

**Análisis de un enlace de comunicaciones ópticas inalámbricas en espacio libre para medir  
tasa de error de bits, calidad y potencia de la señal desde la universitaria Agustiniana hasta  
el colegio Agustiniano Tagaste**

Junior Aldemar Arias Arias

Universitaria Agustiniana  
Facultad de Ingenierías  
Programa de Ingeniería en Telecomunicaciones  
Bogotá D.C  
2020

**Análisis de un enlace de comunicaciones ópticas inalámbricas en espacio libre para medir tasa de error de bits, calidad y potencia de la señal desde la universitaria Agustiniana hasta el colegio Agustiniano Tagaste**

Junior Aldemar Arias Arias

Director

Martha Isabel Villareal López

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero en Telecomunicaciones

Universitaria Agustiniana  
Facultad de Ingenierías  
Programa de Ingeniería en Telecomunicaciones

Bogotá D.C

2020

## **Resumen**

En la actualidad, nuestro país vive en una época donde la tecnología juega un papel fundamental en el desarrollo de distintos ámbitos de la vida cotidiana ya que ahora las personas no solo necesitan tener cobertura ilimitada para llamadas también requieren conexión a internet para acceder a plataformas con múltiples servicios. Sin embargo, los dispositivos y sistemas tecnológicos existentes se están quedando cortos en el acceso de los clientes de distintos operadores de telecomunicaciones a beneficios como películas, series y música los cuales en muchas ocasiones son de buena calidad, así como en la resolución de problemas de tráfico de datos en redes ubicadas en zonas urbanas. Por tanto, con el fin de mejorar estos inconvenientes se plantea este proyecto conociendo las necesidades y defectos de los modelos en vigencia como Ethernet, Wi-Fi y fibra óptica.

Para ello se decide realizar el Análisis de un enlace de comunicaciones ópticas inalámbricas en espacio libre para medir tasa de error de bits, calidad y potencia de la señal desde la universitaria Agustiniense hasta el colegio Agustiniense Tagaste que renueve las topologías de red de área metropolitana que existen hoy en día, para así facilitar el aumento de las conexiones entre redes LAN y WAN, llevando la conexión de los usuarios finales con las operadoras de telecomunicaciones a un nivel de evolución donde no se requieran medios guiados para su enlace entre sí, aumentando el ancho de banda, disminuyendo costos de instalación y operación en las compañías del país.

## Tabla de contenidos

Problemática .....	11
Justificación .....	12
Objetivos.....	13
Objetivo general.....	13
Objetivos específicos .....	13
Marco referencial.....	14
Estado del arte.....	14
Marco teórico .....	16
Comunicaciones ópticas inalámbricas (FSO) .....	16
Fundamentos para la aplicación de sistemas ópticos inalámbricos (FSO) como solución de telecomunicaciones en áreas metropolitanas .....	20
Marco legal .....	22
Metodología de la investigación.....	23
Método .....	23
Presupuesto.....	25
Requerimientos de transmisión y recepción de datos en los sistemas de comunicaciones de ópticas inalámbricas FSO.....	26
Orígenes de las comunicaciones ópticas inalámbricas FSO.....	26
Definiciones y características de las comunicaciones ópticas inalámbricas FSO .....	29
Introducción. ....	29
Fundamentos de las redes ópticas relevantes para las comunicaciones FSO.....	32
Espectro electromagnético y longitud de onda. ....	33
Conectividad FSO en las redes actuales.....	34
Redes ópticas: Integración del sistema FSO. ....	35
Tasas de bit en las comunicaciones ópticas inalámbricas FSO .....	41
Ancho de banda: tasas de transmisión de datos. ....	41
Como se proporcionan las tasas de transmisión de datos en las redes actuales.....	42
Protocolos y operación de los sistemas FSO para transmitir bits. ....	43
Parámetros y dispositivos de operatividad en las comunicaciones ópticas inalámbricas FSO. ....	44

Transmisor.....	45
Receptor. ....	46
Rastreo y adquisición del láser.....	47
Margen de enlace. ....	47
Enlace FSO y su condición de funcionamiento. ....	48
Disponibilidad y fiabilidad de los dispositivos para el sistema FSO. ....	48
Seguridad del sistema FSO. ....	48
Comprobación y modificación de un enlace FSO.....	49
Efectos atmosféricos en las comunicaciones ópticas inalámbricas FSO .....	51
Transmisión mediante el ambiente.....	51
Dispersión. ....	51
Filtración en el ambiente.....	51
Turbulencia. ....	53
Lluvia. ....	54
Nieve. ....	55
Niebla.....	55
Análisis del sistema para el enlace de comunicaciones ópticas inalámbricas FSO bajo diferentes parámetros desde la universitaria Agustiniiana hasta el colegio Agustiniiano Tagaste ..	57
Condiciones climáticas para el funcionamiento de las comunicaciones ópticas inalámbricas FSO.....	57
El clima promedio en Bogotá.....	57
El clima de la localidad de Kennedy.....	63
Código internacional de visibilidad. ....	63
Condiciones geográficas para el funcionamiento de las comunicaciones ópticas inalámbricas FSO.....	64
Fabricantes proveedores de equipos ópticos FSO .....	66
fSONA.....	67
CableFree. ....	68
AIRLINX Communications Inc.....	69
EC SYSTEM.....	71
Análisis económico.....	72

fSONA.....	72
CableFree. ....	72
AIRLINX Communications Inc.....	73
EC SYSTEM.....	74
Simulación y realización de pruebas de validación del diseño propuesto.....	76
Componentes del simulador Optisystem para la creación de sistemas de comunicación FSO .....	76
Escenarios de prueba del sistema de comunicación FSO propuesto .....	78
Primer escenario - fSONA. ....	80
Segundo escenario – CableFree. ....	103
Tercer escenario – AIRLINX Communications Inc. ....	122
Cuarto escenario – EC SYSTEM.....	136
Análisis de resultados. ....	151
Conclusiones y recomendaciones.....	155
Referencias .....	157

## Lista de figuras

Figura 1. Medios de una red de Acceso. ....	19
Figura 3. Modos de transmisión de la red de acceso.....	19
Figura 4. Sistema de comunicaciones ópticas de Polibio.....	26
Figura 5. Descubrimiento FSO por Graham Bell.....	27
Figura 6. Cuello de botella de la red de acceso.....	31
Figura 7. Esquema de la tecnología de comunicación con óptica inalámbrica FSO y una conectividad de usuario diferente.....	31
Figura 8. Sistema básico de comunicación.....	32
Figura 9. Espectro electromagnético y la zona de comunicaciones ópticas inalámbricas FSO.....	33
Figura 10. Tres tipos de arquitectura FSO.....	36
Figura 11. Implementación simplificada de una red FSO.....	37
Figura 12. Topología conceptual de la red óptica de redes integradas ópticas inalámbricas, satelitales, terrestres y domésticas.....	38
Figura 13. Enlaces ópticos en espacio libre conectando un área pequeña.....	40
Figura 14. Operación del sistema FSO.....	44
Figura 15. Arquitectura FSO para la transmisión de datos voz y video.....	44
Figura 16. Esquema de un transceptor FSO.....	45
Figura 17. Láser interceptado en un sistema de comunicación FSO.....	49
Figura 18. Diagrama para la solucionar inconvenientes en un enlace FSO.....	50
Figura 19. Transmisión en longitud de onda en condición de cielo despejado en un contexto urbano con visibilidad de 5 km.....	52
Figura 20. Transmisión en cielo claro considerando la longitud de onda.....	52
Figura 21. Transmisión en un ambiente con dióxido de carbono en función de la longitud de onda.....	53
Figura 22. Secuelas de la cintilación.....	54
Figura 23. Procedimiento de repetición para transmitir datos.....	54
Figura 24. Visión considerando la atenuación en ambiente de niebla.....	56
Figura 25. Temperatura máxima y mínima promedio.....	57
Figura 26. Temperatura media por cada hora.....	58
Figura 27. Categorías de nubosidad.....	59
Figura 28. Probabilidad diaria de precipitación.....	59

Figura 29. Precipitación de lluvia mensual promedio.....	60
Figura 30. Horas de luz natural y crepúsculo.....	60
Figura 31. Salida del sol y puesta del sol con crepúsculo. ....	61
Figura 32. Niveles de comodidad de la humedad .....	61
Figura 33. Velocidad promedio del viento.....	62
Figura 34. Dirección del viento.....	63
Figura 35. Código internacional de visibilidad.....	64
Figura 36. Trayecto entre la Universitaria Agustiniana y el Colegio Agustiniano Tagaste.....	65
Figura 37. Línea de vista y leve perdida indicada entre la universitaria Agustiniana y el Colegio Agustiniano Tagaste.....	66
Figura 38. Equipo óptico del fabricante fSONA.....	67
Figura 39. Equipo óptico CableFree. ....	69
Figura 40. Equipo óptico FlightStrata-G.....	70
Figura 41. Equipo óptico Canobeam DT – 130. ....	70
Figura 42. Equipo óptico EC SYSTEM.....	71
Figura 43. Esquema de transmisión óptica FSO. ....	77
Figura 44. Esquema de recepción óptica FSO. ....	78
Figura 45. Medidores de potencia en el sistema de comunicación FSO propuesto .....	79
Figura 46. Comportamiento del Factor de calidad Q y diagrama de ojo de cada condición meteorológica para el modelo 10G-E+ del fabricante fSONA con potencia de transmisión de 800 mW, 10 cm de diámetro de apertura del receptor y tasa de 10 Gbps.....	83
Figura 47. Comportamiento del Factor de calidad Q y diagrama de ojo de cada condición meteorológica para el modelo 1250-E2 del fabricante fSONA con potencia de transmisión de 320 mW, 10 cm de diámetro de apertura del receptor y tasa de 1.25 Gbps.....	86
Figura 48. Comportamiento del Factor de calidad Q y diagrama de ojo de cada condición meteorológica para el modelo 1250-E2 del fabricante fSONA con potencia de transmisión de 320 mW, 10 cm de diámetro de apertura del receptor y tasa de 622 Mbps .....	89
Figura 49. Comportamiento del Factor de calidad Q y diagrama de ojo de cada condición meteorológica para el modelo 2500-E3 del fabricante fSONA con potencia de transmisión de 320 mW, 10 cm de diámetro de apertura del receptor y tasa de 2.5 Gbps.....	93

Figura 50. Comportamiento del Factor de calidad Q y diagrama de ojo de cada condición meteorológica para el modelo 1250-Z1 del fabricante fSONA con potencia de transmisión de 160 mW, 50 mm de diámetro de apertura del receptor y tasa de 1.25 Gbps. ....	96
Figura 51. Comportamiento del Factor de calidad Q y diagrama de ojo de cada condición meteorológica para el modelo 1250-Z1 del fabricante fSONA con potencia de transmisión de 160 mW, 50 mm de diámetro de apertura del receptor y tasa de 622 Mbps.....	99
Figura 52. Comportamiento del Factor de calidad Q y diagrama de ojo de cada condición meteorológica para el modelo 2500-Z2 del fabricante fSONA con potencia de transmisión de 160 mW, 50 mm de diámetro de apertura del receptor y tasa de 2.5 Gbps .....	103
Figura 53. Comportamiento del Factor de calidad Q y diagrama de ojo de cada condición meteorológica para el modelo G-200 del fabricante CableFree con potencia de transmisión de 30.2 mW, 8 mili-radianes/segundo de divergencia del haz de láser y tasa de 1.5 Gbps.....	107
Figura 54. Comportamiento del Factor de calidad Q y diagrama de ojo de cada condición meteorológica para el modelo G-500 del fabricante CableFree con potencia de transmisión de 30.2 mW, 5 mili-radianes/segundo de divergencia del haz de láser y tasa de 1.5 Gbps.....	111
Figura 55. Comportamiento del Factor de calidad Q y diagrama de ojo de cada condición meteorológica para el modelo G-700/G-1000 del fabricante CableFree con potencia de transmisión de 79.43 mW, 8 mili-radianes/segundo de divergencia del haz de láser y tasa de 1.5 Gbps. ....	114
Figura 56. Comportamiento del Factor de calidad Q y diagrama de ojo de cada condición meteorológica para el modelo G-1500 del fabricante CableFree con potencia de transmisión de 79.43 mW, 5 mili-radianes/segundo de divergencia del haz de láser y tasa de 1.5 Gbps.....	118
Figura 57. Comportamiento del Factor de calidad Q y diagrama de ojo de cada condición meteorológica para el modelo G-2000 del fabricante CableFree con potencia de transmisión de 79.43 mW, 4 mili-radianes/segundo de divergencia del haz de láser y tasa de 1.5 Gbps.....	121
Figura 58. Comportamiento del Factor de calidad Q y diagrama de ojo de cada condición meteorológica para el modelo FlightStrata-G del fabricante AIRLINX Communications Inc. con potencia de transmisión de 2 mW y tasa de 1.25 Gbps.....	125
Figura 59. Comportamiento del Factor de calidad Q y diagrama de ojo de cada condición meteorológica para el modelo FlightStrata-G del fabricante AIRLINX Communications Inc. con potencia de transmisión de 10 mW y tasa de 1.25 Gbps.....	129

Figura 60. Comportamiento del Factor de calidad Q y diagrama de ojo de cada condición meteorológica para el modelo FlightStrata-G del fabricante AIRLINX Communications Inc. con potencia de transmisión de 1000 mW y tasa de 1.25 Gbps..... 132

Figura 61. Comportamiento del Factor de calidad Q y diagrama de ojo de cada condición meteorológica para el modelo Canobeam DT-130 del fabricante AIRLINX Communications Inc. con potencia de transmisión de 11 mW y tasa de 1.25 Gbps. .... 136

Figura 62. Comportamiento del Factor de calidad Q y diagrama de ojo de cada condición meteorológica para el modelo EL-1GS del fabricante EC SYSTEM con potencia de transmisión de 75 mW y tasa de 1 Gbps..... 140

Figura 63. Comportamiento del Factor de calidad Q y diagrama de ojo de cada condición meteorológica para el modelo EL-1GL del fabricante EC SYSTEM con potencia de transmisión de 72 mW y tasa de 1 Gbps..... 143

Figura 64. Comportamiento del Factor de calidad Q y diagrama de ojo de cada condición meteorológica para el modelo EL-10G del fabricante EC SYSTEM con potencia de transmisión de 72 mW y tasa de 10 Gbps..... 147

Figura 65. Comportamiento del Factor de calidad Q y diagrama de ojo de cada condición meteorológica para el modelo EL-30G del fabricante EC SYSTEM con potencia de transmisión de 72 mW y tasa de 30 Gbps..... 150

### **Problemática**

La red de acceso también conocida como última milla ha presentado varios inconvenientes en seguridad, ancho de banda y cobertura, los dispositivos de Ethernet que componen la red se ven expuestos a amenazas eléctricas y de mantenimiento, y ataques informáticos que aumenta la posibilidad de robo de información sobre todo en lugares donde se manipulen muchos datos como lo son las entidades y los sitios universitarios que con frecuencia necesitan de servicios de internet (Mena & Mena Lindao, 2017). Si bien existen los medios guiados para brindar información y hacerla llegar al usuario final, la dificultad radica en la vulnerabilidad física de los mismos que conlleva a la disminución de la velocidad de transmisión y la necesidad constante de cables para la recepción de datos de los dispositivos inalámbricos como la fibra óptica lo que significa un alto costo de operación mensual para las compañías de telecomunicaciones (Garreton, 2005).

En la actualidad, la cobertura de conexiones Ethernet y Wi-Fi siguen sin renovación, la red más extensa sigue siendo el cableado telefónico al lado de tecnologías como HFC, 4G, ADSL y opciones minoritarias como WiMAX y la vía satelital que resuelven de cierta forma los percances de los clientes, pero el resultante es el poco ancho de banda de dichos medios de comunicación (Santos González, 2012). El estado de red existente en la universitaria Agustiniiana y en el colegio Agustiniiano Tagaste presenta dificultades para generar una adecuada conectividad provocando que haya deficiencia en la emisión de grandes cantidades de datos de forma bidireccional debido a que no comparten un medio o canal de comunicación. Para facilitar la interacción de información entre las sedes es requerida una alta inversión económica en redes tecnológicas existentes que, aunque solucionan el problema de conexión son muy costosas y no ofrecen una total capacidad para transportar datos con calidad.

## **Justificación**

Con el desarrollo de tecnologías que aumentan el tráfico de datos se requieren canales con un mayor ancho de banda para obtener un buen funcionamiento. Dichos canales están ubicados en las bandas libres del espectro radioeléctrico en donde se utilizan varias comunicaciones para una cantidad determinada de servicios lo que produce deficiencia en los mismos y saturación en las bandas usadas.

Por otro lado, las conexiones físicas para el acceso a internet se han convertido en un problema de diseño y costos para las empresas que reciben y proporcionan los servicios de telecomunicaciones debido a que los elementos y dispositivos de la red suelen ocupar grandes espacios físicos dentro y fuera de los establecimientos lo que conlleva a que no exista orden y seguridad en estos sistemas haciéndolos en ocasiones vulnerables a ataques externos provocados por el hombre. Con la intención de mejorar estos inconvenientes se hace necesario explorar como una posible solución las comunicaciones ópticas inalámbricas en espacio libre, dado que este tipo de tecnología no emplea frecuencias del espectro radioeléctrico por lo que no necesita de licencias como los demás sistemas para cumplir su operación, además, es de fácil diseño e instalación de modo que permite mejorar redes robustas y hacerlas menos vulnerables de ataques físicos y lógicos. Por consiguiente, la temática se hace importante por el hecho de ser algo novedoso como objeto de estudio, donde a medida que se vaya profundizando en el tema se le puede ir encontrando puntos de mejora con el propósito de que esta tecnología poco conocida sea confiable y hacer de ella un buen complemento de tecnologías existentes como la fibra óptica generando renovación en la misma reduciendo su alto costo de instalación.

Es por todo lo anterior que se hace necesario estudiar este tipo de tecnología para indagar y analizar todos los conceptos vistos en la formación en telecomunicaciones examinando nuevas ideas que contribuyan al crecimiento profesional y así obtener mayor capacidad y conocimiento para el futuro desempeño laboral como ingeniero.

## Objetivos

### Objetivo general

Analizar un enlace de comunicaciones ópticas inalámbricas en espacio libre para medir tasa de error de bits, calidad y potencia de la señal desde la universitaria Agustiniiana hasta el colegio Agustiniiano Tagaste.

### Objetivos específicos

- Definir los requerimientos de transmisión y recepción de datos en los sistemas de comunicaciones ópticas inalámbricas FSO desde la universitaria Agustiniiana hasta el colegio Agustiniiano Tagaste.
- Analizar el sistema del enlace de comunicaciones ópticas inalámbricas FSO bajo diferentes parámetros desde la universitaria Agustiniiana hasta el colegio Agustiniiano Tagaste.
- Simular y realizar pruebas de validación del diseño propuesto.

## **Marco referencial**

### **Estado del arte**

El siguiente proyecto consiste en el diseño de una red con tecnología láser FSO para el campus de la Escuela Politécnica Nacional y su comparación con la red de fibra óptica con el fin de mostrar la efectividad de los sistemas FSO y su alcance operativo. Para ello, hizo una conceptualización sobre la tecnología óptica en espacio libre y sus diferentes impactos. Luego, detalla las condiciones actuales de la red de fibra óptica que está en el sitio y el tráfico de datos que maneja, así mismo, ejecuto un estudio del lugar de instalación revisando que haya espacio y línea de vista para montar los equipos. Verificando el clima realizo cálculos rápidos para obtener los rangos de distancia para el funcionamiento de los enlaces. Enseguida, esquematiza los edificios con sus distancias para asignar los equipos ópticos adecuados de acuerdo con los requerimientos de los usuarios y datos del fabricante. Por último, efectúa el análisis comparativo entre las dos tecnologías para hallar su costo – beneficio. Al final, la tecnología óptica inalámbrica FSO mostro en muchos aspectos mayor confiabilidad (Caizaluisa Caizaluisa, 2008).

El proyecto tiene el propósito de crear una red de acceso con sistemas ópticos de espacio libre solucionar el déficit de servicios banda ancha de los usuarios del municipio Ciego de Ávila de Cuba y ayudar a la empresa de telecomunicaciones ETECSA. El trabajo explica las tecnologías existentes y el sistema FSO con sus aplicaciones, virtudes y falencias exponiendo la propuesta de diseño donde analiza las técnicas usadas para el transporte de datos y las distancias entre edificios. En el desarrollo del diseño de la red óptica inalámbrica considero los factores climáticos, la atenuación, la conexión para cada entidad y los cálculos para la potencia transmitida, el margen y la distancia del enlace. Enseguida, fundamento los factores de potencia y divergencia de luz en la transmisión, y en la sensibilidad y las pérdidas ópticas durante la recepción. Después especifica las condiciones de operación en longitud de onda, tasa de error de bit y transferencia, y selección del terminal óptico basado en proveedores tecnológicos realizando el análisis comparativo costo – beneficio entre el sistema FSO y la fibra óptica. Por último, efectúa la simulación de la red FSO configurando parámetros de frecuencia, potencia, atenuación y tasa de transferencia de bits midiendo la potencia de salida y la señal de poder en el transmisor, y la potencia de entrada en el receptor ejecutando pruebas de validación de la señal y las pérdidas ópticas comprobando que existe 99.99% de disponibilidad de servicio en cada sede mostrando la

efectividad del software al ofrecer un completo análisis de las comunicaciones ópticas inalámbricas en espacio libre (Castillo Prades, 2012).

Con el fin de evaluar bajo diferentes parámetros el rendimiento del sistema FSO, el proyecto se basa en el diseño y simulación de sistemas de comunicación óptica FSO usando múltiples transmisores y receptores a través Optisystem. El trabajo consiste en conceptualizar los aspectos de la tecnología FSO profundizando en el proceso para escoger la longitud de onda y la topología adecuada analizando los efectos atmosféricos. Previo a la simulación, explica índices como la tasa de error de bit (BER), factor de calidad y el diagrama de ojo que sirve para diagnosticar el desempeño de la red. Luego, diseña el sistema FSO configurando 1, 4, 7 y 10 transmisores/receptores respectivamente, con distancias de 1, 5, 10, 30 y 50 km y atenuaciones de 0.43, 4.3 y 43 dB/km ajustando en cada configuración longitudes de onda de 850, 1350 y 1550 nm. Enseguida, concluyo que para largas distancias se requieren más equipos con longitudes menores a 1350 nm, mientras que la longitud de 1550 nm es más útil en distancias cortas para mantener en niveles óptimos la tasa de error de bit y el factor de calidad. (Giler León , 2019).

Con el fin mejorar el desempeño del Backbone actual de la ESPE Campus Sangolquí, realizan un estudio de factibilidad y simulación de una red óptica inalámbrica basada en tecnología FSO conceptualizando los medios de comunicación guiados y no guiados que existen. En los sistemas FSO profundizaron los fundamentos, divergencia de haz, tipos de láser, modulación, topologías y aplicaciones. Luego, examinaron la estructura y el rendimiento en tráfico de datos en cada sede del Backbone actual para realizar el estudio de factibilidad mediante encuestas sobre él indicadores de red como velocidad, disponibilidad, factibilidad, internet y calidad de servicio mostrando insatisfacción en los usuarios y la necesidad de implementar como alternativa una nueva red, la cual es diseñada en sedes con distancias largas. El análisis económico indico que el sistema FSO es más caro, pero con mejores aspectos que el sistema de fibra óptica, en la instalación hacen la elección de los equipos ópticos considerando los obstáculos para línea de vista y las vibraciones generadas por otros equipos. La simulación para ambos enlaces define una tasa de bits de 1,25 Gbps con distancias de 340 m y 380 m, ambos con frecuencia de 860 nm y atenuación de 140 mW, con cálculos y medidores obtiene el ruido, la potencia de la señal, disponibilidad y ganancia del enlace. Con más transmisores y receptores funcionando como repetidores la señal genera 99.99% de disponibilidad del servicio y credibilidad en el software Optisystem. (León Apolo & Vaca Ron, 2008).

Con el fin de mejorar los servicios en calidad, disponibilidad, velocidad de transmisión e información que ofrecen la fibra óptica y la radiofrecuencia, el proyecto propone las comunicaciones ópticas en espacio libre para validar su efectividad y dar respaldo a las tecnologías vigentes. La conceptualización desenvuelve los inicios, fundamentos, parámetros aspectos de desempeño, factores atmosféricos y aplicaciones de la tecnología FSO. Consideran especificaciones como la disposición y alineación de línea de vista, la instalación y montaje de equipos y cableado, así como la elección del terminal óptico, la longitud de onda y potencia de transmisión detallando cálculos y descripciones considerados para la sensibilidad, divergencia del haz, pérdidas ópticas, atenuación y margen de enlace para la recepción en el sistema FSO. Para diseñar y simular la red evaluó la situación actual de los enlaces, la línea de vista y la distancia entre sedes y los equipos elegidos, con datos del proveedor y cálculos realizados configuro los parámetros en el simulador para hacer pruebas de validación verificando buena calidad de señal en la atenuación más alta que tiene el sitio. En lo económico la tecnología óptica inalámbrica es más barata que la instalación de fibra en las sedes hallando viabilidad de ejecución (Padrón Solanelles, 2013).

## **Marco teórico**

### **Comunicaciones ópticas inalámbricas (FSO)**

El sistema de transmisión óptico de espacio libre (FSO) es una conexión que se realiza para interconectar dos puntos que están en una línea de visión directa y sin obstrucciones. El sistema toma una señal de telecomunicaciones, la convierte en un formato digital y la transmite a través del espacio libre. La portadora usada para la transmisión de la señal es infrarroja que se genera por medio de leds de alta potencia, la simulación de este evento es parecida a la forma de interconexión de dos puntos por medios guiados como la fibra óptica

Estos sistemas de transmisión de comunicación óptica operan bajo la misma longitud de onda de la fibra óptica en el espectro electromagnético, el cual está entre 750 nm hasta 1550 nm.

Las características generales de los sistemas FSO son:

- Alcance desde 300 metros hasta 4 kilómetros y dependiendo de la visibilidad se debe hacer un estudio de la parte que compete a la línea de vista, aclarando que dicho sistema es vulnerable a la niebla.
- Es de modo portátil ya que se puede operar detrás de ventanas.
- Seguro para la vista humana y para las interferencias virtuales.

- Suficiencia ilimitada.
- Es un método multiprotocolo.

Las aplicaciones de los sistemas FSO son:

- Interconexión de redes de área local (LAN).
- Transmisión de voz y video en IP.
- Redes de modo de transferencia asíncrona (ATM).
- Redes de acceso local.
- Conexión temporal en situaciones de emergencia.

Las ventajas de los sistemas FSO son:

- Canales con alta velocidad.
- Mayores tasas de transmisión.
- Facilidad de instalar.
- No necesita de una licencia de operación.
- Difícil de interceptar.
- Es compatible con el cobre y la fibra en interfaces.
- No necesita de routers o puentes.
- Sistema portable.
- Gran disponibilidad.
- Resistente a diferentes temperaturas y cambios de clima.
- Latencia aproximada a cero en cualquier distancia.

***Desventajas de los sistemas FSO.*** La desventaja más importante es la fragilidad que evidencia ante los efectos atmosféricos como la dispersión lo cual disminuye la disponibilidad de estos sistemas y provoca exceso de errores. Por otro lado, un pequeño ancho del haz laser dificulta el apuntamiento direccional de inicio entre el transmisor y el receptor y por ende el mantenimiento del mismo.

**Limitaciones los sistemas FSO.** Los medios FSO están dispuestos a eventos externos ya que, a diferencia de la fibra óptica, este no es un medio cerrado por lo que cualquier cambio atmosférico imprevisto afecta el desempeño del sistema. FSO es una tecnología de línea visual análoga a los sistemas de radio basados en ondas milimétricas:

Los aspectos que condicionan el rendimiento de los sistemas de transmisión de óptica en espacio libre (FSO) son:

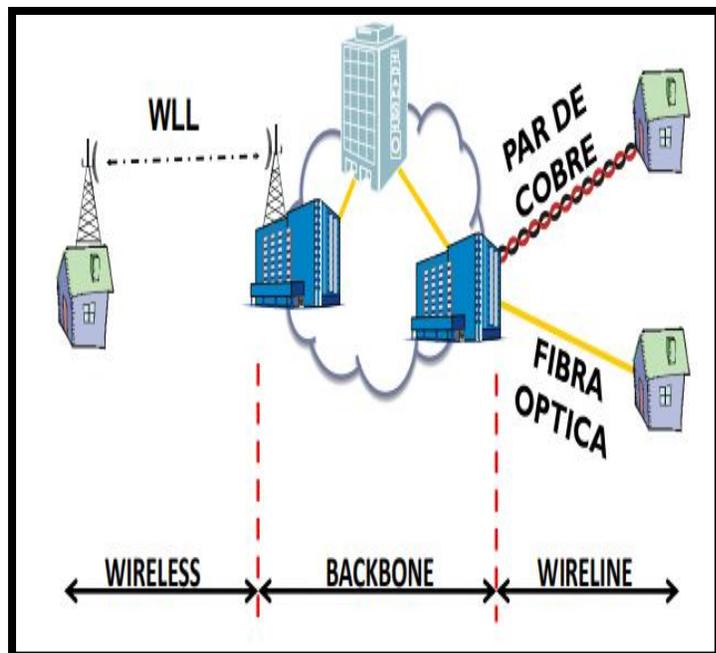
- Condiciones climáticas.
- Obstáculos físicos.
- Centelleo atmosférico.
- Limpieza de los dispositivos de transmisión y recepción óptica.
- Oscilación de edificios.
- Seguridad. (Rivamar , 29).

**Red de acceso última milla.** La red de acceso también conocida como la última milla ocupa la mayor parte de la malla mundial de comunicaciones que une dos puntos primordiales para su comunicación como son el operador proveedor de servicios y el cliente por medio de la interconexión de distintos equipos, la última milla como tal es el último tramo de la red de comunicaciones y el cual facilita la transmisión de datos para el usuario final. El proveedor de servicios se le conoce como “central Office” en esta parte se encuentran todos los equipos que permiten realizar el enlace de la red de acceso con enormes redes de comunicación de datos y servicios, es decir, todo lo que comprende la red de área metropolitana MAN y la red troncal Backbone.

La red de área metropolitana MAN es la red de servidores que a través de conexiones de alta velocidad ofrece cobertura en ciudades y municipios.

La red de transporte también conocida como troncal o Backbone es la gran red que proporciona interconexión entre enormes ciudades países y continentes. La mayor parte de estas redes se basan en fibra óptica por su capacidad de conexión y su ancho de banda.

Sus medios de acceso se denotan a continuación:

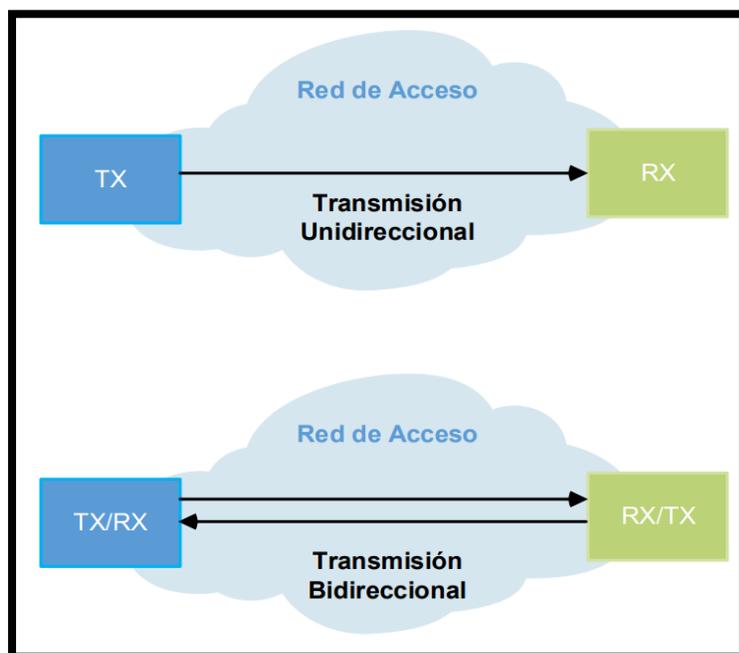


**Figura 1.** Medios de una red de Acceso Lopez, (2015, pág. 7)

*Wireless.* Bucle local inalámbrico, es utilizada para proporcionar servicios a pueblos lejanos y zonas rurales cuando es imposible realizar por medios guiados.

*Wireline.* Transmisión por medios guiados, es decir, por cable coaxial o fibra óptica.

Sus modos de transmisión se evidencian a continuación:



**Figura 2.** Modos de transmisión de la red de acceso. Lopez, (2015, pág. 10)

*Transmisión Unidireccional.* Este modo de transmisión va en un solo sentido, del transmisor (TX) al receptor (RX) y es usado en comunicación Broadcast en servicios de TV y radio.

*Transmisión Bidireccional.* Este modo de transmisión es ideal para las redes de acceso última milla ya que comprende servicios interactivos como transmisión de datos y las tecnologías adecuadas son ADSL y FTTX. (FTTH, 2015/07/15)

### **Fundamentos para la aplicación de sistemas ópticos inalámbricos (FSO) como solución de telecomunicaciones en áreas metropolitanas.**

El sistema de transmisión FSO, es una tecnología óptica inalámbrica de espacio libre que tiene por característica principal que funciona con línea de vista donde datos voz y video son enviados por un haz de luz infrarrojo y laser con velocidades de hasta 2,5 Gigabits por segundo (Gbps).

FSO se puede trabajar en distintos protocolos como Ethernet que es el estándar para redes de área local, también pueden ejecutar Fast Ethernet Sonet, ATM, FDDI. FSO maneja una conexión entre dos puntos que son un transceptor que se comporta como transmisor y receptor laser con capacidades bidireccionales, cada unidad está compuesta de una fuente óptica de alta potencia sumado a un lente que transmite luz a través de la atmosfera a otros lentes que reciben la información que va llegando.

Las aplicaciones que se mencionaran a continuación en su gran mayoría resuelven temas de sistemas existentes que han carecido de fortalezas para solucionar problemas recurrentes en última milla:

- En la conectividad con las redes de área local inalámbricas (WLAN) que se ejecutan bajo el estándar IEEE 802.11. la conexión de este tipo de redes con las redes de retorno Backhaul y la interconexión en sitios remotos implica es el reto más grande que hay sobre todo en la cuestión económica.
- La solución está en la tecnología FSO realizando ajustes como la delimitación de la línea de vista y la distancia y rápidamente comienza la operación del sistema por consiguiente la conexión de nuevas redes.
- FSO al ser un sistema dúctil se puede desarrollar en ámbitos empresariales incluyendo la conectividad LAN a LAN, en redes de almacenamiento y funcionalidad en modo punto a punto, multipunto o en mallas.

- Se utiliza como red redundante en reemplazo a las redes de fibra óptica que suelen ser muy costosas, de esta manera se consigue extender las redes MAN para conectar edificios cercanos y conectar organismos financieros.
- Otra aplicación es los enlaces entre redes WLAN permitiendo soluciones inalámbricas a diferentes extensiones de red. Para sitios que manejan temas de salud en donde se presentan situaciones de muchos sitios dentro del centro médico que deben salvarse dando a FSO como una tecnología ideal para la resolución de problemas.

Para aplicar esta tecnología se deben tener en cuenta cinco fases para la ejecución de un buen modelo y que se mostraran a continuación:

- Determinar las distancias lineales entre los puntos que se van a interconectar. Esto se considera importante ya que FSO es una tecnología de distancias cortas y que transmite luz en espacios libres evitando costos en la compra de más equipos que funcionen como repetidores maximizando el espacio de ejecución en cada punto de transmisión y recepción.
- Examinar si realmente existe línea de vista y tener en cuenta las condiciones meteorológicas, ya que los obstáculos no permiten enlazar puntos por lo cual no existiría la comunicación, en cuanto lo meteorológico se debe considerar por temas de potencia y así evaluar los equipos adecuados para ciertos lugares.
- Delimitar la tasa de bits para la colocación de equipos adecuados, por tanto, habrá que medir la cantidad de información que se quiere comunicar.
- Una vez solucionados los pasos anteriores se realiza el diseño del enlace de comunicación donde se debe incluir la interconexión de los equipos de recepción de datos. La ubicación de los sistemas FSO y alguna consideración técnica que se deba tener en cuenta.
- Implementar el sistema teniendo en cuenta las normas de la localización donde se vaya a instalar.

Con esta investigación se quiere por supuesto solucionar el tema de última milla y además reducir costos de instalación así mismo en el mantenimiento de equipos y por último lograr escalabilidad tecnológica punto clave para el desarrollo sostenible de sistemas de comunicación. (Chacín, Julio - Diciembre, 2004).

**Marco legal**

Para la realización del proyecto se debe tener en cuenta la recomendación UIT-R P.530-12 que trata la propagación de las ondas radioeléctricas para enlaces punto a punto con línea de vista directa, en la parte tres del manual de recomendaciones se detalla la información sobre la planificación y diseño de enlaces ópticos (FSO). Entre los parámetros de referencia están las consideraciones iniciales para el diseño del enlace, las condiciones meteorológicas y del trayecto, y métodos de cálculo para la atenuación geométrica y atmosférica, la dispersión los efectos de centelleo por el haz de láser, entre otros. (Arbesser-Rastburg, 2008).

También se requiere tener en cuenta la recomendación UIT-R P.1817-1 que muestra los datos de propagación necesarios para el diseño enlaces ópticos terrenales en el espacio libre, comenzando se describen las condiciones atmosféricas y climáticas que afectan la comunicación, la atenuación y como es distribuida bajo condiciones de nieve o de lluvia, el comportamiento de la tecnología FSO en sistemas híbridos, métodos de cálculo para hacer las respectivas mediciones de visibilidad y por último, recomendaciones sobre diferentes programas que utiliza el coeficiente de transmisión atmosférica para analizar los datos de los factores atmosféricos. (ITU Union Internacional de Telecomunicaciones , 2012)

### Metodología de la investigación

El enfoque cuantitativo es una sucesión de pasos los cuales no se pueden saltar ni eludir, se requiere de un orden específico para la consecución de los elementos necesarios que contribuyan a solucionar las preguntas que se generen durante la investigación. De los interrogantes se fundamentan hipótesis y se fijan variables para la elaboración del diseño o estudio probatorio, de ser obligatorio se usan métodos estadísticos para analizar los datos que se recogen y al final se dan las conclusiones y recomendaciones pertinentes. En resumen, con todas estas fases lo que se busca es tratar de explicar todos los procesos que serán ejecutados. (Hernandez Sampieri , Fernandez Collado , & Baptista Lucio, 2013).

Este tipo de investigación es el ideal para este trabajo de grado porque permite cuantificar la cantidad de datos y conceptos que se van a indagar, obteniendo un mayor análisis del tema. Para el proyecto, se van a realizar varias consultas sobre distintos temas de la tecnología FSO usando diferentes materiales bibliográficos. Además, por medio de software, se determinarán los factores y las condiciones necesarias para la transmisión de datos lo que a su vez llevara al análisis de costos para la implementación del enlace con el propósito de hallar resultados concretos que permitan medir su alcance y viabilidad final.

#### Método

OBJETIVOS	ACTIVIDADES
Definir los requerimientos de transmisión y recepción de datos en los sistemas de comunicaciones ópticas inalámbricas FSO desde la universitaria Agustiniiana hasta el colegio Agustiniiano Tagaste.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Investigar los orígenes de las comunicaciones ópticas inalámbricas FSO.</li> <li>✓ Consultar las definiciones y características de las comunicaciones ópticas inalámbricas FSO.</li> <li>✓ Identificar las tasas de bit y la operatividad de las comunicaciones ópticas inalámbricas FSO.</li> <li>✓ Establecer y describir los dispositivos para transmisión y recepción de las comunicaciones FSO.</li> <li>✓ Describir los factores atmosféricos que ocasionan pérdidas en las comunicaciones ópticas inalámbricas FSO.</li> </ul>

<p>Analizar el sistema del enlace de comunicaciones ópticas inalámbricas FSO bajo diferentes parámetros desde la universitaria Agustiniiana hasta el colegio Agustiniiano Tagaste.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Indicar las condiciones climáticas y geográficas para el funcionamiento de comunicaciones ópticas inalámbricas FSO.</li> <li>✓ Identificar las empresas que proveen equipos ópticos para las comunicaciones ópticas inalámbricas en espacio libre.</li> <li>✓ Desarrollar una tabla comparativa sobre los parámetros y especificaciones del fabricante.</li> <li>✓ Realizar el análisis económico para implementación del enlace FSO entre la universitaria Agustiniiana y el colegio Agustiniiano Tagaste.</li> </ul>
<p>Simular y realizar pruebas de validación del diseño propuesto.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Analizar los componentes del simulador Optisystem necesarios para la creación de un sistema de comunicación FSO.</li> <li>✓ Establecer y configurar escenarios de prueba en la simulación propuesta del sistema de comunicación FSO.</li> <li>✓ Examinar y validar los resultados del sistema FSO en tasa de error de bit (BER), factor de calidad y el comportamiento de la señal utilizada en la transmisión digital.</li> </ul>

## Presupuesto

A continuación, se mostrarán tablas con todo lo que se requiere para la ejecución del proyecto de grado, el valor de cada elemento necesario para el trabajo se da en pesos colombianos para una mejor interpretación.

Tabla 1.

### *Presupuesto recursos humanos*

<b>PERFIL</b>	<b>JUSTIFICACION</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>VALOR</b>	<b>TIEMPO</b>
Estudiante de ingeniería en telecomunicaciones	Persona encargada del desarrollo del proyecto	1	\$7,022,424	4 meses

*Nota.* El valor designado fue previamente acordado con el profesor encargado del curso y la tutora asignada para el proyecto de grado (fuente propia).

Tabla 2.

### *Presupuesto hardware y software*

<b>EQUIPO</b>	<b>JUSTIFICACION</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>VALOR</b>
Computador	Necesarios para las consultas y redacciones	1	\$3,000,000
Programa XIRIO	Observación de línea de vista	1	\$11,542,800

*Nota.* Los costos para cada recurso a utilizar fueron consultados con el tutor (fuente propia).

Tabla 3.

### *Presupuesto total*

<b>ITEM</b>	<b>VALOR</b>
Recursos humanos	\$7,022,424
Hardware y software	\$14,542,800
Total	\$21,565,224

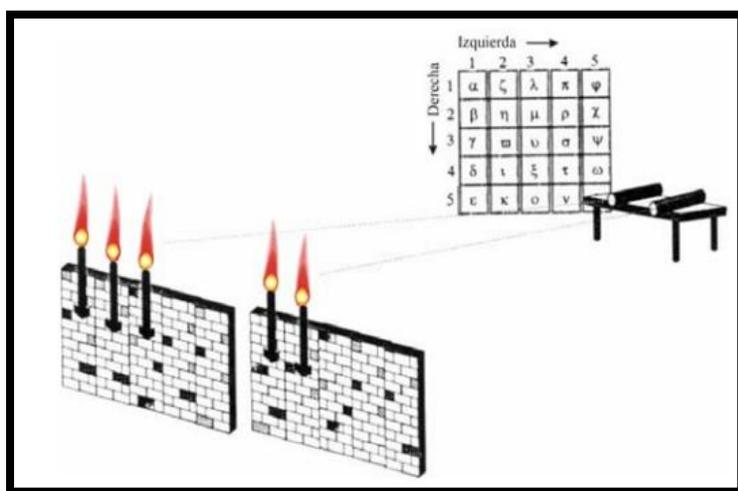
*Nota.* En esta sección se observa el resumen de los recursos necesarios para la ejecución del proyecto de grado (fuente propia).

## Requerimientos de transmisión y recepción de datos en los sistemas de comunicaciones de ópticas inalámbricas FSO

### Orígenes de las comunicaciones ópticas inalámbricas FSO

Para explicar los orígenes se toman referencias de libros y anexos relacionados con las comunicaciones ópticas los cuales, han sido verificados y reflejan validez debido a que son documentados por expertos en la temática y por personas que han evidenciado vivencias en este campo. A continuación, se demostrará el avance del medio de comunicación y la explicación detallada de los sucesos que marcaron un hito en la historia de las comunicaciones tratados en forma cronológica.

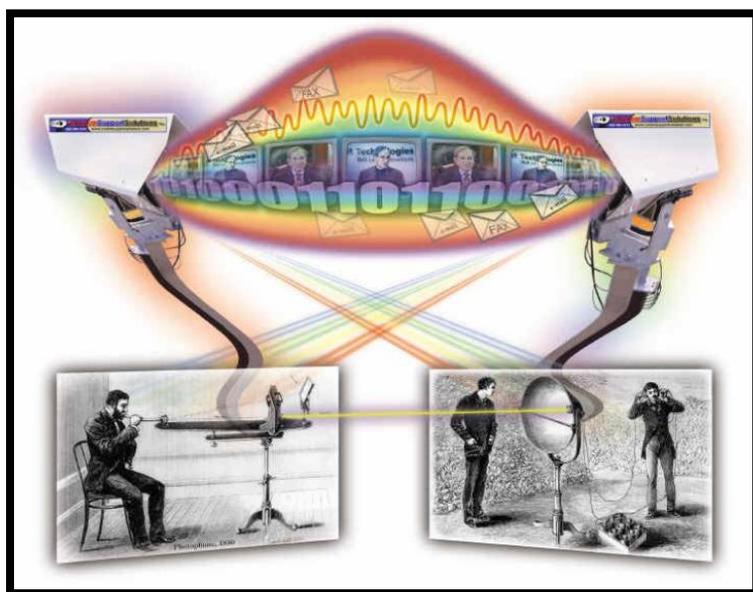
Los comienzos de las comunicaciones ópticas inalámbricas coinciden con el origen de las comunicaciones ópticas mismas. Desde la prehistoria, el ser humano ha utilizado señales ópticas para comunicarse, esta comunicación consistía en muy poca información la cual tenía corto alcance. Las comunicaciones ópticas no guiadas tienen tres milenios de historia, su uso fue verificado hacia el 800 A.C. con señales ópticas creadas con fuego para transmitir información formada por un máximo número de mensajes conocidos por el emisor y el receptor. En el 200 A.C. el historiador griego Polibio desarrolló para transmitir letras en vez de mensajes fijos, su manera de funcionar se basa en una tabla de códigos como la que se ilustra en la figura 3. La idea de Polibio se basaba en un número de antorchas que hubiera encendidas a la derecha y a la izquierda, se escogía una letra señalada. Con operadores entrenados conseguían una comunicación de ocho letras por minuto.



**Figura 3.** Sistema de comunicaciones ópticas de Polibio. Jurgen & Virander (2002, págs. 1-3)

El progreso de las comunicaciones ópticas prácticamente se detuvo hasta el siglo XVII. En 1791 se dio el invento del primer telégrafo el cual, fue de tipo óptico y no eléctrico por parte de Claude Chappe. Se basaba en un mástil fijo que soportaba dos piezas móviles con las que se podían adaptar una gran cantidad de configuraciones diferentes. Dicha disposición era observada mediante un telescopio por un operador situado en otra estación haciendo de repetidora a la siguiente estación. Dicho sistema propicio la creación de una red de comunicaciones ópticas en Francia que en 1844 alcanzo una cobertura de 5000 km con más de 500 estaciones. Aunque este modelo tuvo éxito durante la época, el descubrimiento de la electricidad y el telégrafo eléctrico acabo con todo (Jurgen & Virander, 2002).

En el siglo XIX a través del científico Graham Bell el cual, antes de establecer las bases de la telefonía, logro la trasmisión de señales de voz a través del aire por un haz de luz hasta una distancia de 180 metros, este dispositivo experimental fue llamado fotófono. Si bien este descubrimiento de Bell nunca se pudo expresar en un producto para su venta o comercialización, puso las bases de las comunicaciones ópticas vistas en la actualidad.



**Figura 4.** Descubrimiento FSO por Graham Bell. Pascual & Cenicerros (2007, pág. 1).

Durante los últimos 40 años, las investigaciones en la temática de las FSO han sido enfocadas en aplicaciones militares y espaciales. Una de las tantas pruebas realizadas se hizo en las comunicaciones por láser la cual consistió en transmitir mensajes en código Morse colocando la mano de cualquier persona para que obstruyera el rayo convirtiéndose en receptor de la comunicación (Pascual Domeño & Cenicerros Medrano, 2007).

En 1916 Albert Einstein presentó su teoría sobre la emisión estimulada de la radiación electromagnética. Hasta ese momento se creía que un fotón solo podía interactuar con un átomo de dos formas: la primera es que podía absorberse elevando el átomo a un nivel alto nivel de energía, y la segunda que podía emitirse de forma que el átomo pasara a un nivel bajo. Einstein dio una tercera opción: que un fotón con energía correspondiente al valor de una transición entre niveles podía estimular que un átomo pasara a un nivel energético bajo emitiendo otro fotón parecido a la primera opción. Esta investigación sirvió como base para el desarrollo del láser, aunque tuvieron que pasar más de 40 años hasta que el primer láser de gas fuera construido y dos años después, se construyó el primer laser de semiconductor. Sin embargo, en ese momento no existía una fibra con baja pérdida. En cuanto a comunicación tropical se realizó la primera prueba experimental en 1967 y la segunda en 1974 utilizando láseres de gas y un medio de espacio libre, pero en ese momento el rango de transmisión pequeño condicionó el interés en estos sistemas. En 1970, las fibras ópticas llegaron al mundo de la tecnología y la comunicación evidenciando una atenuación cercana a los 20 dB por kilómetro y la vida útil del láser cercano a las mil horas. En 1980 retoman las pruebas sobre comunicaciones ópticas y diodos láser semiconductores, dos años después mejoraron la producción y fabricación de fibras las cuales se produjeron con una atenuación de 0.2 dB por kilómetro. A partir de acá, la época de las comunicaciones ópticas había comenzado (Jurgen & Virander, 2002).

En el campo de la comunicación óptica atmosférica, en 1965 se creó la primera línea en Moscú. Se trata de una línea telefónica con un tamaño de 5 km la cual, fue instalada entre el edificio de la Universidad Estatal de Lomonósov de Moscú, en las montañas de Lenin y la plaza de Zúbovskaya. Posteriormente, en la URSS construyeron más líneas de comunicaciones ópticas atmosféricas y después de una serie de ensayos exitosos la tecnología no fue considerada. Los primeros sistemas de láser no tuvieron éxito debido a la menor vibración que producía el paso de vehículos de carga cerca de los edificios donde eran colocados, también por vientos que desviaban la trayectoria del haz.

En 1990, retornan a la concepción de las comunicaciones ópticas no guiadas en espacio terrestre, el surgimiento de sistemas de auto tracking solventó el problema. Gracias al uso de un sistema con elementos modernos permitió durante el siglo XXI crear líneas de comunicaciones ópticas atmosféricas las cuales ofrecían alta eficacia durante su operación, la nueva tecnología recibió un nuevo nombre Free Space Optics (FSO) (KRET, 2014).

## **Definiciones y características de las comunicaciones ópticas inalámbricas FSO**

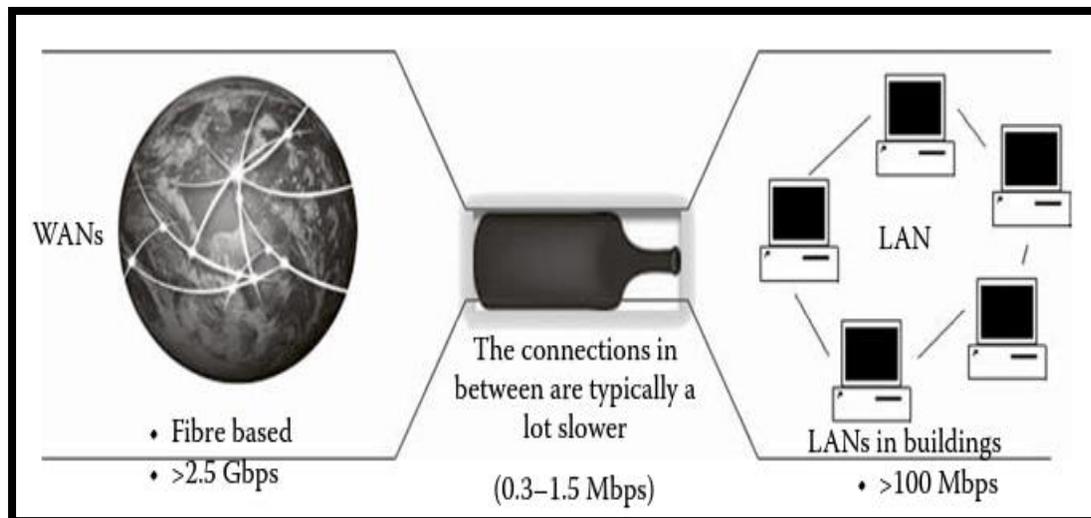
### **Introducción.**

Durante el último tiempo, existe la necesidad de incluir la óptica de espacio libre dentro del conjunto de soluciones que existen para cubrir la necesidad de ancho de banda en la actualidad. Las comunicaciones FSO sirven para solucionar la conectividad de banda ancha y como complemento de los enlaces típicos de radiofrecuencia. El reto de mejorar su rendimiento ha sido continuo al punto de seguir incrementando la tasa de datos suministrada por los enlaces en las aplicaciones de largo y corto alcance. FSO sin duda será un mecanismo con éxito que resolverá el cuello de botella en las redes de acceso LAN ilustrado en la figura 6, este inconveniente se presenta en la capacidad de transmisión de aplicaciones como videoconferencias, contenidos multimedia y los dispositivos habilitados en las redes de alta velocidad en esta última década, gracias a la aceptación que tiene internet en el mundo. En estos momentos los enlaces de largas distancias es una investigación activa, uno de los problemas que enfrenta este tipo de comunicaciones es el centelleo causado por la turbulencia atmosférica que conlleva a la desviación del haz de láser, para mejorar el rendimiento de los enlaces de largo alcance se tienen que realizar corrección de errores en avance y códigos de corrección a nivel de paquete, a su vez las implementaciones de los transceptores y los esquemas de modulación eficientes también sirven como mejora para un enlace. Los diferentes escenarios de los enlaces FSO necesitan satisfacer varios requisitos del sistema que poseen diferentes características de los canales de propagación con distintos métodos de transmisión y técnicas de detección. El uso de las comunicaciones FSO en interiores llama la atención como alternativa que no interfiere con la radiofrecuencia, el concepto de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO) abren nuevas opciones para enlaces en diferentes condiciones atmosféricas. Por eso durante esta parte, estudia los fundamentos y los aspectos del sistema de comunicaciones FSO.

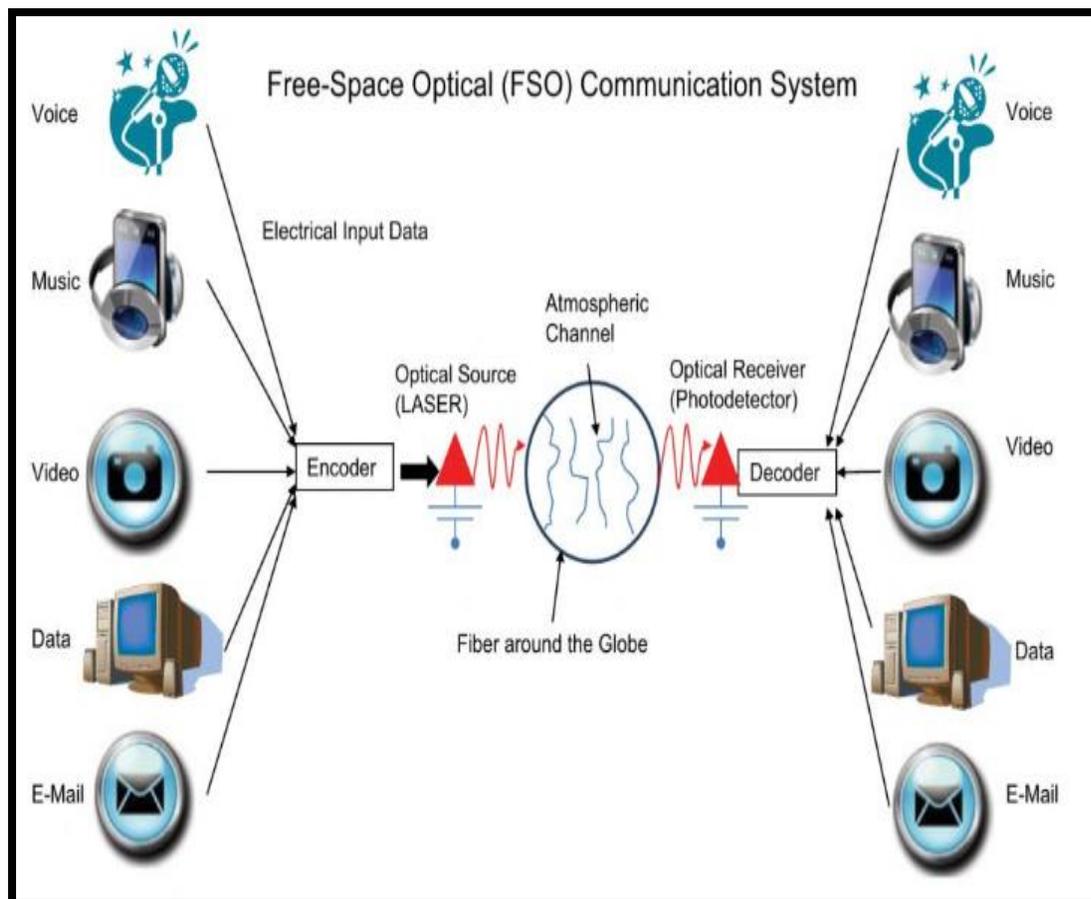
Los sistemas de comunicación se encargan de transmitir información de una fuente a un usuario. La ventaja más importante en las comunicaciones FSO tanto analógicos como digitales es el inmenso ancho de banda que está en las frecuencias ópticas. Una longitud de onda de  $1 \mu\text{m}$  son  $3 \times 10^{14} \text{ Hz} = 300.000 \text{ GHz}$ , un solo canal de  $16 \text{ GHz}$  equivale tan solo a  $3.3 \times 10^{-6} \mu\text{m}$  de longitud de onda de propagación.

Existen dos tipos de sistemas de comunicación. El sistema de comunicación digital transfiere información de una fuente digital generando un conjunto limitado de mensajes al usuario,

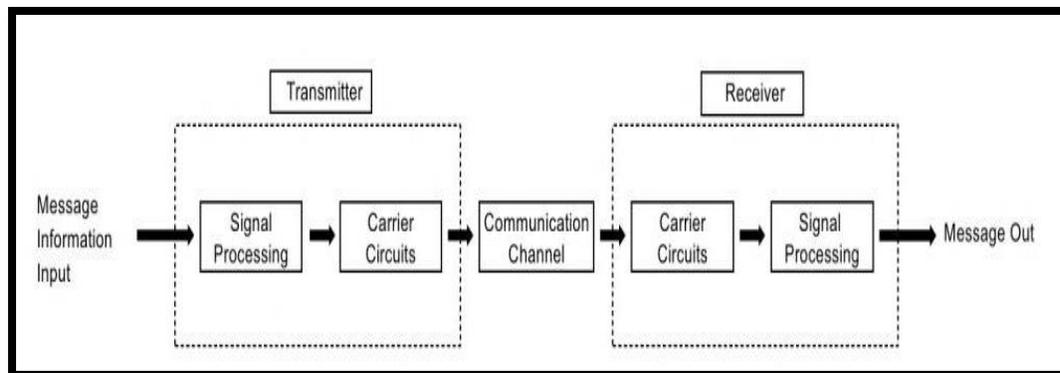
mientras que un sistema de comunicación analógico transmite de una fuente digital mensajes de forma continua a un usuario. La imagen de la figura 7 muestra un sistema único punto a punto, en cambio un sistema multiplexado puede tener múltiples fuentes y usuarios de mensajes de entrada y salida llamados destinos. El propósito del bloque de procesamiento de la señal en el transmisor es acomodar una fuente para una transmisión más eficaz, usualmente los sistemas digitales proveen una reducción de la redundancia de la fuente. A su vez puede suministrar la codificación eficaz del canal de forma que la detección y corrección de errores puedan usarse en la unidad de procesamiento de señales del sitio receptor a fin de reducir los errores producidos por el ruido del canal. Una unidad de procesamiento de señales analógicas puede ser un filtro pasa bajo analógico en un sistema híbrido analógico y digital combinado. Dicho procesador puede tomar muestras de la entrada análoga y luego digitalizarlas para que sean transmitidas. La salida del bloque procesador de señales del transmisor es una señal compleja que posee tanto magnitud como fase y tiene un espectro de frecuencia que se concentra en forma continua. Esta señal se define como señal de banda base que es convertida por un circuito portador en una frecuencia más alta que es acondicionada para propagarse por el canal de comunicación hasta el destino del usuario. Ese espectro de la señal de salida de los circuitos de la cámara contiene una banda de frecuencia que es cercana a la frecuencia portadora. La finalidad de un sistema de comunicación es entregar información para una distancia requerida, al destino requerido, de forma segura, rápida y rentable y, lo principal con la menor imperfección. Es decir, con la mayor calidad posible. En los sistemas digitales el deterioro se describe como la probabilidad de error de bits. “Definido como el número de errores en determinado grupo de bits dividido por el número de bits dividido por el número de bits de error y los bits transmitidos en algún intervalo de tiempo” (Majumdar, 2014, p.3). En los sistemas analógicos, la medida del rendimiento es la relación señal/ruido (SNR) a la salida del receptor (Majumdar A. , 2014).



**Figura 5.** Cuello de botella de la red de acceso. Ghassemlooy, & Rajbhandari (2017, pág. 10)



**Figura 6.** Esquema de la tecnología de comunicación con óptica inalámbrica FSO y una conectividad de usuario diferente. Majumdar (2014, pág. 3)



**Figura 7.** Sistema básico de comunicación. Majumdar, (2014, pág. 3).

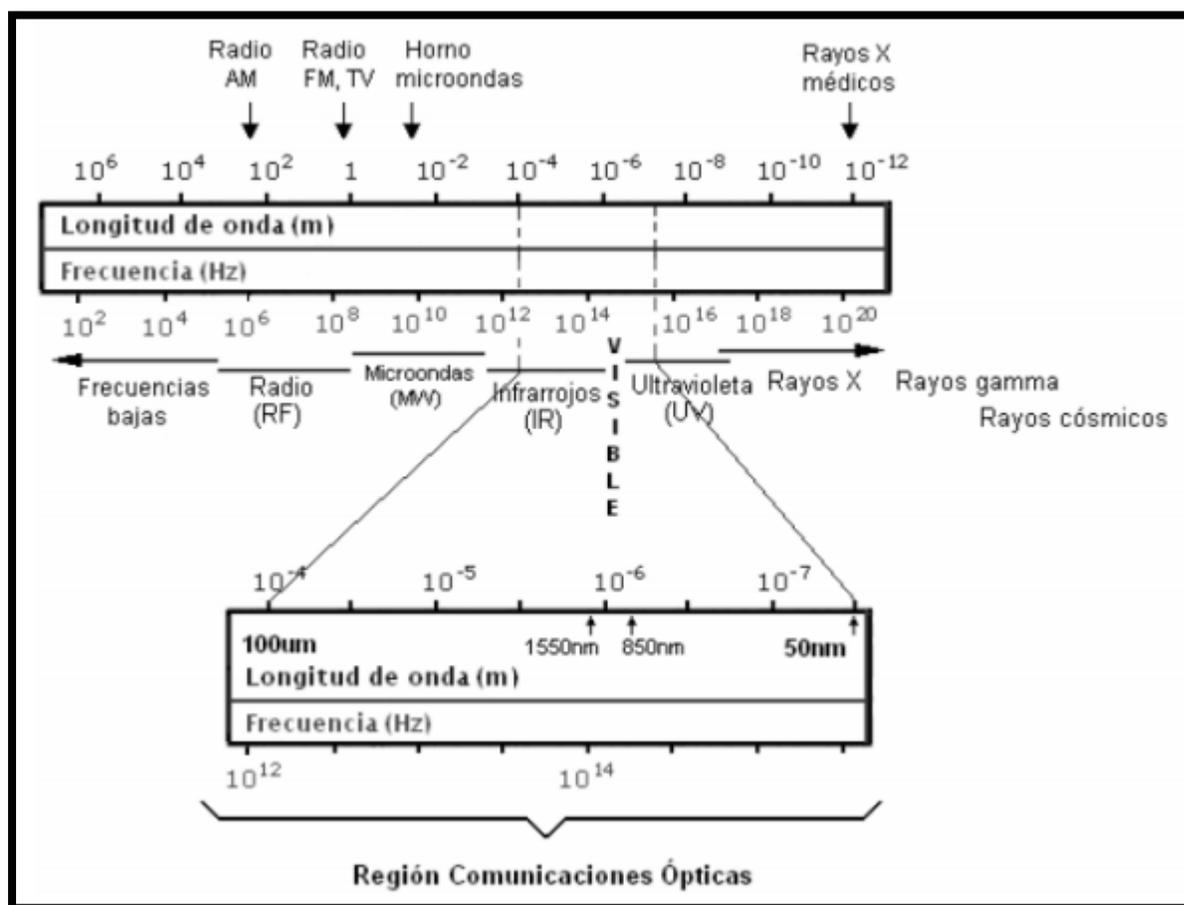
### **Fundamentos de las redes ópticas relevantes para las comunicaciones FSO.**

Para enfrentar la carencia y satisfacer la necesidad de ancho de banda, la fibra óptica ha sido el medio de comunicaciones ópticas más fiable de la actualidad. Pero la fibra es más costosa en términos de instalación, además está el hecho de algunas áreas se hace bastante difícil tender la fibra. La tecnología RF, aunque está más avanzada requiere inversiones económicas altas para conseguir las licencias de espectro y aun no se puede avanzar a capacidades ópticas para cubrir el ancho de banda requerido. La tecnología FSO ofrece una solución escalable de ancho de banda, velocidad para maniobrar, seguridad y rentabilidad. Otra característica interesante de la operación de la red óptica inalámbrica es su estructura de bajo costo para transportar ancho de banda por unidad de distancia.

Los tres tipos de red que pueden fijarse con las comunicaciones FSO son la red de área local (LAN), la red de área metropolitana (MAN) y la red de área amplia (WAN). Las redes LAN comprenden una sola área como oficinas de edificios, una red doméstica o un campus universitario. Las redes WAN comprenden múltiples ubicaciones geográficas las cuales pueden ser múltiples redes LAN, es decir, dos o más redes LAN pueden conformar una red WAN. La red MAN comprende una sola ciudad o área metropolitana donde se pueden conectar dos sitios entre sí. Un enlace FSO punto a punto entre dos edificios puede suministrar velocidades de datos de 1 a 10 Gbps y podría aumentar a 50 o 120 Gbps por enlace usando la multiplexación por división de longitudes de onda (WDM). Con esta tecnología óptica se pueden multiplexar de manera óptica varios canales y todos se unen a una sola fibra (Majumdar A. , 2014).

### Espectro electromagnético y longitud de onda.

En cuanto al uso de espectro electromagnético, en las comunicaciones ópticas inalámbricas en espacio libre se debe considerar la asignación de potencia de las ondas electromagnéticas, dichas ondas cuanto más frecuencia evidencia habrá menor longitud de onda con bastante energía. Por el contrario, las ondas de frecuencias bajas consiguen mayor longitud de onda y poca energía. La figura 12 presenta distintas señales del espectro electromagnético donde está identificada la zona de las comunicaciones ópticas inalámbricas FSO.



