



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

TEMA:

Diseño y simulación de sistemas de comunicación óptica por el espacio libre usando múltiples transmisores/receptores mediante OptiSystem.

AUTOR:

Giler León, Jhon Francisco

Trabajo de Titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

TUTOR:

M. Sc. Zamora Cedeño, Néstor Armando

Guayaquil, Ecuador

11 de Marzo del 2019



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Sr.
Giler León, Jhon Francisco como requerimiento para la obtención del título
de **INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**.

TUTOR

M. Sc. Zamora Cedeño, Néstor Armando

DIRECTOR DE CARRERA

M. Sc. Heras Sánchez, Miguel Armando

Guayaquil, a los 11 días del mes de Marzo del año 2019



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Giler León, Jhon Francisco**

DECLARO QUE:

El trabajo de titulación **“Diseño y simulación de sistemas de comunicación óptica por el espacio libre usando múltiples transmisores/receptores mediante OptiSystem”** previo a la obtención del Título de **Ingeniero en Telecomunicaciones**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, a los 11 del mes de Marzo del año 2019

EL AUTOR

Giler León, Jhon Francisco



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

AUTORIZACIÓN

Yo, **Giler León, Jhon Francisco**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación: **“Diseño y simulación de sistemas de comunicación óptica por el espacio libre usando múltiples transmisores/receptores mediante OptiSystem”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 11 del mes de Marzo del año 2019

EI AUTOR

Giler León, Jhon Francisco

REPORTE DE URKUND

URKUND

Documento: [Giler_Titulacion_2018.docx](#) (D48127311)
Presentado: 2019-02-20 08:28 (-05:00)
Presentado por: Néstor Zamora (nestor.zamora@cu.ucsg.edu.ec)
Recibido: nestor.zamora.ucsg@analysis.orkund.com
Mensaje: Trabajo Titulacion Giler [Mostrar el mensaje completo](#)
1% de estas 47 páginas, se componen de texto presente en 2 fuentes.

Lista de fuentes Bloques

Categoría	Enlace/nombre de archivo
>	Titulacion-Giler.docx
	Titulacion-Giler.docx
	ALBAN_Titulacion.docx
	SUAREZ_GINO_FINAL-FINAL.docx
Fuentes alternativas	
	ALBAN_Titulacion.docx

1 Advertencias. Reiniciar Exportar Compartir

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

TEMA:
Diseño y simulación
de
sistemas de comunicación óptica por el espacio libre usando múltiples transmisores/receptores mediante OptiSystem.

AUTOR: Giler León, Jhon Francisco

Trabajo de Titulación
previo a
la obtención del título de INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

TUTOR: M. Sc. Zamora Cedeño, Néstor Armando
Guayaquil, Ecuador

DEDICATORIA

A la vida, por mis decisiones.

A mi abuelo que desde arriba continúa guiándome.

A mi madre y a mi abuela, por todo su sacrificio.

EL AUTOR

Giler León, Jhon Francisco

AGRADECIMIENTO

A mi abuela.

A mis padres.

A las personas que influyeron en mí durante el transcurso de mi carrera.

A quienes me brindaron su apoyo, y a quienes no.

Me enseñaron mucho, se los agradezco.

EL AUTOR

Giler León, Jhon Francisco



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. _____

M. Sc. ROMERO PAZ, MANUEL DE JESÚS
DECANO

f. _____

M. Sc. PALACIOS MELÉNDEZ, EDWIN FERNANDO
COORDINADOR DE ÁREA

f. _____

M. Sc. PACHECO BOHÓRQUEZ, HÉCTOR IGNACIO
OPONENTE

Índice General

Índice de Figuras	XI
Resumen.....	XIV
Abstract.....	XV
CAPÍTULO 1: DESCRIPCIÓN GENERAL.....	2
1.1. Introducción.....	2
1.2. Antecedentes.	3
1.3. Definición del Problema.	4
1.4. Justificación del Problema.	4
1.5. Objetivos del Problema de Investigación.	5
1.5.1. Objetivo General.....	5
1.5.2. Objetivos Específicos.	5
1.6. Hipótesis.	5
1.7. Metodología de Investigación.	6
CAPÍTULO 2: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	7
2.1. La fibra óptica.....	7
2.2. Conceptos básicos detrás de la comunicación óptica.	10
2.2.1. Fibras y cables ópticos.	10
2.2.2. Formato de modulaciones.....	12
2.2.3. Multiplexación de canal.	14
2.3. Sistemas de comunicación ópticos inalámbricos.....	16
2.4. Historia de la comunicación óptica en espacio libre.....	19
2.5. La comunicación óptica en el espacio libre.....	22
2.5.1. Componentes de un sistema de comunicación FSO.	22
2.5.1.1. Transmisor óptico.....	24
2.5.1.1.1. Moduladores.	26
2.5.1.2. Receptor óptico.	30
2.5.2. Comparación de sistemas de comunicación FSO y RF.....	32
2.5.3. Elección de la longitud de onda en sistemas de comunicación FSO.....	35
2.5.4. Tecnologías utilizadas en FSO.....	36
2.5.5. Aplicaciones de los sistemas de comunicación FSO.....	38
2.5.6. Topologías empleadas para enlaces FSO.....	39

2.5.6.1. FSO en arquitectura anillo.....	39
2.5.6.2. FSO en arquitectura estrella.....	39
2.5.6.3. FSO en arquitectura malla.....	41
2.5.6.4. FSO en arquitectura PTP múltiple.....	42
2.5.7. Efectos atmosféricos sobre enlaces FSO.	42
2.5.7.1. FSO y niebla.....	43
2.5.7.2. FSO y centello.....	43
2.5.7.3. FSO e interferencia solar.....	44
2.5.8. FSO e interrupciones humanas no autorizadas.	44
2.5.8.1. Seguridad en sistemas FSO.....	44
2.5.8.2. Necesidad de un enlace ininterrumpido completo.....	45
2.5.8.3. Prevención de decodificación de señales de intrusos.....	45
CAPÍTULO 3: SIMULACIÓN Y RESULTADOS OBTENIDOS.....	46
3.1. OptiSystem 7.0.....	46
3.2. Índices de rendimiento.	47
3.2.1. Tasa de error de bit (BER).	47
3.2.2. Factor Q.....	49
3.2.3. Diagrama de ojo.	49
3.3. Diseño de diferentes configuraciones de enlace FSO en OptiSystem. .	50
3.3. Análisis de resultados.	54
CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	75
4.1. Conclusiones.....	75
4.2. Recomendaciones.	75
Bibliografía.....	76
Anexos.....	81

Índice de Figuras

Capítulo 2

Figura 2. 1: Incremento del producto BL durante a lo largo del tiempo.	9
Figura 2. 2: Sistema de comunicación óptico genérico.	10
Figura 2. 3: Estructura interna de una fibra monomodo.	11
Figura 2. 4: Dependencia de la longitud de onda de las pérdidas de potencia para una fibra de sílice de baja pérdida.	12
Figura 2. 5: Secuencia de bits digital 010110... codificado utilizando (a) formatos de retorno a cero (RZ) y (b) de no retorno a cero (NRZ).	13
Figura 2. 6: (a) Multiplexación por división en el tiempo de cinco canales de voz digitales que funcionan a 64 kb/s. (b) Multiplexación por división de longitud de onda de tres señales analógicas o digitales.	15
Figura 2. 7: Clasificación de los sistemas de comunicación ópticos inalámbricos.	17
Figura 2. 8: Aplicaciones de los WOC: (a) comunicación de chip a chip, (b) redes corporales inalámbricas, (c) comunicación de luz visible o IR interior, (d) comunicación entre edificios y (e) misiones en el espacio profundo.	19
Figura 2. 9: Enlace terrestre FSO.	21
Figura 2. 10: Aplicaciones de enlaces de comunicación.	22
Figura 2. 11: Representación esquemática de varios componentes para el enlace óptico de tierra a satélite.	24
Figura 2. 12: Diagrama esquemático de un modulador de fase.	28
Figura 2. 13: Modulador de fase LiNbO ₃ óptico integrado.	29
Figura 2. 14: Modulador de amplitud Mach-Zehnder.	29
Figura 2. 15: Comparación de la divergencia de haz óptico y RF desde Marte hacia la Tierra.	33
Figura 2. 16: Moduladores ópticos. (a) Modulador interno. (b) Modulador externo.	37
Figura 2. 17: Red FSO en arquitectura de anillo.	40
Figura 2. 18: FSO en arquitectura estrella.	41
Figura 2. 19: FSO en arquitectura malla.	42
Figura 2. 20: FSO en arquitectura PTP múltiple.	42

Capítulo 3

Figura 3. 1: Interfaz gráfica de trabajo de OptiSystem 7.0.	46
Figura 3. 2: Bloque transmisor de un sistema FSO.	51
Figura 3. 3: Canal de propagación de un sistema FSO.	51
Figura 3. 4: Bloque receptor de un sistema FSO.	52
Figura 3. 5: Modelo de diseño de un sistema FSO de 1TX/1RX.	52
Figura 3. 6: Modelo de diseño de un sistema FSO de 4TX/4RX.	53
Figura 3. 7: Modelo de diseño de un sistema FSO de 7TX/7RX.	53
Figura 3. 8: Modelo de diseño de un sistema FSO de 10TX/10RX.	54
Figura 3. 9: Diagrama de ojo y factor Q para 1TX/1RX con longitud de onda de 850nm y 0.43dB/Km a a) 1Km, b) 5Km, c) 10Km, d) 30Km y e) 50Km...	55
Figura 3. 10: Diagrama de ojo y factor Q para 1TX/1RX con longitud de onda de 850nm y 4.3dB/Km a a) 1Km, b) 5Km, c) 10Km, d) 30Km y e) 50Km.	57
Figura 3. 11: Diagrama de ojo y factor Q para 1TX/1RX con longitud de onda de 850nm y 43dB/Km a a) 1Km, b) 5Km, c) 10Km, d) 30Km y e) 50Km.	59
Figura 3. 12: Factor Q Vs. Atenuación de un sistema FSO de 1 transmisor y 1 receptor óptico.	61
Figura 3. 13: Diagrama de ojo y BER para 4TX/4RX con longitud de onda de 850nm y 0.43dB/Km a a) 1Km, b) 5Km, c) 10Km, d) 30Km y e) 50Km.	62
Figura 3. 14: Diagrama de ojo y BER para 4TX/4RX con longitud de onda de 850nm y 4.3dB/Km a a) 1Km, b) 5Km, c) 10Km, d) 30Km y e) 50Km.	64
Figura 3. 15: Diagrama de ojo y BER para 4TX/4RX con longitud de onda de 850nm y 43dB/Km a a) 1Km, b) 5Km, c) 10Km, d) 30Km y e) 50Km.	66
Figura 3. 16: Factor Q Vs. Atenuación de un sistema FSO de 4 transmisores y 4 receptores ópticos.	67
Figura 3. 17: Factor Q Vs. Atenuación de un sistema FSO de 7 transmisores y 7 receptores ópticos.	70
Figura 3. 18: Factor Q Vs. Atenuación de un sistema FSO de 10 transmisores y 10 receptores ópticos.	72
Figura 3. 19: Mejoramiento de la eficiencia de factor Q para la configuración 1TX/1R a 0.43 dB/Km.	73
Figura 3. 20: Costo Vs. Longitud de onda de trasmisores láser.	74

Índice de Tablas

Capítulo 2

Tabla 2. 1: Velocidad de Bits SONET/SDH	16
---	----

Capítulo 3

Tabla 3. 1: Resultados para diferentes parámetros dentro de la simulación de 1TX/1RX con una atenuación de 0.43dB/Km.	55
Tabla 3. 2: Resultados para diferentes parámetros dentro de la simulación de 1TX/1RX con una atenuación de 4.3dB/Km.	57
Tabla 3. 3: Resultados para diferentes parámetros dentro de la simulación de 1TX/1RX con una atenuación de 43dB/Km.	59
Tabla 3. 4: Resultados para diferentes parámetros dentro de la simulación de 4TX/4RX con una atenuación de 0.43dB/Km.	61
Tabla 3. 5: Resultados para diferentes parámetros dentro de la simulación de 4TX/4RX con una atenuación de 4.3dB/Km.	64
Tabla 3. 6: Resultados para diferentes parámetros dentro de la simulación de 4TX/4RX con una atenuación de 43dB/Km.	65
Tabla 3. 7: Resultados para diferentes parámetros dentro de la simulación de 7TX/7RX con una atenuación de 0.43dB/Km.	68
Tabla 3. 8: Resultados para diferentes parámetros dentro de la simulación de 7TX/7RX con una atenuación de 4.3dB/Km.	68
Tabla 3. 9: Resultados para diferentes parámetros dentro de la simulación de 7TX/7RX con una atenuación de 43dB/Km.	69
Tabla 3. 10: Resultados para diferentes parámetros dentro de la simulación de 10TX/10RX con una atenuación de 0.43dB/Km.	70
Tabla 3. 11: Resultados para diferentes parámetros dentro de la simulación de 10TX/10RX con una atenuación de 4.3dB/Km.	70
Tabla 3. 12: Resultados para diferentes parámetros dentro de la simulación de 10TX/10RX con una atenuación de 43dB/Km.	71

Resumen

Las diversas tecnologías de comunicación a través de enlaces ópticos inalámbricos pueden lograr velocidades de transmisión de datos en el orden de los Gbps, convirtiéndolas así en soluciones eficaces para zonas de difícil acceso o en donde la implementación de sistemas físicos de fibra óptica es muy compleja, tales como regiones campestres, terminales aéreos o territorios apartados. Es así como la tecnología FSO permite a los usuarios movilizarse sin perder conectividad dentro de la zona de cobertura, es de sencilla instalación y gestión y está libre de licencias de espectro, lo que reduce costos. La seguridad presente en esta tecnología dentro de la transferencia de información y la considerable inmunidad a interferencias y efectos de dispersión, son prerrogativas para tener en cuenta. En este trabajo se efectúa un análisis de la tecnología señalada previamente y se simulan diversos escenarios y configuraciones utilizando la aplicación OptiSystem 7.0. A través del presente estudio se evaluó el comportamiento del sistema mediante indicadores como la tasa de bits erróneos (BER), diagrama de ojo y el factor de calidad Q, lo que permitió comprobar el exitoso funcionamiento del enlace.

Palabras claves: FSO, SISTEMAS, COMUNICACIONES, FACTOR Q, BER, TRANSMISOR, RECEPTOR.

Abstract

Various communication technologies through wireless optical links can achieve data transmission speeds in the order of Gbps, making them effective solutions for areas of difficult access or where the implementation of physical fiber systems is very complex, such as country regions, airports or remote territories. This is how the FSO technology allows users to move without losing connectivity within the coverage area, is easy to install and manage and is free of spectrum licenses, which reduces costs. The security present in this technology within the transfer of information and the considerable immunity to interference and dispersion effects, are prerogatives to take into account. In this work an analysis of the previously mentioned technology is accomplished, and different scenarios and configurations are simulated using the OptiSystem. Within this study, the behavior of the system was evaluated through indicators such as the error bit rate (BER), eye diagram and Q factor (quality factor), which made it possible to verify the successful operation of the link.

Keywords: FSO, SYSTEMS, COMMUNICATIONS, Q FACTOR, BER, TRANSMITTER, RECEIVER.

CAPÍTULO 1: DESCRIPCIÓN GENERAL

1.1. Introducción.

La comunicación se ha convertido en una parte vital de nuestra rutina diaria. La comunicación significa transferir información de un lugar a otro a través de un medio. Se utilizan diferentes servicios para transmitir información como voz, video, texto, datos, etc. Hoy en día hay una gran demanda de estos servicios y también demandas de capacidad de transmisión. Así que, para la mayor velocidad de datos y gran ancho de banda, se ha utilizado la tecnología de luz.

La fibra óptica es esencial para la red mundial de banda ancha. Con un número cada vez mayor de usuarios, se necesita una red de ancho de banda amplia que también pueda proporcionar un bajo retraso en la transmisión. La fibra óptica proporciona un ancho de banda de transmisión enorme con una latencia insignificante. Por tanto ofrece numerosas ventajas, como interferencia electromagnética insignificante, alta velocidad de datos y baja huella de carbono, la fibra óptica se emplea para transportar grandes transmisiones de datos para la comunicación en tiempo real (Sood, Sharma, & C., 2018).

La comunicación óptica en espacio libre (FSO) se está estudiando como una alternativa adecuada para la comunicación por fibra óptica, especialmente debido a su facilidad de despliegue donde la instalación de fibra no es factible. Recientemente, es un área de investigación activa debido a sus ventajas como altas tasas de transmisión, operación sin licencia, sistema full dúplex y alta seguridad de transmisión (Saruchi Attri, Charu Narula, & Sanjiv Kumar, 2017). Últimamente, FSO está siendo investigado para aplicaciones de transferencia de datos de alta velocidad que comprenden enlaces entre plataformas fijas y móviles que se encuentran adecuadas para el acceso de la última milla, enlace de respaldo de fibra óptica, enlace de comunicación celular, enlaces temporales, terrenos difíciles, televisión de alta definición y red de comunicación de multi-campus (Ritu Gupta & Preeti Singh, 2017).

1.2. Antecedentes.

Inicialmente, la atención en FSO fue impulsada por propósitos militares para aplicaciones de defensa. Pero el interés de mercado de hoy en FSO se refiere a aplicaciones civiles también debido a las tasas de datos más altas en términos de Gbps. Debido a estas características, FSO tiene el increíble potencial de proporcionar un enlace de comunicación completo (Ritu Gupta & Preeti Singh, 2017).

A medida que se hacen nuevos avances en dispositivos ópticos y de comunicación, se ha renovado el interés en analizar y mejorar los enlaces ópticos inalámbricos y adoptar la tecnología FSO para redes de acceso inalámbricas. Recientemente, resultados experimentales exitosos demostraron la viabilidad en comunicaciones a través de FSO. Según Keun Son & Shiwen Mao en su artículo de 2016 "A survey of free optical networks" investigadores del Centro Aeroespacial Alemán demostraron transmisiones de datos por FSO a 1,72 Tbps a una distancia de 10,45 km en noviembre de 2016. La red FSO podría convertirse en un candidato viable para su uso en redes inalámbricas de banda ancha de la próxima generación (Son & Mao, 2017).

En la actualidad, la comunicación óptica en espacio libre (FSO) se ha convertido en una alternativa inalámbrica viable y de gran ancho de banda al cableado de fibra óptica. La comunicación óptica en el espacio libre ha recibido mucha atención en los últimos años como una técnica de acceso de ancho de banda extenso, rentable y sin costo para aplicaciones de alta velocidad de datos. Los canales en los sistemas FSO tienen un ancho de banda más amplio y, por lo tanto, pueden admitir más usuarios en comparación con sus homólogos de radiofrecuencia (RF). A través de técnicas de transmisión, los transceptores ópticos FSO para exteriores también pueden cubrir grandes distancias (Yang Zhang, Youngil Park, ByungYeon Kim, & KiDoo Kim, 2013).

Las comunicaciones inalámbricas, en especial FSO, tienen propiedades beneficiosas que no se encuentran en las comunicaciones por

cable, como el menor costo de implementación debido a la falta tender cables, la facilidad de construcción de la topología de red, el mantenimiento flexible de las redes operativas, etc. Las comunicaciones inalámbricas también permiten a los usuarios de dispositivos móviles acceder a internet en cualquier momento y en muchos lugares (Son & Mao, 2017).

1.3. Definición del Problema.

Necesidad de diseñar sistemas de comunicación óptica por el espacio libre usando múltiples transmisores/receptores sobre la plataforma OptiSystem para la evaluación de su desempeño basándose en diversos indicadores de calidad.

1.4. Justificación del Problema.

La creciente demanda de alto ancho de banda en las redes metropolitanas, y la búsqueda por parte de los proveedores de servicios de una amplia gama de aplicaciones, incluida la extensión de la red metropolitana, la conectividad de LAN a LAN empresarial y la red de retorno inalámbrica, ha creado un desequilibrio pues, los proveedores de servicios se enfrentan a la necesidad de brindar servicios de manera rápida y rentable en un momento en que los gastos de capital están limitados. Este desequilibrio a menudo se conoce como el "cuello de botella de conectividad".

El cuello de botella de conectividad está en todas partes en las redes metropolitanas. Desde el punto de vista de la tecnología, hay varias opciones para abordar este "cuello de botella", pero dentro de la mayoría de las alternativas el aspecto económico las imposibilita. En primer lugar, la opción más obvia es el cable de fibra óptica, un medio confiable para proporcionar comunicaciones ópticas, pero la excavación, los retrasos y los costos asociados a la colocación de la fibra a menudo la hacen económicamente inapropiada. La segunda opción es la radiofrecuencia (RF), una tecnología madura que ofrece rangos más amplios que FSO, pero las redes basadas en RF requieren inmensas inversiones de capital para adquirir una licencia de espectro. Las tecnologías de RF no pueden escalar y

el ancho de banda es limitado. La tercera alternativa son las tecnologías basadas en cobre (es decir, cable módem, DSL, etc.). Aunque la infraestructura de cobre está disponible en casi todas partes y el porcentaje de edificios conectados al cobre es mucho más alto que el de la fibra, todavía no es una alternativa viable para resolver el cuello de botella. El mayor obstáculo es la escalabilidad de ancho de banda. Las tecnologías de cobre pueden aliviar los inconvenientes a corto plazo, pero las limitaciones de ancho de banda las convierten en una solución marginal, incluso en un buen día.

En cuarto y último lugar, la alternativa más viable es FSO. La tecnología facilita una solución óptima, la escalabilidad de ancho de banda, la velocidad de implementación (horas en lugar de semanas o meses), la implementación y la portabilidad, la rentabilidad (en promedio, una quinta parte del costo de instalación del cable de fibra óptica).

1.5. Objetivos del Problema de Investigación.

1.5.1. Objetivo General.

Diseñar sistemas de comunicación óptica por el espacio libre usando múltiples transmisores/receptores mediante OptiSystem.

1.5.2. Objetivos Específicos.

- Diseñar diferentes configuraciones de simulación para sistemas de comunicación óptica por el espacio libre de 1, 4, 7 y 10 transmisores y receptores.
- Simular sistemas FSO usando múltiples transmisores/receptores sobre la plataforma OptiSystem.
- Evaluar el desempeño de la tasa de bits erróneos y factor de calidad ante diversos valores de atenuación y distancias de propagación.

1.6. Hipótesis.

El diseño y simulación de sistemas de comunicación óptica por el espacio libre mediante la aplicación OptiSystem, herramienta fundamental para la evaluación de estos sistemas en una amplia variedad de situaciones

reales e ideales, además favorece en la colaboración para investigaciones futuras.

1.7. Metodología de Investigación.

Este trabajo de titulación tiene un carácter explicativo, porque trata de encontrar la razón de los hechos, en este caso de la Comunicación Óptica por el Espacio Libre (FSO), estableciendo las relaciones de causa y efecto. Se determinaron las causas (investigación ex post facto) y los efectos con la comprobación de la hipótesis establecida. Se emplea una investigación explicativa dando a conocer su valor a través de una investigación documental que permita el estudio del conocimiento acumulado.

En términos de metodología de investigación, este trabajo recae sobre el paradigma Empírico-Analítico y presenta una perspectiva cuantitativa por tanto el simulador OptiSystem muestra una serie de indicadores e índices de calidad, parámetros significativos y necesarios para determinar la eficiencia y disponibilidad de FSO.

CAPÍTULO 2: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1. La fibra óptica.

Las fibras ópticas estaban disponibles durante la década de 1960 y se usaban para hacer gastroscopios (instrumento médico para observar y examinar el interior del estómago) y otros dispositivos que requerían solo una corta longitud de la fibra (Hecht, 2013). Sin embargo, nadie se tomaba en serio el uso de ellos para la comunicación óptica. El principal problema fue que las fibras ópticas disponibles durante la década de 1960 tenían pérdidas tan altas que solo el 10% de la luz que entraba por un extremo, emergía del otro extremo de una fibra que solo tenía unos pocos metros de largo.

La mayoría de los ingenieros la ignoraban para aplicaciones de telecomunicaciones donde la luz tenía que ser transportada durante al menos unos pocos kilómetros. En 1966 se sugirió que las pérdidas de fibras ópticas podrían reducirse drásticamente al eliminar las impurezas del vidrio de sílice utilizado para fabricarlas, y que dichas fibras de bajas pérdidas podrían ser la mejor opción para la comunicación óptica (Kao & Hockham, 2014). De hecho, a Charles Kao se le otorgó la mitad del premio noble de 2009 por sus logros innovadores en cuanto a la transmisión de luz en fibras para comunicación óptica (Nobel Media, 2009). La idea de utilizar fibras de vidrio para la comunicación óptica fue revolucionaria, ya que las fibras son capaces de guiar la luz de manera similar al confinamiento de electrones dentro de los cables de cobre. Como resultado, se pueden usar de la misma manera que los cables eléctricos se usan habitualmente.

Sin embargo, antes de que las fibras ópticas pudieran usarse para la comunicación óptica, sus pérdidas debían reducirse a un nivel aceptable. Corning, una empresa estadounidense ubicada cerca de Rochester, Nueva York, asumió este desafío. Un gran avance ocurrió en 1970 cuando tres científicos de Corning publicaron un documento que indicaba que podían reducir las pérdidas de fibra a menos de 20 dB/Km en la región de longitud de onda cerca de 630 nm (Kapron, Keck, & Maurer, 2014). Dos años más

tarde, el mismo equipo de Corning produjo una fibra con una pérdida de solo 4 dB/Km al reemplazar el titanio con el germanio como dopante dentro del núcleo de sílice de la fibra. Poco después, muchos laboratorios industriales entraron en la carrera por reducir aún más las pérdidas de fibra. La carrera fue ganada en 1979 por un grupo japonés que logró reducir la pérdida de una fibra óptica a cerca de 0.2 dB/Km en la región de longitud de onda infrarroja cercana a 1.55 μm (Miya, Terunuma, Hosaka, & Miyashita, 2013). Este valor estaba cerca del límite fundamental establecido por el fenómeno de dispersión de Rayleigh. Incluso las fibras modernas muestran valores de pérdida similares a los reportados por primera vez en 1979.

Además de las fibras ópticas de baja pérdida, el cambio de microondas a ondas ópticas también requería un láser compacto y eficiente, cuya salida podría modularse para imponer la información que se necesitaba transmitir sobre dichas fibras. El mejor tipo de láser para este propósito fue el láser semiconductor. Afortunadamente, casi al mismo tiempo que Corning anunció su fibra de baja pérdida en 1970, los láseres semiconductores de GaAs, que operan continuamente a temperatura ambiente, fueron demostrados por dos grupos que trabajaban en Rusia y en los Laboratorios Bell. (Alferov, 2014) La disponibilidad simultánea de fuentes ópticas compactas y fibras ópticas de baja pérdida condujo a un esfuerzo mundial para desarrollar sistemas de comunicación de fibra óptica (Snyder, 2000).

Los sistemas de primera generación fueron diseñados para funcionar a una velocidad de bits de 45 Mbps en la región espectral cercana al infrarrojo porque los láseres semiconductores de GaAs se utilizan para hacer que emitan luz a longitudes de onda cercanas a 850 nm. Dado que la pérdida de fibra en esa longitud de onda era cercana a 3 dB/Km, la señal óptica debía regenerarse cada 10 Km aproximadamente utilizando los llamados repetidores. Esto puede parecer una limitación importante, pero era mejor que la tecnología de cable coaxial que prevalecía y que requería una regeneración en cada kilómetro. El desarrollo extensivo de laboratorio pronto llevó a varias pruebas de campo exitosas. AT&T envió sus primeras señales de prueba el 1 de abril de 1977 en el distrito Loop de Chicago. Tres semanas

después, General Telephone and Electronics envió tráfico telefónico en vivo a 6 Mbps en Long Beach, California. Fue seguido por la oficina de correos británica que comenzó a enviar tráfico telefónico en vivo a través de las fibras cerca de Martlesham Heath, Reino Unido. Estos ensayos fueron seguidos con un mayor desarrollo, y los sistemas comerciales comenzaron a instalarse en 1980. La nueva era de los sistemas de comunicación por fibra óptica finalmente había llegado. Aunque no se realizó en ese momento, estaba preparado para revolucionar la forma en que los humanos vivían e interactuaban. Esto se hizo evidente solo después de la llegada de internet durante la década de los noventa (Agrawal, 2016).

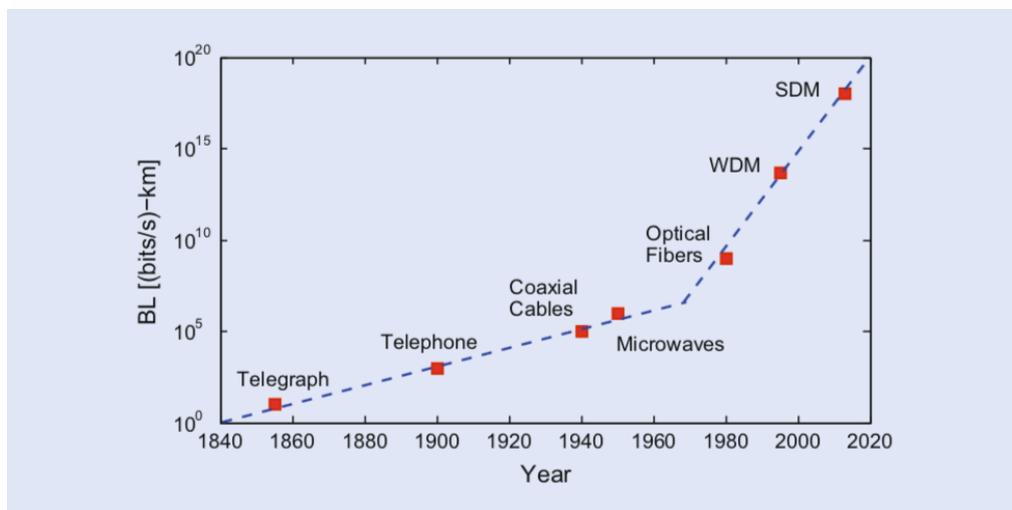


Figura 2. 1: Incremento del producto B·L durante a lo largo del tiempo.
Fuente: (Agrawal, 2016)

Una cifra de mérito utilizada comúnmente para los sistemas de comunicación es la tasa de bits - distancia del producto B·L, donde B es la tasa de bits y L es el espaciado del repetidor, la distancia después de la cual se debe regenerar una señal óptica para mantener su fidelidad. La figura 2.1 muestra cómo el producto B·L ha aumentado en un factor de 10^{18} a través de los avances tecnológicos durante los últimos 180 años. El acrónimo WDM en esta figura significa multiplexación por división de longitud de onda, una técnica utilizada después de 1992 para transmitir múltiples canales en diferentes longitudes de onda a través de la misma fibra. Su uso mejoró la capacidad de los sistemas de comunicación de fibra óptica de manera tan espectacular que la transmisión de datos a 1 Tbps se realizó en 1996. El acrónimo SDM significa multiplexación por división de espacio, una técnica

utilizada después de 2010 para mejorar aún más la capacidad de los sistemas de fibra óptica en respuesta al aumento continuo en el tráfico de datos de internet (con la llegada de la transmisión de video por parte de compañías como YouTube y Netflix) y las limitaciones de capacidad fundamentales de las fibras de monomodo (Agrawal, 2016).

2.2. Conceptos básicos detrás de la comunicación óptica.

Antes de describir las tecnologías utilizadas para avanzar en el estado del arte de los sistemas de comunicación de fibra óptica, es útil observar el diagrama de bloques de un sistema de comunicación genérico en la figura 2.2. Este sistema genérico consiste en un transmisor óptico y un receptor óptico conectados a los dos extremos de un canal de comunicación que puede ser un cable coaxial (o simplemente aire) para los sistemas de comunicación eléctrica, pero toma la forma de una fibra óptica para todos los sistemas de comunicación de fibra óptica (Agrawal, 2016).



Figura 2. 2: Sistema de comunicación óptico genérico.

Fuente: (Agrawal, 2016)

2.2.1. Fibras y cables ópticos.

La mayoría de las personas tienen el conocimiento que al escuchar radio o ver televisión, las ondas electromagnéticas se transmiten a través del aire. Sin embargo, los sistemas de comunicación óptica requieren ondas electromagnéticas cuyas frecuencias se encuentran en la región visible o cercana a la infrarroja. Aunque estas ondas pueden propagarse a través del aire en distancias cortas y en buenas condiciones climáticas, este enfoque no es adecuado para hacer que las redes de comunicación óptica abarquen todo el mundo. Las fibras ópticas resuelven este problema y transmiten luz a largas distancias, independientemente de las condiciones climáticas, al limitar la onda óptica a la proximidad de un núcleo de vidrio cilíndrico microscópico a través de un fenómeno conocido como reflexión interna total (Agrawal, 2016).

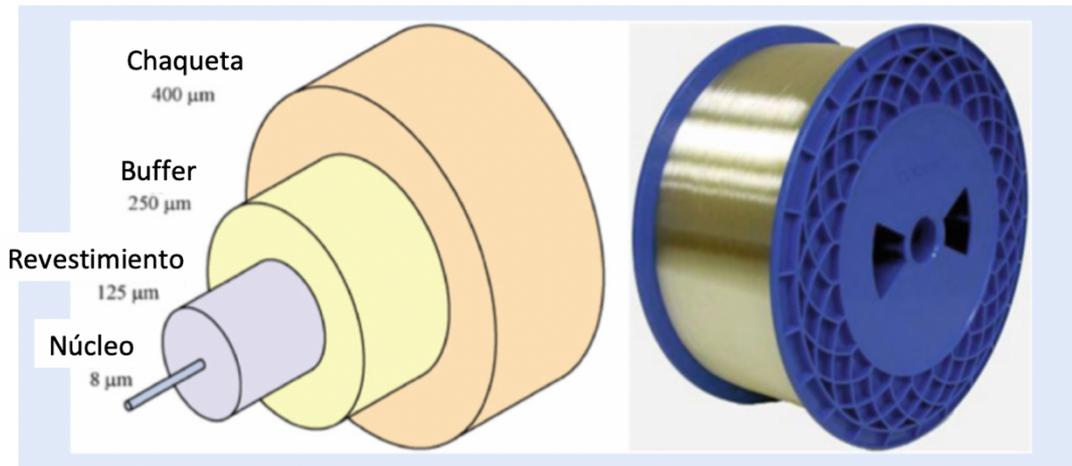


Figura 2. 3: Estructura interna de una fibra monomodo.
Fuente: (Agrawal, 2016)

La figura 2.3 muestra la estructura de una fibra óptica diseñada para soportar un modo espacial único al reducir su diámetro central por debajo de $10\ \mu\text{m}$. En el caso de una fibra multimodo de índice graduado, el diámetro del núcleo es típicamente de $50\ \mu\text{m}$. El núcleo está hecho de vidrio de sílice y está dopado con germania para mejorar su índice de refracción ligeramente (alrededor de un 0,5%) en comparación con el revestimiento circundante que también está hecho de vidrio de sílice. Se agrega una capa intermedia sobre el revestimiento antes de colocar una chaqueta de plástico. El diámetro exterior de toda la estructura, solo una fracción de milímetro es tan pequeño que la fibra es apenas visible. Antes de que se pueda utilizar para transmitir información, una o más fibras ópticas se encuentran dentro de un cable cuyo diámetro puede variar de 1 a 20 mm, según la aplicación prevista.

¿Qué sucede con una señal óptica transmitida a través de una fibra óptica? Idealmente, no debería ser modificado por la fibra en absoluto. En la práctica, se debilita debido a pérdidas inevitables y se distorsiona a través de fenómenos como la dispersión cromática y la no linealidad de Kerr (Agrawal, 2013). Como se mencionó anteriormente, las pérdidas fueron el factor limitante hasta 1970 cuando se produjo por primera vez una fibra con pérdidas manejables (Kapron et al., 2014). La figura 2.4 muestra la dependencia de la longitud de onda de las pérdidas de potencia medidas

para dicha fibra (Miya et al., 2013). Múltiples picos en la curva experimental se deben a la presencia de vapores de agua residuales. La línea discontinua, marcada dispersión de Rayleigh, indica que, junto con los vapores de agua, la mayor parte de la pérdida puede atribuirse al fenómeno fundamental de la dispersión de Rayleigh, el mismo responsable del color azul de nuestro cielo. De hecho, aunque los picos de agua casi han desaparecido en las fibras modernas, sus pérdidas no han cambiado mucho, ya que aún están limitadas por este fenómeno.

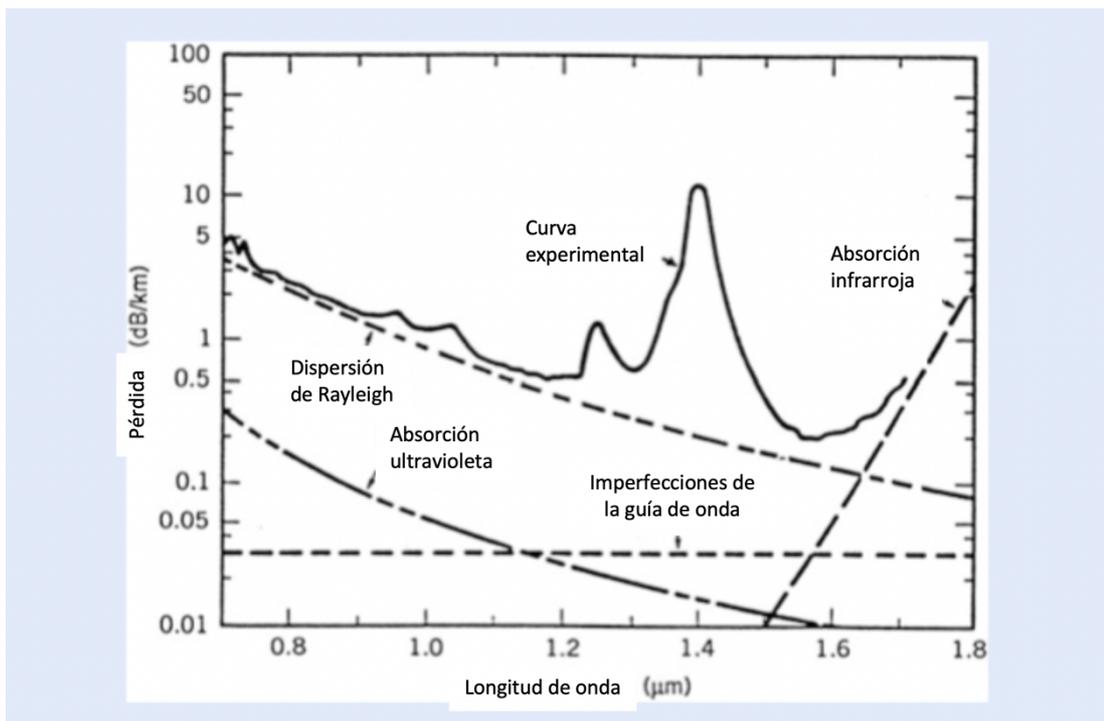


Figura 2. 4: Dependencia de la longitud de onda de las pérdidas de potencia para una fibra de sílice de baja pérdida.

Fuente: (Miya, Terunuma, Hosaka, & Miyashita, 2013)

2.2.2. Formato de modulaciones.

El primer paso en el diseño de cualquier sistema de comunicación óptica es decidir cómo se convertirían los datos binarios eléctricos en un flujo de bits óptico. Como se mencionó anteriormente, se utiliza un modulador electro-óptico para este propósito. La técnica más simple emplea pulsos ópticos de modo que la presencia de un pulso en el intervalo de tiempo de un bit corresponde a 1, y su ausencia indica un bit 0. Esto se conoce como codificación on-off ya que la señal óptica está "off" o "on" dependiendo de si se está transmitiendo un 0 o 1 bit.

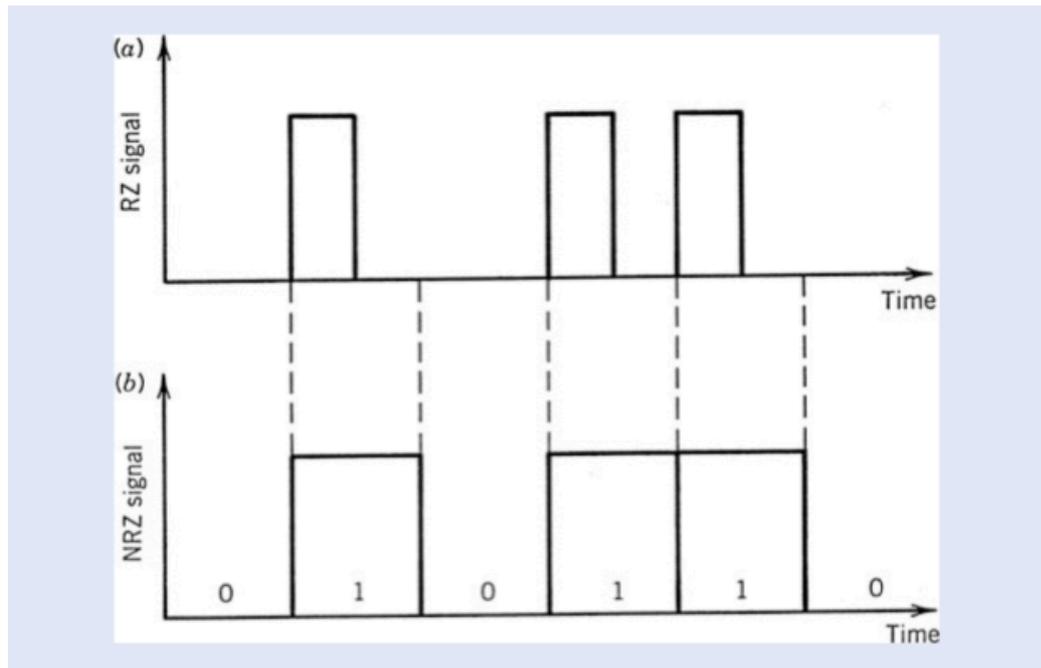


Figura 2. 5: Secuencia de bits digital 010110... codificado utilizando (a) formatos de retorno a cero (RZ) y (b) de no retorno a cero (NRZ).

Fuente: (Agrawal, 2016)

Todavía hay dos opciones para el formato del flujo de bits óptico resultante. Estos se muestran en la figura 2.5 y se conocen como formatos de retorno a cero (RZ) y no retorno a cero (NRZ). En el formato RZ, cada pulso óptico que representa el bit 1 es más corto que la ranura de bit, y su amplitud vuelve a cero antes de que finalice la duración del bit. En el formato NRZ, el pulso óptico permanece activado en toda la ranura de bits, y su amplitud no cae a cero entre dos o más 1 bits sucesivos. Como resultado, el ancho temporal de los pulsos varía según el patrón de bits, mientras que sigue siendo el mismo en el caso del formato RZ. Una ventaja del formato NRZ es que el ancho de banda asociado con el flujo de bits es más pequeño en un factor de 2 simplemente porque las transiciones de encendido y apagado ocurren menos veces. Los sistemas de comunicación eléctrica emplearon el formato NRZ por esta razón en vista de su ancho de banda limitado. El ancho de banda de los sistemas de comunicación óptica es lo suficientemente grande como para que el formato RZ se pueda utilizar sin mucha preocupación. Sin embargo, el formato NRZ fue empleado inicialmente. El cambio al formato RZ se realizó solo después de 1999, cuando se descubrió que su uso ayuda a diseñar sistemas de ondas de luz

de alta capacidad. En este momento, el formato RZ se usa casi exclusivamente para sistemas WDM cuyos canales individuales están diseñados para operar a velocidades de bits superiores a 10 Gbps (Agrawal, 2016).

2.2.3. Multiplexación de canal.

Antes de la llegada de Internet, los teléfonos se usaban con mayor frecuencia para comunicar información. Cuando se digitaliza una señal eléctrica analógica que representa la voz humana, la señal digital resultante contiene 64,000 bits en cada segundo de duración. La velocidad de bits de tal flujo de bits óptico es claramente de 64 Kbps. Dado que los sistemas de comunicación de fibra óptica son capaces de transmitir a velocidades de hasta 40 Gbps, sería una gran pérdida de ancho de banda si se enviara una sola llamada telefónica a través de una fibra óptica. Para utilizar completamente la capacidad del sistema, es necesario transmitir muchos canales de voz simultáneamente a través de multiplexación. Esto se puede lograr a través de multiplexación por división de tiempo (TDM) o WDM. En el caso de TDM, los bits asociados con diferentes canales se entrelazan en el dominio del tiempo para formar un flujo de bits compuesto. Por ejemplo, la ranura de bits es de aproximadamente 15 μ s para un solo canal de voz que funciona a 64 Kbps. Cinco de estos canales se pueden multiplexar a través de TDM si los flujos de bits de canales sucesivos se retrasan en 3 μ s. La figura 2.6a muestra el flujo de bits resultante de forma esquemática a una velocidad de bits compuesta de 320 Kbps. En el caso de WDM, los canales están separados en el dominio de la frecuencia. Cada canal es transportado por su propia onda portadora. Las frecuencias portadoras están espaciadas más que el ancho de banda del canal para que los espectros de este no se superpongan, como se ve en la figura 2.6b. WDM es adecuado tanto para señales analógicas como digitales y se utiliza en la transmisión de canales de radio y televisión. TDM se implementa fácilmente para señales digitales y se usa comúnmente para redes de telecomunicaciones (Agrawal, 2013).

El concepto de TDM se ha utilizado para formar jerarquías digitales. En América del Norte y Japón, el primer nivel corresponde a la multiplexación

de 24 canales de voz con una tasa de bits compuesta de 1.544 Mbps (jerarquía DS-1), mientras que en Europa se multiplexan 30 canales de voz, lo que da como resultado una tasa de bits compuesta de 2.048 Mbps. La tasa de bits de la señal multiplexada es ligeramente mayor que el producto simple de 64 Kbps con el número de canales debido a los bits de control adicionales que se agregan para separar los canales en el extremo del receptor. La jerarquía de segundo nivel se obtiene multiplexando cuatro canales DS-1. Esto resulta en una tasa de bits de 6.312 Mbps (jerarquía DS-2) para América del Norte y 8.448 Mbps para Europa. Se continúa este procedimiento para obtener jerarquías de nivel superior (Agrawal, 2016).

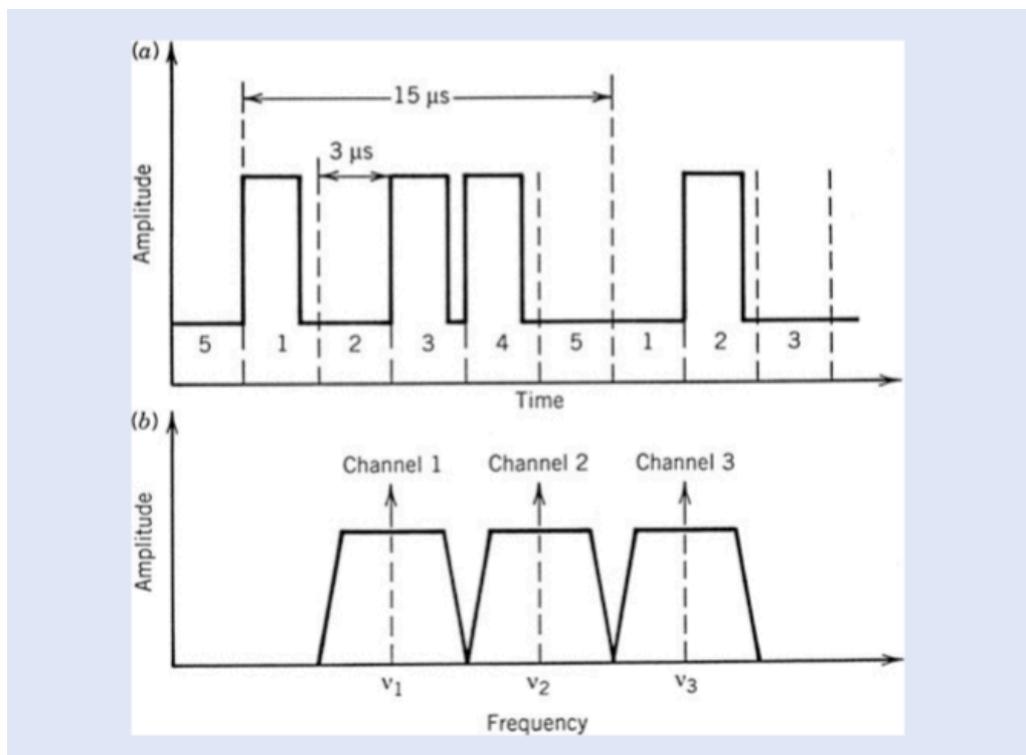


Figura 2. 6: (a) Multiplexación por división en el tiempo de cinco canales de voz digitales que funcionan a 64 Kbps. (b) Multiplexación por división de longitud de onda de tres señales analógicas o digitales.

Fuente: (Agrawal, 2013)

La falta de un estándar internacional en la industria de las telecomunicaciones durante la década de 1980 condujo a la aparición de un nuevo estándar, primero denominado red óptica síncrona (SONET) y luego jerarquía digital síncrona (SDH). Define una estructura de trama síncrona para transmitir señales digitales TDM. El componente básico del SONET tiene una tasa de bits de 51.84 Mbps. La señal óptica correspondiente se

denomina OC-1, donde OC significa portadora óptica. El bloque de construcción básico de la SDH tiene una velocidad de bits de 155.52 Mbps y se conoce como STM-1, donde STM significa módulo de transporte síncrono. Una característica útil de SONET y SDH es que los niveles más altos tienen una velocidad de bits que es un múltiplo exacto de la velocidad de bits básica. La tabla 1 enumera la correspondencia entre las tasas de bits de SONET y SDH para varios niveles. Los sistemas comerciales STM-256 (OC-768) que operan cerca de 40 Gbps se pusieron a disposición en 2002. Uno de estos canales ópticos transmite más de medio millón de conversaciones telefónicas a través de una sola fibra óptica. Si la técnica WDM se emplea para transmitir 100 canales a diferentes longitudes de onda, una fibra puede transportar más de 50 millones de conversaciones telefónicas al mismo tiempo (Agrawal, 2016).

Tabla 2. 1: Velocidad de Bits SONET/SDH

SONET	SDH	B (Mb/s)	Channels
OC-1		51.84	672
OC-3	STM-1	155.52	2016
OC-12	STM-4	622.08	8064
OC-48	STM-16	2488.32	32,256
OC-192	STM-64	9953.28	129,024
OC-768	STM-256	39,813.12	516,096

Fuente: (Agrawal, 2016)

2.3. Sistemas de comunicación ópticos inalámbricos.

La Comunicación Óptica Inalámbrica (WOC) se considera la próxima frontera para la conexión de banda ancha de alta velocidad debido a sus características únicas: ancho de banda extremadamente alto, facilidad de despliegue, asignación de ancho de banda libre de tarifas, baja potencia (~1/2 de los sistemas RF), menos masa (~1/2 de los sistemas RF), tamaño pequeño (~1/10 el diámetro de la antena de RF) y seguridad de canal mejorada. Ha surgido una buena alternativa comercial a la comunicación de radiofrecuencia existente, ya que soporta mayores velocidades de datos y proporciona una alta ganancia debido a su divergencia de haz estrecho. Es

capaz de transmitir datos de hasta 10 Gbps y comunicaciones de voz y video a través de la atmósfera/espacio libre. WOC tiene dos categorías amplias, comunicaciones ópticas inalámbricas interiores y exteriores. WOC en interiores se clasifica en cuatro configuraciones de sistemas genéricos, línea de visión dirigida (LOS), LOS no dirigido, difuso y casi difuso. La comunicación óptica inalámbrica al aire libre también se denomina comunicación óptica en espacio libre (FSO). Los sistemas de comunicación FSO también se clasifican en sistemas terrestres y espaciales. La figura 2.7 muestra la clasificación de los sistemas WOC (Kaushal, Jain, & Kar, 2017b).

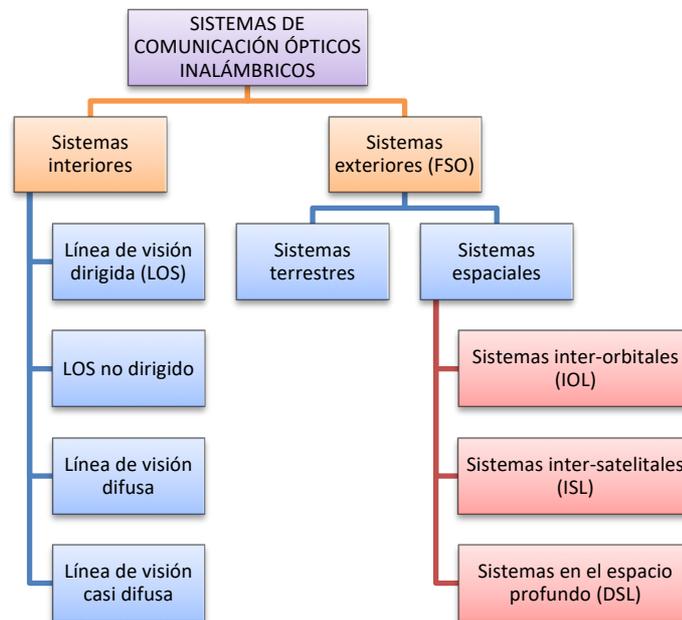


Figura 2. 7: Clasificación de los sistemas de comunicación óptica inalámbricos.
Fuente: (Kaushal, Jain, & Kar, 2017b)

En los últimos años, se ha observado una expansión masiva en la tecnología WOC debido a los enormes avances en componentes optoelectrónicos y al monumental crecimiento en el mercado que ofrece dispositivos ópticos inalámbricos. Parece ser una de las tecnologías prometedoras para abordar el problema de los enormes requisitos de ancho de banda y el "cuello de botella de la última milla o conectividad". Hay muchas aplicaciones comerciales de la tecnología WOC que incluyen tierra a LEO (órbita terrestre baja), LEO a GEO (órbita geoestacionaria)/LEO a tierra, GEO a tierra, LEO/GEO a aeronave, sondas de espacio profundo, estaciones terrestres, vehículos aéreos no tripulados (UAV), plataformas de gran altitud (HAP), etc. (Kazemlou, Hranilovic, & Kumar, 2013). También

encuentra aplicaciones en el área de la detección remota, la radioastronomía, la comunicación por radio espacial, el ejército, etc. Cuando la tecnología WOC se utiliza en distancias muy cortas, se denomina interconexiones FSO (FSOI) y encuentra aplicaciones en interconexiones chip a chip o placa a placa. FSOI ha ganado popularidad actualmente pues potencialmente aborda los requisitos de comunicación complejos en dispositivos optoelectrónicos.

Esta tecnología ofrece la posibilidad de crear redes de interconexión con mayor velocidad, menor disipación de potencia y paquetes más compactos de lo que es posible con la tecnología de integración electrónica a gran escala (VLSI). Sin embargo, el costo de los dispositivos optoelectrónicos, su integración y el embalaje en general hacen que FSOI sea un asunto costoso. Se ha demostrado experimentalmente un rendimiento de hasta 1 Tbps por placa de circuito impreso (PCB) (Yamamoto, 1998) utilizando 1000 canales por PCB con una matriz de haz óptico de 1 mm a 1 Gbps por canal. Según su rango de transmisión, WOC se puede clasificar en cinco amplias categorías (Figura 2.8):

- **WOC de rango ultracorto:** se utiliza en la comunicación de chip a chip.
- **WOC de corto alcance:** se utiliza en redes corporales inalámbricas (WBAN) o redes de área personal inalámbricas (WPAN).
- **WOC de medio alcance:** se utiliza en la comunicación de luz visible (VLC), o de infrarrojos (IR) en interiores, para redes inalámbricas de área local (WLAN) y comunicaciones entre vehículo a vehículo o vehículo a infraestructura.
- **WOC de largo alcance:** se utiliza en la comunicación terrestre entre dos edificios o extensiones de área metropolitana.
-
- **WOC de alcance ultra largo:** se utiliza en enlaces tierra a satélite/satélite a tierra, entre satélites o en misiones en el espacio (Kaushal et al., 2017b).

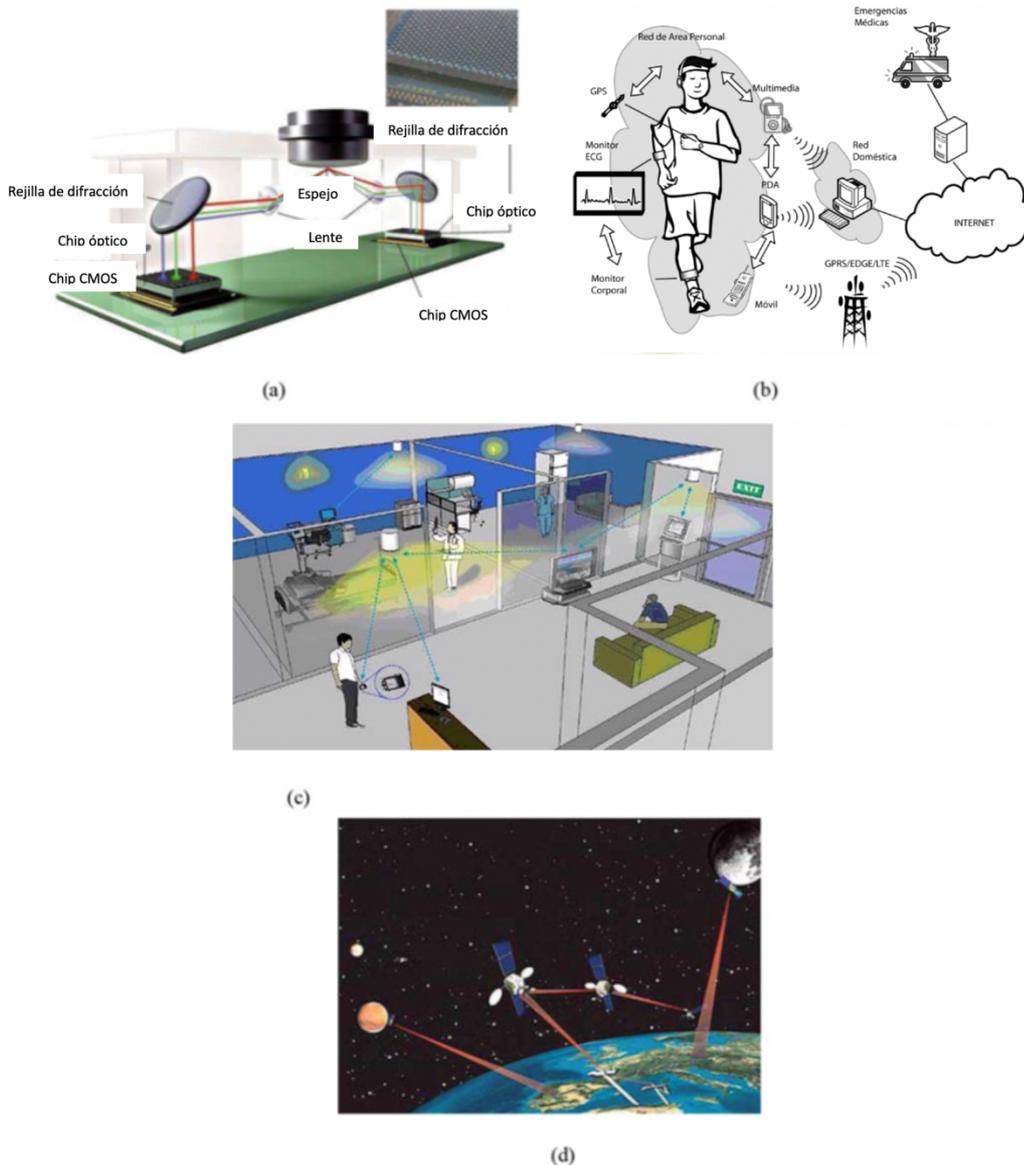


Figura 2. 8: Aplicaciones de los WOC: (a) comunicación de chip a chip, (b) redes corporales inalámbricas, (c) comunicación de luz visible o IR interior y (d) misiones en el espacio profundo.

Fuente: (Dsouza, 2016), (Savage, 2002)

2.4. Historia de la comunicación óptica en espacio libre.

El primer experimento de transmisión de señales a través de la atmósfera fue realizado por Alexander Graham Bell en 1880. Utilizó la luz solar como portador para transmitir señales de voz a una distancia de unos pocos pies. Sin embargo, el experimento no tuvo éxito debido a la naturaleza inconsistente de la portadora. Más tarde, en la década de 1960, Theodore H. Maiman descubrió el primer láser en funcionamiento en los Laboratorios de Investigación Hughes, Malibu, California. Desde este punto en adelante, la

fortuna de FSO cambió. Se llevaron a cabo varios experimentos en laboratorios militares y espaciales para demostrar enlaces FSO (Kaushal et al., 2017b).

En la década de 1970, la Fuerza Aérea patrocinó un programa conocido como Sistema de Prueba de Vuelo Espacial (SFTS) para establecer un enlace satelital a tierra en la estación terrestre de la Fuerza Aérea, Nuevo México. El programa fue posteriormente renombrado como Airborne Flight Test System. Este programa logró su primer éxito en la década de 1980, donde se demostró una tasa de datos de 1 Gbps desde el avión hasta la estación de tierra. Después de esto, se registraron una serie de avances durante los años 80 y 90, incluyendo el subsistema de enlace cruzado láser (LCS), el sistema de seguimiento y vigilancia aumentada (BSTS), el sistema de alerta temprana de seguimiento (BSTS) y muchos más (Andrews & Phillips, 2014).

Un enlace full dúplex de tierra a espacio conocido como Demostración de Comunicación por Láser de tierra/órbita se estableció por primera vez en 1995–1996 por la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) junto con el Jet Propulsion Laboratory (JPL). Además de esto, se llevaron a cabo varias demostraciones para misiones en el espacio profundo y entre satélites, como la Demostración de Comunicación Láser de Marte (MLCD) y el Experimento de Enlace entre Satélites Espaciales (SILEX), respectivamente (Andrews & Phillips, 2014).

Se están llevando a cabo desarrollos a gran escala por la NASA en Estados Unidos, la Organización de Investigación Espacial de la India (ISRO), la Agencia Espacial Europea (ESA) en Europa y la Agencia Nacional de Desarrollo Espacial (NSDA) en Japón. Las demostraciones han establecido un enlace FSO full dúplex con altas velocidades de datos entre varias estaciones espaciales y terrestres, entre satélites, etc., con mayor confiabilidad y 99,999% de disponibilidad. Además del enlace ascendente/descendente de FSO, se realizan investigaciones exhaustivas para enlaces terrestres de FSO, es decir, el enlace entre dos edificios para

establecer un segmento de red de área local que proporcionará conectividad de última milla a los usuarios (Figura 2.9) (Kaushal et al., 2017b).

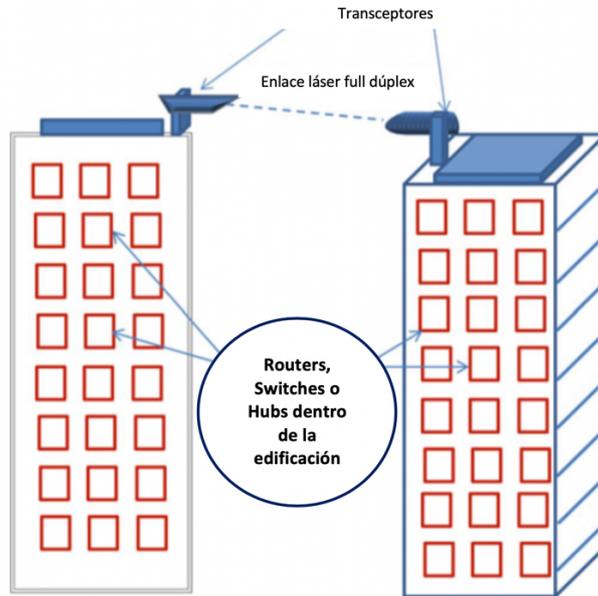


Figura 2. 9: Enlace terrestre FSO.
Fuente: (Kaushal, Jain, & Kar, 2017b)

La comunicación de FSO es muy adecuada para áreas urbanas densamente pobladas donde la excavación de carreteras es engorrosa. Los enlaces FSO terrestres se pueden utilizar para distancias cortas o largas. Los enlaces de corto alcance proporcionan conectividad de alta velocidad a los usuarios finales al interconectar segmentos de la red de área local que se encuentran en edificios separados dentro del campus o en diferentes edificios de la empresa. Los enlaces de comunicación FSO de largo alcance se extienden hasta los anillos de fibra existentes del área metropolitana o para conectar nuevas redes. Estos enlaces no llegan al usuario final, pero extienden sus servicios a la infraestructura central.

El sistema de comunicación FSO también se puede implementar dentro de un edificio, denominándose un sistema de comunicación óptica inalámbrica en interiores (WOC). Este sistema WOC para interiores de corto alcance es una tecnología futurista y actualmente está ganando atención con el avance de la tecnología que involucra dispositivos portátiles, por ejemplo, laptops, asistentes personales digitales, smartphones, etc. (Kaushal et al., 2017b).

2.5. La comunicación óptica en el espacio libre.

La comunicación óptica en el espacio libre requiere una conexión de línea de vista entre el transmisor y el receptor para la propagación de información de un punto a otro. Aquí, la señal de información de la fuente se modula en la portadora óptica, y luego a esta señal modulada se le permite propagarse a través del canal atmosférico o espacio libre, en lugar de fibras ópticas guiadas, hacia el receptor. La conexión de tierra a satélite (enlace ascendente óptico) y de satélite a tierra (enlace descendente óptico) implica la propagación del haz óptico a través de la atmósfera, así como en el espacio libre. Por lo tanto, estos enlaces son una combinación de enlaces terrestres y espaciales. La figura 2.10 ilustra las áreas de aplicación de los enlaces FSO (Kaushal et al., 2017b).

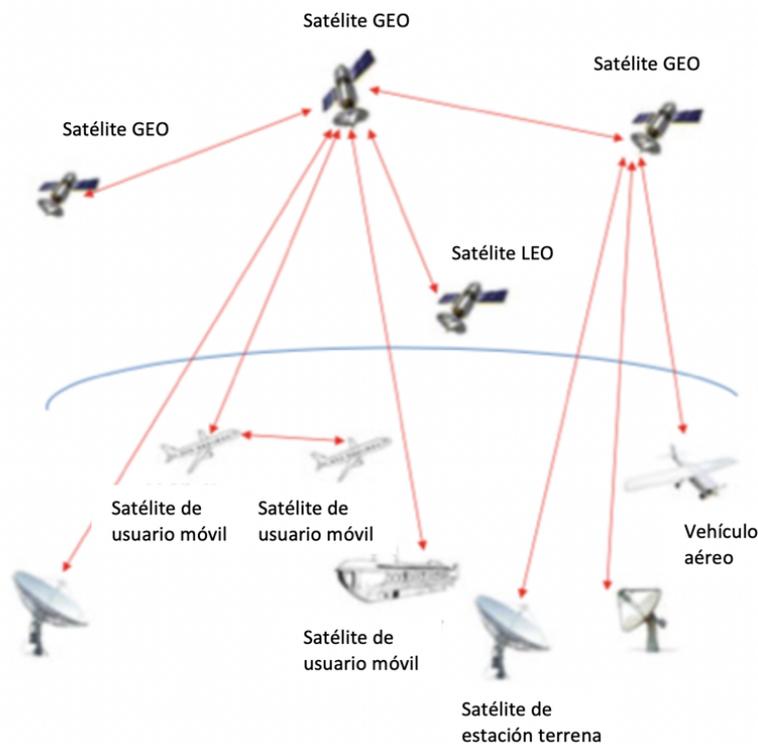


Figura 2. 10: Aplicaciones de enlaces de comunicación FSO.

Fuente: (Kaushal, Jain, & Kar, 2017b)

2.5.1. Componentes de un sistema de comunicación FSO.

Los componentes funcionales básicos del sistema de comunicación FSO consisten en (i) fuente de energía óptica, transmisor; (ii) modulación y codificación de la luz, modulador y codificador; (iii) sistema de adquisición, seguimiento y señalamiento (ATP), espejos de puntería fina y ópticas de

dirección; (iv) supresión de fondo, filtro; (v) apertura óptica de transmisión y recepción; y (vi) detector, demodulador, y decodificador, receptor.

En la Figura 2.11 se muestran varios componentes del transceptor en tierra, el canal óptico intermedio y el transceptor óptico a bordo. Consiste en transmisor, receptor, sistema ATP y canal atmosférico. Antes de transmitir el mensaje/señal de datos, una señal de baliza se transmite desde la estación terrestre al satélite, y el enlace se establece mediante el sistema ATP. La señal de baliza de enlace ascendente es adquirida primero por el objetivo distante que inicia el proceso de adquisición. Durante la adquisición, una estación (por ejemplo, un transceptor terrestre basado en tierra) interroga el área de incertidumbre de otra estación (por ejemplo, un satélite a bordo), ya sea a través de la descolimación o la exploración del haz del transmisor. Una vez que el satélite a bordo adquiere la baliza del transceptor terrestre, comienza la transición de la adquisición al rastreo. Para el sistema de haz estrecho, los compensadores se utilizan para corregir el retardo de propagación en el rango del enlace. Inicialmente para adquirir la señal, la imagen del transceptor terrestre basado en tierra se captura en una matriz de píxeles focal, y se calcula el centroide. El vector de posición con base en tierra se determina a partir del centroide calculado. La diferencia entre la posición actual del láser a bordo y la posición en tierra con la adición de un ángulo (para tener en cuenta el viaje bidireccional de la luz entre el transceptor de tierra y el satélite a bordo) es el vector de posición que impulsa el espejo de dirección de haz. Una vez que se adquiere el enlace y se establece una conexión de línea de vista entre dos estaciones, se puede iniciar la comunicación de datos. La transferencia de datos se realiza utilizando una variedad de esquemas de modulación coherentes y no coherentes y técnicas de codificación. Tanto para la baliza como para la transferencia de datos, la señal debe pasar a través del canal óptico atmosférico, que además del ruido de fondo introduce la atenuación y el centelleo de la señal. Por lo tanto, se necesita suficiente potencia óptica, puntería de precisión y directividad para entregar la señal requerida para la señalización de baliza de enlace ascendente o la comunicación de datos (Kaushal, Jain, & Kar, 2017a).

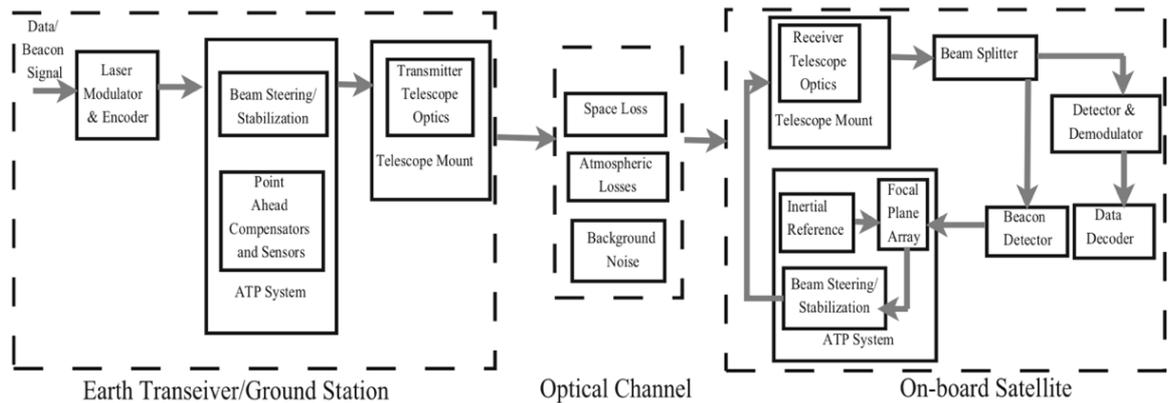


Figura 2. 11: Representación esquemática de varios componentes para el enlace óptico de tierra a satélite.

Fuente: (Kaushal, Jain, & Kar, 2017a)

2.5.1.1. Transmisor óptico.

El transmisor convierte la información de la fuente en señales ópticas que se transmiten al receptor a través de la atmósfera. Los componentes esenciales del transmisor son (i) el modulador, (ii) el circuito controlador de la fuente óptica para estabilizar las radiaciones ópticas contra las fluctuaciones de la temperatura, y (iii) el colimador que recolecta colima y dirige las señales ópticas hacia el receptor a través del canal atmosférico. Las fuentes ópticas que se utilizan para la transmisión de FSO se encuentran en la ventana de transmisión atmosférica que varía entre 700 y 10.000 nm de longitud de onda. El rango de longitud de onda de 780 a 1380 nm es el más ampliamente utilizado como longitud de onda operativa de baliza (Kaushal et al., 2017a).

El costo de los componentes aumenta con el aumento de la longitud de onda de operación. Para un buen transmisor óptico, la elección de la potencia del láser y la longitud de onda se debe hacer con mucho cuidado para que se pueda lograr una potencia óptica adecuada y ganancia de la antena de transmisión para formar un enlace de comunicación de circuito cerrado. Sin embargo, esta no es la única restricción para la mayoría de las fuentes de láser. La selección del láser está influenciada por varios otros factores, entre los que se incluyen la eficiencia, la vida útil operativa y la potencia de salida por difracción limitada alcanzable. Una buena fuente tendrá un ancho de línea espectral estrecho y estable y un perfil espacial

monomodo casi limitado por difracción (Kaushal et al., 2017a). A continuación, se detallan algunos de los requisitos clave que afectan la elección del transmisor láser para aplicaciones basadas en FSO:

- **Frecuencia de repetición de impulsos (PRF):** el mecanismo de impulsos del láser (por ejemplo, conmutación Q, descarga de cavidad) determina el PRF del láser. Los láseres de conmutación Q que utilizan moduladores acústico-ópticos o electroópticos tienen PRF de menos de 200 kHz. Los láseres de descarga de cavidad tienen PRF en el orden de decenas de megahertz. PRF hasta varios gigahertz se puede lograr con los láseres de potencia amplificada utilizados en conjunto con varias etapas de amplificación.
- **Potencia de salida promedio:** el láser debe tener una potencia promedio suficiente para un enlace de comunicación confiable con un margen de enlace adecuado. Para cualquier buen láser, debe proporcionar estabilidad de potencia de impulso a impulso y potencia promedio casi constante sobre diferentes velocidades de datos. La potencia máxima de cualquier láser viene dada por el producto de la energía por pulso y el ancho del pulso. Los láseres de estado sólido proporcionan una gran potencia de pico a PRF bajo. Sin embargo, la potencia pico máxima está limitada por la disipación de calor y las normas de seguridad del láser.
- **Ancho de pulso:** el ancho del pulso del láser debe ser pequeño para facilitar menos ruido de fondo en ranuras temporales estrechas.
- **Relación de extinción de pulso:** la relación de la potencia del láser en modo encendido y en modo apagado se denomina relación de extinción de pulso. La relación de extinción debe ser lo más grande posible. Si la emisión del láser no se cambia al modo apagado completo, puede degradar la relación de extinción, lo que resulta en un margen de enlace más bajo. Los láseres de estado sólido tienen una relación de extinción de modulación de 40 dB, mientras que los láseres semiconductores tienen una relación de extinción relativamente baja de aproximadamente 10 dB. Los láseres de fibra y los amplificadores tienen relaciones de extinción del orden de 30 dB.

- **Calidad del haz de salida:** la salida del láser debe consistir en un modo espacial único. Para evitar oscilaciones no deseadas, ya sea dentro del láser o en el haz transmitido, se requiere aislamiento de retroalimentación del láser desde el haz reflejado hacia atrás.
- **Estabilidad de puntería del haz:** para aplicaciones basadas en FSO, la precisión de puntería en el orden de micro radios, o mejor, es deseable. Tal precisión requiere que la estabilidad de puntería del láser se mantenga mediante el uso de resonadores mecánicos u ópticos dentro del láser.
- **Eficiencia general:** para minimizar el requerimiento de energía eléctrica, es deseable tener la eficiencia general más alta posible.
- **Masa y tamaño:** para cualquier aplicación espacial, la masa y el tamaño de todos los componentes deben minimizarse para lograr un bajo costo de lanzamiento. Por lo tanto, requiere el uso de diseños optomecánicos de resonador láser.
- **Vida útil operacional:** se espera que la vida útil de los componentes láser activos (por ejemplo, diodo láser, modulador y controladores, etc.) exceda la vida útil operativa del sistema. La redundancia de los elementos activos o la redundancia de bloque del láser ayudará a extender la vida útil operacional. Se debe tener en cuenta que cuanto mayor sea la potencia de bombeo, menor será la vida útil esperada del láser.
- **Gestión térmica controlada:** se requiere un control térmico eficiente, ya que el calor disipado no afecta la integridad de la alineación óptica del sistema que, de lo contrario, daría lugar a una mayor pérdida (Kaushal et al., 2017a).

2.5.1.1.1. Moduladores.

Los moduladores ayudan a convertir la señal de información de baja frecuencia en un portador óptico para la comunicación a larga distancia. Los parámetros que caracterizan a los moduladores ópticos son el ancho de banda, la pérdida de inserción, la profundidad de modulación, la potencia de la unidad y la potencia de rendimiento óptico máximo (Hemmati, 2015). La modulación se puede aplicar a cualquier parámetro, es decir, intensidad,

fase, frecuencia o la polarización de la portadora óptica. La modulación más utilizada es la modulación de intensidad (IM) en detección directa, donde la intensidad de la fuente óptica se modula de acuerdo con la información de la fuente. Esto se puede lograr variando la corriente continua de la fuente óptica o haciendo uso de un modulador externo. El uso de un modulador externo permite una transmisión de alta velocidad de datos. Sin embargo, el modulador externo tiene grandes desventajas de respuesta no lineal, complejidad y costo. En caso de detección coherente, los esquemas de modulación comúnmente utilizados son los esquemas de modulación de intensidad y fase (Kaushal et al., 2017a).

Una modulación de fase produce bandas laterales de frecuencia en un haz óptico de onda continua (CW). La amplitud de las bandas laterales con respecto a la portadora está determinada por la amplitud del voltaje aplicado y viene dada por las funciones de Bessel. Aquí, la señal se aplica como un voltaje a través de los electrodos colocados en la parte superior e inferior del cristal electroóptico. Esto desarrollará el campo eléctrico a través del cristal. Cuando se permite que la luz polarizada pase a través del cristal experimentará un índice de cambio de refracción que dará lugar a un cambio en la longitud del camino óptico que es proporcional al campo eléctrico aplicado. Por lo tanto, la fase del haz óptico que sale del cristal experimentará un cambio de fase debido al campo eléctrico aplicado. La figura 2.12 muestra el modulador de fase electroóptica. Este tipo de moduladores utiliza niobato de litio (LiNbO_3) y niobato de litio dopado con óxido de magnesio (MgO/LiNbO_3) que tienen altos coeficientes electroópticos que minimizan los voltajes de accionamiento requeridos y tienen cristal de alta calidad. Además, dichos moduladores tienen una baja pérdida de inserción de 4.5dB y una gran potencia de rendimiento de más de 500mW. El ancho de banda de modulación de 2 y 3 GHz se puede lograr con una estructura de electrodo simple que se puede aumentar aún más mediante el uso de estructuras de electrodo más avanzadas (Kaushal et al., 2017a).

El modulador electroóptico de modulación de fase se puede usar eficientemente como un modulador de amplitud. El modulador Mach-

Zehnder es uno de ese tipo. Consiste en un divisor en Y que divide la luz entrante en dos ramas. Una de las ramas posee un modulador de fase. La luz de salida de ambas ramas se combina utilizando otro sumador Y. La fase de la luz entrante se varía de acuerdo con la señal de modulación. La luz de ambas ramas se combinará de forma destructiva o constructiva, según el cambio de fase que se introduzca en una de las ramas. Por lo tanto, esto controla la amplitud o la intensidad de la luz entrante que resulta en una onda de salida modulada en amplitud (Kaushal et al., 2017a).

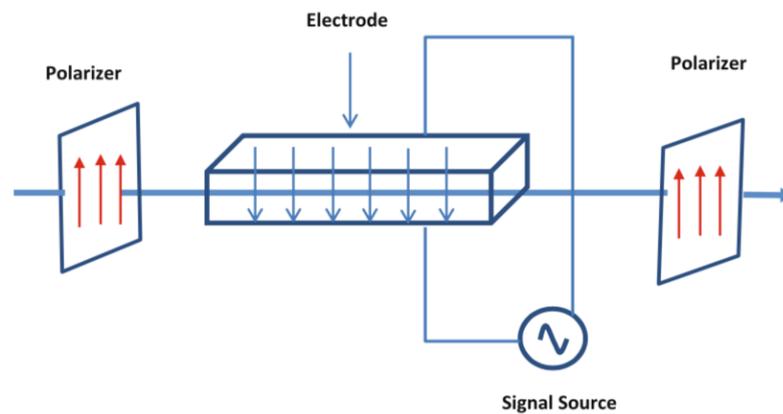


Figura 2. 12: Diagrama esquemático de un modulador de fase.
Fuente: (Kaushal, Jain, & Kar, 2017a)

Los moduladores ópticos integrados (IOM) también son una buena opción para la comunicación de FSO y están disponibles en una amplia gama de longitudes de onda. Estos moduladores están hechos de LiNbO_3 y se construyen utilizando una guía de onda óptica dieléctrica simple. La figura 2.13 muestra el concepto de modulador de fase integrado. El dispositivo consta de una guía de ondas en el sistema de electrodo y chip LiNbO_3 . En presencia de campo eléctrico, el cambio en el tiempo de viaje dt de la onda de luz viene dado por

$$dt = dn \cdot L/c,$$

donde dn es el cambio absoluto en el índice de refracción debido al campo eléctrico aplicado, L la longitud de interacción y c la velocidad de la luz en el vacío. Este retardo de propagación es equivalente a un cambio en la fase de la luz de salida que viene dada por

$$d\phi = \omega \cdot dt = \omega \cdot dn \cdot L/c,$$

donde ω es la frecuencia angular (Kaushal et al., 2017a).