**Figura 8.** Espectro electromagnético y la zona de comunicaciones ópticas inalámbricas FSO. Suarez, (2014, pág. 24).

Considerando lo anterior se delimita cual es la longitud de onda con la que pueden trabajar los equipos FSO.

En longitudes cercanas a los 800 nm, el espectro electromagnético, es definido como “Región de Riesgo Retinal” ya que puede dañar la retina del ojo humano en caso de incurrir con el rayo láser. Para evitar este inconveniente, el haz de luz debe tener un nivel aceptable de seguridad

emitiendo una potencia relativamente menor. Para este escenario es recomendado un láser de clasificación 1M donde su transmisión es 100% seguro incluso si el ojo humano lo ve en forma directa si ninguna protección.

En 1550 nm, los equipos ópticos que trabajan en esta longitud de onda están al día con las normas de seguridad para el ojo humano debido a que no está dentro de la zona de retina visual. En cuanto a la potencia, los equipos pueden elevarla hasta 50 veces más que aquellos que trabajan en longitud de onda de 850 nm y efectúan la norma de seguridad denominada “Eye-Safe”.

En síntesis, la potencia de transmisión es un aspecto fundamental en la tecnología FSO, entre más grande sea más energía tendrá y su funcionalidad en la neblina más densa será de mayor eficacia. Al tener enlaces ópticos con longitudes más grandes mayor su disponibilidad será hasta del 99.99% (Suarez Serrano, 2014).

#### **Conectividad FSO en las redes actuales.**

FSO es una tecnología cuyo requisito de funcionamiento es tener línea de vista para emitir haces modulados visibles por medio de la atmosfera para fijar comunicaciones ópticas. Las comunicaciones FSO tienen las siguientes ventajas las cuales, han sido consideradas como una tecnología factible para las redes banda ancha:

- Funcionan en bandas de espectro Tera Hertz sin licencia con longitud de onda entre 800 y 1700 nm.
- Suministran varias magnitudes para mejorar el ancho de banda de la señal RF.
- Son inmunes a la interferencia electromagnética (EMI).
- Tienen bajo probabilidad de interceptación y detección por lo que es un sistema muy seguro.
- Simplicidad de instalación.
- Bajo costo.
- Independencia de protocolos para soportar múltiples plataformas e interfaces.

La mayor desventaja del sistema FSO es el clima debido a que el enlace de comunicación contiene parte de la atmosfera, la turbulencia del aire despejado causa distorsiones de fase y el desvanecimiento del enlace. Las redes FSO también pueden sufrir baja disponibilidad y fiabilidad debido a las turbulencias meteorológicas, las condiciones meteorológicas como la niebla, el smog, la nieve, la lluvia, las partículas de polvo, que perjudican el rendimiento de las comunicaciones FSO. La electricidad atmosférica entre las nubes puede aglomerar relámpagos con una duración individual entre 20 y 130 milisegundos de duración que corresponde a 12.5

Mbps causando una pérdida de datos si el relámpago interfiere con la señal en el receptor. Otro efecto que se debe considerar es la interferencia solar si la luz del sol cae sobre el fotodetector (Majumdar A. , 2014).

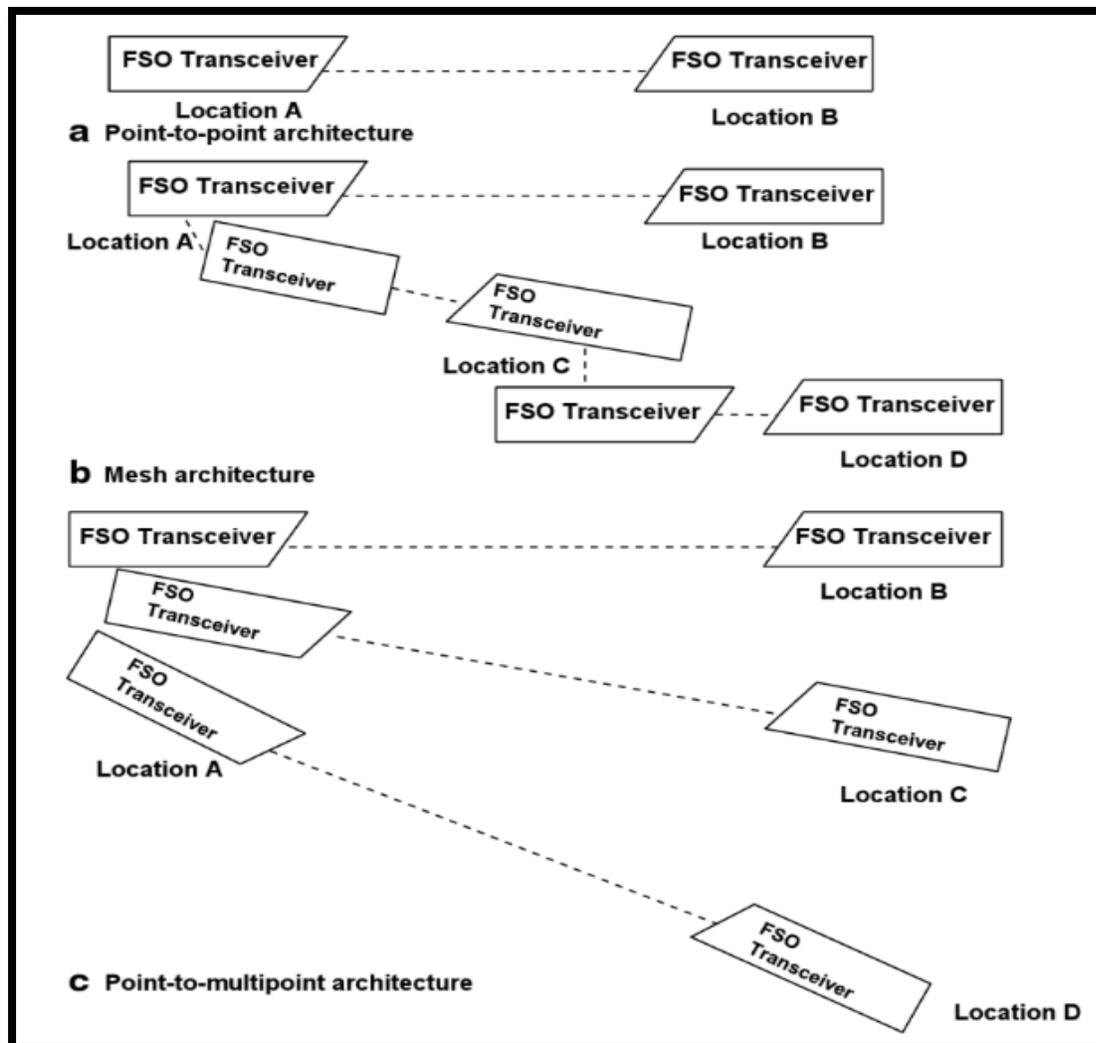
Otros inconvenientes que presentan las comunicaciones FSO son la atenuación por la atmosfera y la obstrucción por edificios y objetos ya que la tecnología requiere de línea de vista. Las longitudes de los enlaces terrestres están limitados a máximo cinco kilómetros debido al rango al que puede transmitir la energía del láser teniendo en cuenta las consideraciones de seguridad para la visión de las personas (Chadha, 2013).

### **Redes ópticas: Integración del sistema FSO.**

La tecnología FSO brinda una solución de red flexible para conseguir más capacidad de banda ancha. Este sistema facilita las cualidades primordiales que requieren para transportar el tráfico de red troncal de la fibra óptica, visto en forma virtual ancho de banda ilimitado, bajo costo, facilidad y velocidad para desplegar todo el montaje para la red. Para la transmisión de datos, FSO utiliza una conexión encriptada que le incorpora un alto grado de seguridad imprescindible para determinadas aplicaciones. Para la integración se debe tener en cuenta tres aspectos importantes:

#### ***1. Las arquitecturas para el funcionamiento de las comunicaciones ópticas inalámbricas.***

- *Punto a punto.* Es una conexión dedicada donde el enlace brinda mejor ancho de banda, su dificultad radica en que es menos escalable.
- *Malla.* Este tipo de arquitectura brinda redundancia y seguridad permitiendo sencillez en la incorporación de nodos, el inconveniente esta en que restringe las distancias mas que otras posibilidades.
- *Punto a multipunto.* Tiene la capacidad de brindar conexiones a precios mas asequibles lo que facilita la opcion de sumar mas nodos, el problema de este tipo de arquitectura es que ofrece un menor ancho de banda que la primera opcion punto a punto.



**Figura 9.** Tres tipos de arquitectura FSO. Majumdar, (2014, pág. 11).

Se debe considerar que estas arquitecturas FSO necesitan dos transeptores ambos con línea de vista (LOS) para crear un enlace de comunicación full dúplex con la condición de que no haya ningún obstáculo. En un sitio establecido, los transeptores del FSO están conectados con los router electrónicos a través de cables, donde dichos dispositivos están ubicados en armarios dentro del edificio y van enlazados con la red pública o privada según sea el caso.

## 2. Red FSO ¿Cómo implementarla?

En la figura 9 se evidencia una ilustración de una red FSO sencilla definiendo el concepto jerárquico básico de una red óptica de banda ancha con alta capacidad. La red de acceso radica en una estación (BS) que está conectada a la infraestructura troncal del anillo de fibra óptica. Cada estación base está suministrada con un número de transeptores ópticos, los cuales sirven como

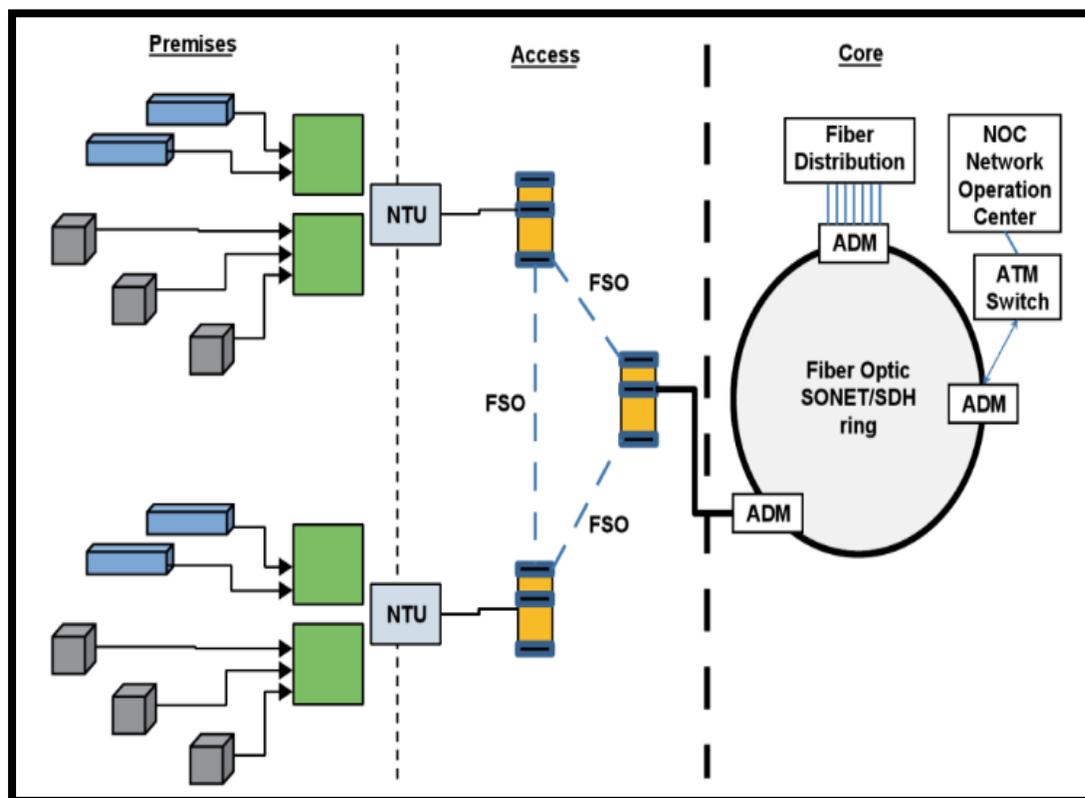
puntos de acceso para retransmisión al siguiente edificio en red. Esa configuración de la malla elimina el aspecto negativo de las arquitecturas punto a punto y punto a multipunto de falla única.

Los nodos del equipo de las instalaciones del cliente (CPE) se pueden conectar a las unidades de terminación de red (NTU) mediante la fibra óptica. Múltiples dispositivos definidos como usuarios, pueden repartir los nodos CPE.

La red central se basa en un centro de operaciones de la red (NOC), un conmutador de modo de transferencia asíncrono (ATM) tres multiplexores de adición (ADM) incorporados en un anillo de fibra óptica SONET/SDH, el cual es la infraestructura central.

El software de gestión de red (NMS) usado por el NOC ejecuta operaciones de gestión y monitoreo del rendimiento para una zona determinada del cliente. El ADM hace la multiplexación y des-multiplexación de los datos en varios pasos de la red.

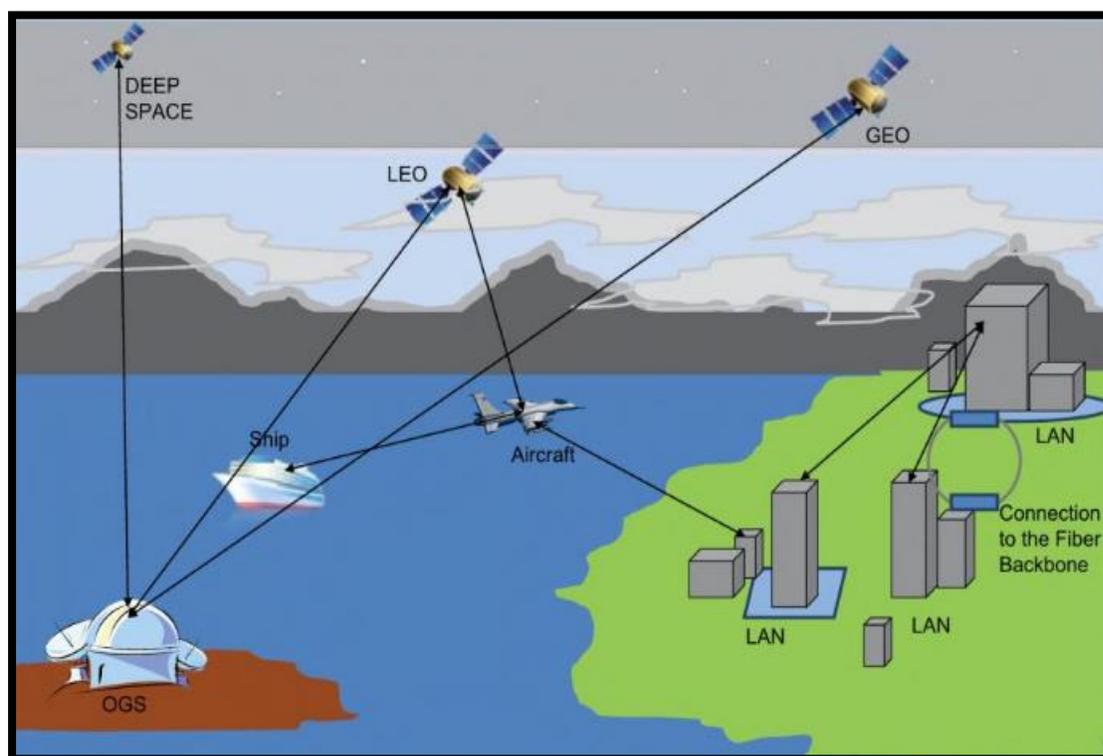
Por último, en esta implementación simple, el conmutador del ATM efectúa la regulación y el control de los datos.



**Figura 10.** Implementación simplificada de una red FSO. Majumdar, (2014, pág. 12)

### 3. Integración FSO para redes satelitales, terrestres y domésticas.

Diversos servicios multimedia como el audio han pedido (AOD), el video a pedido (VOD), como el proveedor Net-flex, y el intercambio de datos entre pares (P2P) necesitan redes de mayor velocidad de datos. El amplio rango de redes FSO que van desde unos cuantos metros hasta miles de kilómetros, brinda la opción de emplear enlaces ópticos para distintas aplicaciones. Las redes FSO que envuelven las redes ópticas inalámbricas por satélite, terrestres y domésticas pueden complementarse y funcionar en un solo modelo de red, como se presenta en la figura 10.



**Figura 11.** Topología conceptual de la red óptica de redes integradas ópticas inalámbricas, satelitales, terrestres y domésticas. Majumdar, (2014, pág. 13).

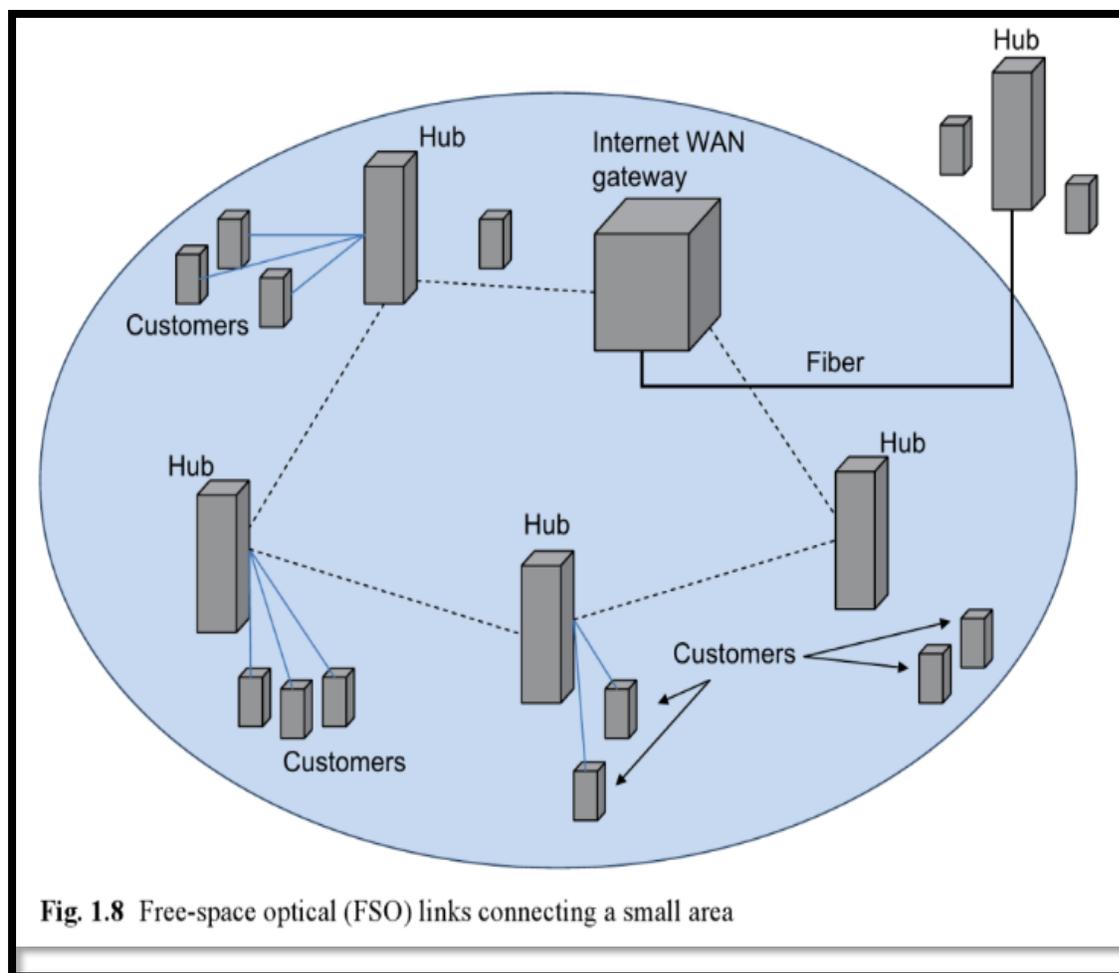
De la imagen se evidencia que una red mundial totalmente óptica puede implementarse uniendo los enlaces y las redes FSO con la mayor fiabilidad y disponibilidad a la red troncal hecha con fibras ópticas. Hay dos consideraciones por las que la construcción de una óptica global externa se hace compleja:

1. los enlaces físicos que hacen parte de una red integrada de alta expansión geográfica y el número de usos, tienen que estar correctamente acondicionadas a la arquitectura de red.
2. El medio por el cual se propaga es distinto para cada protocolo de capa. Un ejemplo puede ser el caso de un enlace entre satélites, el entorno no tiene atmósfera es decir, se comporta

como un enlace en el vacío. El único efecto para canalizar será la pérdida de propagación ya que el haz limitado por la difracción tendrá una inevitable dispersión. En el caso de un enlace terrestre con atmósfera suele pasar que cuando varios clientes intervienen en el mismo medio óptico al ser canales aleatorios interactúan con el protocolo de la capa superior lo que provoca una reducción en la utilidad de la red. Por ende, todas las redes mundialmente conocidas tendrían que diseñarse de manera que sean consideradas las múltiples capas de la red.

Las redes satelitales FSO pueden suministrar a los usuarios finales una forma de acceso a la red sin la necesidad de hilos conductores de tipo óptico debido a que los satélites tienen la capacidad de cubrir grandes zonas del mundo. La arquitectura de enlace óptico que hace uso de redes-satélites, satélites-aeronaves, aeronaves-aeronaves o entre aeronaves y tierra brindan velocidades cercanas a los 10 Gbps. Otras características de la red Inter satélites FSO son:

1. Son alternativa para el internet con medios guiados como la fibra óptica submarina. Es decir, podría convertirse en un sistema para las comunicaciones globales mediante el océano que proporcione internet de banda ancha mundial con tecnología FSO.
2. Puede suministrar servicios de internet en cualquier sitio remoto o para los usuarios que estén conectados a una plataforma móvil. La figura 11 demuestra un enlace FSO que conecta un área pequeña.



**Fig. 1.8** Free-space optical (FSO) links connecting a small area

**Figura 12.** Enlaces ópticos en espacio libre conectando un área pequeña. Majumdar, (2014, pág. 13).

La red terrestre FSO incluye dentro de la atmosfera factores como turbulencia y dispersión como canal de comunicación para fijar una conexión sin medios guiados entre los transceptores. El camino de propagación LOS puede variar de metros hasta decenas de kilómetros. Algunas aplicaciones de la red terrestre FSO son:

- Como ya se habia mencionado, puede solucionar el problema de “ultima milla” para conectar el extenso ancho de banda de la red troncal de fibra optica a todos los usuarios finales que requieran un alto ancho de banda.
- Tambien ha sido nombrado a apartados anteriores, no es necesario hacer excavaciones o colocar fibras opticas para fijar comunicaciones para terminales moviles entre edificios, entre barcos o entre comunidades.
- Se puede integrar con redes de radio inalambricas para disminuir las limitaciones de capacidad y escalabilidad de canales de radio frecuencia denominado como comunicación

hibrida optica/RF. El principal problema de este tipo de enlace son las condiciones meteorológicas locales siendo la niebla el factor más delicado. El diseño de la arquitectura de la red FSO debe considerar mecanismos para tratar el deterioro de la señal provocado por la turbulencia y la dispersión atmosférica con el fin de alcanzar el nivel de calidad de servicio (QoS) necesario para los clientes. El principal objetivo de una red terrestre FSO es proyectar transceptores FSO y delimitar la red para soportar distancias de transmisión de metros a kilómetros con velocidades de datos que vayan de Mbps a Gbps (Majumdar A. , 2014).

### **Tasas de bit en las comunicaciones ópticas inalámbricas FSO**

#### **Ancho de banda: tasas de transmisión de datos.**

La entrega de información ha sido un tema crítico por la amplia gama de medios digitales y las nuevas tecnologías que surgen con el tiempo. En telecomunicaciones y en las comunicaciones ópticas inalámbricas FSO la velocidad de bits de computación está definida por el número de bits que son procesados por unidad de tiempo. Es decir, la velocidad binaria o tasa de transferencia de datos es el número medio de bits por unidad de tiempo que transitan entre los equipos de un sistema de emisión de datos. Dicha tasa de bits se representa en bits por segundo (bps) apoyados en el sistema internacional de unidades.

En síntesis, la tasa de ancho de banda estará definida por unos factores entre los que comprenden las tasas de comprensión y la calidad de la señal deseada. Para diversas aplicaciones las tasas de flujo pueden ser:

#### ***Audio MP3.***

- 32 Kbit/s, 96 Kbit/s, 100-160 Kbit/s, 192 Kbit (nivel más alto soportado por la mayoría de los codificadores de MP3 cuando se saca de un compacto).
- 224230 Kbit/s la más alta calidad de MP3.

#### ***Video.***

- 16 Kbit/s de calidad de videotelefono
- 128-138 Kbit/s de calidad de videoconferencia orientada al negocio usando comprensión de video.
- 1,5 Mbit/s de calidad máxima de VCD (usando la comprensión MPEG-I).
- Calidad de television con definición estandar típica de 3,5 Mbit/s (con reducción de la velocidad binaria a partir de la comprensión MPE G-2).

- 9,8 Mbit/s max-DVD (usando MPE de compresion 2).
- Calidad de HDTV de 8-15 Mbit/s (con reducción de la tasa de bits de la compresion de codificación de video avanzada (AVC) MPEG-4).
- 19 Mbit/s aproximado – HDTV 720 (usando compresión MPE G-2).
- 25 Mbit/s aproximado – HDV 1080i MPE G-2.
- 29,4 Mbit/s, HD DVD.
- 40 Mbit/s Disco Blue Ray (utilizando MPE G-2, AVC o compresión de video (VC)-1).

### ***Tecnología de internet.***

- Servicios Integrados para la Red Digital (ISDN)-128 Kbps.
- T1-1.544 Kbps.
- Lenguaje Especifico de Dominio (DSL)-512 Kbps-8 Mbps.
- T3-44.736 Kbps
- Gigabit ethernet-1 Gbps.
- OC-256-13.271 Gbps.
- Telefonos celulares – 10 Gbps.

### ***Tecnología de computación.***

- Universal serial bus (USB)-12 Mbps.
- Firewire (a.k.a “IEEE 1394” o “i-Link”)-400 Mbps.
- Ultra-3 Interfaz de Sistema de Computadora Pequeña (SCSI)- 160 Mbps (Majumdar A. , 2014)

### **Como se proporcionan las tasas de transmisión de datos en las redes actuales.**

En las comunicaciones ópticas inalámbricas FSO, los canales pueden clasificarse en tres categorías:

Canal de espacio libre.

Canal atmosférico de espacio libre.

Canal submarino de espacio libre.

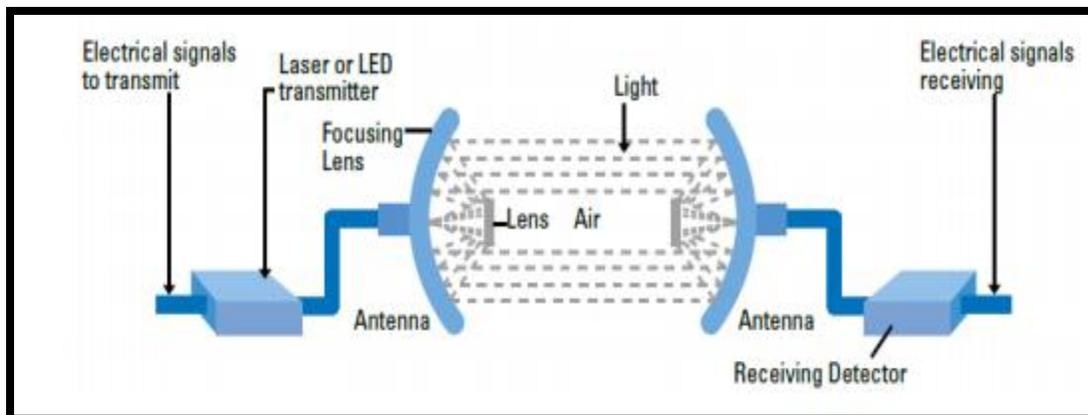
Se debe considerar que los canales ópticos FSO tienen medios no guiados. La diferencia entre canales guiados como la fibra óptica y los no guiados es que en los canales que no necesitan medios físicos para transportar datos la radiación se difracta a medida que se propaga desde la fuente hacia afuera, los canales que usan fibra su radiación están concentrada dentro de la estructura como la guía de las ondas de fibra.

Bajo este entorno, la red de comunicaciones se estima como la infraestructura física que posibilita la transmisión y el intercambio de voz, video y datos entre dos o más usuarios. La red óptica FSO con su capacidad y la opción de manejar datos/voz/video, ejerce un rol significativo en la red mundial de comunicaciones para hacer frente a los contenidos de internet que brindan gráficos en 3D, transmisión de audio y video en tiempo real, telemedicina, etc. Para entender la industria de las comunicaciones mundiales de la actualidad y el camino que debe seguir de cara al futuro, es primordial comprender la red óptico síncrona de América del norte (SONET) y la jerarquía digital síncrona (SDH), los cuales son los esquemas de multiplexación. Dichos esquemas admiten el tráfico de comunicaciones a velocidades de datos con el tiempo se hacen cada vez más altas. Los niveles típicos de SONET y su velocidad de datos son:

- OC-1 (52 Mbps)
- OC-3 (155.5 Mbps)
- OC-12 (622 Mbps)
- OC-24 (1.24 Gbps)
- OC-192 aproximadamente 10 Gbps (Majumdar A. , 2014).

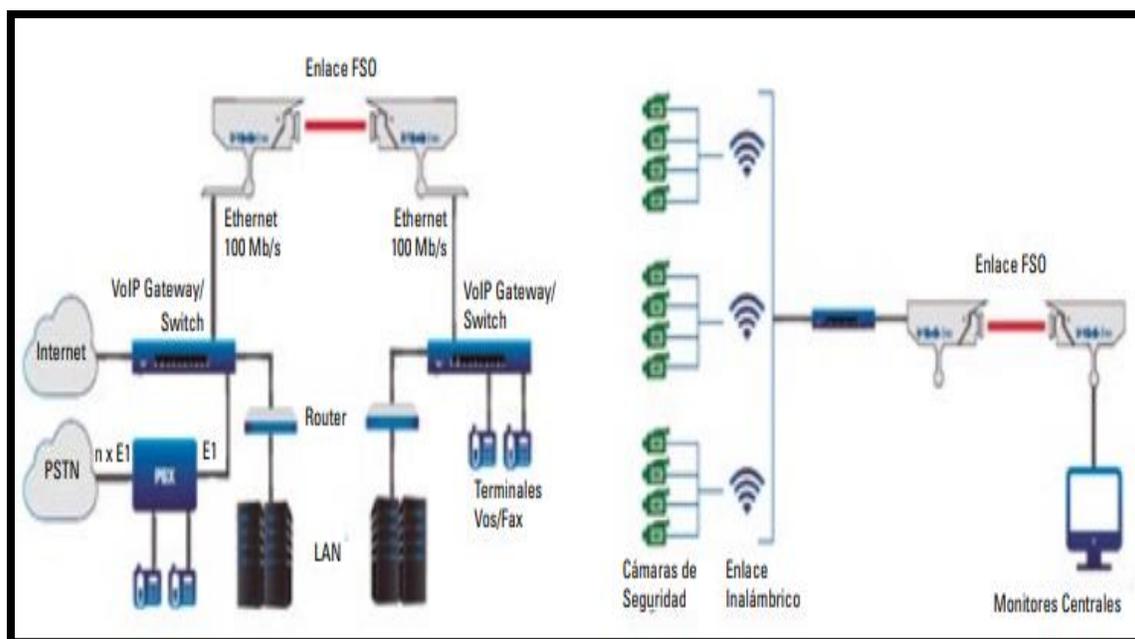
#### **Protocolos y operación de los sistemas FSO para transmitir bits.**

Los sistemas de comunicaciones ópticas inalámbricas FSO pueden aplicarse en diferentes protocolos. Sin embargo, cuando el enlace está en operación no tiene definido el protocolo para trabajar, es decir, es independiente y esto hace que sea un modelo de practicidad al momento de transmitir una tasa de bits requerida. Dichos protocolos son Ethernet en sus distritos estándares, Fast Ethernet, Sonet, ATM, FDDI, entre otros. Su forma de conexión entre dos dispositivos FSO está constituida por un transmisor y un receptor donde cada uno tiene un transceptor. Según la página HIGHMICRO (2018): “el transceptor realiza funciones de recepción de una comunicación, para ello, un circuito eléctrico permite un procesamiento para también realizar la transmisión de esta información sin importar su diseño o formato” (p.1). Estos aparatos tienen capacidad Full-Dúplex, cada punto emplea óptica mediante fuentes generadoras de potencia más un lente que emite el láser a través del ambiente a diversos lentes que admiten datos (Romero Diaz, 2010).



**Figura 13.** Operación del sistema FSO. Carballo, (2019, pág. 3).

La arquitectura FSO refleja como ejecuta la transmisión de datos, voz y video se puede detallar en la siguiente imagen (Romero Díaz, 2010).

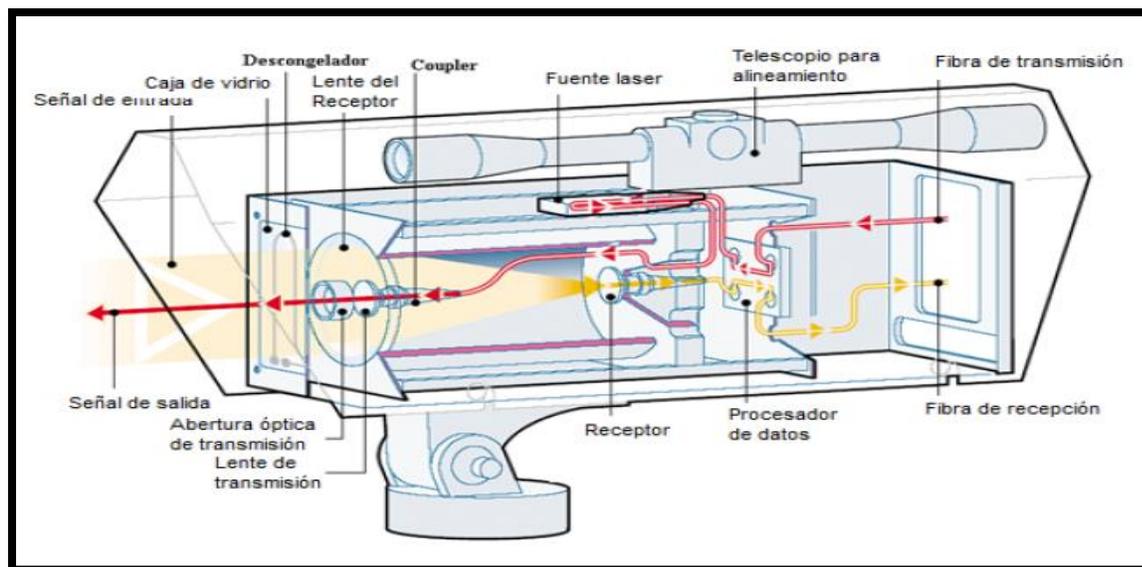


**Figura 14.** Arquitectura FSO para la transmisión de datos voz y video. Carballo, (2019, pág. 2).

### Parámetros y dispositivos de operatividad en las comunicaciones ópticas inalámbricas FSO.

Los elementos básicos que constituyen un enlace FSO son el transmisor y receptor, cada uno posee un transceptor que tiene un convertor eléctrico-óptico que cuenta con una fuente de datos, la cual transforma de señal eléctrica a señal óptica que luego es retransmitida en el aire, así mismo tiene un convertor óptico-eléctrico que transforma las señales tipo láser que están en

transceptor en señales eléctricas. Desde luego está el medio no guiado por el cual viaja el haz de luz que es el canal atmosférico de propagación. En la figura 13, se observa una onda óptica que viene de otro dispositivo y que es amplificada para ser difundida en el aire, es decir, la función del conversor eléctrico-óptico, y por otro lado la señal recibida que procede del aire y que es dirigida mediante fibra óptica a otro dispositivo.



**Figura 15.** Esquema de un transceptor FSO. Acosta, (2011, pág. 25).

### **Transmisor.**

En el sistema de comunicación FSO, el transmisor es importante para ajustar aspectos de señal como frecuencia, potencia y técnica de modulación. Lo que corresponde a la tecnología FSO, el transmisor genera la señal óptica adaptando y modulando la franja para la emisión en la atmosfera (Acosta Sanchez, 2011).

Ahora, los equipos ópticos FSO utilizan diferentes fuentes de luz como los componentes semiconductores que son empleados de manera frecuente para la transmisión de datos. Habitualmente las fuentes son transductores que se encargan de generar una portadora tipo óptica para que enseguida sea modulada a través de las ondas eléctricas que vienen de un mecanismo análogo o digital que debe tener condiciones de operatividad como bajo consumo, integridad con los cambios de temperatura, volumen reducido y buena potencia de salida.

Por la dispersión de la luz y la extensa repartición de espectro, los diodos tipo LED son utilizados solamente para transmisiones en distancias reducidas que piden baja potencias de salida y velocidad mínima de 155 Mbps, por el contrario, el láser evidencia un reducido espectro

para su emisión a diferencia del diodo LED. Por consiguiente, para transmisiones en distancias extensas admite su uso de forma eficaz.

Para escoger una fuente láser apropiada para sistemas de comunicación FSO se debe tener en cuenta ciertas condiciones de operación como la longitud de onda, de acuerdo a párrafos anteriores está cerca de los 850 nm y máximo 1550 nm. Normalmente, para la operación de la fuente láser son necesarios las bajas temperaturas y otros elementos como la potencia de transmisión, vida útil, disposición para modular la portadora óptica, protección para el ojo humano y complemento con medios guiados como la fibra óptica.

### **Receptor.**

Para los sistemas de comunicación FSO está a disposición la comercialización de detectores, los cuales son fabricados con semiconductores y de acuerdo al componente utilizado se pueden emplear en diferentes longitudes de onda. Dichos dispositivos tienen como finalidad demodular la portadora óptica obtenida, restaurando la información, enseguida se introduce en el receptor pasando por técnicas de amplificación y filtro para ofrecer aumento de sensibilidad, poco consumo, descenso en la tasa de error de bit (BER) en el orden de  $10^{-10}$  para recobrar con prontitud la señal de origen, disminución de ruido, elevada eficiencia y buen rendimiento en la conversión de óptica-eléctrica.

En la primera parte del proceso de recepción, el detector convierte la señal láser en señal eléctrica. Enseguida, la señal es reconstruida para proporcionarla al equipo terminal que funciona como un repetidor óptico. Hoy en día, los detectores comercializados poseen fotodiodos semiconductores que ofrecen diferentes bandas de longitudes de onda y que ejercen con polarización inversa, al almacenar fotones en un campo eléctrico producen nano amperios ( $10^{-9}$ ) en corriente eléctrica, la cual se debe amplificar para que la señal sea procesada. Ahora, los fotodiodos utilizados son PIN (Positiva – Intrínseca – Negativa) y APD (Fotodiodo Avalancha).

***Criterio de selección de receptores.*** Para escoger un receptor óptico tiene que ir de acuerdo a la aplicabilidad que se le va a dar, para ello es fundamental que exista un balanceo óptimo entre la longitud de onda ejecutada y la operatividad del transmisor. Por consiguiente, si el otro transmisor propaga mayor potencia los detectores PIN son capaces suplir cortas distancias con longitudes de onda de 850 nm. Con respecto a los detectores APD son útiles en distancias más largas, debido a la elevada sensibilidad que poseen este tipo de diodos añade un margen de enlace

lo que hacen que requieran de una tensión fija y elevada haciendo que este componente sea más caro que los PIN (Suarez Serrano, 2014).

### **Rastreo y adquisición del láser.**

Considerando que la trayectoria entre origen y destino puede ser en kilómetros, es necesario que el haz de luz sea lo más reducido posible, es decir, en micro radianes para trasladar la mayor cantidad de potencia al lado contrario del receptor. Una falla en el alineamiento de haz más pequeño puede impedir la conexión del enlace, esta puede derivar de movimientos de la zona de montaje o cuestiones sísmicas del edificio donde se encuentra. Para solucionar este inconveniente existe el sistema Auto Tracking, es un aspecto donde el haz de luz es nuevamente alineado de manera automática hacia el costado del receptor. Dicho sistema localiza la alteración de la alineación del haz de luz obtenido y de inmediato lo modifica. Varios sistemas emplean un haz independiente condicionando que el haz de alineamiento y haz de datos estén en forma paralela, para separarlos se emplean distintas longitudes de onda.

### **Margen de enlace.**

Es fundamental realizar la observación constante del margen del enlace sobre todo en las tecnologías de comunicación sin medios guiados debido a su relación directa con la causa de pérdida en el aire como medio de propagación desde el transmisor hasta el receptor que puede cambiar con el paso del tiempo por las condiciones climáticas que perjudican el sitio donde está el montaje.

En este margen, se debe considerar el balance de potencia para que ser examinado. Es decir, la tasa de error de bit (BER) dicho balance no puede ser adverso. Para ello, es importante tener en cuenta:

- Pérdidas ópticas y por desapuntamiento en el receptor, las cuales no tienen que ver con la longitud de onda.
- Pérdida geométrica que suceden por la divergencia del haz láser, esta relacionado con el ángulo de apertura del láser definiendo que a menor divergencia menor será la distancia solicitada.
- Por elevación del diámetro del haz de láser.
- Por efectos en la atmósfera.
- La sensibilidad del receptor.

### **Enlace FSO y su condición de funcionamiento.**

En los sistemas FSO se debe tener en cuenta lo dinámico que puede ser la potencia de emisión, por lo que es importante definir la diferencia entre el mínimo y el máximo nivel de potencia que puede admitir. Una onda con niveles altos de potencia puede causar sobresaltos en el receptor, dicho efecto suele observarse en los enlaces de trayecto corto. Un alcance dinámico se mide en decibelio (dB) y el máximo permitido para que un enlace FSO funcione en aceptables condiciones es de 30 dB. Es decir, mil veces más elevada que el nivel mínimo de señal admitida de acuerdo a parámetros de sensibilidad del receptor (Toapanta Medina , 2015).

### **Disponibilidad y fiabilidad de los dispositivos para el sistema FSO.**

Dentro de las características que debe tener un sistema de comunicaciones FSO para brindar el máximo desempeño posible es la disponibilidad y la fiabilidad del enlace implementado. Pese a la adversidad que represente el factor climático se puede garantizar una disponibilidad del 99.999% sin la necesidad de hacer más corta la trayectoria de un enlace. Gracias a la fabricación equipos ópticos con tres láseres y elevada sensibilidad se obtiene transmisión y recepción de alta calidad incluso para 17 dB/km de atenuación.

En la actualidad, dichos dispositivos en comercialización son certificados para garantizar su fiabilidad al momento de utilizarlo. Cada componente es sometido a estudios de laboratorio donde se ejecutan escenarios reales donde se miden su capacidad en temperaturas que están entre 50°C y 75°C. Cada láser de un dispositivo óptico cuenta con modo activo de enfriamiento, el cual conserva el haz láser en buen estado para operar garantizando el máximo rendimiento del dispositivo y mayor vida útil.

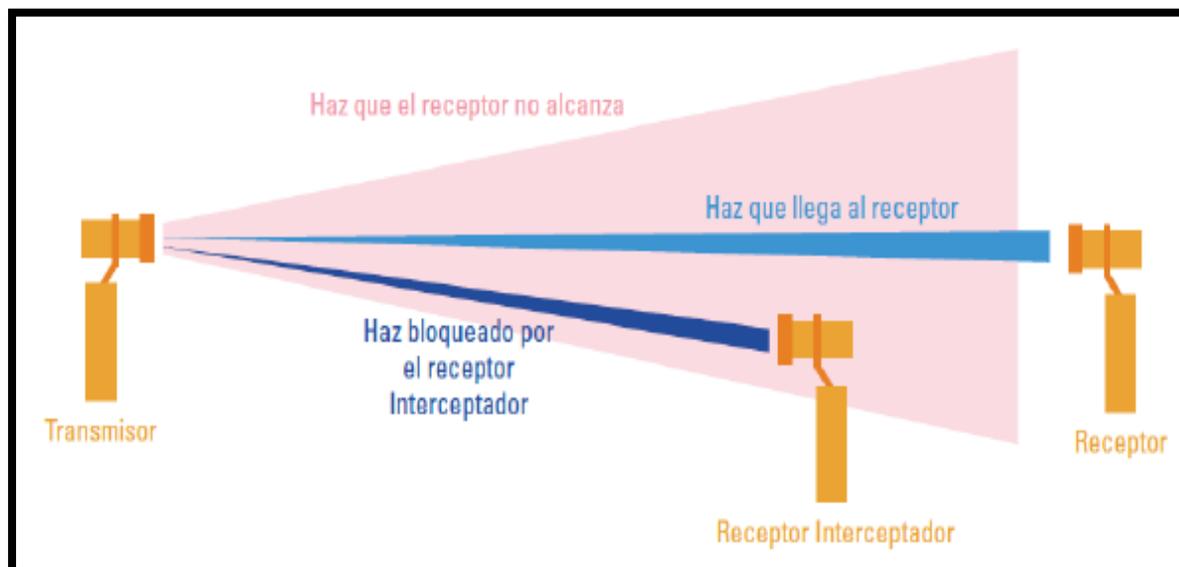
### **Seguridad del sistema FSO.**

En los sistemas de comunicación FSO la seguridad es un parámetro que ha evidenciado eficacia por la esencia del canal de propagación al no contar con medios guiados que lo sustenten. También está la condición de exclusividad que tiene el haz de luz emitida y el reducido tamaño de los equipos ópticos en comparación con los de otras tecnologías.

Cuando hay obstrucción la señal inalámbrica FSO puede ser interrumpida por completo, existe una forma de interrumpir el enlace colocando un dispositivo receptor en el trayecto de láser óptico como se muestra en la figura 14. Dicha operación es muy compleja de ejecutar incluso de forma oculta y depende del sitio donde sea instalado el enlace. Además, el administrador del

sistema tiene la gestión de la operación de tal manera que la transmisión se verá perjudicada interrumpiendo la misma. Es decir, quien gestiona dicho sistema se percatará del nuevo receptor.

}



**Figura 16.** Láser interceptado en un sistema de comunicación FSO. Carballo, (2019).

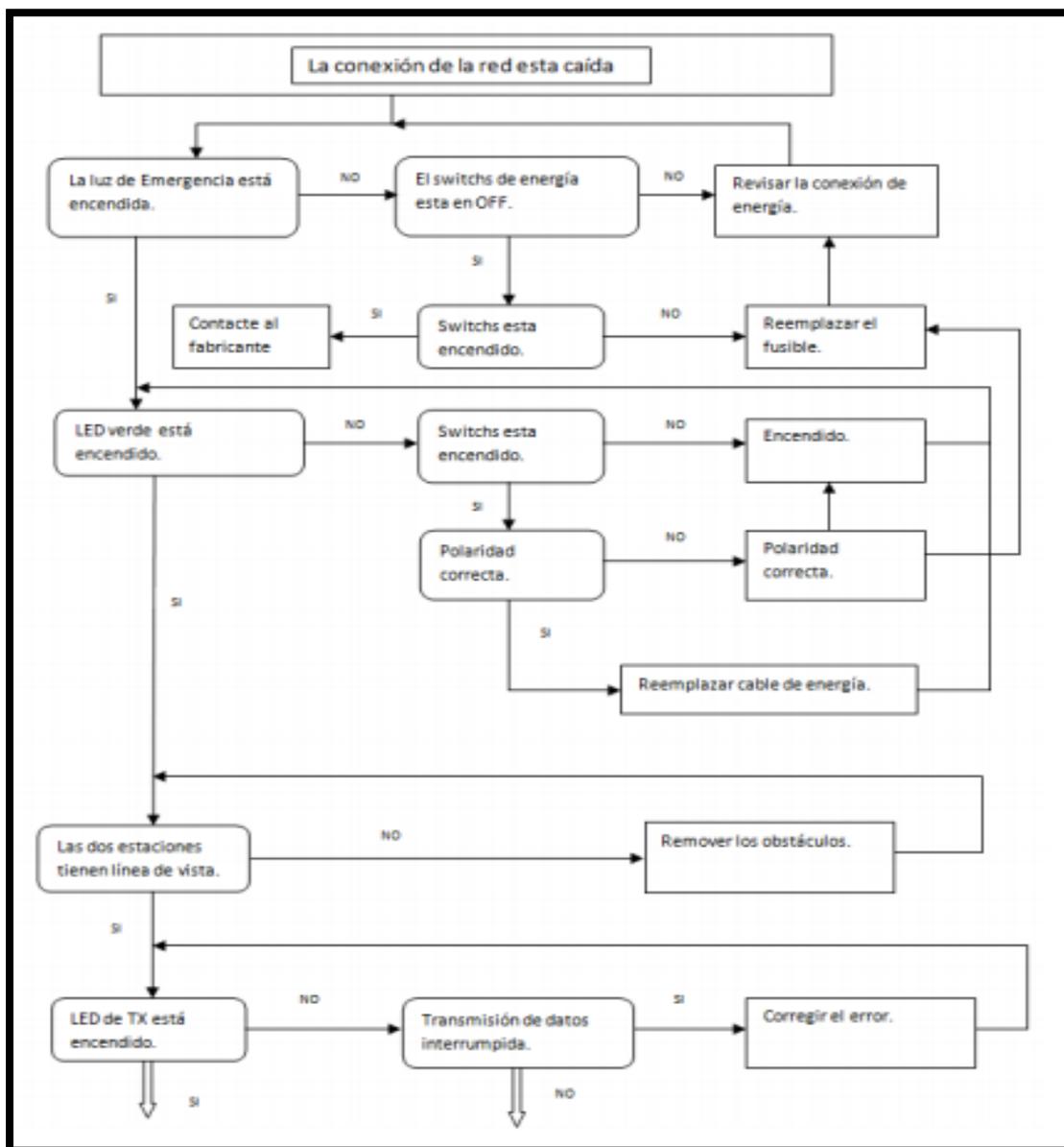
Otro aspecto por el cual no se puede intentar una interceptación es la longitud de onda, ya que tiene operar con un diámetro de haz de igual tamaño al que están operando, lo cual resulta muy difícil si se tiene en cuenta que el medio de propagación es la atmósfera. Por consiguiente, las comunicaciones ópticas inalámbricas FSO son el sistema ideal para los clientes que requieran salvaguardar información robusta y alta confidencialidad (Caizaluisa Caizaluisa, 2008).

#### **Comprobación y modificación de un enlace FSO.**

Este procedimiento se hace luego de haber estudiado el sitio de instalación en el que se debe analizar cuestiones como línea de vista y potencia requerida para la transmisión, es importante definir los lugares de cada sitio donde estarán los equipos ya que dichos dispositivos no pueden estar a la deriva de movimientos, los cuales deben ser minimizados lo mejor posible. Como ya se ha mencionado, la línea de vista es fundamental y es la esencia de funcionamiento de la tecnología FSO, para este paso se debe hacer con anticipación una inspección fotográfica en cada sitio del enlace propuesto y, por ende, se determinará dónde colocar los dispositivos sin que existan problemas de obstrucción provocado por cualquier elemento en el trayecto. Respecto al trayecto del enlace, es obligatorio tener claro el número de metros o kilómetros que tiene debido a las condiciones climáticas y geográficas que tenga el lugar.

Una vez que está planificado el enlace, el siguiente paso es la instalación eléctrica de los equipos ópticos y para que no existan inconvenientes solo si es necesario se debe instalar una UPS para mantener los niveles de energía eléctrica en excelentes condiciones.

Por último, es necesaria una verificación de funcionamiento del enlace y para realizar este paso de manera correcta se debe tener en cuenta la figura 15 que se mostrara a continuación (Toapanta Medina, 2015).



**Figura 17.** Diagrama para la solucionar inconvenientes en un enlace FSO. Toapanta, (2015, pág. 108).

## **Efectos atmosféricos en las comunicaciones ópticas inalámbricas FSO**

### **Transmisión mediante el ambiente.**

El aire es una combinación de moléculas de oxígeno y nitrógeno. El tiempo ayuda a almacenar altas sumas de vapor que también puede ser de derivados contaminantes que existen en la atmosfera y que son causados por factores externos. Considerando que las condiciones atmosféricas son imposibles de manipular factible utilizar las zonas que estén en perfecto estado para que las longitudes de onda sean escogidas de manera adecuada con el propósito de mantener el mínimo de perdida por atenuación de la señal, por absorción y dispersión.

### **Dispersión.**

La definición de dispersión indica (Hill, 1997): “es la desviación que sufre la luz al tratar de pasar por la atmosfera. La dispersión de la luz puede causar un impacto drástico en el desempeño de un sistema FSO.” (p.51). Este tema es directamente relacionado con el direccionamiento y la repartición de la luz y es ajeno a la carencia de energía en el ambiente. Lo anterior implica que exista una considerable reducción de la potencia de luz en el dispositivo receptor (Toapanta Medina, 2015).

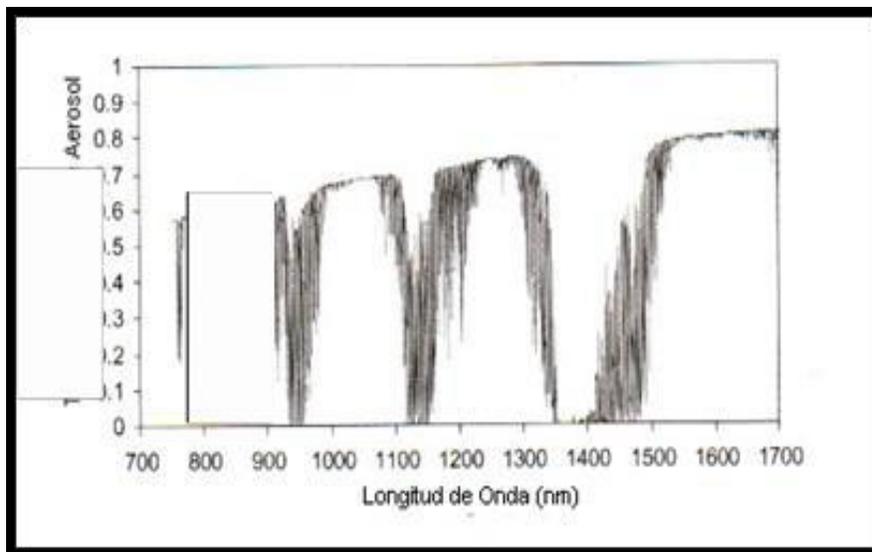
Existen dos tipos de dispersión en el ambiente:

***Dispersión Rayleigh.*** Se presenta en el momento que las partículas existentes en el ambiente poseen un diámetro pequeño respecto a la longitud de onda que hay en la radiación. Dichas partículas se producen por la dispersión, la cual es causante que el cielo sea de color azul.

***Dispersión Mie.*** Se presenta en el instante que las partículas que hay en la atmosfera tienen un diámetro que alcanza o supera la longitud de onda provocada por la radiación. Esas partículas producen la dispersión que hace que las nubes tengan el color blanco que las caracterizan (Acosta Sánchez, 2011).

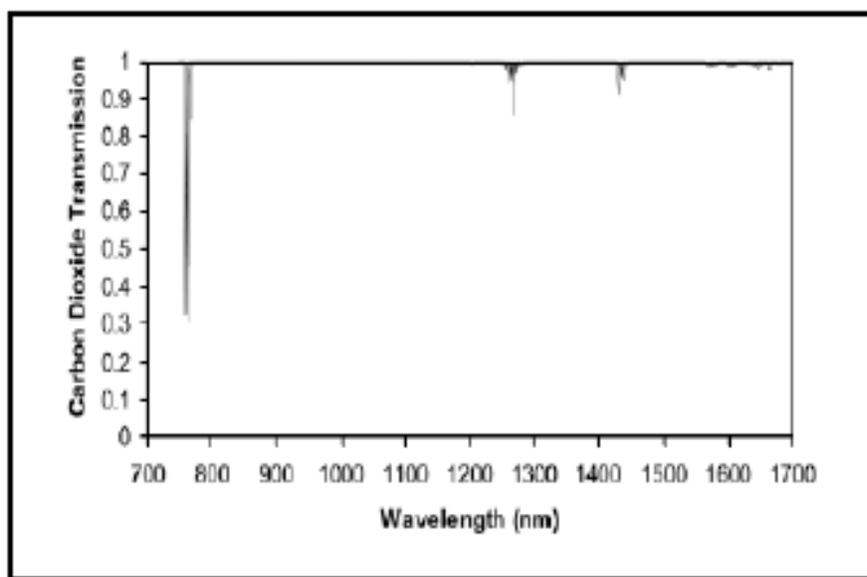
### **Filtración en el ambiente.**

Los distintos tipos de moléculas que pueden filtrar las señales ópticas provocan cierta afluencia que fijan la fuerza de atenuación que tendrá la señal. La figura 15, evidencia el espectro de emisión para el clima de cielo despejado en un contexto urbano con visibilidad de 5km bajo densidad de aerosol (Toapanta Medina, 2015).

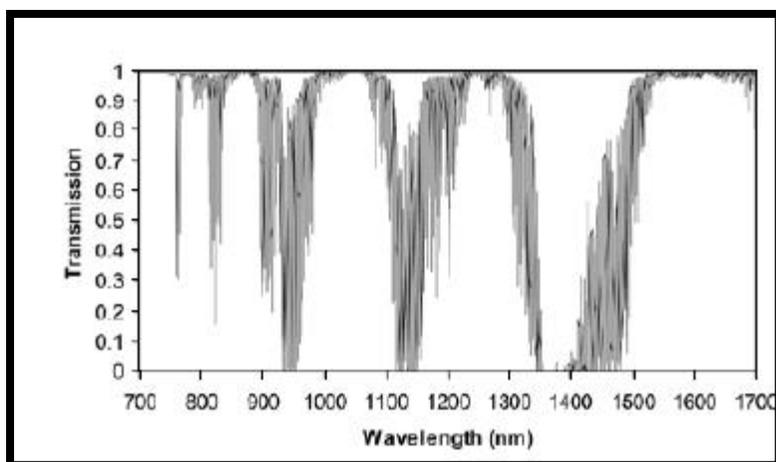


**Figura 18.** Transmisión en longitud de onda en condición de cielo despejado en un contexto urbano con visibilidad de 5 km. Toapanta, (2015, pág. 55).

En la figura 16 se observa el comportamiento en cielo sin nubosidad donde el vapor de agua resalta en la emisión. La cantidad de líneas colabora en un espectro complejo con aberturas eventuales en longitudes de onda de 850 y 1550 nm. Por otra parte, la figura 17 expone como es el comportamiento de la emisión bajo condiciones de dióxido de carbono.



**Figura 19.** Transmisión en cielo claro considerando la longitud de onda. Caizaluisa, (2008, pág. 40).



**Figura 20.** Transmisión en un ambiente con dióxido de carbono en función de la longitud de onda. Caizaluiza, (2008, pág. 40).

En los sistemas de comunicaciones ópticas inalámbricas FSO la operación en atmosfera de niebla densa es necesario su ejecución en trayectos cortos entre cada dispositivo óptico para sostener una disponibilidad con niveles elevados.

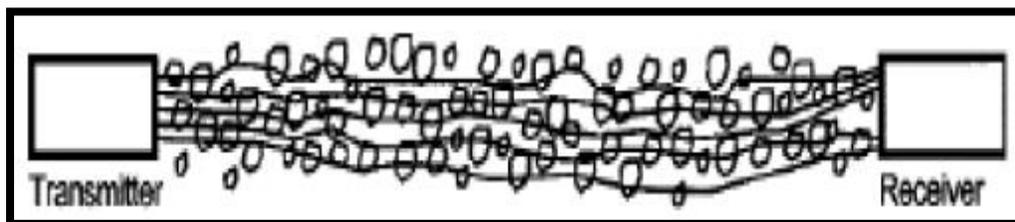
#### **Turbulencia.**

Los lugares despejados suelen parecer convenientes para la transmisión en los sistemas FSO, el poder de la turbulencia ocasiona inconvenientes en la transmisión. Cuestiones como el calor, fuertes vientos modifica la trayectoria del haz de luz desviando el índice de refracción. La tecnología óptica en espacio libre FSO no es recomendada su implementación en zonas calientes y de ser el caso deberá ir acompañado por un sistema de refrigeración que mantenga en niveles óptimos la temperatura.

**Desviación del haz.** Como ya se había nombrado anteriormente, el índice de refracción puede cambiar de acuerdo al desvío que tenga el haz de luz. Por eso dentro de las recomendaciones dadas por los expertos, una de ellas es no colocar los dispositivos ópticos tanto para transmisión como para recepción anteponiendo lentes de vidrio ya que el haz se desviará causando perdida de potencia y datos durante la emisión.

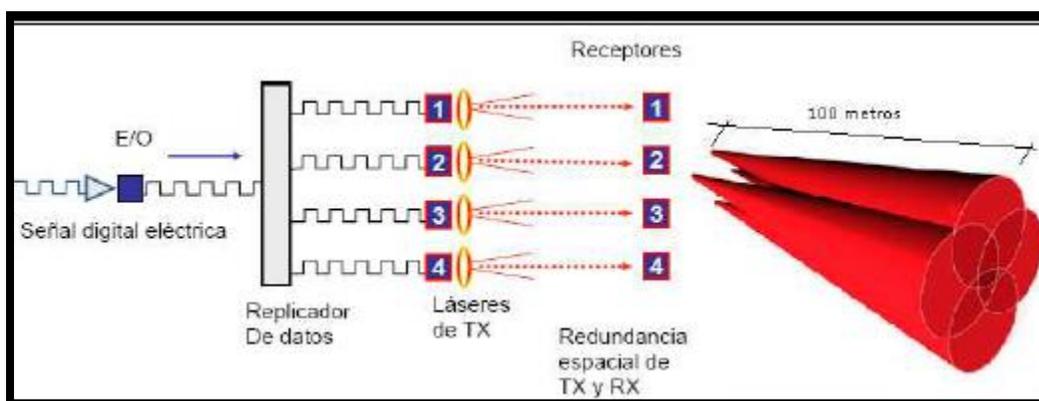
**Cintilación.** También conocido como “centelleo”. Las diferentes turbulencias generan una variedad de índices de refracción lo que ocasiona alteraciones temporales y espaciales de alta velocidad en el índice de refracción del ambiente. Una señal óptica frontal que viaja por medio de turbulencia podría llegar defectuosa por las bolsas de viento que intervienen en prismas y lentes

de vidrio. Debido a este problema, se crea una variación provisional de la intensidad del láser en el equipo receptor como se observa en la figura 18.



**Figura 21.** Secuelas de la cintilación. Caizaluisa, (2008, pág. 47).

Una manera de enfrentar el problema del centelleo, es la transmisión de datos repetitivos en enlaces distribuidos de forma espacial, los cuatro haces de luz se superponen a un trayecto de 100 metros, esta reiteración aumenta la disponibilidad y así mismo el alcance tal y como se muestra en la figura 19.



**Figura 22.** Procedimiento de repetición para transmitir datos. Caizaluisa, (2008, pág. 47).

### Lluvia.

El efecto de la lluvia se da por las gotas de agua cuyo radio está entre 200 y 2000  $\mu\text{m}$  y, por tanto, es más considerable que la longitud de onda de la tecnología FSO cuya fuente es de tipo lumínica. La cantidad de atenuación que puede provocar la lluvia depende de su comportamiento. Los sistemas de comunicaciones FSO ofertados en el mercado tecnológico trabajan bajo un margen de enlace de 25 dB de tal forma que este efecto climático puede manifestarse sin interrumpir la comunicación del enlace. Un escenario de prueba bajo lluvia sucede cuando un sistema es implementado en un trayecto de 500 metros, la atenuación presentada no supera los 3 dB. Cabe mencionar que cuando la lluvia sigue con regularidad con niveles mayores a 10cm/hora

la atenuación se convierte en un inconveniente delicado incluso en trayectos cortos, aunque la duración de este nivel de lluvia no se extiende a grandes lapsos.

Un aspecto importante a consideración es el hecho de que los modelos sin medios guiados como los RF utilizan frecuencias que van por encima de los 10 GHz que son usualmente afectados por la lluvia, aunque con poco déficit respecto al efecto de niebla. Esto se justifica gracias al equilibrio que existe entre las gotas de lluvia y la longitud de onda RF y está comprobado que estas dos cuestiones tienen alta diferencia con las gotas húmedas de niebla, las cuales son más pequeñas. Las bandas de frecuencia de 2.4 GHz y 5 GHz son ideales para la tecnología FSO, ya que además de no trabajar bajo licencia, dichas frecuencias no son impactadas por la lluvia y la niebla lo que las convierte en escenario ideal para el funcionamiento óptimo de estos dispositivos.

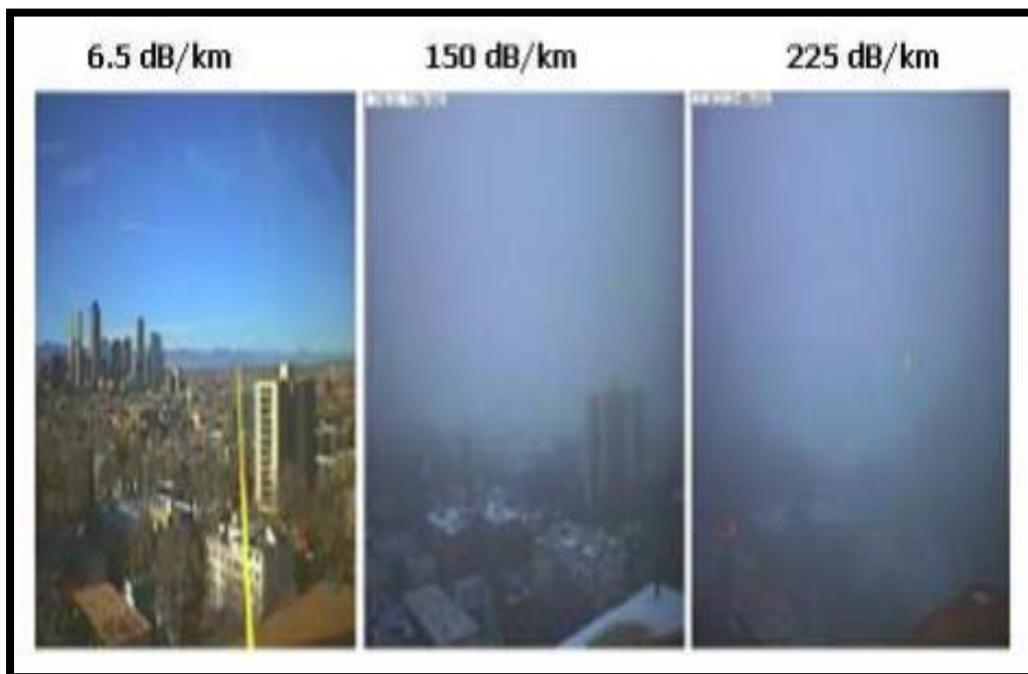
#### **Nieve.**

Son cristales de hielo que juntados forman copos de nieve con volumen variado. Dicho volumen de nieve es mayor que el de la lluvia. Sin embargo, en ambientes en que la nieve oculta las zonas de operación limitando considerablemente la visibilidad, la atenuación tiende a elevarse. La dispersión provocada por la nieve no es un inconveniente grave en la tecnología FSO debido al tamaño elevado de los copos de nieve en relación con la longitud de onda ejecutada. Cuando se presenta una atenuación de 3 dB/km a 30 dB/km, el efecto de un acelerado viento de nieve o una lluvia rápida con algo de niebla.

#### **Niebla.**

El efecto más problemático para los sistemas de comunicaciones FSO es la niebla ya que está constituida de diminutas pizcas de agua, las cuales poseen un radio cercano o equivalente a la longitud de onda que brinda un equipo óptico emisor de luz. En estados climatológicos donde hay existencia de niebla los trayectos de 0 a 2 km son los indicados para hallar visibilidad. Cuando dicho factor supera los 2 km a ese estado atmosférico se le conoce con el nombre de bruma. Como se ha dicho anteriormente, la altura de las edificaciones podría representar un problema de visibilidad para los equipos ópticos que se encuentren instalados allí, un caso que refleja este inconveniente es el de un edificio cuya altura es mayor a 300 metros. En la figura 20, la imagen del lado izquierdo deja ver un clima con cielo claro donde la atenuación es cercana a los 6.5 dB/km con distancia para visión de 2 km, la imagen situada en la mitad evidencia manifestación de una leve niebla cuya atenuación está en 150 dB/km aproximadamente y con una visión de 113

a 300 metros de trayecto, y en la imagen del lado derecho refleja la condición de niebla densa tanto que la edificación es casi imposible de ver provocando una atenuación de 225 dB/km con una visión de 75 metros de distancia (Suarez Serrano, 2014).



**Figura 23.** Visión considerando la atenuación en ambiente de niebla. Suarez, (2014, pág. 83).

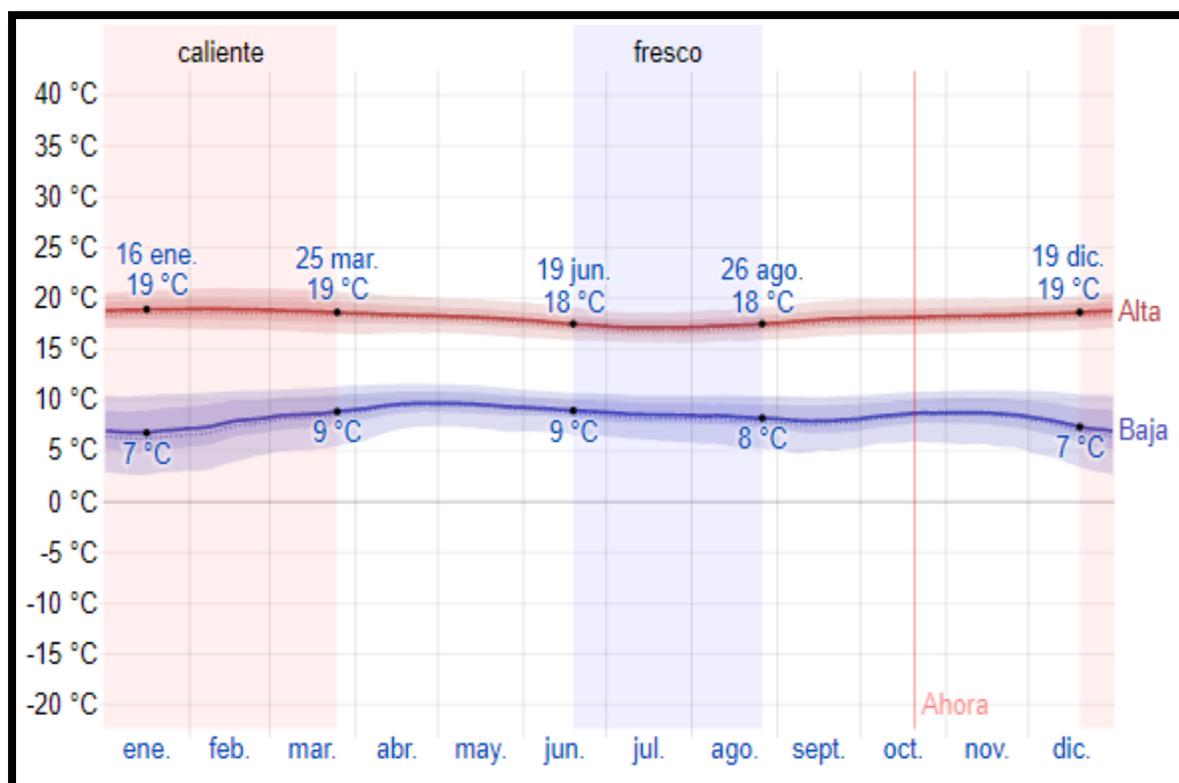
## Análisis del sistema para el enlace de comunicaciones ópticas inalámbricas FSO bajo diferentes parámetros desde la universitaria Agustiniiana hasta el colegio Agustiniiano Tagaste

### Condiciones climáticas para el funcionamiento de las comunicaciones ópticas inalámbricas FSO

#### El clima promedio en Bogotá.

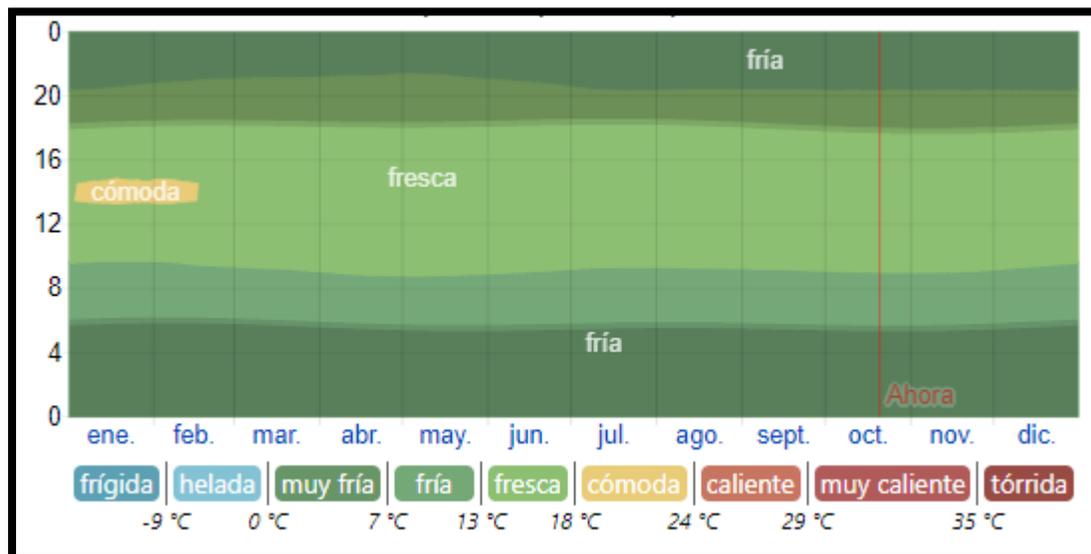
En el año 2020, la ciudad de Bogotá tiene estados cálidos que son agradables. También se manifiestan los estados de tiempo nublado con inviernos de ciclos breves, de ambiente fresco y húmedo con tiempos en su mayoría tipo nublado. Con el paso de los días, se presentan cambios de temperatura que van desde los 7°C hasta los 19°C. Ocasionalmente, disminuye hasta los 3°C y se eleva a un grado superior a los 21°C.

**Temperatura.** El clima cálido se extiende por un ciclo de 3.2 meses comprendidos desde el 19 de diciembre hasta el 25 de marzo. Con respecto al ambiente fresco, esta época del año se extiende por un ciclo de 2.2 meses que van desde el 19 de junio al 26 de agosto. Ambos escenarios se muestran en la gráfica de la figura 21.



**Figura 24.** Temperatura máxima y mínima promedio. Cedar Lake Ventures Inc. (2020, pág. 1).

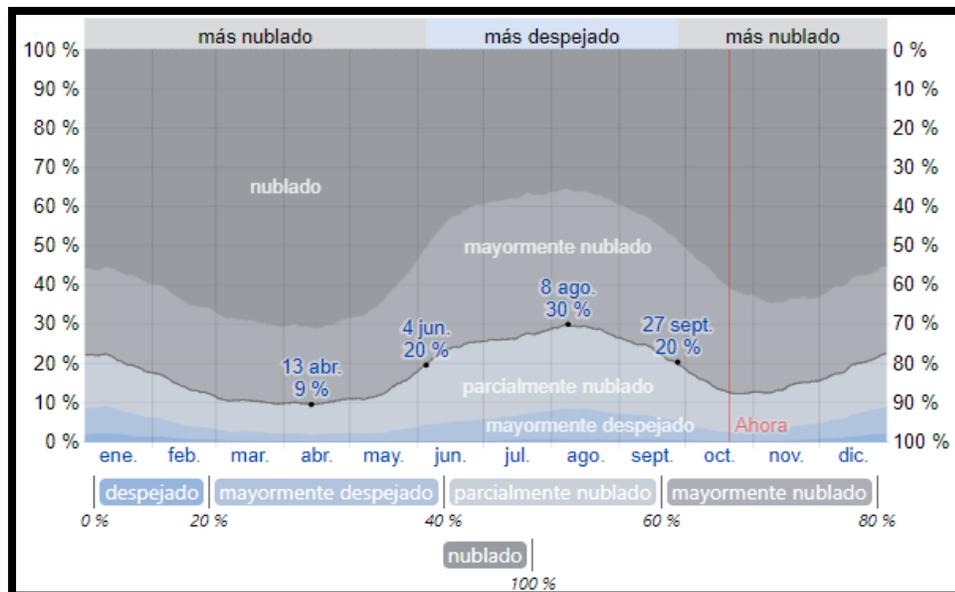
La siguiente grafica de la figura 22, demuestra el comportamiento de diferentes ambientes en la media en temperatura por cada hora durante el año.



**Figura 25.** Temperatura media por cada hora. Cedar Lake Ventures Inc, (2020, pág. 2).

**Nubes.** En la ciudad de Bogotá, el punto más claro del año empieza cerca del 4 de junio y se extiende por un ciclo de 3.7 meses y culmina sobre el 27 de septiembre. La fecha con más claridad durante el año es el 8 de agosto, la claridad del cielo permanece la mayor parte del tiempo. La nubosidad en el cielo se manifiesta de manera momentánea o inexistente en un ciclo menor o igual al 30%, la mayor nubosidad se presenta por un periodo del 70%.

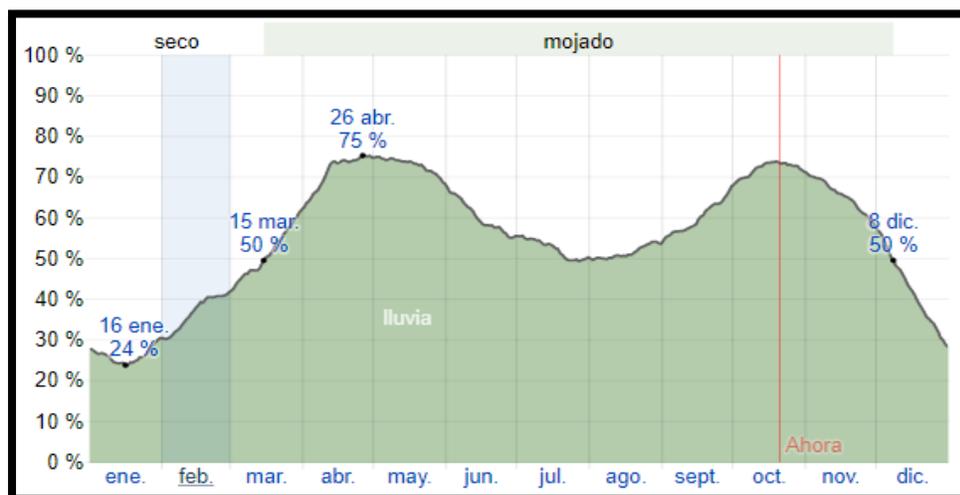
El punto de mayor nubosidad del año arranca sobre el 27 de septiembre y se extiende por un periodo de 8.3 meses culminando sobre el 4 junio. La fecha del año con elevada nubosidad es el 13 de abril. El cielo evidencia una elevada nubosidad en un ciclo que dura el 90%. Un estado de considerable o momentánea claridad tiene un ciclo de 9% de duración. Lo anterior, se ve reflejado de manera categorizada en la gráfica de la figura 23 que se mostrara a continuación.



**Figura 26.** Categorías de nubosidad Cedar Lake Ventures Inc., (2020, pág. 3).

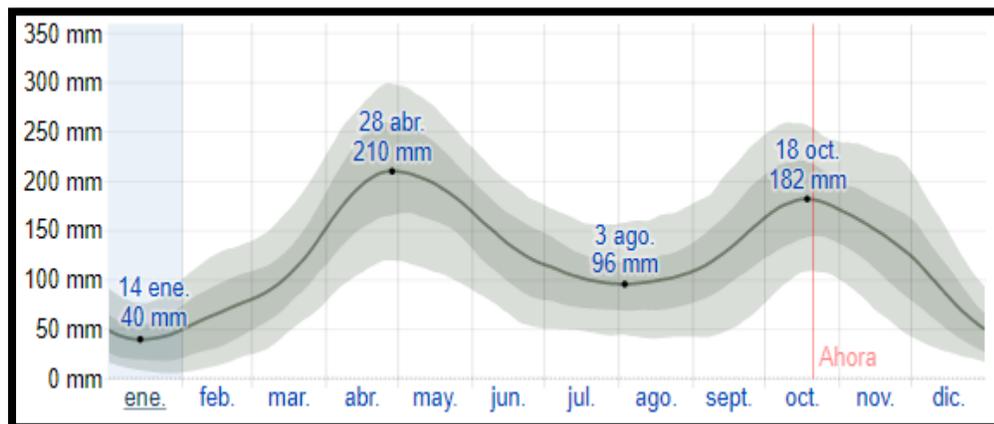
**Precipitación.** Un día de bajo este estado tiene casi 1 milímetro de líquido. En Bogotá, la posibilidad que en el año haya fechas con humedad cambia permanentemente. La época de mayor humedad se extiende por 8.8 meses. En un 50%, es posible que del 15 de marzo al 8 de diciembre haya una fecha que presente condición de humedad, la expectativa que el 26 de abril sea una fecha con humedad es del 75%.

El tiempo seco se extiende por un periodo de 3.2 meses comprendido entre el 8 de diciembre y el 15 de marzo. El día 16 de enero tiene el 24% de probabilidad que se dé un estado húmedo. La precipitación solo se refleja con la lluvia el día 26 de abril y tiende a acercarse al 75%.



**Figura 27.** Probabilidad diaria de precipitación. Cedar Lake Ventures Inc., (2020, pág. 4).

Con respecto a lluvia, aunque no es un factor importante, pero sí de consideración, se debe observar la precipitación de la misma durante ciertos periodos como se observa en la figura 25.



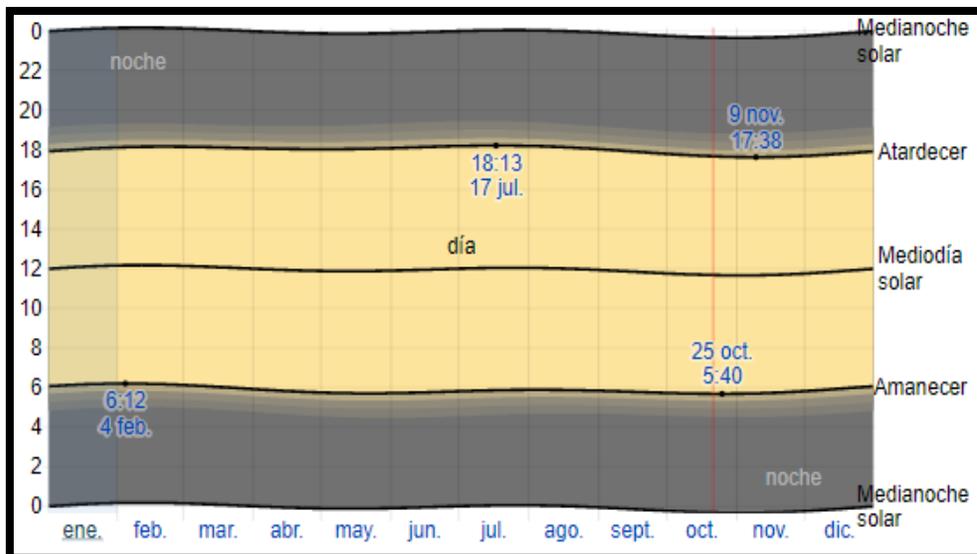
**Figura 28.** Precipitación de lluvia mensual promedio. Cedar Lake Ventures Inc., (2020, pág. 5).

**Sol.** La durabilidad del sol no tiene un cambio muy grande en el año. El 21 de diciembre es cuando la luz del sol tiene menor duración, la cual equivale a 11 horas y 52 minutos. La fecha del 20 de junio es cuando la luz del sol tiene mayor duración, la cual equivale a 12 horas y 23 minutos. A continuación, se muestra la figura 26 que evidencia el número de horas que existe visibilidad del sol.



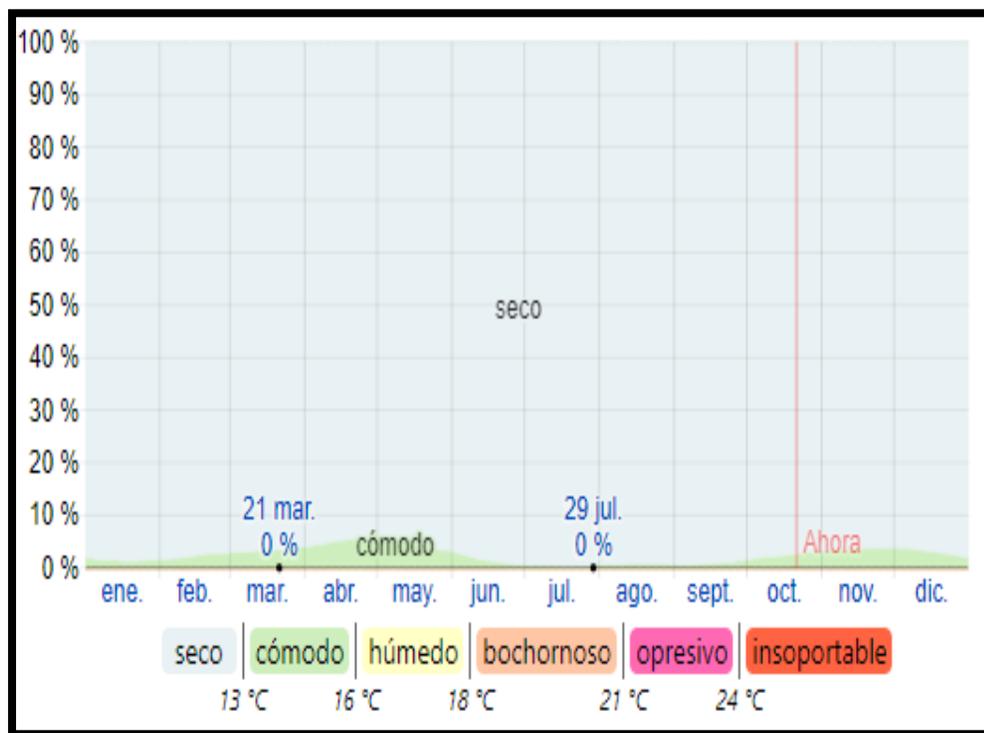
**Figura 29.** Horas de luz natural y crepúsculo. Cedar Lake Ventures Inc., (2020, pág. 6).

Cabe aclarar que, en la madrugada del 25 de octubre, el sol comienza a ponerse hacia las 5:40 y 31 minutos después el sol se pone más tarde el día 6:12. Lo más temprano que sale el sol es hacia las 17:38 horas del 9 de noviembre. A las 18:13 horas del 17 de julio es más tarde cuando cae el sol. Todo lo anterior, se evidencia en la gráfica de la figura 27.



**Figura 30.** Salida del sol y puesta del sol con crepúsculo (Cedar Lake Ventures Inc., 2020, pág. 7).

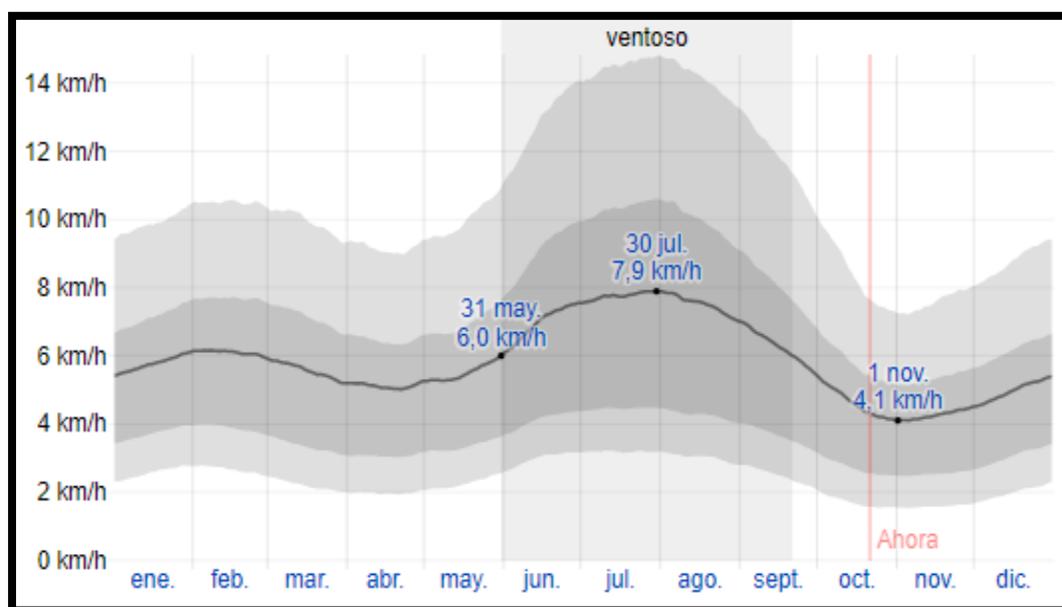
A continuación, se expone una gráfica donde indica la elevación de humedad que existe en la ciudad de Bogotá, se debe considerar los niveles de helaje son bajos el ambiente es de tiempo seco. En cambio, cuando dichos niveles son elevados se presentarán condiciones de humedad.



**Figura 31.** Niveles de comodidad de la humedad. Cedar Lake Ventures Inc., (2020, pág. 8).

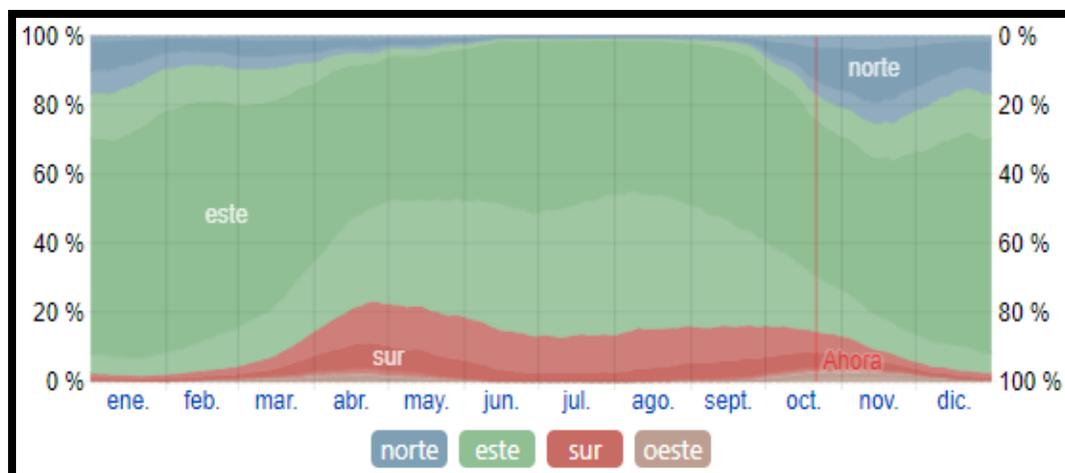
**Viento.** En este estado del tiempo se pretendió evaluar la rapidez y directividad del viento a 10 metros de una superficie, terreno o suelo. Esta condición derivada del clima obedece a la ubicación geográfica donde se localice.

En un ciclo de 3.7 meses comprendidos desde el 31 de mayo hasta el 21 de septiembre, se presentan vientos con mayor rapidez. Dicha rapidez es mayor a 6 km por hora. La fecha con mayor brisa es el 30 de julio con una media de rapidez cercana los 8 km por hora. En un periodo de 8.3 meses entre el 21 de septiembre al 31 de mayo se evidencia más calma. Dicho aspecto se manifiesta en toda su magnitud el 1 de noviembre con una media de rapidez de 4.1 km por hora. En la gráfica de la figura 29, se observa el comportamiento del viento descrito anteriormente.



**Figura 32.** Velocidad promedio del viento. Cedar Lake ventures Inc, (2020, pág. 9).

En la siguiente grafica de la figura 30, se observa la directividad de las brisas en la ciudad de Bogotá (Cedar Lake Ventures Inc, 2020).



**Figura 33.** Dirección del viento. Cedar Lake Ventures Inc., (2020, pág. 10).

### **El clima de la localidad de Kennedy.**

Kennedy está localizado al suroccidente de Bogotá, su estación para medición climática se encuentra en el aeropuerto El Dorado. La sensación térmica es de 16°C, el punto de rocío es de 8°C y el nivel de humedad llega al 59% con visibilidad de 10 km.

La salida del sol se da cerca de las 5:40 horas, el sol se oculta a las 17:41 aproximadamente, el periodo de luminosidad que tiene el sol es de 12 horas (FORECA Ltd. , 2020).

### **Código internacional de visibilidad.**

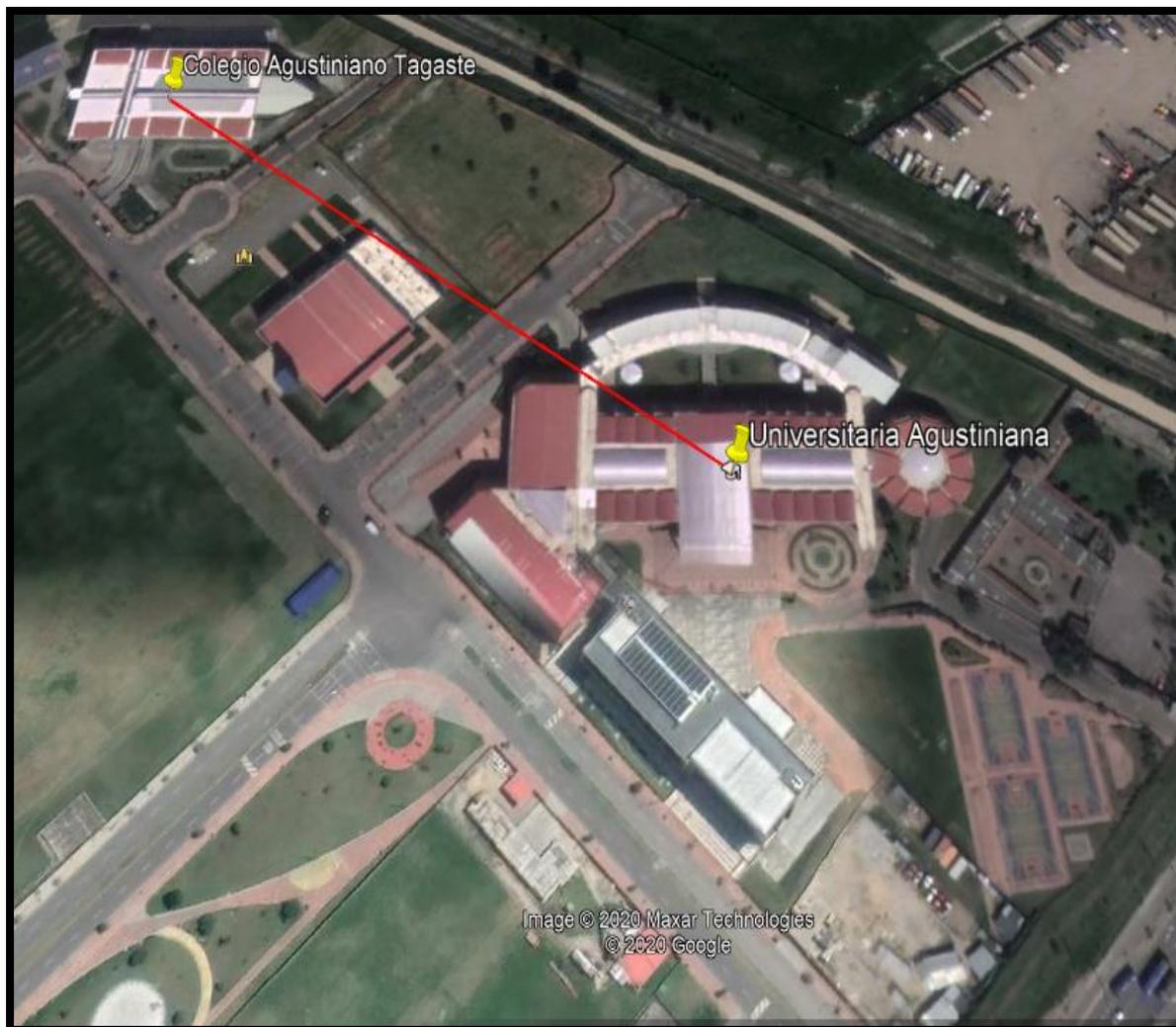
La figura 15, indica el patrón de visibilidad con las diferentes condiciones climáticas, los distintos tipos de niebla causados que en señales sobre trayectos cortos sean afectadas por la atenuación. El nivel de partículas de niebla en el canal de propagación depende de la altura del sitio en donde se encuentra el sistema. A continuación, se observará la relación que existe entre la visibilidad y la atenuación.

Código internacional de visibilidad					
Condiciones meteorológicas	Precipitación		Visibilidad (m)	Atenuación (dB/km)	
	mm/h				
Niebla densa			0		
Niebla espesa			50	315	
Niebla moderada			200	75	
Niebla ligera			500	28,9	
Niebla muy ligera	Nieve	Tormenta	100	770	18,3
				1 000	13,8
Neblina ligera	Nieve	Lluvia intensa	25	1 900	6,9
				2 000	6,6
Neblina muy ligera	Nieve	Lluvia media	12,5	2 800	4,6
				4 000	3,1
Tiempo despejado	Nieve	Lluvia ligera	2,5	5 900	2
				10 000	1,1
Tiempo muy despejado	Nieve	Llovizna	0,25	18 100	0,6
				20 000	0,54
				23 000	0,47
				50 000	0,19

Figura 34. Código internacional de visibilidad. Carballo González, (2019, pág. 8).

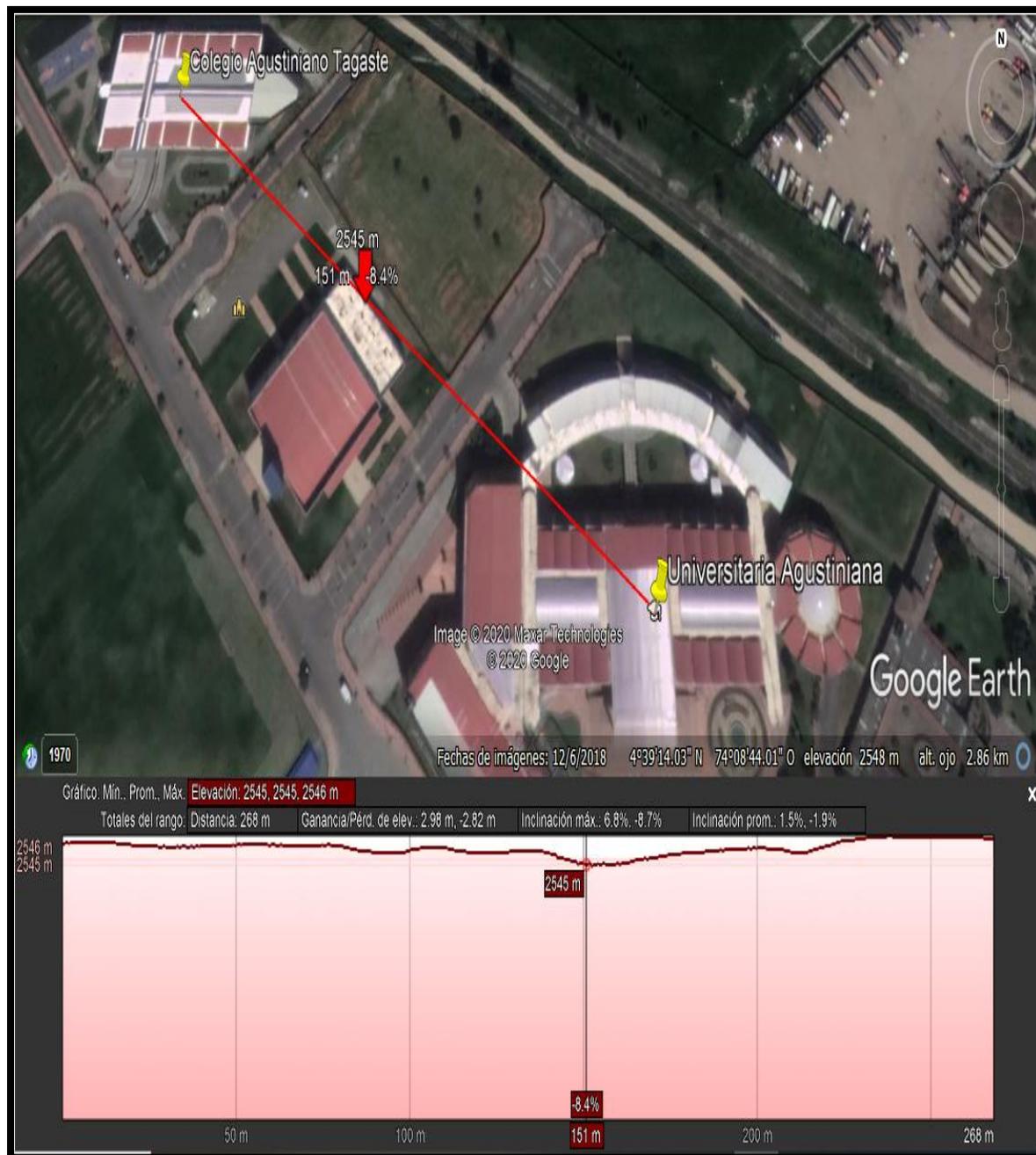
### Condiciones geográficas para el funcionamiento de las comunicaciones ópticas inalámbricas FSO

Para el diseño de un enlace de comunicaciones ópticas inalámbricas FSO, los lugares elegidos de la localidad de Kennedy son la Universitaria Agustiniana sede Tagaste y el colegio Agustiniano Tagaste ambos ubicados en la UPZ Tintal Norte. En la figura 31, se observan las dos sedes del enlace cuya distancia entre ambas es de 268 metros.



**Figura 35.** Trayecto entre la Universitaria Agustiniana y el Colegio Agustiniano Tagaste. Fuente propia, (2020, pág. 62).

En la siguiente figura, se observa que la línea de vista entre la universitaria Agustiniana y el colegio Agustiniano Tagaste se encuentra en óptima posición. Se debe considerar una leve pérdida de elevación, ya que la Iglesia San Agustín de Fontibón indicada en la imagen se encuentra intermedio entre ambas sedes. Cabe aclarar que esto puede variar cambiando la zona en donde se hace el montaje del equipo óptico en cada ubicación.



**Figura 36.** Línea de vista y leve pérdida indicada entre la universitaria Agustiana y el Colegio Agustino Tagaste. Fuente propia, (2020, pág. 63).

### Fabricantes proveedores de equipos ópticos FSO

A continuación, se detallan tablas de distintas empresas fabricantes de equipos ópticos FSO que existen en el mercado mostrando aspectos generales a considerar en el sistema de transmisión.

## fSONA.

La compañía fSONA Networks se encarga de fabricar equipos de comunicaciones ópticas inalámbricas en espacio libre con el propósito de facilitar soluciones a las demandas actuales de ancho de banda, mejorando el acceso y la velocidad de banda ancha en lugares donde las tecnologías cotidianas no llegan por factores propios de las mismas. Todos los modelos fSONA trabajan Full-dúplex bajo una longitud de onda de 1550 nm. Estos equipos definen los parámetros para la transmisión y canalización del sistema FSO con diferentes condiciones que se verán a continuación (fSONA, 2020).



**Figura 37.** Equipo óptico del fabricante fSONA. fSONA, (2020).

Tabla 4.

*Modelos de equipos ópticos fSONA*

MODELO	TASAS Y PROTOCOLOS DE TRANSMISION	RANGO OPERACIONAL			POTENCIA SALIDA
		DISTANCIA	ATENUACION	CONDICION ATMOSFERICA	
10G-E +	10 Gbps	100 m a 1000 m	3 dB/km	Aire limpio	pico de 800 mW (2X400 mW)
		100 m a 600 m	10 dB/km	Lluvia extrema	
1250-E2	Gigabit Ethernet: 1.25 Gbps	50 m a 2700 m	3 dB/km	Aire limpio	pico de 320 mW (2X160 mW)
		50 m a 1400 m	10 dB/km	Lluvia extrema	

	OC-12/STM-4: 622 Mbps	50 m a 2700 m	3 dB/km	Aire limpio	pico de 160 mW
		50 m a 1400 m	10 dB/km	Lluvia extrema	
2500-E3	OC48 / SMT16, 2.5 Gbps	50 m a 1900 m	3 dB/km	Aire limpio	
		50 m a 1000 m	10 dB/km	Lluvia extrema	
	Gigabit Ethernet: 1.25 Gbps	50 m a 1900 m	3 dB/km	Aire limpio	
		50 m a 1000 m	10 dB/km	Lluvia extrema	
1250-Z1	Gigabit Ethernet: 1.25 Gbps	50 m a 500 m	3 dB/km	Aire limpio	
		50 m a 350 m	10 dB/km	Lluvia extrema	
	OC-12/STM-4: 622 Mbps	50 m a 500 m	3 dB/km	Aire limpio	
		50 m a 350 m	10 dB/km	Lluvia extrema	
2500-Z2	OC48/STM 16, 2.5 Gbps	50 m a 500 m	3 dB/km	Aire limpio	
		50 m a 350 m	10 dB/km	Lluvia extrema	
	Gigabit Ethernet: 1.25 Gbps	50 m a 500 m	3 dB/km	Aire limpio	
		50 m a 350 m	10 dB/km	Lluvia extrema	

*Nota.* Esta lista de modelos fueron elegidos de acuerdo a parámetros establecidos para el análisis del proyecto (fSONA, 2020).

### **CableFree.**

Desde 1997, esta compañía en Wireless Excellence Limited ha sido la primera en proporcionar equipos para las comunicaciones ópticas en espacio libre. Esta serie de productos FSO tiene avances en la adecuación de la potencia mediante el mecanismo ATPC (Control Automático de la Potencia Transmitida) con el fin de mejorar la disipación de la señal provocada por efectos desfavorables, así mismo, asegura eficiencia y disponibilidad durante la transmisión. Los modelos presentados a continuación tienen ATPC, Full-dúplex, receptor APD, banda ancha de

1.5 Gbps bajo el estándar Gigabit Ethernet y una longitud de onda óptica de 780 nm. Además, se detalla las especificaciones de operación (CableFree, 2020).



**Figura 38.** Equipo óptico CableFree. CableFree, (2020).

Tabla 5.

*Modelos de equipos ópticos CableFree*

ESPECIFICACIONES	MODELOS				
	G200	G500	G700/1000	G1500	G2000
Distancia	200 m	500 m	700/1000 m	1500 m	2000 m
Potencia de transmisión	30.2 mW	30.2 mW	79.43 mW	79.43 mW	79.43 mW

*Nota.* Modelos del fabricante seleccionados para la ejecución del análisis del proyecto (CableFree, 2020).

### **AIRLINX Communications Inc.**

Es una compañía fundada en 1996 y desde su comienzo ha venido creciendo en el mundo inalámbrico ofreciendo tasa de datos a inversiones más económicas. Esta empresa se destaca por su capacidad de integrar redes de área local (LAN) sin ningún medio guiado para hospitales, centros educativos y empresas con el fin de brindar eficiencia en los servicios de conexión a internet, telefonía IP y Gateway buscando reducir costos. De la amplia gama de equipos ópticos, han sido seleccionados dos dispositivos de distintas series con tasa de datos de 1.25 Gbps, receptor APD y transmisión Full-Dúplex. El dispositivo FlightStrata-G posee un sistema óptico de cuatro haces con seguimiento automático y control automático de potencia (APC), este equipo será descritos en la tabla 6. De la serie Canobeam DT – 100 ha sido elegido un equipo óptico que tiene como aspecto importante la función 3R (remodelación, reprogramación y regeneración) ayudando que la señal de datos emitida no pierda potencia y calidad, especificaciones que serán detalladas en la tabla 7. Ambas tablas se mostrarán a continuación (AIRLINX, 2020).



**Figura 39.** Equipo óptico FlightStrata-G. AIRLINX, (2020).

Tabla 6.

*Equipo óptico serie Flight.*

MODELO	ESPECIFICACIONES			
	Longitud de onda	Clima y potencia de transmisión		
		Neblina ligera	Niebla fina	Niebla moderada
		Lluvia ligera	Lluvia fuerte	Monzón
	2 mW	10 mW	1000 mW	
FlightStrata-G	850 nm	2 km	1.1 km	1.1 km

*Nota.* Único modelo del fabricante seleccionado para la ejecución del análisis del proyecto (AIRLINX, 2020).



**Figura 40.** Equipo óptico Canobeam DT – 130. AIRLINX, (2020).

Tabla 7.

*Equipo óptico serie Canobeam DT – 130.*

MODELO	ESPECIFICACIONES		
	Distancia	Longitud de onda	Potencia Transmisión
Canobeam DT - 130	100 m a 1000 m	785 nm	11 mW

*Nota.* Único modelo de la serie Canobeam seleccionado y útil para la realización del análisis (AIRLINX, 2020).

### **EC SYSTEM.**

Esta empresa de soluciones en telecomunicaciones de financiación privada ubicada en Republica Checa fue constituida en el año 2010 con especialización en óptica de espacio libre, enlace punto a punto, punto a multipunto y microondas. EC SYSTEM FSO consiste en tecnología láser, la cual está protegida contra interferencias apoyada por un sistema de seguimiento automático que evita la concurrencia en pérdidas de enlace haciendo ágil y fácil la instalación de los equipos. Esta compañía es proyectada para operadores de telecomunicaciones, proveedores de internet y redes de CCTV. En cuanto a las soluciones mencionadas al principio, una de ellas es el acoplador óptico inalámbrico (FSO), el cual funciona con modo de transmisión Full-Dúplex y longitud de onda 1550 nm. Las demás características serán especificadas a continuación (EC SYSTEM, 2020).



**Figura 41.** Equipo óptico EC SYSTEM. EC SYSTEM, (2020).

Tabla 8.

*Modelo de equipos ópticos EC SYSTEM.*

MODELO	ESPECIFICACIONES				
	Velocidad de datos (Gbps)	Ancho de banda (Mbps)	Distancia	Atenuación	Potencia Transmisión
EL-1GS	1	1250	1200 m	27 dB/km	75 mW
EL-1GL	1	1250	4400 m	44 dB/km	72 mW
EL-10G	10	10312,5	1500 m	18 dB/km	72 mW
EL-30G	3 puertos 10 Gbps SFP+	10312,5 30937,5	1300 m	18 dB/km	72 mW

*Nota.* Los modelos elegidos van desde la capacidad más baja hasta la capacidad más alta (EC SYSTEM, 2020).

### **Análisis económico**

Para analizar este factor económico se deben considerar las siguientes especificaciones de cada fabricante:

#### **fSONA.**

Para transmitir tasas desde los 622 Mbps hasta 10 Gbps, los equipos ópticos consideran:

- Opciones de interfaz mediante fibra optica multimodo tipo SX para distancias cortas en longitud de onda de 850 nm y LX para distancias largas en longitud de onda de 1550 nm.
- Temperatura minima de operación es de -40°C y una maxima de 60°C.
- Consumo de energia de 40 Watts.
- Peso de 8 Kg.
- Interface de linea de comando (CLI) via USB o mediante direccion IP.
- Controlador terminal.
- Poseen 2 laseres para crear redundancia durante la transmisi3n.
- Seguridad de láser clase 1M.
- Protocolo Simple de Administracion de Red (SNMP).
- Sistema de seguimiento automatico (fSONA, 2020).

#### **CableFree.**

Para transmitir tasas de 1.5 Gbps, los equipos ópticos consideran:

- Consumo de energia de 40 Watts.
- Temperatura minima de operación es de -20°C y una maxima de 60°C.

- Seguridad de láser clase 1M
- Poseen 2 laseres para crear redundancia durante la transmisión.
- Peso desde 4.2 Kg hasta 9 Kg.
- Control Automatico de la potencia de transmisión (ATPC).
- Opciones de interfaz mediante fibra optica multimodo tipo SX para distancias cortas y fibra optica multimodo LX para distancias largas.
- Interfaz de gestion SNMP V2.
- Módem GSM.
- LinkManager y Vista de alarma contra intercepcion u obstaculos (CableFree, 2020).

#### **AIRLINX Communications Inc.**

El modelo óptico Canobeam DT – 130 con tasa de 1.25 Gbps tiene las siguientes consideraciones:

- Consumo de energia de 20 Watts.
- Temperatura minima de operación es de -20°C y una maxima de 50°C.
- Seguridad de láser clase 1M.
- Peso aproximado de 8 Kg.
- Opciones de interfaz mediante fibra optica multimodo tipo SX para distancias cortas y fibra optica monomodo y multimodo LX para distancias largas.
- Funcion 3R (remodelación, reprogramación y regeneración).
- Para su administracion utiliza el Protocolo Simple de Administracion de Red (SNMP) para supervisar el enlace, el protocolo Telnet para supervision y envio y el Protocolo de Transferencia de Archivos (FTP). Todo lo anterior, de extremo a extremo.
- Sistema de seguimiento automatico (AIRLINX, 2020).

El modelo óptico FlightStrata-G con tasa de 1.25 Gbps tiene las siguientes consideraciones:

- Consumo de energia de 40 Watts.
- Temperatura minima de operación es de -25°C y una maxima de 50°C.
- Seguridad de láser clase 1M.
- Peso aproximado de 1.11 Kg.
- Poseen 4 laseres para crear redundancia durante la transmisión.

- Opciones de interfaz mediante fibra optica multimodo tipo SX para distancias cortas y fibra optica multimodo LX para distancias largas.
- Control de Potencia Automatico (APC).
- Protocolo Simple de Administracion de Red (SNMP).
- Sistema de seguimiento automatico (AIRLINX, 2020).

### **EC SYSTEM.**

Los modelos ópticos EL-1GS y EL1GL con tasa de 1 Gbps tienen las siguientes consideraciones:

- Consumo de energia de 40 - 50 Watts.
- Temperatura minima de operación es de -20°C y una maxima de 50°C.
- Seguridad de láser clase 1M.
- Peso entre 9 y 9.4 Kg.
- Opciones de interfaz mediante fibra optica multimodo tipo SX para distancias cortas y fibra optica monomodo y multimodo LX para distancias largas.
- Protocolo Simple de Administracion de Red (SNMP).
- UDP (Firmware) que brinda la posibilidad de controlar una operación con un sistema operativo interno del componente.
- Sistema de seguimiento automatico.

Los modelos ópticos con tasas que van desde 1 a 30 Gbps tienen las siguientes consideraciones:

- Consumo de energia de 40 - 50 Watts.
- Temperatura minima de operación es de -20°C y una maxima de 50°C.
- Seguridad de láser clase 1M.
- Peso entre 9 y 9.4 Kg.
- Opciones de interfaz mediante fibra optica multimodo tipo SX para distancias cortas y fibra optica monomodo y multimodo LX para distancias largas.
- Protocolo Simple de Administracion de Red (SNMP).
- UDP (Firmware) que brinda la posibilidad de controlar una operación con un sistema operativo interno del componente.
- Sistema de seguimiento automatico (EC SYSTEM, 2020).

A continuación, se mostrará la tabla con los costos que tienen los elementos para el montaje de un enlace FSO incluyendo ambos extremos. Es decir, transmisor y receptor.

Tabla 9.

*Costos de equipos ópticos por fabricante.*

<b>FABRICANTES</b>	<b>MODELOS ÓPTICOS</b>	<b>PRECIOS</b>	
fSONA	1250-E+	\$	62.850.035
	2500-E+	\$	70.115.935
	10G-E+	\$	81.014.785
CableFree	G200	\$ 9.082.375	\$ 79.924.900
	G500		
	G700/1000		
	G1500		
	G2000		
AIRLINX Communications Inc.	FlightStrata-G	\$	68.662.755
	Canobeam DT - 130		
EC SYSTEM	EL-1GS	\$	54.494.250
	EL-1GL		
	EL-10G	\$	84.284.440
	EL-30G	\$	145.318.000

*Nota.* Para los costos de cada modelo se consultó durante mucho tiempo vía e-mail con los representantes de cada fabricante los cuales de manera gradual me proporcionaron la información consignada en esta tabla (fuente propia).

### **Simulación y realización de pruebas de validación del diseño propuesto**

La empresa Optiwave Systems Inc. ha venido ascendiendo en el último tiempo con ideas reformadoras para el diseño y simulación de enlaces y redes ópticas. La empresa fue fundada en 1994 y su software ha sido apoyado por más de 1000 entidades ubicadas en 70 países alrededor del mundo. Uno de sus productos disponibles en el mercado es Optisystem que está basado en algoritmos para distintos cálculos, brinda una visión acerca de la rentabilidad y los parámetros que limitan el diseño del sistema evitando una pérdida económica en proyectos potenciales. Una de sus aplicabilidades radica en los sistemas de comunicación óptica inalámbrica FSO midiendo la utilidad del sistema en cuanto a calidad y potencia de la señal, y el comportamiento de la misma (Optiwave Systems Inc., 2020).

El simulador Optisystem mide rendimientos mediante indicadores como la tasa de error de bit (BER) que busca verificar la cantidad de errores presentados en la transmisión de información y que podrían degradar la funcionalidad del sistema completo. Es decir, la tasa de error de bit se puede interpretar como la cantidad de errores que hay en cierto número de bits dirigidos al receptor. Una manera de saber que el sistema responde de forma óptima es cuando la tasa de error de bit es mínima debido a que el medio de propagación posee un nivel elevado en la relación señal/ruido. Es decir, si en el canal hay manifestación de ruido el sistema tendrá errores de consideración.

El siguiente indicador es el factor de calidad  $Q$ , el cual entre más grande sea la pérdida de potencia más bajo será este factor. El inconveniente que más genera alteraciones en la forma de onda es el ruido y este determinara la tasa de error de bit lo que evaluara si aumenta o disminuye el rendimiento del receptor.

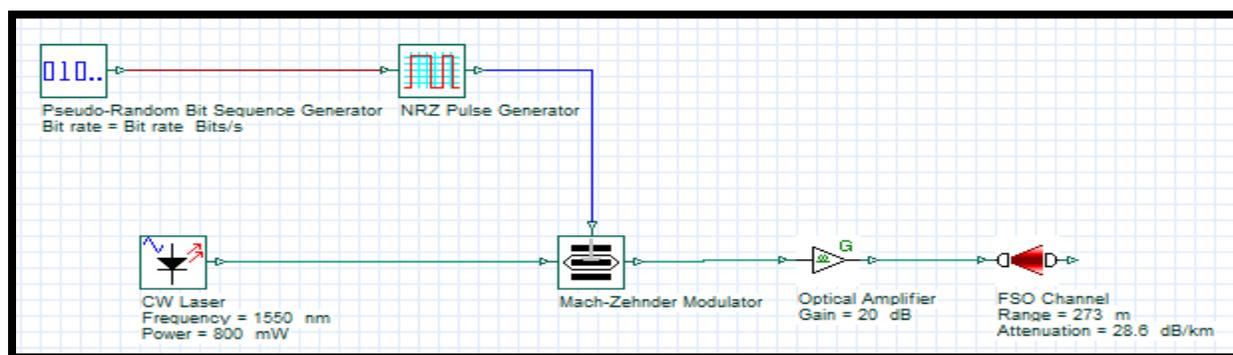
Otro indicador es el diagrama de ojo, que permite visualizar en qué situación se encuentra un enlace FSO mostrando las condiciones que tiene la señal y se presenta alteraciones o desfase brindando un panorama rápido y amplio del comportamiento del sistema. Así mismo, proporciona datos concretos sobre deficiencias encontradas en el canal.

### **Componentes del simulador Optisystem para la creación de sistemas de comunicación FSO**

Como se ha nombrado en párrafos anteriores, un sistema de comunicación FSO esté compuesto por un transmisor, un canal y un receptor. Existen esquemas básicos para generar dicho sistema, pero suele presentar inconvenientes para contrarrestar la atenuación en el medio de

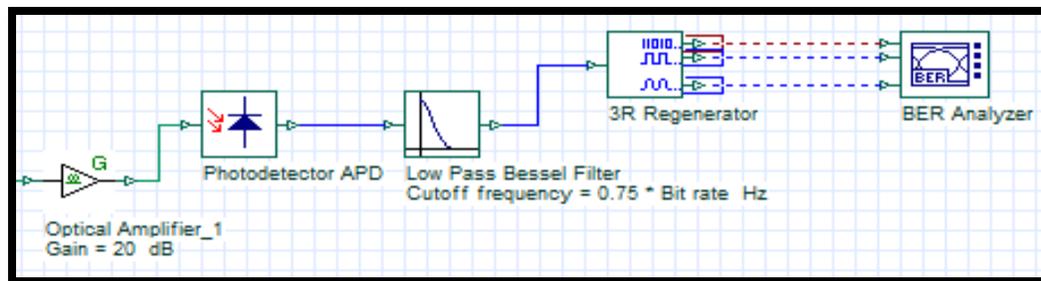
propagación y para ello es fundamental agregar ciertos componentes que ayuden a mitigar el problema.

Para el esquema de transmisión óptica se agregarán ciertos elementos. El primero es un generador de secuencia binaria pseudoaleatoria (P-RBS) que proporciona los bits para su respectiva transmisión. El segundo elemento es un generador eléctrico de impulsos sin retorno a cero (NRZ) que ayuda a cifrar los datos del generador de PRBS, el tercer elemento es el transmisor óptico que es la esencia del sistema que proporciona el haz de luz. El siguiente elemento es el modulador Mach-Zehnder que cambia la energía de la luz láser dependiendo de cuanta intensidad salga del modulador, dicho láser pasa por el amplificador óptico cuya ganancia es de 20 dB y finalmente está el medio de propagación. La siguiente figura se observa los parámetros establecidos.



**Figura 42.** Esquema de transmisión óptica FSO. Optisystem, (2020).

En cuanto al esquema de recepción óptica se contemplan varios elementos. El primero es otro amplificador a parte del ya agregado para que minimizar la pérdida de potencia cuando pasa por el medio de propagación. Enseguida, está el fotodetector APD, el cual es utilizado en todos los modelos de equipos FSO que fueron previamente consultados. El tercer elemento que va seguido del APD es el filtro pasa baja LPF Bessel con el fin de impedir señales con frecuencias altas y, por último, un regenerador 3R para rehabilitar la señal con bits que fue modulada en la transmisión óptica y que sirva para que sea nuevamente emitida sin daños que pueden provocarse por cuestiones climáticas como se ha dicho en párrafos anteriores. Ese comportamiento de la señal será observado en el último elemento del sistema que es el diagrama de ojo. Todos los elementos se pueden apreciar en la siguiente figura (Giler León, 2019).



**Figura 43.** Esquema de recepción óptica FSO. Optisystem, (2020).

### Escenarios de prueba del sistema de comunicación FSO propuesto

Para establecer los escenarios de prueba se deben tener en cuenta las temáticas presentadas anteriormente y que serán utilizadas de la siguiente manera:

- Las tasas de bit ayudaran a determinar los servicios que pueden brindar cada equipo óptico.
- Apoyados en la caracterizacion climatica de Bogotá y la localidad de Kennedy, del codigo internacional de visibilidad se escogieron los valores mas altos de la atenuación de cada condiciones metereologica para generar las simulaciones.

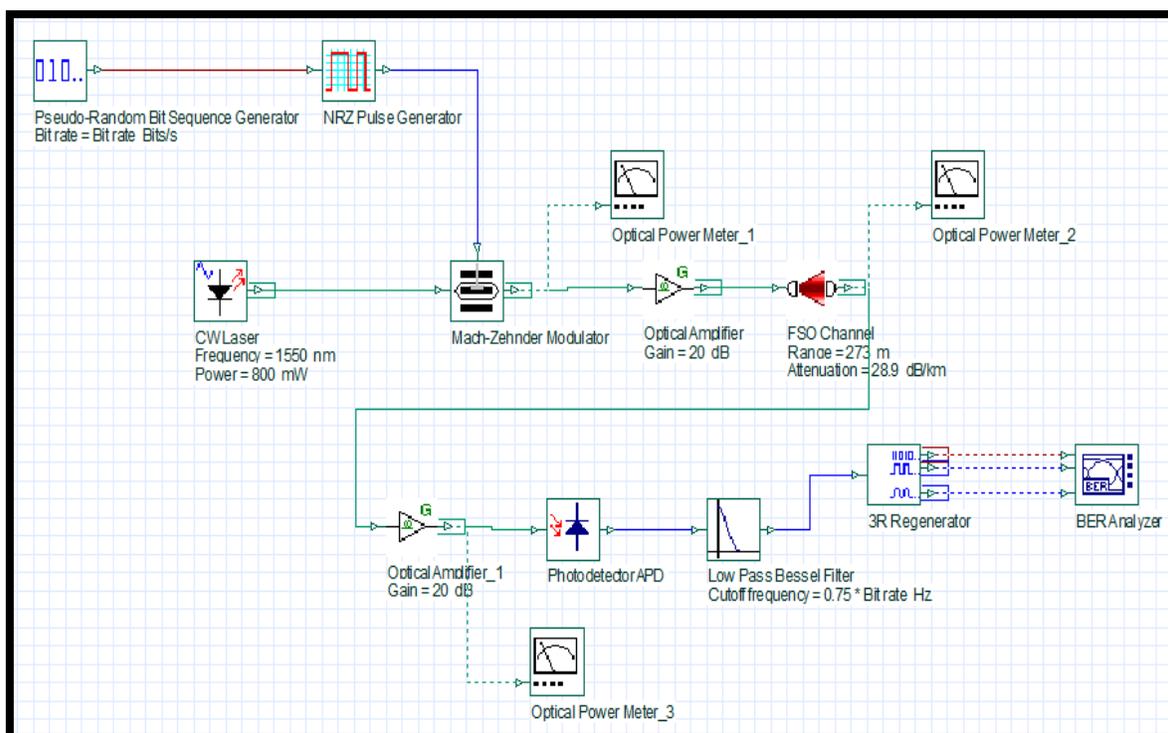
Tabla 10.

*Atenuación en relación a las condiciones meteorológicas.*

CONDICIONES METEREOLÓGICAS	ATENUACION dB/km
Tiempo despejado	0.54
Llovizna	0.6
Lluvia ligera	2
Neblina muy ligera	3.1
Lluvia media	4.6
Neblina ligera	6.6
Lluvia intensa	6.9
Niebla muy ligera	13.8
Niebla ligera con tormenta	18.3
Niebla moderada	28.9

*Nota.* La tabla se realizó con base al código internacional de visibilidad que se encuentra en la caracterización climática hecha en apartados anteriores (Carballo González, 2019, pág. 8).

- Los modelos FSO con su nivel de tolerancia en tasas de bit, distancias, potencia de transmisión y atenuación. Si se encuentra en las especificaciones del fabricante se considerara la divergencia del haz láser ya que entre mas pequeño sea este factor no sera afectado por problemas de distancia o de atmosfera. A mayor divergencia mas ancho sera el láser emitido.
- El umbral sera el minimo de señal que puede recibir el receptor en el sistema FSO.
- Si esta indicado se tendra en cuenta el diametro de apertura del receptor o dispositivo seleccionado.
- En la simulacion realizada en Optisystem se colocaran medidores de potencia en tres puntos clave. El primero estara a la salida de la fuente laser con el fin de verificar que la potencia sea la que se configuro, el segundo estara a la salida del modulador donde se observa cuanta potencia se pierde con la modulacion ejecutada, el tercero estara ubicado despues del canal FSO, es decir, cuando haya pasado por el medio de propagación, y el ultimo estara en el esquema de recepcion despues del amplificador óptico para observar cuanta potencia recepcionara el sistema FSO.



**Figura 44.** Medidores de potencia en el sistema de comunicación FSO propuesto. Optisystem, (2020).

Para cada escenario se obtiene la imagen de cada condición meteorológica de la tabla anterior, por cada una se redactan los resultados del factor de calidad Q, mínima tasa de error de bit (BER) y umbral de seguridad. Al final, para los distintos modelos de cada escenario se darán las conclusiones del comportamiento mostrado en los resultados de cada aspecto y los servicios que puede brindar.

### Primer escenario - fSONA.

Esta configuración se hará con los datos de modelos ópticos FSO del fabricante fSONA, los cuales están consignados en tablas anteriores. Estos equipos trabajan con transmisión Full-Dúplex y longitud de onda de 1550 nm. Debido a que el fabricante no brinda información sobre la divergencia del haz láser, el simulador Optisystem asigna por defecto 2 mili-radianes/segundo.

**Modelo 10G-E+ Tasa de 10 Gbps.** Para la transmisión el dispositivo emplea una potencia de 800 mW y 10 cm de diámetro de la apertura del receptor. De cada condición meteorológica se obtuvieron los siguientes datos.

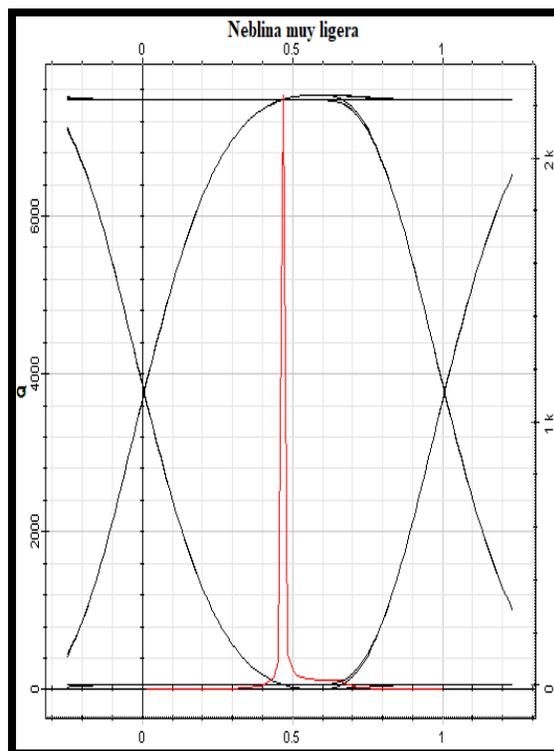
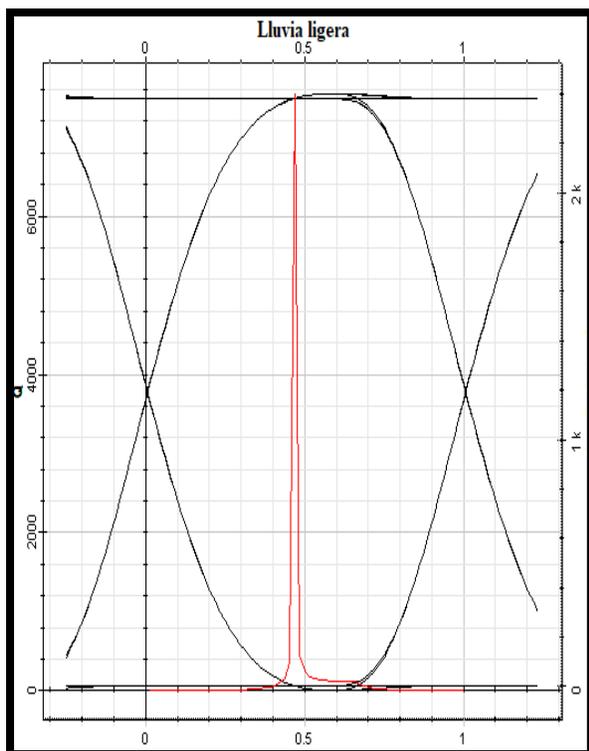
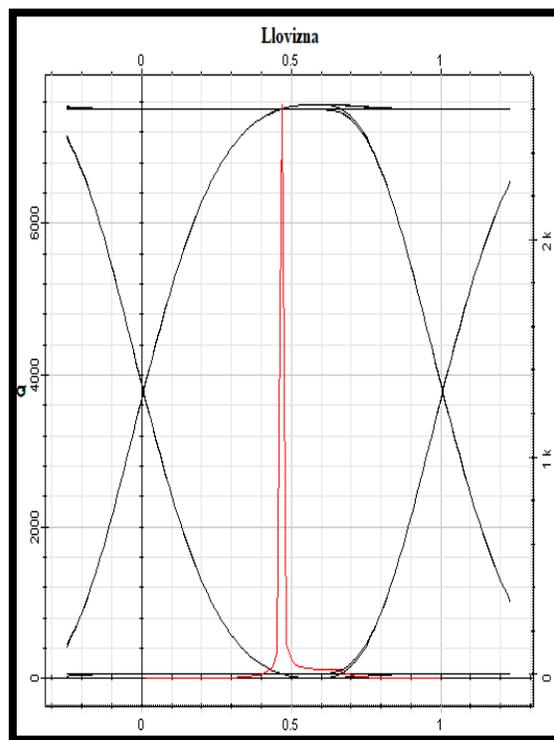
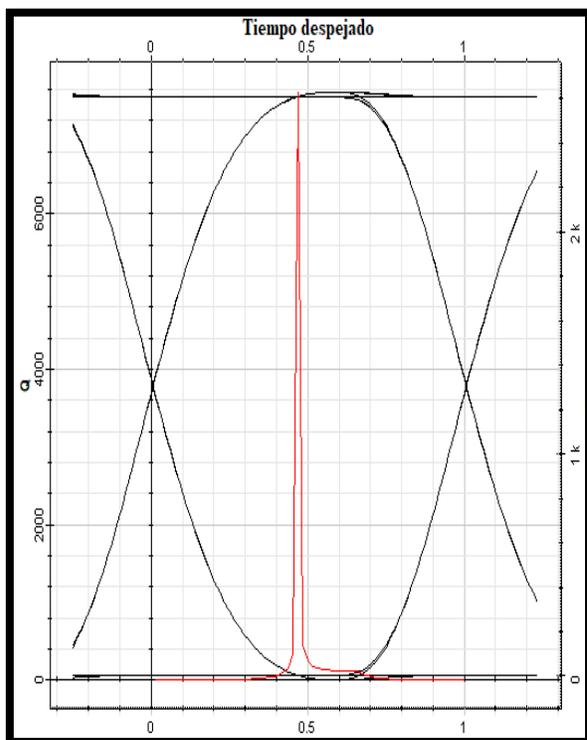
Tabla 11.