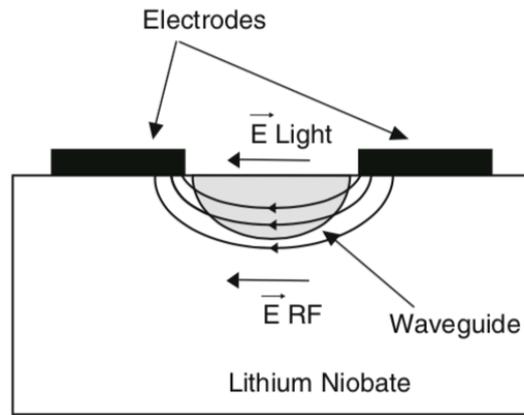


Figura 2. 13: Modulador de fase LiNbO₃ óptico integrado.
Fuente: (Newport Inc., 2018)

De manera similar, en la figura 2.14 se muestran los moduladores de amplitud ópticos integrados construidos modelando un interferómetro Mach-Zehnder en un sustrato de LiNbO₃. Para un modulador de amplitud ideal, la potencia óptica total en la salida del modulador viene dada por

$$P_0 = \frac{1}{2} P_i [1 + \cos(d\phi)],$$

donde P_i es la potencia óptica de entrada y $d\phi$ la diferencia de fase entre dos trayectorias. Además de los moduladores integrados de fase óptica y amplitud, existen moduladores con combinaciones de moduladores de fase y amplitud en el mismo chip. El diseño y la construcción de estos moduladores son complejos a diferencia de los moduladores IOM; sin embargo, su principio básico de operación es el mismo que el de los moduladores electroópticos lineales (Kaushal et al., 2017a).

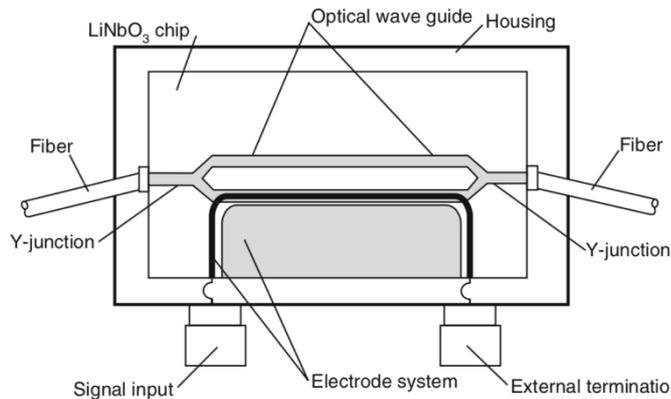


Figura 2. 14: Modulador de amplitud Mach-Zehnder.
Fuente: (Kaushal, Jain, & Kar, 2017a)

2.5.1.2. Receptor óptico.

El receptor ayuda a recuperar los datos transmitidos después de propagarse a través de una atmósfera turbulenta. Consta de un telescopio receptor, filtro, fotodetector, unidad de procesamiento de señales y demodulador. El telescopio receptor consta de lentes que enfocan la señal óptica recibida en el fotodetector. El filtro se utiliza para reducir la cantidad de ruido de fondo. Las fuentes de ruido presentes en el receptor incluyen el fondo, la corriente del detector, el preamplificador, el ruido de disparo de señal y el ruido térmico. El fotodetector convierte la señal óptica recibida en una señal eléctrica que pasa a la unidad de procesamiento y luego al demodulador. En el receptor, se pueden usar tanto PIN (Positive-Intrinsic-Negative Photodetector) como APD (Avalanche Photodetector). En el enlace ascendente FSO, el nivel de potencia recibido es bastante bajo debido a la gran pérdida en el espacio libre. A este nivel de potencia, un receptor APD ofrece un rendimiento mucho mejor que el receptor PIN. La elección del receptor óptico depende de varios problemas fundamentales y parámetros de hardware. Algunos de los parámetros importantes se enumeran a continuación:

- **Técnica de modulación:** la técnica de detección utilizada en el receptor depende del formato de modulación. No todas las técnicas de detección son adecuadas para todos los formatos de modulación, por ejemplo, los receptores de detección directa son insensibles a la información de fase y polarización.
- **Disponibilidad, confiabilidad y costo del hardware:** los diferentes tipos de receptores tienen diferentes requisitos de hardware que pueden o no estar disponibles fácilmente a un costo razonable. Por ejemplo, la alta ganancia de Si-APD funciona de manera eficiente solo a una longitud de onda inferior a 1000 nm. Según las necesidades, se pueden usar otros detectores como InGaAs/InGaAsP.
- **Sensibilidad del receptor:** este es un parámetro muy importante en todos los sistemas de comunicación óptica, incluido el sistema de comunicación FSO. Se mide en términos de fotones promedio recibidos por bit y se da como

$$n_{av} = \frac{P_{av}}{h\nu R},$$

donde $h\nu$ es la energía del fotón en la longitud de onda operativa de transmisión ($\lambda=c/\nu$) y R la velocidad de bits/datos. La sensibilidad del receptor depende principalmente de la técnica de detección de fotones, el formato de modulación, el fotodetector y el ruido de fondo. Estos se describen brevemente a continuación:

- **Técnica de fotodetección:** como se mencionó anteriormente, la técnica de detección utilizada en el receptor óptico se puede clasificar de manera amplia en dos tipos, detección coherente y detección directa no coherente. En el receptor de detección coherente, la señal entrante se mezcla con la señal fuerte del oscilador local (LO). Esta mezcla de señal débil y señal LO fuerte en el extremo frontal del receptor proporciona amplificación lineal y convierte la señal óptica en señal eléctrica. El fuerte campo de LO eleva el nivel de la señal muy por encima del nivel de ruido del circuito electrónico. Por lo tanto, la sensibilidad del receptor coherente está limitada por el ruido de disparo de la señal LO. Además, debido al proceso de mezcla espacial, el receptor coherente es sensible a la señal y al ruido de fondo solo que cae dentro del mismo modo temporal espacial del LO. Esto permite que el receptor óptico de detección coherente funcione con un ruido de fondo muy fuerte sin una degradación significativa en el rendimiento.
- **Formato de modulación:** el tipo de formato de modulación utilizado para el enlace FSO afecta la sensibilidad del receptor. El receptor coherente, en particular el tipo heterodino, se puede utilizar para todo tipo de esquemas de modulación. Por otro lado, los receptores homodinos se pueden usar solo para los esquemas de intensidad y modulación de fase. El receptor de detección directa se puede usar para detectar solo señales de intensidad modulada (Da-Shan Shiu & Kahn, 2013).
- **Fotodetector y ruido de fondo:** hay varios tipos de fuentes de ruido que contribuyen al ruido en el receptor de FSO. Estas fuentes de ruido incluyen ruido de fondo, ruido de corriente del detector, ruido de disparo

de señal y ruido térmico. Las contribuciones de estas fuentes de ruido en la salida final dependen del diseño óptico, la configuración del receptor, el ancho de banda de datos y el tipo de enlace FSO (Kaushal et al., 2017a).

2.5.2. Comparación de sistemas de comunicación FSO y RF.

El sistema de comunicación FSO ofrece varias ventajas sobre el sistema de RF. La principal diferencia entre las comunicaciones FSO y Radiofrecuencia surge de la gran diferencia en la longitud de onda. En condiciones climáticas despejadas (visibilidad >15 kilómetros), la ventana de transmisión atmosférica se encuentra en la región cercana a IR y se encuentra entre 700 y 1600 nm. La ventana de transmisión para RF se encuentra entre 30 mm y 3 m. Por lo tanto, la longitud de onda de RF es mil veces mayor que la longitud de onda óptica. Esta alta proporción de longitudes de onda conduce a algunas diferencias interesantes entre los dos sistemas como se indica a continuación:

- **Gran ancho de banda de modulación:** es un hecho bien conocido que un aumento en la frecuencia de la portadora aumenta la capacidad de transporte de información de un sistema de comunicación. En los sistemas de comunicación de RF y microondas, el ancho de banda permitido puede ser de hasta el 20% de la frecuencia de la portadora. En la comunicación óptica, incluso si se considera que el ancho de banda es el 1% de la frecuencia portadora ($\approx 10^{16}$ Hz), el ancho de banda permitido será de 100 THz. Esto hace que el ancho de banda utilizable a una frecuencia óptica del orden de THz, que es casi 105 veces mayor que la de una portadora de RF típica.
- **Divergencia de haz estrecho:** la divergencia del haz es $\sim \lambda/DR$, donde λ es la longitud de onda portadora y DR el diámetro de apertura. Por lo tanto, la propagación del haz ofrecido por la portadora óptica es más estrecha que la de la portadora de RF. Por ejemplo, la divergencia del rayo láser a $\lambda = 1550$ nm y el diámetro de apertura DR = 10 cm resultan ser de 0.34 μ rad. Por otro lado, la señal de radiofrecuencia en la banda X producirá una divergencia de haz muy grande, por ejemplo, a 10 GHz,

es decir, a $\lambda = 3$ cm, y el diámetro de apertura $D_R = 1$ m produce una divergencia de haz de 67,2 mrad. Una divergencia de haz mucho menor en la frecuencia óptica hace que aumente la intensidad de la señal en el receptor para una potencia de transmisión dada. La figura 2.15 muestra la comparación de divergencia de haz para señales ópticas y de RF cuando se envía de regreso desde Marte hacia la Tierra (Franz & Jain, 2012).

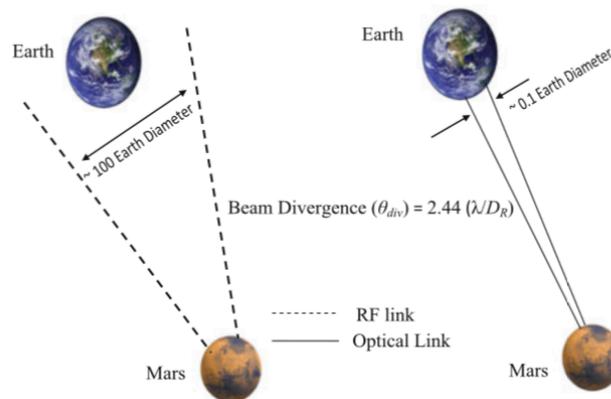


Figura 2. 15: Comparación de la divergencia de haz óptico y RF desde Marte hacia la Tierra.

Fuente: (Franz & Jain, 2012)

- **Menor requerimiento de potencia y masa:** para un nivel de potencia del transmisor dado, la intensidad óptica es mayor en el receptor debido a su divergencia de haz estrecho. Por lo tanto, una menor longitud de onda de la portadora óptica permite al diseñador de FSO idear un sistema que tenga una antena más pequeña que el sistema de RF para lograr la misma ganancia (ya que la ganancia de la antena es inversamente proporcional al cuadrado de la longitud de onda operativa). El tamaño típico para el sistema óptico es de 0,3 contra 1,5 m para las antenas de naves espaciales (Hemmati, 2006).
- **Alta directividad:** dado que la longitud de onda óptica es muy pequeña, se obtiene una directividad muy alta con una antena de tamaño pequeño. La directividad de la antena está estrechamente relacionada con su ganancia. La ventaja de la portadora óptica sobre la portadora de RF se puede ver en la relación de directividad de la antena que se indica a continuación, donde

$$\frac{Ganancia_{\acute{o}ptica}}{Ganancia_{RF}} = \frac{4\pi/\theta_{div(\acute{o}ptica)}^2}{4\pi/\theta_{div(RF)}^2},$$

donde $\theta_{div(\acute{o}ptica)}$ y $\theta_{div(RF)}$ son las divergencias de haz óptico y RF, respectivamente, y son proporcionales a λ/DR . Para el sistema que utiliza un portador óptico con un diámetro de apertura $DR = 10\text{cm}$ y $\lambda = 1550\text{ nm}$ se obtiene $\theta_{div(\acute{o}ptica)} \approx 40\ \mu\text{rad}$. En la divergencia del haz de $40\ \mu\text{rad}$, la ganancia de la antena, $Ganancia_{\acute{o}ptica}$, es de aproximadamente 100dB. Para lograr la misma ganancia en el sistema de RF que usa la banda X en $\lambda = 3\text{ cm}$, el tamaño del diámetro de apertura DR se vuelve extremadamente grande y poco práctico de implementar.

- **Espectro sin licencia:** en el sistema de RF, la interferencia de la portadora adyacente es el principal problema debido a la congestión del espectro. Esto requiere la necesidad de licencias de espectro por parte de las autoridades reguladoras. Pero el sistema óptico está libre de licencias de espectro hasta ahora. Esto reduce el costo de instalación inicial y el tiempo de desarrollo.
- **Seguridad:** es muy difícil detectar los haces ópticos transmitidos en comparación con la señal de RF debido a su estrecha divergencia de haz. Para detectar la señal óptica, uno tiene que estar físicamente muy cerca (≤ 150 metros) al diámetro del punto del haz. Los estudios han demostrado que la señal óptica bajaría a 140 dB desde su potencia de transmisión máxima a una distancia de 15 kilómetros. Sin embargo, la señal de RF tiene una región de escucha mucho más amplia. En este caso, la señal se puede captar fácilmente a una distancia de 65 kilómetros y se reduce aproximadamente 40 dB a aproximadamente 160 kilómetros (Kaushal et al., 2017b).

Además de las ventajas anteriores, las ventajas secundarias del sistema de comunicación FSO son: (a) es beneficioso en los casos en que no es necesario el uso de cables de fibra óptica, (b) fácilmente expandible y reduce el tamaño de los segmentos de red, y (c) ligero y compacto. Además

de estas ventajas, un sistema de comunicación FSO también tiene algunas desventajas. Requiere una alineación estrecha y puntería debido a su divergencia de haz estrecho. Como la luz no puede penetrar paredes, colinas, edificios, etc., se requiere una clara línea de visión entre el transmisor y el receptor. Además, a diferencia de los sistemas de RF, un sistema FSO es altamente propenso a las condiciones atmosféricas que pueden degradar drásticamente el rendimiento del sistema. Otro factor limitante es la posición del sol con respecto al transmisor y receptor láser. En una alineación particular, las radiaciones solares de fondo aumentarán, lo que conducirá a un rendimiento deficiente del sistema (Kaushal et al., 2017b).

2.5.3. Elección de la longitud de onda en sistemas de comunicación FSO.

La selección de longitud de onda en el sistema de comunicación FSO es un parámetro de diseño muy importante ya que afecta el rendimiento del enlace y la sensibilidad del detector del sistema. Dado que la ganancia de la antena es inversamente proporcional a la longitud de onda operativa, es más beneficioso operar a longitudes de onda más bajas. Sin embargo, las longitudes de onda más altas proporcionan una mejor calidad de enlace y un menor desvanecimiento de la señal inducida por la señalización (Jurado-Navas, Garrido-Balsells, Paris, Castillo-Vázquez, & Puerta-Notario, 2013). Una optimización cuidadosa de la longitud de onda operativa en el diseño del enlace FSO ayudará a lograr un mejor rendimiento. La elección de la longitud de onda depende en gran medida de los efectos atmosféricos, la atenuación y la potencia de ruido de fondo. Además, la disponibilidad de los componentes del transmisor y el receptor, las normas de seguridad ocular y el costo impactan profundamente la selección de la longitud de onda en el proceso de diseño de FSO.

La Comisión Internacional de Iluminación (CIE, 2018), ha clasificado las radiaciones ópticas en tres categorías: IR-A (700–1400 nm), IR-B (1400–3000 nm) e IR-C (3000 nm – 1 mm). Puede ser subclasificado en:

- infrarrojo cercano (NIR) que varía de 750 a 1450 nm, que es una ventana de baja atenuación y se utiliza principalmente para fibra óptica,
- infrarrojo corto (SIR) que varía de 1400 a 3000nm, de los cuales 1530–1560 nm es un rango espectral dominante para la comunicación a larga distancia,
- infrarrojo medio (MIR) de 3000 a 8000 nm, que se utiliza en aplicaciones militares para guiar misiles,
- infrarrojo largo (LIR) que varía de 8000 nm a 15 μ m, que se utiliza en imágenes térmicas, e
- infrarrojo lejano (FIR), que se encuentra entre 15 μ m y 1mm.

Casi todos los sistemas FSO disponibles comercialmente están utilizando el rango de longitud de onda NIR y SIR, ya que estas longitudes de onda también se usan en la comunicación de fibra óptica, y sus componentes están fácilmente disponibles en el mercado. La selección de la longitud de onda para la comunicación FSO debe ser segura para los ojos y la piel, ya que ciertas longitudes de onda pueden causar peligros oculares potenciales o daños a la retina (Bader & Harvey, 1996).

2.5.4. Tecnologías utilizadas en FSO.

Las tecnologías utilizadas en el sistema FSO son casi similares al sistema de RF convencional. La mayoría de las técnicas se adaptan directamente de los sistemas de RF. A continuación, se discuten varios esquemas de detección y modulación utilizados en el sistema FSO. La modulación de la portadora óptica difiere de la modulación de la portadora de RF debido a las características y limitaciones de los dispositivos utilizados para llevar el proceso de modulación. La modulación óptica se puede llevar a cabo de dos maneras: interna o externa, como se muestra en la figura 2.16. Un modulador interno es uno en el que las características de la fuente varían directamente de acuerdo con la señal de información para producir la señal óptica modulada. La modulación de intensidad se puede realizar variando la corriente de polarización. La modulación de frecuencia o fase se puede obtener cambiando la longitud de la cavidad del láser. La modulación de impulsos se puede lograr variando la corriente de excitación por encima y

por debajo del umbral. Estas modulaciones se limitan al rango lineal de las características de potencia de la fuente. En el caso de moduladores externos, se utiliza un dispositivo externo que varía las características de la portadora de acuerdo con la señal de modulación. Estos sistemas son capaces de utilizar toda la potencia de la fuente. Sin embargo, los moduladores externos limitan el rango de modulación y requieren una corriente de accionamiento relativamente alta (Kaushal et al., 2017b).

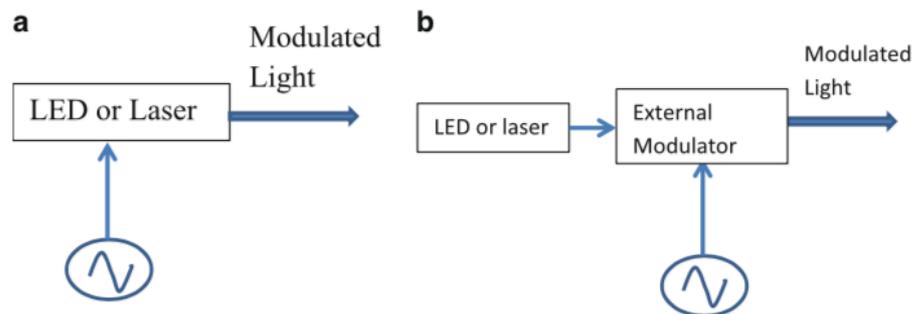


Figura 2. 16: Moduladores ópticos. (a) Modulador interno. (b) Modulador externo.
Fuente: (Kaushal, Jain, & Kar, 2017b)

En las frecuencias ópticas, estos moduladores operan directamente en la intensidad de la portadora (amplitud al cuadrado del campo eléctrico) en lugar de la amplitud de la portadora. Otras formas de modular la portadora óptica son mediante el uso de su fase o polarización. Sin embargo, debido a razones de simplicidad, el esquema de modulación más popular utilizado en el sistema FSO es la modulación de intensidad: banda base o subportadora. Los esquemas de modulación se pueden clasificar en dos categorías: modulación de intensidad de banda base y modulación de intensidad de subportadora. El método más común utilizado para la detección de la señal óptica es la detección directa. Cuando la señal de intensidad modulada es detectada por un receptor de detección directa, el esquema se conoce como intensidad modulada/detección directa (IM/DD) y se usa comúnmente en sistemas FSO. El otro enfoque para detectar la señal óptica modulada es la detección coherente. Hace uso del oscilador local para convertir la portadora óptica en banda base (detección homodina) o en frecuencia intermedia de RF (detección heterodina). Esta señal de RF se demodula posteriormente a banda base mediante un proceso de demodulación de RF convencional (Kaushal et al., 2017b).

2.5.5. Aplicaciones de los sistemas de comunicación FSO.

Las aplicaciones de los sistemas de comunicación FSO van desde aplicaciones de corto alcance (<1 km) hasta aplicaciones de largo alcance y espaciales. Proporcionan una solución de banda ancha (altas velocidades de datos sin cableado) para conectar a los usuarios finales a la red troncal. La aplicación de corto alcance proporciona acceso a la última milla al conectar varias torres, edificios, etc. en áreas urbanas donde la excavación de cables es una tarea difícil. Incluye enlaces punto a punto o punto a multipunto o enlaces de banda ancha. A continuación, se enumeran varias aplicaciones de los sistemas FSO:

- **Conectividad empresarial:** el enlace FSO se puede implementar fácilmente para conectar varias torres/edificios permitiendo la conectividad de área local. También puede extenderse para conectar anillos de fibra del área metropolitana, conectar nuevas redes y proporcionar una expansión de red de alta velocidad.
- **Respaldo de fibra:** En caso de falla del enlace de fibra óptica, el enlace FSO se puede implementar como un enlace de respaldo para garantizar la disponibilidad del sistema.
- **Enlaces punto a punto:** abarca enlaces (LEO-LEO), (LEO-GEO) y enlace de satélite a tierra/tierra a satélite. Este tipo de enlace requiere un buen sistema de señalamiento y seguimiento. Aquí, la potencia de salida del transmisor, el consumo de energía, el tamaño, la masa y el costo de implementación aumentan con el rango de enlace.
- **Enlaces punto a multipunto:** la detección multiplataforma multiestática, las comunicaciones satelitales interoperables y el procesamiento de vehículos espaciales compartidos son una aplicación de red del sistema FSO.
- **Conexión inalámbrica híbrida/redundancia de red:** la comunicación FSO es propensa a condiciones climáticas como niebla, nevadas, etc. Para obtener un 100% de disponibilidad de la red, los enlaces FSO se pueden combinar con enlaces de microondas que operan a altas frecuencias (en el rango de GHz) y ofrecen tasas de datos comparables.

- **Recuperación de desastres:** el sistema de comunicación FSO proporciona un enlace escalable de alta capacidad en caso de colapso de la red de comunicación existente.
- **Backhaul para redes celulares:** con el advenimiento de la comunicación celular 5G, existe un desafío cada vez mayor para aumentar la capacidad de backhaul entre las torres celulares para hacer frente al aumento de la demanda de los clientes móviles de banda ancha. Las opciones de backhaul viables para la red 5G son implementar cables de fibra óptica o instalar una conexión FSO entre torres. La implementación de cables de fibra requiere mucho tiempo y es una tarea costosa. Por lo tanto, el sistema de comunicación FSO desempeña un papel importante en la provisión de capacidad de backhaul para redes celulares (Kaushal et al., 2017b).

2.5.6. Topologías empleadas para enlaces FSO.

2.5.6.1. FSO en arquitectura anillo.

En la figura 2.17 se muestra una red FSO en arquitectura de anillo. En el ejemplo dado, las distancias entre los edificios son de hasta 500 m. En la configuración mínima, se instalan dos unidades de receptor/transmisor óptico en la parte superior de cada edificio. Deben usarse repetidores ópticos, si no hay una línea de visión entre el transmisor y el receptor. En el caso de un enlace roto o, por ejemplo, un fallo de enlace entre los edificios 1 y 2, se puede utilizar la conexión indirecta. De este modo, la información se envía en la otra dirección de la red de anillo que pasa por los edificios 1, 6, 5, 4, 3 y 2. Por lo tanto, utilizando una arquitectura de anillo, se puede lograr una seguridad parcial contra fallas, la instalación de enlaces redundantes adicionales aumenta la disponibilidad y la seguridad contra las mismas (Leitgeb, Gebhart, & Birnbacher, 2016).

2.5.6.2. FSO en arquitectura estrella.

En la figura 2.18 se muestra una instalación de prueba en la Universidad de Católica de Santiago de Guayaquil, utilizando una arquitectura en estrella. El área de cobertura de esta red FSO es de aproximadamente 300 m de diámetro. Una unidad óptica multipunto está

montada en el techo de un edificio. Cinco terminales de usuario están conectados permanentemente por sus unidades de transceptor óptico a la estación central óptica multipunto. Los cinco terminales de usuario están ubicados en los edificios circundantes y ofrecen una conexión a través del enlace FSO a la unidad multipunto óptica. En esta configuración, la unidad óptica multipunto se realiza con cinco unidades FSO punto a punto, cada una de ellas dirigida a un terminal FSO de usuario. La unidad óptica multipunto está interconectada por conmutadores con la red troncal de la UCSG (Leitgeb et al., 2016).

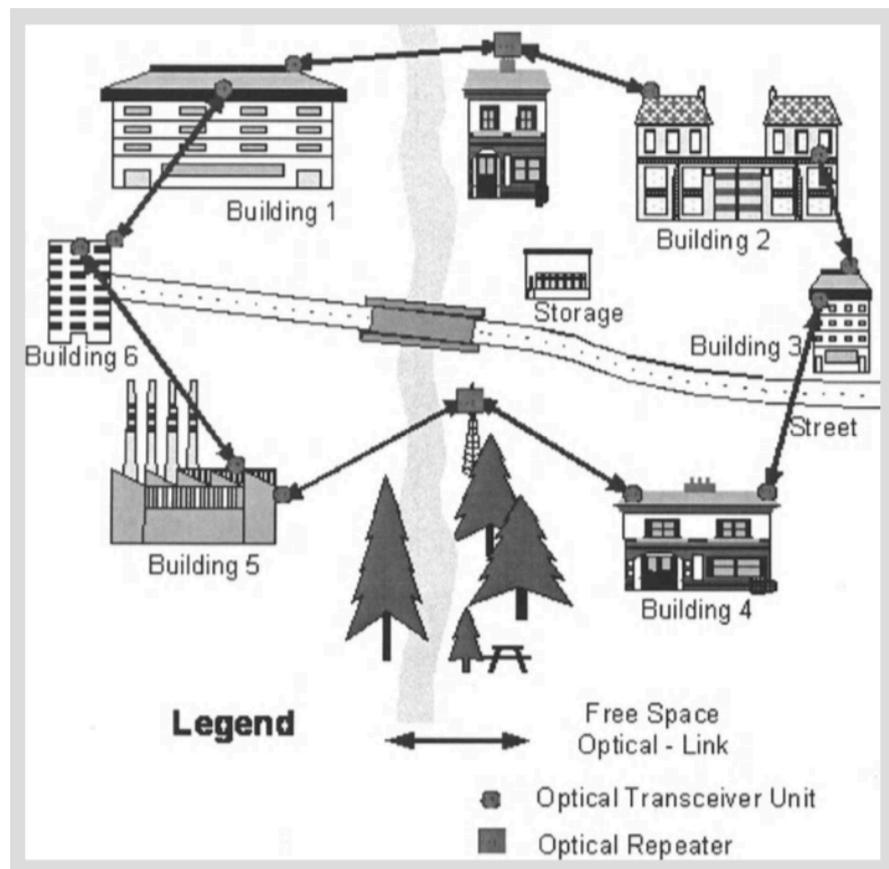


Figura 2. 17: Red FSO en arquitectura de anillo.
Fuente: (Leitgeb, Gebhart, & Birnbacher, 2016)

La ventaja de esta configuración es la distancia más corta entre cualquiera de las dos unidades de FSO. En general, el multipunto óptico se ubica en el centro de la zona, montado en el edificio más alto. Pero esta arquitectura tiene la desventaja de un solo punto de falla. Si la unidad óptica multipunto falla, se produce un fallo del sistema de toda la instalación. Para mejorar la confiabilidad de esta arquitectura, se tendría que instalar una unidad multipunto redundante. La segunda unidad óptica multipunto también

se puede montar en plataformas móviles, por ejemplo, una furgoneta, para aumentar la flexibilidad y disminuir el tiempo de configuración. Sin embargo, para la instalación de unidades multipunto en automóviles, son preferibles los sistemas FSO con "seguimiento automático" (Leitgeb et al., 2016).

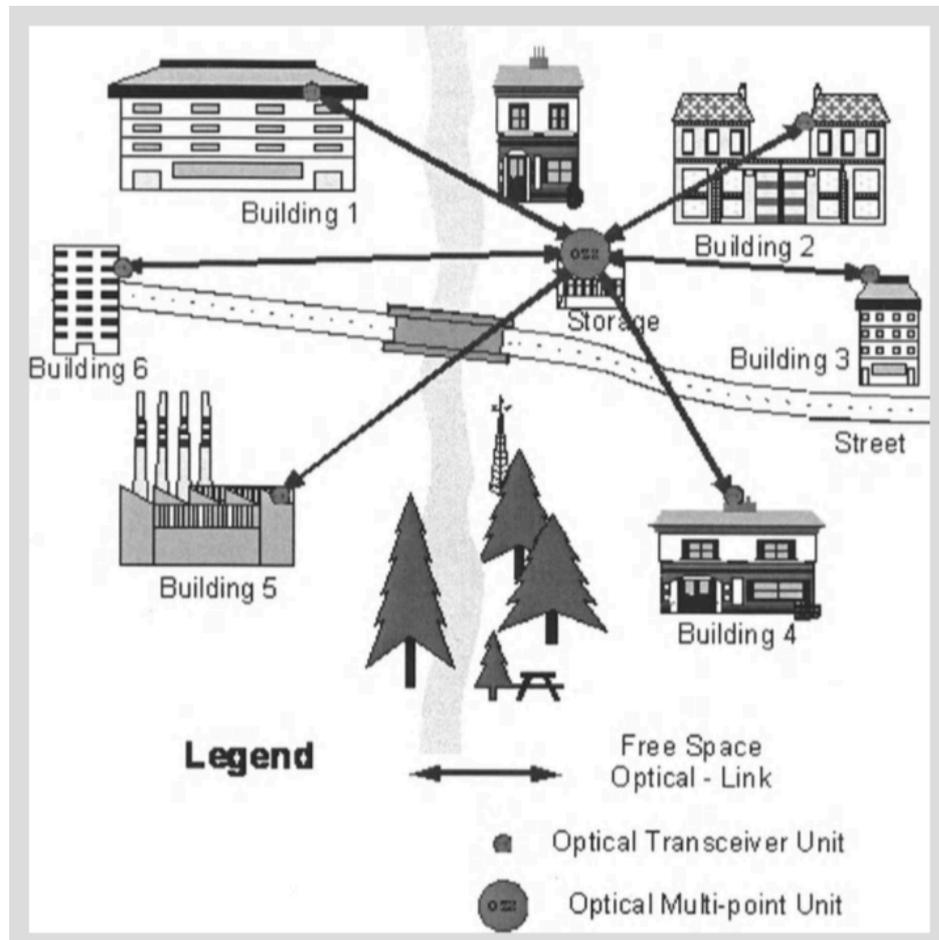


Figura 2. 18: FSO en arquitectura estrella.
Fuente: (Leitgeb, Gebhart, & Birnbacher, 2016)

2.5.6.3. FSO en arquitectura malla.

Una red de malla como se muestra en la figura 2.19 está compuesta por una serie de nodos interconectados con cierto grado de redundancia. En tal red, cada nodo está conectado a todos los demás nodos, ya sea directamente o por una serie de saltos. El nivel de redundancia en la red determina el nivel de conexión en la misma. Por lo tanto, cuanto mayor sea el número de nodos, mejor será el sistema. Las redes de malla ofrecen una alta fiabilidad con una fácil posibilidad de adición de nodos (Department Of Telecommunications Government Of India, 2014).

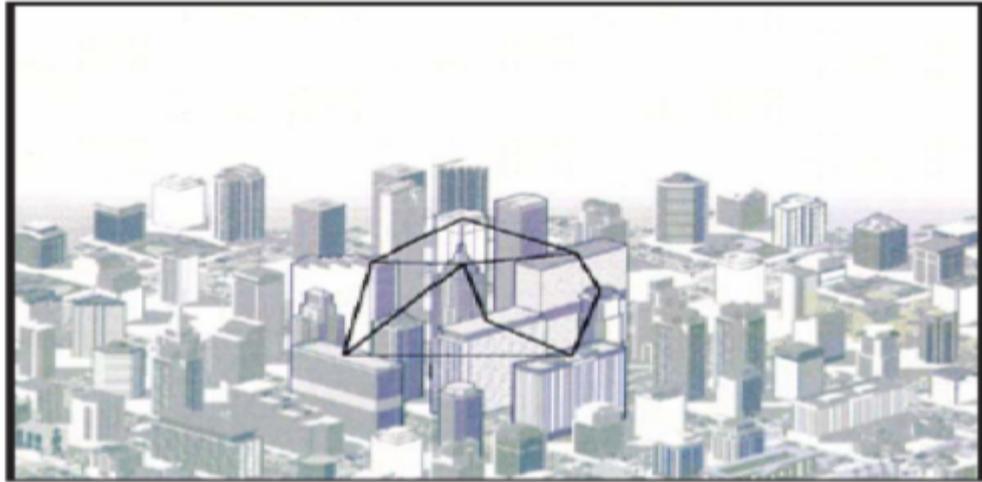


Figura 2. 19: FSO en arquitectura malla.

Fuente: (Department of Telecommunications Government of India, 2014)

2.5.6.4. FSO en arquitectura PTP múltiple.

La arquitectura de PTP (punto a punto) múltiple que se muestra en la figura 2.20 es adecuada en los casos en que es deseable crear una ruta de enlace extensa que exceda el límite del rango del producto o la distancia limitada recomendada por el clima para un enlace óptico. Es una conexión dedicada que ofrece mayor ancho de banda.

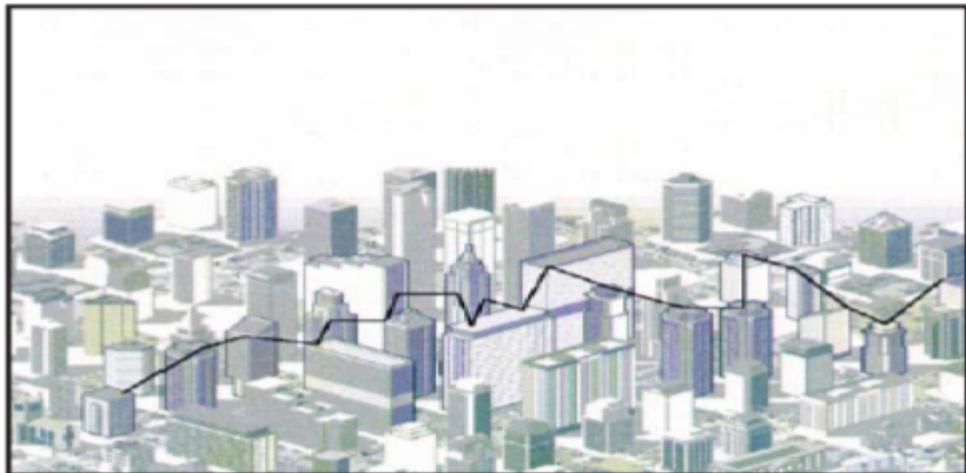


Figura 2. 20: FSO en arquitectura PTP múltiple.

Fuente: (Department of Telecommunications Government of India, 2014)

2.5.7. Efectos atmosféricos sobre enlaces FSO.

Las tasas de transmisión reales dependen del clima ya que la atenuación atmosférica es variable y difícil de predecir. Es posible que el enlace no funcione bien en lugares donde la atmósfera se ve afectada por condiciones tales como niebla, tormenta, centelleo, etc.

2.5.7.1. FSO y niebla.

La niebla atenúa sustancialmente la radiación visible y tiene un efecto similar en las longitudes de onda cercana al infrarrojo que se emplean en sistemas FSO. Se debe tener en cuenta que el efecto de la niebla en el espacio libre de la radiación inalámbrica óptica es completamente análogo a la atenuación y los desvanecimientos sufridos por el sistema inalámbrico de RF debido a la lluvia. Al igual que en el caso de la atenuación de la lluvia con RF, la atenuación por la niebla no es un “show-stopper” para FSO (las señales se bloquean en la televisión durante la lluvia intensa) porque el enlace óptico puede diseñarse de manera tal que durante una gran fracción de tiempo una potencia aceptable se recibe incluso en presencia de niebla pesada. El sistema de comunicación óptico inalámbrico basado en FSO se puede mejorar para proporcionar aún mayor disponibilidad (fSONA Communications Corporation, 2018).

2.5.7.2. FSO y centello.

Se puede pensar en el centelleo atmosférico como un cambio en las intensidades de la luz en el tiempo y el espacio en el plano de un receptor que detecta la señal de un transmisor a una distancia determinada. Cuando el haz es centelleado, los fotones de luz son dirigidos temporalmente por bolsas de aire en dirección aleatoria. Este es el mismo efecto atmosférico que hace que las estrellas parpadeen en la noche. El nivel de la señal recibida en el detector fluctúa debido a cambios inducidos térmicamente en el índice de refracción del aire a lo largo de la ruta de transmisión. Los cambios en el índice hacen que la atmósfera actúe como una colección de pequeños prismas y lentes que desvían el haz de luz dentro y fuera de la ruta de transmisión. La escala de tiempo de estas fluctuaciones es aproximadamente el tiempo que tarda un volumen de aire del tamaño del haz en moverse por el camino y, por lo tanto, está relacionado con la velocidad del viento. Para el caso de la óptica del espacio libre, que implica una propagación de la trayectoria horizontal y, por lo tanto, un centelleo más fuerte, la distribución tiende a ser más exponencial (Jangir, Suman, & Chaudhary, 2014). Para superar los efectos de centelleo, se utiliza el

mecanismo de control automático de ganancia (fSONA Communications Corporation, 2018).

2.5.7.3. FSO e interferencia solar.

La interferencia solar en sistemas FSO puede combatirse de dos maneras. En primer lugar, mediante el uso de una ventana de filtro óptico de paso largo para impedir que todas las longitudes de onda ópticas por debajo de 850 nm entren en el sistema y, en segundo lugar, mediante el filtro óptico de banda estrecha que precede al detector del receptor para filtrar todo, excepto la longitud de onda que realmente se usa para la comunicación. Para manejar la energía solar fuera de eje se utilizan dos filtros espaciales. Estos subsistemas permiten que los enlaces FSO funcionen sin verse afectados por la interferencia solar que se encuentra a más de 1.5° del eje (Jangir et al., 2014).

2.5.8. FSO e interrupciones humanas no autorizadas.

FSO se está utilizando en el campo de la recuperación de desastres y las aplicaciones temporales junto con la comunicación entre satélites y bajo el agua. Actualmente FSO es utilizado por empresarios que poseen edificios con línea de visión. Para ellos la seguridad y la recepción ininterrumpida es muy importante (Jangir et al., 2014).

2.5.8.1. Seguridad en sistemas FSO.

El haz de FSO fuertemente colimado asegura que la energía de la señal se enfoque en la unidad receptora, lo que dificulta la interceptación del haz, la razón principal detrás de esto es la ausencia de los lóbulos laterales. Interceptar una señal a través de efectos de dispersión aleatoria es prácticamente imposible. En distancias largas, los cambios de temperatura entre bolsas de aire pueden causar que el haz se disperse ligeramente. Esto se conoce como centelleo. Estas bolsas de aire están en movimiento permanente, por lo que los límites entre las diferentes bolsas también cambian constantemente. Debido a que el centelleo es causado por la luz láser que pasa a través de estos límites de las bolsas de aire vecinas, el camino de los fotones parpadeantes siempre está cambiando al azar. Estos

cambios de centelleo duran solo una fracción de segundo. Dado que el ángulo de centelleo es aleatorio y los cambios son muy rápidos, es muy difícil pronosticar un punto específico de intercepción de la señal (Jangir et al., 2014).

2.5.8.2. Necesidad de un enlace ininterrumpido completo.

El haz láser FSO no se puede detectar con un analizador de espectro o medidores de RF porque estos haces son estrechos e invisibles, lo que hace que sean más difíciles de interceptar y rastrear. Para un haz óptico, la interrupción de la señal solo es posible colocando un detector en la trayectoria o en el área de enfoque del haz. Si alguien intenta interceptar una señal colocando un detector en la trayectoria del haz, se bloqueará y se terminará la comunicación. La única forma de interceptar la trayectoria del haz estrecho es desde la ubicación detrás del edificio en el que está instalada la unidad receptora. Para evitar este improbable evento, se puede hacer un blindaje de haz y hay dos formas de hacerlo (a) instalando el receptor contra la pared que sea dos veces más ancho que el radio del haz de FSO y (b) si el enlace está instalado en un techo o una superficie abierta es posible colocar una cubierta o escudo detrás del receptor (dos veces más grande que el diámetro del haz) (Jangir et al., 2014).