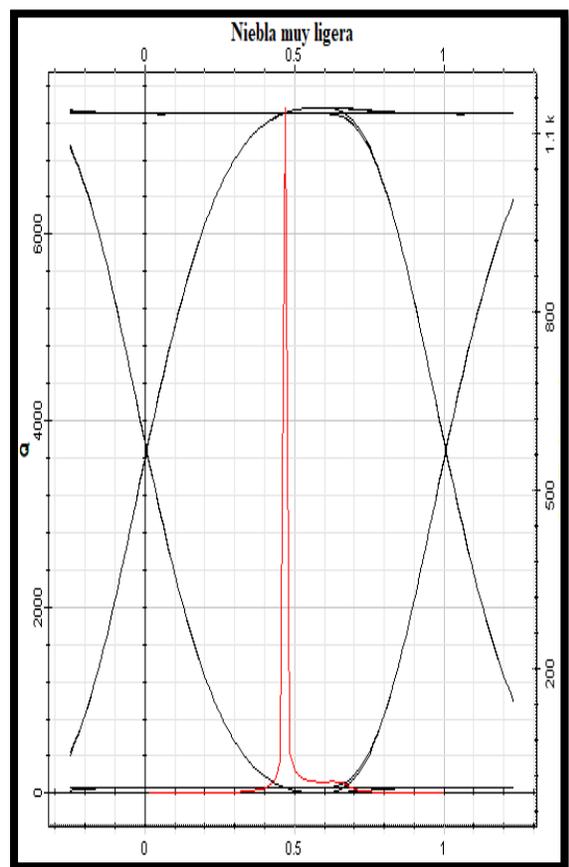
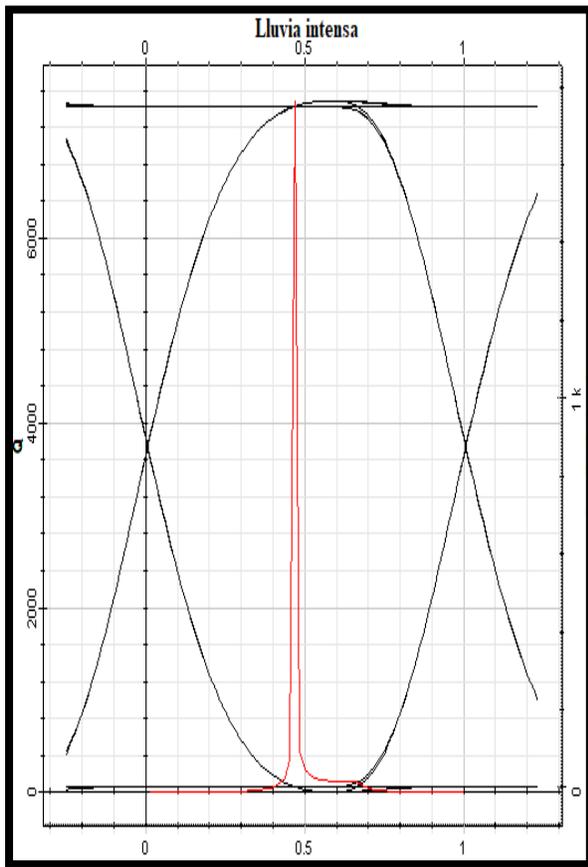
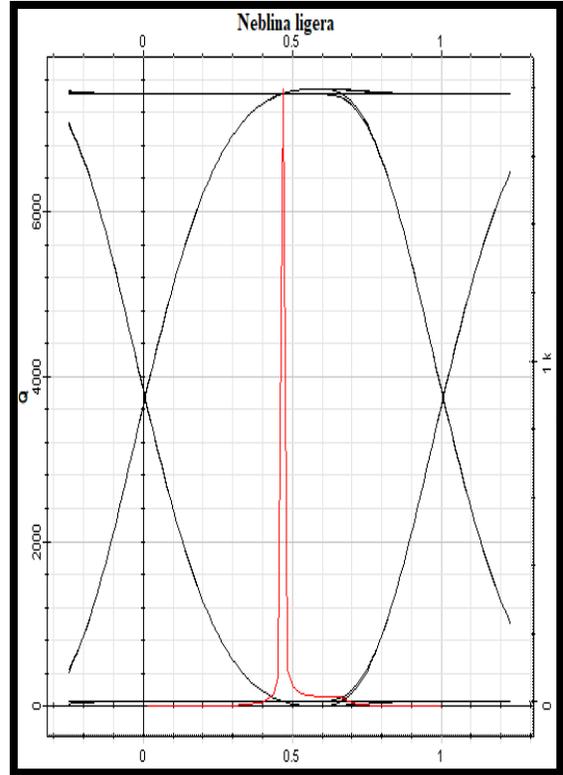
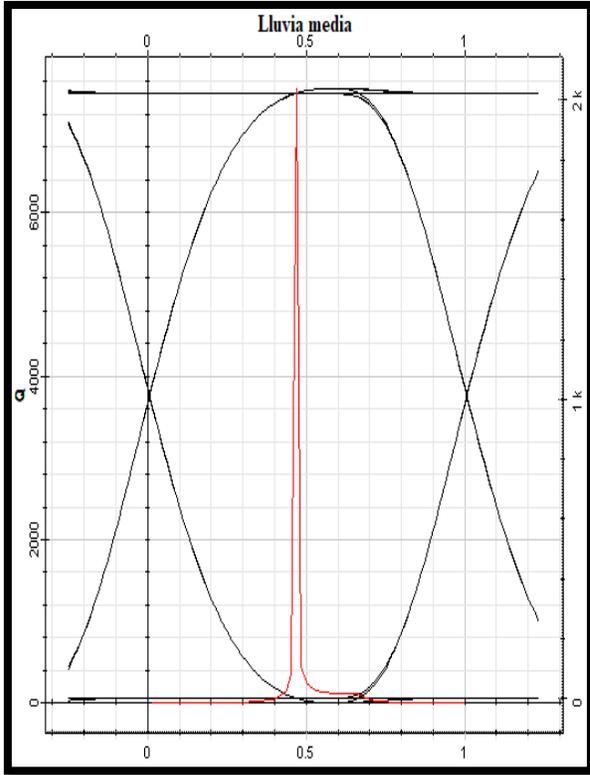
*Resultados para el modelo 10G-E+ Tasa de 10 Gbps.*

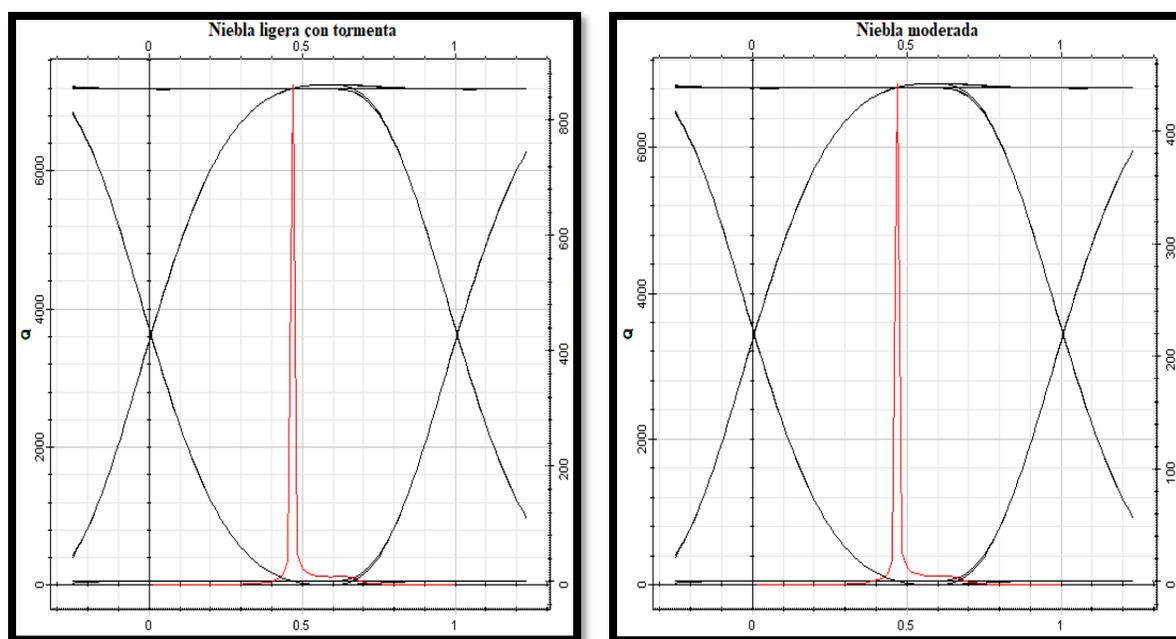
CONDICION METEREOLÓGICA	ASPECTOS DE ANALISIS						
	Atenuación dB/km	Potencia de transmisión mW			Factor Q	Umbral	BER
		P1	P2	P3			
Tiempo despejado	0.54	387	1054.62	105462.97	7121.48	257.29	0
Llovizna	0.6	387	1050.26	105050.95	7119.45	256.321	0
Lluvia ligera	2	387	962	96205.52	7070.57	234.728	0
Neblina muy ligera	3.1	387	898	89763.54	7029.9	219.045	0
Lluvia media	4.6	387	817	81695.85	6971.14	199.335	0
Neblina ligera	6.6	387	720	72044.36	6886.65	175.785	0
Lluvia intensa	6.9	387	707	70761.98	6873.36	172.501	0
Niebla muy ligera	13.8	387	458	45814.18	6521.07	111.794	0
Niebla ligera con tormenta	18.3	387	345	34530.27	6242.62	84.24	0
Niebla moderada	28.9	387	177	17737.81	5450.79	43.26	0

*Nota.* Los datos muestran el comportamiento del equipo utilizado en cada parámetro de análisis (fuente propia).

De cada condición meteorológica se evidencian las siguientes imágenes donde se observa el factor de calidad  $Q$  que es la señal de color rojo, y el diagrama de ojo que es la onda de color negro.







**Figura 45.** Comportamiento del Factor de calidad Q y diagrama de ojo de cada condición meteorológica para el modelo 10G-E+ del fabricante fSONA con potencia de transmisión de 800 mW, 10 cm de diámetro de apertura del receptor y tasa de 10 Gbps. Fuente propia, (2020, pág. 77).

**Modelo 1250-E2 Tasa de 1.25 Gbps.** Para la transmisión el dispositivo emplea una potencia de 320 mW y 10 cm de diámetro de la apertura del receptor. De cada condición meteorológica se obtuvieron los siguientes datos.

Tabla 12.

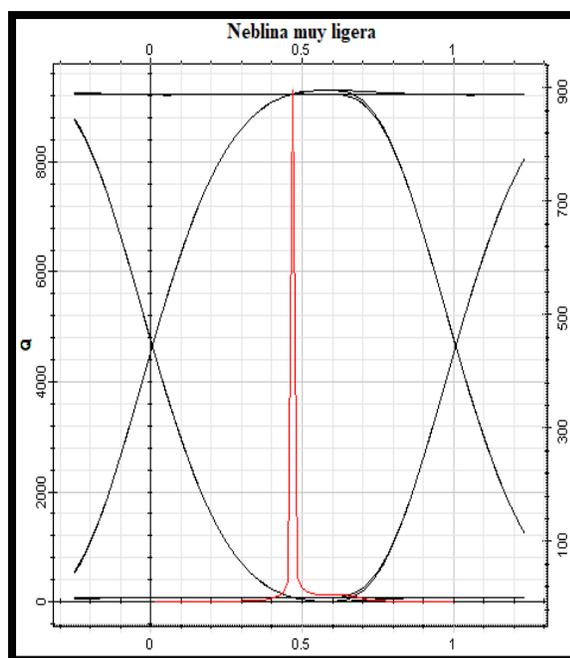
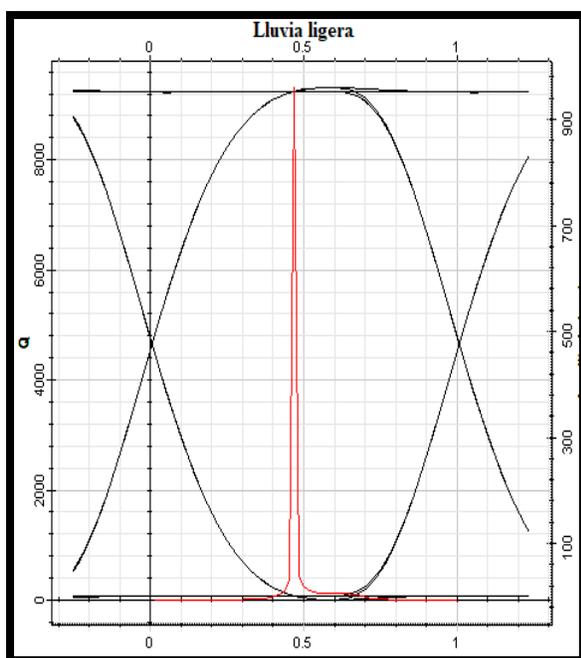
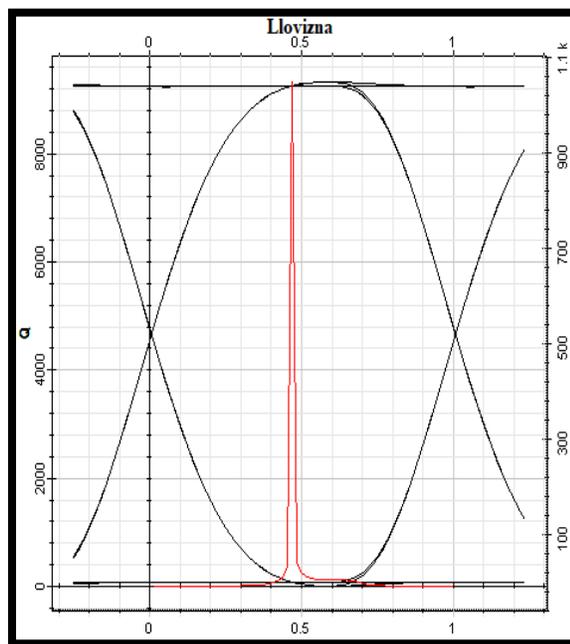
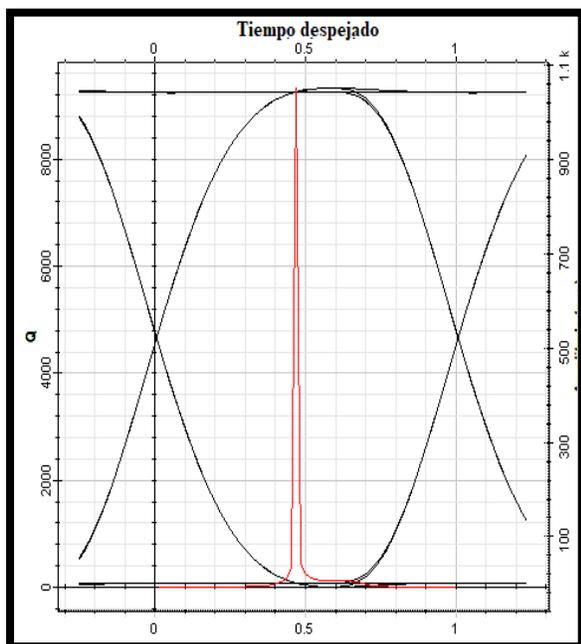
*Resultados para el modelo 1250-E2 Tasa de 1.25 Gbps.*

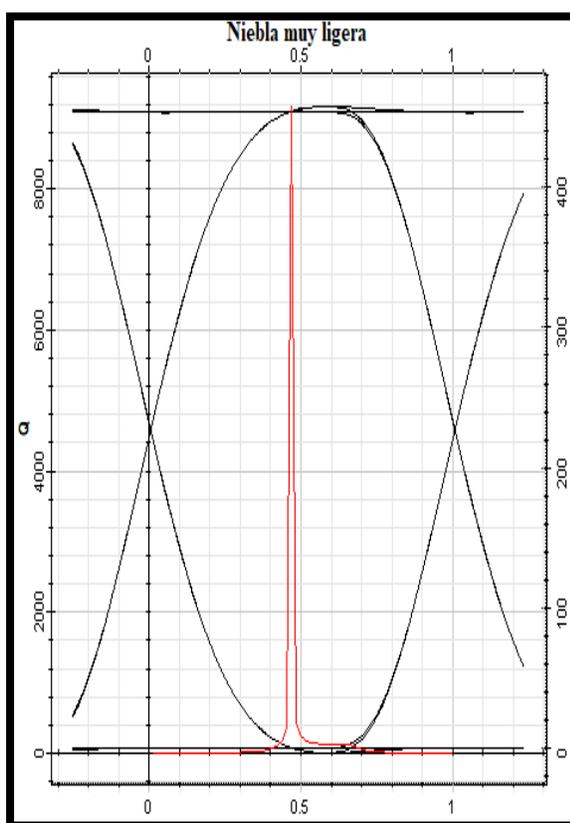
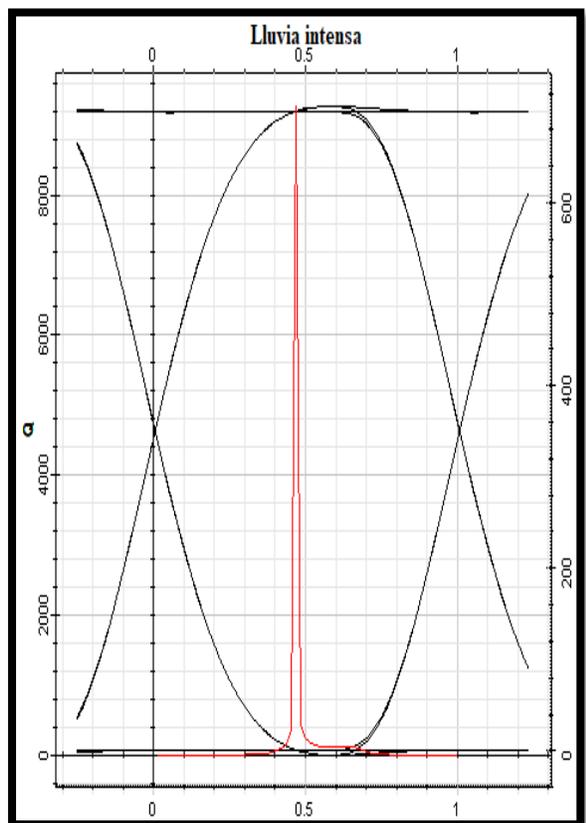
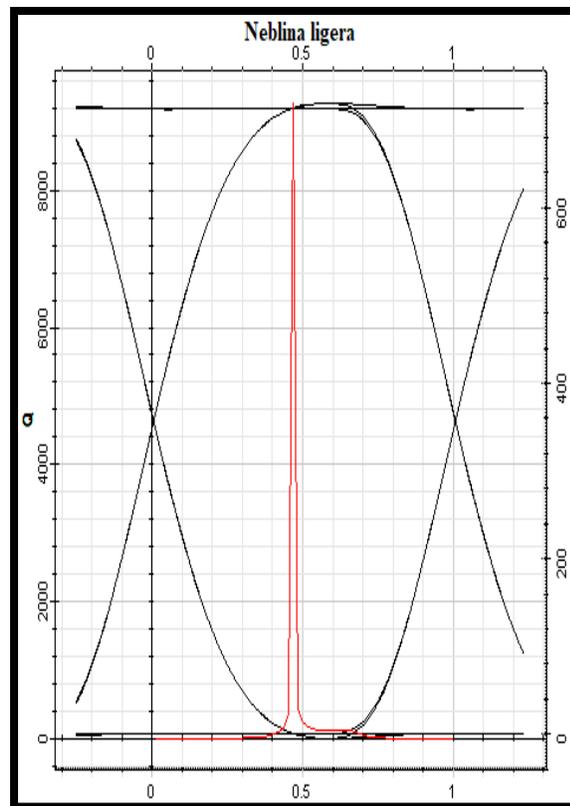
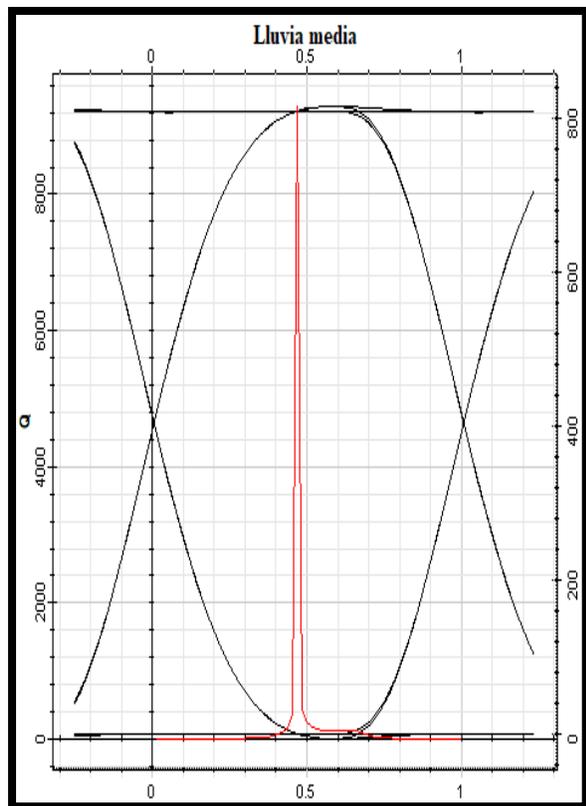
CONDICION METEREOLÓGICA	ASPECTOS DE ANALISIS						
	Atenuación dB/km	Potencia de transmisión mW			Factor Q	Umbral	BER
		P1	P2	P3			
Tiempo despejado	0.54	155	422	42179.36	8969.91	102.918	0
Llovizna	0.6	155	420	42024.25	8968.23	102.531	0
Lluvia ligera	2	155	385	38485.75	8927.41	93.90	0
Neblina muy ligera	3.1	155	359	35908.72	8893.24	87.62	0
Lluvia media	4.6	155	327	32681.35	8843.51	79.73	0
Neblina ligera	6.6	155	288	28820.39	8771.27	70.32	0
Lluvia intensa	6.9	155	283	28281.34	8759.82	69	0
Niebla muy ligera	13.8	155	183	18327.36	8448.67	44.71	0

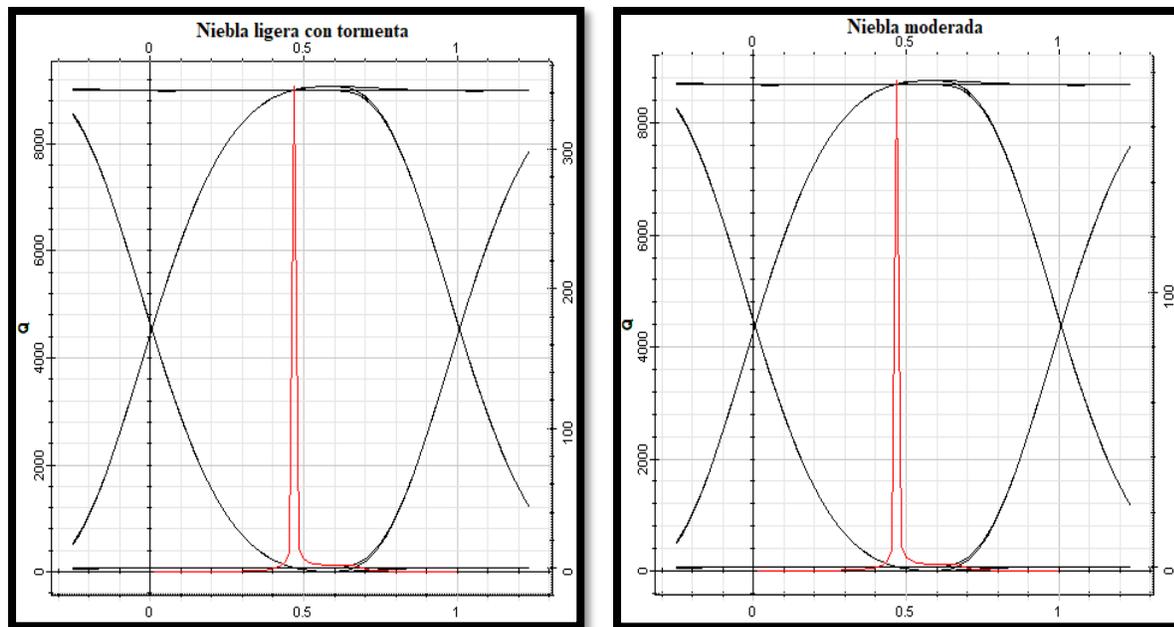
Niebla ligera con tormenta	18.3	155	138	13810.20	8191.91	33.70	0
Niebla moderada	28.9	155	71	7094.14	7409.02	17.30	0

*Nota.* Los datos muestran el comportamiento del equipo utilizado en cada parámetro de análisis (fuente propia).

De cada condición meteorológica se evidencian las siguientes imágenes donde se observa el factor de calidad  $Q$  que es la señal de color rojo, y el diagrama de ojo que es la onda de color negro.







**Figura 46.** Comportamiento del Factor de calidad Q y diagrama de ojo de cada condición meteorológica para el modelo 1250-E2 del fabricante fSONA con potencia de transmisión de 320 mW, 10 cm de diámetro de apertura del receptor y tasa de 1.25 Gbps (fuente propia, 2020, pág. 80).

**Modelo 1250-E2 Tasa de 622 Mbps.** Para la transmisión el dispositivo emplea una potencia de 320 mW y 10 cm de diámetro de la apertura del receptor. De cada condición meteorológica se obtuvieron los siguientes datos.

Tabla 13.

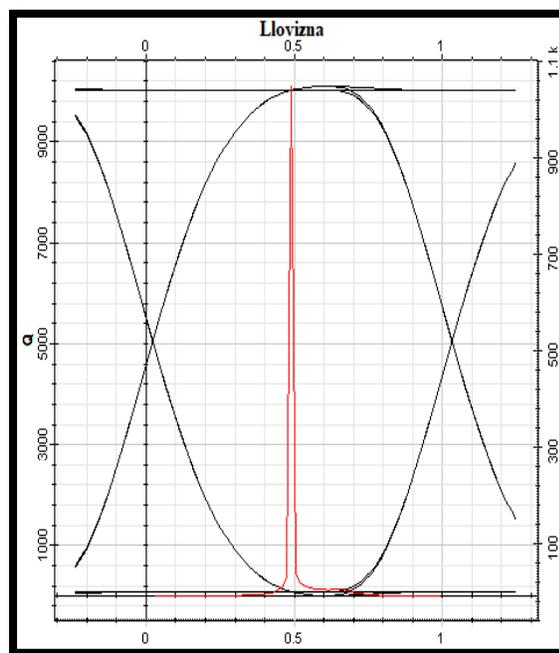
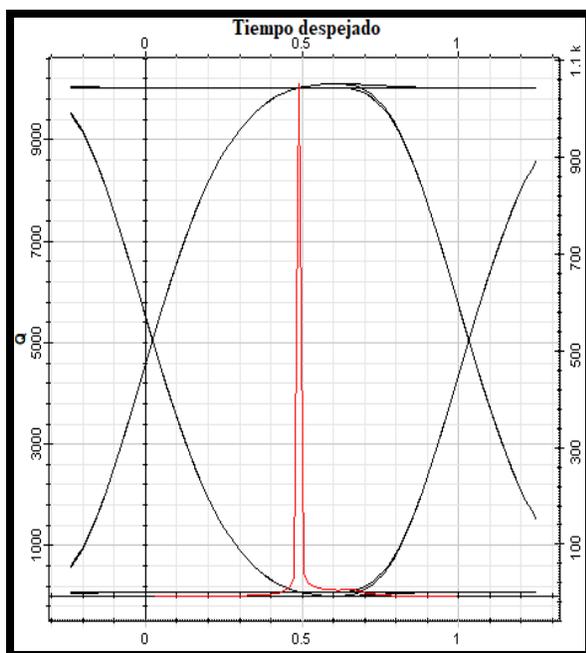
*Resultados para el modelo 1250-E2 Tasa de 622 Mbps.*

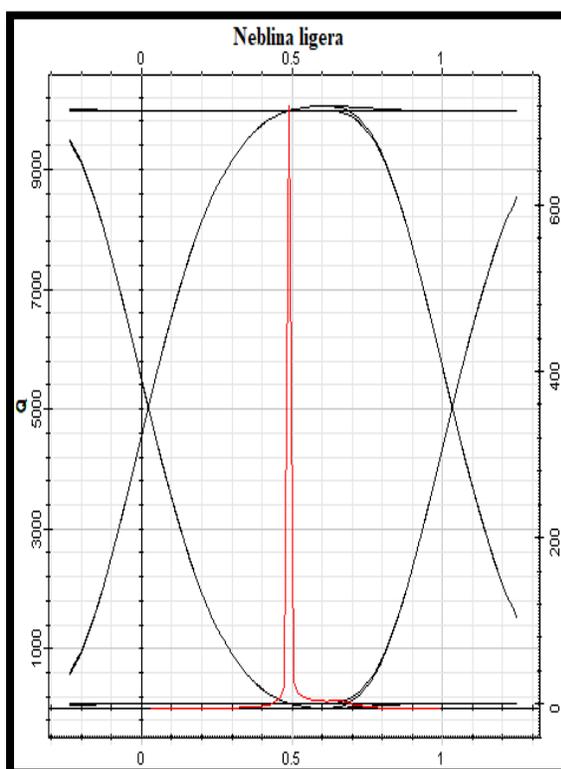
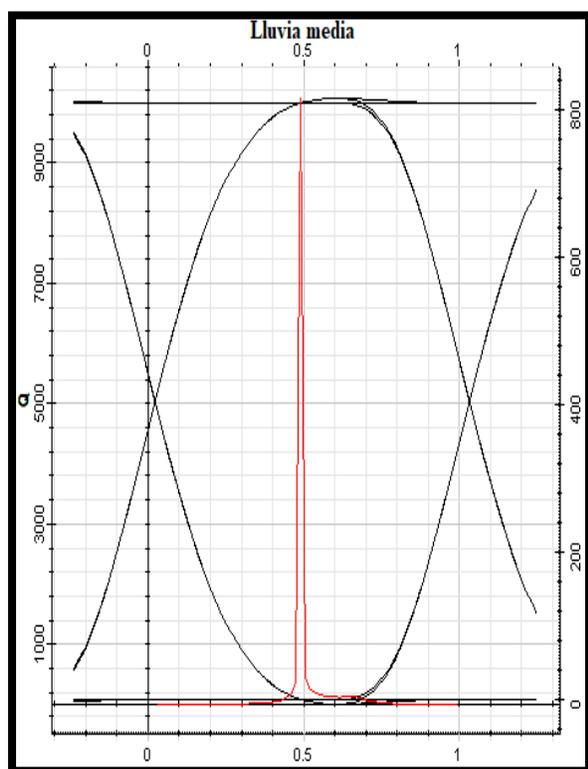
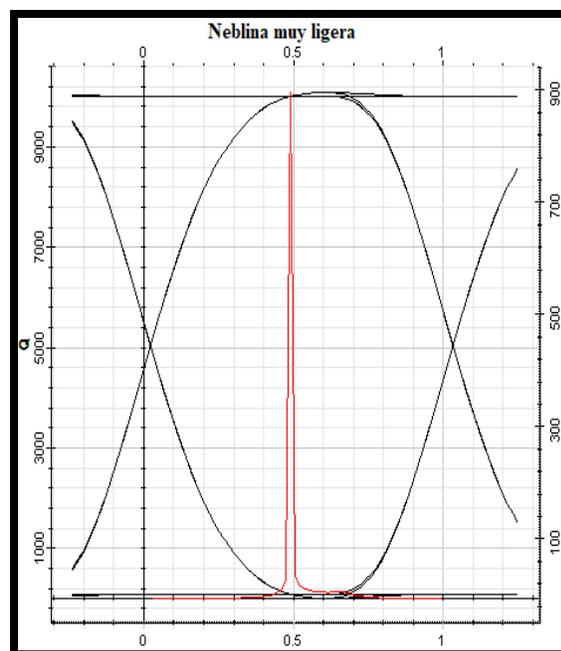
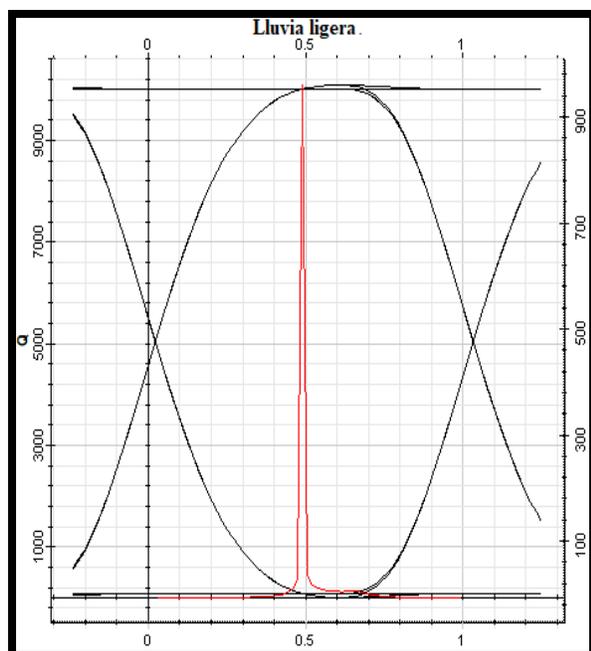
CONDICION METEREOLÓGICA	ASPECTOS DE ANALISIS						
	Atenuación dB/km	Potencia de transmisión mW			Factor Q	Umbral	BER
		P1	P2	P3			
Tiempo despejado	0.54	155	422	42179.36	9831.16	102.918	0
Llovizna	0.6	155	420	42024.25	9829.88	102.531	0
Lluvia ligera	2	155	385	38485.75	9798.9	93.90	0
Neblina muy ligera	3.1	155	359	35908.72	9772.89	87.62	0
Lluvia media	4.6	155	327	32681.35	9734.95	79.73	0
Neblina ligera	6.6	155	288	28820.39	9679.59	70.32	0
Lluvia intensa	6.9	155	283	28281.34	9670.79	69	0

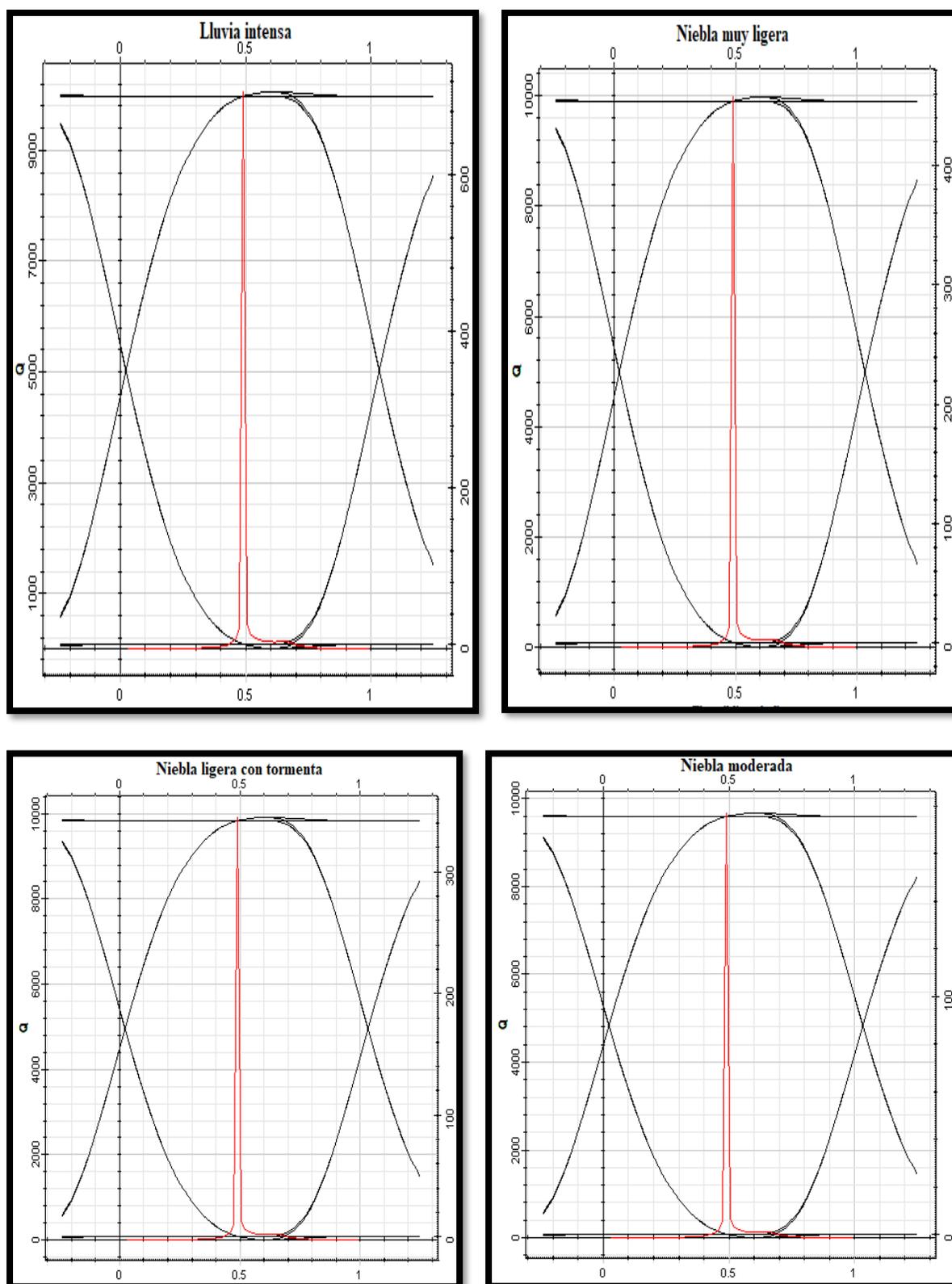
Niebla muy ligera	13.8	155	183	18327.36	9428.25	44.71	0
Niebla ligera con tormenta	18.3	155	138	13810.20	9222.85	33.70	0
Niebla moderada	28.9	155	71	7094.14	8564.5	17.30	0

*Nota.* Los datos muestran el comportamiento del equipo utilizado en cada parámetro de análisis (fuente propia).

De cada condición meteorológica se evidencian las siguientes imágenes donde se observa el factor de calidad  $Q$  que es la señal de color rojo, y el diagrama de ojo que es la onda de color negro.







**Figura 47.** Comportamiento del Factor de calidad  $Q$  y diagrama de ojo de cada condición meteorológica para el modelo 1250-E2 del fabricante fSONA con potencia de transmisión de 320

mW, 10 cm de diámetro de apertura del receptor y tasa de 622 Mbps. Fuente propia, (2020, pág. 83).

**Modelo 2500-E3 Tasa de 2.5 Gbps.** Para la transmisión el dispositivo emplea una potencia de 320 mW y 10 cm de diámetro de la apertura del receptor. De cada condición meteorológica se obtuvieron los siguientes datos.

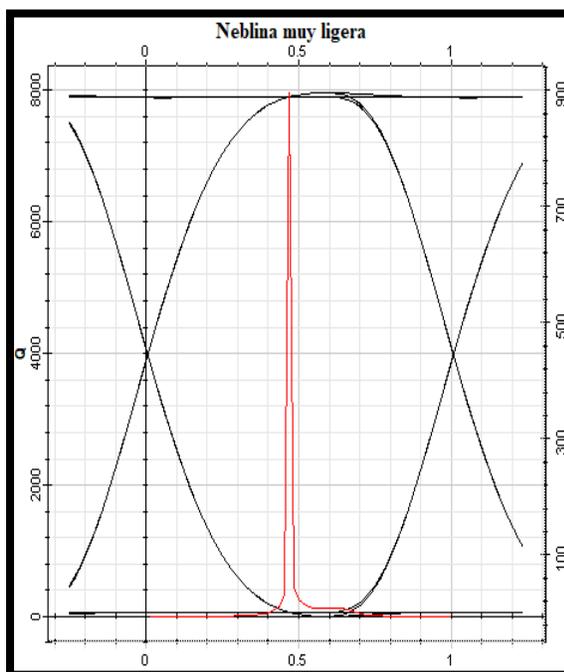
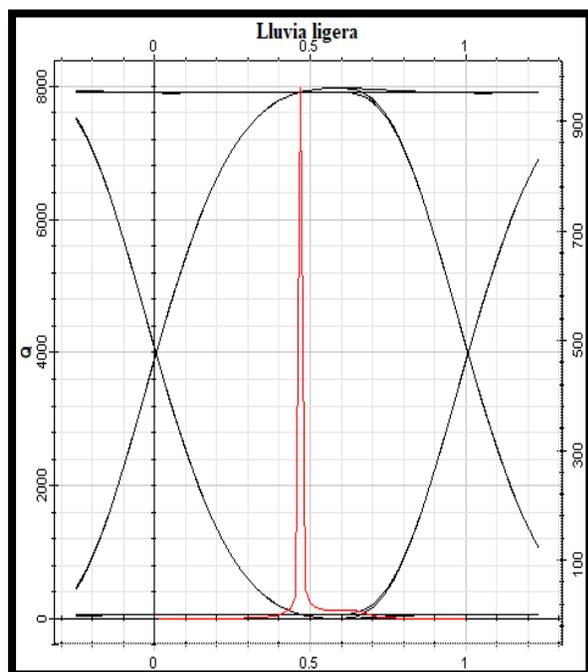
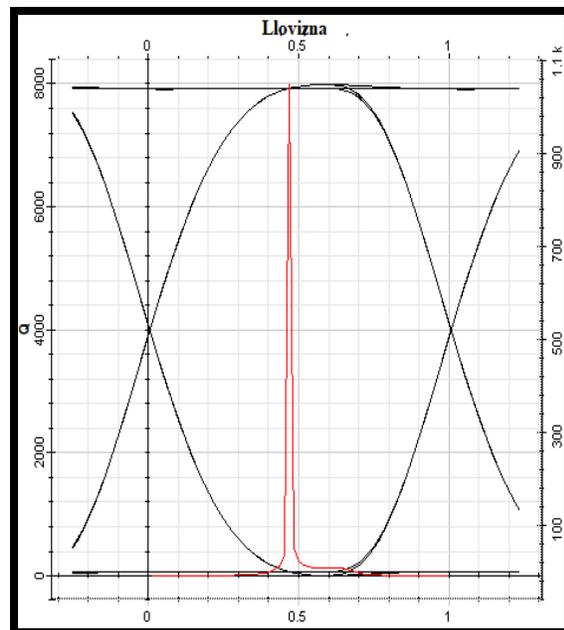
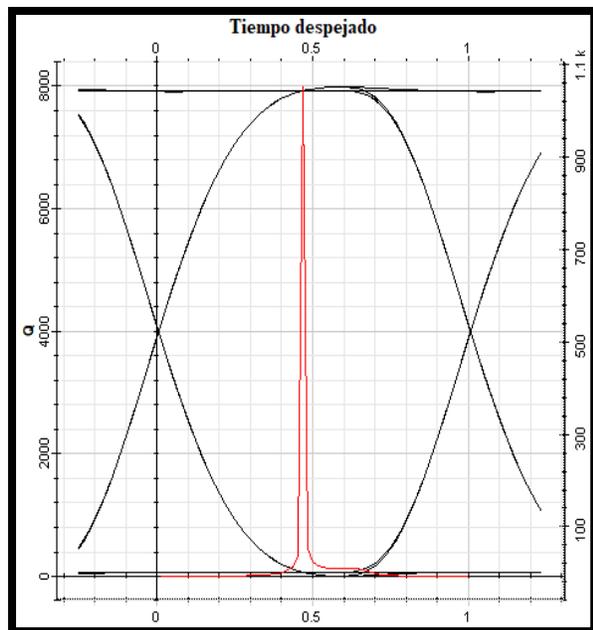
Tabla 14.

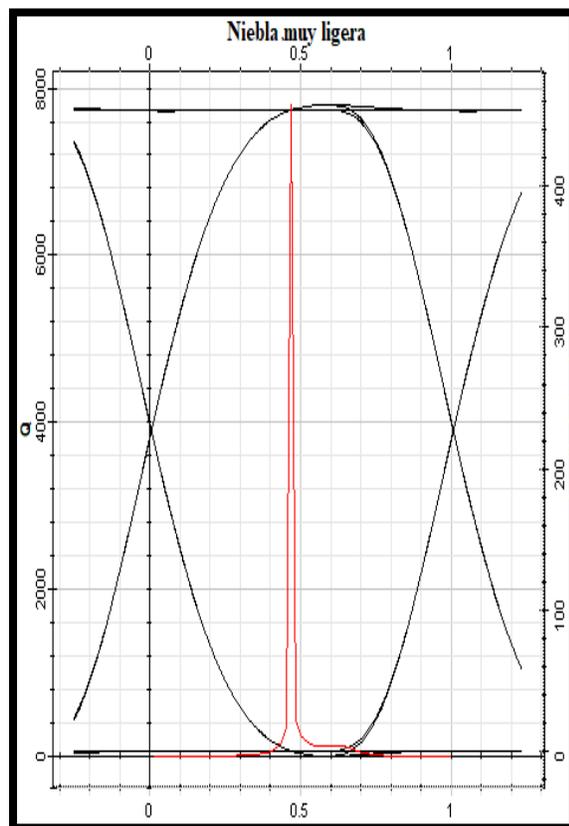
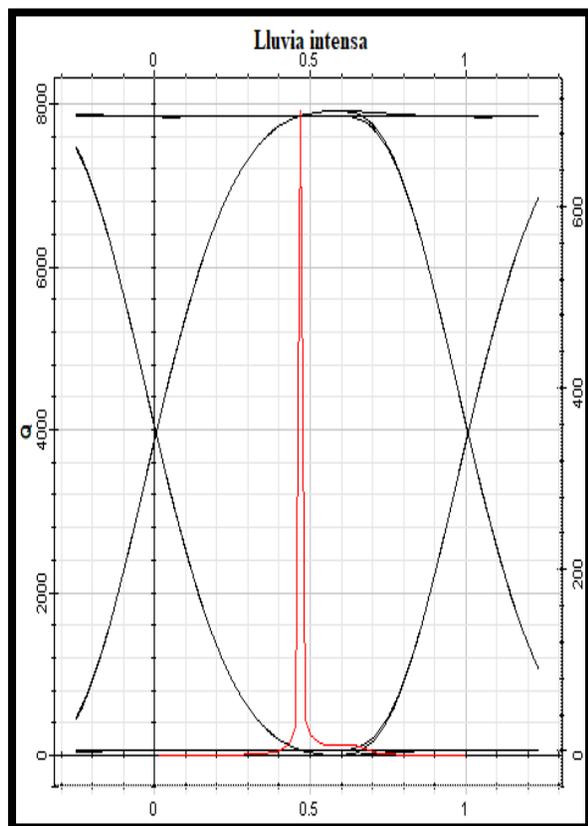
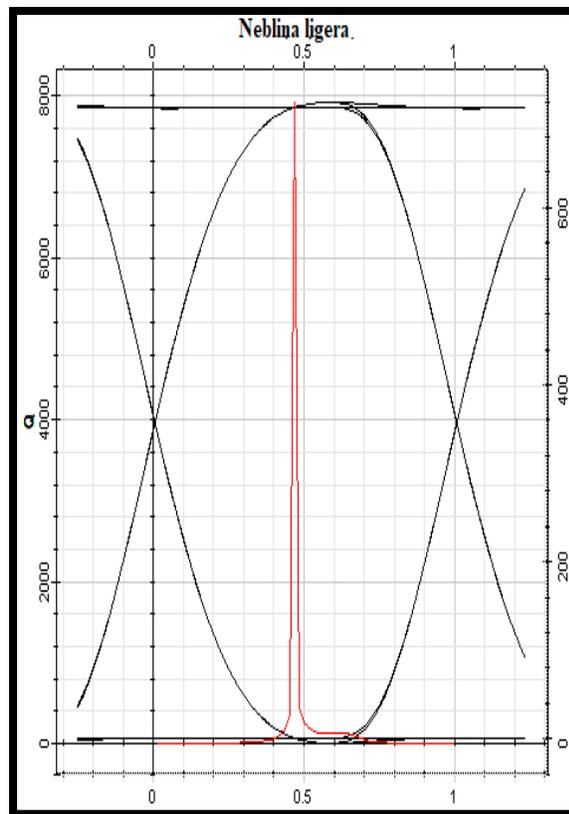
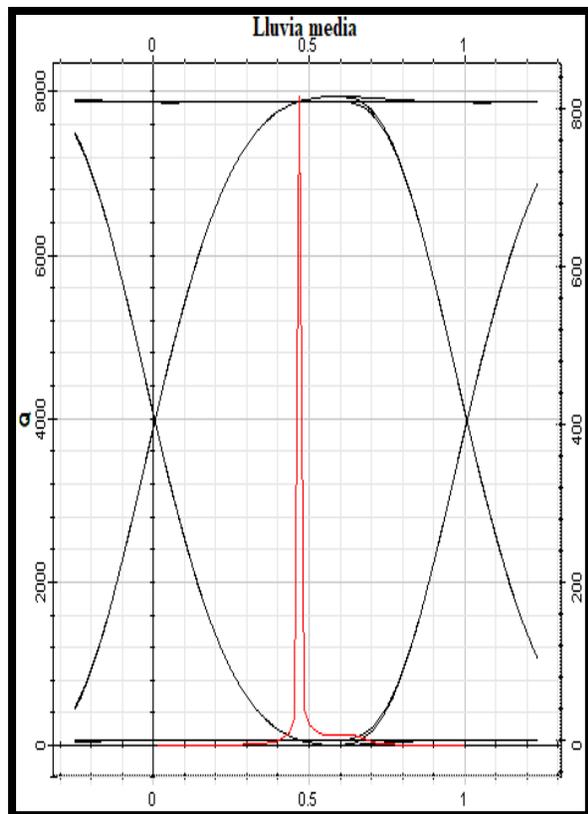
*Resultados para el modelo 2500-E3 Tasa de 2.5 Gbps.*

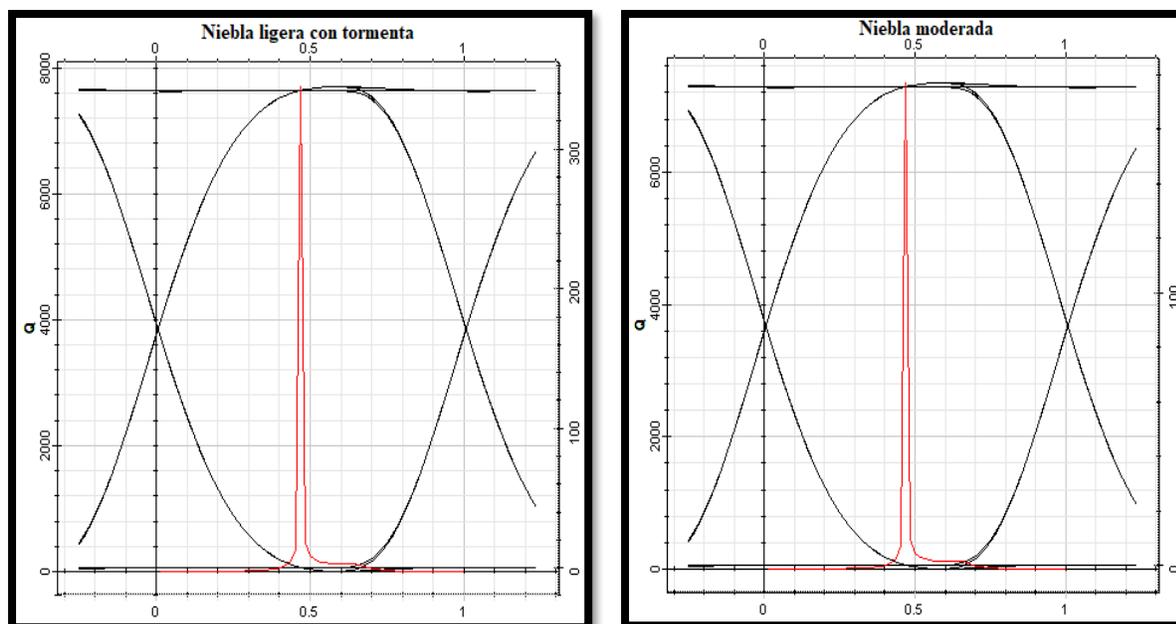
CONDICION METEREOLÓGICA	ASPECTOS DE ANALISIS						
	Atenuación dB/km	Potencia de transmisión mW			Factor Q	Umbral	BER
		P1	P2	P3			
Tiempo despejado	0.54	155	422	42179.36	7577.34	102.918	0
Llovizna	0.6	155	420	42024.25	7575.46	102.531	0
Lluvia ligera	2	155	385	38485.75	7530	93.90	0
Neblina muy ligera	3.1	155	359	35908.72	7492.13	87.62	0
Lluvia media	4.6	155	327	32681.35	7437.32	79.73	0
Neblina ligera	6.6	155	288	28820.39	7358.33	70.32	0
Lluvia intensa	6.9	155	283	28281.34	7345.88	69	0
Niebla muy ligera	13.8	155	183	18327.36	7013.78	44.71	0
Niebla ligera con tormenta	18.3	155	138	13810.20	6748.14	33.70	0
Niebla moderada	28.9	155	71	7094.14	5976.69	17.30	0

*Nota.* Los datos muestran el comportamiento del equipo utilizado en cada parámetro de análisis (fuente propia).

De cada condición meteorológica se evidencian las siguientes imágenes donde se observa el factor de calidad Q que es la señal de color rojo, y el diagrama de ojo que es la onda de color negro.







**Figura 48.** Comportamiento del Factor de calidad Q y diagrama de ojo de cada condición meteorológica para el modelo 2500-E3 del fabricante fSONA con potencia de transmisión de 320 mW, 10 cm de diámetro de apertura del receptor y tasa de 2.5 Gbps. Fuente propia, (2020, pág. 86).

**Modelo 1250-Z1 Tasa de 1.25 Gbps.** Para la transmisión el dispositivo emplea una potencia de 160 mW y 50 mm de diámetro de la apertura del receptor. De cada condición meteorológica se obtuvieron los siguientes datos.

Tabla 15.

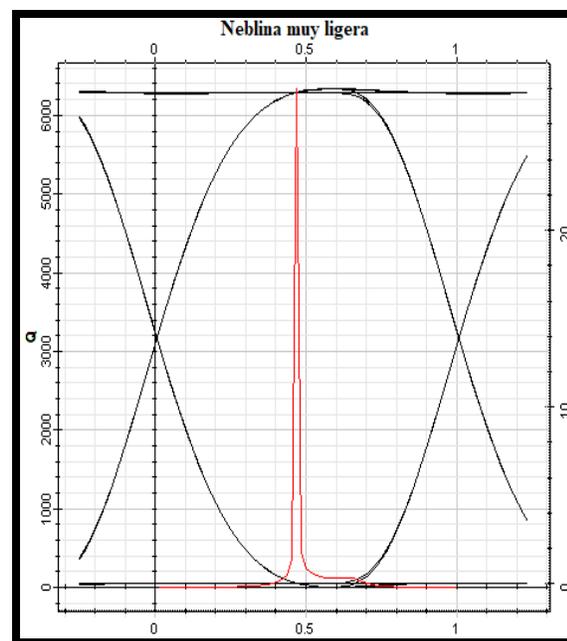
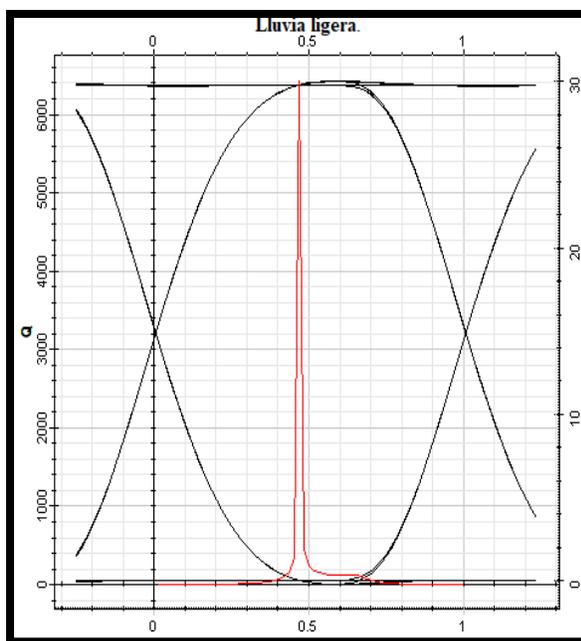
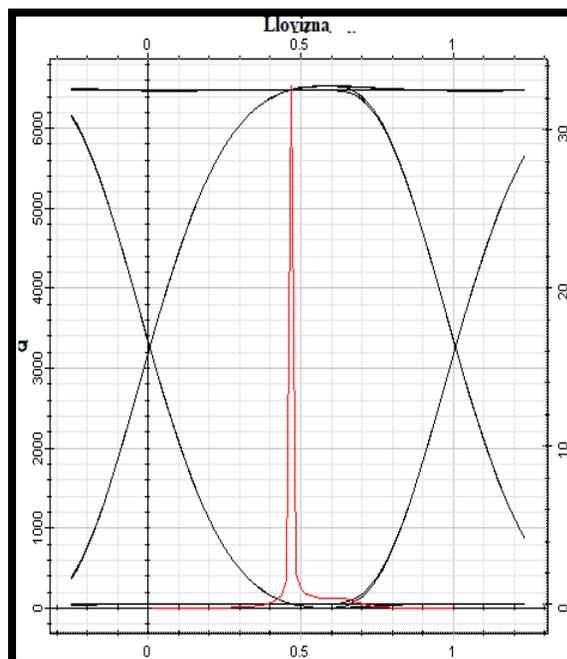
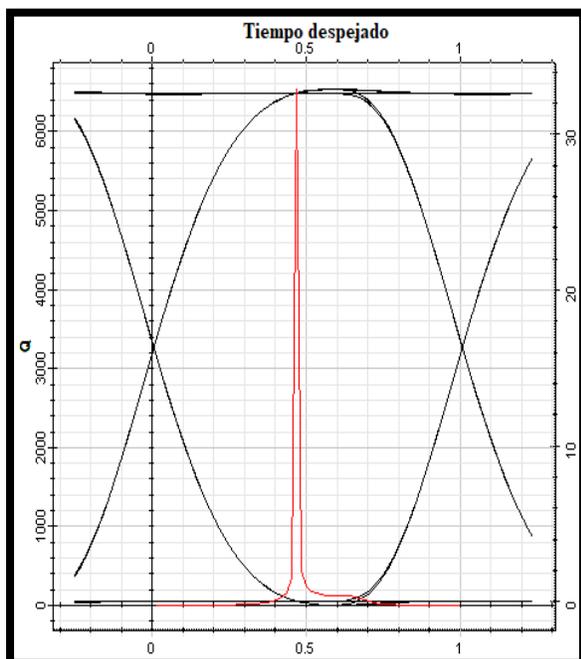
*Resultados para el modelo 1250-Z1 Tasa de 1.25 Gbps.*

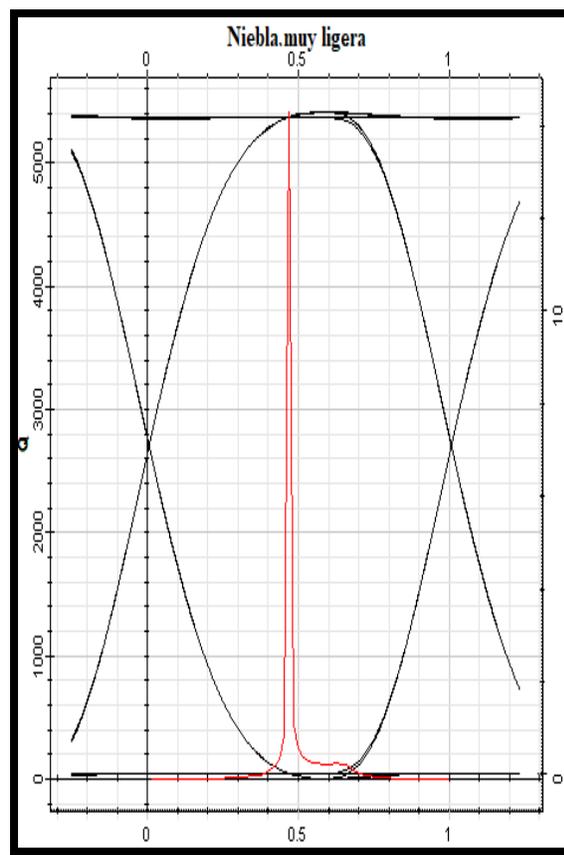
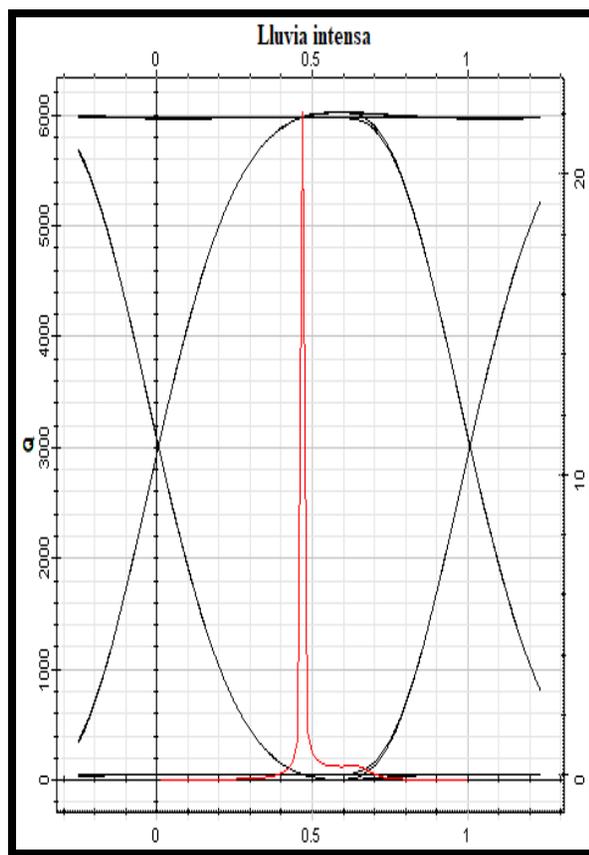
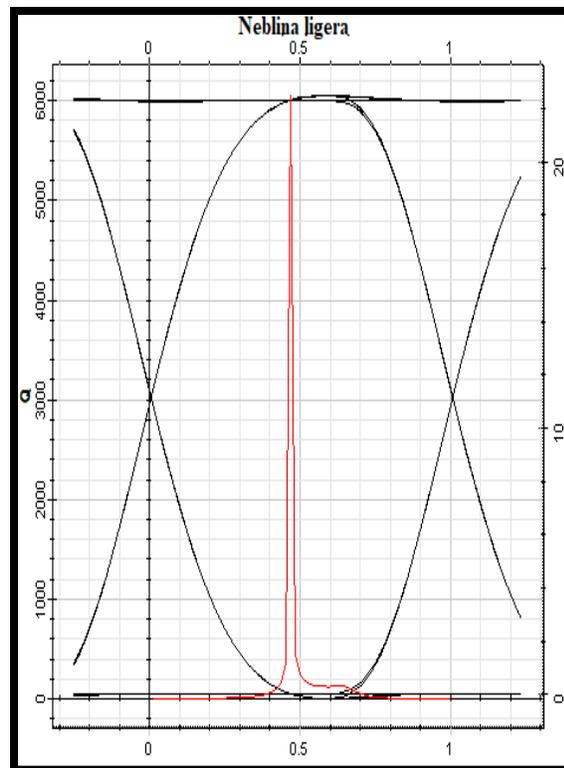
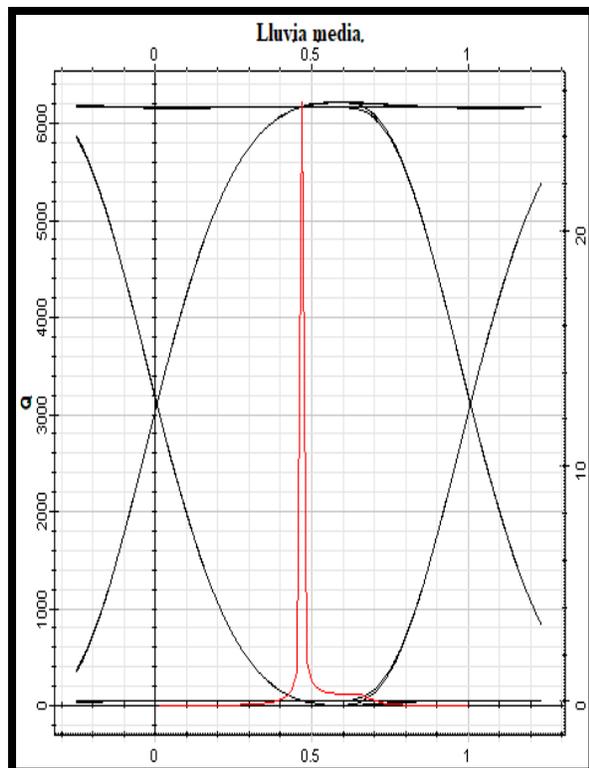
CONDICION METEREOLOGICA	ASPECTOS DE ANALISIS						
	Atenuación dB/km	Potencia de transmisión mW			Factor Q	Umbral	BER
		P1	P2	P3			
Tiempo despejado	0.54	77	52	5273.51	6537.05	12.86	0
Llovizna	0.6	77	52	5252.91	6532.56	12.81	0
Lluvia ligera	2	77	48	4810.60	6425.95	11.73	0
Neblina muy ligera	3.1	77	45	4489.52	6339.8	10.95	0
Lluvia media	4.6	77	41	4086.01	6219.1	9.96	0
Neblina ligera	6.6	77	36	3603.29	6052.83	8.78	0
Lluvia intensa	6.9	77	35	3535.90	6027.4	8.62	0
Niebla muy ligera	13.8	77	23	2291.39	5414.29	5.59	0

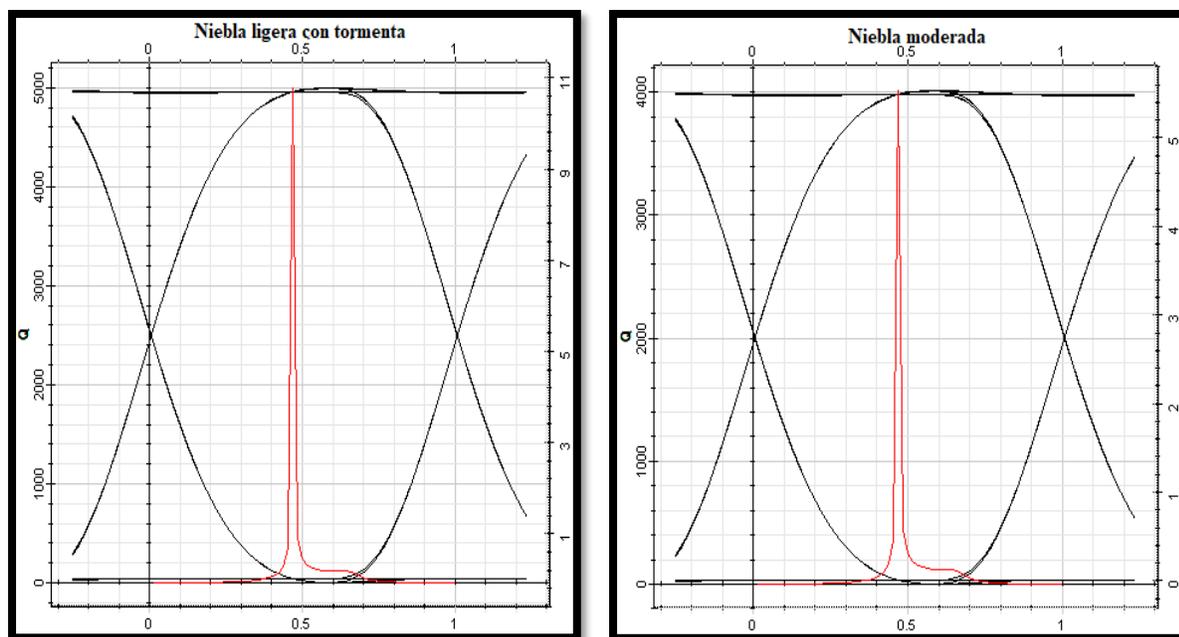
Niebla ligera con tormenta	18.3	77	17	1726.63	4995.75	4.21	0
Niebla moderada	28.9	77	8.9	887.15	4012.9	2.16	0

*Nota.* Los datos muestran el comportamiento del equipo utilizado en cada parámetro de análisis (fuente propia).

De cada condición meteorológica se evidencian las siguientes imágenes donde se observa el factor de calidad  $Q$  que es la señal de color rojo, y el diagrama de ojo que es la onda de color negro.







**Figura 49.** Comportamiento del Factor de calidad Q y diagrama de ojo de cada condición meteorológica para el modelo 1250-Z1 del fabricante fSONA con potencia de transmisión de 160 mW, 50 mm de diámetro de apertura del receptor y tasa de 1.25 Gbps. Fuente propia, (2020, pág. 89).

**Modelo 1250-Z1 Tasa de 622 Mbps.** Para la transmisión el dispositivo emplea una potencia de 160 mW y 50 mm de diámetro de la apertura del receptor. De cada condición meteorológica se obtuvieron los siguientes datos.

Tabla 16.

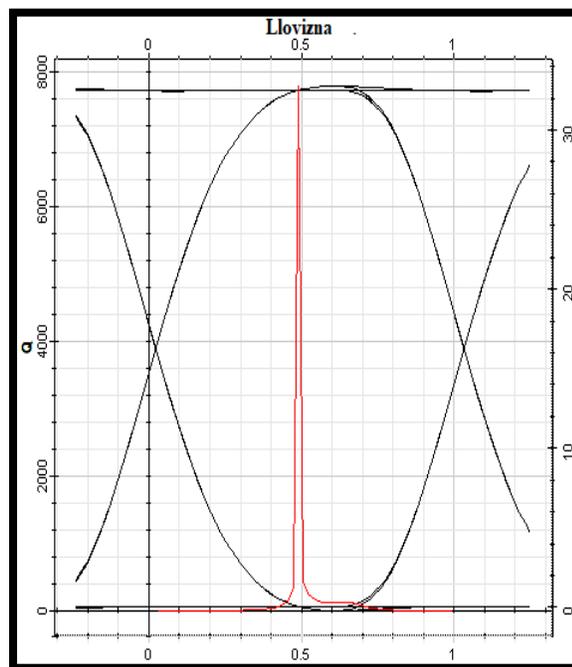
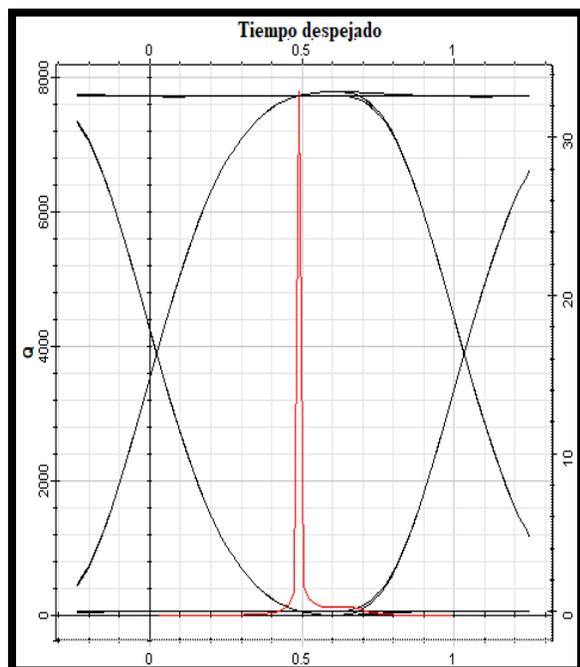
Resultados para el modelo 1250-Z1 Tasa de 622 Mbps.

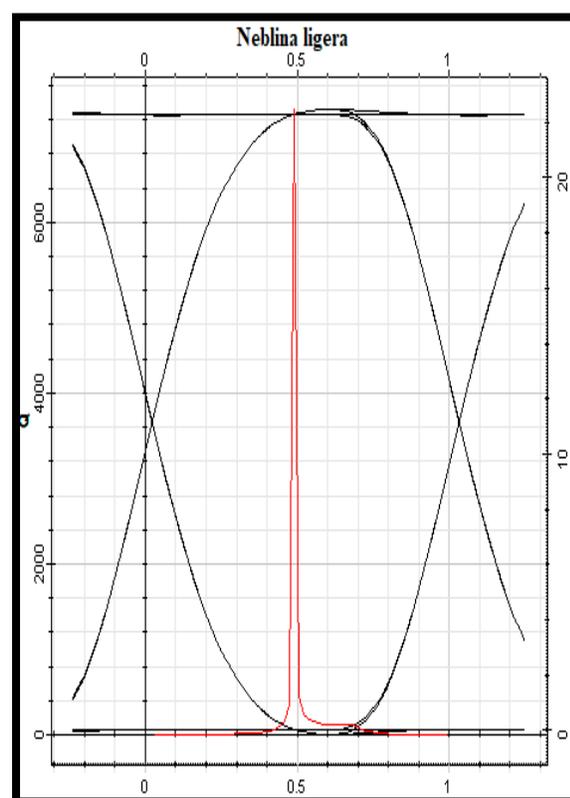
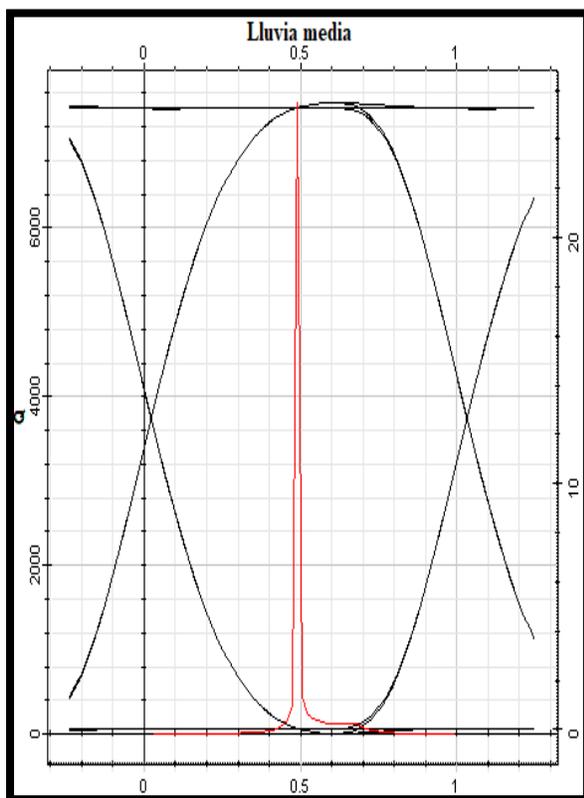
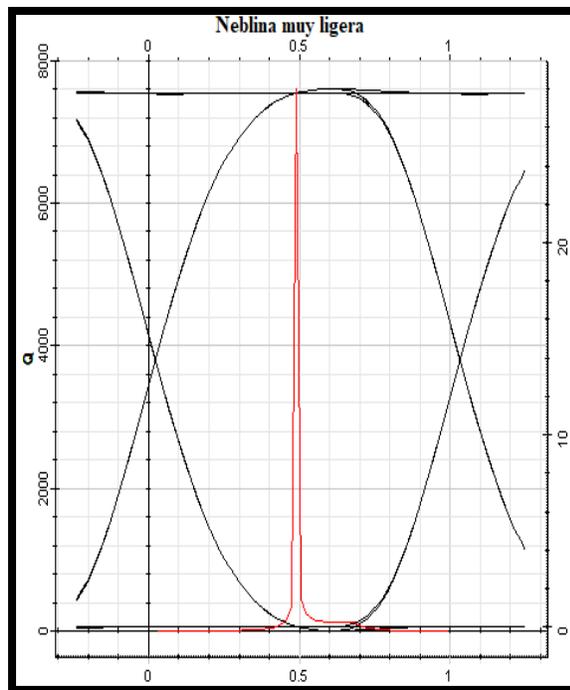
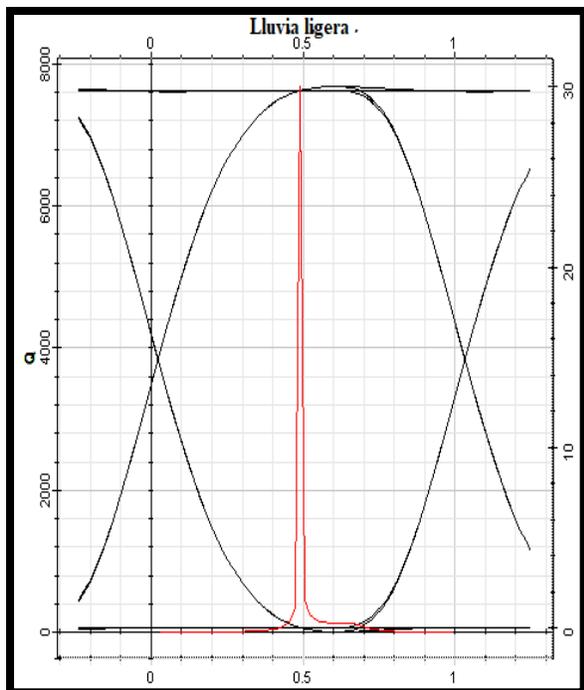
CONDICION METEREOLÓGICA	ASPECTOS DE ANALISIS						
	Atenuación dB/km	Potencia de transmisión mW			Factor Q	Umbral	BER
		P1	P2	P3			
Tiempo despejado	0.54	77	52	5273.51	7792.65	12.86	0
Llovizna	0.6	77	52	5252.91	7788.35	12.81	0
Lluvia ligera	2	77	48	4810.60	7686.01	11.73	0
Neblina muy ligera	3.1	77	45	4489.52	7602.67	10.95	0
Lluvia media	4.6	77	41	4086.01	7484.97	9.96	0
Neblina ligera	6.6	77	36	3603.29	7320.99	8.78	0
Lluvia intensa	6.9	77	35	3535.90	7292.72	8.62	0
Niebla muy ligera	13.8	77	23	2291.39	6671.5	5.59	0

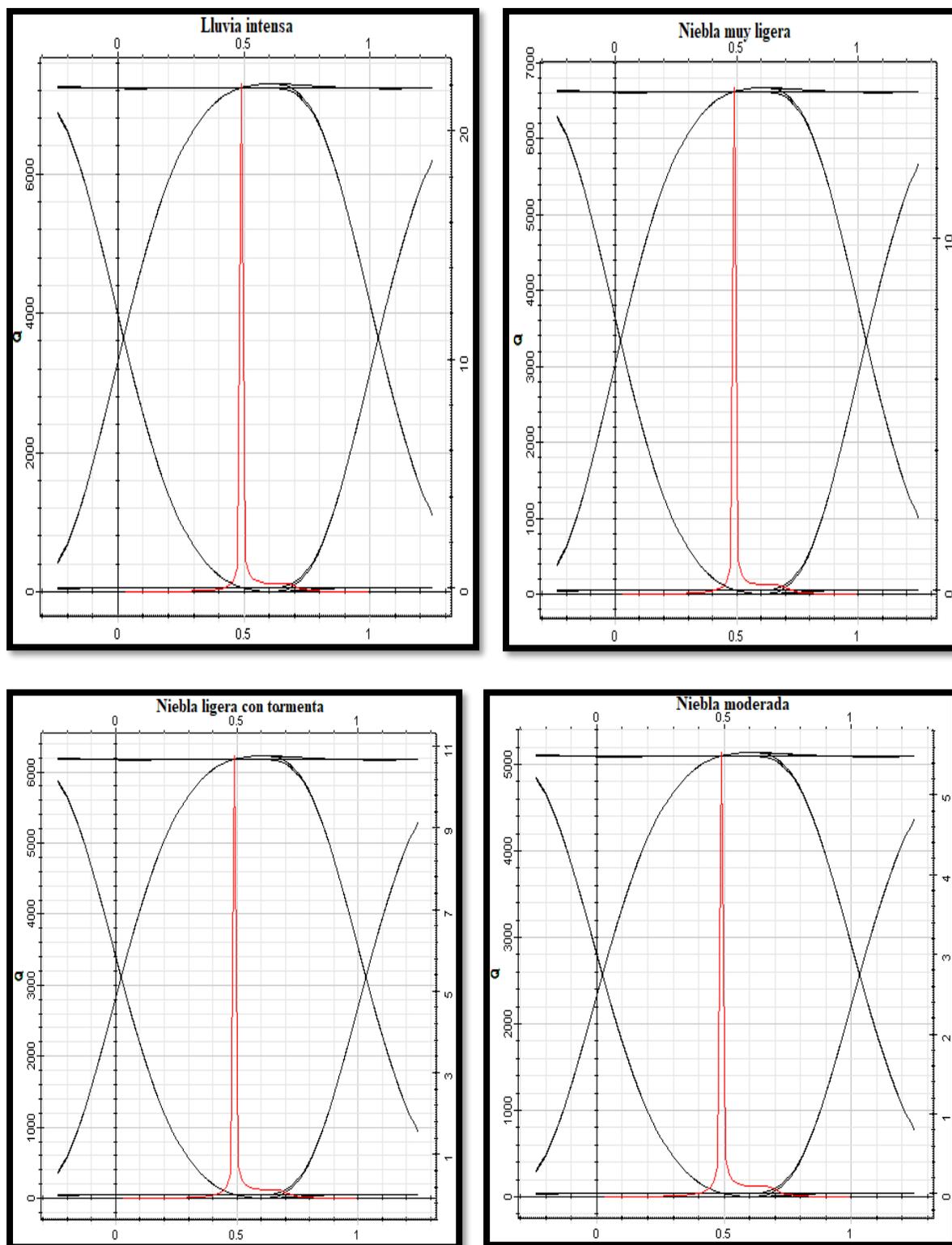
Niebla ligera con tormenta	18.3	77	17	1726.63	6228.87	4.21	0
Niebla moderada	28.9	77	8.9	887.15	5137.91	2.16	0

*Nota.* Los datos muestran el comportamiento del equipo utilizado en cada parámetro de análisis (fuente propia).

De cada condición meteorológica se evidencian las siguientes imágenes donde se observa el factor de calidad  $Q$  que es la señal de color rojo, y el diagrama de ojo que es la onda de color negro.







**Figura 50.** Comportamiento del Factor de calidad  $Q$  y diagrama de ojo de cada condición meteorológica para el modelo 1250-Z1 del fabricante fSONA con potencia de transmisión de 160

mW, 50 mm de diámetro de apertura del receptor y tasa de 622 Mbps. Fuente propia, (2020, pág. 92).

**Modelo 2500-Z2 Tasa de 2.5 Gbps.** Para la transmisión el dispositivo emplea una potencia de 160 mW y 50 mm de diámetro de la apertura del receptor. De cada condición meteorológica se obtuvieron los siguientes datos.

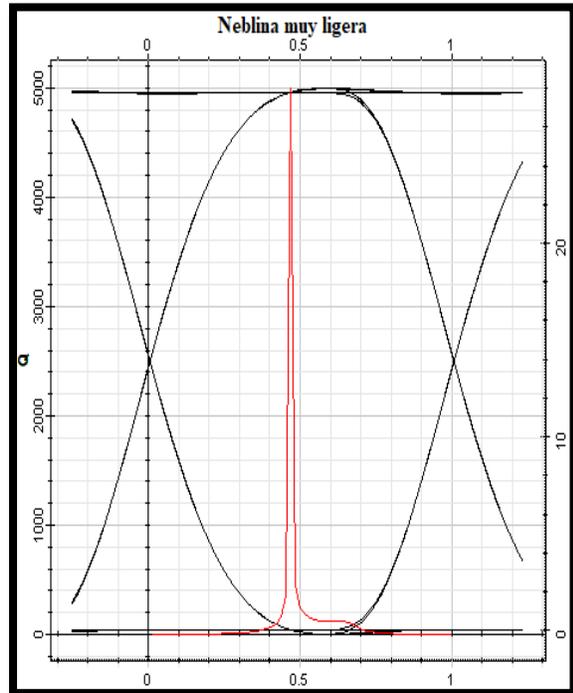
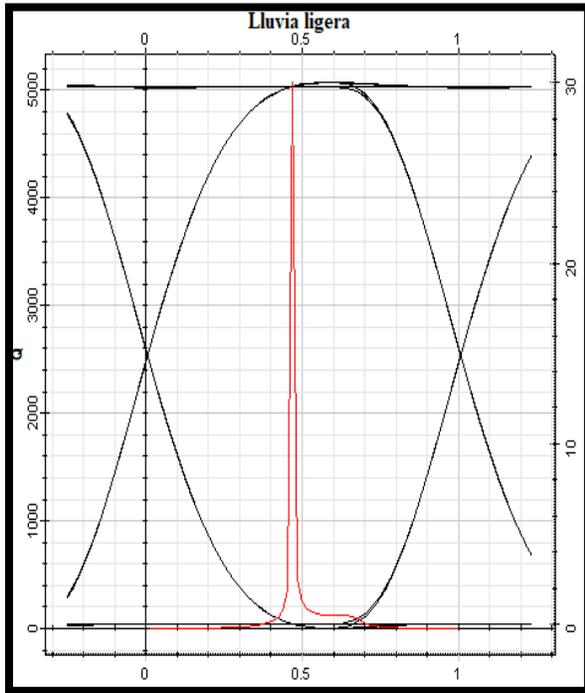
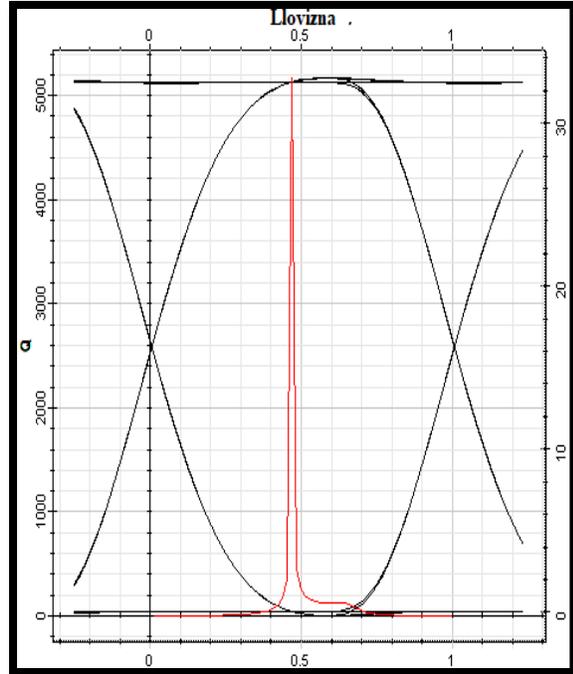
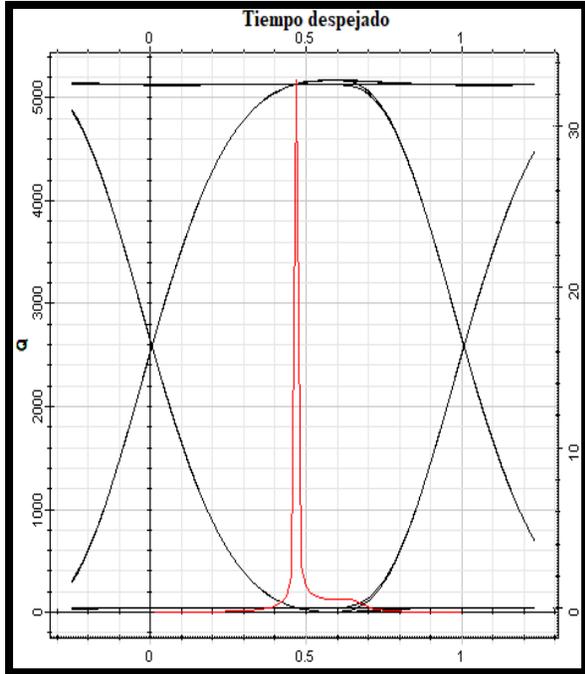
Tabla 17.

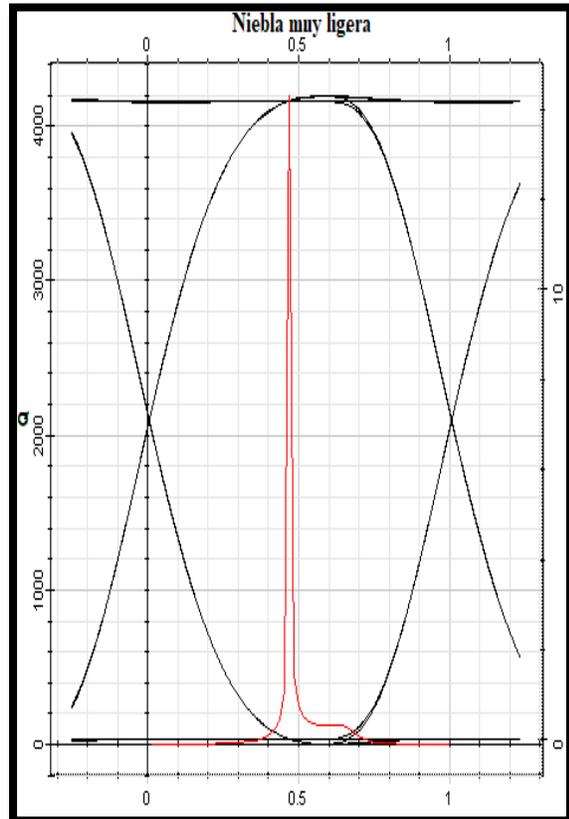
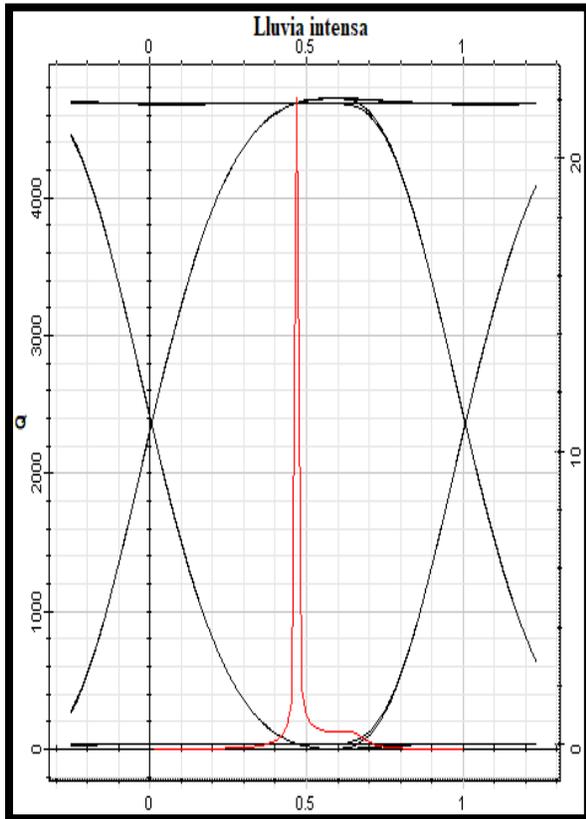
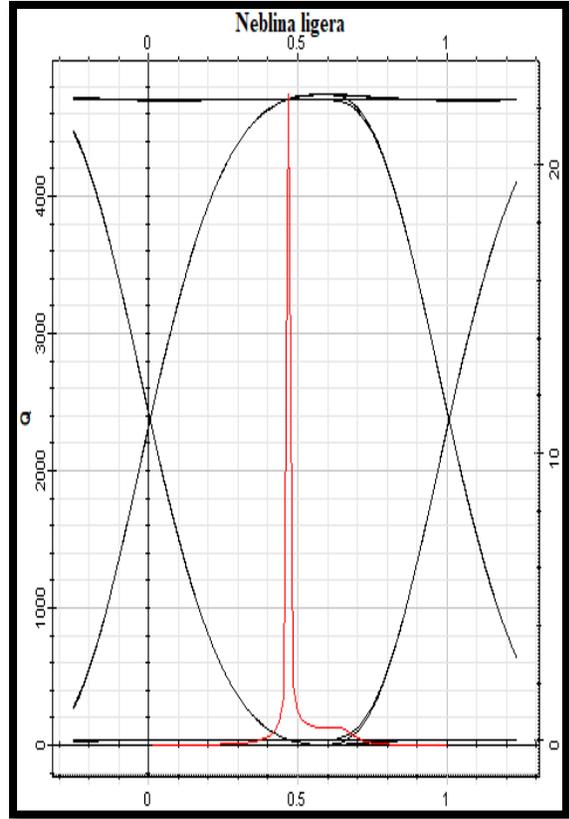
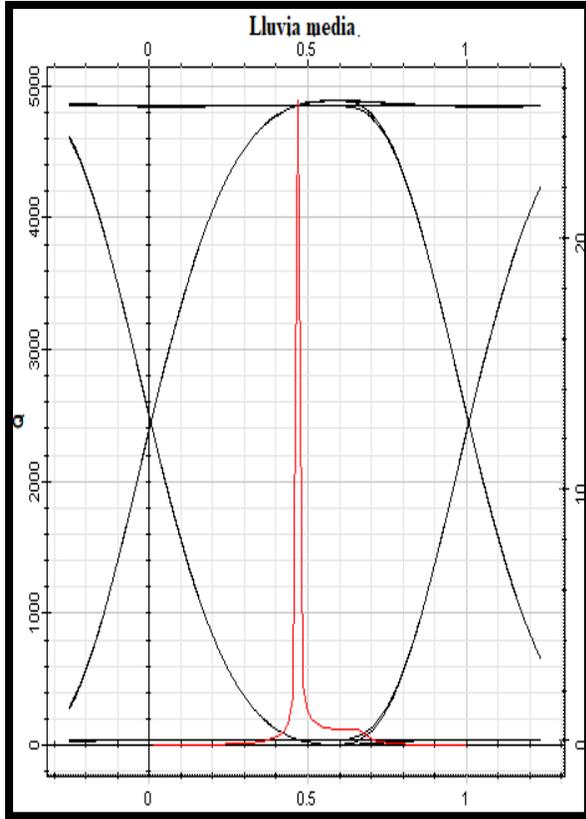
*Resultados para el modelo 2500-Z2 Tasa de 2.5 Gbps.*

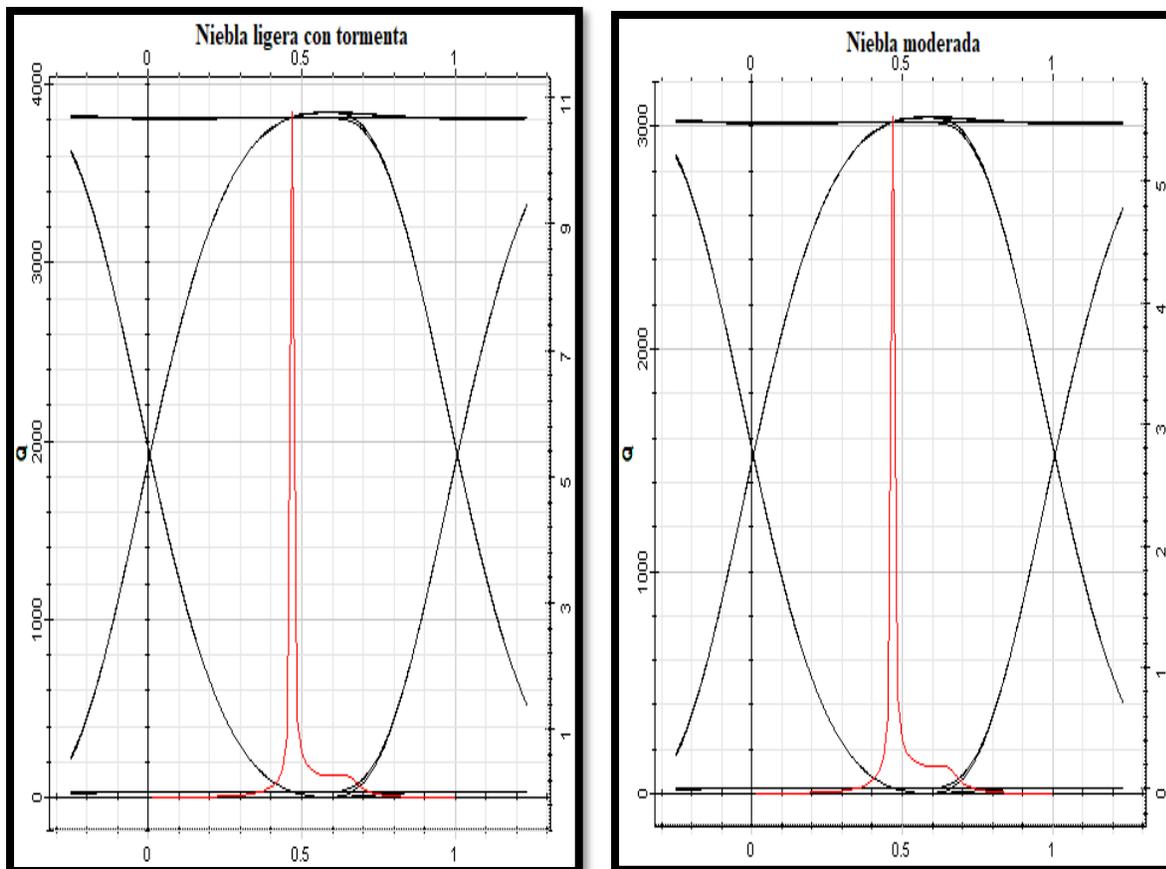
CONDICION METEREOLÓGICA	ASPECTOS DE ANALISIS						
	Atenuación dB/km	Potencia de transmisión mW			Factor Q	Umbral	BER
		P1	P2	P3			
Tiempo despejado	0.54	77	52	5273.51	5173.93	12.86	0
Llovizna	0.6	77	52	5252.91	5169.89	12.81	0
Lluvia ligera	2	77	48	4810.60	5074.31	11.73	0
Neblina muy ligera	3.1	77	45	4489.52	4997.52	10.95	0
Lluvia media	4.6	77	41	4086.01	4890.61	9.96	0
Neblina ligera	6.6	77	36	3603.29	4744.52	8.78	0
Lluvia intensa	6.9	77	35	3535.90	4722.29	8.62	0
Niebla muy ligera	13.8	77	23	2291.39	4195.27	5.59	0
Niebla ligera con tormenta	18.3	77	17	1726.63	3844.25	4.21	0
Niebla moderada	28.9	77	8.9	887.15	3043.22	2.16	0

*Nota.* Los datos muestran el comportamiento del equipo utilizado en cada parámetro de análisis (fuente propia).

De cada condición meteorológica se evidencian las siguientes imágenes donde se observa el factor de calidad Q que es la señal de color rojo, y el diagrama de ojo que es la onda de color negro.







**Figura 51.** Comportamiento del Factor de calidad Q y diagrama de ojo de cada condición meteorológica para el modelo 2500-Z2 del fabricante fSONA con potencia de transmisión de 160 mW, 50 mm de diámetro de apertura del receptor y tasa de 2.5 Gbps. Fuente propia, (2020, pág. 95).

### Segundo escenario – CableFree.

Esta configuración se hará con los datos de modelos ópticos FSO del fabricante CableFree, los cuales están consignados en tablas anteriores. Todos los equipos trabajan con una tasa de bit de 1.5 Gbps, modo de transmisión Full-Dúplex, longitud de onda de 780 nm. Debido a que el fabricante no brinda información sobre el diámetro de apertura del receptor, el simulador Optisystem asigna por defecto 20 cm.

**Modelo G-200.** Para la transmisión el dispositivo emplea una potencia de 30.2 mW y 8 miliradianes/segundo de divergencia del haz láser. De cada condición meteorológica se obtuvieron los siguientes datos.

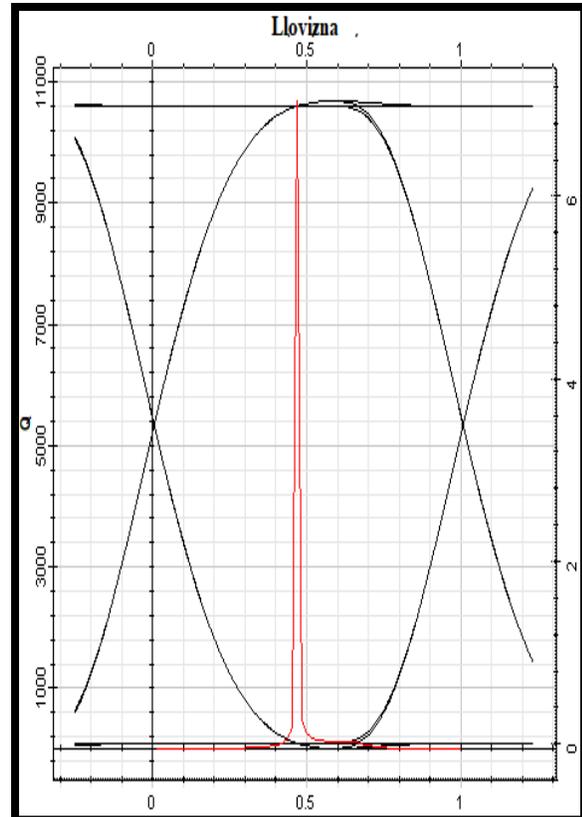
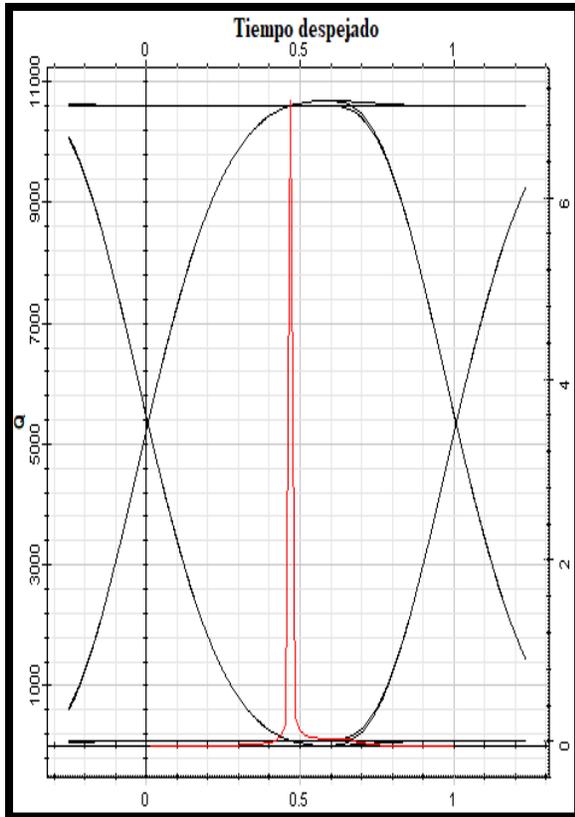
Tabla 18.

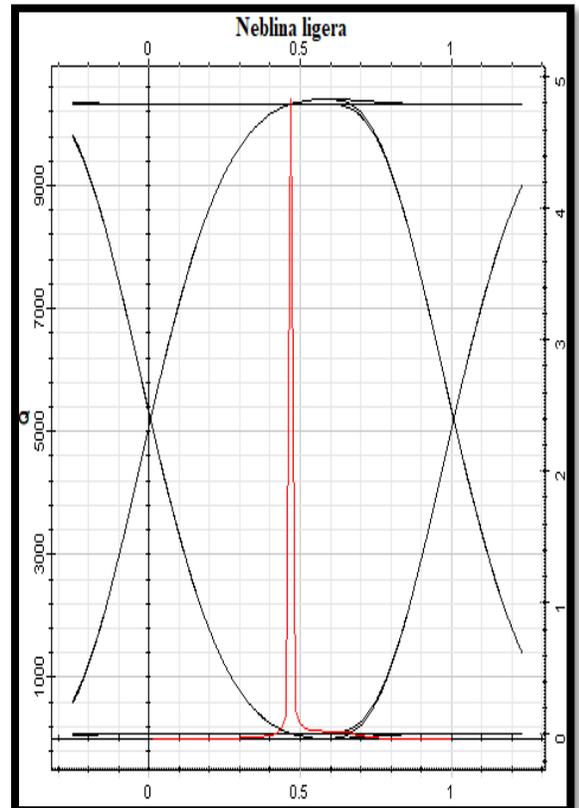
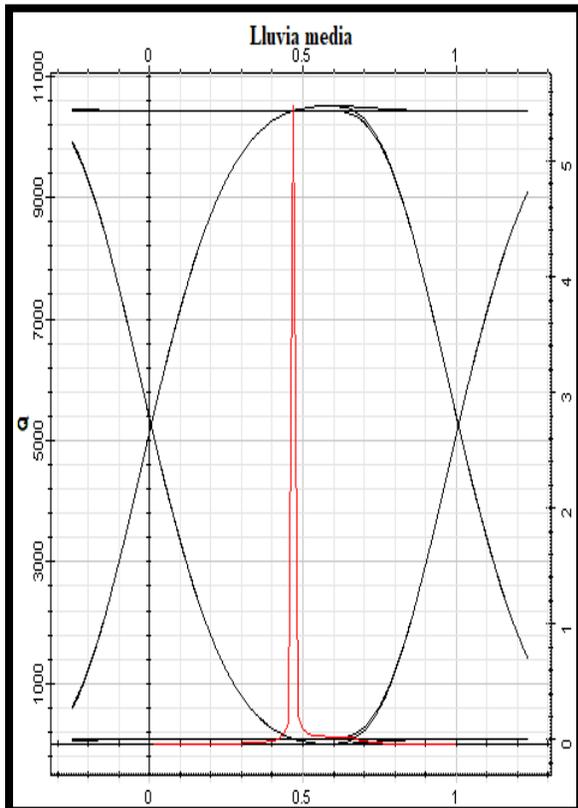
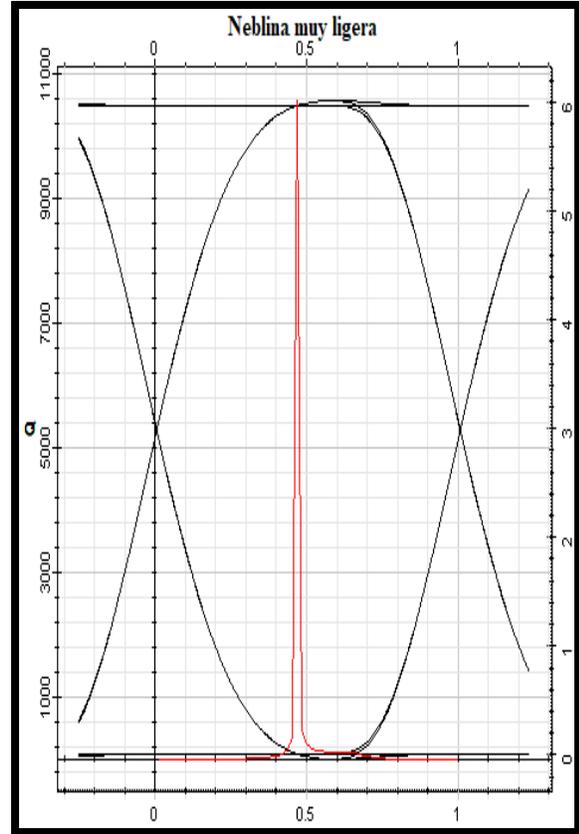
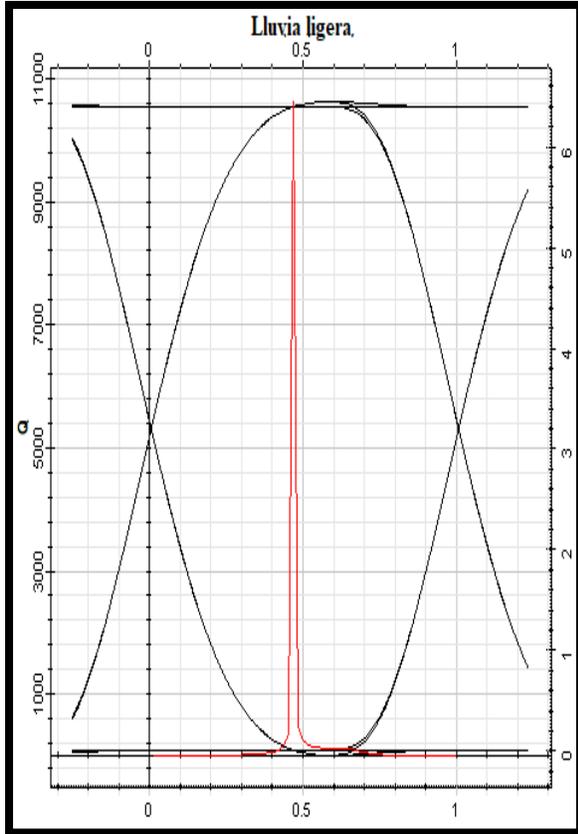
Resultados para el modelo G-200 Tasa de 1.5 Gbps.

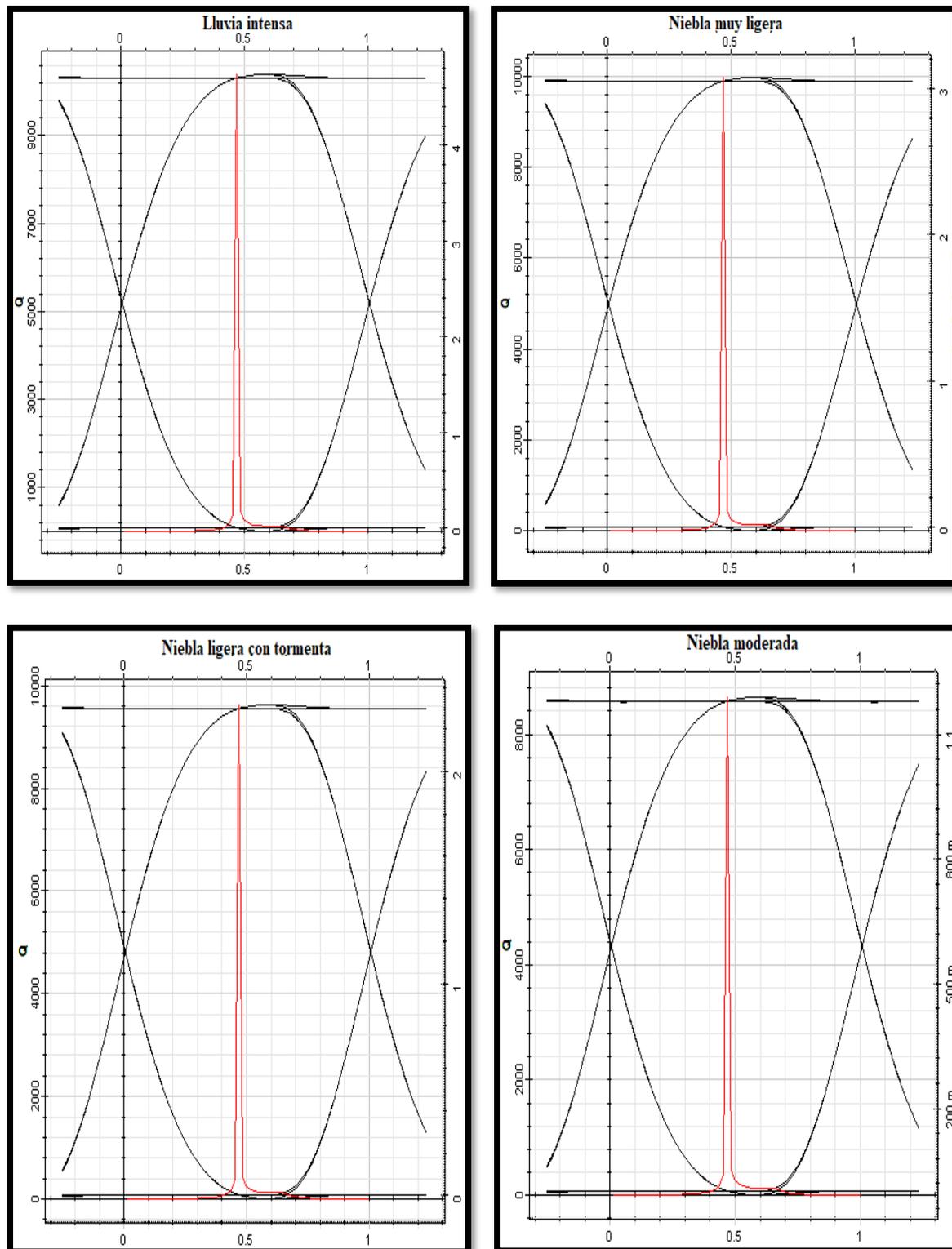
CONDICION METEREOLÓGICA	ASPECTOS DE ANALISIS						
	Atenuación dB/km	Potencia de transmisión mW			Factor Q	Umbral	BER
		P1	P2	P3			
Tiempo despejado	0.54	14	11	1134.22	10687.3	2.76	0
Llovizna	0.6	14	11	1129.79	10684.9	2.75	0
Lluvia ligera	2	14	10	1034.66	10626.2	2.52	0
Neblina muy ligera	3.1	14	9.6	965.60	10577.4	2.35	0
Lluvia media	4.6	14	8.7	879	10507	2.14	0
Neblina ligera	6.6	14	7.7	775	10405.7	1.88	0
Lluvia intensa	6.9	14	7.6	760	10389.8	1.85	0
Niebla muy ligera	13.8	14	4.9	493	9966.63	1.20	0
Niebla ligera con tormenta	18.3	14	3.7	372	9629.11	0.90	0
Niebla moderada	28.9	14	1.9	191	8644.49	0.46	0

*Nota.* Los datos muestran el comportamiento del equipo utilizado en cada parámetro de análisis (fuente propia).

De cada condición meteorológica se evidencian las siguientes imágenes donde se observa el factor de calidad Q que es la señal de color rojo, y el diagrama de ojo que es la onda de color negro.







**Figura 52.** Comportamiento del Factor de calidad  $Q$  y diagrama de ojo de cada condición meteorológica para el modelo G-200 del fabricante CableFree con potencia de transmisión de

30.2 mW, 8 mili-radianes/segundo de divergencia del haz de láser y tasa de 1.5 Gbps (fuente propia, 2020, pág. 98).

**Modelo G-500.** Para la transmisión el dispositivo emplea una potencia de 30.2 mW y 5 mili-radianes/segundo de divergencia del haz láser. De cada condición meteorológica se obtuvieron los siguientes datos.

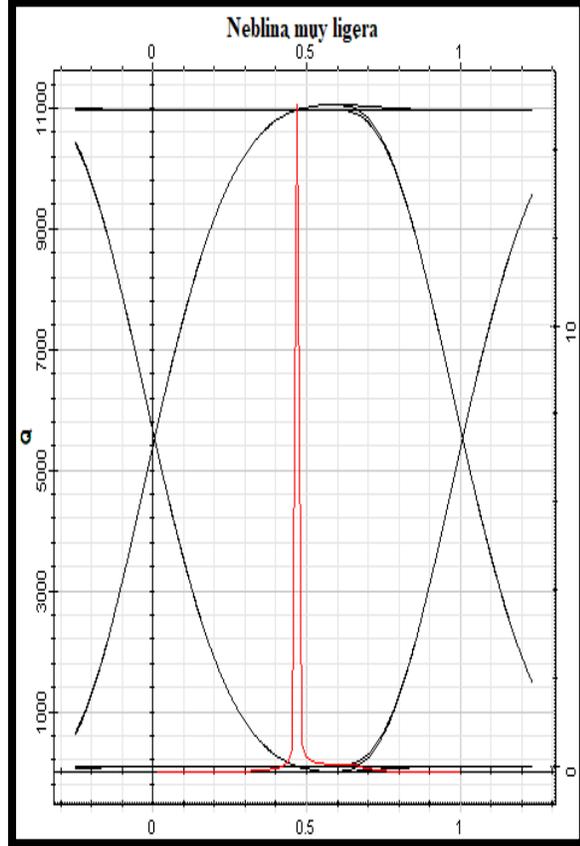
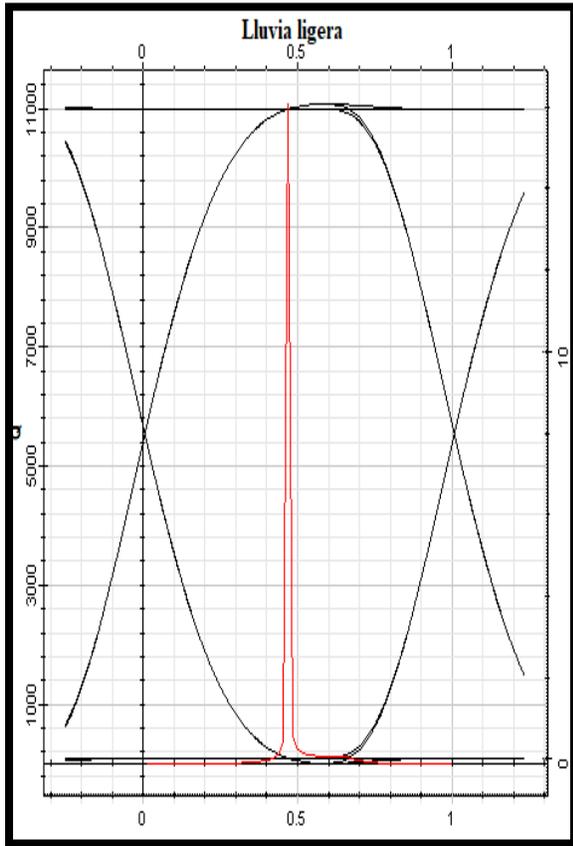
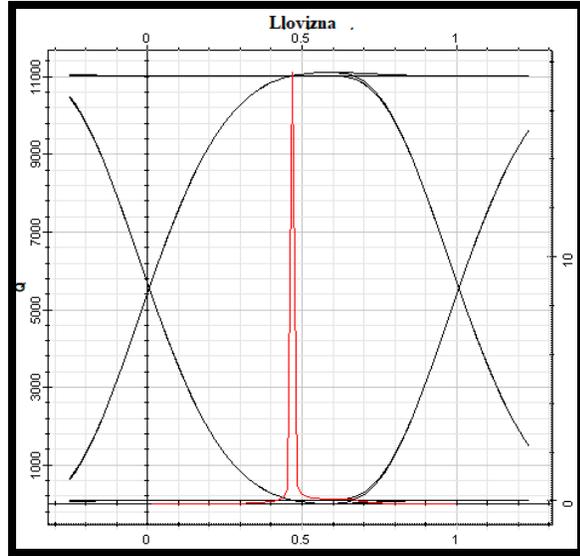
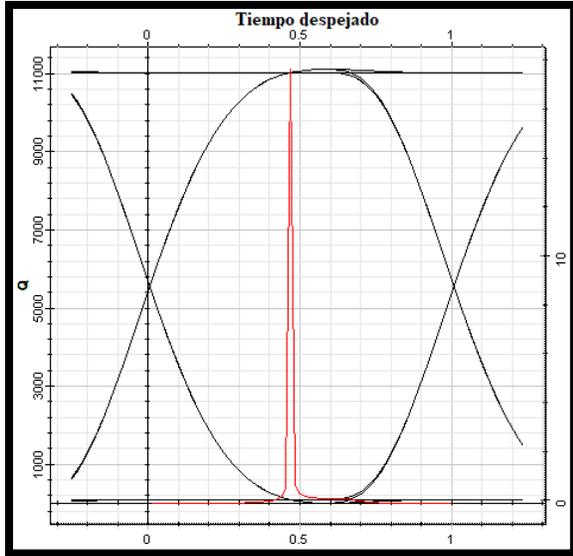
Tabla 19.

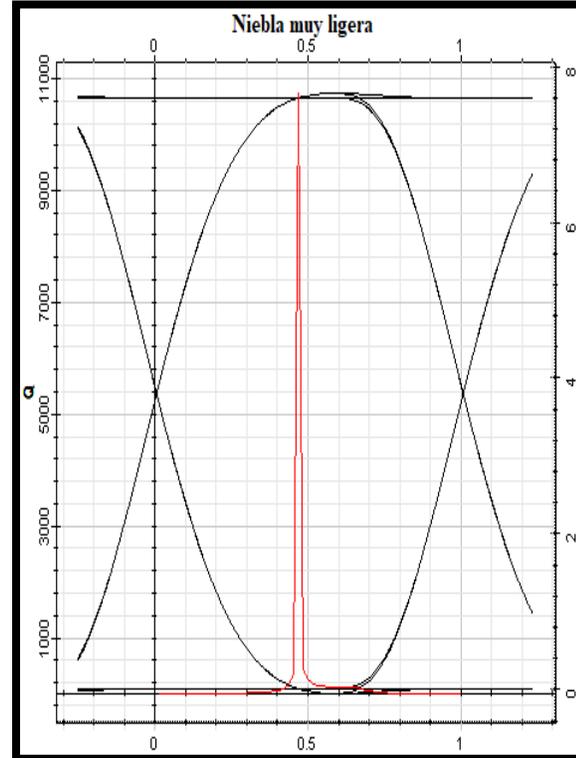
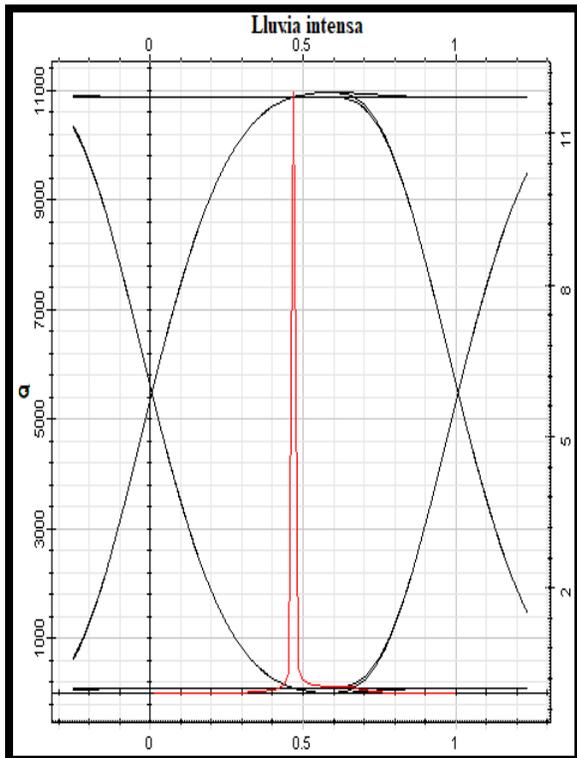
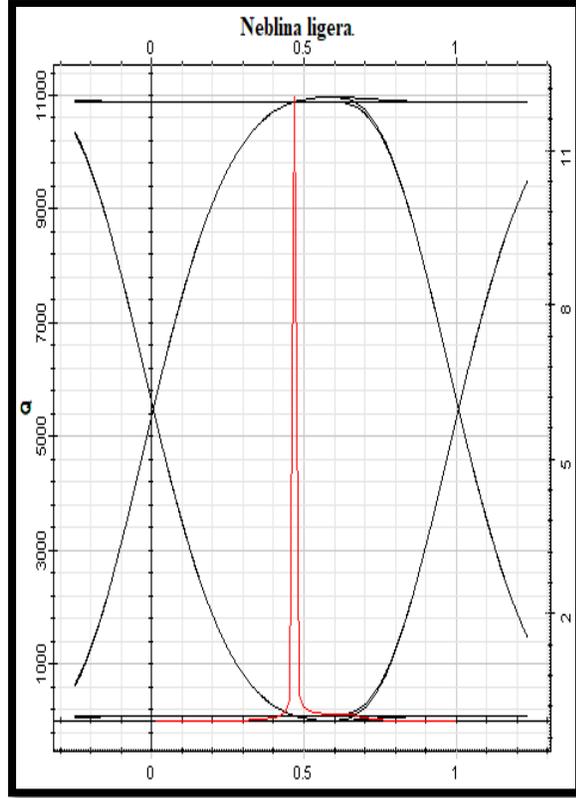
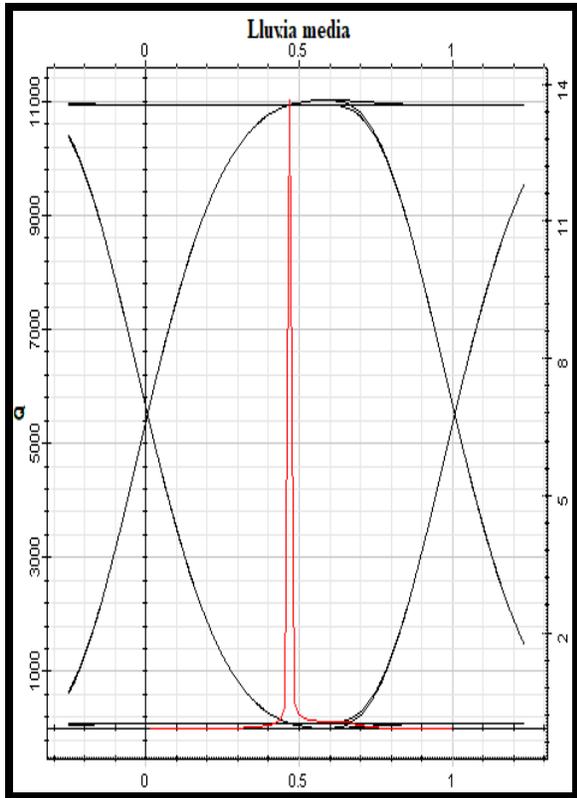
*Resultados para el modelo G-500 Tasa de 1.5 Gbps.*

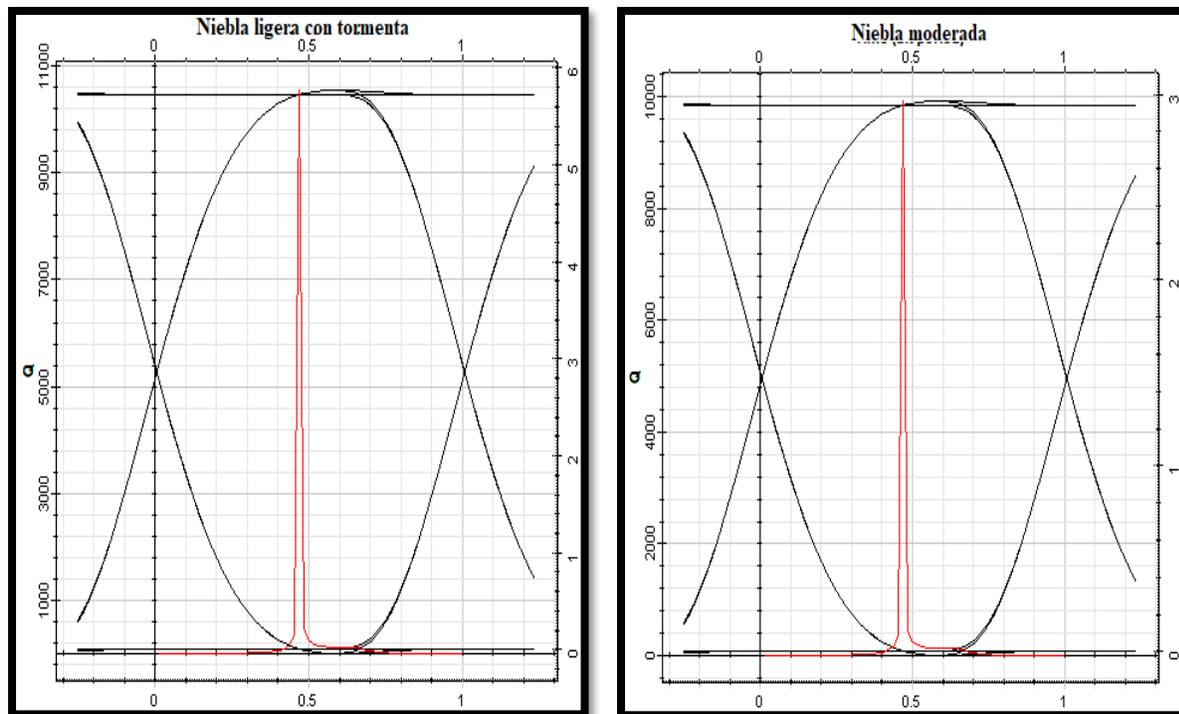
CONDICION METEREOLÓGICA	ASPECTOS DE ANALISIS						
	Atenuación dB/km	Potencia de transmisión mW			Factor Q	Umbral	BER
		P1	P2	P3			
Tiempo despejado	0.54	14	28	2826.18	11111.1	6.89	0
Llovizna	0.6	14	28	2815.78	11109.9	6.86	0
Lluvia ligera	2	14	27	2578.69	11081	6.28	0
Neblina muy ligera	3.1	14	24	2406.02	11056.8	5.86	0
Lluvia media	4.6	14	21.8	2189.77	11021.6	5.34	0
Neblina ligera	6.6	14	19	1931.07	10970.2	4.70	0
Lluvia intensa	6.9	14	18.9	1894.95	10962.1	4.62	0
Niebla muy ligera	13.8	14	12	1228.28	10737.3	2.99	0
Niebla ligera con tormenta	18.3	14	9	928	10546.5	2.25	0
Niebla moderada	28.9	14	4.7	475	9926.58	1.15	0

*Nota.* Los datos muestran el comportamiento del equipo utilizado en cada parámetro de análisis (fuente propia).

De cada condición meteorológica se evidencian las siguientes imágenes donde se observa el factor de calidad Q que es la señal de color rojo, y el diagrama de ojo que es la onda de color negro.







**Figura 53.** Comportamiento del Factor de calidad Q y diagrama de ojo de cada condición meteorológica para el modelo G-500 del fabricante CableFree con potencia de transmisión de 30.2 mW, 5 mili-radianes/segundo de divergencia del haz de láser y tasa de 1.5 Gbps (fuente propia, 2020, pág. 101).

**Modelo G-700/G-1000.** Para la transmisión el dispositivo emplea una potencia de 79.43 mW y 8 mili-radianes/segundo de divergencia del haz láser. De cada condición meteorológica se obtuvieron los siguientes datos.

Tabla 20.