2.5.8.3. Prevención de decodificación de señales de intrusos.

Todas las funciones de seguridad de conmutación y enrutamiento existentes en una infraestructura de línea de cable se pueden transferir a los telescopios (dispositivo utilizado para el enfoque de haz en FSO). Dado que los sistemas de telescopio son dispositivos de encriptación que se agregan al enlace para ofrecer seguridad adicional. El telescopio retransmite pasivamente un flujo de bits codificado, lo que dificulta aún más la decodificación de la señal externa (LightPointe Inc., 2018).

CAPÍTULO 3: SIMULACIÓN Y RESULTADOS OBTENIDOS

3.1. OptiSystem 7.0.

Pertenciente a la compañía Optiwave Photonic Software Inc., es un innovador paquete de simulación de sistemas de comunicación óptica para el diseño, pruebas y optimización de prácticamente cualquier tipo de enlace óptico en la capa física de un amplio espectro de redes ópticas, desde sistemas de transmisión de video analógico hasta redes troncales intercontinentales. Es un simulador basado en el modelado realista de sistemas de comunicación de fibra óptica, posee un nuevo y poderoso entorno de simulación y una definición verdaderamente jerárquica de componentes y sistemas. Sus capacidades también se pueden ampliar fácilmente con la adición de componentes e interfaces integradas a una gama de herramientas ampliamente utilizadas. OptiSystem 7.0 representa un sistema de comunicación óptica como un conjunto de bloques interconectados. Cada bloque se simula de forma independiente utilizando los parámetros especificados por el usuario para ese bloque y la información de la señal transmitida desde otros bloques (Khadir, Dhahir, & Fu, 2014). La interfaz gráfica de trabajo de OptiSystem 7.0 se muestra en la figura 3.1.

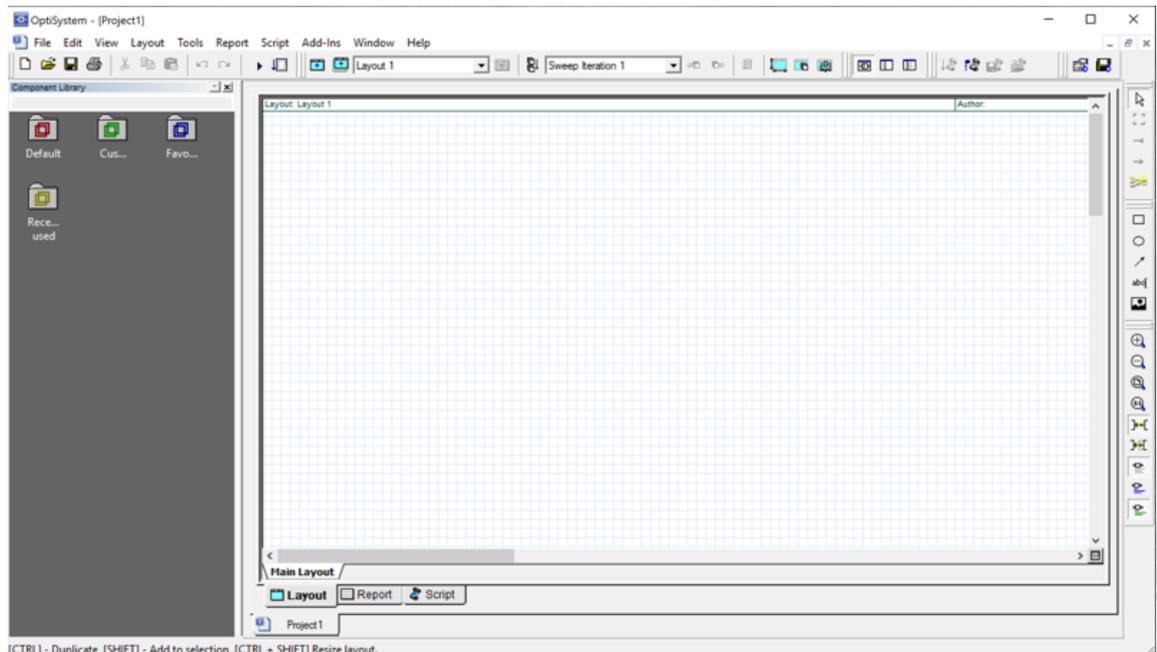


Figura 3. 1: Interfaz gráfica de trabajo de OptiSystem 7.0.
Elaborado por: Autor.

A medida que la señal física pasa entre componentes en un sistema de comunicación del mundo real, los datos de "señal" pasan entre los modelos de componentes en la simulación. Estos bloques se representan gráficamente como iconos en OptiSystem. Hay muchos beneficios al usar este software de simulación, como la representación visual de las opciones de diseño, los escenarios para presentar prospectos, la drástica reducción del riesgo de inversión y el tiempo de comercialización, y la creación de prototipos a bajo costo. Con respecto al campo de la educación, el uso de este software es beneficioso para entrenar las habilidades de los estudiantes, como el análisis independiente, el diseño y la capacidad para resolver problemas prácticos (Yang & Hechao, 2014), por lo que les permite a los estudiantes desarrollar una comprensión intuitiva de la óptica de una manera rápida.

Dentro de las ventajas y beneficios que OptiSystem 7.0 ofrece a sus usuarios están:

- Proporciona una visión global del rendimiento del sistema
- Evalúa las sensibilidades de parámetros ayudando a las especificaciones de tolerancia de diseño.
- Presenta visualmente las opciones de diseño y los escenarios a los clientes potenciales.
- Ofrece acceso directo a conjuntos extensos de datos de caracterización del sistema.
- Proporciona barrido automático de parámetros y optimización.
- Se integra con la familia de productos Optiwave (Optiwave Inc., 2018).

3.2. Índices de rendimiento.

3.2.1. Tasa de error de bit (BER).

Es un parámetro clave que se utiliza para evaluar sistemas que transmiten datos digitales de una ubicación a otra, los sistemas para los cuales el BER es aplicable incluyen enlaces de datos de radio, así como sistemas de datos de fibra óptica, ethernet o cualquier sistema que transmita datos a través de una red de alguna forma donde el ruido, la interferencia y la fluctuación de fase puedan causar la degradación de la señal digital.

Cuando la información se transmite a través de un enlace de datos, existe la posibilidad de que se introduzcan errores en el sistema. Si se generan errores en los datos, la integridad del sistema puede verse comprometida. Como resultado, es necesario evaluar el rendimiento del sistema, y la tasa de errores de bits proporciona una forma ideal para lograrlo (Radio-Electronics Inc., 2019).

A diferencia de muchas otras formas de evaluación, el BER toma en cuenta el rendimiento completo de un sistema que incluye el transmisor, el receptor y el medio. De esta manera permite probar el rendimiento real de un sistema en operación, en lugar de probar los componentes y esperar que funcionen satisfactoriamente cuando estén en su lugar.

Como su nombre lo indica, una tasa de error de bits se define como la tasa a la que se producen los errores en un sistema de transmisión. Esto se puede traducir directamente a la cantidad de errores que ocurren en una cadena de una cantidad determinada de bits. La definición de tasa de error de bits se puede traducir en una fórmula simple:

$$\text{Tasa de Error de Bit (BER)} = \frac{\text{Número de errores}}{\text{Total de bits enviados}}$$

Si el medio entre el transmisor y el receptor es bueno y la relación señal/ruido es alta, entonces la tasa de errores de bits será muy pequeña, posiblemente insignificante y no tendrá un efecto notable en el sistema en general. Sin embargo, si se puede detectar ruido, hay posibilidad de que la tasa de error de bits tendrá que ser considerada. Las principales razones de la degradación de un canal de datos y la tasa de error de bits correspondiente, es el ruido y los cambios en la ruta de propagación (Radio-Electronics Inc., 2019). Por lo general, estas variaciones pueden ser generadas por fotodiodos y amplificadores que necesitan responder a cambios muy pequeños y, como resultado, hay altos niveles de ruido presentes (Radio-Electronics Inc., 2019). Otro factor que contribuye a los

errores de bit es cualquier fluctuación de fase que pueda estar presente en el sistema, pues esto altera el muestreo de los datos.

3.2.2. Factor Q.

El factor de calidad o factor Q es una medida adimensional que representa cómo están amortiguadas las oscilaciones. El factor de calidad más alto muestra una menor tasa de pérdida de energía. El factor Q se usa ampliamente para especificar el rendimiento del receptor, pues va de la mano con la relación señal/ruido requerida para lograr una tasa de error de bit específica. En particular, tiene en cuenta que en los sistemas de fibra óptica las variaciones en las potencias de ruido generalmente son diferentes para los impulsos lógicos 0 y 1 recibidos. (Kadhim, 2016).

3.2.3. Diagrama de ojo.

El diagrama de ojo o patrón de ojo es un método utilizado para el análisis del comportamiento de los enlaces de transmisión. Permite analizar las formas de onda de los pulsos que se propagan en un enlace de comunicaciones, para lograr observar sus formas, desfases, etc. En telecomunicaciones un diagrama de ojo es una herramienta útil para el análisis de calidad de la señal utilizada en la transmisión digital. Proporciona una evaluación rápida del rendimiento del sistema y puede ofrecer información sobre la naturaleza de las imperfecciones del canal. Un análisis cuidadoso de esta pantalla visual puede dar al usuario una aproximación de primer orden de señal a ruido, fluctuación de la temporización del reloj y sesgo (Breed, 2015).

El diagrama del ojo es una pantalla de osciloscopio de una señal digital, muestreada repetidamente para obtener una buena representación de su comportamiento. En un sistema de radio, el punto de medición puede ser anterior al modulador en un transmisor, o después del demodulador en un receptor, dependiendo de qué parte del sistema requiere un estudio. El diagrama de ojo también se puede utilizar para examinar la integridad de la señal en un sistema puramente digital como la transmisión de fibra óptica, cables de red o en una placa de circuito (Breed, 2015).

3.3. Diseño de diferentes configuraciones de enlace FSO en OptiSystem.

El diseño básico del sistema FSO se modela y simula para la caracterización de su calidad utilizando OptiSystem 7.0. Hay varios parámetros del sistema para obtener el rendimiento óptimo. Medidas como la atenuación de canal de transmisión, longitud de onda y distancia de propagación del láser entre el canal FSO específico fueron consideradas. Dentro de los sistemas simulados y analizados constan configuraciones de 1, 4, 7 y 10 transmisores/receptores ópticos.

La primera configuración (1TX/1RX) está compuesta por el transmisor óptico que consta de cuatro bloques como se muestra en la figura 3.2. El primer bloque es el generador de secuencia binaria pseudoaleatoria (P-RBS). Este bloque representa la información o datos que se quiere transmitir. La salida de un generador P-RBS es un flujo de bits de pulsos binarios; una secuencia de "1" s (ON) o "0" s (OFF), de un patrón conocido y reproducible. El segundo bloque es el generador eléctrico de impulsos sin retorno a cero (NRZ). Este bloque codifica los datos del generador de PRBS utilizando la técnica de codificación NRZ. Un código de línea NRZ es un código binario en el que 1s están representados por una condición significativa, generalmente un voltaje positivo, mientras que los 0s están representados por alguna otra condición significativa, generalmente un voltaje negativo, sin otra condición neutral o de reposo. El tercer bloque en el transmisor óptico son láseres de retroalimentación de onda continua basados en la tecnología de semiconductores InGaAs (Arseniuro de indio y galio), desarrollados específicamente para sistemas de comunicaciones de fibra óptica debido a las características de baja atenuación de la fibra. El último bloque es el modulador Mach-Zehnder. Es un modulador óptico cuya función es variar la intensidad de la fuente de luz del láser de acuerdo con la salida del generador de impulsos NRZ, consta de dos uniones Y que proporcionan una división equitativa de la potencia óptica de entrada. Esta luz modulada se amplifica usando amplificadores ópticos antes de la transmisión. La ganancia del amplificador se establece a 20 dB.

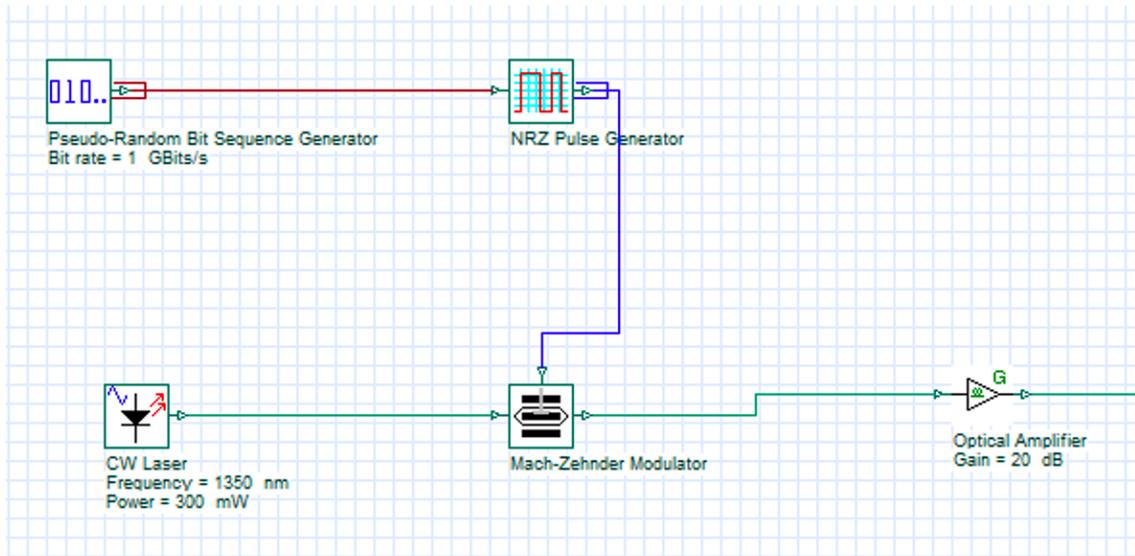


Figura 3. 2: Bloque transmisor de un sistema FSO.
Elaborado por: Autor

En el software OptiSystem utilizado, el canal FSO (figura 3.3) se considera como el medio de propagación para la luz transmitida, se encuentra entre un transmisor y un receptor óptico con un diámetro de apertura de 2.5 cm y 8 cm en cada extremo, respectivamente, mientras que la divergencia del haz (medida angular del incremento en el diámetro del haz con respecto a la distancia desde la apertura óptica o la apertura de la antena desde donde emerge el mismo) se establece en 2 mrad.

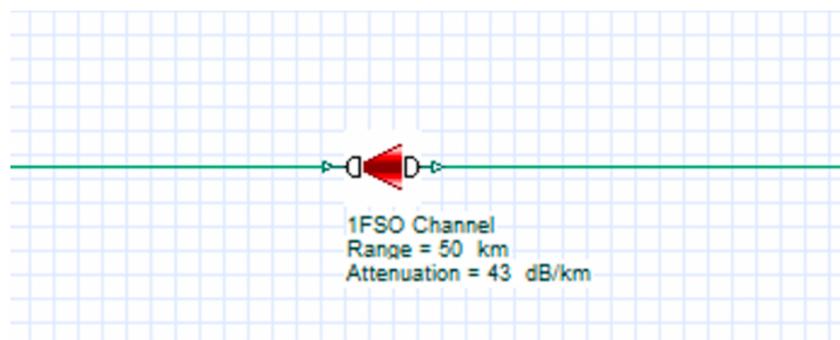


Figura 3. 3: Canal de propagación de un sistema FSO.
Elaborado por: Autor

El receptor óptico expuesto en la figura 3.4 consta de un amplificador frontal seguido de un fotodiodo de avalancha (APD), un filtro de paso bajo y un regenerador 3R. Un filtro de paso bajo (LPF) después del APD se usa para filtrar las señales de frecuencias más altas no deseadas. LPF de Bessel se utiliza con una frecuencia de corte de $0,75 \times$ Tasa de Bits de la señal. El regenerador 3R (remodelado, reordenamiento, regeneración) es el último

bloque en el receptor óptico. La función 3R es regenerar la señal eléctrica de la secuencia de bits original y la señal eléctrica modulada tal como en el transmisor óptico para ser usada para el análisis de BER. En otras palabras, normaliza la forma de onda de la señal. Esto es para permitir la retransmisión sin deterioro de la calidad de la señal entre zonas que están a más de 1 km de distancia o que no proporcionan una buena línea de vista.

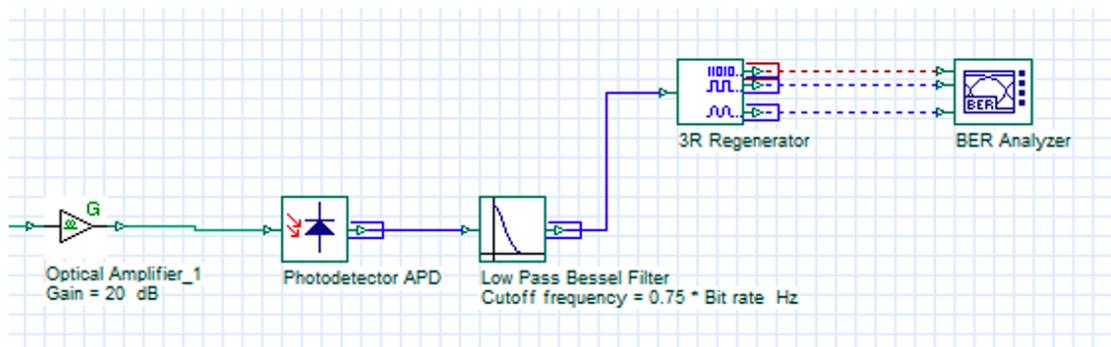


Figura 3. 4: Bloque receptor de un sistema FSO.
Elaborado por: Autor.

La figura 3.5 presenta en su totalidad un sistema FSO en la configuración 1TX/1RX, formado por los tres principales bloques antes mencionados: transmisor, canal y receptor.

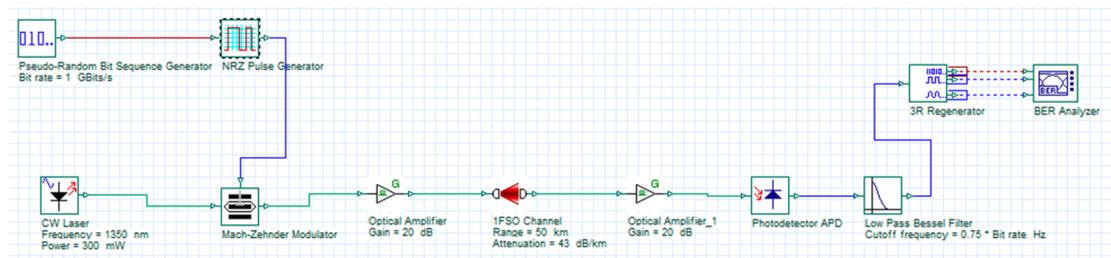


Figura 3. 5: Modelo de diseño de un sistema FSO de 1TX/1RX.
Elaborado por: Autor.

El segundo sistema FSO de 4TX/4RX (figura 3.6) consta de los mismos bloques mencionados anteriormente para la configuración de 1TX/1RX: transmisor, canal y receptor. La diferencia en este caso es el uso de un mayor número de enlaces, en específico 4, la inclusión dentro del transmisor de un bifurcador 1x4 que aumenta el número de puertos de salida (4), de modo que cada una de las señales de este, posean el mismo valor que la señal de salida del bloque anterior conectado a él, y un combinador de potencia 4x1 en el lado de recepción, que acopla todas las señales recibidas.

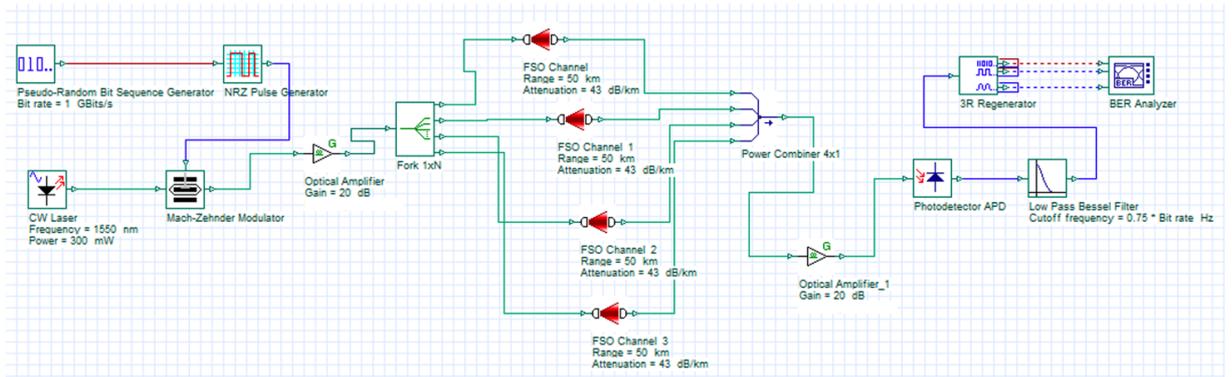


Figura 3. 6: Modelo de diseño de un sistema FSO de 4TX/4RX.
Elaborado por: Autor.

La tercera configuración presentada en la figura 3.7 es la de 7TX/7RX la cual nuevamente esta conformada por los mismos componentes ya indicados. En este sistema el número de enlaces incrementa a 7, de nuevo se halla la instalación de un bifurcador 1x7 en el transmisor y un combinador de potencia 7x1 en el receptor.

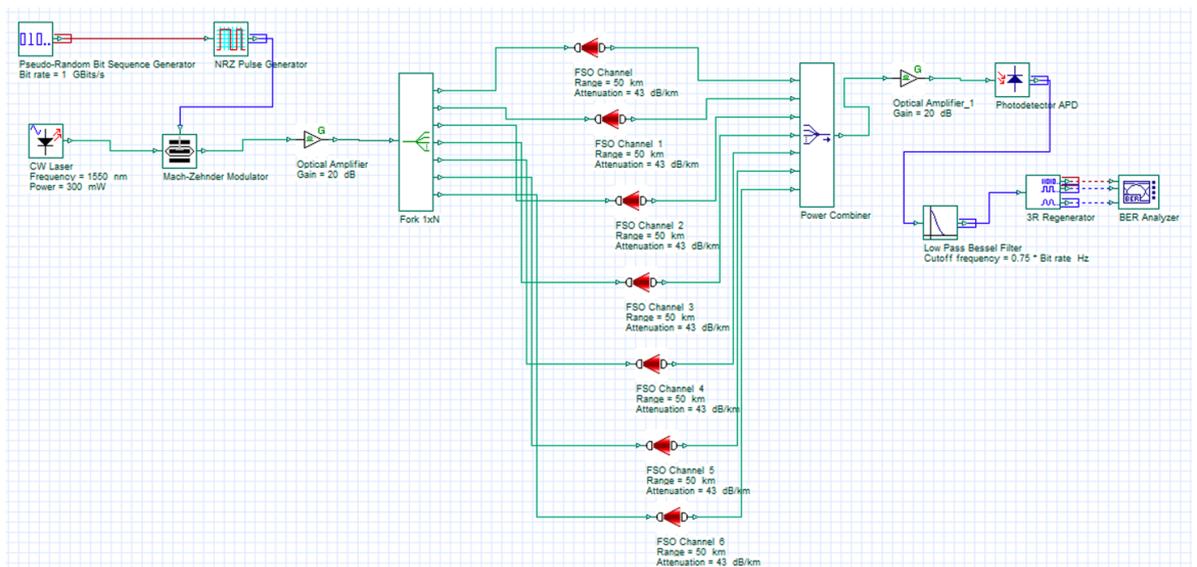


Figura 3. 7: Modelo de diseño de un sistema FSO de 7TX/7RX.
Elaborado por: Autor.

El cuarto y último sistema analizado es el compuesto por 10 transmisores y 10 receptores ópticos como lo muestra la figura 3.8. Está constituido por bloques iguales a los previamente mencionados. Aquí el número de enlaces asciende a 10 por lo que se usa un bifurcador 1x10 y un combinador de potencia 10x1 para enlazar nuevamente la señal captada.

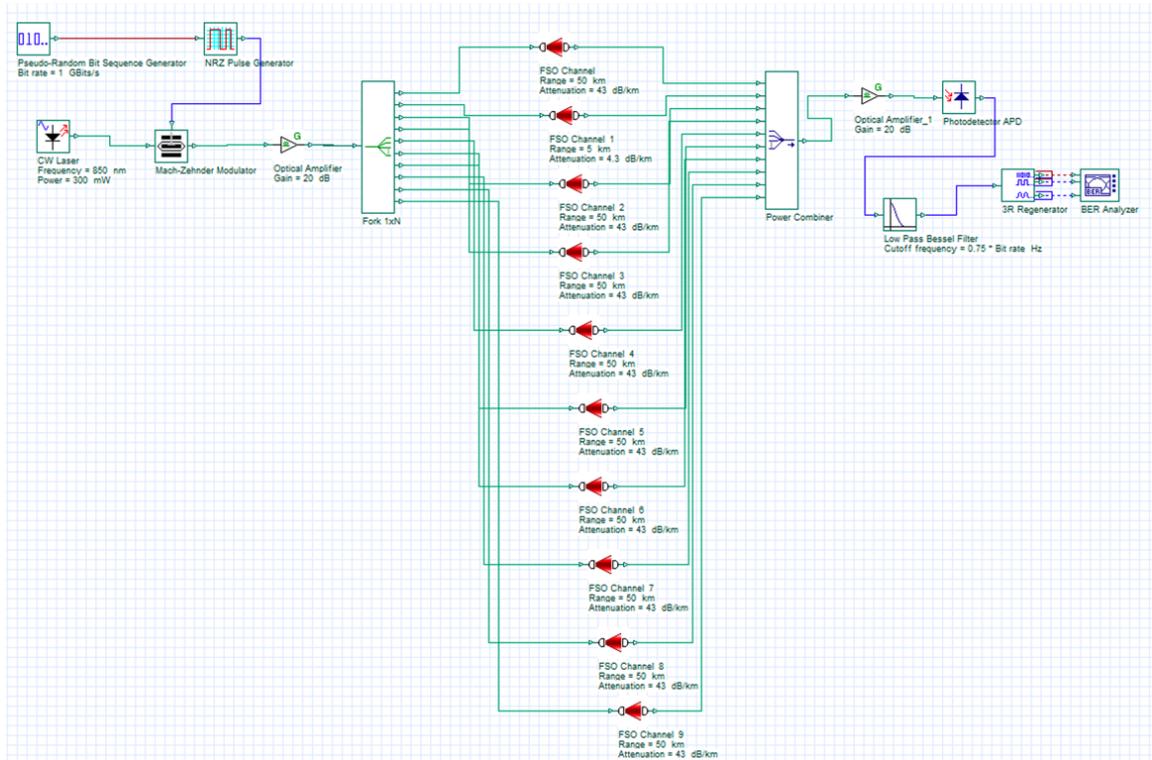


Figura 3. 8: Modelo de diseño de un sistema FSO de 10TX/10RX.
Elaborado por: Autor.

3.3. Análisis de resultados.

La tabla 3.1 muestra los resultados obtenidos durante la ejecución de las simulaciones diseñadas en OptiSystem para diferentes valores de longitud de onda $\lambda_1 = 850$ nm, $\lambda_2 = 1350$ nm y $\lambda_3 = 1550$ nm a varias distancias de propagación para una atenuación de 0.43 dB/Km, correspondiente a clima despejado, todo esto para el escenario de simulación de 1 transmisor y 1 receptor óptico con una tasa de transmisión de 1Gbps y una potencia de transmisor de 300mW (figura 3.5). Se observa que el factor Q decrece a medida que la distancia de propagación aumenta. Se distingue que en ambientes despejados este sistema funciona sin problemas. Se denota también que la longitud de onda posee una tendencia inversamente proporcional en relación con el factor Q. Tomando en cuenta lo anterior, es preferible trabajar con longitudes de onda entre 850 y 1350 nm, y en esta configuración particular, hasta la vecindad de los 30 Km, pues existe mayor inestabilidad en el enlace a mayores distancias de propagación.

Tabla 3. 1: Resultados para diferentes parámetros dentro de la simulación de 1TX/1RX con una atenuación de 0.43dB/Km.

Longitud de Onda [nm]	1km		5km		10km		30km		50km	
	Factor Q	Min. BER	Factor Q	Min. BER						
850	101.691	0	100.839	0	99.0026	0	68.1387	0	11.6206	1.35531E-31
1350	101.691	0	100.839	0	99.0026	0	68.1387	0	11.6206	1.35531E-31
1550	101.449	0	95.6879	0	77.049	0	14.9146	8.03104E-51	2.25398	8.03104E-51

Elaborado por: Autor.

A continuación, la figura 3.9 muestra el diagrama de ojo y el factor Q para la configuración de 1TX/1RX a 0.43 dB/Km de atenuación, a varias distancias de propagación.

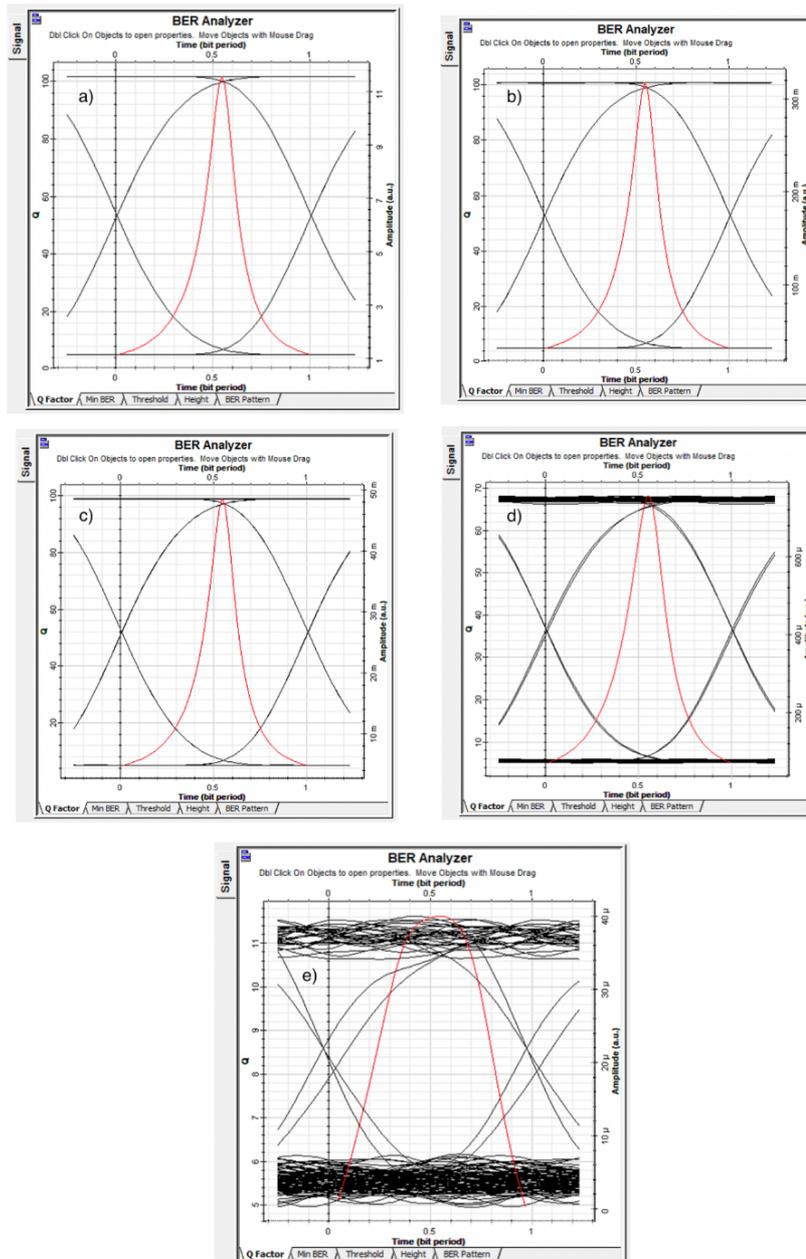


Figura 3. 9: Diagrama de ojo y factor Q para 1TX/1RX con longitud de onda de 850nm y 0.43dB/Km a a) 1Km, b) 5Km, c) 10Km, d) 30Km y e) 50Km.

Elaborado por: Autor.

La figura 3.9a muestra la representación gráfica del factor Q y el diagrama de ojo de un sistema FSO de 1 transmisor y 1 receptor óptico, a una distancia de propagación de 1 Km, longitud de onda de 850 nm y con una atenuación de 0.43 decibelios por kilómetro. Se aprecia que el factor Q toma un valor de 101.691 y expone un diagrama de ojo libre de inconsistencias. La figura 3.9b presenta las mismas características anteriores, a diferencia de la distancia de propagación situada a 5 Km, aquí el factor Q disminuye a 100.839 pero el diagrama de ojo mantiene su buen estado. La figura 3.9c nuevamente muestra las características antes mencionadas, pero con 10 Km de distancia de enlace, el factor Q en este caso es de 99.0026 y el diagrama de ojos sigue excelente. La figura 3.9d así mismo mantiene las particularidades anteriores, pero a 30 Km de longitud de enlace, en esta situación el factor Q decae considerablemente hasta un valor de 68.1387 y revela un diagrama de ojo con poca inconsistencia. Por último, se presenta la figura 3.9e, de nuevo con las características previas, pero a una distancia de enlace de 50 Km, en este escenario el factor Q empeora hasta llegar a un valor de 11.6206 mostrando un diagrama de ojo bastante inestable. Este patrón y relación entre las diversas variables se mantiene a lo largo de las demás simulaciones realizadas para longitudes de onda de 1350 y 1550 nm, como lo exhiben las figuras a.1 y a.4 del anexo.

La tabla 3.2, expone los resultados obtenidos de las simulaciones diseñadas para diferentes valores de longitud de onda $\lambda_1 = 850$ nm, $\lambda_2 = 1350$ nm y $\lambda_3 = 1550$ nm a varias distancias de propagación para una atenuación de 4.3 dB/Km, correspondiente a un clima con calima (fenómeno meteorológico consistente en la presencia en la atmósfera de partículas muy pequeñas de polvo, cenizas, arcilla o arena en suspensión), todo esto nuevamente para el escenario de simulación de 1 transmisor y 1 receptor óptico con una tasa de transmisión de 1Gbps y una potencia de transmisor de 300mW (figura 3.5). Como en el caso anterior, se denota que el factor Q posee una relación inversamente proporcional con la distancia de propagación, la longitud de onda y con los nuevos valores obtenidos se distingue que con la atenuación también conversa esta correlación. En un ambiente con calima este sistema funciona sin problemas hasta la vecindad

de los 5 Km, de nuevo, es preferible trabajar con longitudes de onda entre 850 y 1350 nm.

Tabla 3. 2: Resultados para diferentes parámetros dentro de la simulación de 1TX/1RX con una atenuación de 4.3dB/Km.

Longitud de Onda [nm]	1 Km		5 Km		10 Km		30 Km		50 Km	
	Factor Q	Min. BER	Factor Q	Min. BER	Factor Q	Min. BER	Factor Q	Min. BER	Factor Q	Min. BER
850	101.601	0	88.6346	0	2.52834	0.00481927	0	1	0	1
1350	101.601	0	88.6346	0	2.52834	0.00481927	0	1	0	1
1550	101.116	0	32.4431	1.9712E-231	0	1	0	1	0	1

Elaborado por: Autor.

A continuación, la figura 3.10 exhibe el diagrama de ojo y el factor Q para la configuración de 1TX/1RX con una atenuación de 4.3 dB/Km, a varias distancias de propagación.

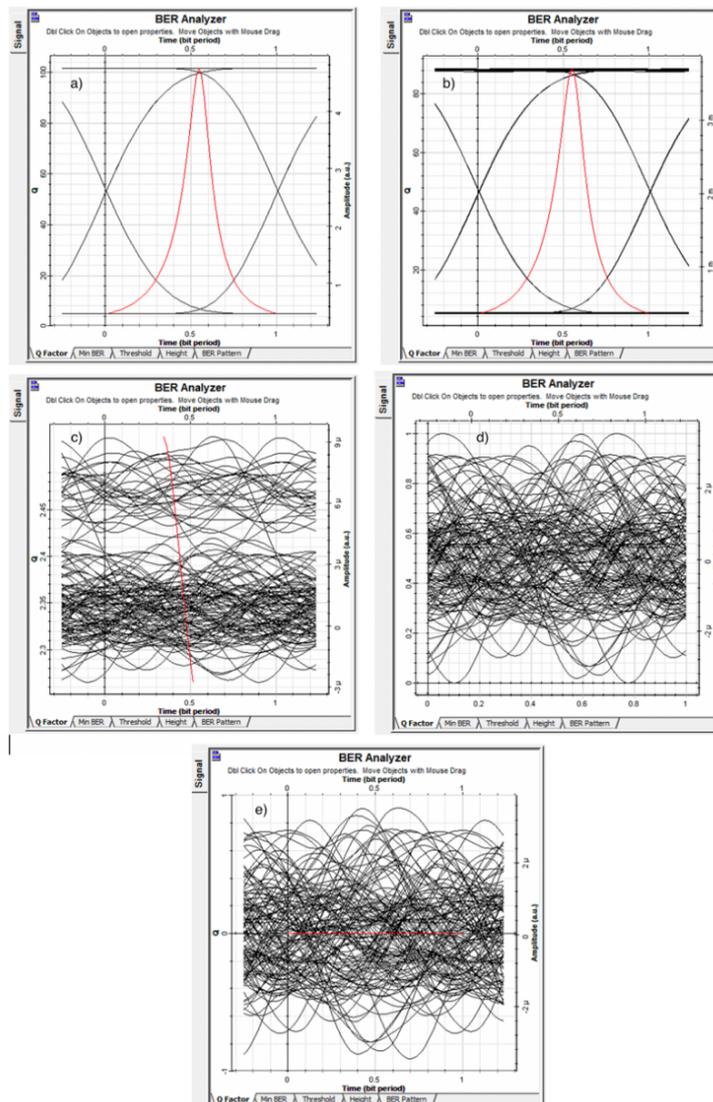


Figura 3. 10: Diagrama de ojo y factor Q para 1TX/1RX con longitud de onda de 850nm y 4.3dB/Km a a) 1Km, b) 5Km, c) 10Km, d) 30Km y e) 50Km.

Elaborado por: Autor.

La figura 3.10a presenta la gráfica del factor Q y el diagrama de ojo de un sistema FSO de 1 transmisor y 1 receptor óptico, a una distancia de propagación de 1 Km, longitud de onda de 850 nm y con una atenuación de 4.3 decibelios por kilómetro. El factor Q adquiere un valor de 101.601 y expone un diagrama de ojo libre de inconsistencias. La figura 3.10b muestra las mismas características anteriores, a diferencia de la distancia de propagación situada a 5 Km, aquí el factor Q disminuye a 88.63 pero el diagrama de ojo mantiene su buen estado. La figura 3.10c nuevamente muestra las características antes mencionadas, pero con 10 Km de distancia de enlace, el factor Q en este caso decae hasta 2.52 y el diagrama de ojos se vuelve totalmente inestable. Las figuras 3.10d y 3.10e también mantienen las particularidades anteriores, pero a 30 Km y 50 Km de longitud de enlace respectivamente, en estas situaciones el factor Q se torna 0 y revelan un diagrama de ojo completamente inconsistente. Este patrón se mantiene a lo largo de las demás simulaciones para longitudes de onda de 1350 y 1550 nm, como lo muestran las figuras a.2 y a.5 del anexo.

La tabla 3.3, exhibe los resultados obtenidos durante la ejecución de las simulaciones diseñadas para valores de longitud de onda $\lambda_1 = 850$ nm, $\lambda_2 = 1350$ nm y $\lambda_3 = 1550$ nm a varias distancias de propagación para 43 dB/Km de atenuación correspondiente a un clima con niebla, todo esto para el escenario 1TX/1RX con una tasa de transmisión de 1Gbps y una potencia de transmisor de 300mW (figura 3.5). Se observa nuevamente que el factor Q conserva una relación inversamente proporcional con las diversas variables mencionadas en los casos anteriores. Se distingue que con la presencia de calima este sistema funciona aceptablemente hasta la vecindad de 1 Km de longitud de enlace con longitudes de onda de 850 nm y 1350 nm. Los resultados inconsistentes a mayores longitudes de propagación de las tablas 3.1, 3.2 y 3.3 son la razón por la que se utiliza mayor cantidad de transmisores/receptores ópticos, situación que se analiza más adelante.

Tabla 3. 3: Resultados para diferentes parámetros dentro de la simulación de 1TX/1RX con una atenuación de 43dB/Km.

Longitud de Onda [nm]	1 Km		5 Km		10 Km		30 Km		50 Km	
	Factor Q	Min. BER	Factor Q	Min. BER	Factor Q	Min. BER	Factor Q	Min. BER	Factor Q	Min. BER
850	65.2563	0	0	1	0	1	0	1	0	1
1350	65.2563	0	0	1	0	1	0	1	0	1
1550	13.773	1.1325E-43	0	1	0	1	0	1	0	1

Elaborado por: Autor

A continuación, la figura 3.11 exhibe el diagrama de ojo y el factor Q para la configuración de 1TX/1RX con una atenuación de 43 dB/Km, a varias distancias de propagación.

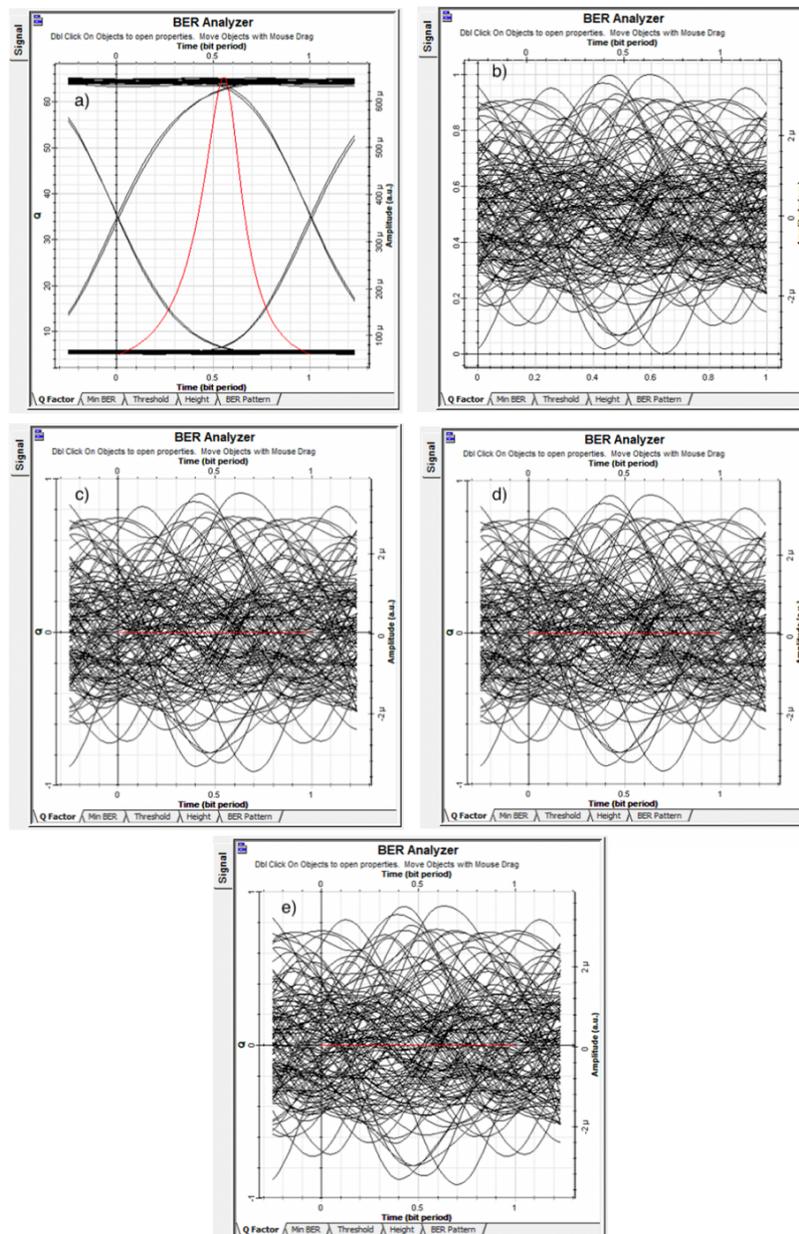


Figura 3. 11: Diagrama de ojo y factor Q para 1TX/1RX con longitud de onda de 850nm y 43dB/Km a a) 1Km, b) 5Km, c) 10Km, d) 30Km y e) 50Km.

Elaborado por: Autor.

La figura 3.11a expone la representación gráfica del factor Q y el diagrama de ojo de un sistema FSO 1TX/1RX, a una distancia de propagación de 1 Km, longitud de onda de 850 nm y con una atenuación de 43 dB/Km. Se aprecia que el factor Q toma un valor de 65.25 y expone un diagrama de ojo libre de inestabilidad. Las figuras 3.11b, 3.11c, 3.11d y 3.11e presentan las mismas características anteriores, a diferencia de las distancias de propagación ubicadas a 5 Km, 10 Km, 30 Km y 50 Km respectivamente, en estas situaciones el factor Q decae completamente hasta un valor de 0 y revelan un diagrama de ojo totalmente inconsistente. Este esquema y dependencia entre las diversas variables se mantiene a lo largo de las demás simulaciones realizadas para longitudes de onda de 1350 y 1550 nm como lo exhiben las figuras a.3 y a.6 del anexo.

Para los casos anteriores y los mencionados en el anexo, los valores de BER promedio para las simulaciones a las diferentes longitudes de onda y distancias de propagación expuestas en la tabla 3.1, 3.2 y 3.3, con atenuaciones de 0.43 dB/Km, 4.3 dB/Km y 43 dB/Km son $1.81E-32$, 0.47 y 0.8 respectivamente, así se denota que la tasa de error de bit decae a mayor distancia de propagación y atenuación. Cabe recalcar que el máximo valor de BER para un enlace funcional es de 10^{-9} . Por otra parte, los diagramas de ojo muestran mucha inestabilidad a mayor distancia de propagación y longitud de onda en comparación con el resto de los casos.

La figura 3.12 muestra un resumen del sistema FSO de 1 transmisor y 1 receptor a través de varias atenuaciones, longitudes de onda y distancias de propagación, se denota que el enlace permanece estable a menor atenuación y a menor distancia, como lo es el caso de 0.43 dB/Km, que hasta distancias de propagación en la vecindad de 10Km, posee valores de factor Q constantes aproximados a 100.

Al cambiar la cantidad de transmisores y receptores ópticos se obtienen otra serie de resultados, tal como se muestran en las tablas 3.4, 3.5 y 3.6.

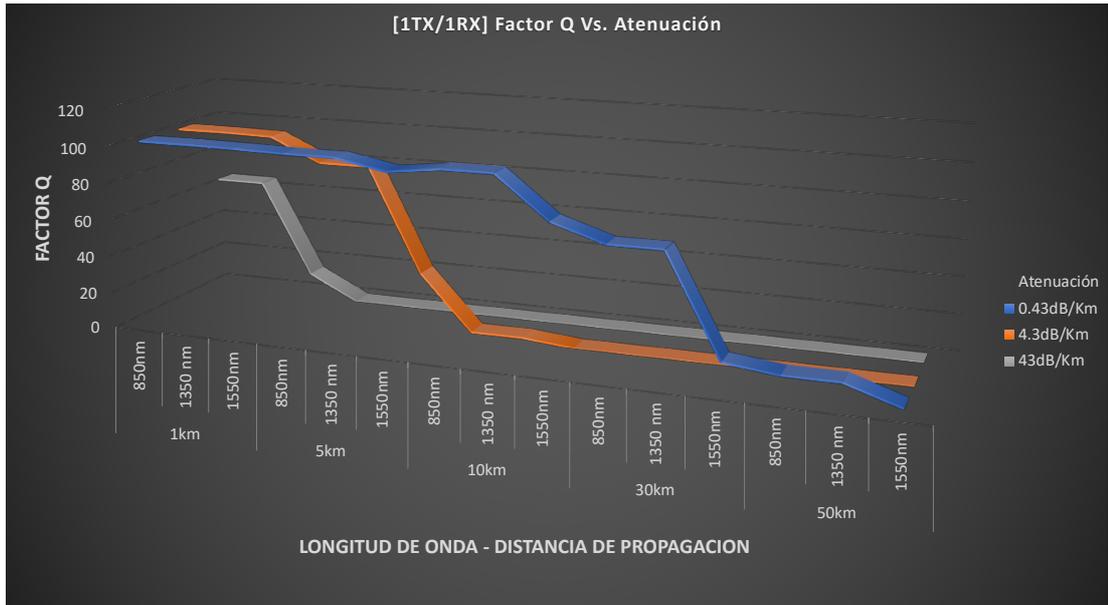


Figura 3. 12: Factor Q Vs. Atenuación de un sistema FSO de 1 transmisor y 1 receptor óptico.
Elaborado por: Autor.

La tabla 3.4, expone los resultados obtenidos de la simulación diseñada en OptiSystem (figura 3.6) para diferentes valores de longitud de onda, $\lambda_1 = 850 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 1350 \text{ nm}$ y $\lambda_3 = 1550 \text{ nm}$ nuevamente a diversas distancias de propagación para una atenuación de 0.43 dB/Km correspondiente a un clima despejado, para el escenario de simulación con 4TX/4RX manteniendo una tasa de transmisión de 1Gbps y una potencia de transmisor de 300mW. Se denota que el factor Q de nuevo guarda una relación inversamente proporcional con la distancia de propagación, la atenuación y la longitud de onda. Tomando en cuenta lo anterior, es preferible trabajar con longitudes de onda entre 850 y 1350 nm, y en esta configuración particular, hasta la vecindad de los 30 Km.

Tabla 3. 4: Resultados para diferentes parámetros dentro de la simulación de 4TX/4RX con una atenuación de 0.43dB/Km.

Longitud de Onda [nm]	1 Km		5 Km		10 Km		30 Km		50 Km	
	Factor Q	Min. BER	Factor Q	Min. BER						
850	101.77	0	101.362	0	100.533	0	86.8159	0	33.5469	3.7449E-247
1350	101.77	0	101.362	0	100.533	0	86.8159	0	33.5469	3.7449E-247
1550	101.69	0	99.8677	0	92.7131	0	29.4641	2.40796E-191	5.98383	7.78296E-10

Elaborado por: Autor.

A continuación, la figura 3.13 muestra el diagrama de ojo y el factor Q para la configuración de 4TX/4RX con una atenuación de 0.43 dB/Km, a varias distancias de propagación.

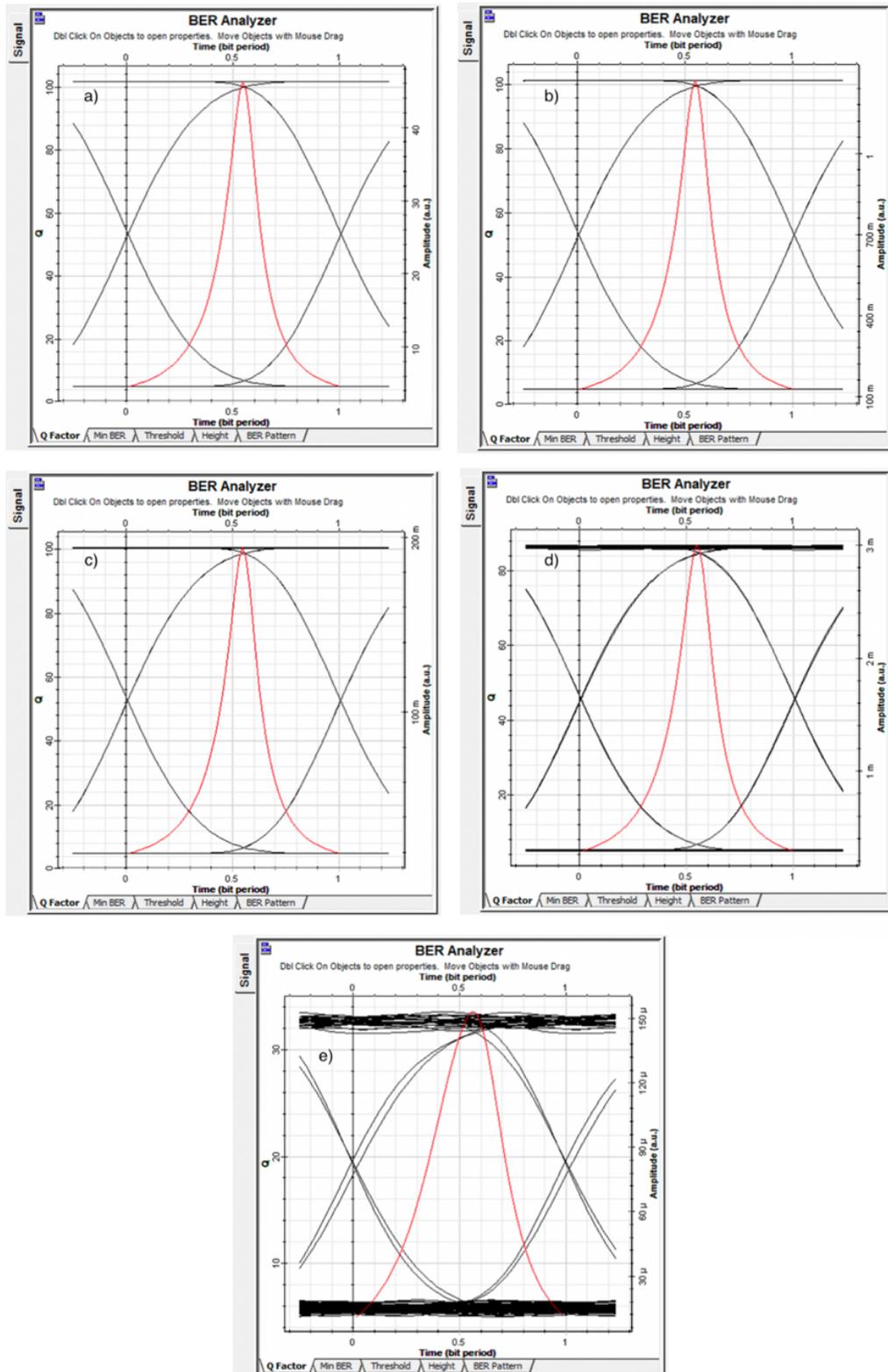


Figura 3. 13: Diagrama de ojo y BER para 4TX/4RX con longitud de onda de 850nm y 0.43dB/Km a a) 1Km, b) 5Km, c) 10Km, d) 30Km y e) 50Km.

Elaborado por: Autor.

La figura 3.13a expone el esquema del factor Q y el diagrama de ojo de un sistema FSO de 4 transmisores y 4 receptores ópticos, a una distancia de propagación de 1 Km, longitud de onda de 850 nm y con una atenuación de 0.43 dB/Km. Se observa que el factor Q toma un valor de 101.77 y expone un diagrama de ojo libre de inconsistencias. La figura 3.13b exhibe las mismas características anteriores, pero la distancia de propagación está situada a 5 Km, aquí el factor Q disminuye a 101.362 y el diagrama de ojo mantiene un buen estado. La figura 3.13c nuevamente muestra las características antes mencionadas, a diferencia de que a 10 Km se establece la distancia de enlace, el factor Q en este caso es de 100.533 y el diagrama de ojos sigue excelente. La figura 3.13d así mismo mantiene los detalles anteriores, pero a 30 Km de longitud de enlace, en esta situación el factor Q decae hasta un valor de 86.8159 y revela un diagrama de ojo totalmente estable. Por último, se presenta la figura 3.13e de nuevo con las características previas, pero a una distancia de enlace de 50 Km, en este escenario el factor Q empeora hasta llegar a un valor de 33.5469 mostrando un diagrama de ojo con poca interferencia. Este modelo y dependencia entre las diversas variables se conserva a lo largo de las demás simulaciones de sistemas realizadas para longitudes de onda de 1350 y 1550 nm como lo exhiben las figuras a.7 y a.10 del anexo.

La tabla 3.5, presenta los resultados de la simulación (figura 3.6) para diferentes valores de longitud de onda, $\lambda_1 = 850$ nm, $\lambda_2 = 1350$ nm y $\lambda_3 = 1550$ nm de nuevo, a diferentes distancias de propagación para una atenuación de 4.3 dB/Km correspondiente a un clima con calima, para el escenario de simulación con 4TX/4RX manteniendo una tasa de transmisión de 1Gbps y una potencia de transmisor de 300mW. Se denota que el factor Q nuevamente mantiene una relación inversamente proporcional con la distancia de propagación, atenuación y la longitud de onda. Según los datos anteriores, es preferible trabajar con longitudes de onda entre 850 y 1350 nm, y en esta configuración particular, hasta la vecindad de los 5 Km, pues existe mayor inestabilidad en el enlace a mayores distancias de propagación.

Tabla 3. 5: Resultados para diferentes parámetros dentro de la simulación de 4TX/4RX con una atenuación de 4.3dB/Km.

Longitud de Onda [nm]	1 Km		5 Km		10 Km		30 Km		50 Km	
	Factor Q	Min. BER	Factor Q	Min. BER	Factor Q	Min. BER	Factor Q	Min. BER	Factor Q	Min. BER
850	101.725	0	96.1391	0	8.64145	2.22765E-18	0	1	0	1
1350	101.725	0	96.1391	0	8.64145	2.22765E-18	0	1	0	1
1550	101.575	0	56.0043	0	0	1	0	1	0	1

Elaborado por: Autor.

A continuación, la figura 3.14 exhibe el diagrama de ojo y el factor Q para la configuración de 4TX/4RX con una atenuación de 4.3 dB/Km, a varias distancias de propagación.

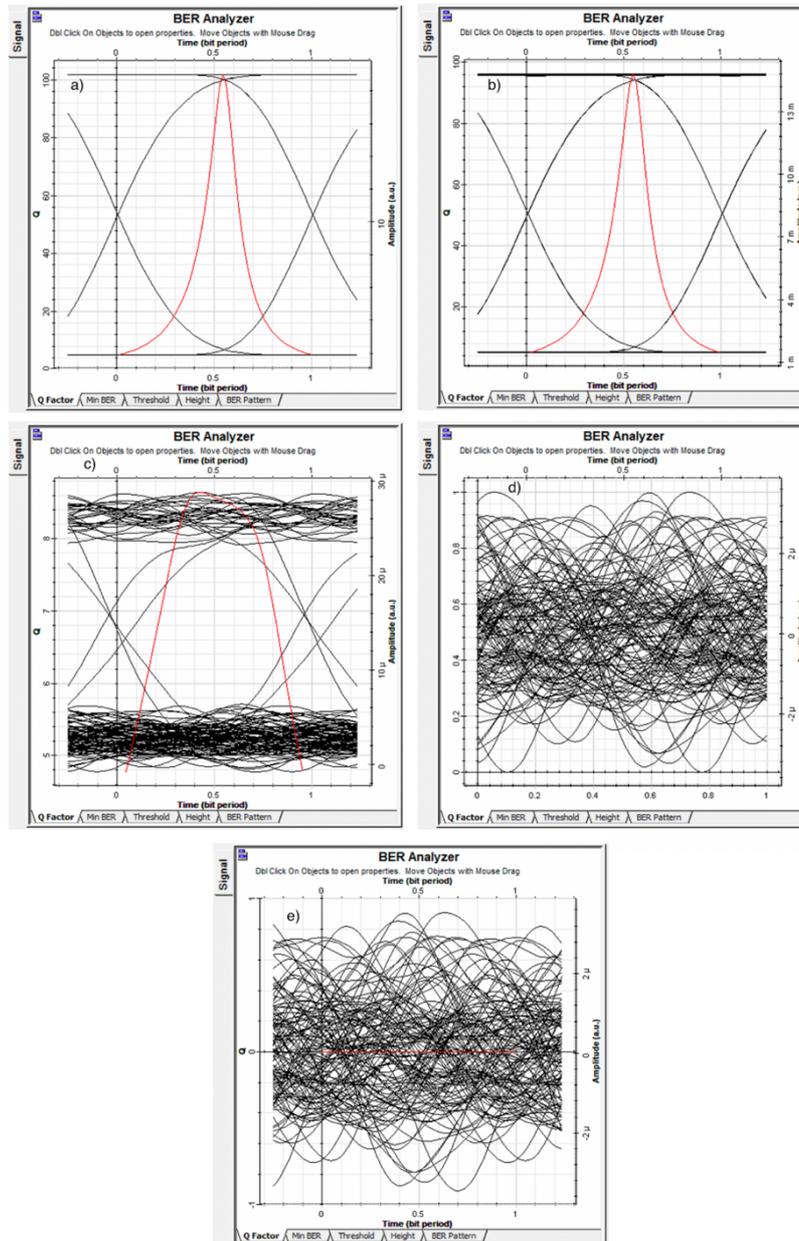


Figura 3. 14: Diagrama de ojo y BER para 4TX/4RX con longitud de onda de 850nm y 4.3dB/Km a a) 1Km, b) 5Km, c) 10Km, d) 30Km y e) 50Km.

Elaborado por: Autor.

La figura 3.14a muestra la gráfica del factor Q y el diagrama de ojo de un sistema FSO 4TX/4RX, a una distancia de propagación de 1 Km, longitud de onda de 850 nm y con una atenuación de 4.3 decibelios por kilómetro. El factor Q adquiere un valor de 101.725 y expone un diagrama de ojo libre de inconsistencias. La figura 3.14b mantiene las características anteriores, a diferencia de la distancia de propagación situada a 5 Km, aquí el factor Q disminuye a 96.13 pero el diagrama de ojo conserva su buen estado. La figura 3.14c nuevamente muestra las características antes mencionadas, pero con 10 Km de distancia de enlace, el factor Q en este caso decae hasta 8.64 y el diagrama de ojos se vuelve inestable. Las figuras 3.14d y 3.14e también poseen las particularidades anteriores, pero a 30 Km y 50 Km de longitud de enlace respectivamente, en estas situaciones el factor Q se torna 0 y revelan un diagrama de ojo completamente inconsistente. Este patrón se mantiene a lo largo de las demás simulaciones para longitudes de onda de 1350 y 1550 nm, como lo muestran las figuras a.8 y a.11 del anexo.

La tabla 3.6, expone los resultados de la simulación (figura 3.6) para longitudes de onda, $\lambda_1 = 850$ nm, $\lambda_2 = 1350$ nm y $\lambda_3 = 1550$ nm, a diferentes distancias de propagación para una atenuación de 43 dB/Km correspondiente a un clima con niebla, para el escenario de simulación con 4TX/4RX manteniendo una tasa de transmisión de 1Gbps y una potencia de transmisor de 300mW. Se observa que el factor Q nuevamente conserva una relación inversamente proporcional con la distancia de propagación, la atenuación y la longitud de onda. Tomando en cuenta lo anterior, es preferible trabajar con longitudes de onda entre 850 y 1350 nm, y en esta configuración particular, hasta la vecindad de 1 Km, pues existe mayor inestabilidad en el enlace a mayores distancias de propagación.

Tabla 3. 6: Resultados para diferentes parámetros dentro de la simulación de 4TX/4RX con una atenuación de 43dB/Km.

Longitud de Onda [nm]	1 Km		5 Km		10 Km		30 Km		50 Km	
	Factor Q	Min. BER	Factor Q	Min. BER	Factor Q	Min. BER	Factor Q	Min. BER	Factor Q	Min. BER
850	85.3682	0	0	1	0	1	0	1	0	1
1350	85.3682	0	0	1	0	1	0	1	0	1
1550	27.45721	1.65305E-166	0	1	0	1	0	1	0	1

Elaborado por: Autor.

A continuación, la figura 3.15 muestra el diagrama de ojo y el factor Q para la configuración de 4TX/4RX con una atenuación de 43 dB/Km, a varias distancias de propagación.

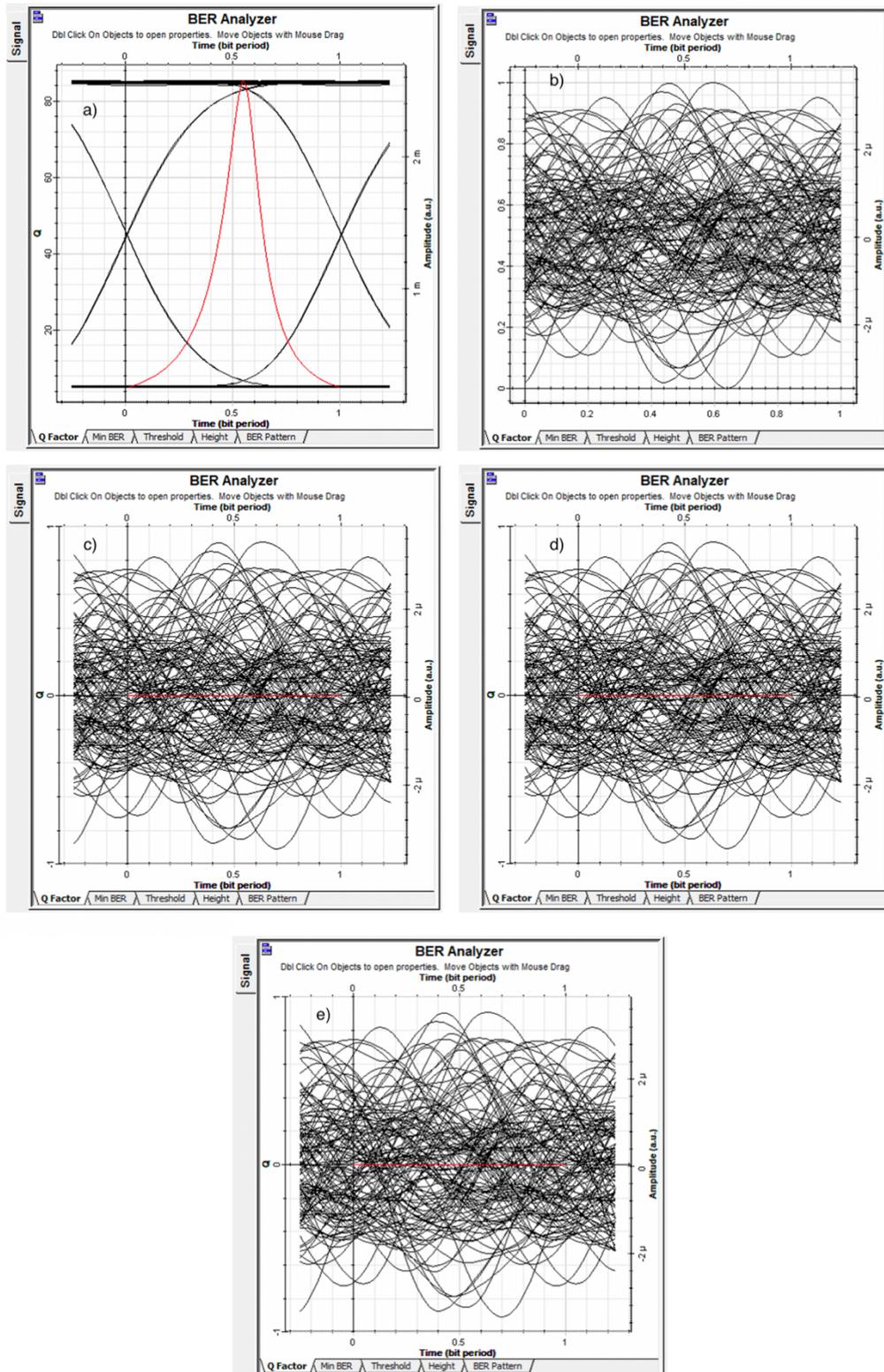


Figura 3. 15: Diagrama de ojo y BER para 4TX/4RX con longitud de onda de 850nm y 43dB/Km a a) 1Km, b) 5Km, c) 10Km, d) 30Km y e) 50Km.

Elaborado por: Autor.

La figura 3.15a presenta la gráfica del factor Q y el diagrama de ojo de un sistema FSO 4TX/4RX, a una distancia de propagación de 1 Km, longitud de onda de 850 nm y con una atenuación de 43 dB/Km. Se aprecia que el factor Q toma un valor de 85.36 y expone un diagrama de ojo libre de inestabilidad. Las figuras 3.15b, 3.15c, 3.15d y 3.15e presentan las mismas características anteriores, a diferencia de las distancias de propagación situadas a 5 Km, 10 Km, 30 Km y 50 Km respectivamente, en estos escenarios el factor Q decae completamente hasta un valor de 0 y revelan un diagrama de ojo enteramente inconsistente. Este esquema y dependencia entre las variables mencionadas se mantiene a lo largo de las demás simulaciones realizadas para longitudes de onda de 1350 y 1550 nm como lo exhiben las figuras a.9 y a.12 del anexo.

La figura 3.16 muestra una síntesis del sistema FSO de 4 transmisores/4 receptores ópticos a través de distintas atenuaciones, longitudes de onda y distancias de propagación, se denota nuevamente que el enlace permanece estable a menor atenuación y a menor distancia, en el caso de 0.43 dB/Km, que hasta trayectos de propagación en la vecindad de ahora 30Km, arroja resultados de factor Q constantes aproximados a 86.

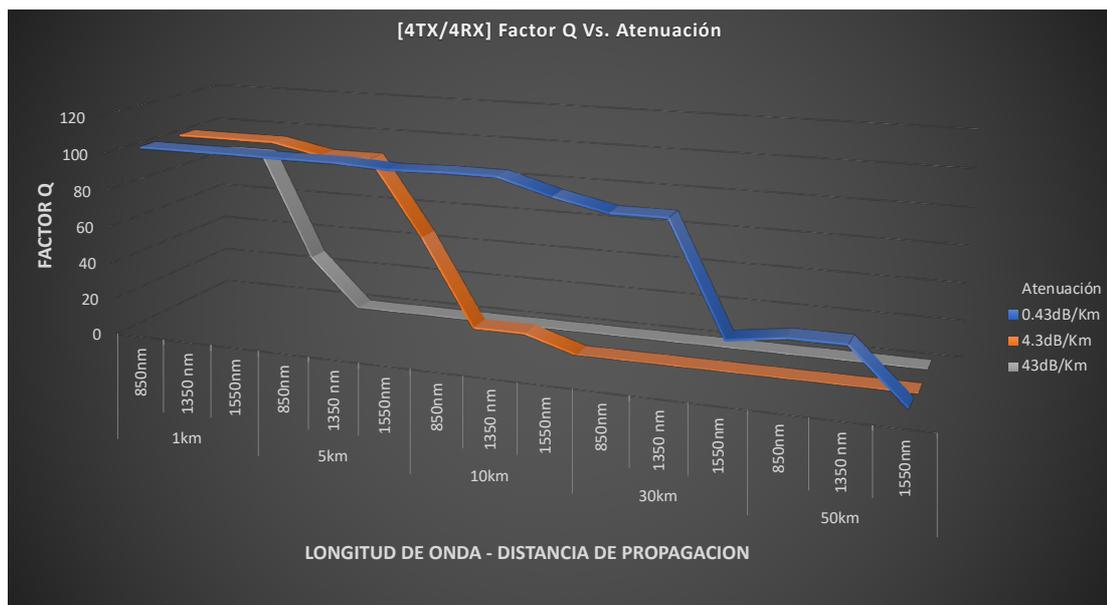


Figura 3. 16: Factor Q Vs. Atenuación de un sistema FSO de 4 transmisores y 4 receptores ópticos.

Elaborado por: Autor.

La tabla 3.7, provee resultados de la simulación diseñada en OptiSystem (figura 3.7) para los diferentes valores de longitud de onda ($\lambda_1 = 850$ nm, $\lambda_2 = 1350$ nm y $\lambda_3 = 1550$ nm) y una atenuación de 0.43 dB/Km, correspondiente a un ambiente despejado para el escenario de simulación de 7 transmisores y 7 receptores ópticos, conservando una tasa de transmisión de 1Gbps y una potencia de transmisor de 300mW. Se denota que el factor Q nuevamente mantiene una relación inversamente proporcional con la distancia de propagación, la atenuación y la longitud de onda. Tomando en cuenta lo anterior, es preferible nuevamente trabajar con longitudes de onda entre 850 y 1350 nm, y en esta configuración particular, hasta la vecindad de los 50 Km.

Tabla 3. 7: Resultados para diferentes parámetros dentro de la simulación de 7TX/7RX con una atenuación de 0.43dB/Km.

Longitud de Onda [nm]	1 Km		5 Km		10 Km		30 Km		50 Km	
	Factor Q	Min. BER	Factor Q	Min. BER						
850	101.789	0	101.484	0	100.875	0	91.1463	0	45.9223	0
1350	101.789	0	101.484	0	100.875	0	91.1463	0	45.9223	0
1550	101.736	0	100.58	0	96.0305	0	37.7283	4.99464e-312	8.37811	1.79587E-17

Elaborado por: Autor.

La tabla 3.8, expone los resultados de la simulación (figura 3.7) planteada en para los diferentes valores de longitud de onda antes usados y 4.3 dB/Km de atenuación para un ambiente con calima en el escenario de simulación de 7 transmisores y 7 receptores, a una tasa de transmisión de 1Gbps y una potencia de transmisor de 300mW. Se observa que el factor Q conserva una relación inversamente proporcional con la distancia de propagación, la atenuación y la longitud de onda. Según lo anterior, es mejor operar con longitudes de onda entre 850 y 1350 nm, y en esta configuración específica, hasta la vecindad de los 10 Km.

Tabla 3. 8: Resultados para diferentes parámetros dentro de la simulación de 7TX/7RX con una atenuación de 4.3dB/Km.

Longitud de Onda [nm]	1 Km		5 Km		10 Km		30 Km		50 Km	
	Factor Q	Min. BER	Factor Q	Min. BER	Factor Q	Min. BER	Factor Q	Min. BER	Factor Q	Min. BER
850	101.755	0	97.7489	0	13.956	1.20547E-44	0	1	0	1
1350	101.755	0	97.7489	0	13.956	1.20547E-44	0	1	0	1
1550	101.659	0	66.3639	0	2.65765	0.00317989	0	1	0	1

Elaborado por: Autor.

La tabla 3.9, presenta resultados de la simulación (figura 3.7) ejecutada para los diversos valores de longitud de onda antes usados y 43 dB/Km de atenuación para un ambiente en este caso con niebla en el escenario de simulación de 7TX/7RX, a 1Gbps de tasa de transmisión y una potencia de 300mW de trasmisor. Se aprecia que el factor Q guarda una relación inversamente proporcional con las variables mencionadas en los casos anteriores. Tomando en cuenta la información obtenida, es más eficiente trabajar con longitudes de onda entre 850 y 1350 nm, y para esta configuración específica, enlaces hasta la vecindad de 1 Km.

Tabla 3. 9: Resultados para diferentes parámetros dentro de la simulación de 7TX/7RX con una atenuación de 43dB/Km.

Longitud de Onda [nm]	1 Km		5 Km		10 Km		30 Km		50 Km	
	Factor Q	Min. BER	Factor Q	Min. BER	Factor Q	Min. BER	Factor Q	Min. BER	Factor Q	Min. BER
850	90.1067	0	0	1	0	1	0	1	0	1
1350	90.1067	0	0	1	0	1	0	1	0	1
1550	35.3419	3.89469E-274	0	1	0	1	0	1	0	1

Elaborado por: Autor.

En las graficas del factor Q y diagrama de ojo de este modelo (7TX/7RX), la dependencia entre las diversas variables se conserva, tal como en las configuraciones anteriores, a lo largo de las simulaciones para longitudes de onda de 850, 1350 y 1550 nm con atenuaciones de 0.43 dB/Km, 4.3 dB/Km y 43 dB/Km, como lo exhiben las figuras a.13 hasta a.21 del anexo. Se observa que, a diferencia de la configuración expuesta en la figura 3.5 (1TX/1RX), esta configuración a distancias de propagación mayores a 10 Km y atenuación de 4.3 dB/Km, se vuelve altamente inconsistente.

La figura 3.17 expone un compendio de los resultados obtenidos dentro del sistema FSO de 7 transmisores y 7 receptores ópticos con distintas atenuaciones, longitudes de onda y distancias de propagación, el enlace conserva su estabilidad a menor atenuación, distancia y longitud de onda, en este caso, los resultados con valores de atenuación de 0.43 dB/Km, mantienen nuevamente la solidez hasta distancias de enlace en la vecindad de 30Km, con un factor Q de 91.

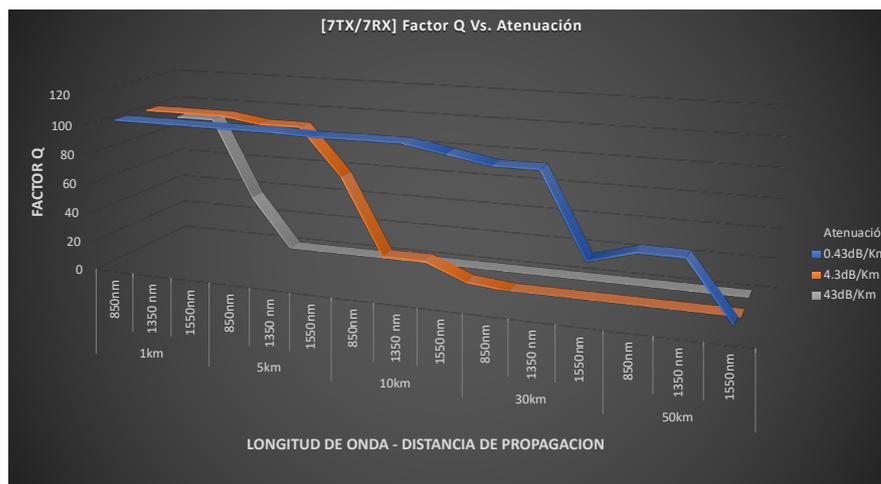


Figura 3. 17: Factor Q Vs. Atenuación de un sistema FSO de 7 transmisores y 7 receptores ópticos.
Elaborado por: Autor.

La tabla 3.10 muestra resultados para una configuración de 10TX/10RX, se observa que las variables mencionadas en las tablas anteriores conservan el mismo patrón, bajo las mismas características de las diferentes configuraciones realizadas previamente, en este caso con una atenuación de 0.43 dB/Km.

Tabla 3. 10: Resultados para diferentes parámetros dentro de la simulación de 10TX/10RX con una atenuación de 0.43dB/Km.

Longitud de Onda [nm]	1 Km		5 Km		10 Km		30 Km		50 Km	
	Factor Q	Min. BER								
850	101.793	0	101.52	0	101.015	0	96.3624	0	89.7304	0
1350	101.793	0	101.52	0	101.015	0	96.3624	0	89.7304	0
1550	101.747	0	100.767	0	97.2739	0	57.2399	0	34.5518	3.90519E-262

Elaborado por: Autor.

La tabla 3.11 expone resultados para una configuración nuevamente de 10TX/10RX, se denota que las variables indicadas en las tablas anteriores conservan el mismo modelo, bajo las mismas características de las diferentes configuraciones realizadas previamente, pero con una atenuación de 4.3 dB/Km.

Tabla 3. 11: Resultados para diferentes parámetros dentro de la simulación de 10TX/10RX con una atenuación de 4.3dB/Km.

Longitud de Onda [nm]	1 Km		5 Km		10 Km		30 Km		50 Km	
	Factor Q	Min. BER	Factor Q	Min. BER	Factor Q	Min. BER	Factor Q	Min. BER	Factor Q	Min. BER
850	101.763	0	99.0097	0	87.0046	0	84.245	0	84.245	0
1350	101.763	0	99.0097	0	87.0046	0	84.245	0	84.245	0
1550	101.678	0	77.1247	0	29.7471	5.47566E-197	26.0768	1.93336E-150	26.0768	1.93653E-150

Elaborado por: Autor.

Por último, la tabla 3.12 expone resultados para una configuración nuevamente de 10TX/10RX, las variables indicadas en las tablas anteriores conservan el mismo patrón, bajo las características previas de las diferentes configuraciones realizadas, en esta ocasión con una atenuación de 43 dB/Km.

Tabla 3. 12: Resultados para diferentes parámetros dentro de la simulación de 10TX/10RX con una atenuación de 43dB/Km.

Longitud de Onda [nm]	1 Km		5 Km		10 Km		30 Km		50 Km	
	Factor Q	Min. BER	Factor Q	Min. BER	Factor Q	Min. BER	Factor Q	Min. BER	Factor Q	Min. BER
850	96.0495	0	84.245	0	84.245	0	84.245	0	84.245	0
1350	96.0495	0	84.245	0	84.245	0	84.245	0	84.245	0
1550	55.5226	0	26.0768	1.93653E-150	26.0768	1.93653E-150	26.0768	1.93653E-150	26.0768	1.93653E-150

Elaborado por: Autor.

Según los datos obtenidos en las tablas 3.10, 3.11 y 3.12, es más eficaz operar de nuevamente con longitudes de onda entre 850 y 1350 nm, y en este arreglo de 10TX/10RX, hasta la vecindad de los 50 Km.

En las graficas del factor Q y diagrama de ojo de este modelo de 10 transmisores y 10 receptores ópticos, la relación de proporcionalidad entre las diversas variables se conserva, tal como en las configuraciones anteriores, a lo largo de las simulaciones para longitudes de onda de 850, 1350 y 1550 nm con atenuaciones de 0.43 dB/Km, 4.3 dB/Km y 43 dB/Km, como lo exhiben las figuras a.22 hasta a.29 del anexo. Se distingue que esta configuración sufre de inestabilidad a mayor escala para la longitud de onda de 1550 nm a partir de los 4.3 dB/Km de atenuación de enlace, se denota también que los valores del factor Q a esta longitud de onda decrecen abruptamente, generando diversos picos como se muestra en la figura 3.18.