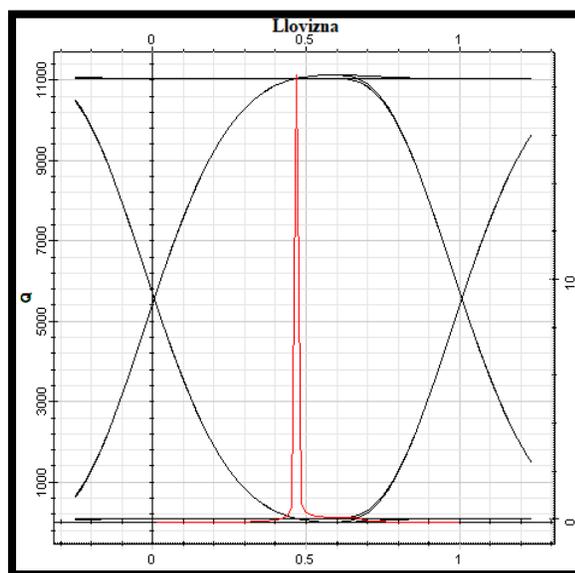
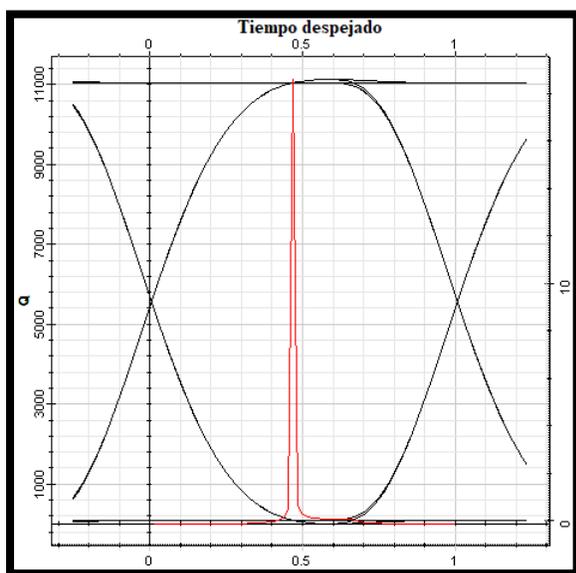
*Resultados para el modelo G-700/G-1000 Tasa de 1.5 Gbps.*

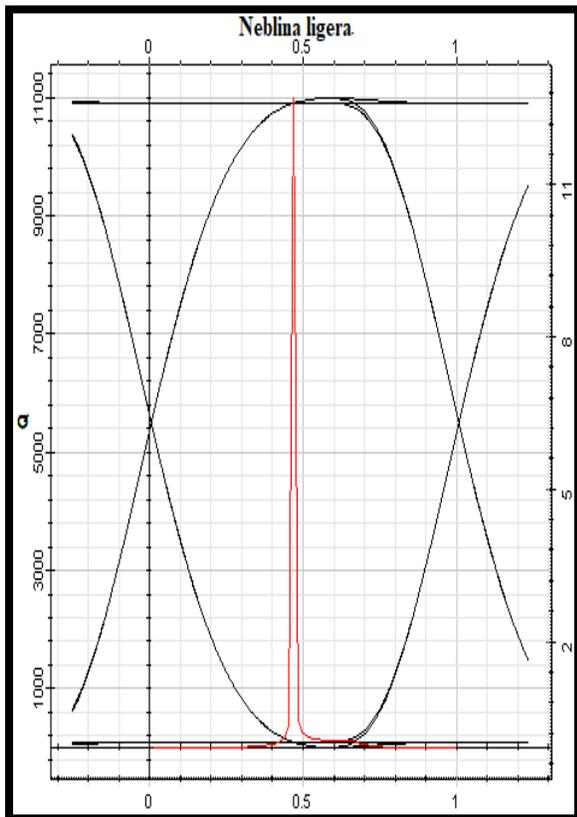
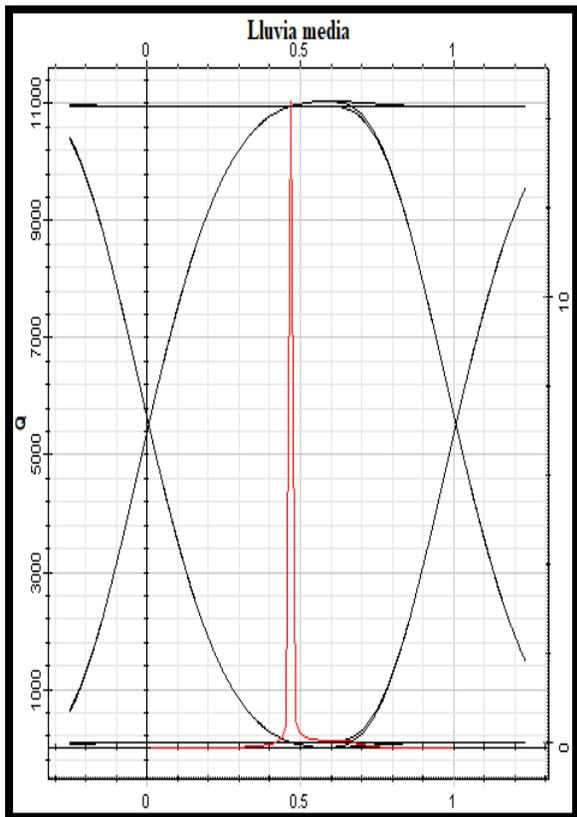
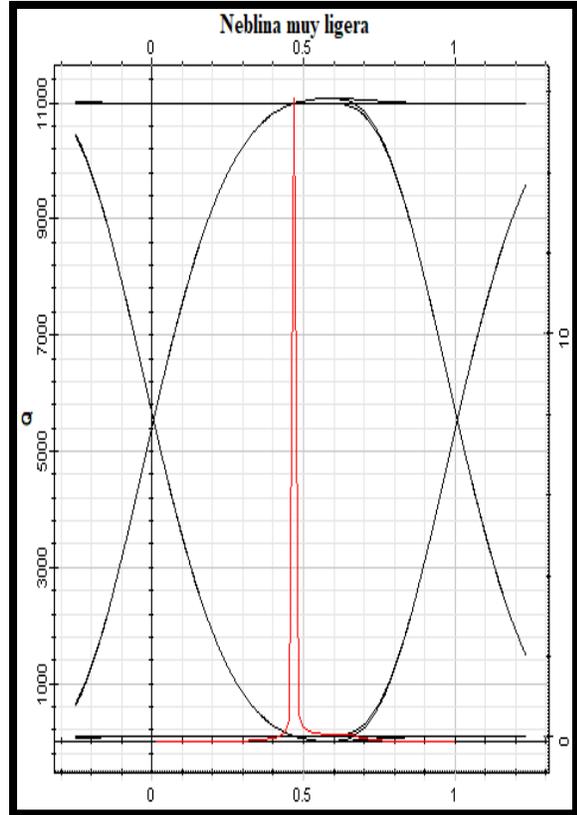
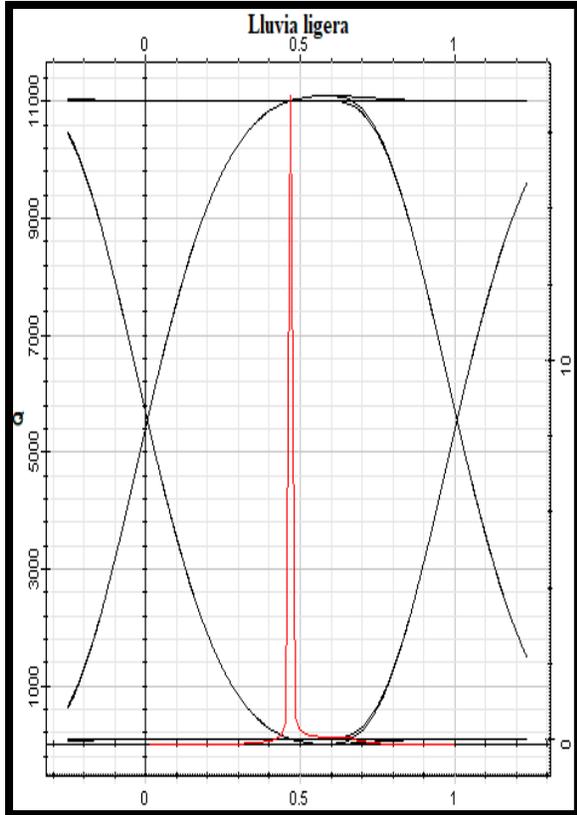
CONDICION METEREOLÓGICA	ASPECTOS DE ANALISIS						
	Atenuación dB/km	Potencia de transmisión mW			Factor Q	Umbral	BER
		P1	P2	P3			
Tiempo despejado	0.54	38	29.8	2981.94	11127.6	7.27	0
Llovizna	0.6	38	29.7	2970.29	11126.5	7.24	0
Lluvia ligera	2	38	27	2720.19	11098.9	6.63	0
Neblina muy ligera	3.1	38	25	2538.63	11075.7	6.19	0
Lluvia media	4.6	38	23	2309.93	11042	5.63	0
Neblina ligera	6.6	38	20	2037.04	10992.8	4.96	0

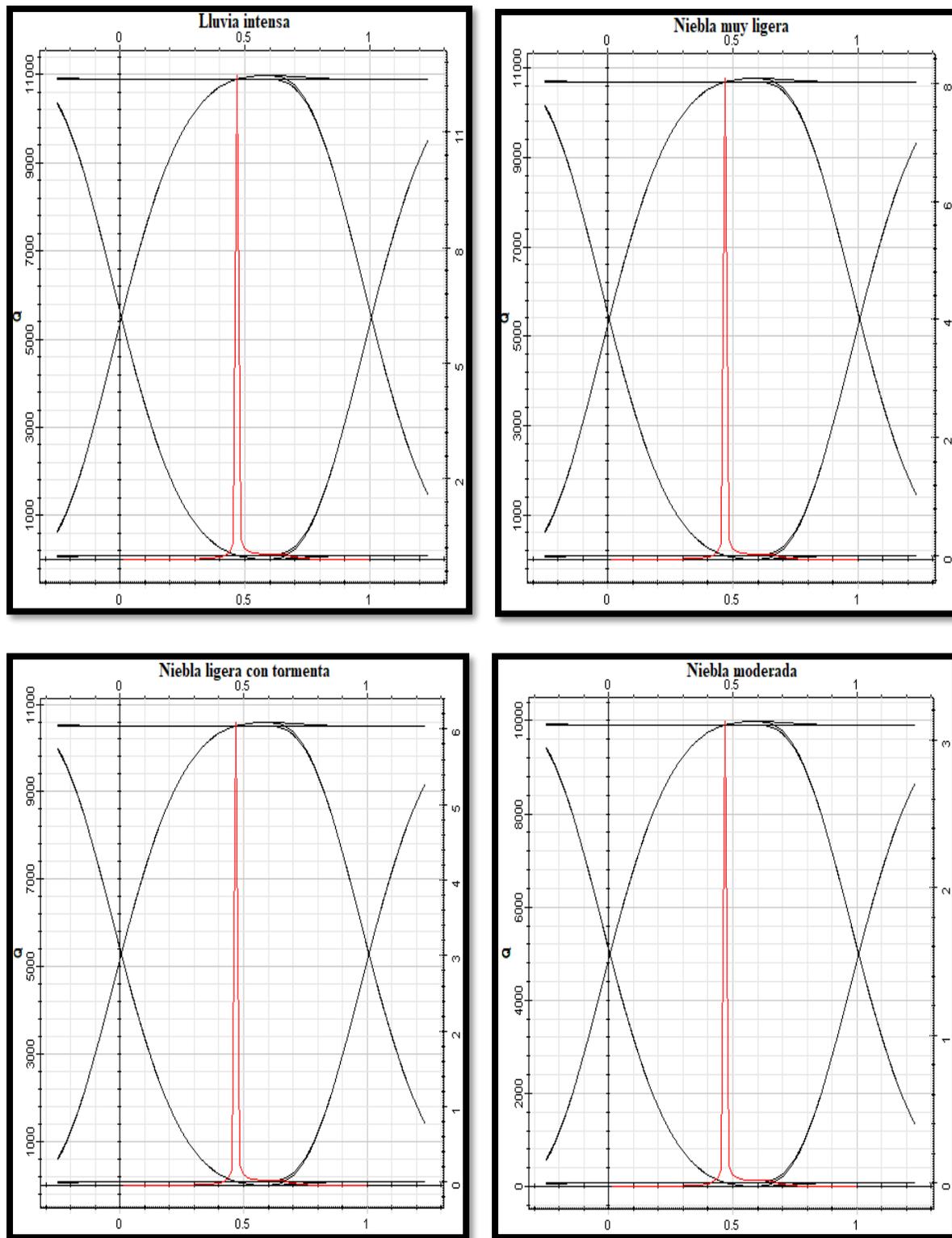
Lluvia intensa	6.9	38	19.9	1999.40	10985	4.87	0
Niebla muy ligera	13.8	38	12.9	1295.68	10769.3	3.16	0
Niebla ligera con tormenta	18.3	38	9.7	976	10585.7	2.38	0
Niebla moderada	28.9	38	5	502	9986.26	1.22	0

*Nota.* Los datos muestran el comportamiento del equipo utilizado en cada parámetro de análisis (fuente propia).

De cada condición meteorológica se evidencian las siguientes imágenes donde se observa el factor de calidad  $Q$  que es la señal de color rojo, y el diagrama de ojo que es la onda de color negro.







**Figura 54.** Comportamiento del Factor de calidad  $Q$  y diagrama de ojo de cada condición meteorológica para el modelo G-700/G-1000 del fabricante CableFree con potencia de

transmisión de 79.43 mW, 8 mili-radianes/segundo de divergencia del haz de láser y tasa de 1.5 Gbps (fuente propia, 2020, pág. 104).

**Modelo G-1500.** Para la transmisión el dispositivo emplea una potencia de 79.43 mW y 5 mili-radianes/segundo de divergencia del haz láser. De cada condición meteorológica se obtuvieron los siguientes datos.

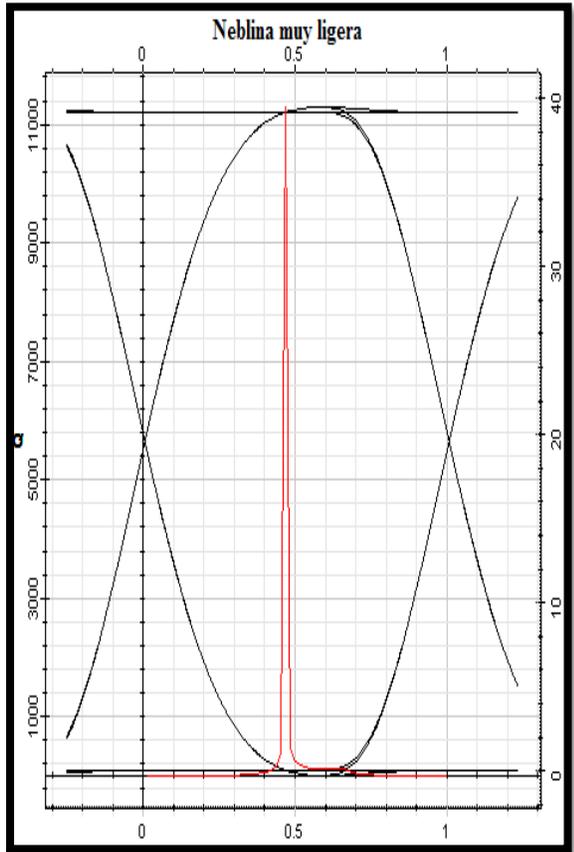
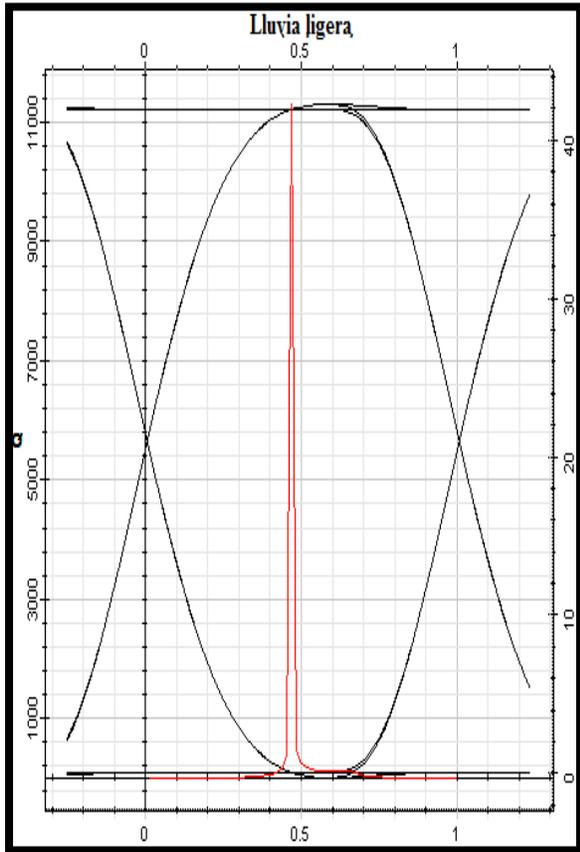
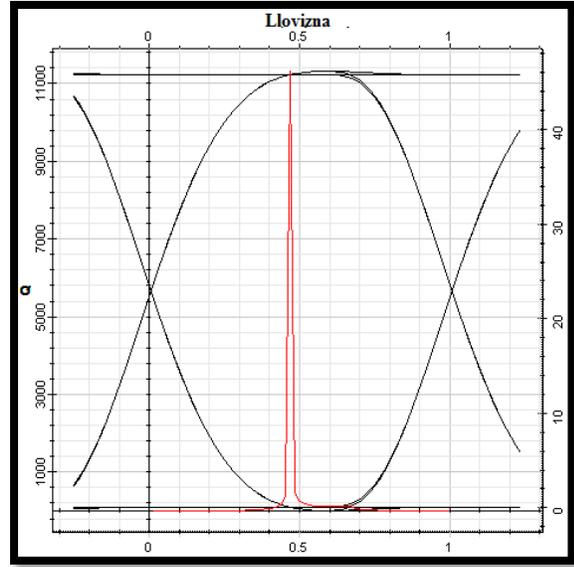
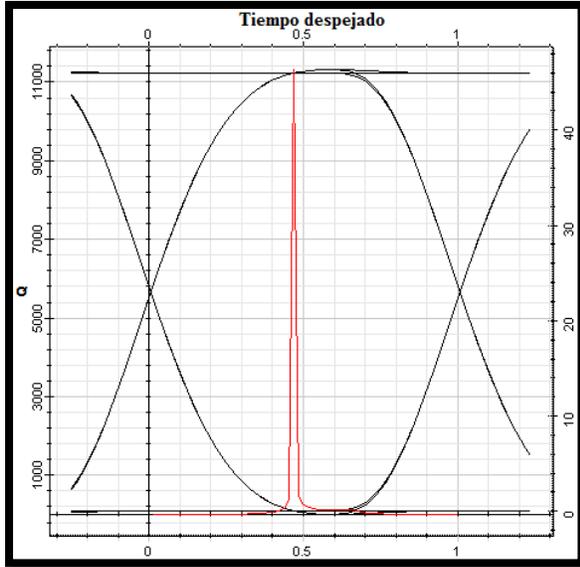
Tabla 21.

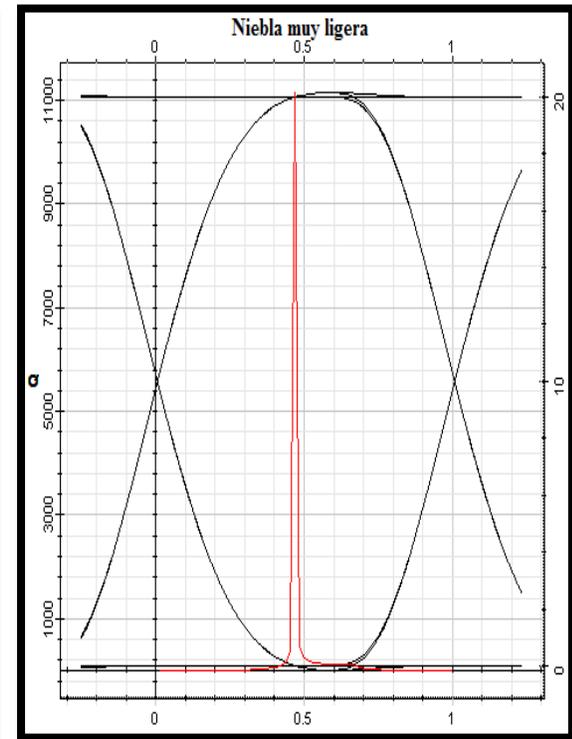
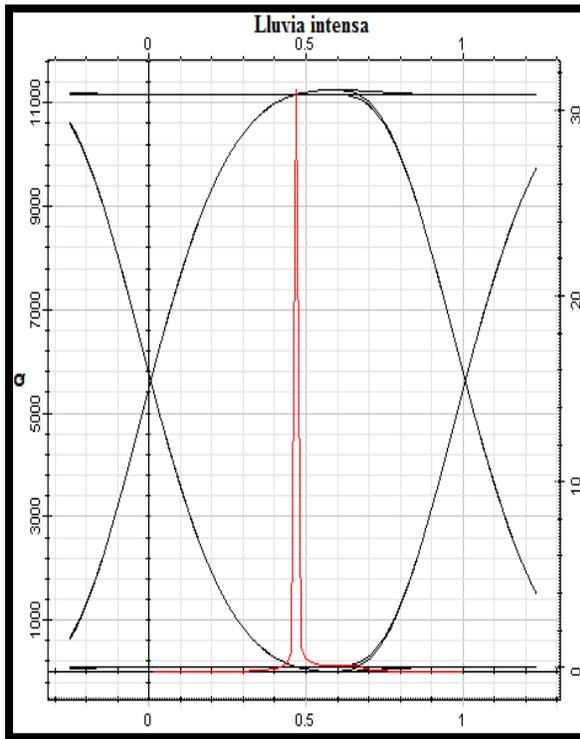
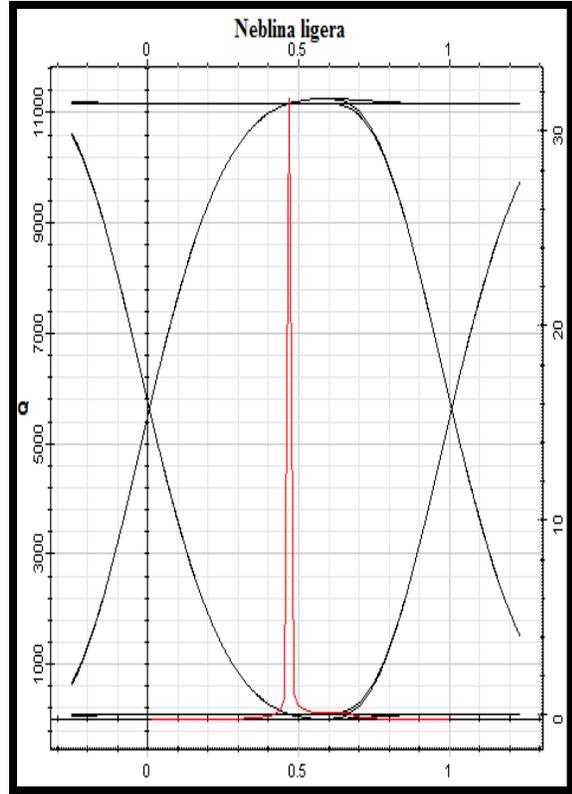
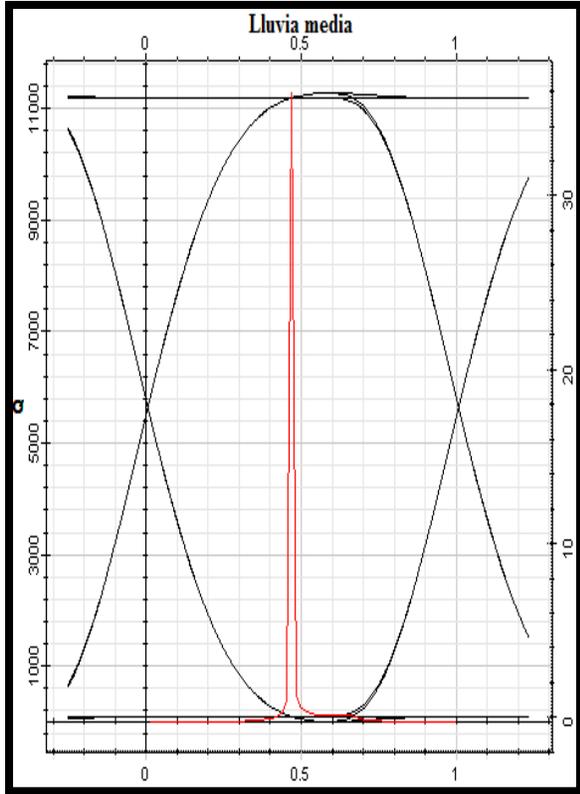
*Resultados para el modelo G-1500 Tasa de 1.5 Gbps.*

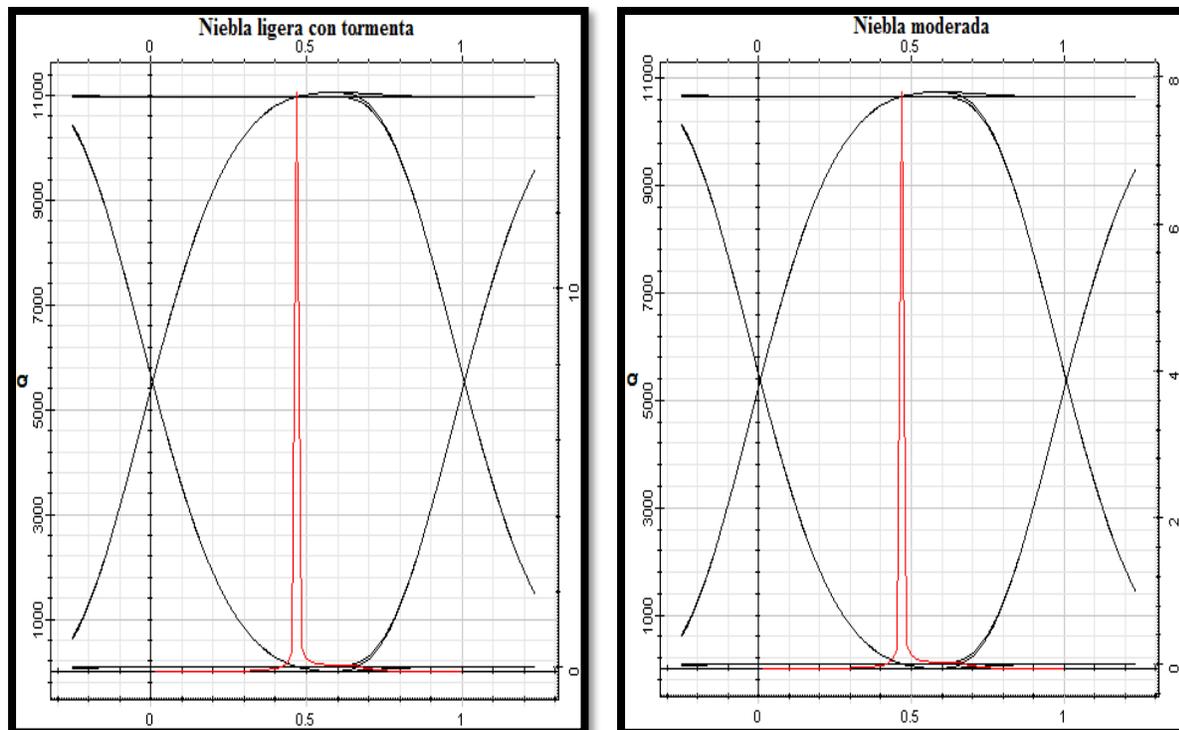
CONDICION METEREOLÓGICA	ASPECTOS DE ANALISIS						
	Atenuación dB/km	Potencia de transmisión mW			Factor Q	Umbral	BER
		P1	P2	P3			
Tiempo despejado	0.54	38	74	7431.90	11319.8	18.12	0
Llovizna	0.6	38	74	7402.86	11319.3	18.06	0
Lluvia ligera	2	38	67.7	6779.53	11306.6	16.53	0
Neblina muy ligera	3.1	38	63	6327.03	11295.8	15.43	0
Lluvia media	4.6	38	57	5757.04	11280.2	14.04	0
Neblina ligera	6.6	38	50.7	5075.74	11257.2	12.38	0
Lluvia intensa	6.9	38	49.8	4983.10	11253.5	12.15	0
Niebla muy ligera	13.8	38	32	3229.23	11150.9	7.87	0
Niebla ligera con tormenta	18.3	38	24	2433.88	11061	5.93	0
Niebla moderada	28.9	38	12	1250.25	10748	3.04	0

*Nota.* Los datos muestran el comportamiento del equipo utilizado en cada parámetro de análisis (fuente propia).

De cada condición meteorológica se evidencian las siguientes imágenes donde se observa el factor de calidad Q que es la señal de color rojo, y el diagrama de ojo que es la onda de color negro.







**Figura 55.** Comportamiento del Factor de calidad Q y diagrama de ojo de cada condición meteorológica para el modelo G-1500 del fabricante CableFree con potencia de transmisión de 79.43 mW, 5 mili-radianes/segundo de divergencia del haz de láser y tasa de 1.5 Gbps. Fuente propia, (2020, pág. 107).

**Modelo G-2000.** Para la transmisión el dispositivo emplea una potencia de 79.43 mW y 4 mili-radianes/segundo de divergencia del haz láser. De cada condición meteorológica se obtuvieron los siguientes datos.

Tabla 22.

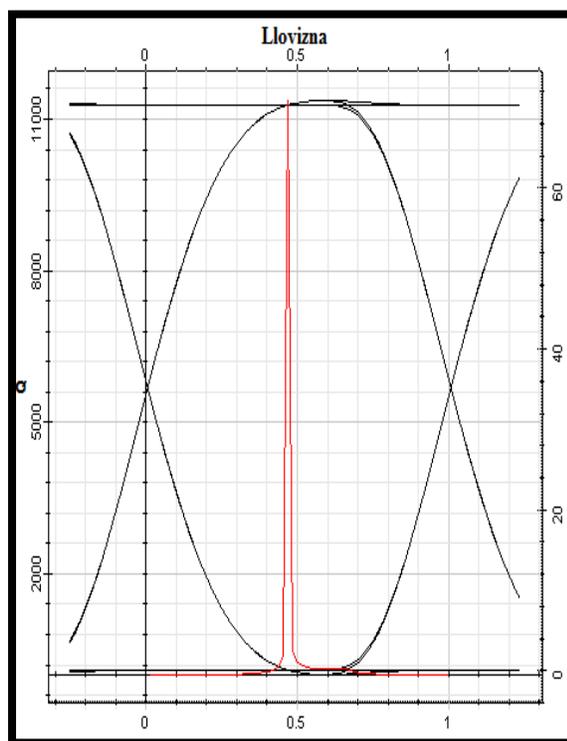
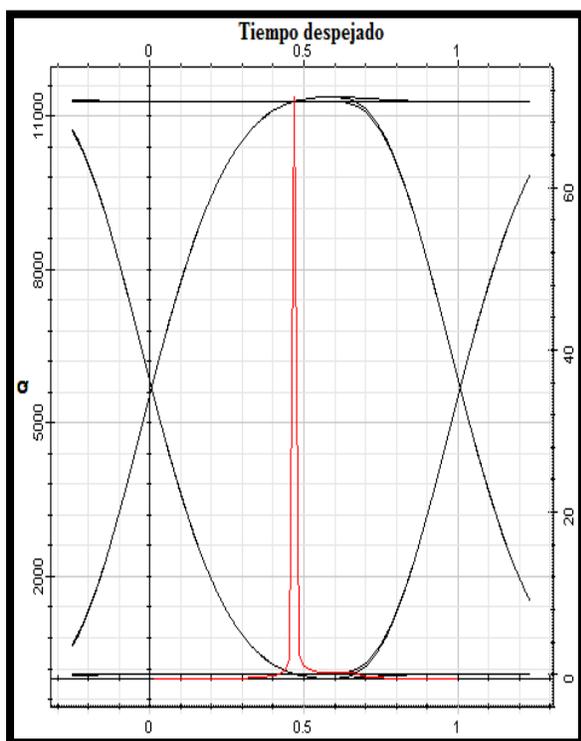
*Resultados para el modelo G-2000 Tasa de 1.5 Gbps.*

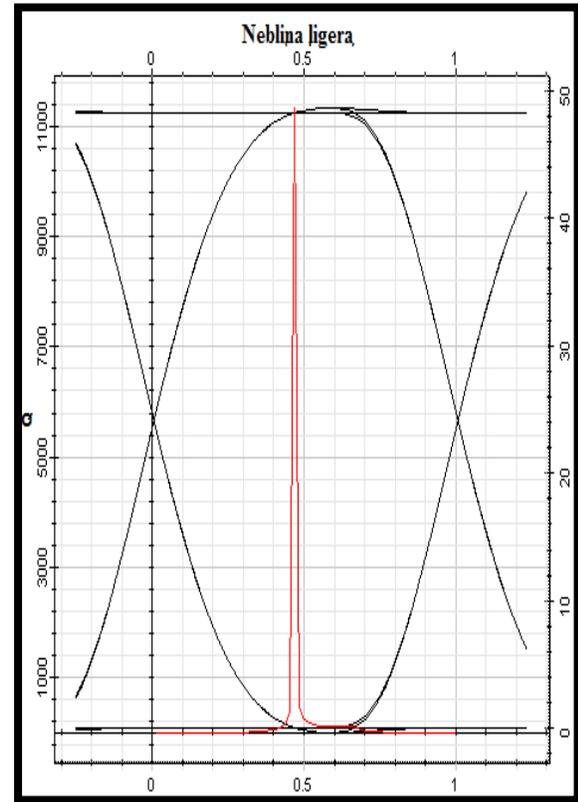
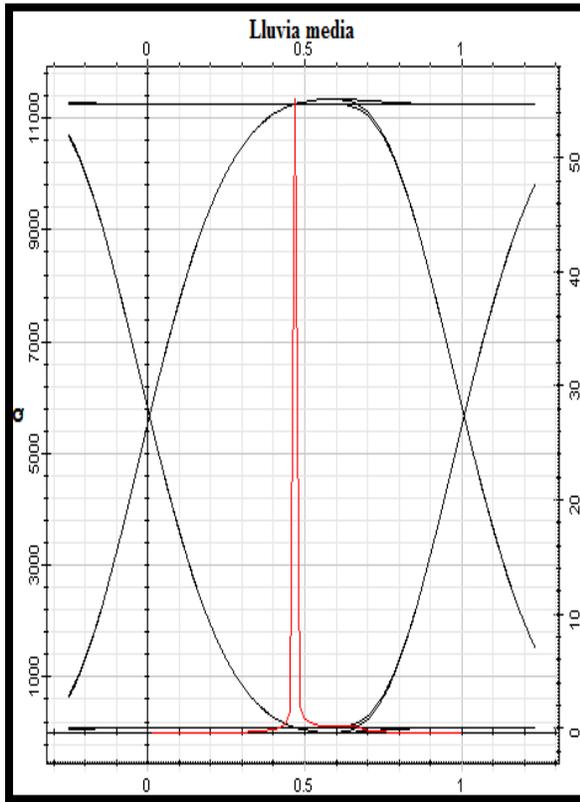
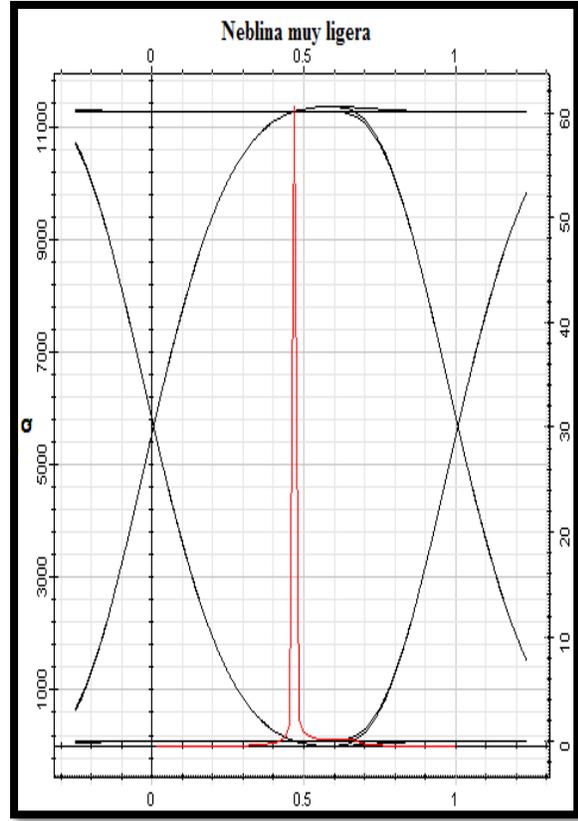
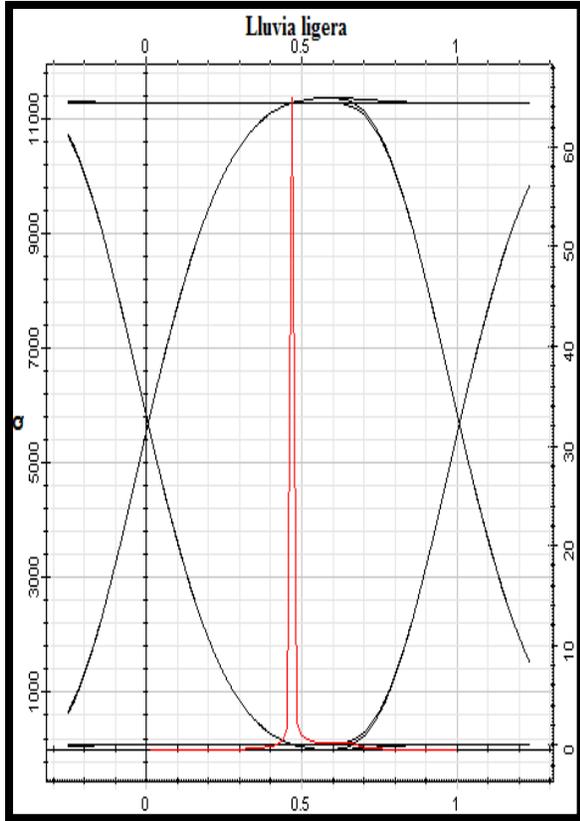
CONDICION METEREOLÓGICA	ASPECTOS DE ANALISIS						
	Atenuación dB/km	Potencia de transmisión mW			Factor Q	Umbral	BER
		P1	P2	P3			
Tiempo despejado	0.54	38	114	11407.75	11369.8	27.83	0
Llovizna	0.6	38	113	11363.18	11369.4	27.72	0
Lluvia ligera	2	38	104	10408.78	11360.6	25.39	0
Neblina muy ligera	3.1	38	97	9714.04	11353	23.69	0
Lluvia media	4.6	38	88	8838.93	11342.3	21.56	0
Neblina ligera	6.6	38	78	7794.71	11326.3	19.01	0

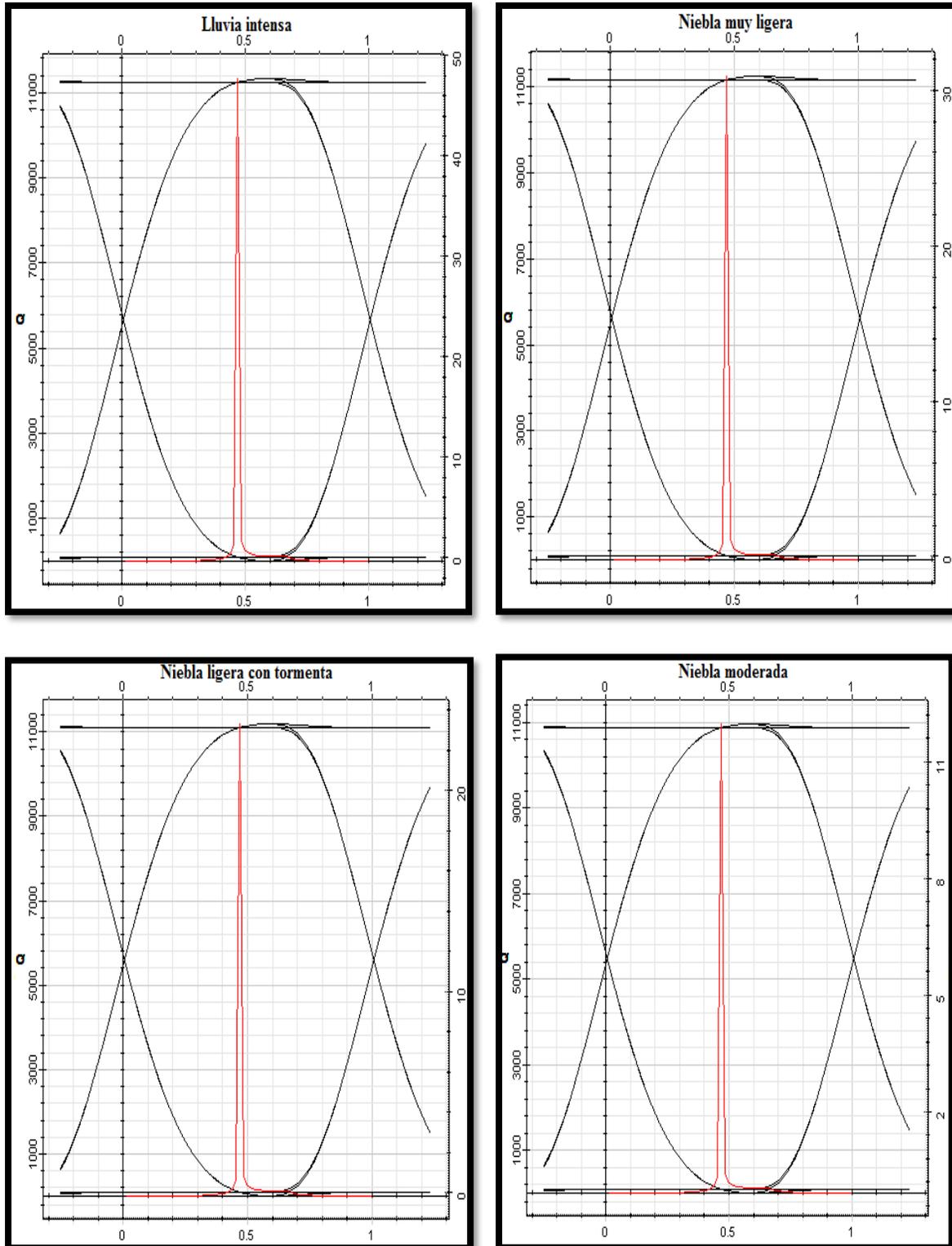
Lluvia intensa	6.9	38	76	7648.91	11323.8	18.66	0
Niebla muy ligera	13.8	38	49	4957.92	11252.5	12.09	0
Niebla ligera con tormenta	18.3	38	37	3735.94	11189.7	9.11	0
Niebla moderada	28.9	38	19	1919.11	10967.6	4.68	0

*Nota.* Los datos muestran el comportamiento del equipo utilizado en cada parámetro de análisis (fuente propia).

De cada condición meteorológica se evidencian las siguientes imágenes donde se observa el factor de calidad  $Q$  que es la señal de color rojo, y el diagrama de ojo que es la onda de color negro.







**Figura 56.** Comportamiento del Factor de calidad  $Q$  y diagrama de ojo de cada condición meteorológica para el modelo G-2000 del fabricante CableFree con potencia de transmisión de

79.43 mW, 4 mili-radianes/segundo de divergencia del haz de láser y tasa de 1.5 Gbps. Fuente propia, (2020, pág. 110).

### Tercer escenario – AIRLINX Communications Inc.

Esta configuración se hará con los modelos ópticos FSO del fabricante AIRLINX Communications Inc. Los datos de cada equipo están consignados en tablas anteriores. Todos los equipos trabajan con una tasa de bit de 1.25 Gbps y modo de transmisión Full-Dúplex. Debido a que el fabricante de cada modelo no brinda información sobre el diámetro de apertura del receptor, el simulador Optisystem asigna por defecto 20 cm. Para la divergencia del haz láser el simulador Optisystem asigna por defecto 2 mili-radianes/segundo.

El modelo FlightStrata-G tendrá simulaciones de cada condición meteorológica para cada potencia de transmisión, las cuales son 2 mW, 10 mW y 1000 mW.

**Modelo FlightStrata-G Longitud de 850 nm.** Para la transmisión el dispositivo emplea una potencia de 2 mW. De cada condición meteorológica se obtuvieron los siguientes datos.

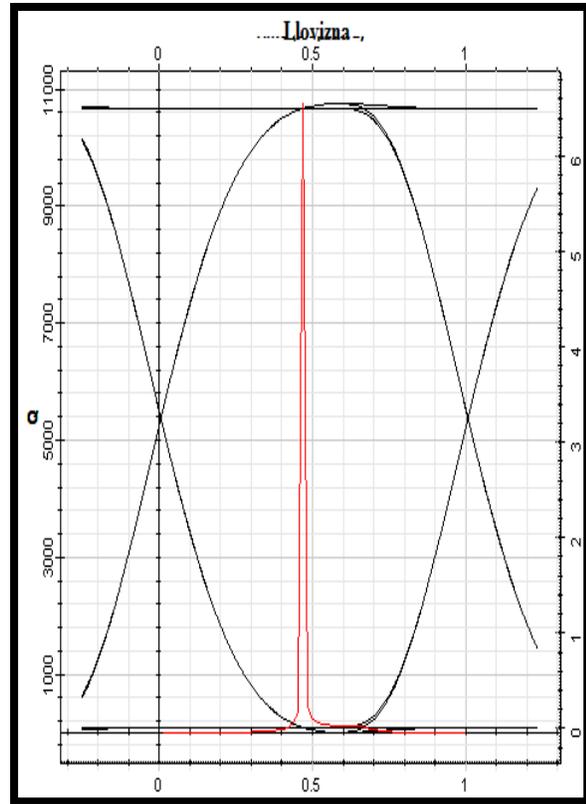
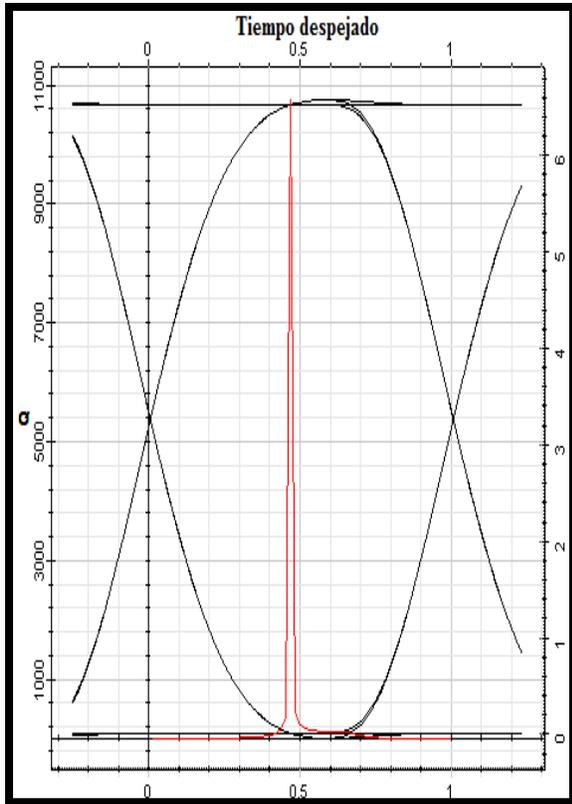
Tabla 23.

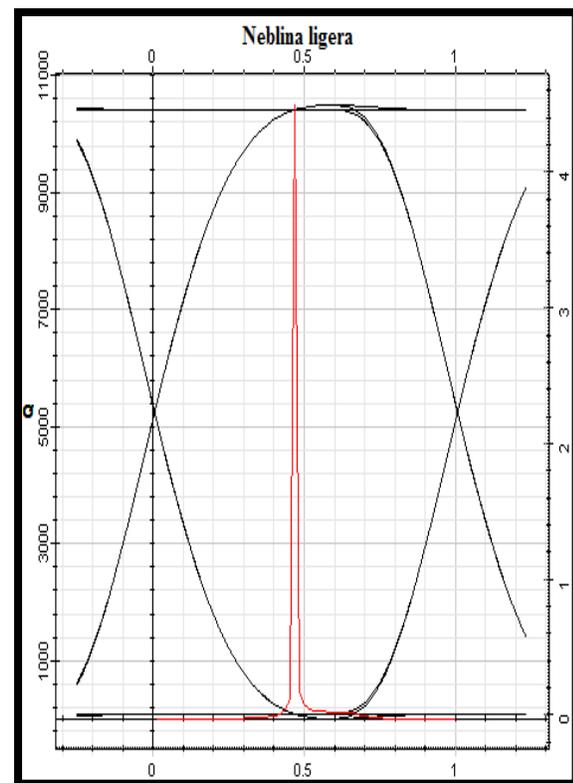
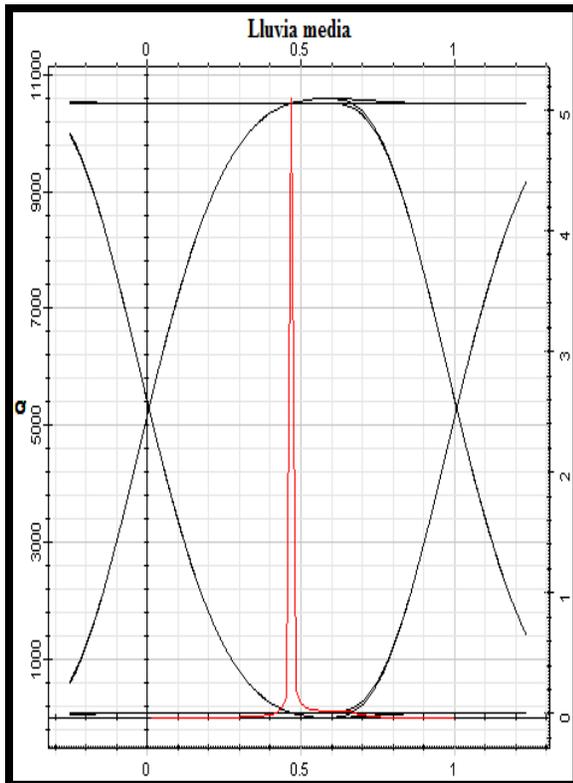
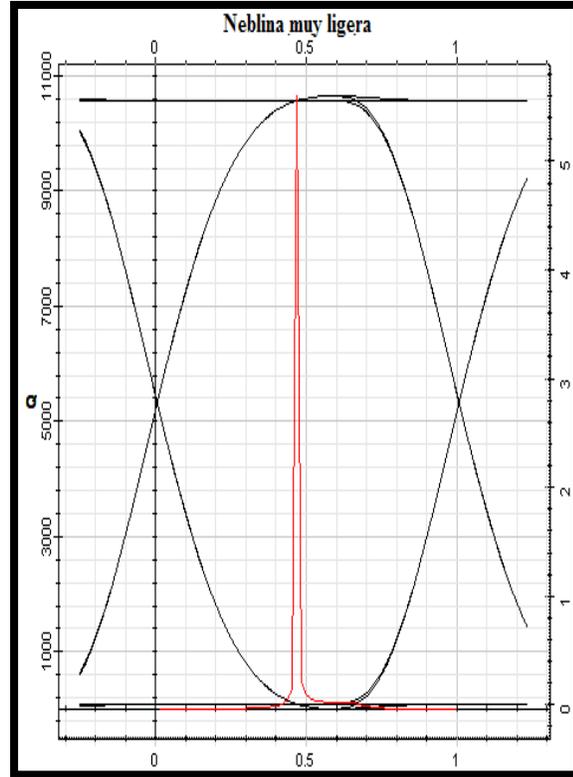
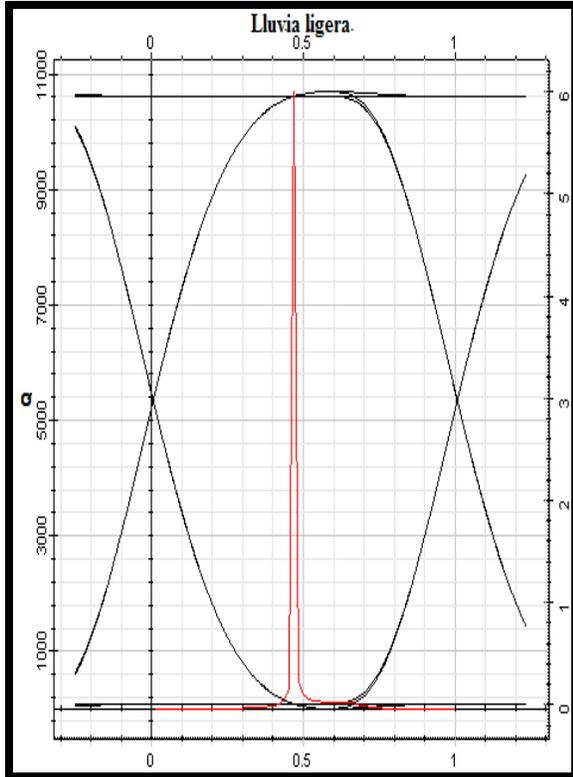
*Resultados para el modelo FlightStrata Tasa de 1.25 Gbps.*

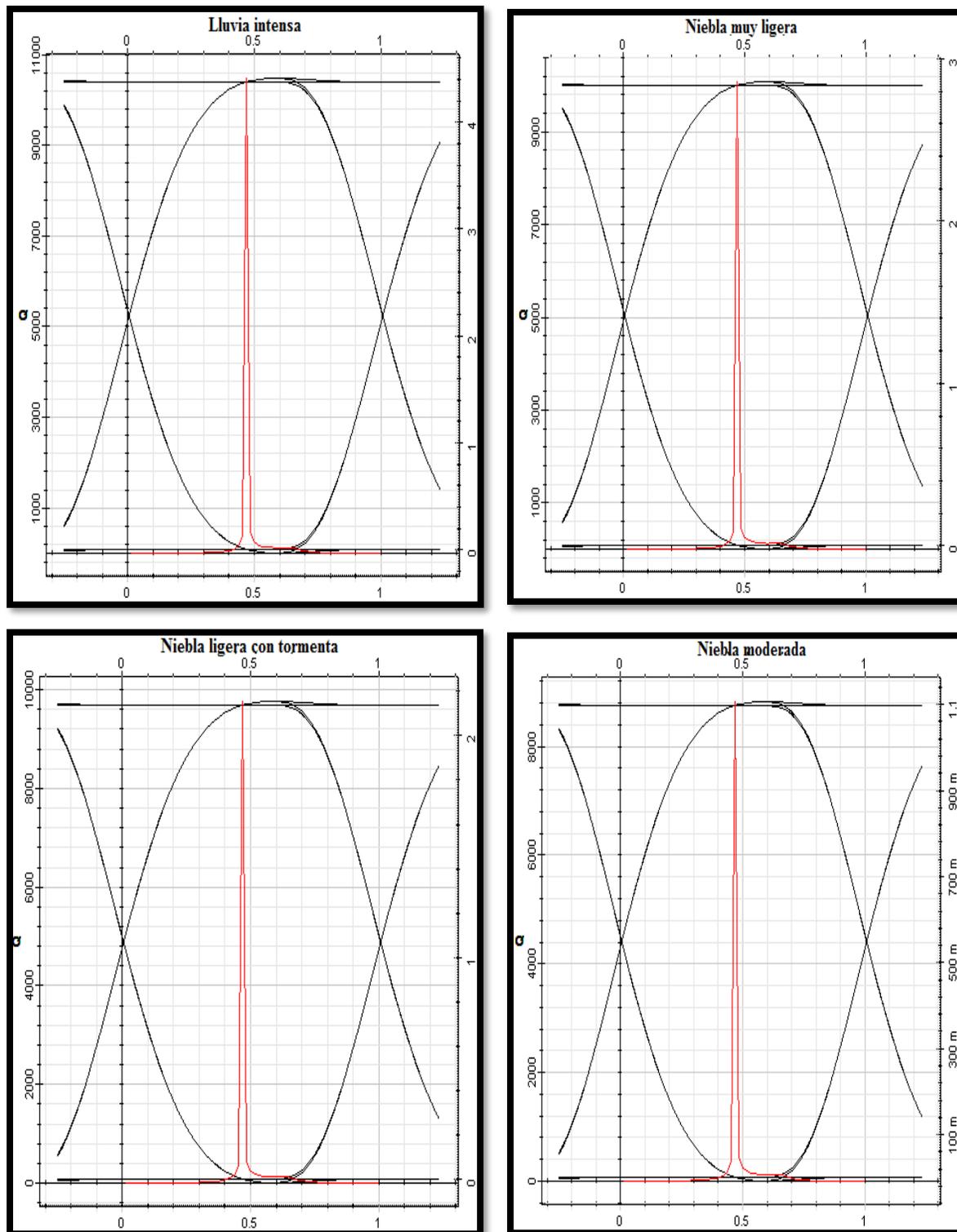
CONDICION METEREOLÓGICA	ASPECTOS DE ANALISIS						
	Atenuación dB/km	Potencia de transmisión mW			Factor Q	Umbral	BER
		P1	P2	P3			
Tiempo despejado	0.54	968	10	1059.49	10557.7	2.57	0
Llovizna	0.6	968	10.5	1055.60	10753.5	2.56	0
Lluvia ligera	2	968	9.6	966	10699.3	2.34	0
Neblina muy ligera	3.1	968	9	902	10654.2	2.19	0
Lluvia media	4.6	968	8.2	821	10589	1.99	0
Neblina ligera	6.6	968	7.2	724	10495.1	1.75	0
Lluvia intensa	6.9	968	7.1	710	10480.3	1.72	0
Niebla muy ligera	13.8	968	4.6	460	10085	1.11	0
Niebla ligera con tormenta	18.3	968	3.4	347	9766.88	0.84	0
Niebla moderada	28.9	968	1.7	178	8824.94	0.43	0

*Nota.* Los datos muestran el comportamiento del equipo utilizado en cada parámetro de análisis (fuente propia).

De cada condición meteorológica se evidencian las siguientes imágenes donde se observa el factor de calidad Q que es la señal de color rojo, y el diagrama de ojo que es la onda de color negro.







**Figura 57.** Comportamiento del Factor de calidad  $Q$  y diagrama de ojo de cada condición meteorológica para el modelo FlightStrata-G del fabricante AIRLINX Communications Inc. con potencia de transmisión de 2 mW y tasa de 1.25 Gbps. Fuente propia, (2020, pág. 114).

**Modelo FlightStrata-G Longitud de 850 nm.** Para la transmisión el dispositivo emplea una potencia de 10 mW. De cada condición meteorológica se obtuvieron los siguientes datos.

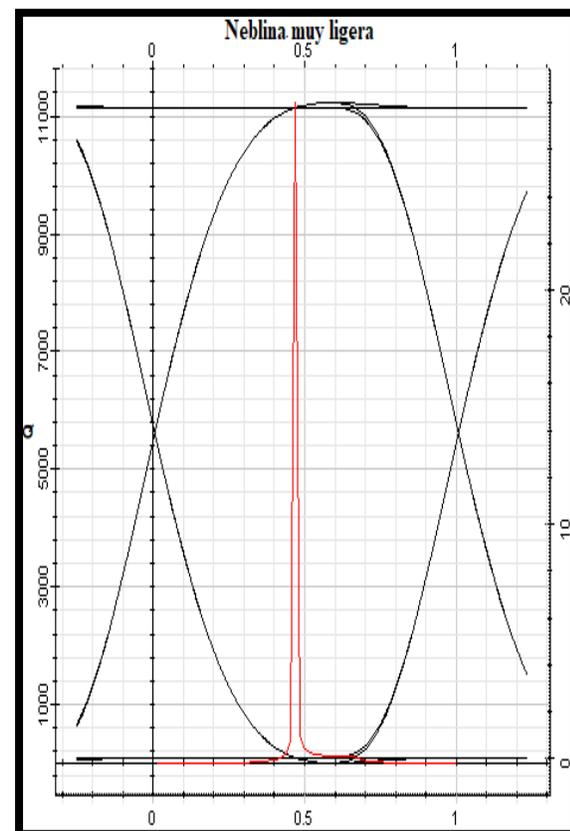
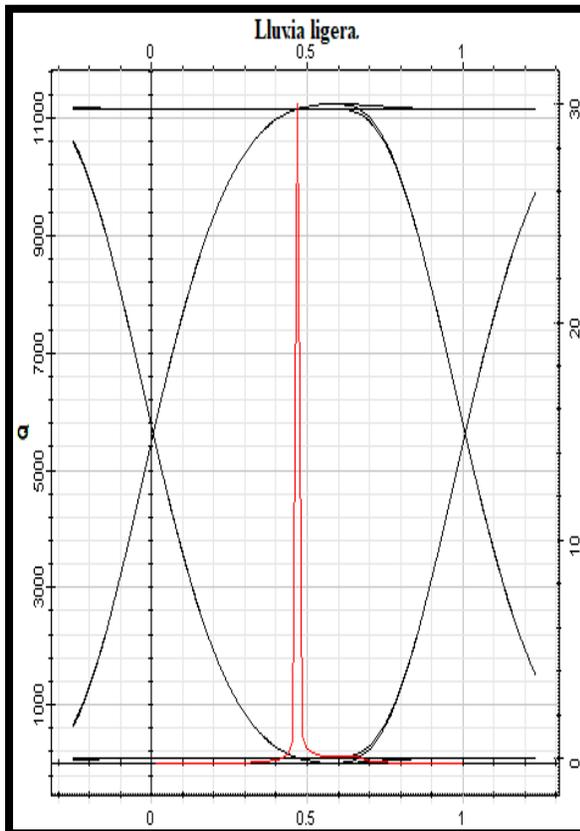
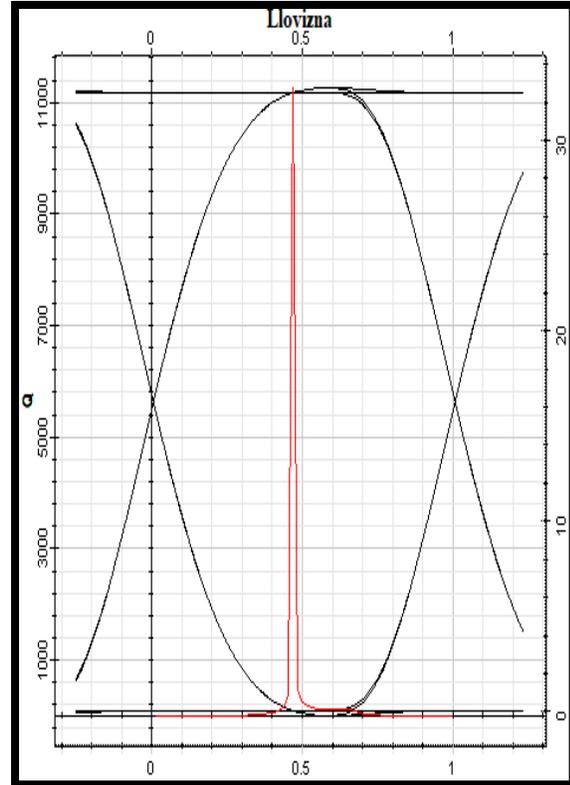
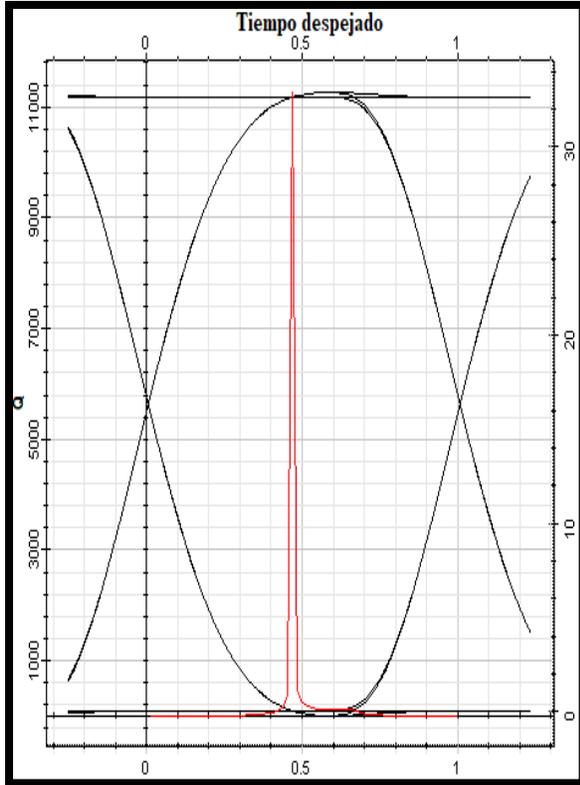
Tabla 24.

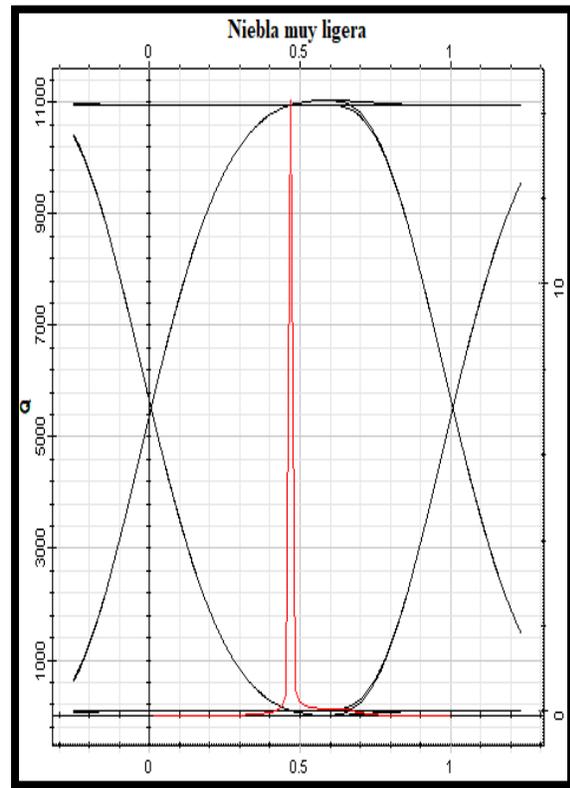
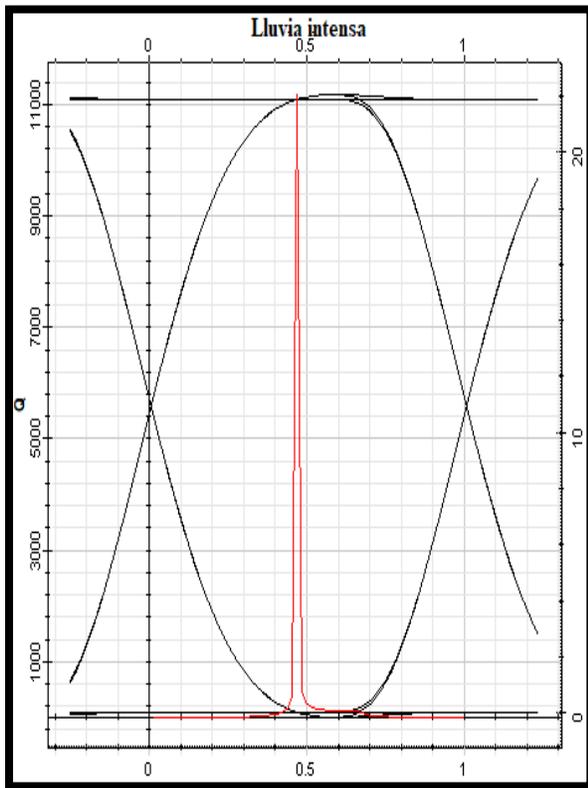
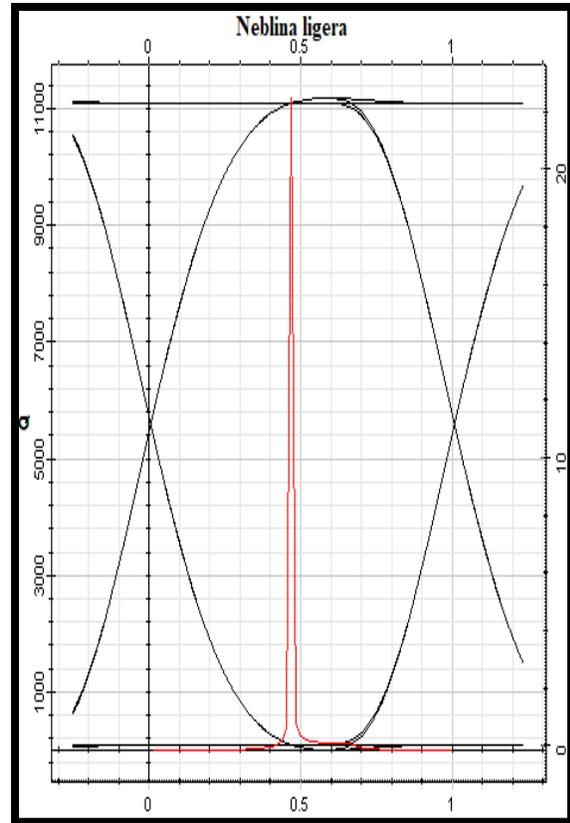
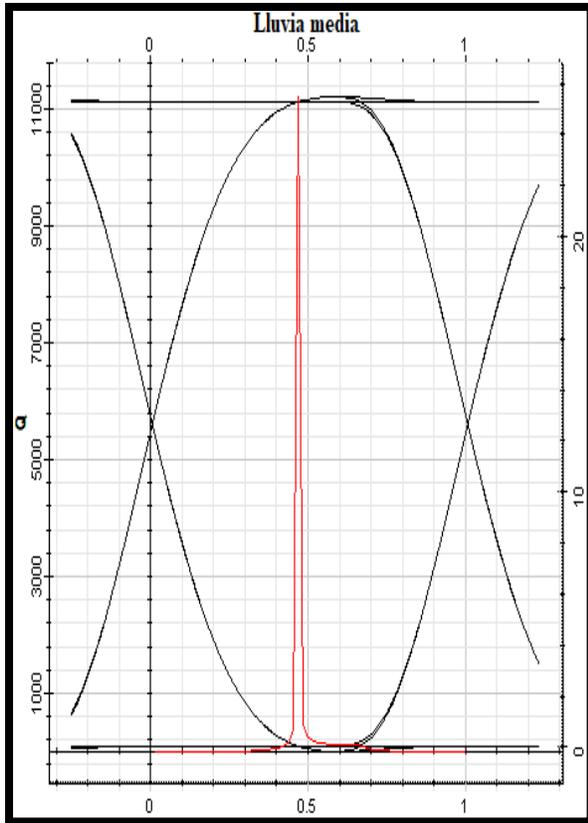
*Resultados para el modelo FlightStrata Tasa de 1.25 Gbps.*

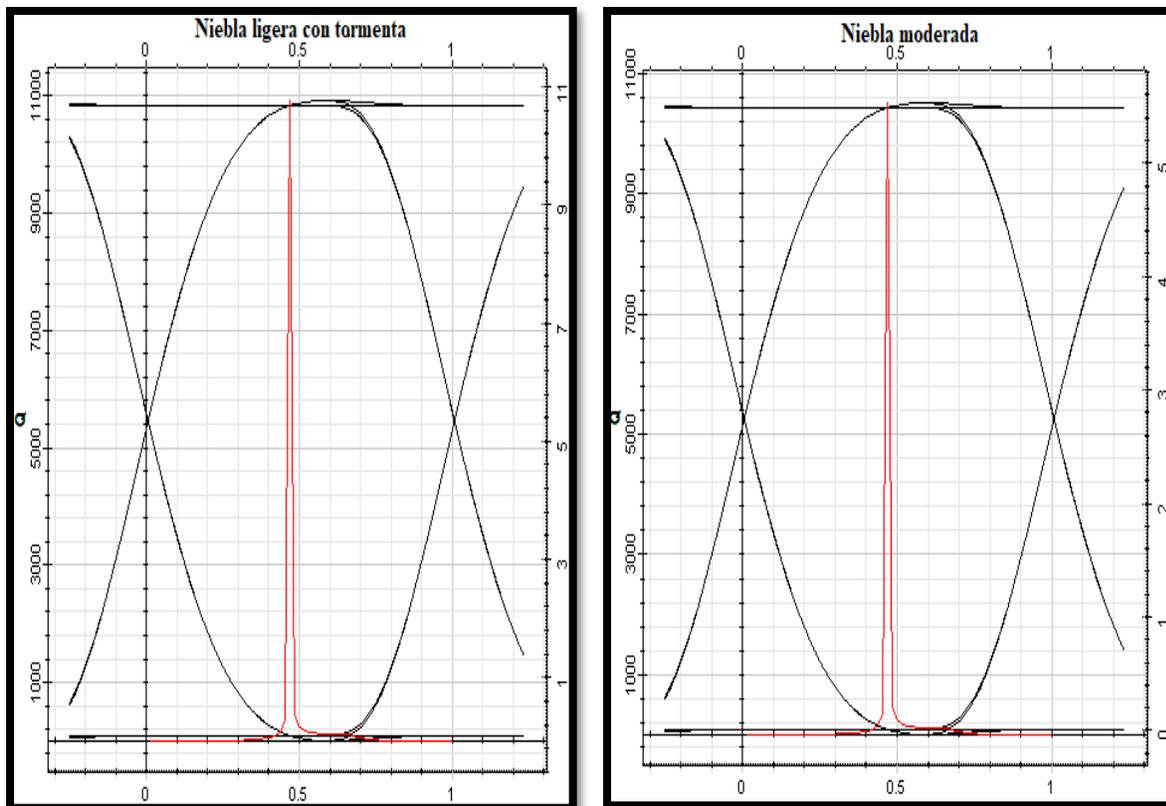
CONDICION METEREOLÓGICA	ASPECTOS DE ANALISIS						
	Atenuación dB/km	Potencia de transmisión mW			Factor Q	Umbral	BER
		P1	P2	P3			
Tiempo despejado	0.54	4.8	52.7	5277.15	11295.9	12.86	0
Llovizna	0.6	4.8	52.5	5257.75	11295.3	12.81	0
Lluvia ligera	2	4.8	48	4815.04	11280	11.73	0
Neblina muy ligera	3.1	4.8	44.9	4493.65	11268.4	10.95	0
Lluvia media	4.6	4.8	40.8	4087.89	11250.4	9.96	0
Neblina ligera	6.6	4.8	36	3556.31	11224	8.78	0
Lluvia intensa	6.9	4.8	35	3538.34	11219.9	8.62	0
Niebla muy ligera	13.8	4.8	22.9	2292.97	11102.5	5.59	0
Niebla ligera con tormenta	18.3	4.8	17	1728.62	10999.9	4.21	0
Niebla moderada	28.9	4.8	8.8	888	10645.9	2.16	0

*Nota.* Los datos muestran el comportamiento del equipo utilizado en cada parámetro de análisis (fuente propia).