La figura 3.18 resume los resultados para un sistema FSO de 10TX/10RX a través de las distintas atenuaciones, longitudes de onda y distancias de propagación ya mencionadas, en el caso de los resultados del escenario con atenuación de 0.43 dB/Km, se observa que permiten trayectos de propagación hasta la vecindad de los 50Km, con un factor de calidad aproximado de 86.

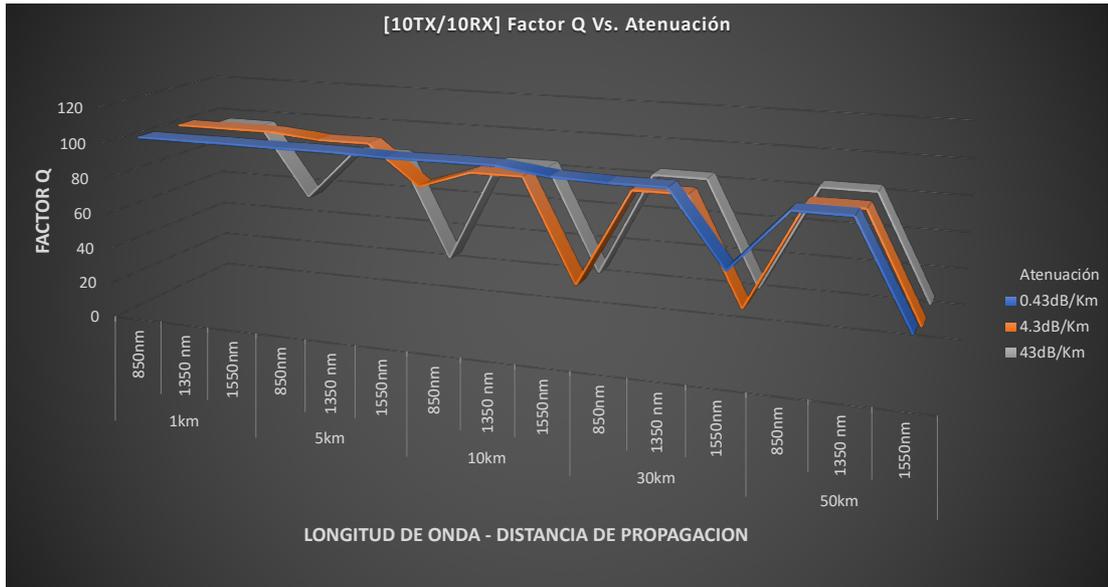


Figura 3. 18: Factor Q Vs. Atenuación de un sistema FSO de 10 transmisores y 10 receptores ópticos.
Elaborado por: Autor.

Los datos previamente recopilados y los anexos correspondientes muestran que, los valores de BER promedio para las simulaciones de 4TX/4RX con una atenuación de 0.43 dB/Km, 4.3 dB/Km y 43 dB/Km son 5.19E-11, 0.47 y 0.8 respectivamente, para el sistema de 7TX/7RX son 1.2E-18, 0.4 y 0.8, mientras que para la configuración de 10TX/10RX son 2.6E-263, 2.6E-151 y 5.2E-151, a partir de estos resultados se denota nuevamente que la tasa de error de bit empeora a mayor distancia de propagación y atenuación. Por otra parte, los diagramas de ojo muestran abundante inestabilidad e inconsistencia a mayor distancia de propagación y longitud de onda, aspecto que en las diversas configuraciones previamente presentadas también se origina.

Los resultados de todas las tablas anteriores denotan, que el factor Q decrece a medida que la distancia de propagación aumenta, misma relación que guarda con la longitud de onda. Con un ambiente despejado estos sistemas funcionan sin inconveniente, pero cuando el clima se deteriora, el enlace decae, pero no con la misma intensidad que un sistema 1TX/1RX. En el caso de la tabla 3.4 (4TX/4RX) los resultados del factor Q para una longitud de onda $\lambda_1 = 850$ nm aumentan un promedio de 17.79%, para la tabla 3.7 (7TX/7RX) aumentan un promedio de 20.51% y para la tabla 3.10

(10TX/10RX) aumentan un promedio de 23.82%, con relación a los valores de la tabla 3.1 (1TX/1RX), estos valores se muestran en la figura 3.19.

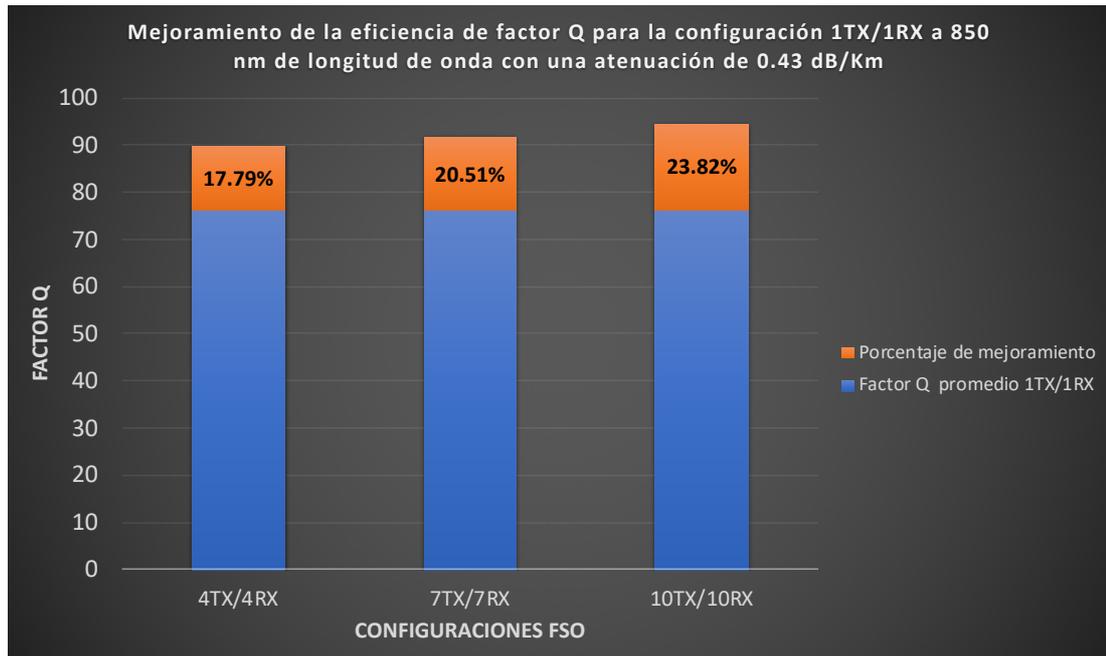


Figura 3. 19: Mejoramiento de la eficiencia de factor Q para la configuración 1TX/1RX a 0.43 dB/Km.
Elaborado por: Autor

Con el uso de una mayor cantidad de transmisores y receptores se logra mejorar la transmisión de información, pero se debe tener en cuenta el costo de esta infraestructura al momento de ser implementada, es así como tomando en cuenta lo establecido anteriormente se expresa que el sistema de 4TX/4RX es el más eficiente en tanto a la relación costo/calidad de servicio pues, el porcentaje de incremento del factor Q en relación con las configuraciones de 7TX/7RX y 10TX/10RX es relativamente semejante.

Dentro del tema económico cabe señalar que, los trasmisores láser que operan a longitud de onda de ~800 nm tienen un coste considerablemente menor de aproximadamente 33% en comparación a los de mayor longitud como lo es el caso de 1300 – 1500 nm (figura 3.20).

Se observa que los resultados conseguidos en los valores del factor Q para longitudes de onda $\lambda_1 = 850$ nm y $\lambda_2 = 1350$ nm en todas las diferentes configuraciones de transmisores y receptores son muy cercanos o en la

mayor parte de los casos, iguales. Estos resultados tienen concordancia pues van de la mano con los valores que una curva de atenuación de fibra óptica expone, por tanto, su primera (820 a 880 nm) y segunda (1285-1350 nm) ventana de transmisión se encuentran considerablemente próximas una a otra.

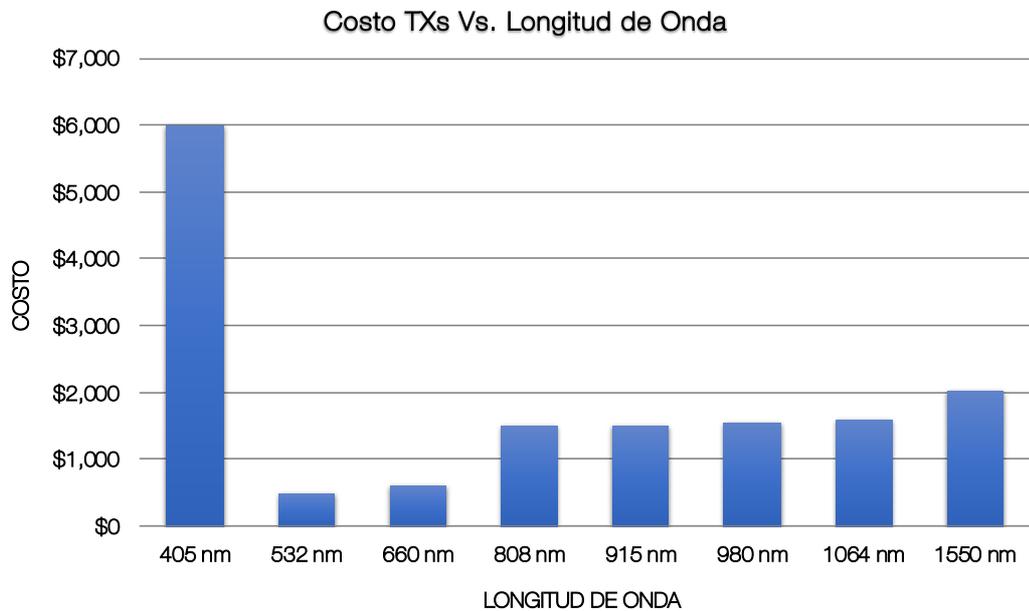


Figura 3. 20: Costo Vs. Longitud de onda de trasmisores láser.
Fuente: (Laser Diode Source Inc., 2019)

Por último, otro aspecto que se denota a partir de los resultados alcanzados es que, gozando de buena visibilidad (línea de vista en un ambiente despejado), empleando la cantidad óptima de trasmisores/receptores dentro de la vecindad de los 30 Km y usando longitudes de onda entre 850 y 1350 se logra establecer un enlace exitoso, pues con distancias de propagación y longitudes de onda mayores, el factor Q, BER y diagrama de ojo se tornan inestables.

CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

4.1. Conclusiones.

- Es posible alcanzar mayores distancias de propagación si se incorporan mayor cantidad de transmisores/receptores y se opera dentro de longitudes de onda entre $\lambda_1 = 850$ nm y $\lambda_2 = 1350$ nm.
- Con el sistema de 10TX/10RX se logró establecer enlaces a distancias de 50 Km libres de inconsistencias para los tres escenarios de atenuación.
- El sistema de 4TX/4RX es el más eficiente para enlaces en la vecindad de los 30 Km y con niveles de atenuación medios-bajos pues, el porcentaje de incremento del factor Q en relación con las configuraciones de 7TX/7RX y 10TX/10RX es comparativamente semejante.
- La tasa de error de bit (BER) y el factor Q en todos los casos expuestos en las diversas simulaciones empeora a medida que la distancia de propagación aumenta, esta misma proporcionalidad inversa se mantiene con respecto a la longitud de onda y la atenuación.

4.2. Recomendaciones.

- Utilizar la plataforma de simulación OptiSystem para el desarrollo de nuevas propuestas de modelado de sistemas de comunicación óptica a través del espacio libre (FSO).
- Ampliar el presente estudio para el modelado de sistemas ópticos en el espacio libre con un mayor número de transmisores/receptores y diferentes divergencias de haz, para estimar la conducta y rendimiento en distintos escenarios utilizando nuevas herramientas y componentes.

Bibliografía

- Agrawal, G. P. (2013). *Fiber-Optic Communication Systems* (4 edition). Wiley.
- Agrawal, G. P. (2016). Optical Communication: Its History and Recent Progress. En M. D. Al-Amri, M. El-Gomati, & M. S. Zubairy (Eds.), *Optics in Our Time* (pp. 177–199). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-31903-2_8
- Alferov, Z. (2014). Double heterostructure lasers: early days and future perspectives. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 6(6), 832–840. <https://doi.org/10.1109/2944.902131>
- Andrews, L. C., & Phillips, R. L. (2014). *Laser beam propagation through random media* (2nd ed). Bellingham, Wash: SPIE Press.
- Bader, O., & Harvey, L. (1996). Laser Safety and the Eye. Recuperado el 19 de noviembre de 2018, de <http://www.dermatology.org/laser/eyesafety.html>
- Breed, G. (2015). Analyzing Signals Using the Eye Diagram.
- CIE. (2018). CIE | International Commission on Illumination / Commission internationale de l'Eclairage / Internationale Beleuchtungskommission. Recuperado el 21 de noviembre de 2018, de <http://www.cie.co.at/>
- Da-Shan Shiu, & Kahn, J. M. (2013). Differential pulse-position modulation for power-efficient optical communication. *IEEE Transactions on Communications*, 47(8), 1201–1210. <https://doi.org/10.1109/26.780456>
- Department Of Telecommunications Government Of India. (2014). Free Space Optics (FSO): A Communication Technology, 7.

- Dsouza, A. (2016). AN-D's Journal: Visible Light Communication - VLC & PureVLC™ [Visible light communication - VLC & PureVLC]. Recuperado el 31 de octubre de 2018, de <http://andy96877.blogspot.com/p/visible-light-communication-vlc-is-data.html>
- Franz, J. H., & Jain, V. K. (2012). *Optical communications components and systems: analysis, design, optimization, application*. Boca Raton, FL: CRC Press/Narosa Pub. House.
- fSONA Communications Corporation. (2018). fSONA: free Space Optical Networking Architecture. Recuperado el 11 de diciembre de 2018, de <http://www.fsona.com/>
- Hecht, J. (2013). *City of light: the story of fiber optics* (Rev. and expanded ed). Oxford; New York: Oxford University Press.
- Hemmati, H. (Ed.). (2006). *Deep space optical communications*. Hoboken, N.J: Wiley-Interscience.
- Hemmati, H. (Ed.). (2015). *Near-Earth laser communications*. Boca Raton: CRC Press.
- Jangir, P., Suman, B., & Chaudhary, R. (2014). Free Space Optical Interconnects Security Aspects of Future High Speed Technology. *International Journal of Computer Applications*, 95(11), 39–42. <https://doi.org/10.5120/16642-6612>
- Jurado-Navas, A., Garrido-Balsells, J. M., Paris, J. F., Castillo-Vázquez, M., & Puerta-Notario, A. (2013). Impact of pointing errors on the performance of generalized atmospheric optical channels. *Optics Express*, 20(11), 12550. <https://doi.org/10.1364/OE.20.012550>
- Kadhim, D. S. A. (2016). Characterization Study and Simulation of MIMO Free Space Optical Communication under Different Atmospheric Channel, 3(8), 9.

- Kao, K. C., & Hockham, G. A. (2014). Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies, *133*(3), 8.
- Kapron, F. P., Keck, D. B., & Maurer, R. D. (2014). Radiation losses in glass optical waveguides. *Applied Physics Letters*, *17*(10), 423–425. <https://doi.org/10.1063/1.1653255>
- Kaushal, H., Jain, V. K., & Kar, S. (2017a). FSO System Modules and Design Issues. En H. Kaushal, V. K. Jain, & S. Kar, *Free Space Optical Communication* (pp. 91–118). New Delhi: Springer India. https://doi.org/10.1007/978-81-322-3691-7_3
- Kaushal, H., Jain, V. K., & Kar, S. (2017b). Overview of Wireless Optical Communication Systems. En H. Kaushal, V. K. Jain, & S. Kar, *Free Space Optical Communication* (pp. 1–39). New Delhi: Springer India. https://doi.org/10.1007/978-81-322-3691-7_1
- Kazemlou, S., Hranilovic, S., & Kumar, S. (2013). All-Optical Multihop Free-Space Optical Communication Systems. *Journal of Lightwave Technology*, *29*(18), 2663–2669. <https://doi.org/10.1109/JLT.2011.2160615>
- Khadir, A. A., Dhahir, B. F., & Fu, X. (2014). Achieving Optical Fiber Communication Experiments by OptiSystem, 12.
- Laser Diode Source Inc. (2019). Pricing Guide for Buying Laser Diodes. Recuperado el 8 de febrero de 2019, de <https://www.laserdiodesource.com/how-much-does-a-laser-diode-cost>
- Leitgeb, E., Gebhart, M., & Birnbacher, U. (2016). Optical networks, last mile access and applications. En A. K. Majumdar & J. C. Ricklin, *Free-Space Laser Communications* (pp. 273–302). New York, NY: Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-0-387-28677-8_6

- LightPointe Inc. (2018). LightPointe Wireless Fiber-FSO: PTP Backhaul. Recuperado el 11 de diciembre de 2018, de <http://lightpointe.com/home.html>
- Miya, T., Terunuma, Y., Hosaka, T., & Miyashita, T. (2013). Ultimate low-loss single-mode fibre at 1.55 μm . *Electronics Letters*, 15(4), 106. <https://doi.org/10.1049/el:19790077>
- Newport Inc. (2018). Practical Uses and Applications of Electro-Optic Modulators. Recuperado el 17 de noviembre de 2018, de <https://www.newport.com/n/practical-uses-and-applications-of-electro-optic-modulators>
- Nobel Media. (2009). The Nobel Prize in Physics 2009. Recuperado el 28 de octubre de 2018, de <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2009/summary/>
- Optiwave Inc. (2018). OptiSystem Overview. Recuperado el 12 de enero de 2019, de <https://optiwave.com/optisystem-overview/>
- Radio-Electronics Inc. (2019). What is BER | Bit Error Rate. Recuperado el 25 de enero de 2019, de <https://radio-electronics.com/info/rf-technology-design/ber/bit-error-rate-tutorial-definition.php>
- Ritu Gupta, & Preeti Singh. (2017). Performance Analysis of FSO System for Different Fog Conditions. En R. Singh & S. Choudhury (Eds.), *Proceeding of International Conference on Intelligent Communication, Control and Devices* (Vol. 479, pp. 181–187). Singapore: Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-1708-7_20
- Saruchi Attri, Charu Narula, & Sanjiv Kumar. (2017). Performance Analysis of FSO Link Using CO-OFDM Under the Effect of Atmospheric Turbulence. En R. Singh & S. Choudhury (Eds.), *Proceeding of International Conference on Intelligent Communication, Control and Devices* (Vol. 479, pp. 167–172). Singapore: Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-1708-7_18

- Savage, N. (2002, agosto 1). Linking with Light. Recuperado el 10 de diciembre de 2018, de <https://spectrum.ieee.org/semiconductors/optoelectronics/linking-with-light>
- Snyder, A. W. (2000). Guiding light into the millennium. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 6(6), 1408–1412. <https://doi.org/10.1109/2944.902195>
- Son, I. K., & Mao, S. (2017). A survey of free space optical networks. *Digital Communications and Networks*, 3(2), 67–77. <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2016.11.002>
- Sood, P., Sharma, A., & C., C. (2018). Analysis of FSO System and its Challenges - A Review. *International Journal of Computer Applications*, 179(52), 42–45. <https://doi.org/10.5120/ijca2018917353>
- Yamamoto, T. (1998). Optical backplane with free-space optical interconnections using tunable beam deflectors and a mirror for bookshelf-assembled terabit per second class asynchronous transfer mode switch. *Optical Engineering*, 37(4), 1332. <https://doi.org/10.1117/1.601968>
- Yang, X., & Hechao, Y. (2014). The Application of OptiSystem in Optical Fiber Communication Experiments, 3.
- Yang Zhang, Youngil Park, ByungYeon Kim, & KiDoo Kim. (2013). Performance analysis of hybrid FSO/RF system. En *2013 Third International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)* (pp. 279–283). Dalian, China: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICUFN.2011.5949176>

Anexos

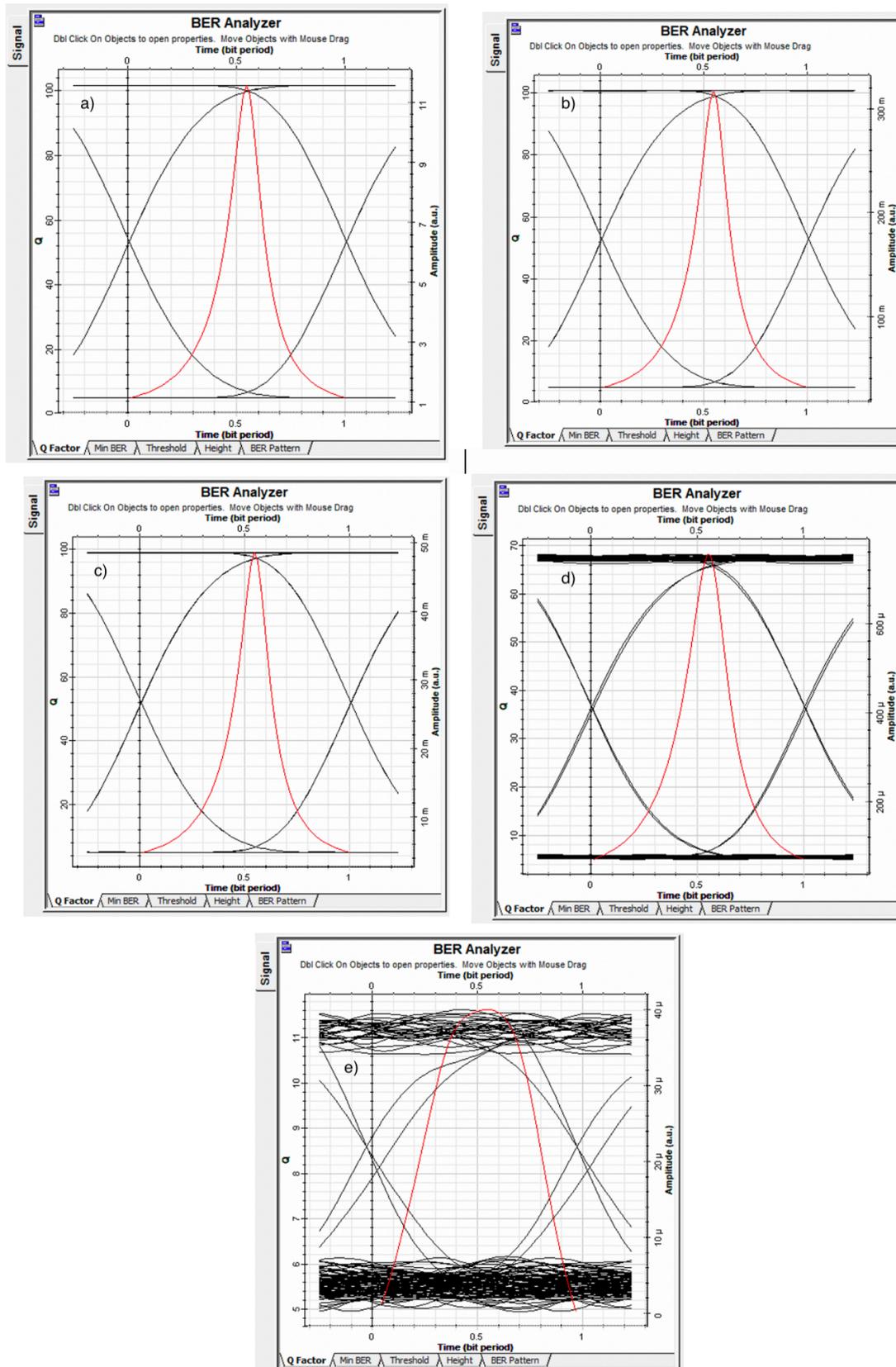


Figura a. 1: Diagrama de ojo y BER para 1TX/1RX con longitud de onda de 1350nm y 0.43dB/Km a a) 1Km, b) 5Km, c) 10Km, d) 30Km y e) 50Km.
Elaborado por: Autor.

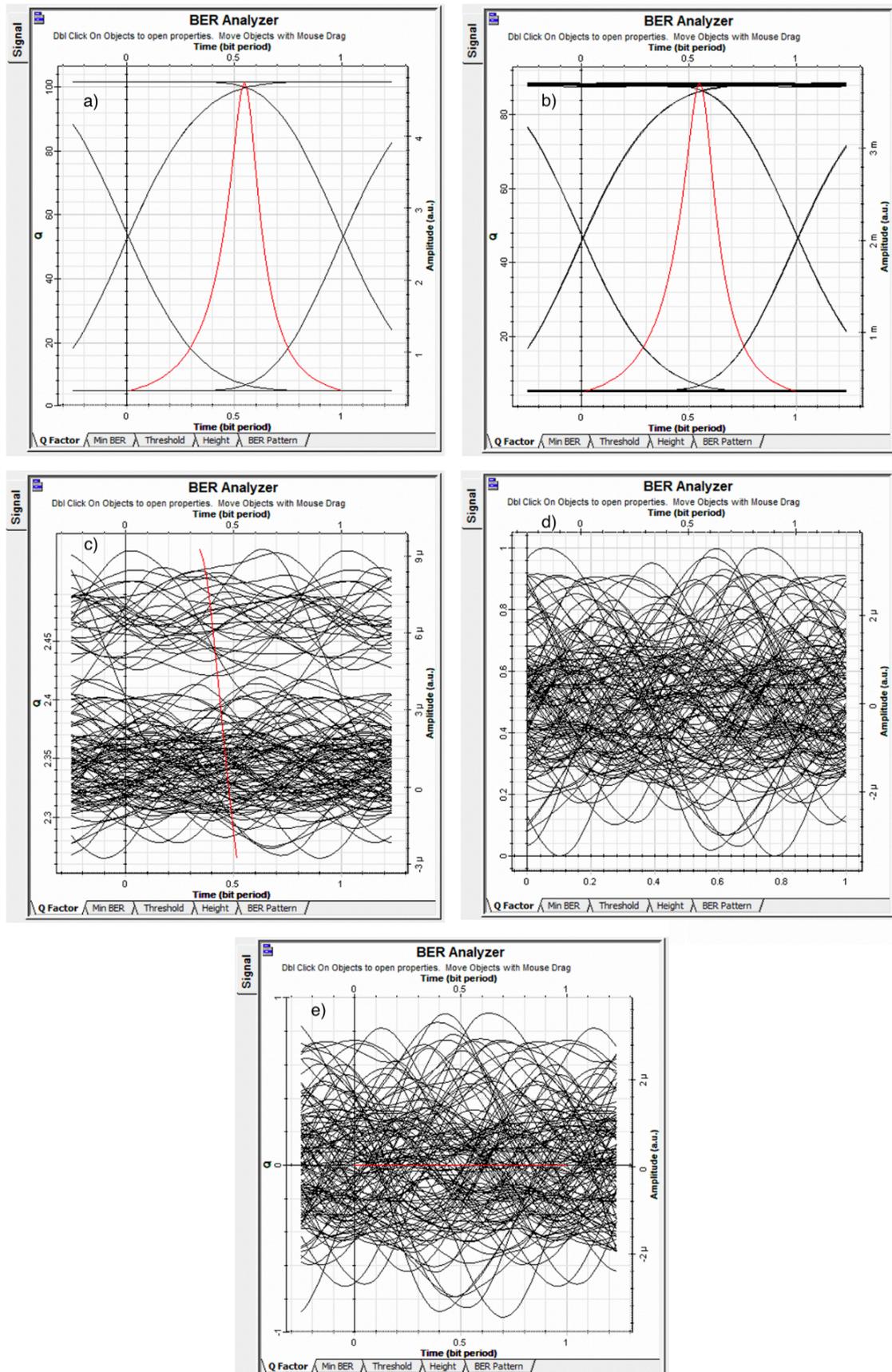


Figura a. 2: Diagrama de ojo y factor Q para 1TX/1RX con longitud de onda de 1350nm y 4.3dB/Km a a) 1Km, b) 5Km, c) 10Km, d) 30Km y e) 50Km.

Elaborado por: Autor.

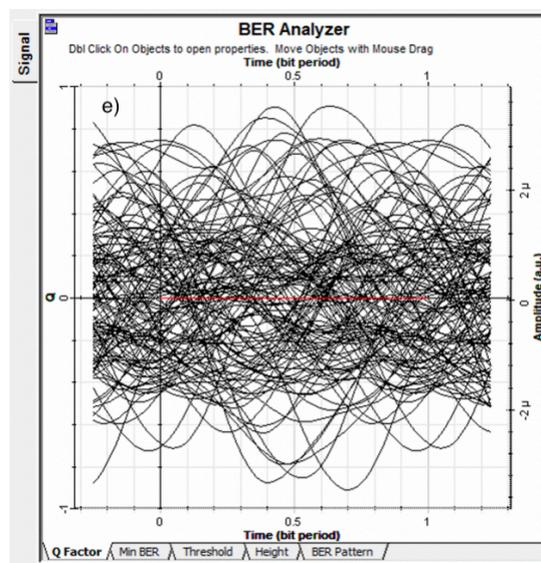
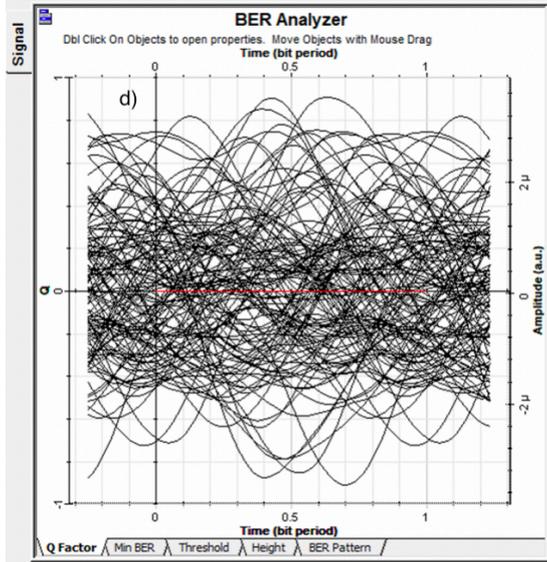
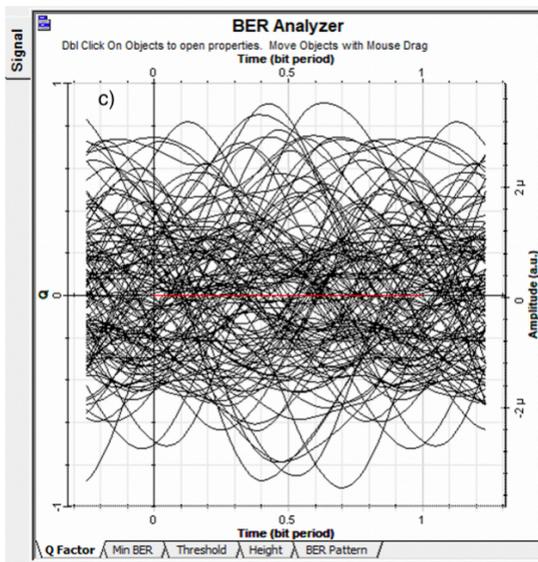
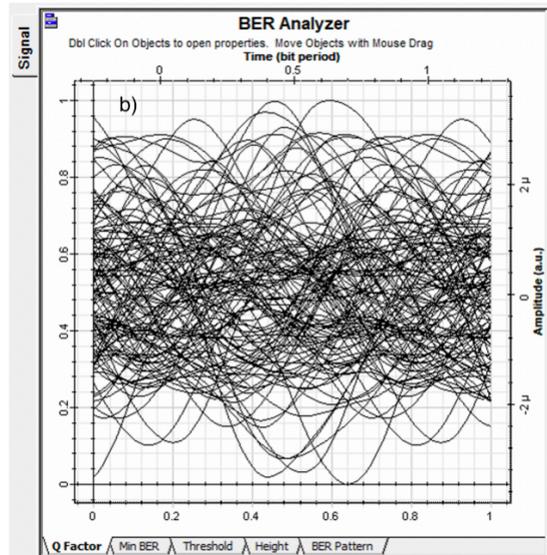
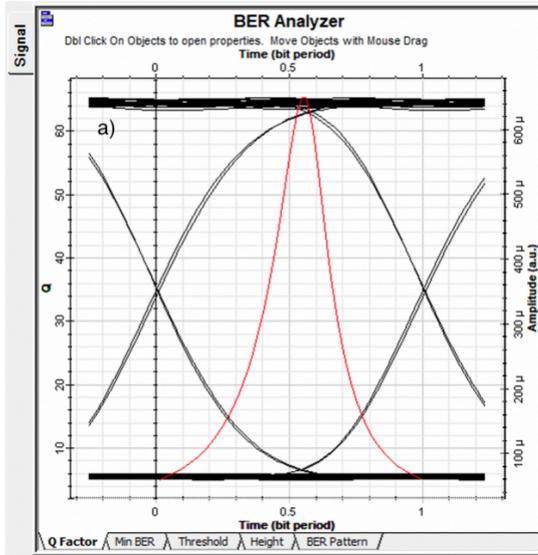


Figura a. 3: Diagrama de ojo y factor Q para 1TX/1RX con longitud de onda de 1350nm y 43dB/Km a a) 1Km, b) 5Km, c) 10Km, d) 30Km y e) 50Km.
Elaborado por: Autor.

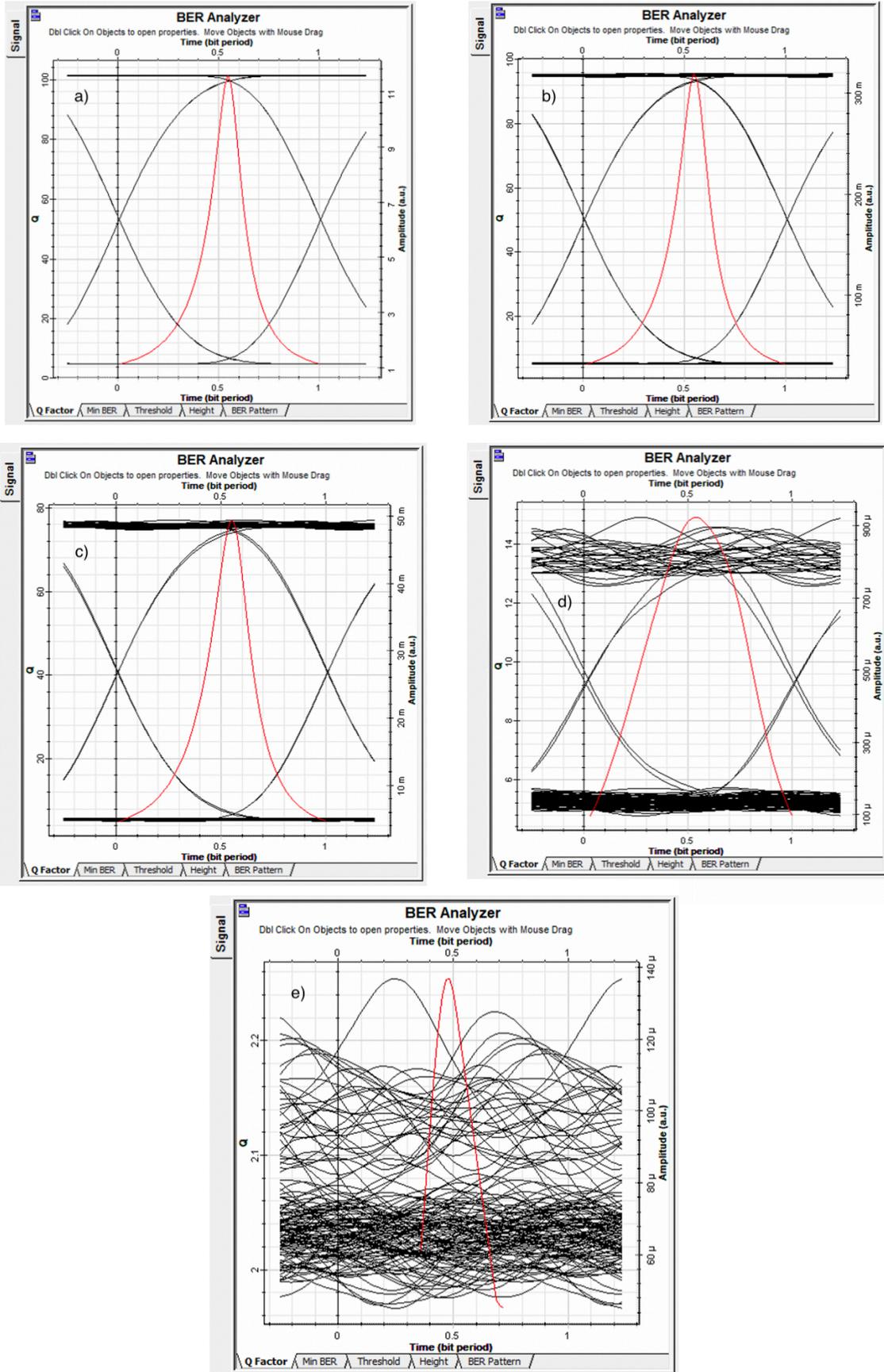


Figura a. 4: Diagrama de ojo y BER para 1TX/1RX con longitud de onda de 1550nm y 0.43dB/Km a a) 1Km, b) 5Km, c) 10Km, d) 30Km y e) 50Km.
Elaborado por: Autor.

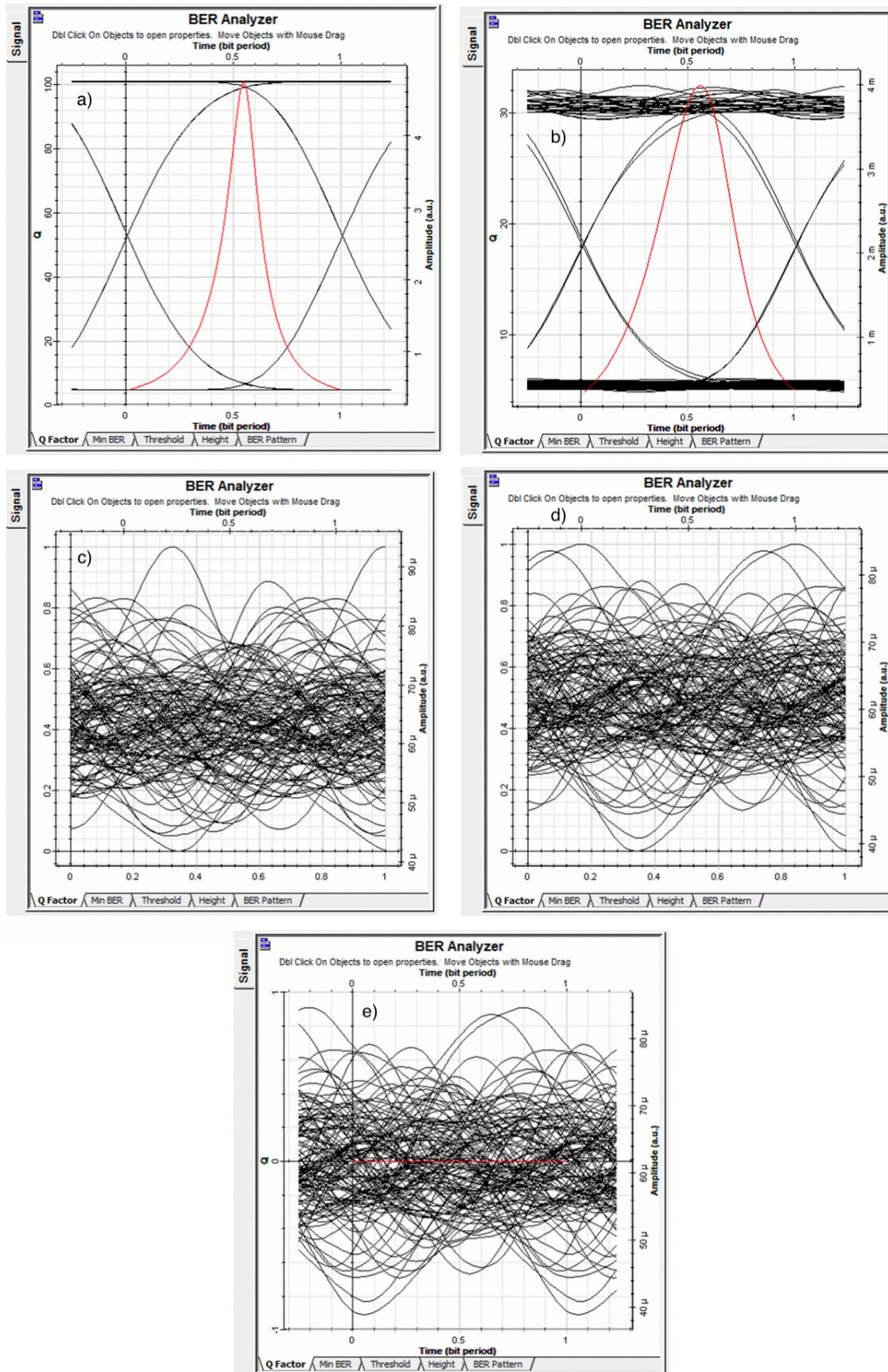


Figura a. 5: Diagrama de ojo y factor Q para 1TX/1RX con longitud de onda de 1550nm y 4.3dB/Km a a) 1Km, b) 5Km, c) 10Km, d) 30Km y e) 50Km.
Elaborado por: Autor.

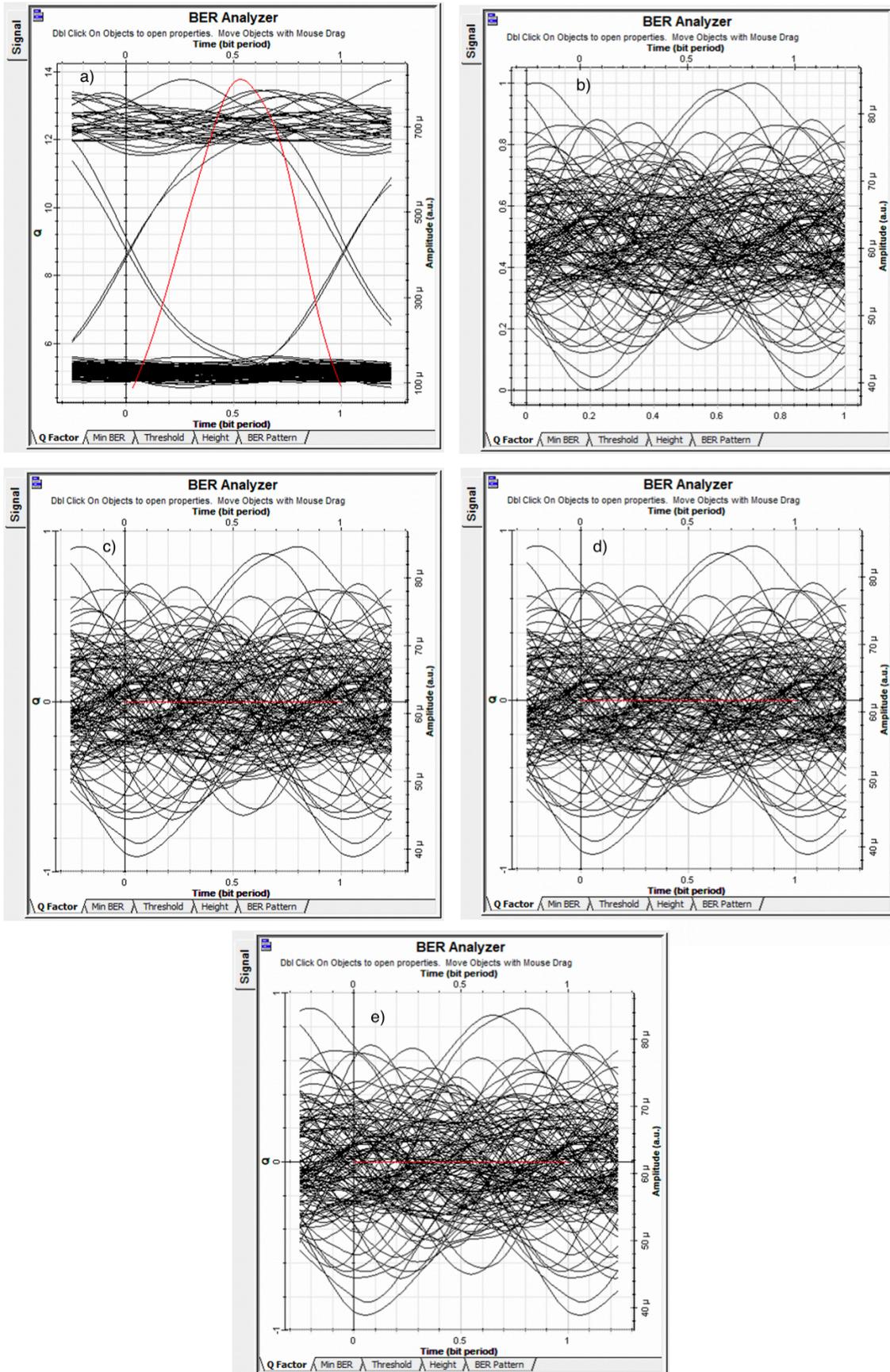


Figura a. 6: Diagrama de ojo y factor Q para 1TX/1RX con longitud de onda de 1550nm y 43dB/Km a a) 1Km, b) 5Km, c) 10Km, d) 30Km y e) 50Km.
Elaborado por: Autor.

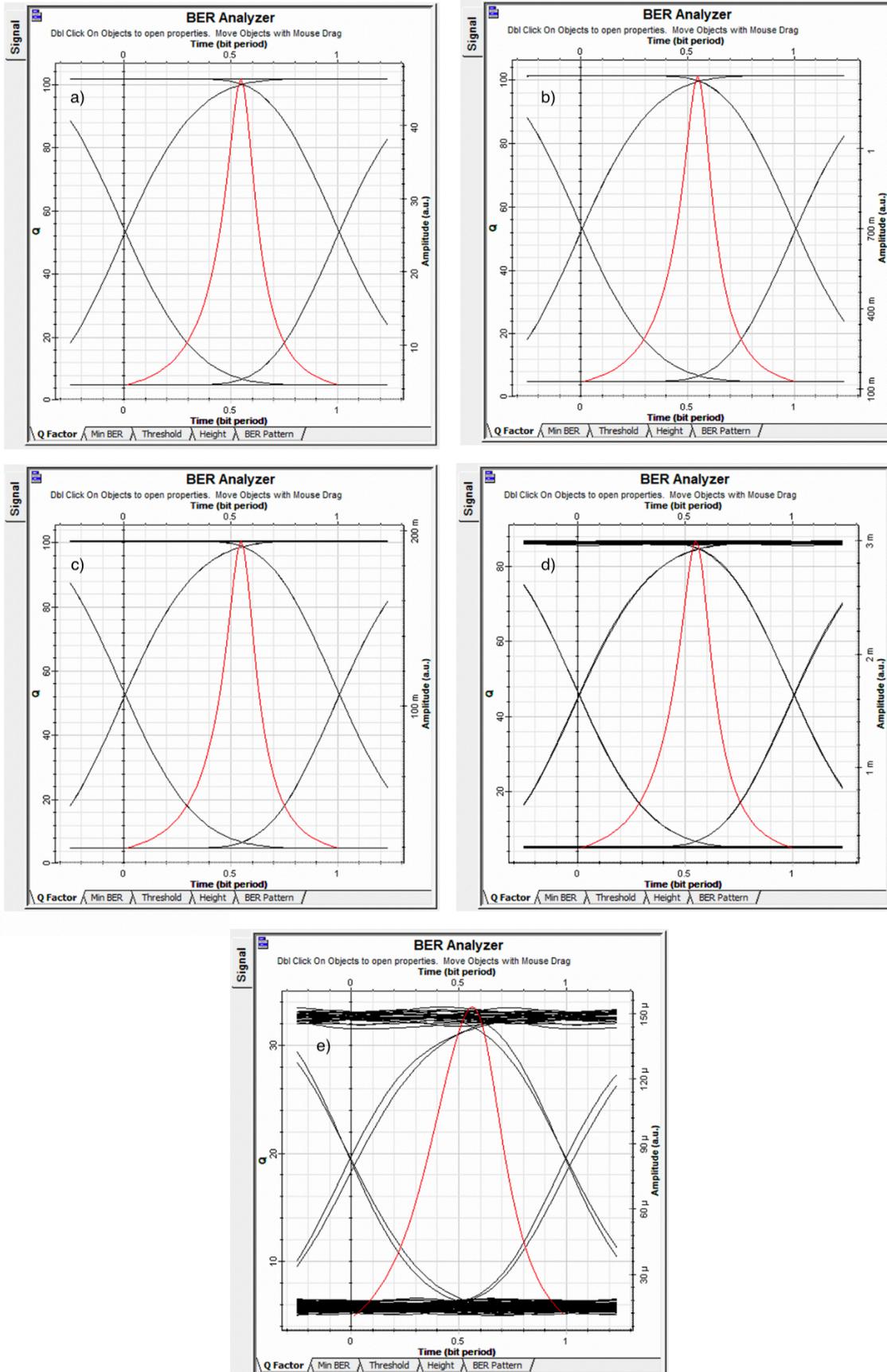


Figura a. 7: Diagrama de ojo y BER para 4TX/4RX con longitud de onda de 1350nm y 0.43dB/Km a a) 1Km, b) 5Km, c) 10Km, d) 30Km y e) 50Km.
Elaborado por: Autor.

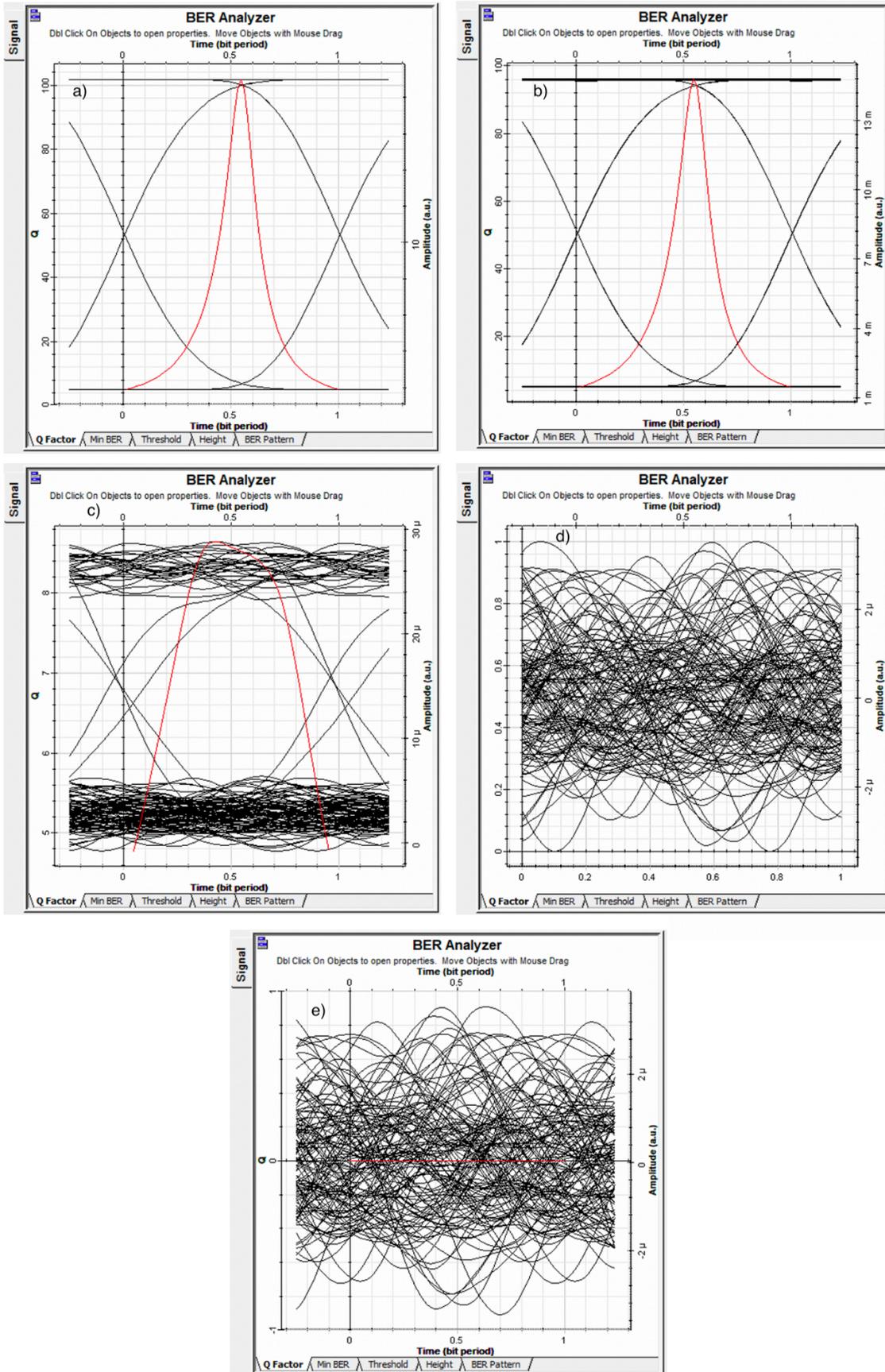


Figura a. 8: Diagrama de ojo y factor Q para 4TX/4RX con longitud de onda de 1350nm y 4.3dB/Km a a) 1Km, b) 5Km, c) 10Km, d) 30Km y e) 50Km.

Elaborado por: Autor.

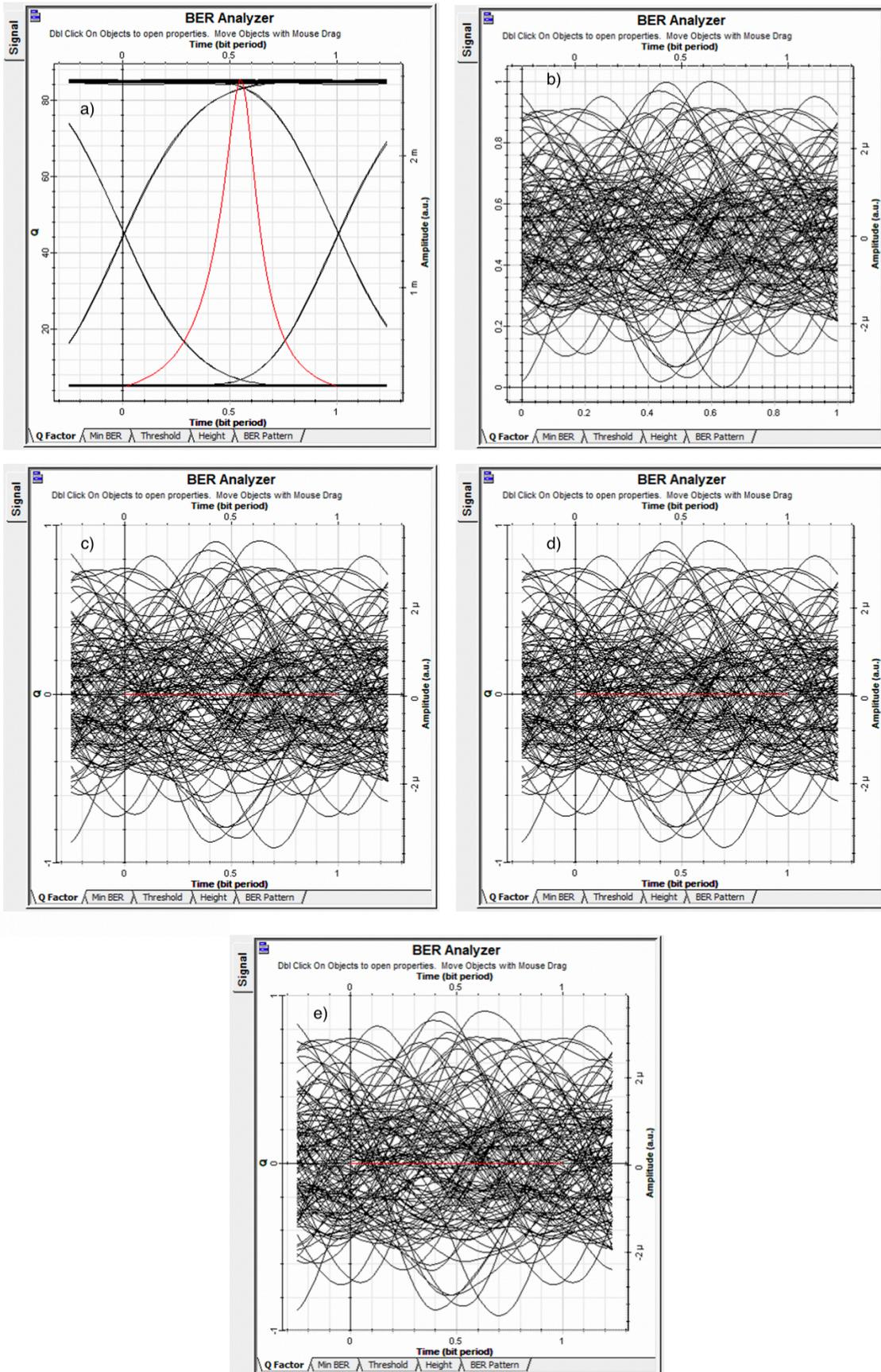


Figura a. 9: Diagrama de ojo y factor Q para 4TX/4RX con longitud de onda de 1350nm y 43dB/Km a a) 1Km, b) 5Km, c) 10Km, d) 30Km y e) 50Km.
Elaborado por: Autor.

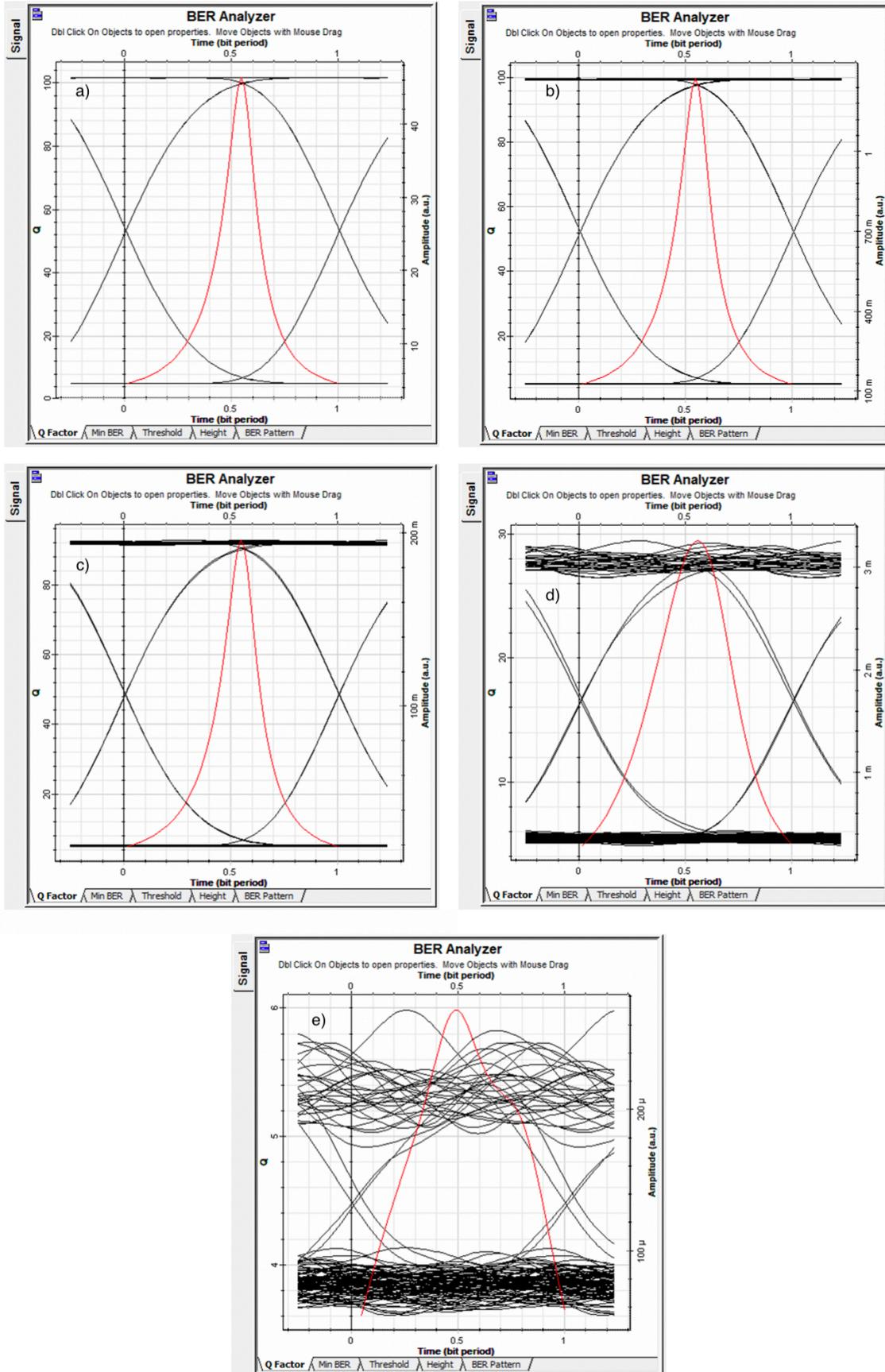


Figura a. 10: Diagrama de ojo y BER para 4TX/4RX con longitud de onda de 1550nm y 0.43dB/Km a a) 1Km, b) 5Km, c) 10Km, d) 30Km y e) 50Km.
Elaborado por: Autor.

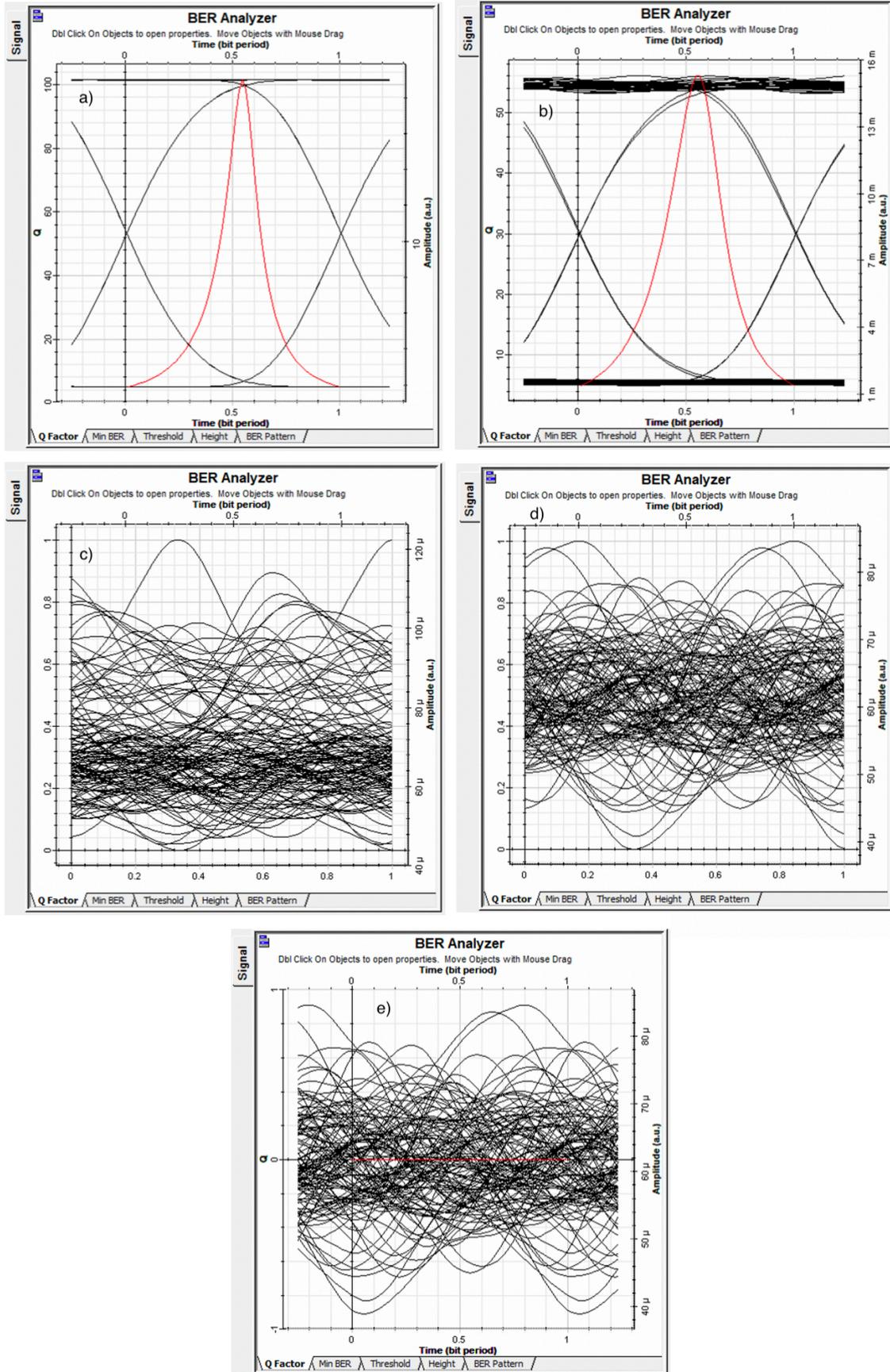


Figura a. 11: Diagrama de ojo y factor Q para 4TX/4RX con longitud de onda de 1550nm y 4.3dB/Km a a) 1Km, b) 5Km, c) 10Km, d) 30Km y e) 50Km.
Elaborado por: Autor.

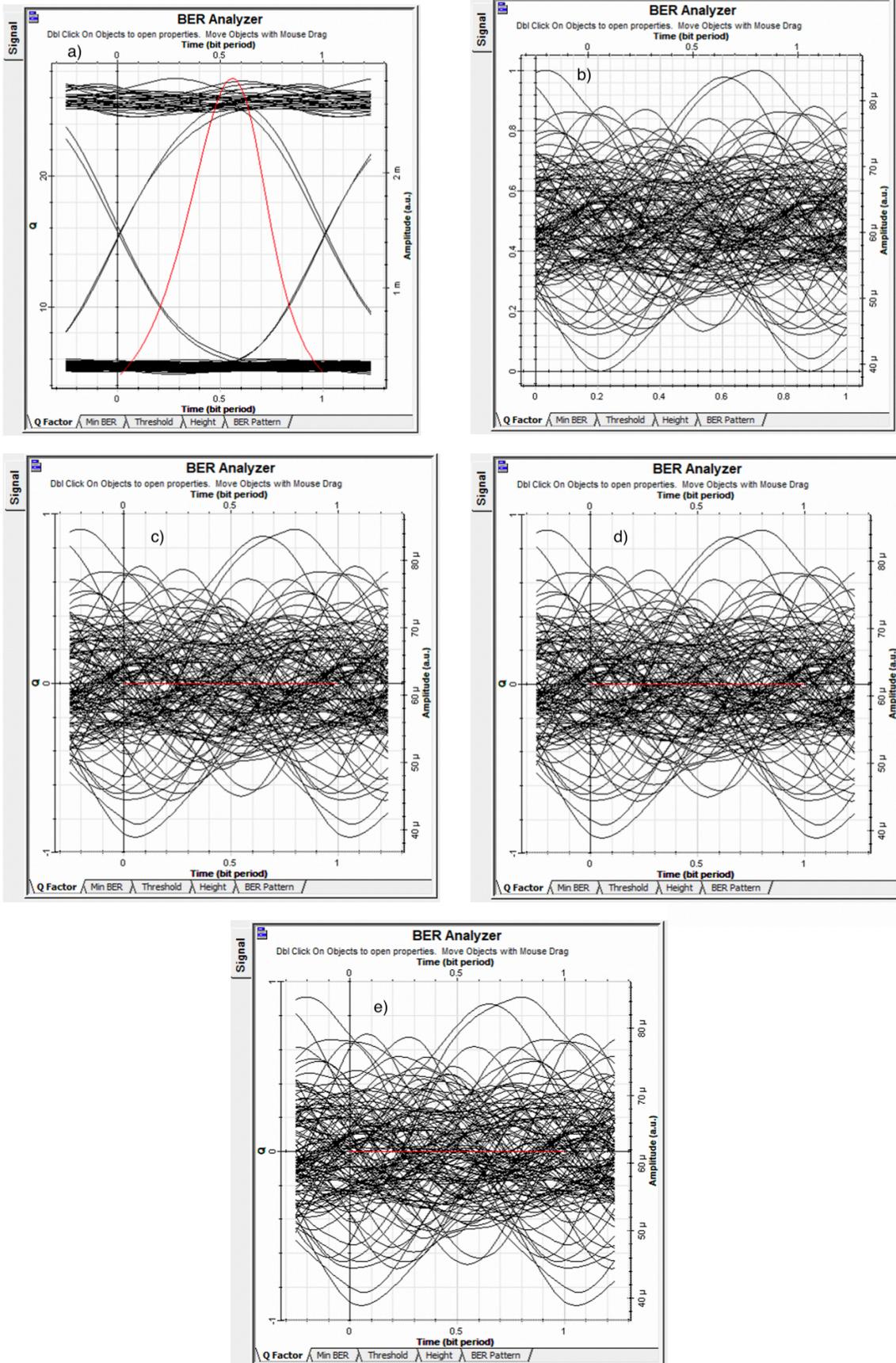


Figura a. 12: Diagrama de ojo y factor Q para 4TX/4RX con longitud de onda de 1550nm y 43dB/Km a a) 1Km, b) 5Km, c) 10Km, d) 30Km y e) 50Km.
Elaborado por: Autor.

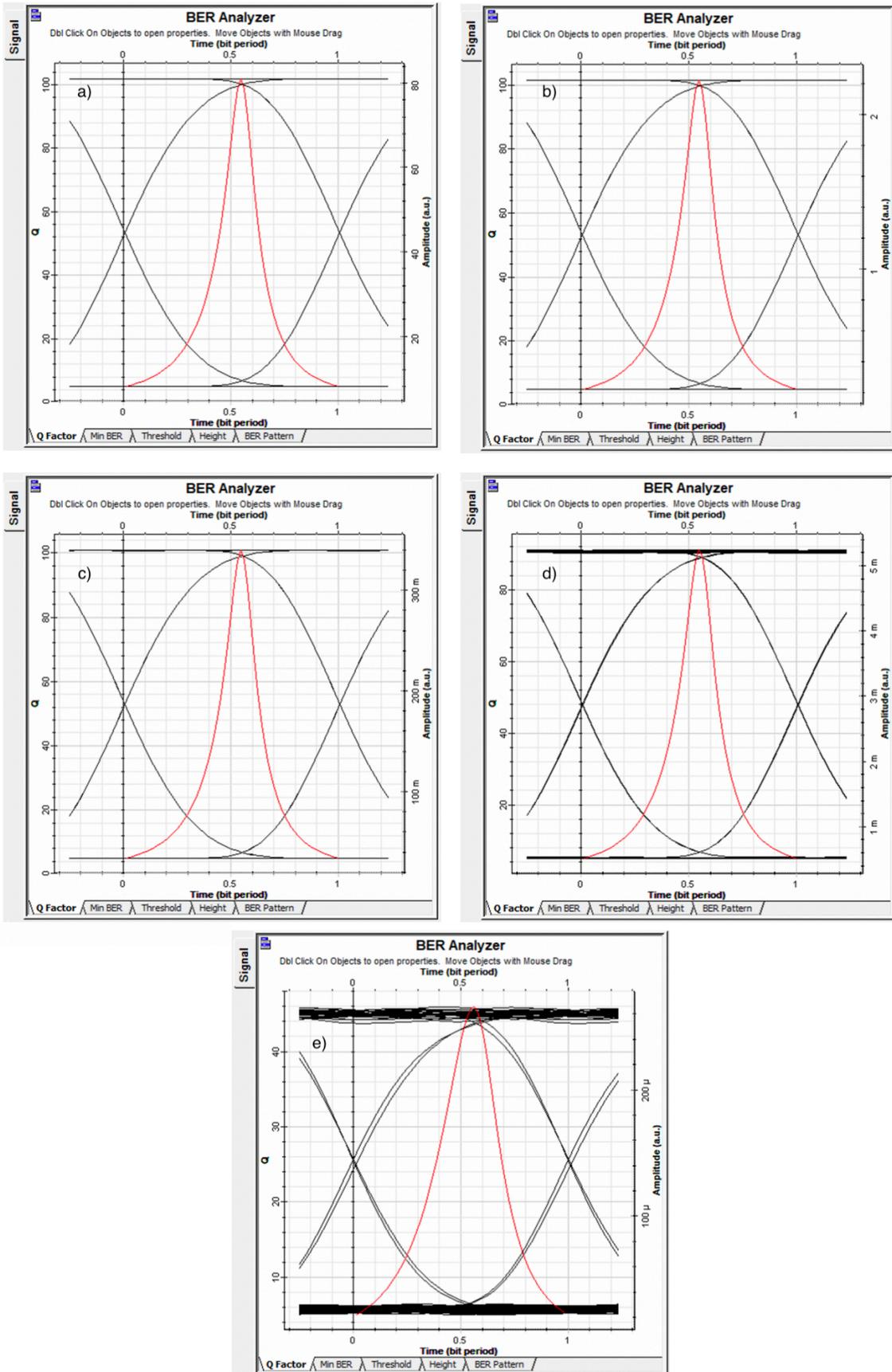


Figura a. 13: Diagrama de ojo y factor Q para 7TX/7RX con longitud de onda de 850nm y 0.43dB/Km a a) 1Km, b) 5Km, c) 10Km, d) 30Km y e) 50Km.
Elaborado por: Autor.

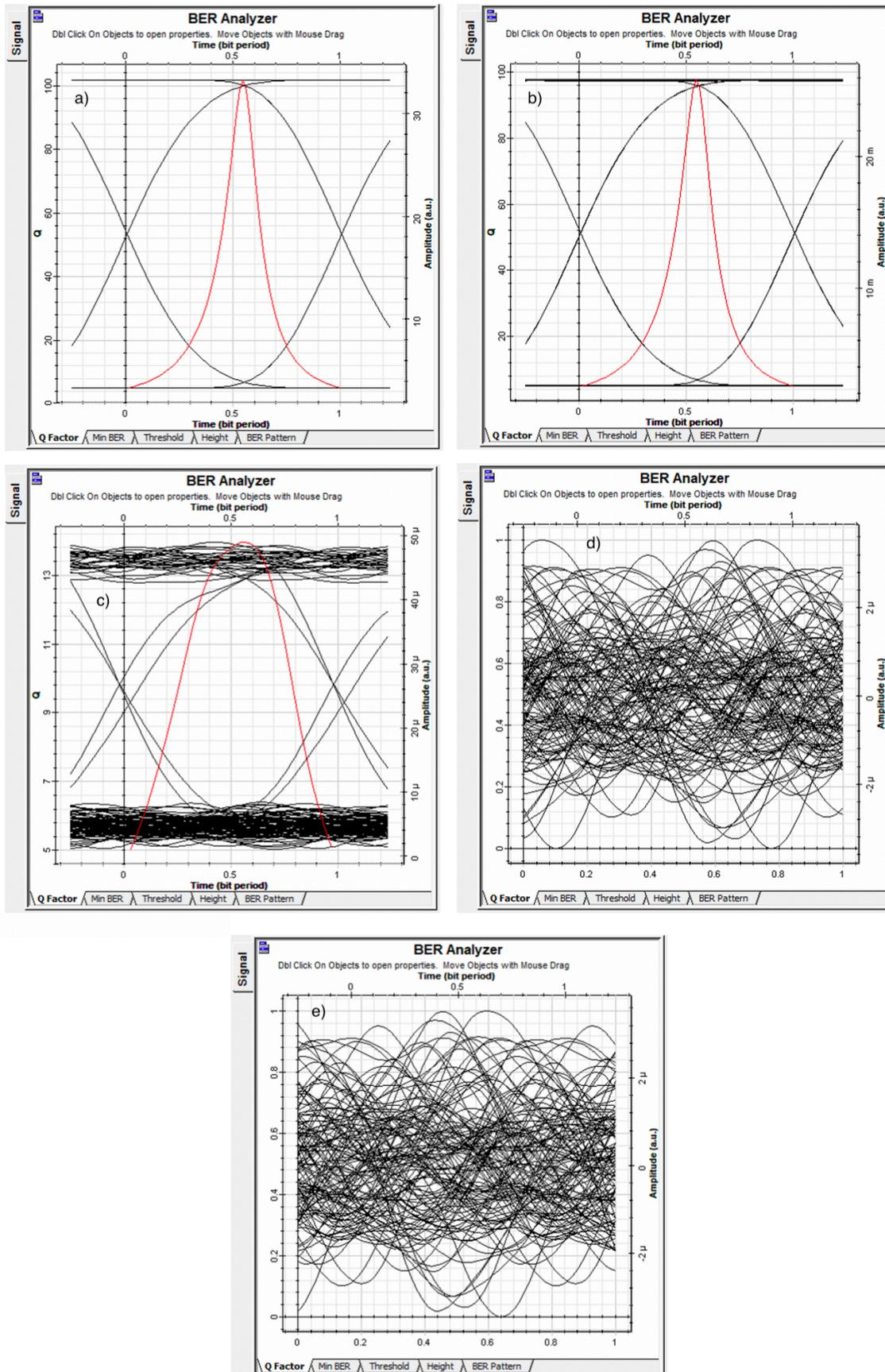


Figura a. 14: Diagrama de ojo y factor Q para 7TX/7RX con longitud de onda de 850nm y 4.3dB/Km a a) 1Km, b) 5Km, c) 10Km, d) 30Km y e) 50Km.
Elaborado por: Autor.

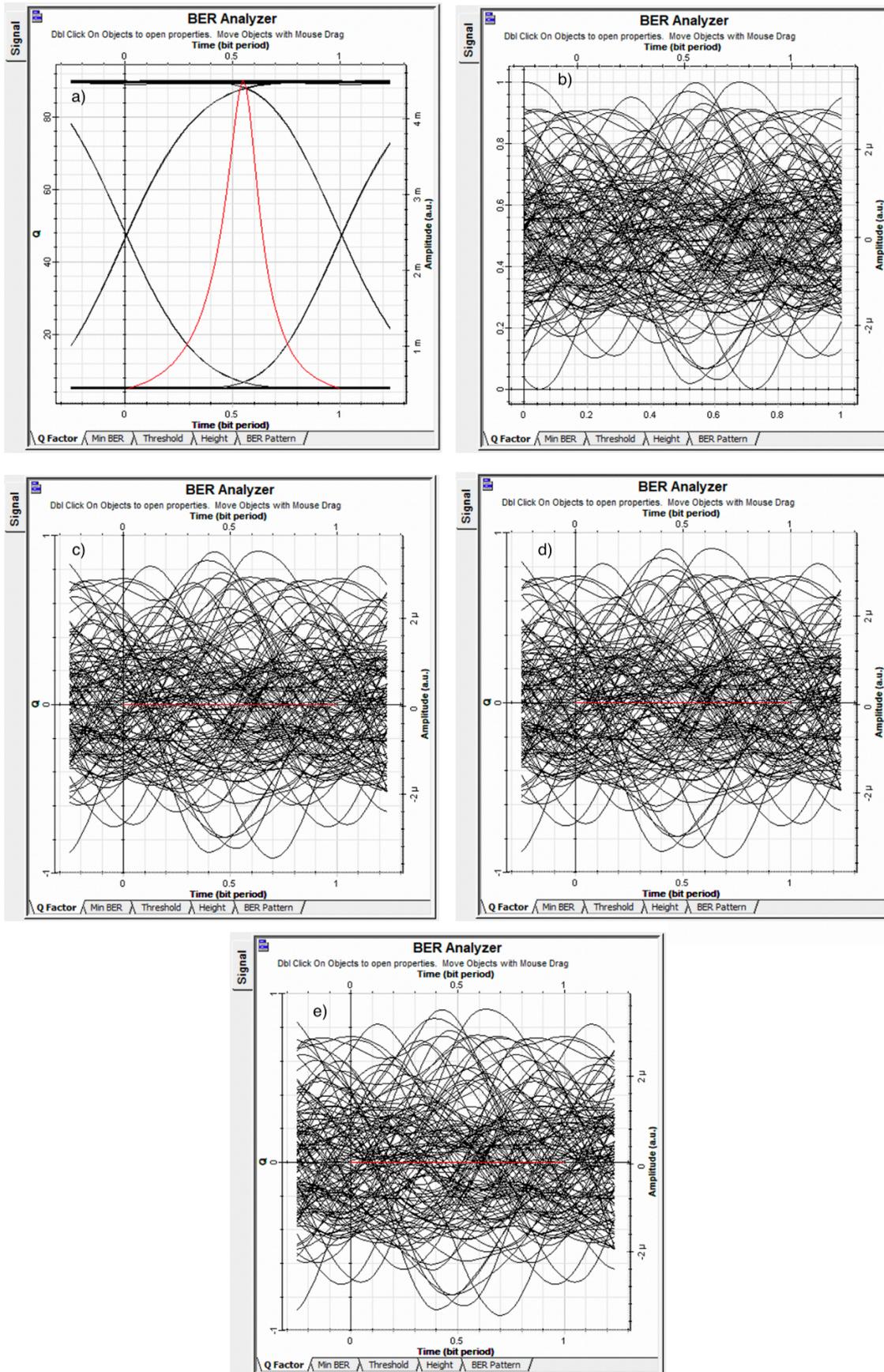


Figura a. 15: Diagrama de ojo y factor Q para 7TX/7RX con longitud de onda de 850nm y 43dB/Km a a) 1Km, b) 5Km, c) 10Km, d) 30Km y e) 50Km.
Elaborado por: Autor.