De cada condición meteorológica se evidencian las siguientes imágenes donde se observa el factor de calidad Q que es la señal de color rojo, y el diagrama de ojo que es la onda de color negro.







**Figura 58.** Comportamiento del Factor de calidad Q y diagrama de ojo de cada condición meteorológica para el modelo FlightStrata-G del fabricante AIRLINX Communications Inc. con potencia de transmisión de 10 mW y tasa de 1.25 Gbps (fuente propia, 2020, pág. 117).

**Modelo FlightStrata-G Longitud de 850 nm.** Para la transmisión el dispositivo emplea una potencia de 1000 mW. De cada condición meteorológica se obtuvieron los siguientes datos.

Tabla 25.

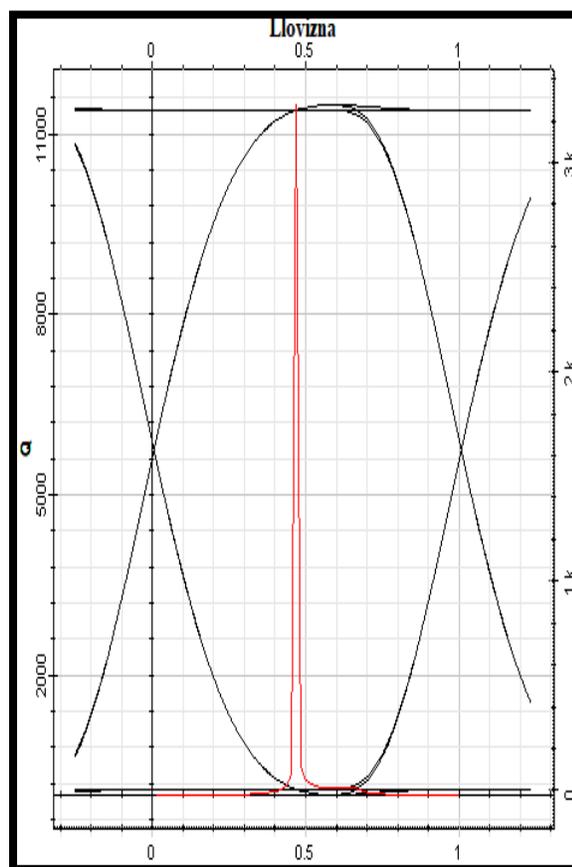
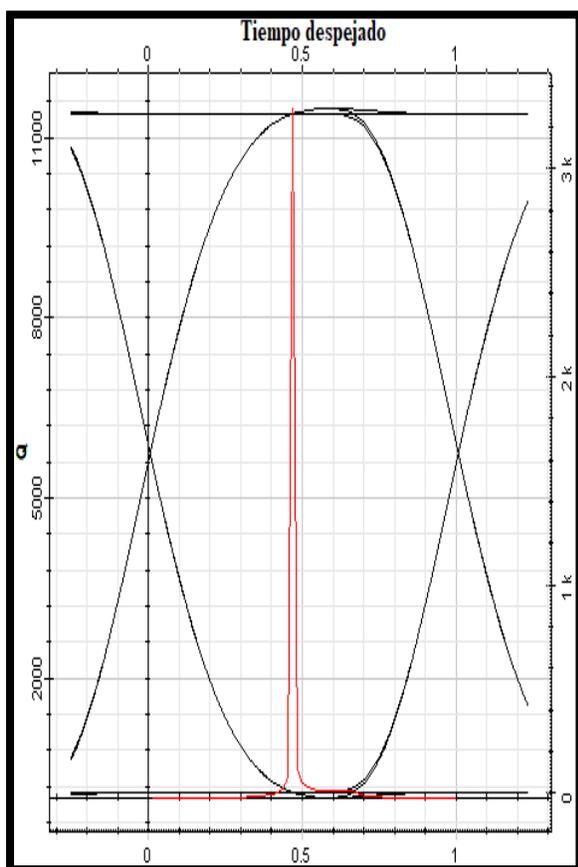
*Resultados para el modelo FlightStrata Tasa de 1.25 Gbps.*

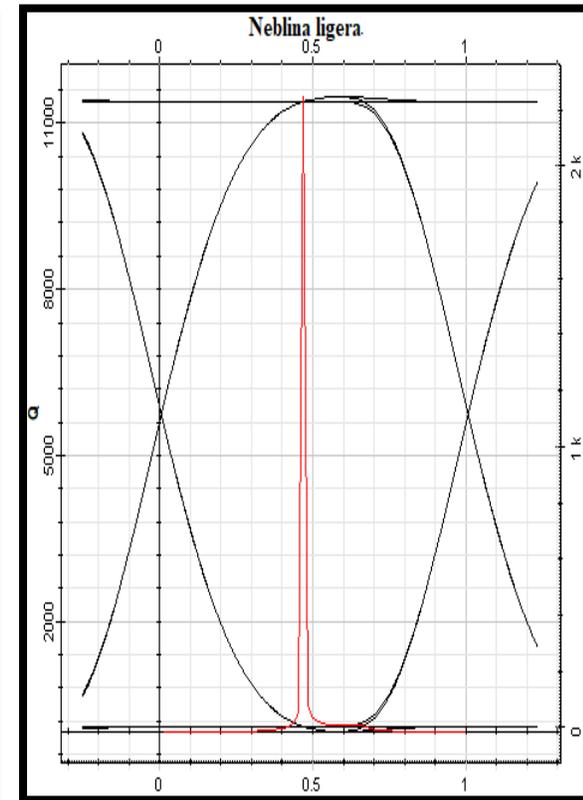
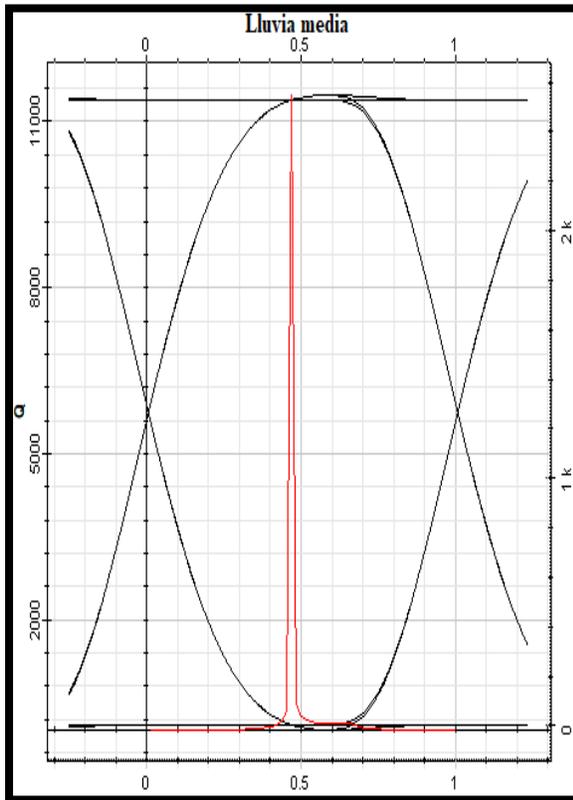
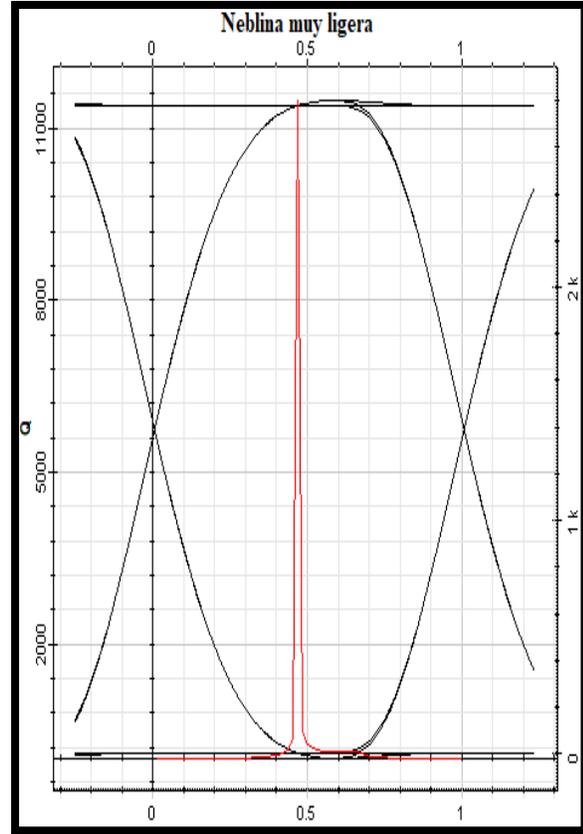
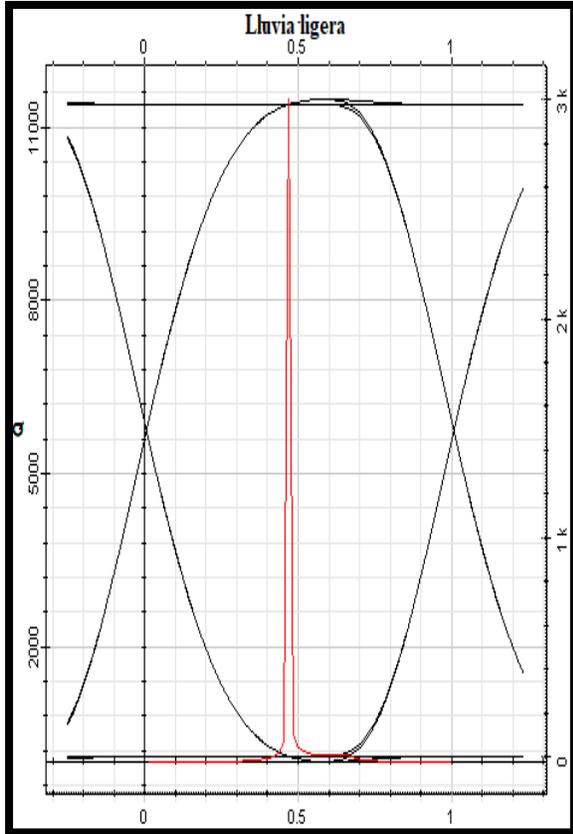
CONDICION METEREOLÓGICA	ASPECTOS DE ANALISIS						
	Atenuación dB/km	Potencia de transmisión mW			Factor Q	Umbral	BER
		P1	P2	P3			
Tiempo despejado	0.54	484	5272.29	527229.86	11483	1286.54	0
Llovizna	0.6	484	5252.91	525291.04	11483	1281.69	0
Lluvia ligera	2	484	4810.60	481060.83	11482.6	1173.72	0
Neblina muy ligera	3.1	484	4489.52	448952.09	11482.3	1095.3	0

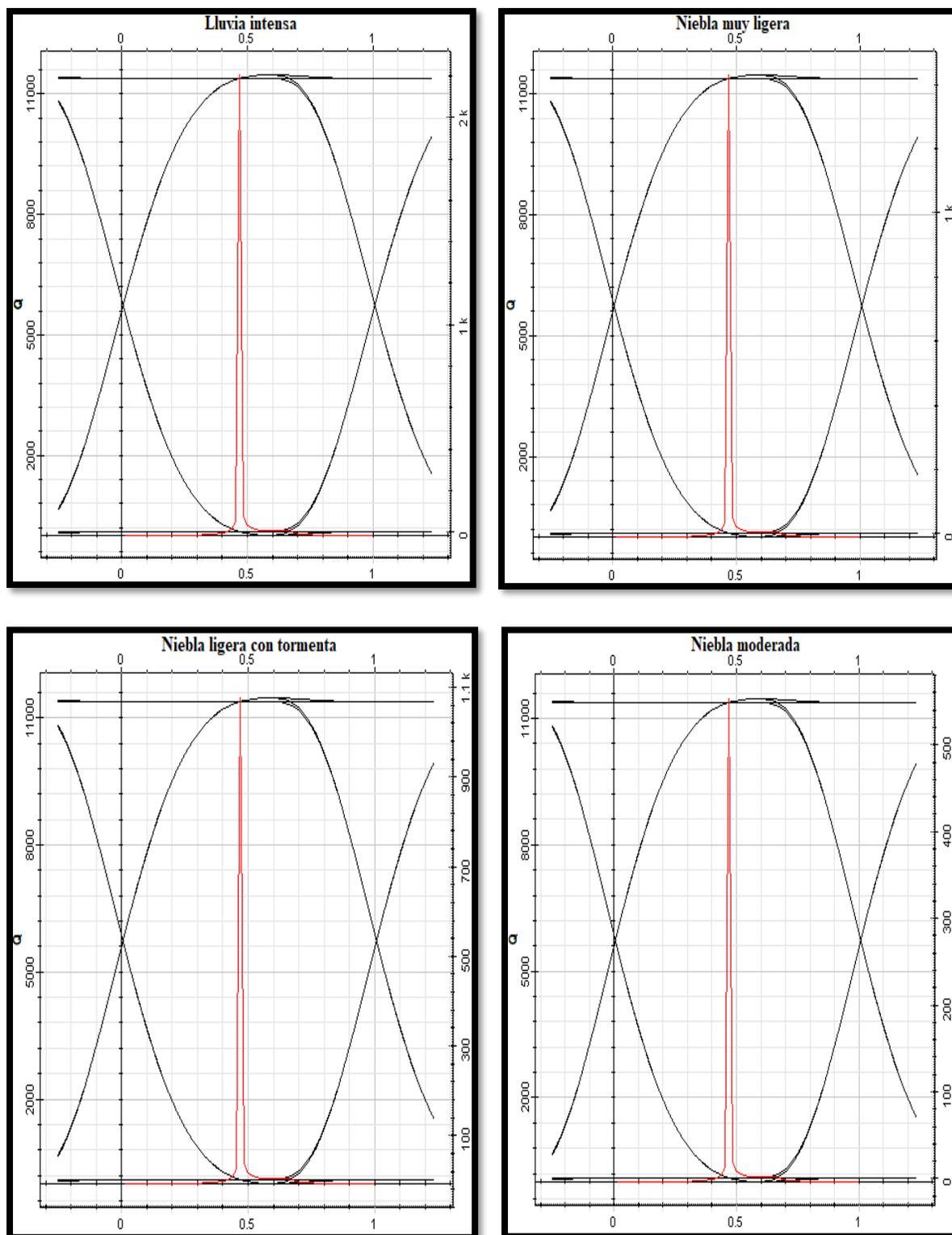
Lluvia media	4.6	484	4085.07	408507. 46	11481.8	996.745	0
Neblina ligera	6.6	484	3602.46	360246. 69	11481	878.99	0
Lluvia intensa	6.9	484	3535.08	353508. 61	11481	862.569	0
Niebla muy ligera	13.8	484	2290.86	229086. 76	11478	559.016	0
Niebla ligera con tormenta	18.3	484	1726.63	172663. 28	11475.6	421.283	0
Niebla moderada	28.9	484	886	88674.7 5	11467.4	216.369	0

*Nota.* Los datos muestran el comportamiento del equipo utilizado en cada parámetro de análisis (fuente propia).

De cada condición meteorológica se evidencian las siguientes imágenes donde se observa el factor de calidad Q que es la señal de color rojo, y el diagrama de ojo que es la onda de color negro.







**Figura 59.** Comportamiento del Factor de calidad  $Q$  y diagrama de ojo de cada condición meteorológica para el modelo FlightStrata-G del fabricante AIRLINX Communications Inc. con potencia de transmisión de 1000 mW y tasa de 1.25 Gbps. Fuente propia, (2020, pág. 120).

**Modelo Canobeam DT-130 Longitud de 785 nm.** Para la transmisión el dispositivo emplea una potencia de 11 mW. De cada condición meteorológica se obtuvieron los siguientes datos.

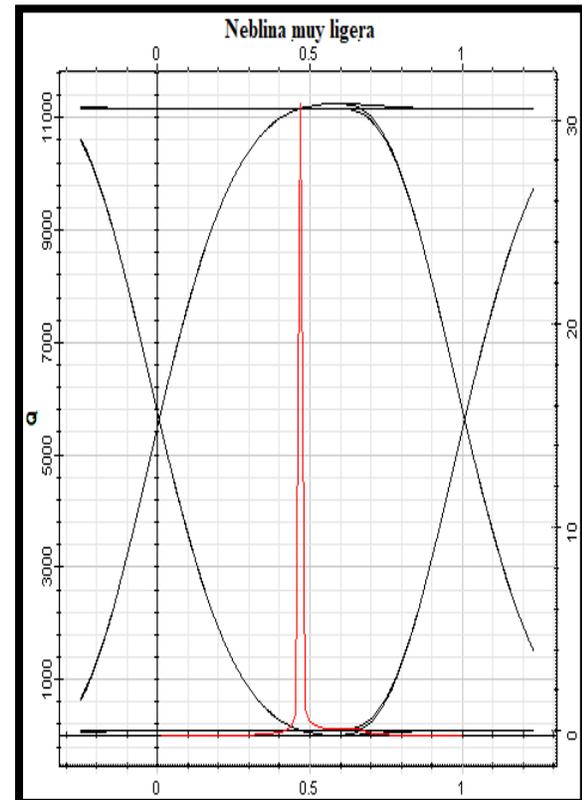
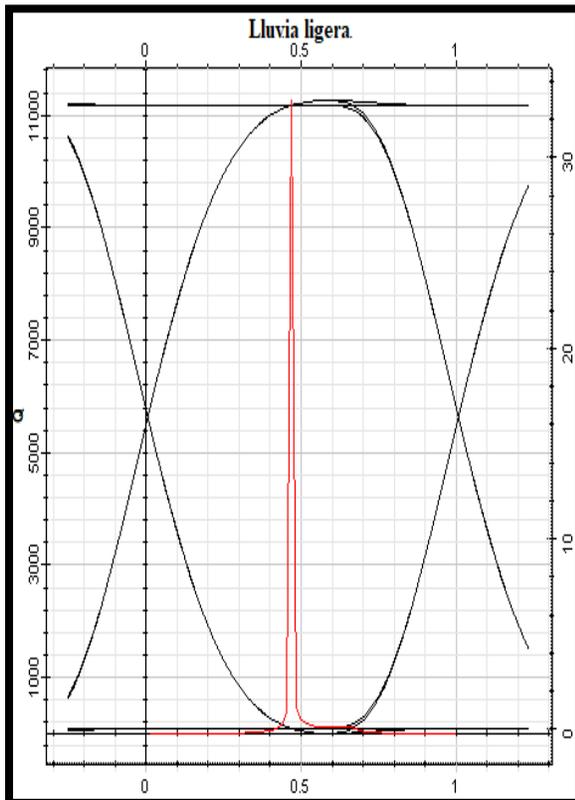
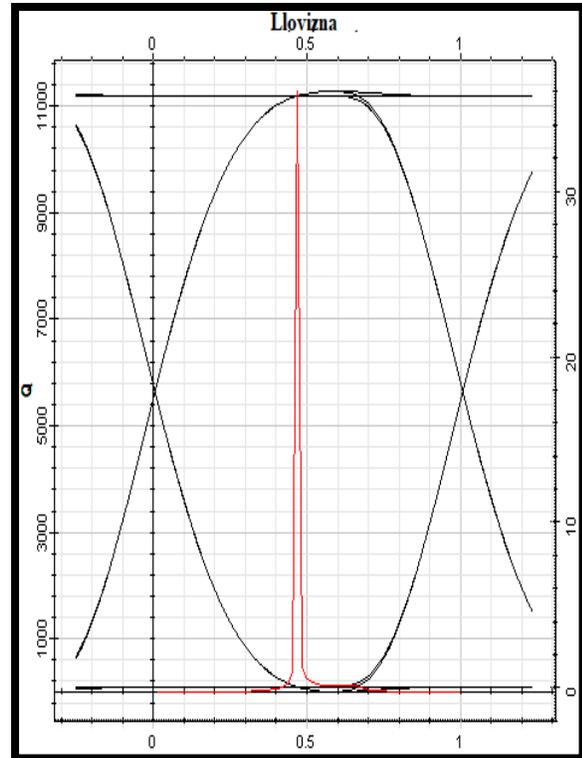
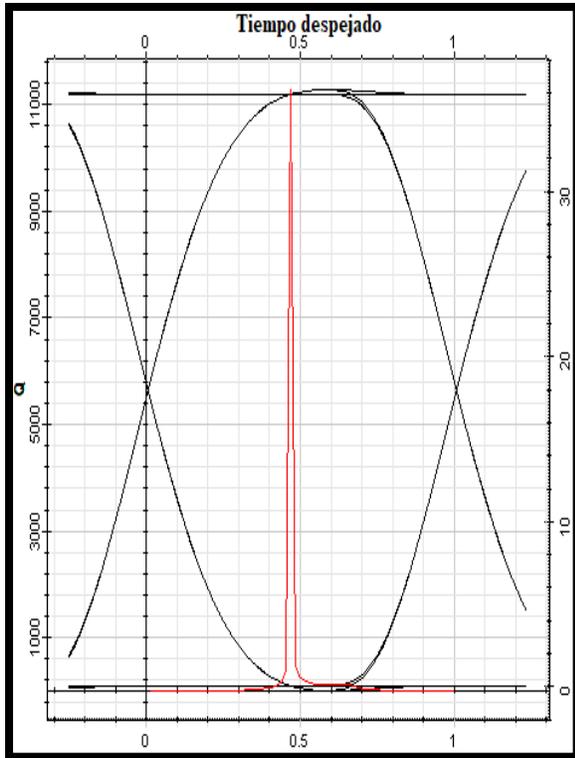
Tabla 26.

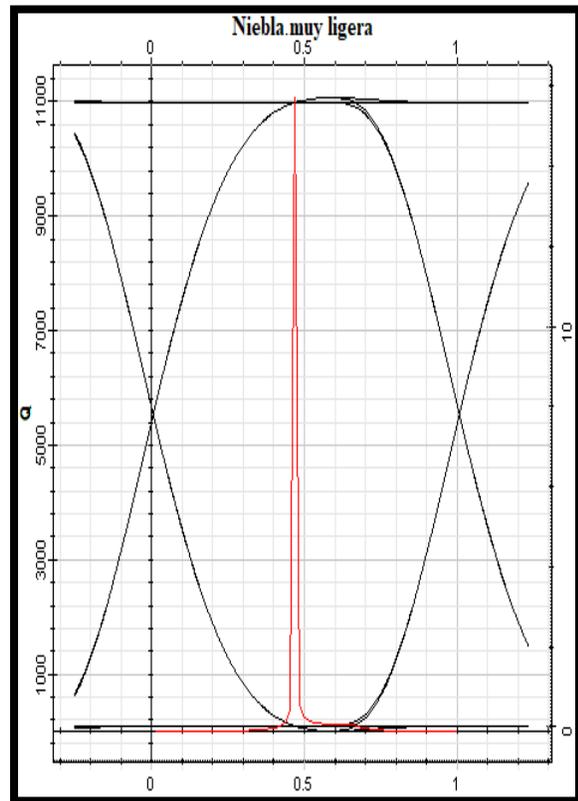
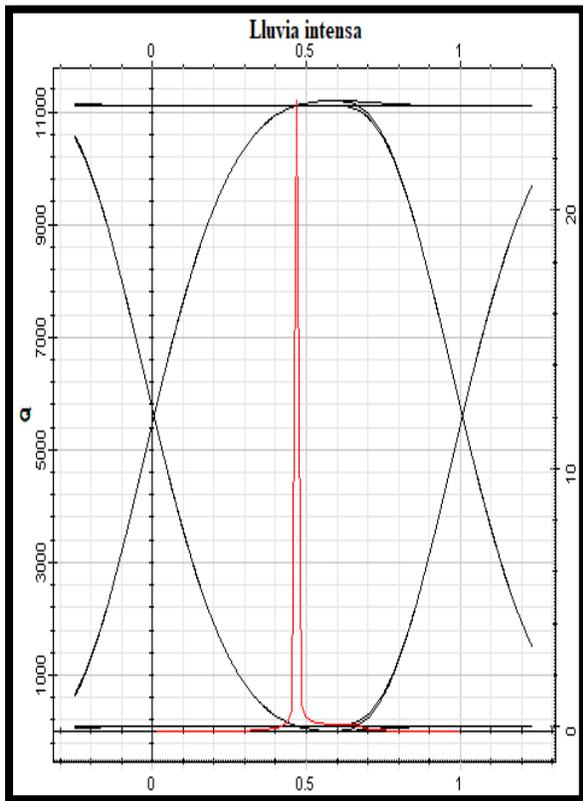
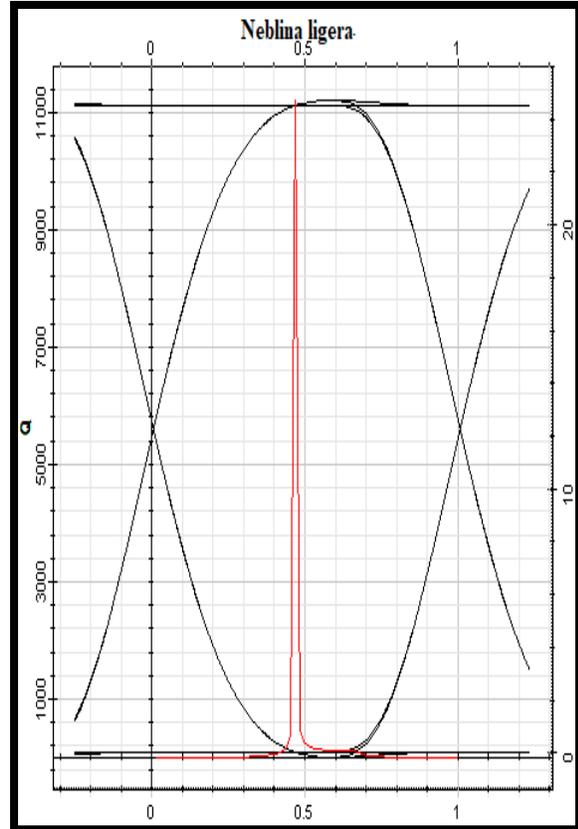
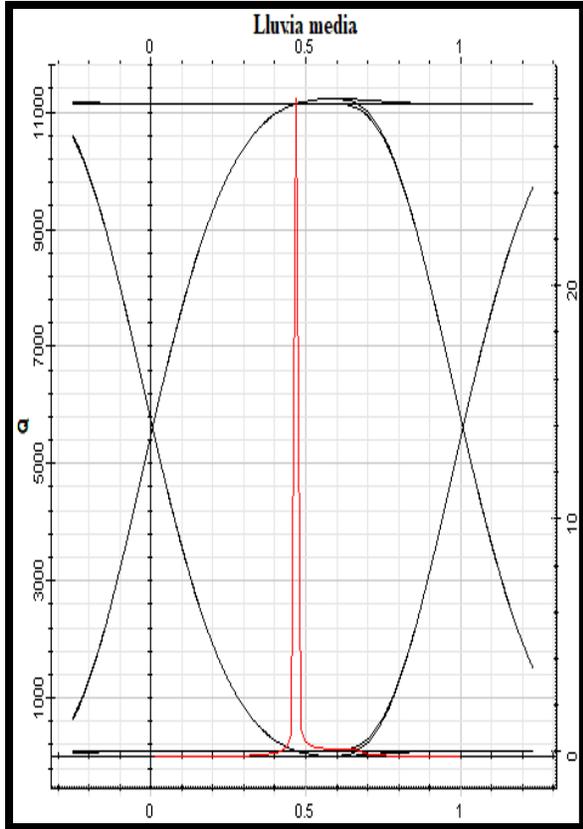
*Resultados para el modelo Canobeam DT-130 Tasa de 1.25 Gbps.*

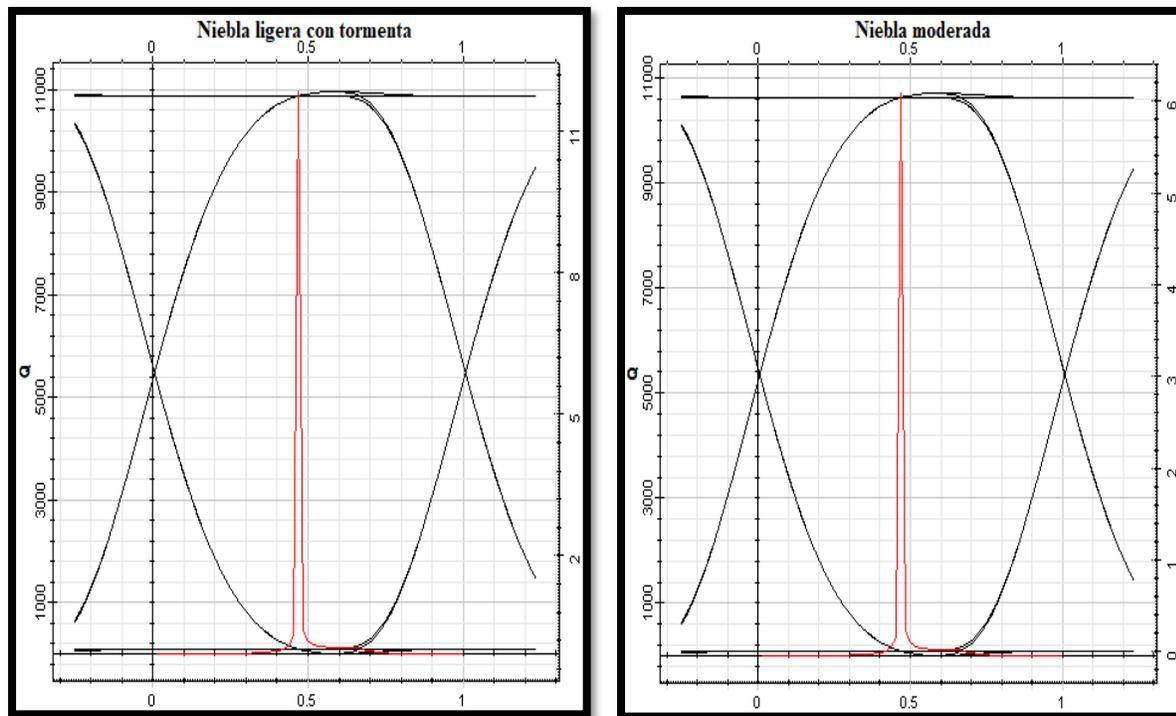
CONDICION METEREOLÓGICA	ASPECTOS DE ANALISIS						
	Atenuación dB/km	Potencia de transmisión mW			Factor Q	Umbral	BER
		P1	P2	P3			
Tiempo despejado	0.54	5.3	58	5804.97	11310.5	14.15	0
Llovizna	0.6	5.3	58	5783.62	11310	14.09	0
Lluvia ligera	2	5.3	53	5295.41	11296.5	12.91	0
Neblina muy ligera	3.1	5.3	49	4941.96	11285	12.04	0
Lluvia media	4.6	5.3	45	4497.79	11268.5	10.96	0
Neblina ligera	6.6	5.3	39	3966.43	11244.3	9.66	0
Lluvia intensa	6.9	5.3	38	3892.24	11240.4	9.48	0
Niebla muy ligera	13.8	5.3	25	2522.31	11132	6.14	0
Niebla ligera con tormenta	18.3	5.3	19	1901.07	11037	4.63	0
Niebla moderada	28.9	5.3	9.7	976	10708	2.38	0

*Nota.* Los datos muestran el comportamiento del equipo utilizado en cada parámetro de análisis (fuente propia).

De cada condición meteorológica se evidencian las siguientes imágenes donde se observa el factor de calidad Q que es la señal de color rojo, y el diagrama de ojo que es la onda de color negro.







**Figura 60.** Comportamiento del Factor de calidad Q y diagrama de ojo de cada condición meteorológica para el modelo Canobeam DT-130 del fabricante AIRLINX Communications Inc. con potencia de transmisión de 11 mW y tasa de 1.25 Gbps. Fuente propia, (2020, pág. 123).

#### Cuarto escenario – EC SYSTEM.

Esta configuración se hará con los datos de cada modelo óptico FSO del fabricante EC SYSTEM y que están consignados en tablas anteriores. Todos los equipos trabajan con una longitud de onda de 1550 nm, modo de transmisión Full-Dúplex y una divergencia del haz láser de 0.55 mili-radianes/segundo. Debido a que el fabricante de cada modelo no proporciona información sobre el diámetro de apertura del receptor, el simulador Optisystem asigna por defecto 20 cm.

**Modelo EL-1GS.** Para la transmisión el dispositivo emplea una potencia de 75 mW. De cada condición meteorológica se obtuvieron los siguientes datos.

Tabla 27.

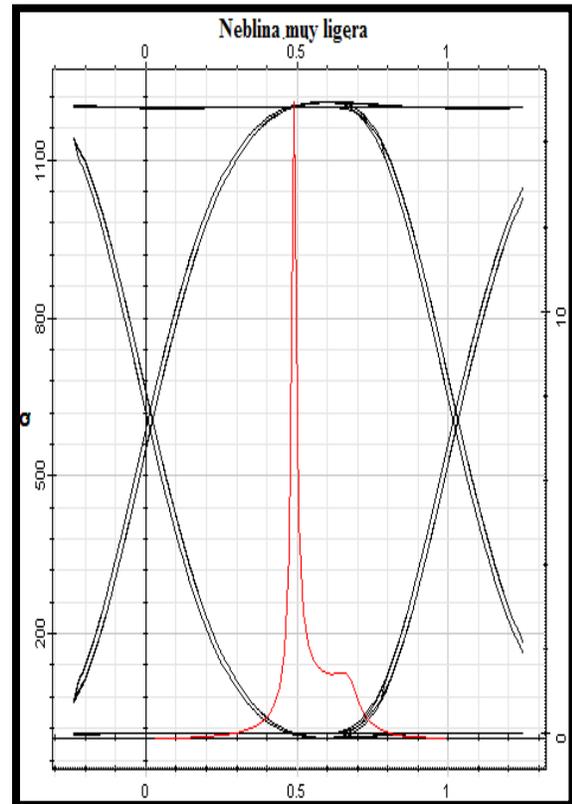
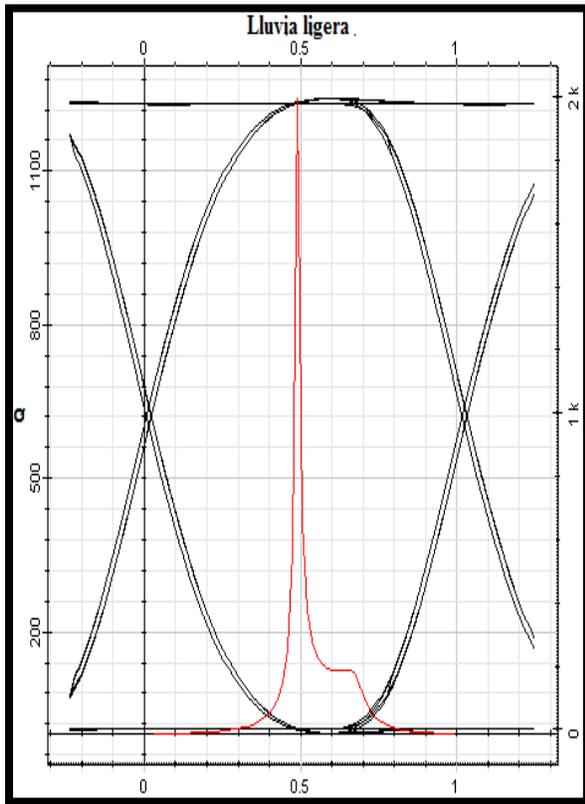
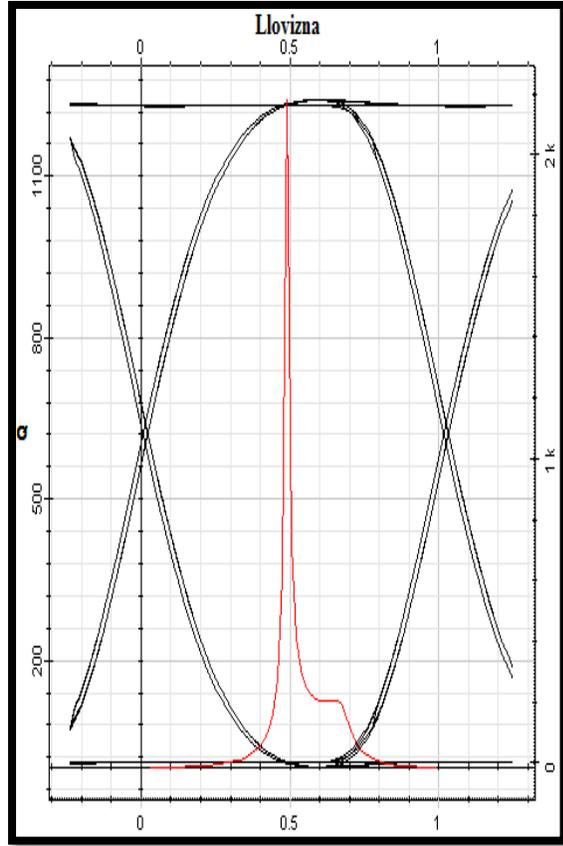
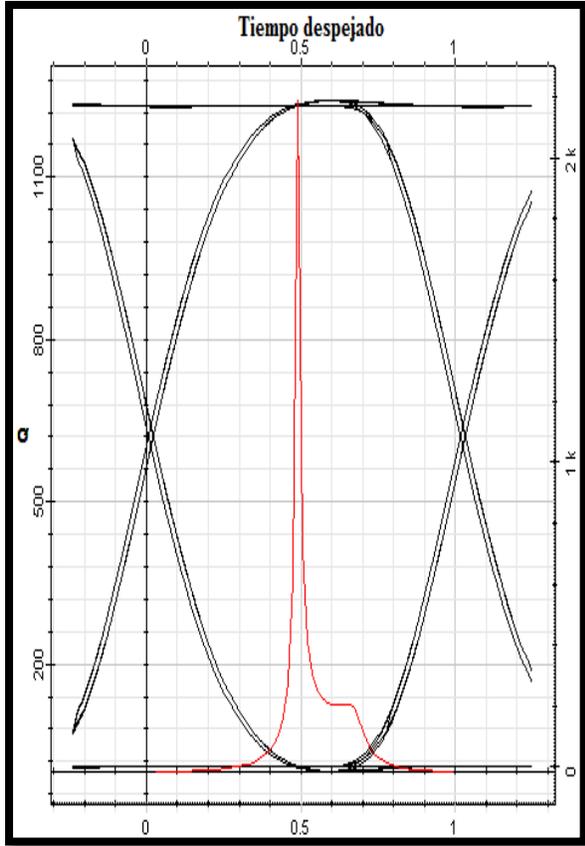
*Resultados para el modelo EL-1GS Tasa de 1 Gbps.*

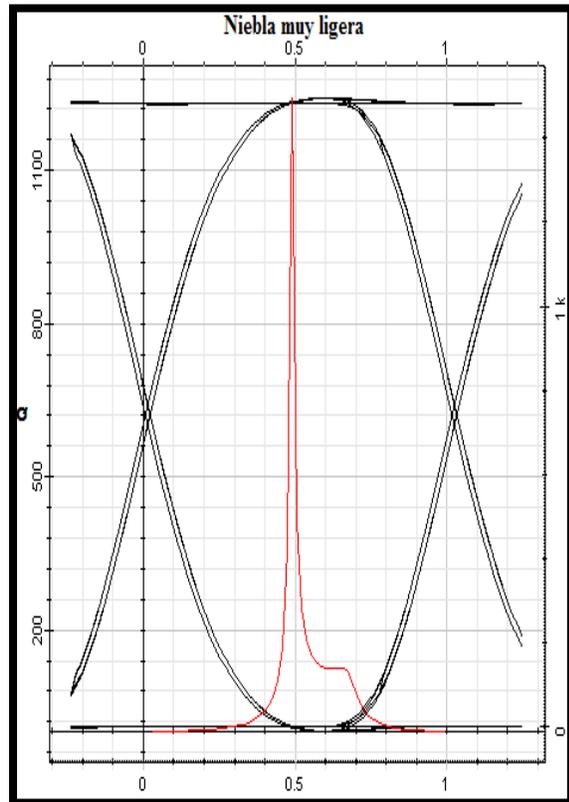
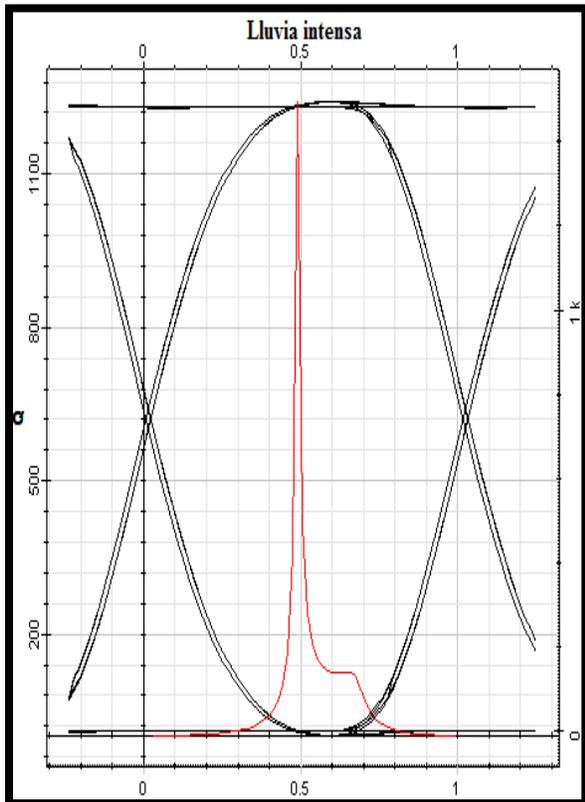
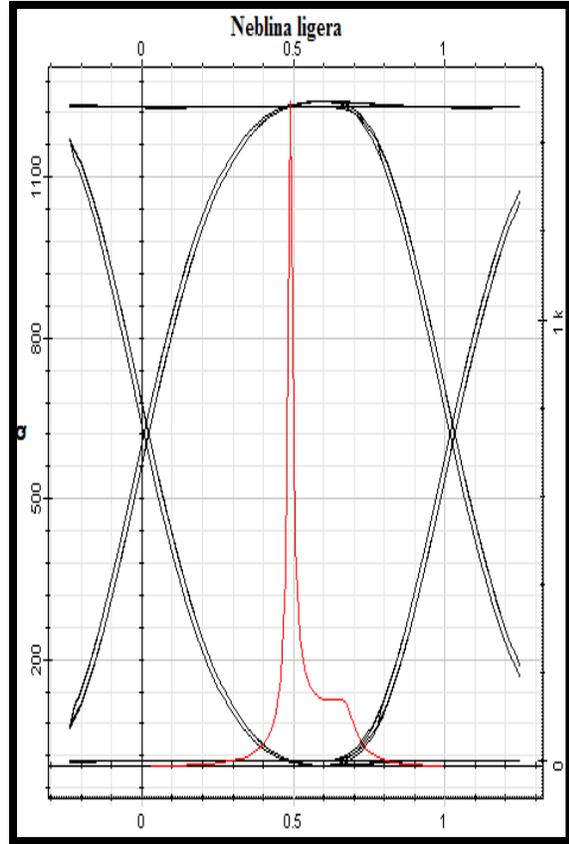
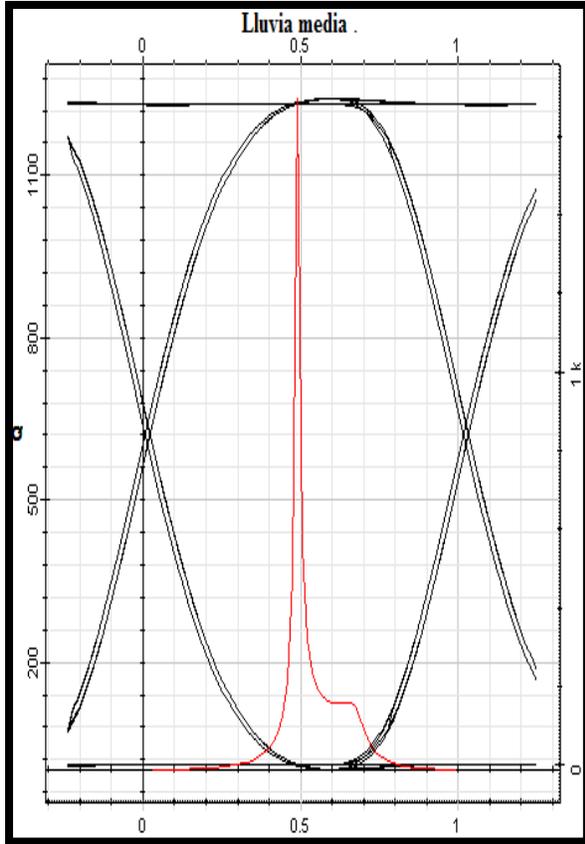
CONDICION METEREOLÓGICA	ASPECTOS DE ANALISIS				
	Atenuación dB/km	Potencia de transmisión mW	Factor Q	Umbral	BER

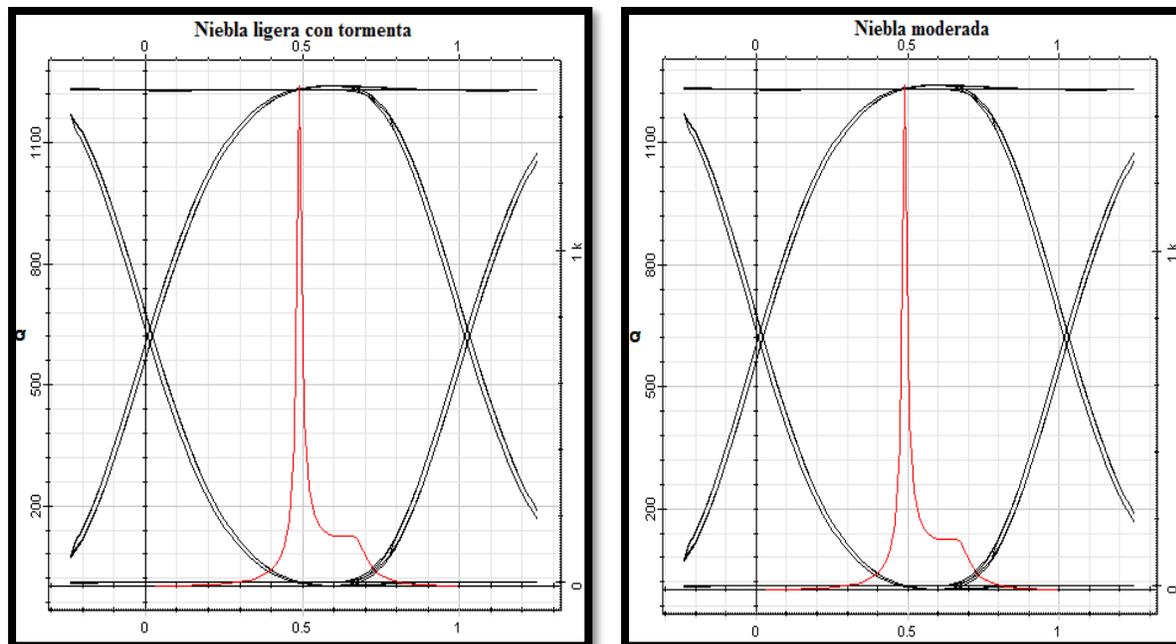
		<b>P1</b>	<b>P2</b>	<b>P3</b>			
Tiempo despejado	0.54	36	3506.71	350671. 11	1241.92	844.908	0
Llovizna	0.6	36	3493.81	349381. 57	1241.92	841.728	0
Lluvia ligera	2	36	3199.63	319963. 17	1241.89	770.818	0
Neblina muy ligera	3.1	36	2985.38	298538. 26	1241.89	719.319	0
Lluvia media	4.6	36	2717.06	271706. 48	1241.82	654.593	0
Neblina ligera	6.6	36	2396.07	239607. 27	1241.76	577.26	0
Lluvia intensa	6.9	36	2351.25	235125. 64	1241.75	566.476	0
Niebla muy ligera	13.8	36	1523.70	152370. 18	1241.49	367.123	0
Niebla ligera con tormenta	18.3	36	152370. 18	115	1241.25	276.67	0
Niebla moderada	28.9	36	590	58979.3 5	1240.42	142.096	0

*Nota.* Los datos muestran el comportamiento del equipo utilizado en cada parámetro de análisis (fuente propia).

De cada condición meteorológica se evidencian las siguientes imágenes donde se observa el factor de calidad Q que es la señal de color rojo, y el diagrama de ojo que es la onda de color negro.







**Figura 61.** Comportamiento del Factor de calidad Q y diagrama de ojo de cada condición meteorológica para el modelo EL-1GS del fabricante EC SYSTEM con potencia de transmisión de 75 mW y tasa de 1 Gbps. Fuente propia, (2020, pág. 127).

**Modelo EL-1GL.** Para la transmisión el dispositivo emplea una potencia de 72 mW. De cada condición meteorológica se obtuvieron los siguientes datos.

Tabla 28.

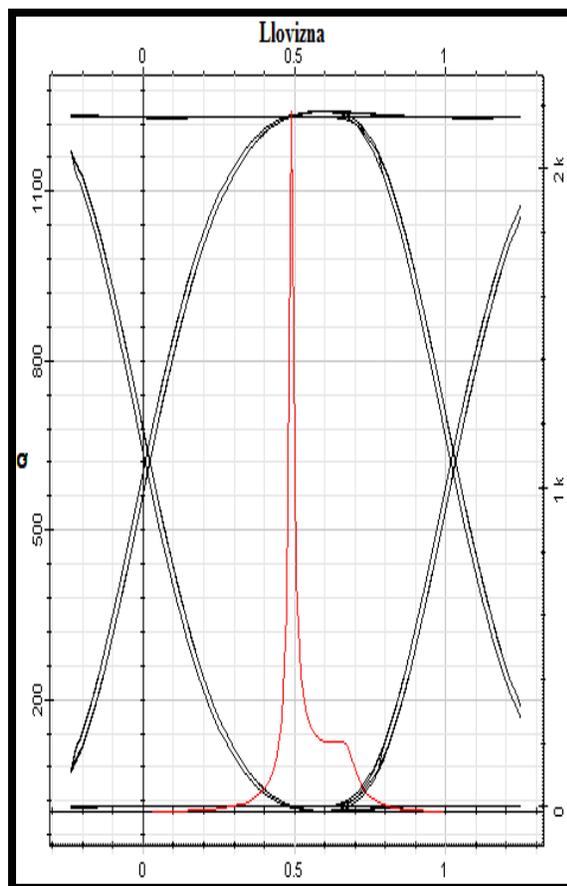
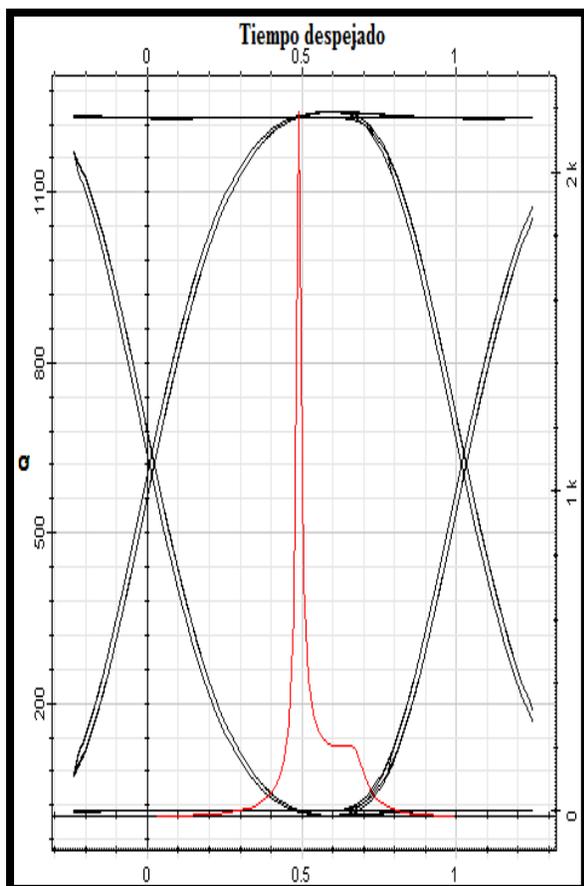
*Resultados para el modelo EL-1GL Tasa de 1 Gbps.*

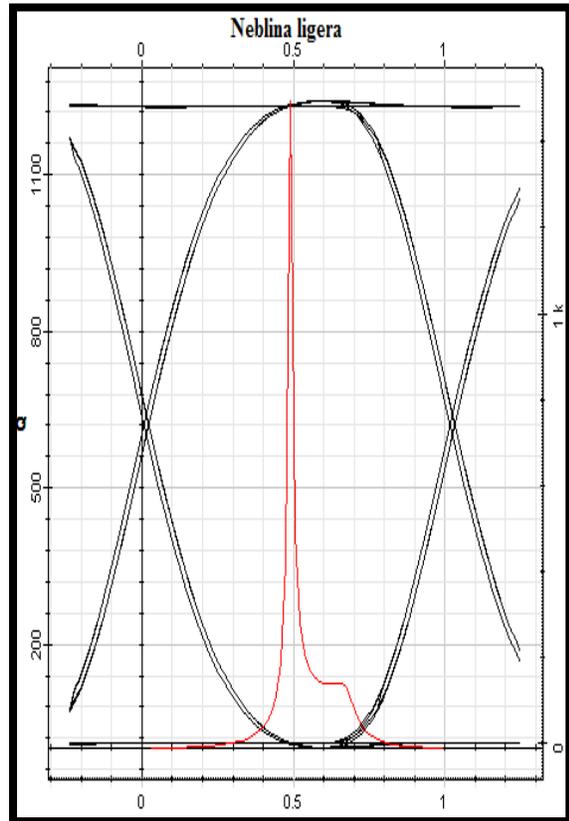
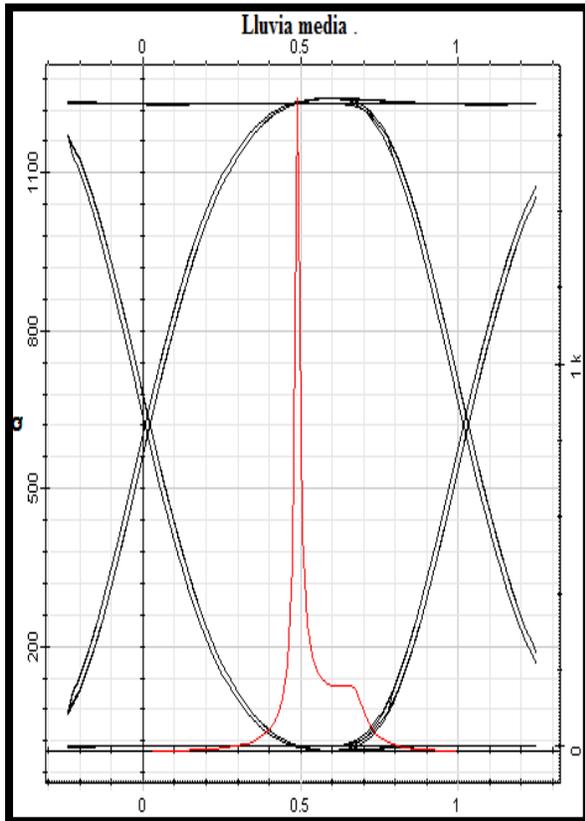
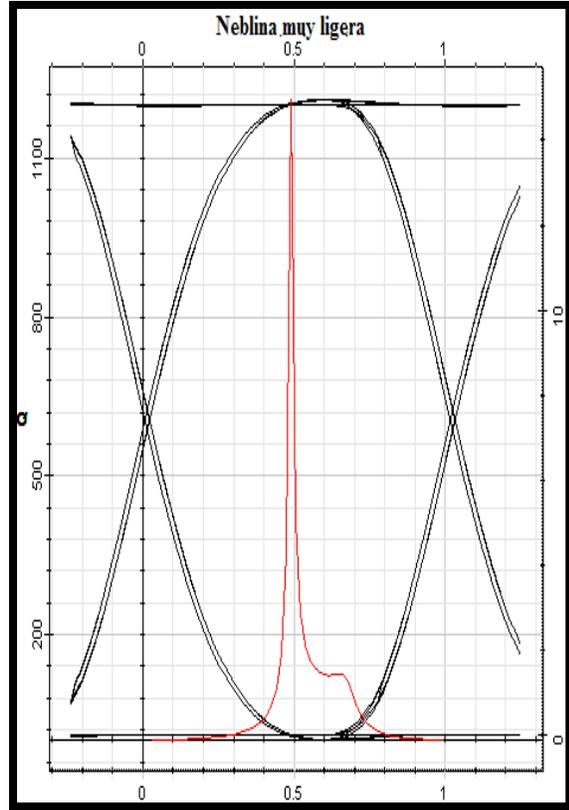
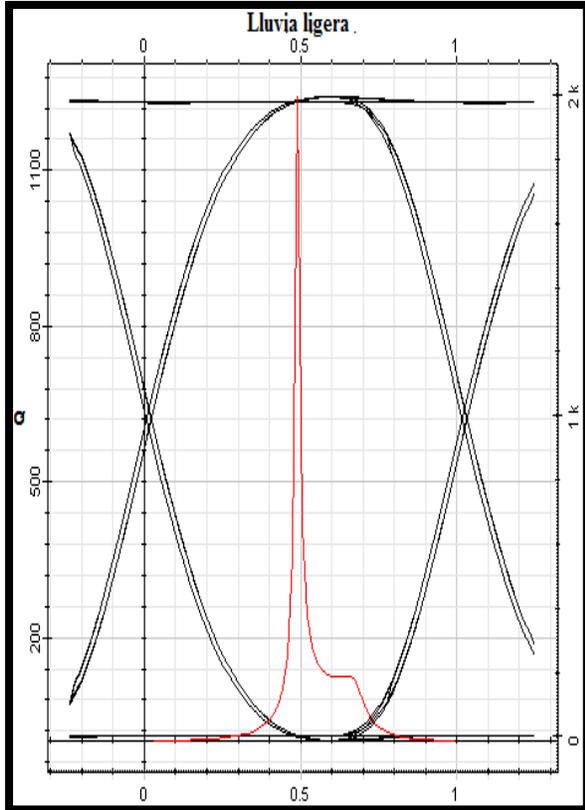
CONDICION METEREOLÓGICA	ASPECTOS DE ANALISIS						
	Atenuación dB/km	Potencia de transmisión mW			Factor Q	Umbral	BER
		P1	P2	P3			
Tiempo despejado	0.54	35	3366.66	336666.57	1241.02	811.111	0
Llovizna	0.6	35	3354.28	335428.53	1241.02	808.058	0
Lluvia ligera	2	35	3071.14	307114.27	1240.99	739.984	0
Neblina muy ligera	3.1	35	2866.15	286615.71	1240.96	690.546	0
Lluvia media	4.6	35	2608.55	260855.50	1240.92	628.409	0
Neblina ligera	6.6	35	2073.95	207395.	1240.86	554.169	0

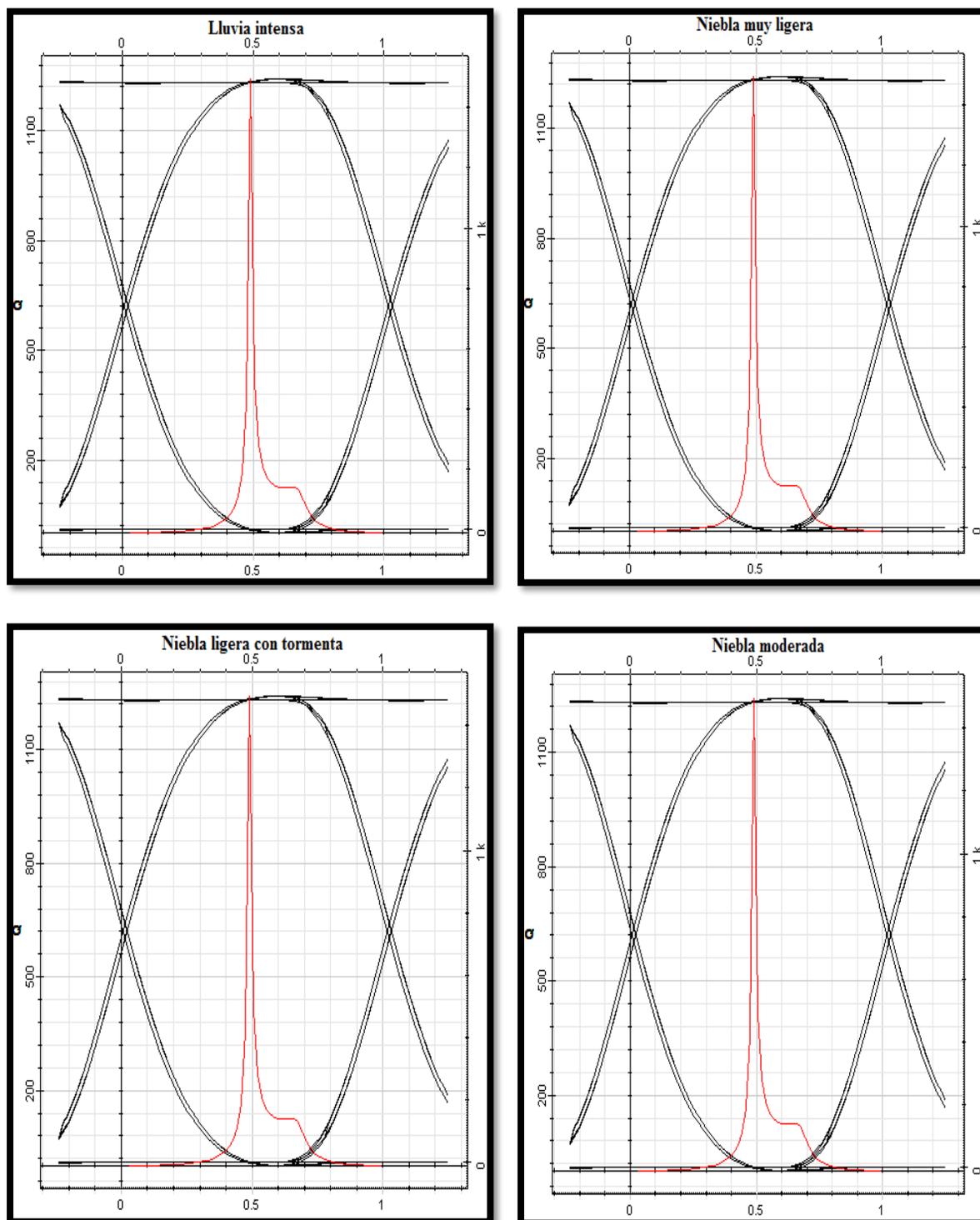
				82			
Lluvia intensa	6.9	35	2257.35	225735. 57	1240.85	543.817	0
Niebla muy ligera	13.8	35	1462.85	146285. 06	1240.58	352.438	0
Niebla ligera con tormenta	18.3	35	1102.55	110255. 43	1240.34	265.603	0
Niebla moderada	28.9	35	566	56623.9 2	1239.48	136.412	0

*Nota.* Los datos muestran el comportamiento del equipo utilizado en cada parámetro de análisis (fuente propia).

De cada condición meteorológica se evidencian las siguientes imágenes donde se observa el factor de calidad Q que es la señal de color rojo, y el diagrama de ojo que es la onda de color negro.







**Figura 62.** Comportamiento del Factor de calidad  $Q$  y diagrama de ojo de cada condición meteorológica para el modelo EL-1GL del fabricante EC SYSTEM con potencia de transmisión de 72 mW y tasa de 1 Gbps. Fuente propia, (2020, pág. 130).

**Modelo EL-10G.** Para la transmisión el dispositivo emplea una potencia de 72 mW. De cada condición meteorológica se obtuvieron los siguientes datos.

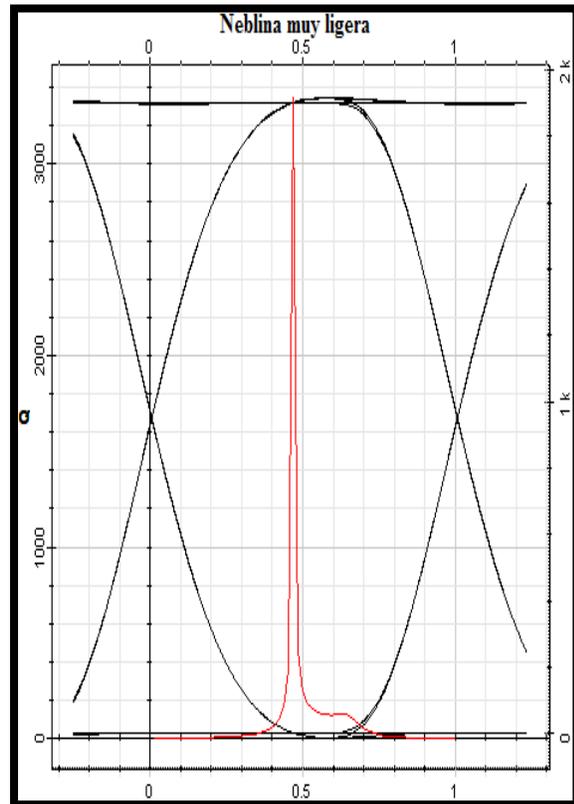
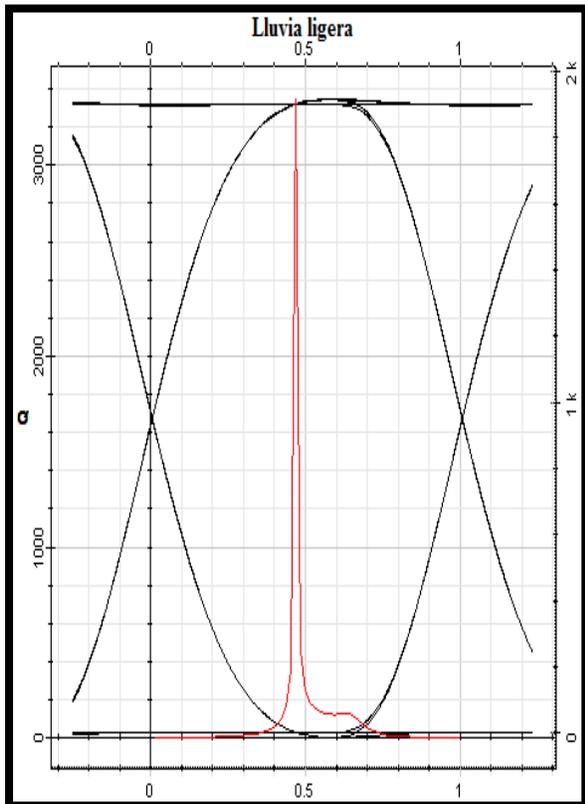
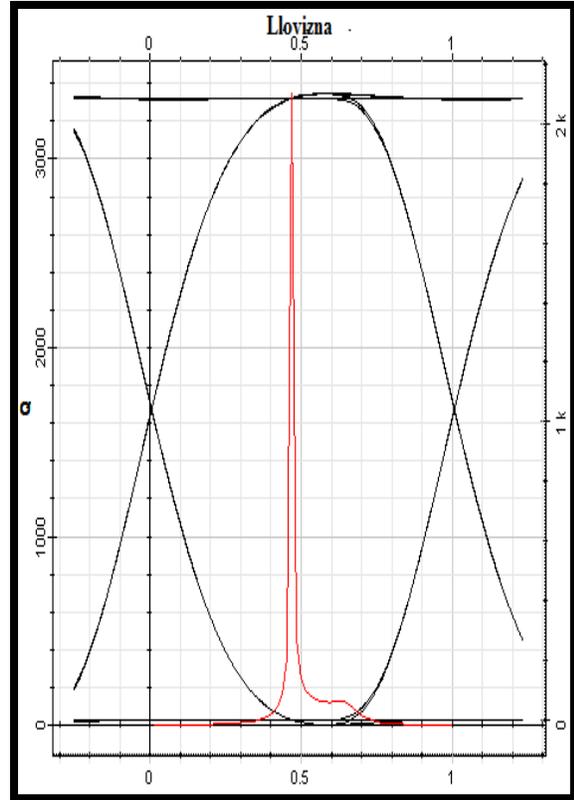
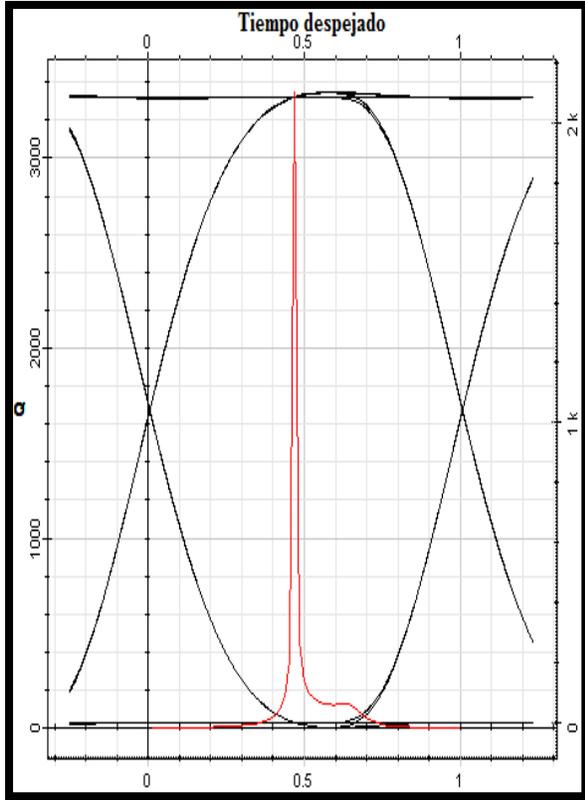
Tabla 29.

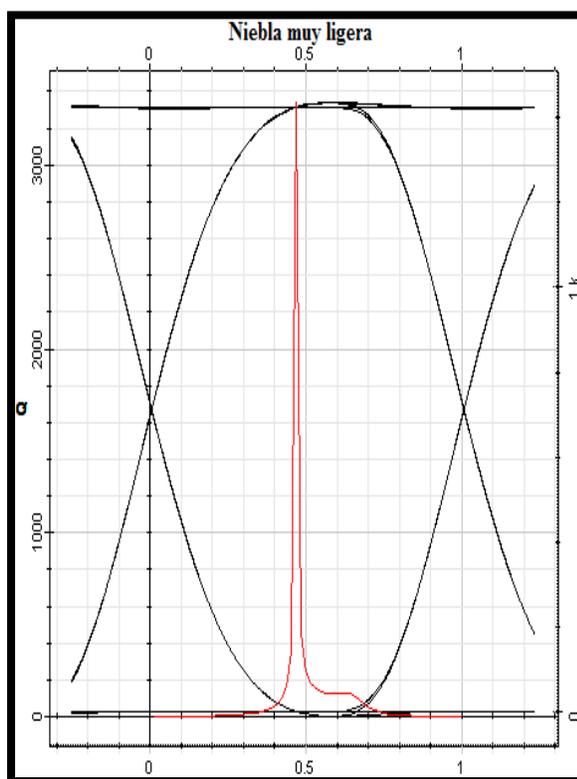
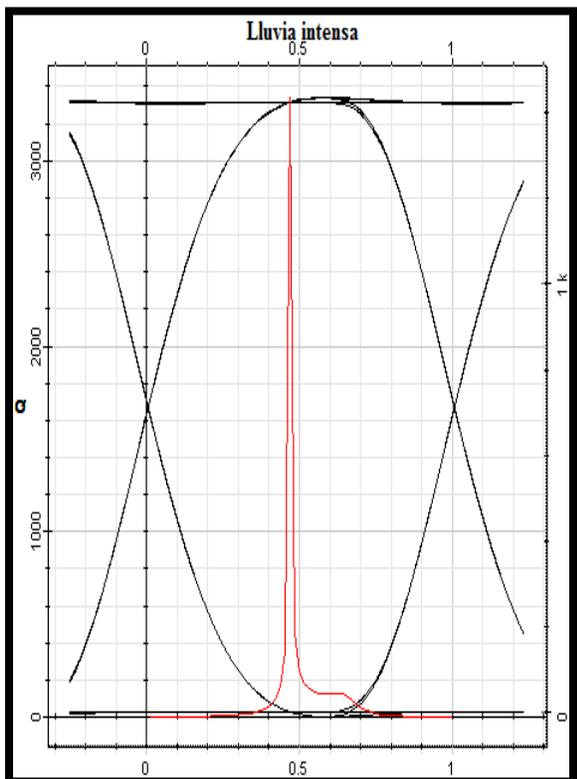
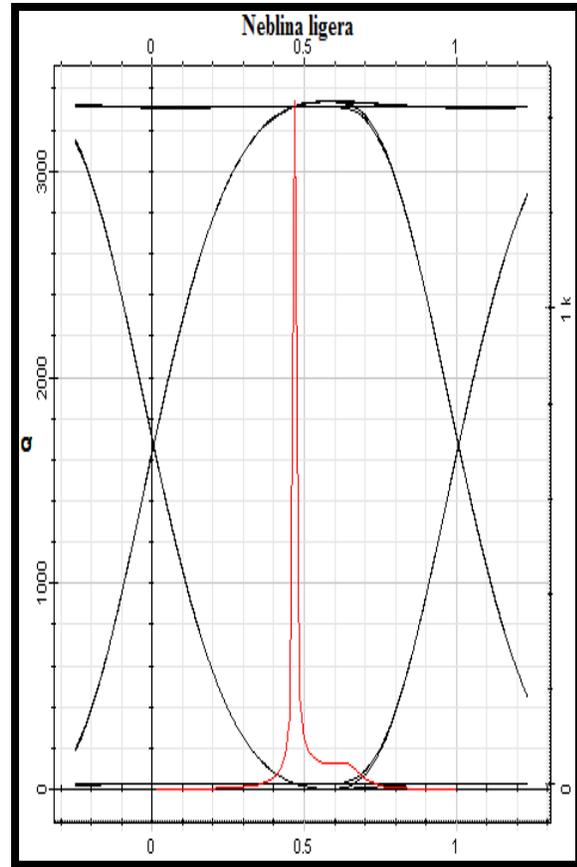
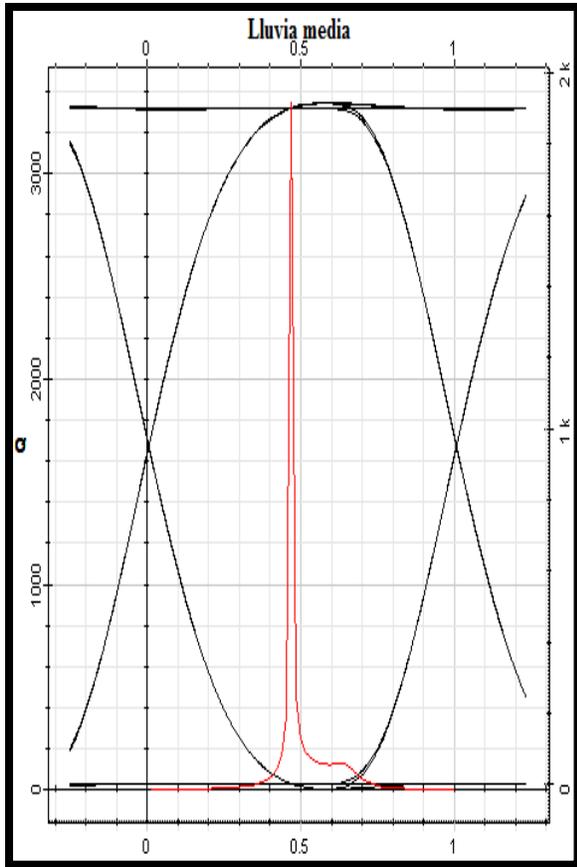
*Resultados para el modelo EL-10G Tasa de 10 Gbps.*

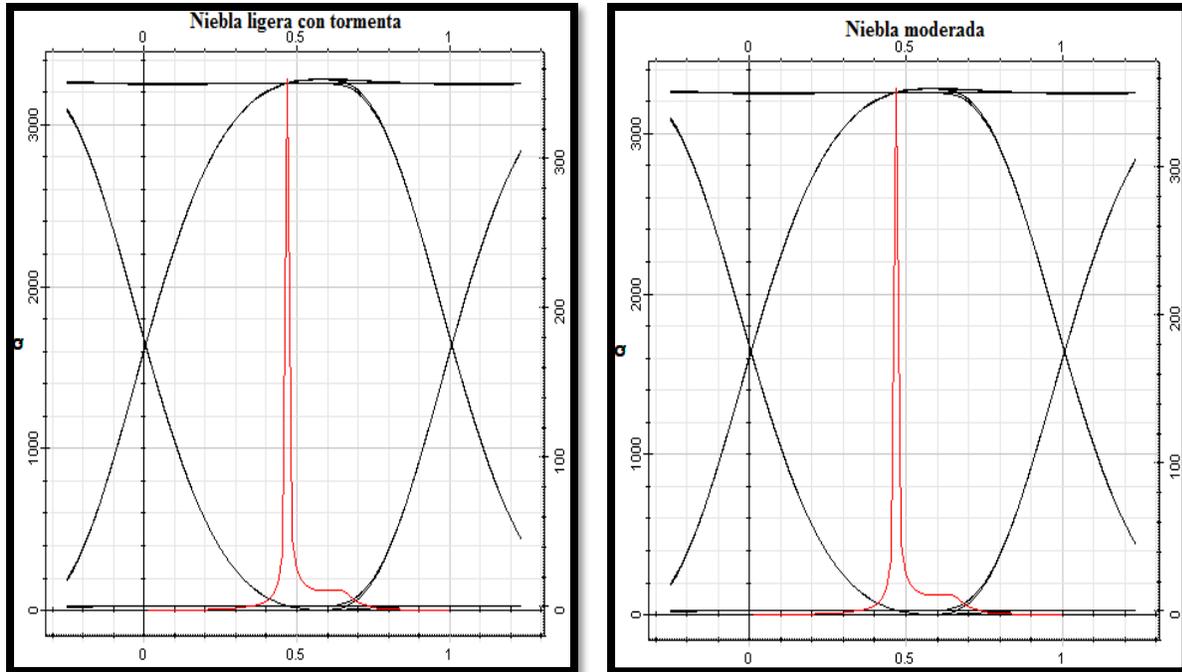
CONDICION METEREOLÓGICA	ASPECTOS DE ANALISIS						
	Atenuación dB/km	Potencia de transmisión mW			Factor Q	Umbral	BER
		P1	P2	P3			
Tiempo despejado	0.54	35	3366.66	336666.57	3347.5	821.207	0
Llovizna	0.6	35	3354.28	335428.53	3347.45	818.116	0
Lluvia ligera	2	35	3071.14	307114.27	3346.22	749.195	0
Neblina muy ligera	3.1	35	2866.15	286615.71	3345.17	699.141	0
Lluvia media	4.6	35	2608.55	260855.50	3343.62	636.231	0
Neblina ligera	6.6	35	2073.95	207395.82	3341.3	561.067	0
Lluvia intensa	6.9	35	2257.35	225735.57	3340.93	550.585	0
Niebla muy ligera	13.8	35	1462.85	146285.06	3330	356.824	0
Niebla ligera con tormenta	18.3	35	1102.55	110255.43	3319.85	268.908	0
Niebla moderada	28.9	35	566	56623.92	3281.22	138.109	0

*Nota.* Los datos muestran el comportamiento del equipo utilizado en cada parámetro de análisis (fuente propia).

De cada condición meteorológica se evidencian las siguientes imágenes donde se observa el factor de calidad Q que es la señal de color rojo, y el diagrama de ojo que es la onda de color negro.







**Figura 63.** Comportamiento del Factor de calidad Q y diagrama de ojo de cada condición meteorológica para el modelo EL-10G del fabricante EC SYSTEM con potencia de transmisión de 72 mW y tasa de 10 Gbps. Fuente propia, (2020, pág. 134).

**Modelo EL-30G.** Para la transmisión el dispositivo emplea una potencia de 72 mW. De cada condición meteorológica se obtuvieron los siguientes datos.

Tabla 30.

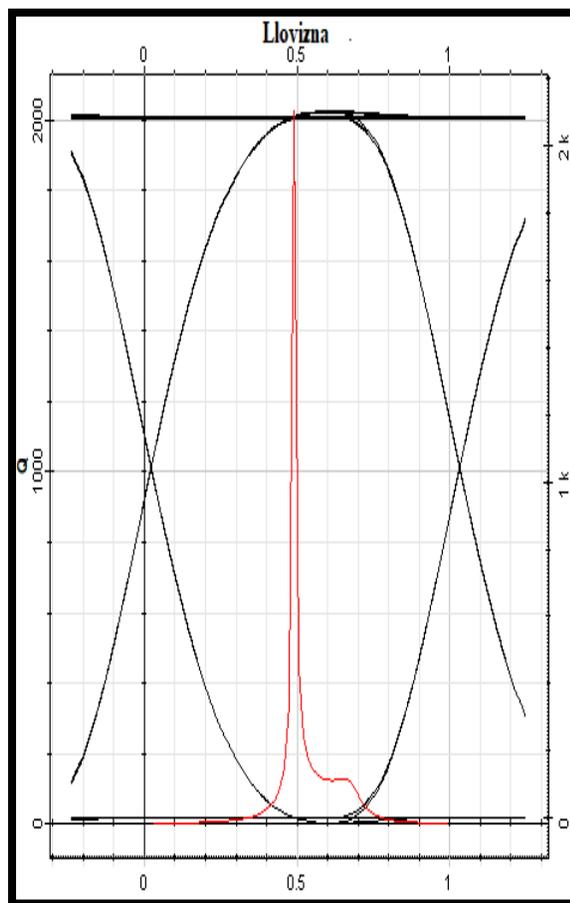
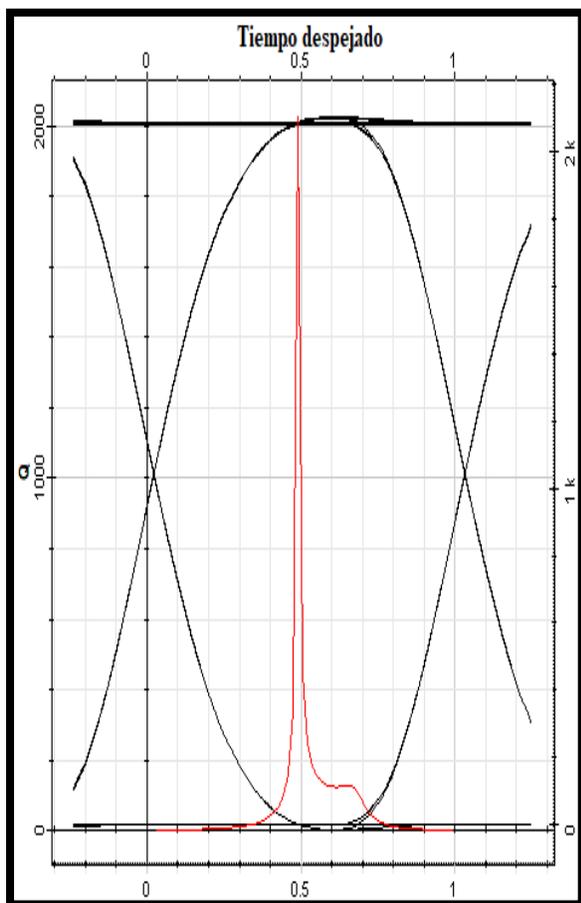
*Resultados para el modelo EL-30G Tasa de 30 Gbps.*

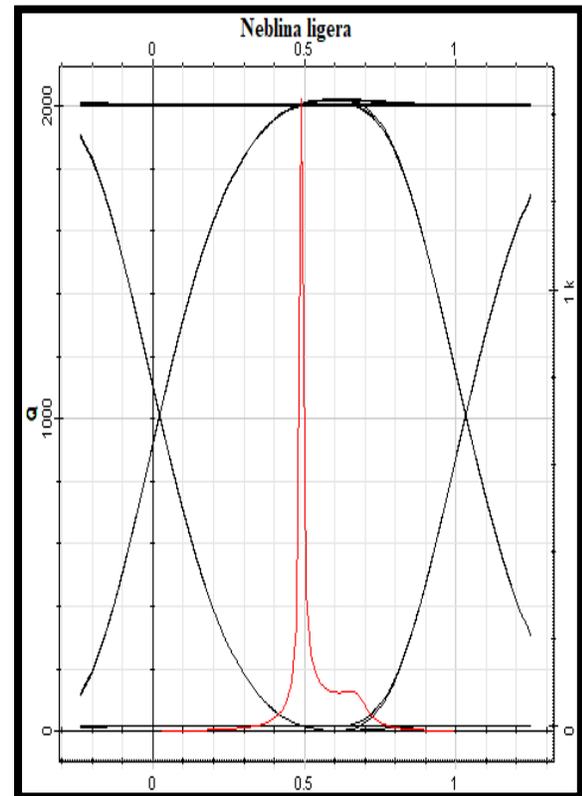
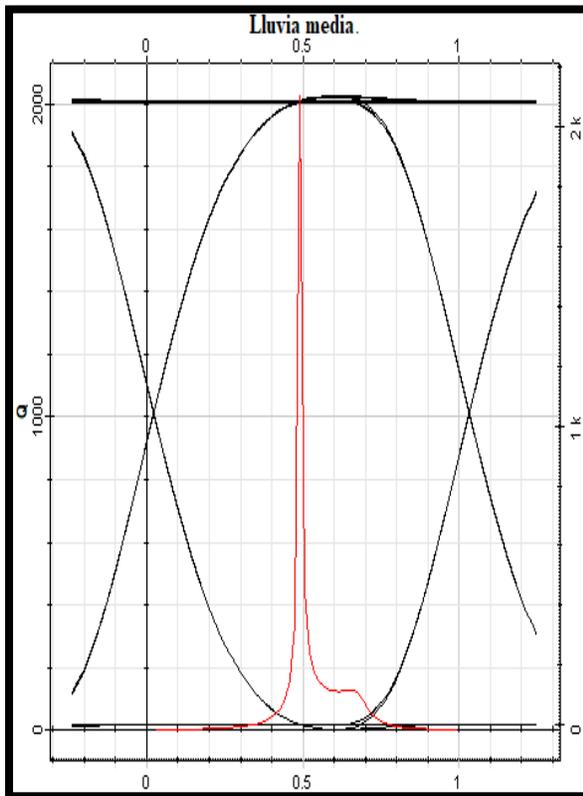
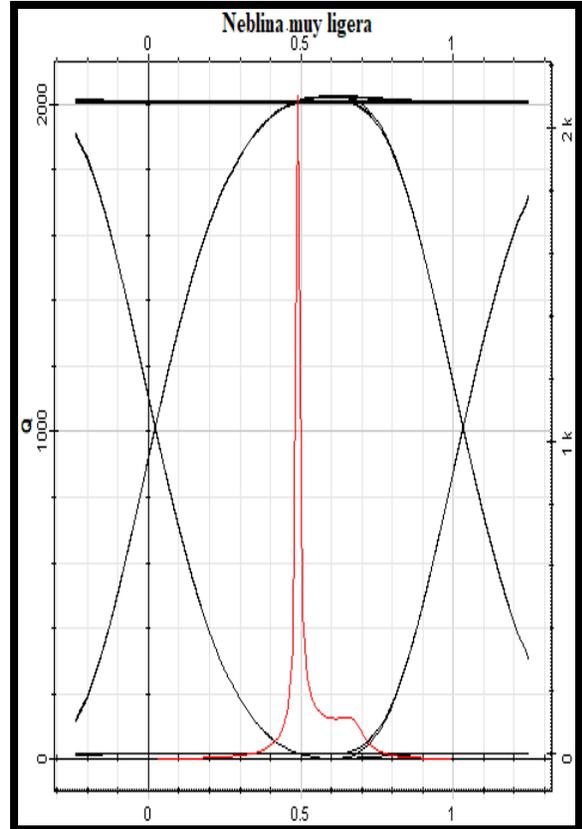
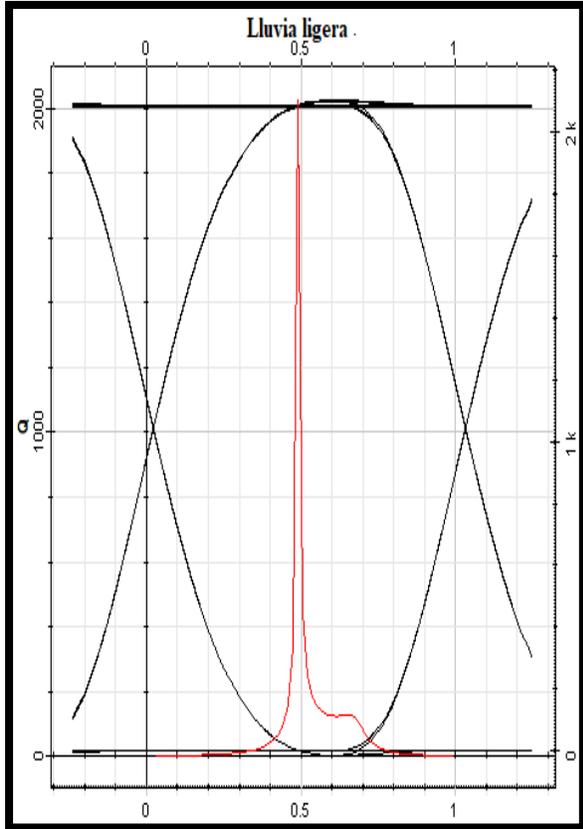
CONDICION METEREOLOGICA	ASPECTOS DE ANALISIS						
	Atenuación dB/km	Potencia de transmisión mW			Factor Q	Umbral	BER
		P1	P2	P3			
Tiempo despejado	0.54	35	3366.66	336666.57	2026.26	820.976	0
Llovizna	0.6	35	3354.28	335428.53	2026.23	817.885	0
Lluvia ligera	2	35	3071.14	307114.27	2025.4	748.984	0
Neblina muy ligera	3.1	35	2866.15	286615.71	2024.7	698.944	0
Lluvia media	4.6	35	2608.55	260855.50	2023.66	636.051	0
Neblina ligera	6.6	35	2073.95	207395.	2022.11	560.908	0

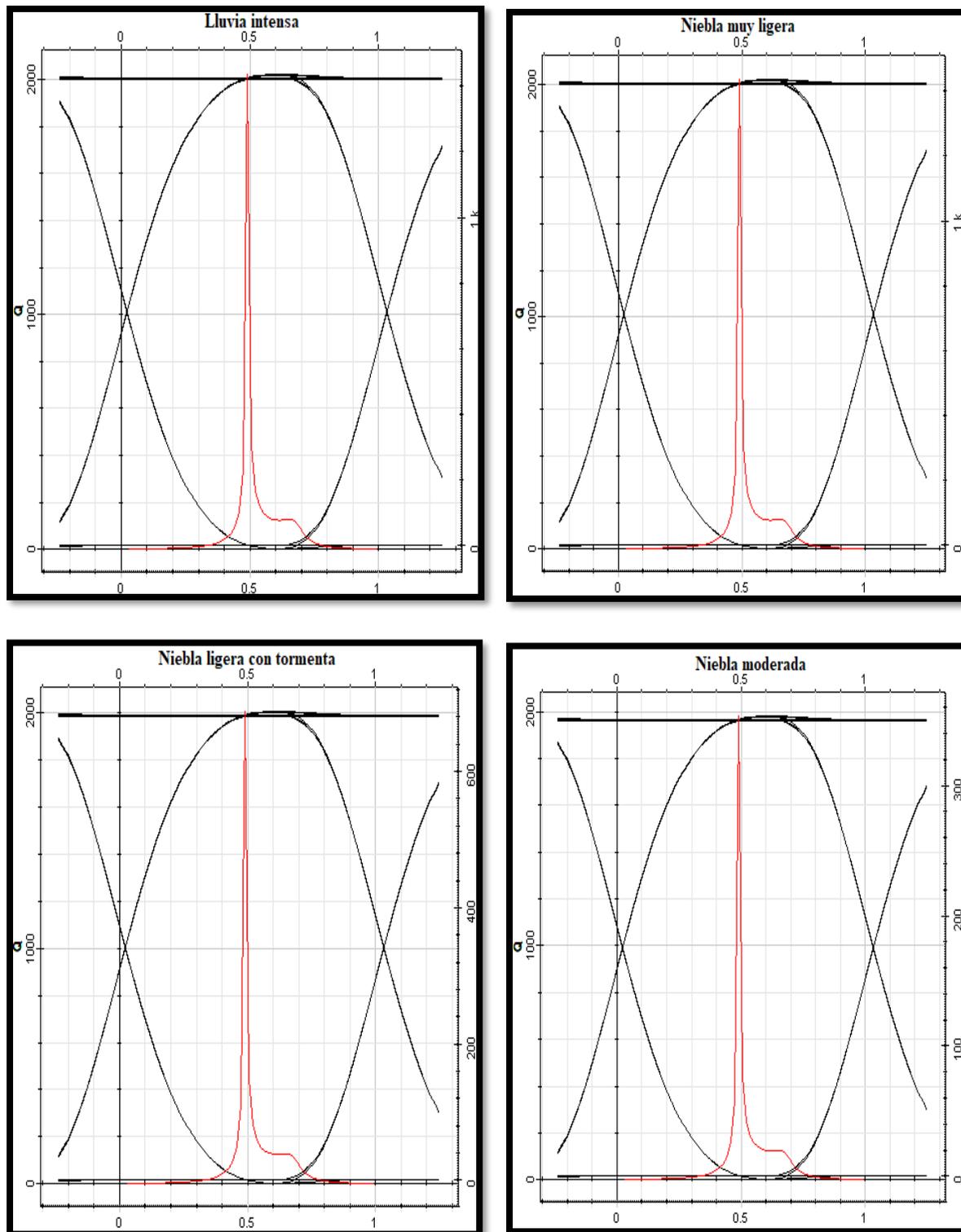
				82			
Lluvia intensa	6.9	35	2257.35	225735.57	2021.86	550.43	0
Niebla muy ligera	13.8	35	1462.85	146285.06	2014.58	356.723	0
Niebla ligera con tormenta	18.3	35	1102.55	110255.43	2007.84	268.832	0
Niebla moderada	28.9	35	566	56623.92	1982.38	138.07	0

*Nota.* Los datos muestran el comportamiento del equipo utilizado en cada parámetro de análisis (fuente propia).

De cada condición meteorológica se evidencian las siguientes imágenes donde se observa el factor de calidad Q que es la señal de color rojo, y el diagrama de ojo que es la onda de color negro.







**Figura 64.** Comportamiento del Factor de calidad  $Q$  y diagrama de ojo de cada condición meteorológica para el modelo EL-30G del fabricante EC SYSTEM con potencia de transmisión de 72 mW y tasa de 30 Gbps. Fuente propia, (2020, pág. 136).

### Análisis de resultados.

De los escenarios de prueba simulados se procede a analizar el comportamiento de cada dispositivo o modelo óptico en el sistema propuesto, dicho análisis será redactado en las siguientes tablas.

Tabla 31.

*Análisis de los resultados de potencia y factor de calidad Q.*

ESCENARIOS DE PRUEBA	PARAMETROS DE MEDICION	
	Potencia	Factor de calidad Q
Primer escenario fSONA	<p>Configurando una pequeña divergencia de haz láser en el sistema con una longitud de onda de 1550 nm, en todos los modelos se ve reflejada la utilidad que tienen los amplificadores ópticos para aumentar la potencia. Por tanto, el esquema de recepción recibe altos niveles de potencia aun en la máxima condición meteorológica que es la niebla moderada y que posee la atenuación más alta.</p> <p>De esta manera, la potencia de transmisión es proporcional a la potencia de recepción y así se determina cuál es su nivel de recepción.</p>	<p>Para cada modelo de este escenario, el receptor tiene un buen rendimiento sin presentar tasa de error de bit BER. Es decir, el nivel de potencia recibida en el receptor es proporcional a la información o bits recibidos en el sistema.</p>
Segundo escenario CableFree	<p>Con una longitud de onda 780 nm, la potencia asignada a los modelos ópticos va desde 30 mW hasta 79.43 mW, lo cual es relativamente bajo. Sin embargo, es la adecuada para transportar 1.5 Gbps que fue lo configurado en cada modelo.</p> <p>Para los dispositivos con potencia de 30.2 mW se pudo observar que bajar la divergencia del haz de 8 a 5 miliradianes/segundo eleva la potencia cuando pasa por canal FSO.</p> <p>El caso es el mismo para la</p>	<p>El factor Q refleja un buen rendimiento en el receptor. Entre más sea la divergencia de haz el receptor recibe más potencia lo que eleva la calidad y cantidad de información recibida disminuyendo la pérdida de energía.</p>

	potencia de 79.43 mW, entre más baja sea la divergencia del haz más potencia se recibirá en el receptor.	
Tercer escenario AIRLINX Communications Inc.	<p>Para los dos modelos, la potencia de transmisión es baja. Sin embargo, es ideal para la longitud de 850 nm y para emitir 1.25 Gbps.</p> <p>La divergencia del haz láser es la asignada por el simulador es de 2 mili-radianes/segundo. Por tanto, hace que el sistema sea más útil hasta en la máxima condición meteorológica.</p> <p>La divergencia no disminuye la potencia así pase por el canal de propagación FSO ayudando que la potencia de recepción sea considerablemente alta.</p>	<p>Incluso con potencia de transmisión de 2 mW, la potencia recibida es bastante elevada en cada modelo. Por consiguiente, el rendimiento del receptor es bueno incluso en máximas condiciones meteorológicas disminuyendo la tasa de pérdida de energía en todos los dispositivos.</p>
Cuarto escenario EC SYSTEM	<p>En este escenario, los modelos ópticos la potencia de transmisión y la divergencia del haz láser es relativamente baja. Gracias a la elevada longitud de onda de 1550 nm y con ayuda de amplificadores ópticos la potencia de recepción es alta incluso en la máxima condición meteorológica.</p> <p>El fabricante indica que los dispositivos seleccionados pueden soportar una elevada atenuación haciendo que el sistema diseñado sea más robusto.</p>	<p>El factor corresponde proporcionalmente a la tasa de bits configurada y emitida en el sistema. Aunque para 1 Gbps el factor Q es bajo comparado con otros dispositivos, el sistema de recepción responde de forma correcta. Cabe mencionar que este comportamiento se evidencia debido a la baja potencia de transmisión que poseen estos dispositivos.</p> <p>Para tasa mayor a 10 Gbps la calidad y rendimiento del receptor es bueno y útil para recibir la cantidad asignada de bits o información.</p>

*Nota.* Los análisis se hacen en relación con los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas (fuente propia).

Tabla 32.

*Análisis del umbral de recepción y el diagrama de ojo.*

ESCENARIOS DE PRUEBA	PARAMETROS DE MEDICION	
	Umbral de recepción	Diagrama de ojo
Primer escenario fSONA	<p>Una potencia de recepción alta proporciona un elevado umbral. El mínimo nivel de señal que puede recibir el sistema no cambia en los modelos que tienen la misma potencia de transmisión.</p> <p>En la máxima condición de niebla moderada para 800 mW el umbral es de 43.26, para 320 mW el umbral es de 17.30 y para la potencia más baja de 160 mW el umbral es de 2.16.</p>	<p>Este parámetro indica que el sistema FSO evidencia buenas condiciones de operación sin presentar desfases e imperfecciones en el canal de propagación. Es decir, sin existencia de ruido y sin muestras de disminución en la calidad de la señal utilizada en el sistema.</p>
Segundo escenario CableFree	<p>Todos los modelos poseen una tasa de bits de 1.5 Gbps. Una vez considerado este detalle, el umbral en la máxima condición meteorológica mejora conforme baja la divergencia del haz.</p> <p>La potencia en el sistema es proporcional al umbral recibido entre más sea mayor será el umbral teniendo en cuenta la cantidad de divergencia que se configura en el sistema.</p> <p>El mejor umbral es de 9926 y se presentó en el dispositivo G-500 con potencia de 30.2 mW, mientras que para el dispositivo G-2000 con potencia de 79.43 mW el umbral es de 10967.6.</p>	<p>El diagrama presenta poca o nula interferencia o manifestación ruido mostrando un buen rendimiento del sistema hasta en la máxima condición meteorológica. Se pudo apreciar una onda que no sufre desfases ni alteraciones que modifiquen su apariencia.</p>
Tercer escenario AIRLINX Communications Inc.	<p>El umbral de recepción mejora bastante gracias a la poca existencia de divergencia en el haz láser de modo que la potencia de transmisión no sufre inconvenientes incluso pasando por el canal de propagación FSO. Es decir, la potencia recibida es</p>	<p>El diagrama de ojo no evidencia fallas en el sistema FSO, el cual está en buenas condiciones.</p> <p>La forma de la onda no presenta alteraciones ni desfases mostrando que la potencia y el factor Q contribuyen a que el sistema sea de</p>

	<p>elevada y a su vez, permite un mayor umbral.</p> <p>Dicho umbral de recepción para cada potencia de transmisión en estado de niebla moderada es el siguiente:</p> <p>Para el dispositivo de FlightStrata que maneja diferentes potencias el umbral para 2 mW es de 0.43, para 10 mW es de 12.86, para 1000 mW es de 216.389 y para 11 mW manejado por la serie Canobeam el umbral es de 2.38.</p>	<p>buena calidad para emitir y recibir información.</p>
<p>Cuarto escenario EC SYSTEM</p>	<p>En este escenario el umbral de recepción es bastante bueno, presenta optimas e ideales condiciones. En la máxima condición que es la niebla moderada, el sistema se comporta de la siguiente manera:</p> <p>Para 1 Gbps con potencia de transmisión de 75 mW el umbral es de 142.096.</p> <p>Para 1 Gbps con potencia de transmisión de 72 mW el umbral es de 136.412-</p> <p>Para 10 Gbps con potencia de transmisión de 72 mW el umbral es de 138.109.</p> <p>Para 1 Gbps con potencia de transmisión de 75 mW el umbral es de 138.07.</p> <p>Se deduce que, en este aspecto el sistema actúa con similitud en cada dispositivo sin importar la cantidad de bits que sean configurados. Es decir, su funcionalidad depende de cuanta potencia de transmisión tenga los dispositivos elegidos.</p>	<p>Cada modelo óptico o dispositivo evidencia sistemas diferentes, aunque funcionales.</p> <p>Para tasa de 1 Gbps el comportamiento es parecido en los dos dispositivos, se evidencia una onda con poca alteración y ruido es decir no consistente, aunque estable y en condiciones aptas mostrando que el sistema tiene un aceptable rendimiento en cada condición meteorológica.</p> <p>Para tasa de 10 y 30 Gbps se observa una onda consistente sin interferencias y alteraciones, y poca existencia de ruido. En esta prueba el sistema tiene alto rendimiento y responde proporcionalmente a la potencia de transmisión emitida en cada dispositivo.</p>

*Nota.* Los análisis se hacen en relación con los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas (fuente propia).

### **Conclusiones y recomendaciones**

Todos los conceptos estudiados han sido analizados y practicados durante el proyecto haciendo una profundización considerable acerca de la temática.

En cuanto al análisis económico realizado, cada dispositivo tiene características importantes y algún factor diferencial por encima de otro. Contar con un sistema de seguimiento automático es ideal ya que dicho aspecto posee un componente de detección en caso de desvió por factores externos o atmosféricos.

Respecto a los escenarios de prueba ejecutados, cabe mencionar varios aspectos que son importantes:

- A mayor longitud de onda, mayor divergencia del haz láser.
- La divergencia del haz deteriora la potencia que pasa por el canal de propagación FSO y al mismo tiempo la potencia de recepción. Por consiguiente, el factor de calidad Q que mide el rendimiento del receptor disminuirá.

Al presentar baja latencia, los equipos ópticos seleccionados no tienen inconvenientes en retardo de red cuando el haz láser pase por el medio de propagación, es decir, el canal FSO.

Lo más destacado del proyecto, es que aun con bajas potencias de transmisión en algunos dispositivos no se presentaron tasas de error de bit BER, lo que hace útil el sistema de comunicación propuesto con cualquier tasa de bit que le sea suministrado. Así mismo, se concluye que los dispositivos más indicados por precio y funcionalidad para el sistema de comunicación FSO propuesto entre la universitaria Agustiniense y el colegio Agustiniense Tagaste son los equipos ópticos 10G-E+, FlightStrata-G, EL-10G y EL-30G porque hace el sistema más robusto y con mayor operatividad, su umbral de recepción es más alto aunque algunos evidencian pequeños problemas por ruidos o interferencias pero que no representan fallas o errores de bit incluso en la máxima condición meteorológica. Por último, soluciona cualquier inconveniente en los servicios de audio, video, MP3, MP4, HDTV y posibilita la opción de utilizar telefonía celular a gran escala. Todos estos servicios han sido mencionados al detalle en apartados anteriores.

Por último, el simulador Optisystem fue muy práctico para todo el análisis y en él se pudieron practicar y profundizar todos los conceptos de la temática en cuestión.

Las recomendaciones son:

- Estudiar a profundidad el tema en clases de los cursos de comunicación digital y comunicación óptica dictados en la universidad Agustiniense con el fin de mejorar la comunicación a mayores distancias y hacer que la tecnología FSO no sea tan emergente como lo es en la actualidad.
- Emplear el simulador Optisystem con escenarios de prueba más complejos que muestren un comportamiento más analítico de los sistemas de comunicación FSO.
- A futuro sería importante si este tipo de enlaces se les practica un estudio de factibilidad en campo porque en primer lugar facilita la interacción real con los dispositivos ópticos y en segundo lugar ayuda a que la universidad Agustiniense o el colegio Agustiniense Tagaste cuenten con un sistema de respaldo en caso de que el modelo actual no brinde con prontitud y calidad todos los servicios que un cliente o estudiante requiere para sus labores. De esta manera se generará confiabilidad en el producto y alta demanda para que los proveedores puedan vender a precios aún más accesibles.

### Referencias

- Acosta, B. (2011). *Repositorio de la fuerzas armadas espe*. Estudio y diseño de un enlace mediante un sistema de comunicación óptica (fso) en el espacio libre para enlazar el edificio principal de la espe con los laboratorios del departamento de eléctrica y electrónica. Recuperado de: <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/4527>
- Acosta, B. (2011). *Repositorio de la universidad de fuerzas armadas espe* . Estudio y diseño de un enlace mediante un sistema de comunicación óptica (fso) en el espacio libre para enlazar el edificio principal de la espe con los laboratorios del departamento de eléctrica y electrónica. - tipos de dispersión. Recuperado de:<http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/4527>
- Acosta, B. (2011). *Repositorio de la universidad de la fuerzas armadas espe*. obtenido de estudio y diseño de un enlace mediante un sistema de comunicación óptica (fso) en el espacio libre para enlazar el edificio principal de la espe con los laboratorios del departamento de eléctrica y electrónica. Recuperado de:<http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/4527>
- Acosta, B. (2011). *researchgate - escuela politecnica del ejercito*. obtenido de estudio y diseño de un enlace mediante un sistema de comunicación óptica (fso) en el espacio libre para enlazar el edificio principal de la espe con los laboratorios del departamento de eléctrica y electrónica - efectos atmosfericos fso: [https://www.researchgate.net/publication/277052666\\_estudio\\_y\\_diseño\\_de\\_un\\_enlace\\_mediante\\_un\\_sistema\\_de\\_comunicacion\\_optica\\_FSO\\_en\\_el\\_espacio\\_libre\\_para\\_enlazar\\_el\\_edificio\\_principal\\_de\\_la\\_ESPE\\_con\\_los\\_laboratorios\\_del\\_departamento\\_de\\_Electrica\\_y\\_elec/cit](https://www.researchgate.net/publication/277052666_estudio_y_diseño_de_un_enlace_mediante_un_sistema_de_comunicacion_optica_FSO_en_el_espacio_libre_para_enlazar_el_edificio_principal_de_la_ESPE_con_los_laboratorios_del_departamento_de_Electrica_y_elec/cit)
- AIRLINX. (2020). *Airlinx communications inc*. Equipo óptico canobeam dt - 130. Recuperado de:<http://www.airlinx.com/products.cfm/product/19-182-993.htm>
- AIRLINX. (2020). *Airlinx communications inc*. Equipo óptico flightstrata-g. Recuperado de:<http://www.airlinx.com/files/AIRLINX%20FlightStrata%20Data%20Sheet%201005.pdf>
- AIRLINX. (2020). *Airlinx communications inc*. Equipo óptico flightstrata-g. Recuperado de: <http://www.airlinx.com/files/AIRLINX%20FlightStrata%20Data%20Sheet%201005.pdf>
- AIRLINX. (2020). *Airlinx communications inc*. . Equipo óptico canobeam dt - 130. Recuperado de: <http://www.airlinx.com/products.cfm/product/19-182-993.htm>

- AIRLINX. (2020). *Airlinx communications, inc.* obtenido de fso canobeam dt-100 y empresas flightstrata - flightlight. Recuperado de: <http://www.airlinx.com/products.cfm/product/19-0-0.htm>
- Arbesser-Rastburg, B. (2008). *Itu union internacional de telecomunicaciones*. Información de propagación de ondas de radio para diseñar enlaces terrestres de punto a punto. Recuperado de: <https://www.itu.int/pub/R-HDB-54-2009>
- CableFree. (2020). *Cablefree wireless excellence*. Fso free optics space. Recuperado de: <https://www.cablefree.net/>
- CableFree. (2020). *Cablefree wireless excellence* . Equipo óptico gigabit range. Recuperado de: <https://www.cablefree.net/pdf/CableFree%20FSO%20Gigabit%20Datasheet.pdf>
- CableFree. (2020). *Cablefree wireless excellence* . Especificaciones modelos ópticos gigabit fso. Recuperado de: <https://www.cablefree.net/pdf/CableFree%20FSO%20Gigabit%20Datasheet.pdf>
- Caizaluisa, E. J. (2008). *Bib digital escuela politécnica nacional*. Diseño de una red con tecnología láser free space optics (fso), para el campus de la escuela politécnica nacional y su compración con la red de fibra óptica. - efectos atmosfericos fso. Recuperado de: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/4232>
- Caizaluisa, E. J. (2008). *Bib digital escuela politécnica nacional* . Diseño de una red con tecnología láser free space optics (fso), para el campus de la escuela politécnica nacional y su compración con la red de fibra óptica. - procedimiento de repetición para transmistir datos. Recuperado de: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/4232>
- Caizaluisa, E. J. (2008). *Bibdigital escuela politécnica nacional*. Transmisión en un cielo claro en función de la longitud de onda. Recuperado de: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/4232>
- Caizaluisa, E. J. (2008). *Bibdigital escuela politécnica nacional*. Transmisión en un ambiente con dióxido de carbono en función de la longitud de onda. Recuperado de: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/4232>
- Caizaluisa, E. J. (2008). *Bibdigital escuela politécnica nacional*. Efectos de la cintilación. Recuperado de: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/4232>
- Caizaluisa, E. J. (2008). *Diseño de una red con tecnología láser free space optics (fso), para el campus de la escuela politécnica nacional y su compración con la red de fibra óptica.*

- obtenido de características de los sistemas fso - disponibilidad de enlace y confiabilidad, y seguridad. Recuperado de: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/4232>
- Caizaluisa, E. J. (2008). *Google academico*. Diseño de una red con tecnología láser free space optics para el campus de la escuela politécnica nacional y su comparación con la red de fibra óptica. Recuperado de: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/4232>
- Carballo, C. (2019). *Researchgate - viii simposio de telecomunicaciones*. Propuesta de comunicación óptica en el espacio libre (fso) como tecnología complementaria en la red de etecsa. - arquitectura fso para la transmisión de datos, voz y video. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/337768871\\_VIII\\_Simposio\\_de\\_Telecomunicaciones\\_PROPUESTA\\_DE\\_COMUNICACION\\_OPTICA\\_EN\\_EL\\_ESPACIO\\_LIBRE\\_FSO\\_COMO\\_TECNOLOGIA\\_COMPLEMENTARIA\\_EN\\_LA\\_RED\\_DE\\_ETECSA\\_PROPOSAL\\_FOR\\_OPTICAL\\_COMMUNICATION\\_IN\\_THE\\_FREE\\_SPACE\\_FSO](https://www.researchgate.net/publication/337768871_VIII_Simposio_de_Telecomunicaciones_PROPUESTA_DE_COMUNICACION_OPTICA_EN_EL_ESPACIO_LIBRE_FSO_COMO_TECNOLOGIA_COMPLEMENTARIA_EN_LA_RED_DE_ETECSA_PROPOSAL_FOR_OPTICAL_COMMUNICATION_IN_THE_FREE_SPACE_FSO)
- Carballo, C. (2019). *Researchgate - viii simposio de telecomunicaciones*. Propuesta de comunicación óptica en el espacio libre (fso) como tecnología complementaria en la red de etecsa. - operación de un sistema fso. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/337768871\\_VIII\\_Simposio\\_de\\_Telecomunicaciones\\_PROPUESTA\\_DE\\_COMUNICACION\\_OPTICA\\_EN\\_EL\\_ESPACIO\\_LIBRE\\_FSO\\_COMO\\_TECNOLOGIA\\_COMPLEMENTARIA\\_EN\\_LA\\_RED\\_DE\\_ETECSA\\_PROPOSAL\\_FOR\\_OPTICAL\\_COMMUNICATION\\_IN\\_THE\\_FREE\\_SPACE\\_FSO](https://www.researchgate.net/publication/337768871_VIII_Simposio_de_Telecomunicaciones_PROPUESTA_DE_COMUNICACION_OPTICA_EN_EL_ESPACIO_LIBRE_FSO_COMO_TECNOLOGIA_COMPLEMENTARIA_EN_LA_RED_DE_ETECSA_PROPOSAL_FOR_OPTICAL_COMMUNICATION_IN_THE_FREE_SPACE_FSO)
- Carballo, C. (2019). *VIII simposio de telecomunicaciones*. Propuesta de comunicación óptica en el espacio libre (fso) como tecnología complementaria en la red de etecsa - codigo internacional de visibilidad. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/337768871\\_VIII\\_Simposio\\_de\\_Telecomunicaciones\\_PROPUESTA\\_DE\\_COMUNICACION\\_OPTICA\\_EN\\_EL\\_ESPACIO\\_LIBRE\\_FSO\\_COMO\\_TECNOLOGIA\\_COMPLEMENTARIA\\_EN\\_LA\\_RED\\_DE\\_ETECSA\\_PROPOSAL\\_FOR\\_OPTICAL\\_COMMUNICATION\\_IN\\_THE\\_FREE\\_SPACE\\_FSO](https://www.researchgate.net/publication/337768871_VIII_Simposio_de_Telecomunicaciones_PROPUESTA_DE_COMUNICACION_OPTICA_EN_EL_ESPACIO_LIBRE_FSO_COMO_TECNOLOGIA_COMPLEMENTARIA_EN_LA_RED_DE_ETECSA_PROPOSAL_FOR_OPTICAL_COMMUNICATION_IN_THE_FREE_SPACE_FSO)
- Carballo, C. (2019). *VIII simposio de telecomunicaciones*. Propuesta de comunicación óptica en el espacio libre (fso) como tecnología complementaria en la red de etecsa - ventajas del sistema fso. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/337768871\\_VIII\\_Simposio\\_de\\_Telecomunicaciones\\_PROPUESTA\\_DE\\_COMUNICACION\\_OPTICA\\_EN\\_EL\\_ESPACIO\\_LIBRE\\_FSO](https://www.researchgate.net/publication/337768871_VIII_Simposio_de_Telecomunicaciones_PROPUESTA_DE_COMUNICACION_OPTICA_EN_EL_ESPACIO_LIBRE_FSO)

O\_COMO\_TECNOLOGIA\_COMPLEMENTARIA\_EN\_LA\_RED\_DE\_ETECSA\_PRO  
 POSAL\_FOR\_OPTICAL\_COMMUNICATION\_IN\_THE\_FREE\_SPACE\_FSO

- Castillo, R. (2012). *Google academico - universidad central marthe abreu de las villas* . Red de acceso con sistemas ópticos de espacio libre en ciego de ávila. Recuperado de: <http://dspace.uclv.edu.cu:8089/handle/123456789/6811>
- Cedar Lake ventures Inc. (2020). *Weather spark*. Velocidad promedio del viento. Recuperado de: <https://es.weatherspark.com/y/23324/Clima-promedio-en-Bogot%C3%A1-Colombia-durante-todo-el-a%C3%B1o>
- Cedar Lake Ventures Inc. (2020). *Weather spark*. obtenido de el clima promedio de bogotá. Recuperado de: <https://es.weatherspark.com/y/23324/Clima-promedio-en-Bogot%C3%A1-Colombia-durante-todo-el-a%C3%B1o#Sections-Precipitation>
- Cedar Lake Ventures Inc. (2020). *Weather spark*. Media en temperatura por cada hora: Recuperado de: <https://es.weatherspark.com/m/23324/6/Tiempo-promedio-en-junio-en-Bogot%C3%A1-Colombia#Sections-ColorTemperature>
- Cedar Lake Ventures Inc. (2020). *Weather spark*. Dirección del viento: Recuperado de: <https://es.weatherspark.com/y/23324/Clima-promedio-en-Bogot%C3%A1-Colombia-durante-todo-el-a%C3%B1o>
- Cedar Lake Ventures Inc. (2020). *Weather spark*. obtenido de categorías de nubosidad. Recuperado de: <https://es.weatherspark.com/m/23324/7/Tiempo-promedio-en-julio-en-Bogot%C3%A1-Colombia#Sections-Clouds>
- Cedar Lake Ventures Inc. (2020). *Weather spark*. Temperatura máxima y mínima promedio en bogotá. Recuperado de: <https://es.weatherspark.com/y/23324/Clima-promedio-en-Bogot%C3%A1-Colombia-durante-todo-el-a%C3%B1o#Sections-Precipitation>
- Cedar Lake Ventures Inc. (2020). *Weather spark*. Probabilidad diaria de precipitación. Recuperado de: <https://es.weatherspark.com/m/23324/7/Tiempo-promedio-en-julio-en-Bogot%C3%A1-Colombia#Sections-Precipitation>
- Cedar Lake Ventures Inc. (2020). *Weather spark*. Precipitación de lluvia mensual promedio. Recuperado de: <https://es.weatherspark.com/y/23324/Clima-promedio-en-Bogot%C3%A1-Colombia-durante-todo-el-a%C3%B1o#Sections-Precipitation>

- Cedar Lake Ventures Inc. (2020). *Weather spark*. Horas de luz natural y crepúsculo. Recuperado de: <https://es.weatherspark.com/y/23324/Clima-promedio-en-Bogot%C3%A1-Colombia-durante-todo-el-a%C3%B1o>
- Cedar Lake Ventures Inc. (2020). *Weather spark*. obtenido de salida del sol y puesta del sol con crepúsculo. Recuperado de: <https://es.weatherspark.com/y/23324/Clima-promedio-en-Bogot%C3%A1-Colombia-durante-todo-el-a%C3%B1o>
- Cedar Lake Ventures Inc. (2020). *Weather spark*. Niveles de comodidad de la humedad. Recuperado de: <https://es.weatherspark.com/y/23324/Clima-promedio-en-Bogot%C3%A1-Colombia-durante-todo-el-a%C3%B1o>
- Chacín, U. P. (2004). Fundamentos para la aplicación de sistemas ópticos inalámbricos (fso) como solución de telecomunicaciones en áreas metropolitanas . *revista electronica de estudios telematicos TELEMATIQUE*, 112 - 115 .
- Chadha, D. (2013). Fso's disadvantages. en d. chadha, *terrestrial wireless optical communication* (pág. 4). McGraw Hill Professional .
- EC SYSTEM. (2020). *ec system*. Óptica en espacio libre. Recuperado de: <http://www.ecsystem.cz/vyroby/opticke-pojitko>
- EC SYSTEM. (2020). *ec system*. Equipo óptico fso. Recuperado de: <http://www.ecsystem.cz/en/products/free-space-optic-equipment>
- EC SYSTEM. (2020). *ec system*. Equipos para enlaces ópticos fso. Recuperado de: <http://www.ecsystem.cz/vyroby/opticke-pojitko>
- FORECA Ltd. . (2020). *Foreca weather* . Tiempo local en Kennedy. Recuperado de: <https://www.foreca.es/Colombia/Bogota-D.C./Kennedy>
- fSONA . (2020). *Google*. Fsona sonabeam - e. Recuperado de: [http://fsona.com/prod/SONAbeam\\_E\\_Plus.pdf](http://fsona.com/prod/SONAbeam_E_Plus.pdf)
- fSONA. (2020). *fsona*. Sonabeam modelos fso. Recuperado de: <http://www.fsona.com/product.php>
- fSONA. (2020). *fsona*. Especificaciones de equipos opticos fsona. Recuperado de: [http://fsona.com/prod/SONAbeam\\_E\\_Plus.pdf](http://fsona.com/prod/SONAbeam_E_Plus.pdf)
- FTTH, L. P. (2015). *modulo i: red de acceso*. barcelona - españa: 10.13140/rg.2.1.1922.4162. Recuperado de: [researchgate:](https://www.researchgate.net/publication/301111111)

- [https://www.researchgate.net/profile/Eduardo\\_Lopez\\_Pastor/publication/280068933\\_FTTH\\_Course\\_-\\_Module\\_1/links/55a656ca08ae32c1d10fb5ec/FTTH-Course-Module-1.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Eduardo_Lopez_Pastor/publication/280068933_FTTH_Course_-_Module_1/links/55a656ca08ae32c1d10fb5ec/FTTH-Course-Module-1.pdf)
- Fuente propia. (2020). google earth pro. bogotá d.c, cundinamarca, colombia . Recuperado de: trayecto entre la universitaria agustiniana y el colegio agustiniano tagaste.
- Garreton, C. (2005). *u-cursos - el55a-1 sistemas de telecomunicaciones*. Problema de la ultima milla. Recuperado de: [https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2005/1/EL55A/1/material\\_docente/bajar?id\\_material=67587](https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2005/1/EL55A/1/material_docente/bajar?id_material=67587)
- Ghassemlooy , Z., Popoola, W., & Rajbhandari, S. (2017). introduction optical wireless communication systems - cuello de botella de la red de acceso. en z. ghassemlooy, w. popoola, & s. rajbhandari, *optical wireless communications system and channel modelling with matlab®* (pág. 10). londres: CRC Press LLC.
- Giler, J. F. (2019). *Google academico - universidad catóica de santiago de guayaquil*. obtenido de diseño y simulacion de sistemas de comunicacion optica por el espacio libre usando multiples transmisores/receptores mediante optisystem. Recuperado de: <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/12731>
- Giler, N. F. (2019). *Universidad católica de santiago de guayaquil*. Diseño y simulación de sistemas de comunicación óptica por el espacio libre usando múltiples transmisores/receptores mediante optisystem. - optisystem y elementos para configuraciones. Recuperado de: <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/12731>
- H. Franz, J., & K. Jain, V. (2002). optical communications: components and systems. en j. h. franz, & v. k. jing, *optical communications: Components and Systems - Chapter 1 History* (págs. 1-3). New Dehli, India : Narosa Publishing House.
- Hernandez, R., Fernandez, C., & Baptista, P. (2013). *Metodologia de la investigacion*. México d.f: McGraw Hill.
- ITU Union Internacional de Telecomunicaciones* . (2012). Datos de propagación necesarios para el diseño de enlaces ópticos terrenales en el espacio libre. Recuperado de: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1817/es>
- KRET. (2014). *Rostec*. Comunicación por medio del rayo láser a través de la atmósfera. Recuperado de: <https://rostec.ru/es/news/4514901/>
- León Apolo, J. H., & Vaca Ron, R. C. (2008). *google academico - escuela politecnica del ejercito*. Estudio de factibilidad y simulación de una red inalámbrica óptica basada en la

- tecnología fso (free space optical), para mejorar el rendimiento del backbone actual de la espe campus sangolqui. Recuperado de: <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/1085>
- Lopez, E. T. (2015). fthh. en e. t. lopez pastor, *modulo i: red de acceso* (pág. 10). barcelona - españa: 10.13140/RG.2.1.1922.4162.
- Lopez, E. T. (2015). Modulo 1: red de acceso. en e. t. lopez pastor, *fthh* (pág. 7). barcelona - españa: 10.13140/RG.2.1.1922.4162.
- Majumdar , A. (2014). Bandwidth: know the data tansmission rates and what you need! en a. majumdar, *advanced free space optics (fso)* (págs. 5 - 6). nueva york: Springer.
- Majumdar , A. (2014). Chapter 1: fundamentals of free-space optical (fso) communication system - 1.1 introduction. en a. majumdar , *advanced free space optics (fso)* (págs. 1 - 3). nueva york: Springer.
- Majumdar , A. (2014). Esquema de la comunicación óptica inalambrica fso con conectividad para diferentes usuarios. en a. majumdar , *advanced free space optics (fso)* (pág. 3). nueva york: Springer.
- Majumdar , A. (2014). Fso connectivity in today's networks. en a. majumdar, *advance free space optics (fso)* (pág. 9). nueva york: Springer.
- Majumdar , A. (2014). Optical networks: integration of fso. en a. k. majumdar, *advanced free space optics (fso)* (págs. 10 - 12). nueva york: Springer.
- Majumdar, A. (2014). Basics of optical networks relevant to fso communications. en a. majumdar, *advanced free space optics (fso)* (págs. 8 - 9 ). nueva york: Springer .
- Majumdar, A. (2014). Enlaces ópticos en espacio libre conectando un área pequeña. en a. majumdar, *advanced free space optics (fso)* (pág. 14). nueva york: Springer .
- Majumdar, A. (2014). How the data transmission rates area provided in today's networks. en a. majumdar, *advanced free space optics (fso)* (págs. 6 - 8). nueva york: Springer.
- Majumdar, A. (2014). Implementacion simplificada de una red fso. en a. majumdar, *advanced free space optics (fso)* (pág. 12). nueva york: Springer.
- Majumdar, A. (2014). Sistema basico de comunicación. en a. majumdar , *advanced free space optics (fso)* (pág. 3). nueva york: Springer .
- Majumdar, A. (2014). Topologia conceptual de la red optica de redes integradas opticas inalambricas, satelitales, terrestres y domesticas. en a. majumdar, *advanced free space optics (fso)* (pág. 13). nueva york: Springer.

- Majumdar, A. (2014). Tres tipos de arquitectura fso. en a. majumdar , *advanced free space optics (fso)* (pág. 11). nueva york: Springer.
- Mena, & Mena, A. A. (2017). *Google academico - universidad de guayaquil*. Análisis de vulnerabilidades en dispositivos de red ethernet del complejo universitario norte caff: <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/27399>
- Optiwave Systems Inc. (2020). *Optiwave*. Reseña historica, beneficios, aplicaciones y funcionalidad de optisystem. Recuperado de: <https://optiwave.com/optisystem-overview/>
- Padrón, J. A. (2013). *Google academico - universidad central "marta abreu" de las villas*. obtenido de comunicaciones ópticas por el espacio libre. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/123456789/737>
- Pascual, D., & Ceniceros, J. (2007). *Universidad pública de navarra*. Free space optics. Recuperado de: [https://www.tlm.unavarra.es/~daniel/docencia/rba/rba06\\_07/trabajos/resumenes/gr15-FSO.pdf](https://www.tlm.unavarra.es/~daniel/docencia/rba/rba06_07/trabajos/resumenes/gr15-FSO.pdf)
- Rivamar, A. G. (2008). *Optical wireless*. Slidershare.net. Recuperado de: <https://es.slideshare.net/rivamara/optical-wireless-presentation>
- Romero, H. E., Ñaupas, H., Pañacios, J. J., & Valdivia, M. R. (2018). *Metodología de la investigación cuantitativa - cualitativa y redacción de la tesis. quinta edición* . bogotá - méxico df: Ediciones de la U.
- Romero, P. (2010). *Researchgate*. obtenido de fundamentos para la aplicación de sistemas ópticos inalámbricos (fso) como solución de telecomunicaciones en áreas metropolitanas. - protocolos fso. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/28293314\\_Fundamentos\\_para\\_la\\_aplicacion\\_de\\_sistemas\\_opticos\\_inalambricos\\_FSO\\_como\\_solucion\\_de\\_telecomunicaciones\\_en\\_areas\\_metropolitanas](https://www.researchgate.net/publication/28293314_Fundamentos_para_la_aplicacion_de_sistemas_opticos_inalambricos_FSO_como_solucion_de_telecomunicaciones_en_areas_metropolitanas)
- Romero, P. (2010). *Researchgate* . obtenido de fundamentos para la aplicación de sistemas ópticos inalámbricos (fso) como solución de telecomunicaciones en áreas metropolitanas. - protocolos y operacion de los sistemas fso. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/28293314\\_Fundamentos\\_para\\_la\\_aplicacion\\_de\\_sistemas\\_opticos\\_inalambricos\\_FSO\\_como\\_solucion\\_de\\_telecomunicaciones\\_en\\_areas\\_metropolitanas](https://www.researchgate.net/publication/28293314_Fundamentos_para_la_aplicacion_de_sistemas_opticos_inalambricos_FSO_como_solucion_de_telecomunicaciones_en_areas_metropolitanas)

- Santos, M. (2012). *Redes telematicas*. obtenido de la última milla. Recuperado de:  
<http://redestelematicas.com/la-ultima-milla/>
- Suarez, J. C. (2014). *Repositorio digital - universidad católica de santiago de guayaquil*. obtenido de visibilidad de acuerdo a la atenuación en entorno con niebla. Recuperado de:  
<http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/2188>
- Suarez, J. C. (2014). *Repositorio digital universidad católica de santiago de guayaquil*. Técnicas de transmisión óptica en el espacio libre (fso) : fundamentos teóricos, tecnologías y aplicación - espectro electromagnetico. Recuperado de:  
<http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/2188>
- Suarez, J. C. (2014). *Repositorio digital universidad católica de santiago de guayaquil*. obtenido de técnicas de transmisión óptica en el espacio libre (fso): fundamentos teóricos, tecnologías y aplicación. Recuperado de: <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/2188>
- Suarez, J. C. (2014). *Repostorio digital universidad católica de santiago de guayaquil* . obtenido de técnicas de transmisión óptica en el espacio libre (fso) : fundamentos teóricos, tecnologías y aplicación. - ventanas atmosfericas e impactos del clima. Recuperado de:  
<http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/2188>
- Suarez, J. C. (2014). *Técnicas de transmisión óptica en el espacio libre (fso) : fundamentos teóricos, tecnologías y aplicación - espectro electromagnetico*. Repositorio digital universidad catolica de guayaquil. Recuperado de:  
<http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/2188>
- Toapanta, F. W. (2015). *Pontificia universidad católica del ecuador*. Estudio de la transmisión óptica en espacio libre (fso) como una alternativa de red inalámbrica para enlaces punto a punto - transmisión óptica en el espacio libre. Recuperado de:  
<http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/11133>
- Toapanta, F. W. (2015). *Repositorio digital - universidad católica de ecuador*. Estudio de la transmisión óptica en espacio libre (fso) como una alternativa de red inalámbrica para enlaces punto a punto. - transmision a traves de la atmosfera y dispersión. Recuperado de:  
<http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/11133>
- Toapanta, F. W. (2015). *Repositorio digital - universidad católica de ecuador*. Estudio de la transmisión óptica en espacio libre (fso) como una alternativa de red inalámbrica para

- enlaces punto a punto. - factores que afectan a los sistemas fso. Recuperado de:  
<http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/11133>
- Toapanta, F. W. (2015). *Repositorio digital - universidad católica de ecuador*. obtenido de transmisión como función de la longitud de onda sobre condiciones en un área urbana (visibilidad = 5 km). Recuperado de: <http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/11133>
- Toapanta, F. W. (2015). *Repositorio digital - universidad católica de ecuador*. obtenido de estudio de la transmisión óptica en espacio libre (fso) como una alternativa de red inalámbrica para enlaces punto a punto. - consideraciones preliminares para el diseño de sistemas fso. Recuperado de: <http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/11133>
- Toapanta, F. W. (2015). *Repositorio digital universidad católica de ecuador*. obtenido de estudio de la transmisión óptica en espacio libre (fso) como una alternativa de red inalámbrica para enlaces punto a punto. - diagrama de flujo para solucionar problemas con el enlace. Recuperado de: <http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/11133>
- Yanetsys, S. D. (2006). *Scielo revista cubana de salud pública*. obtenido de google academico - el análisis de información y las investigaciones cuantitativa y cualitativa. Recuperado de: <https://www.scielo.org/article/rcsp/2007.v33n3/10.1590/S0864-34662007000300020/pt/>