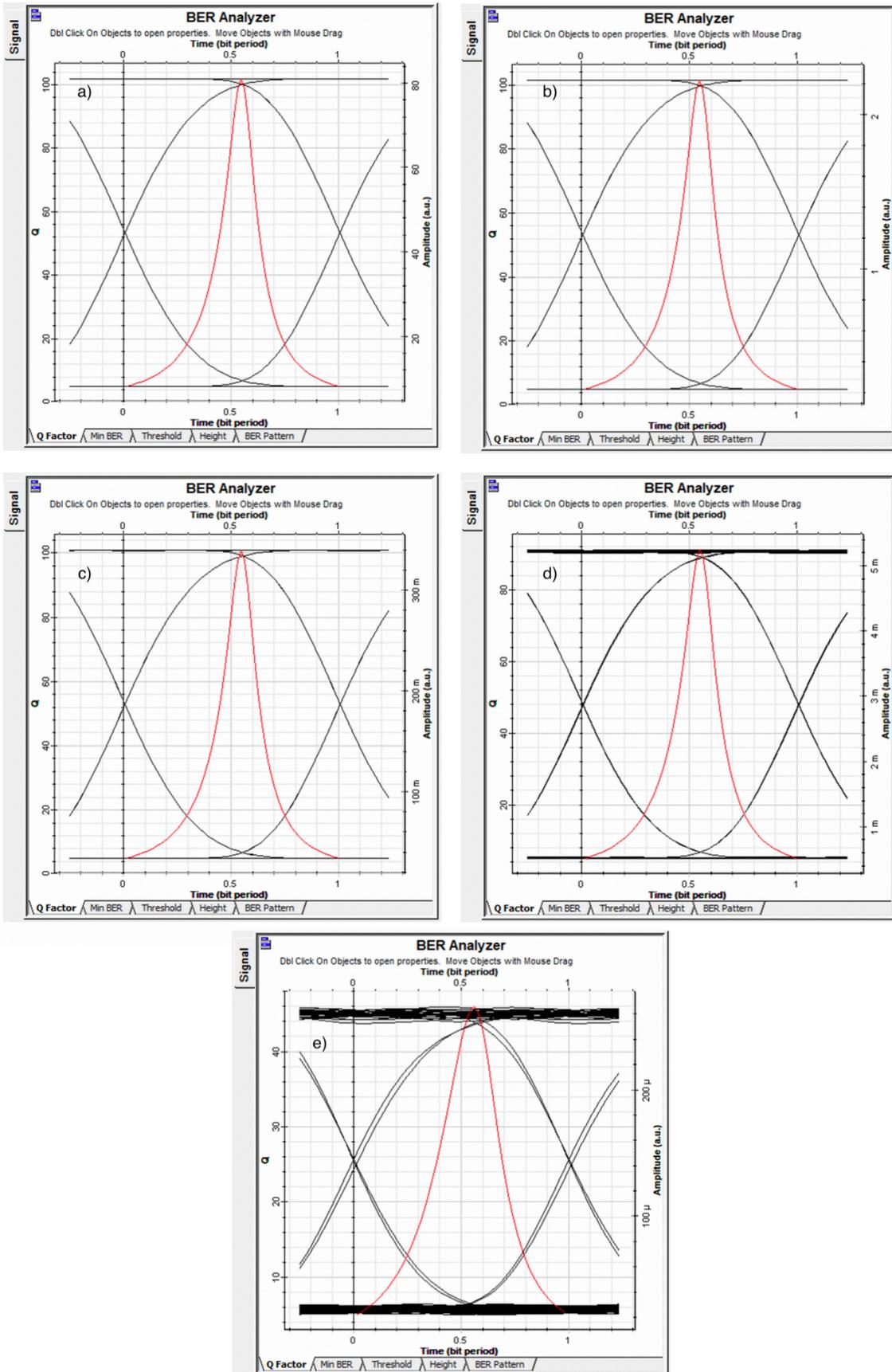


Figura a. 16: Diagrama de ojo y factor Q para 7TX/7RX con longitud de onda de 1350nm y 0.43dB/Km a a) 1Km, b) 5Km, c) 10Km, d) 30Km y e) 50Km.
Elaborado por: Autor.

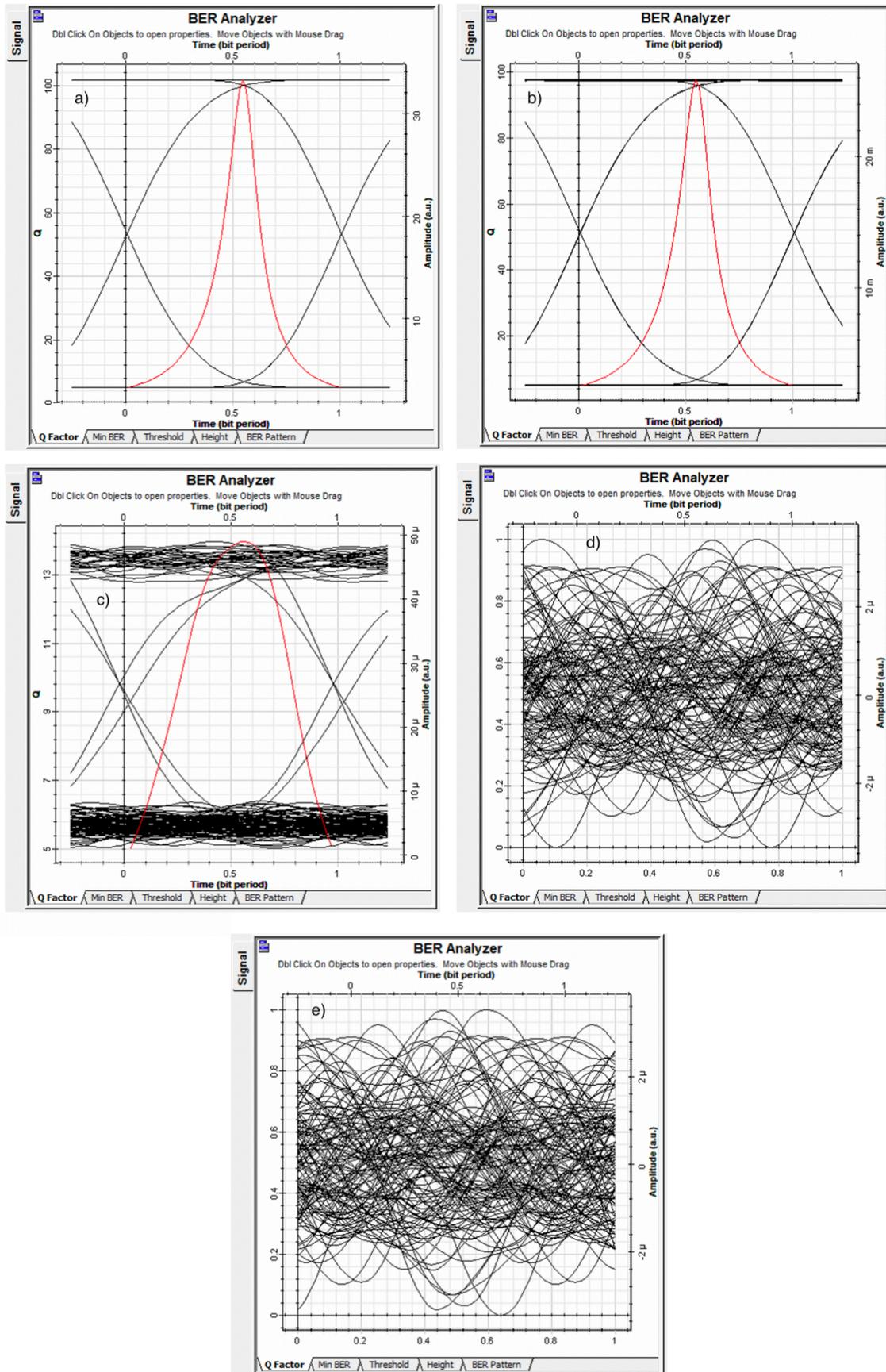


Figura a. 17: Diagrama de ojo y factor Q para 7TX/7RX con longitud de onda de 1350nm y 4.3dB/Km a a) 1Km, b) 5Km, c) 10Km, d) 30Km y e) 50Km.
Elaborado por: Autor.

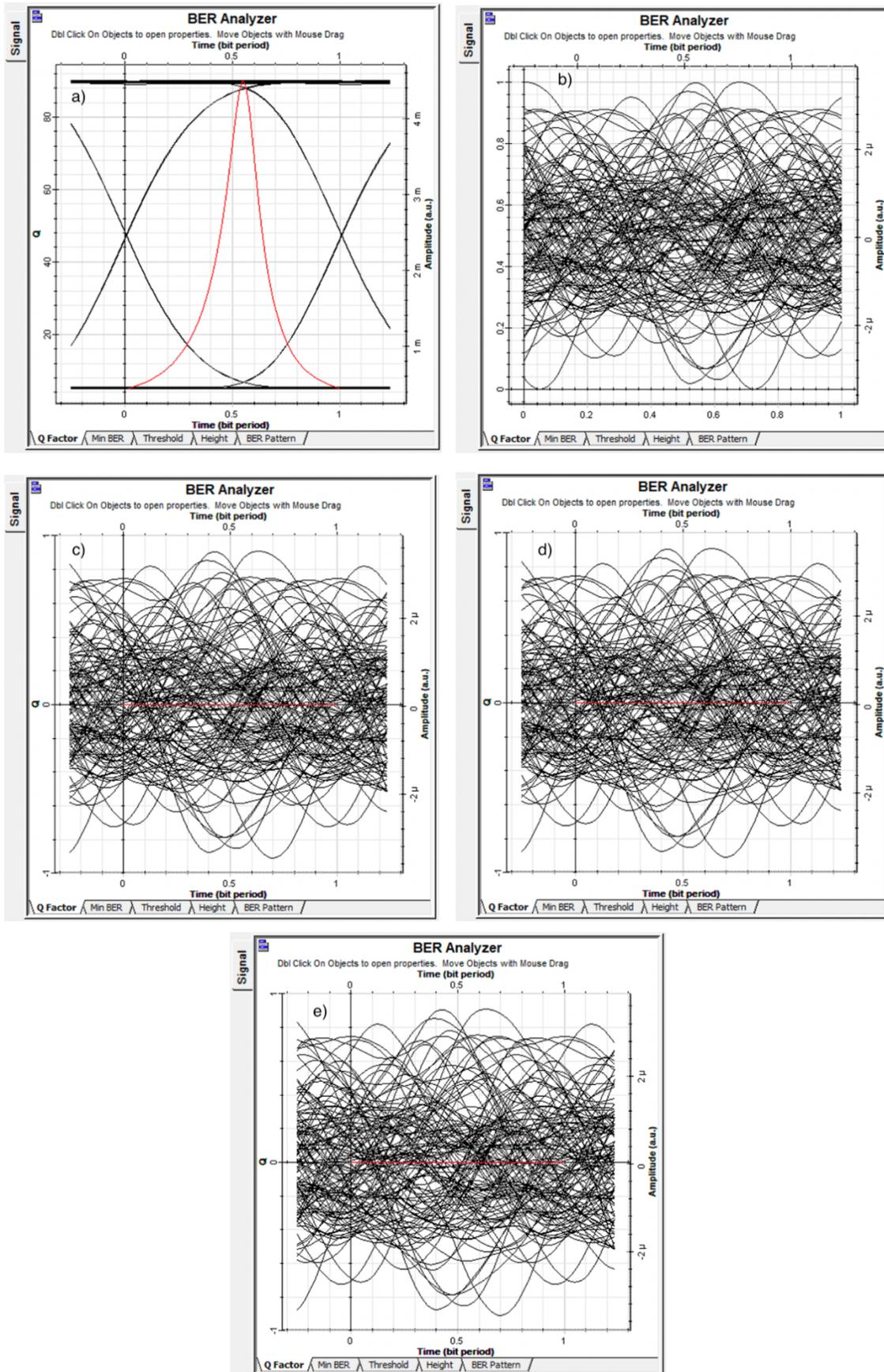


Figura a. 18: Diagrama de ojo y factor Q para 7TX/7RX con longitud de onda de 1350nm y 43dB/Km a a) 1Km, b) 5Km, c) 10Km, d) 30Km y e) 50Km.
Elaborado por: Autor.

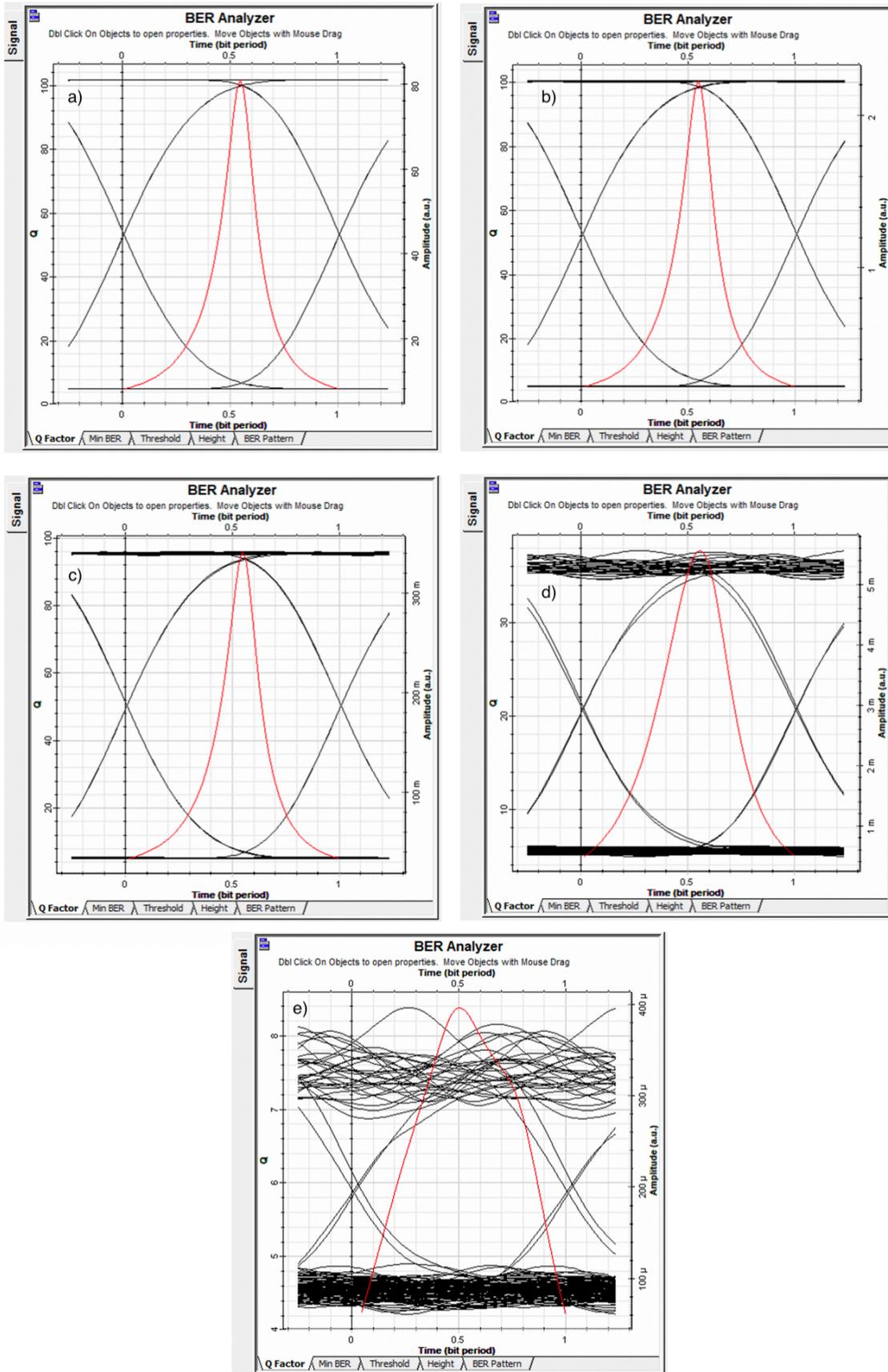


Figura a. 19: Diagrama de ojo y factor Q para 7TX/7RX con longitud de onda de 1550nm y 0.43dB/Km a a) 1Km, b) 5Km, c) 10Km, d) 30Km y e) 50Km.
Elaborado por: Autor.

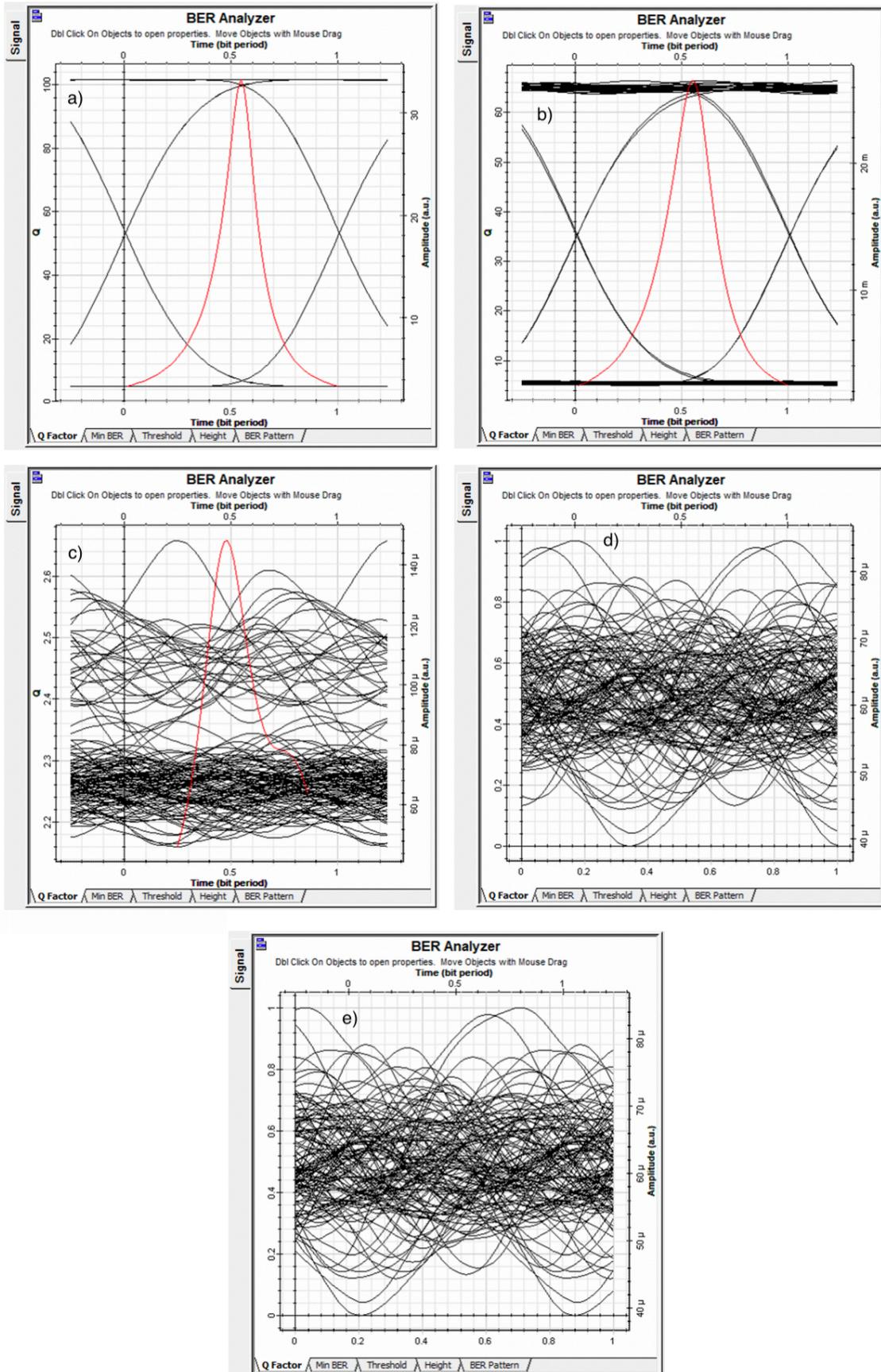


Figura a. 20: Diagrama de ojo y factor Q para 7TX/7RX con longitud de onda de 1550nm y 4.3dB/Km a a) 1Km, b) 5Km, c) 10Km, d) 30Km y e) 50Km.
Elaborado por: Autor.

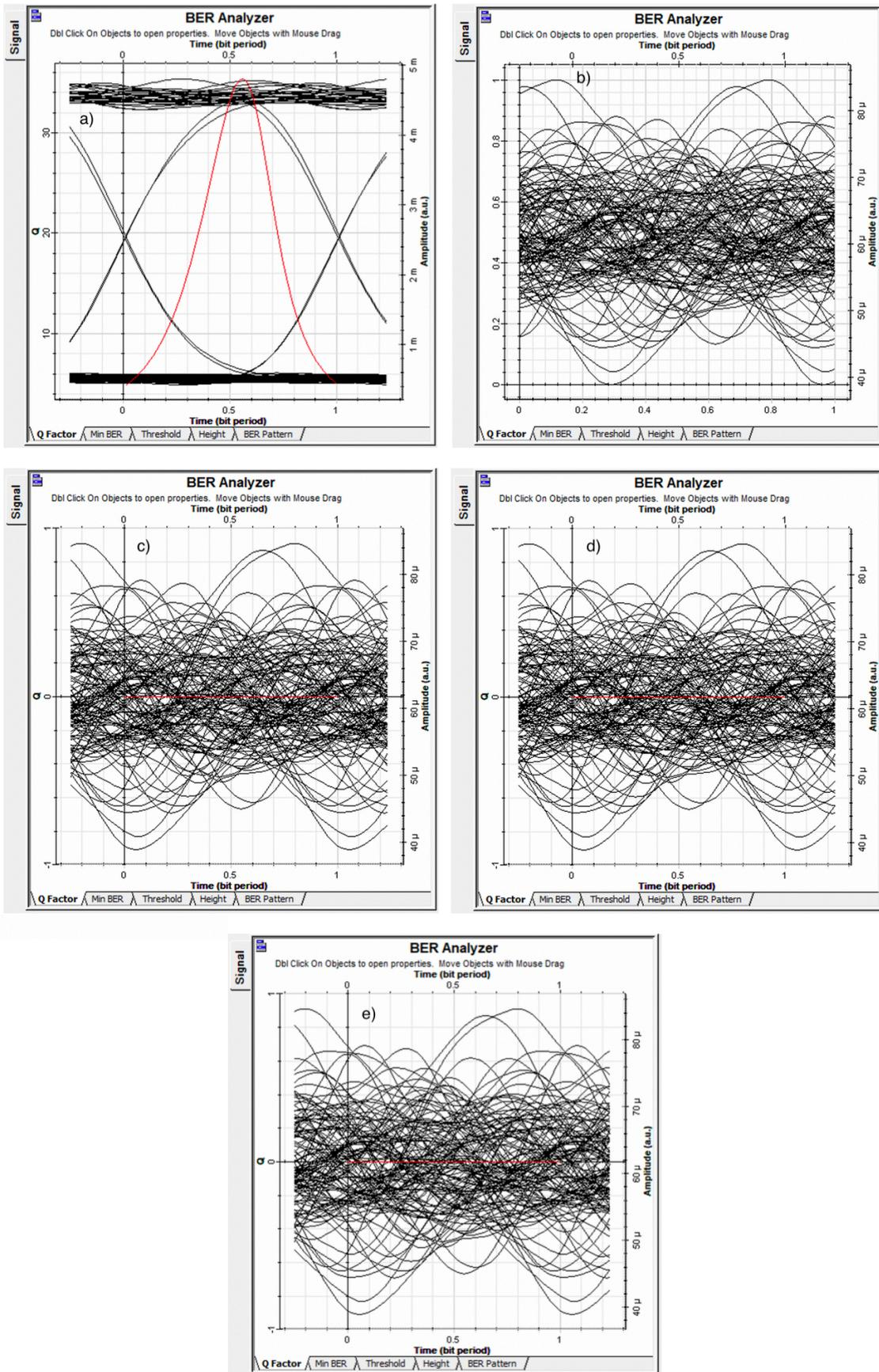


Figura a. 21: Diagrama de ojo y factor Q para 7TX/7RX con longitud de onda de 1550nm y 43dB/Km a a) 1Km, b) 5Km, c) 10Km, d) 30Km y e) 50Km.
Elaborado por: Autor.

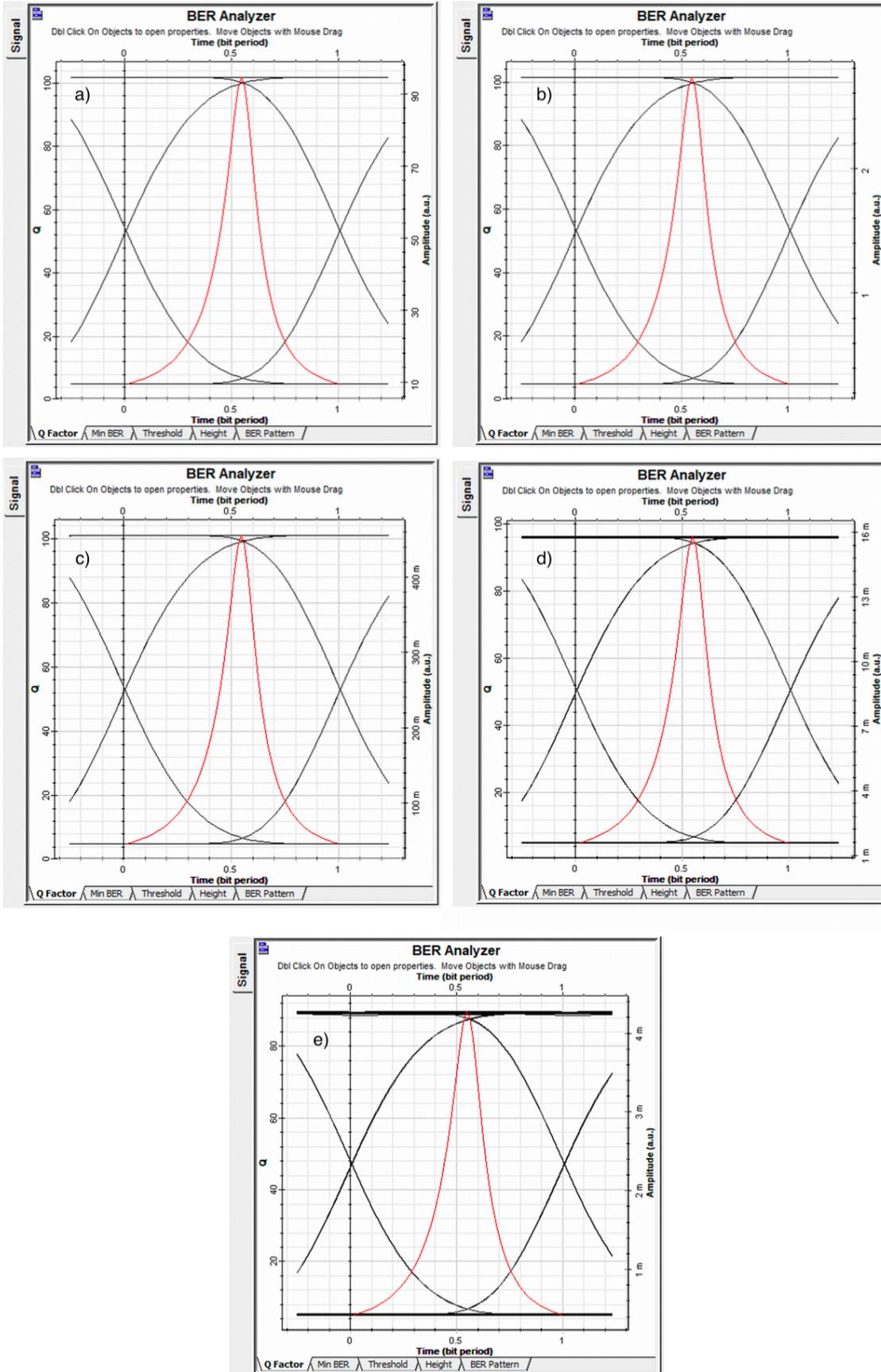


Figura a. 22: Diagrama de ojo y factor Q para 10TX/10RX con longitud de onda de 850nm y 0.43dB/Km a a) 1Km, b) 5Km, c) 10Km, d) 30Km y e) 50Km.
Elaborado por: Autor.

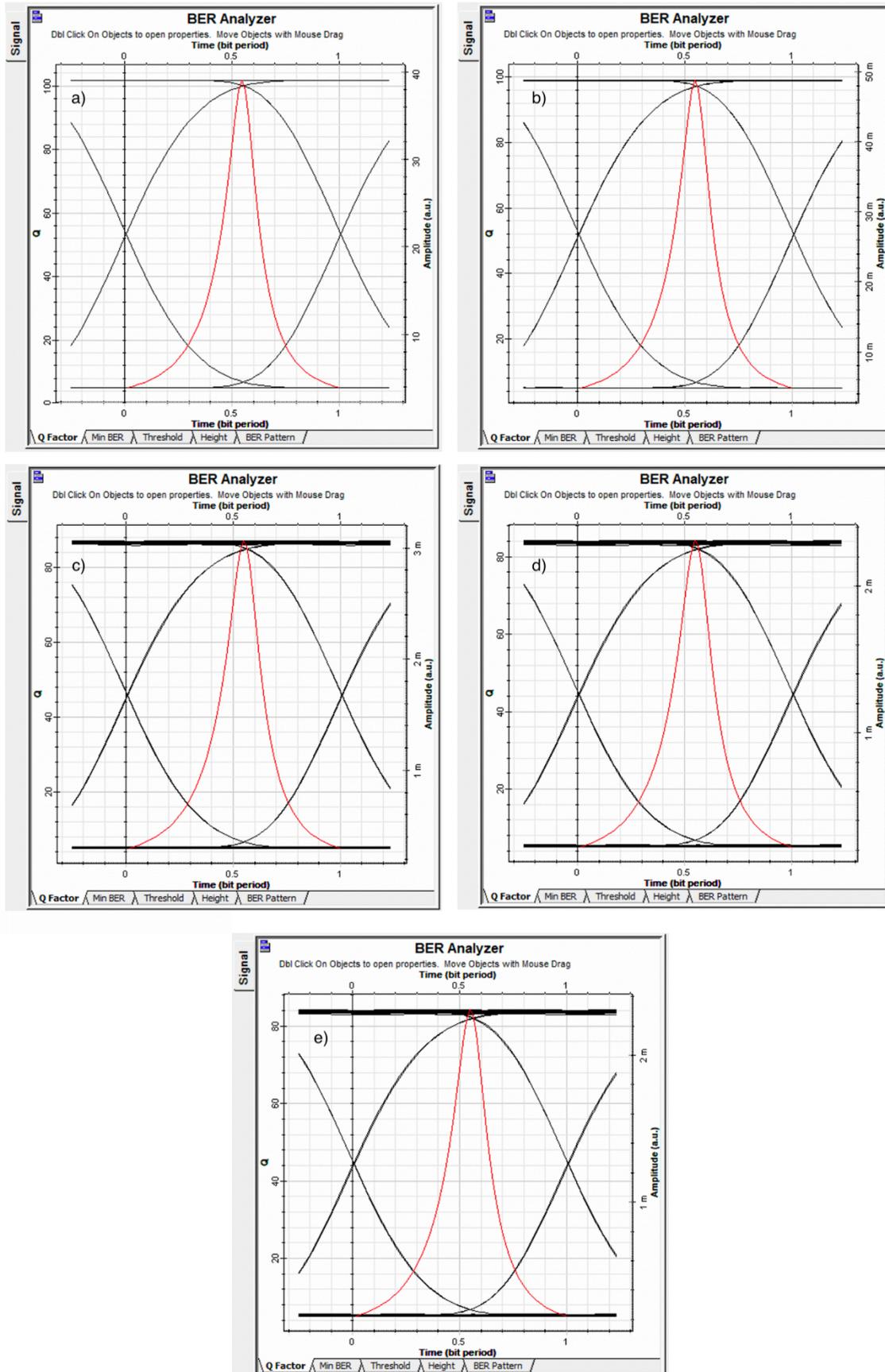


Figura a. 23: Diagrama de ojo y factor Q para 10TX/10RX con longitud de onda de 850nm y 4.3dB/Km a a) 1Km, b) 5Km, c) 10Km, d) 30Km y e) 50Km.
Elaborado por: Autor.

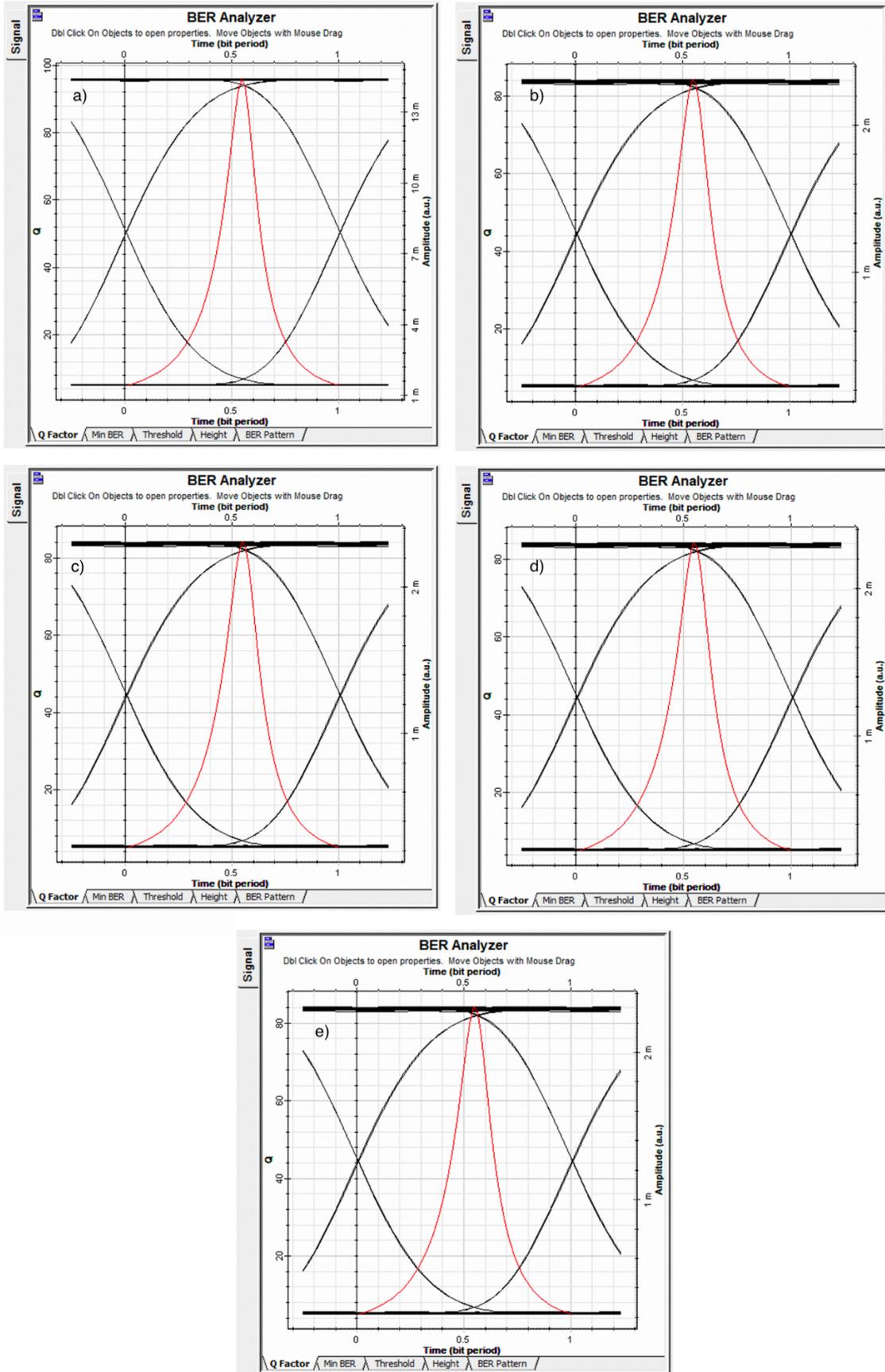


Figura a. 24: Diagrama de ojo y factor Q para 10TX/10RX con longitud de onda de 850nm y 43dB/Km a a) 1Km, b) 5Km, c) 10Km, d) 30Km y e) 50Km.
Elaborado por: Autor.

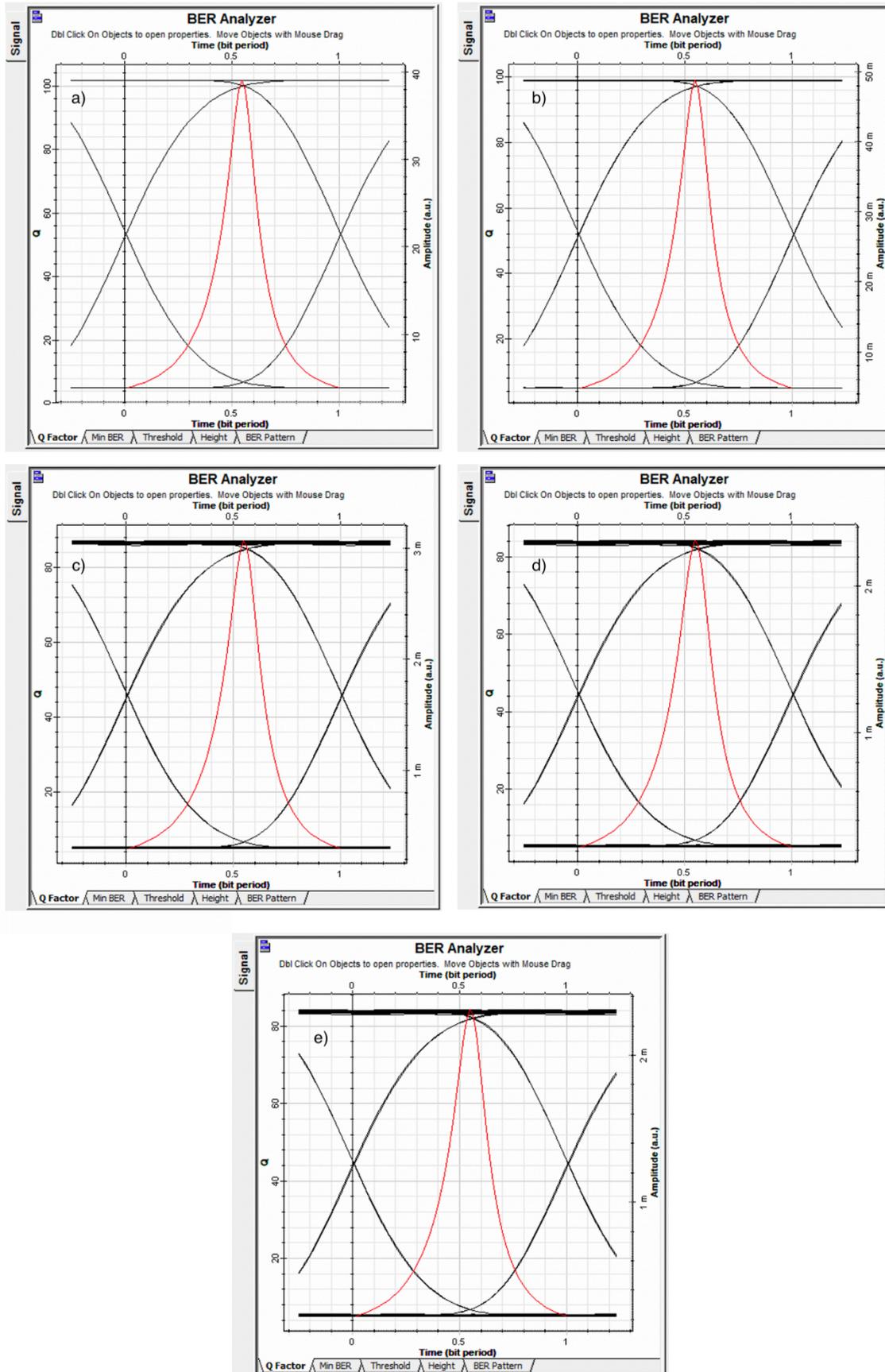


Figura a. 25: Diagrama de ojo y factor Q para 10TX/10RX con longitud de onda de 1350nm y 4.3dB/Km a a) 1Km, b) 5Km, c) 10Km, d) 30Km y e) 50Km.
Elaborado por: Autor.

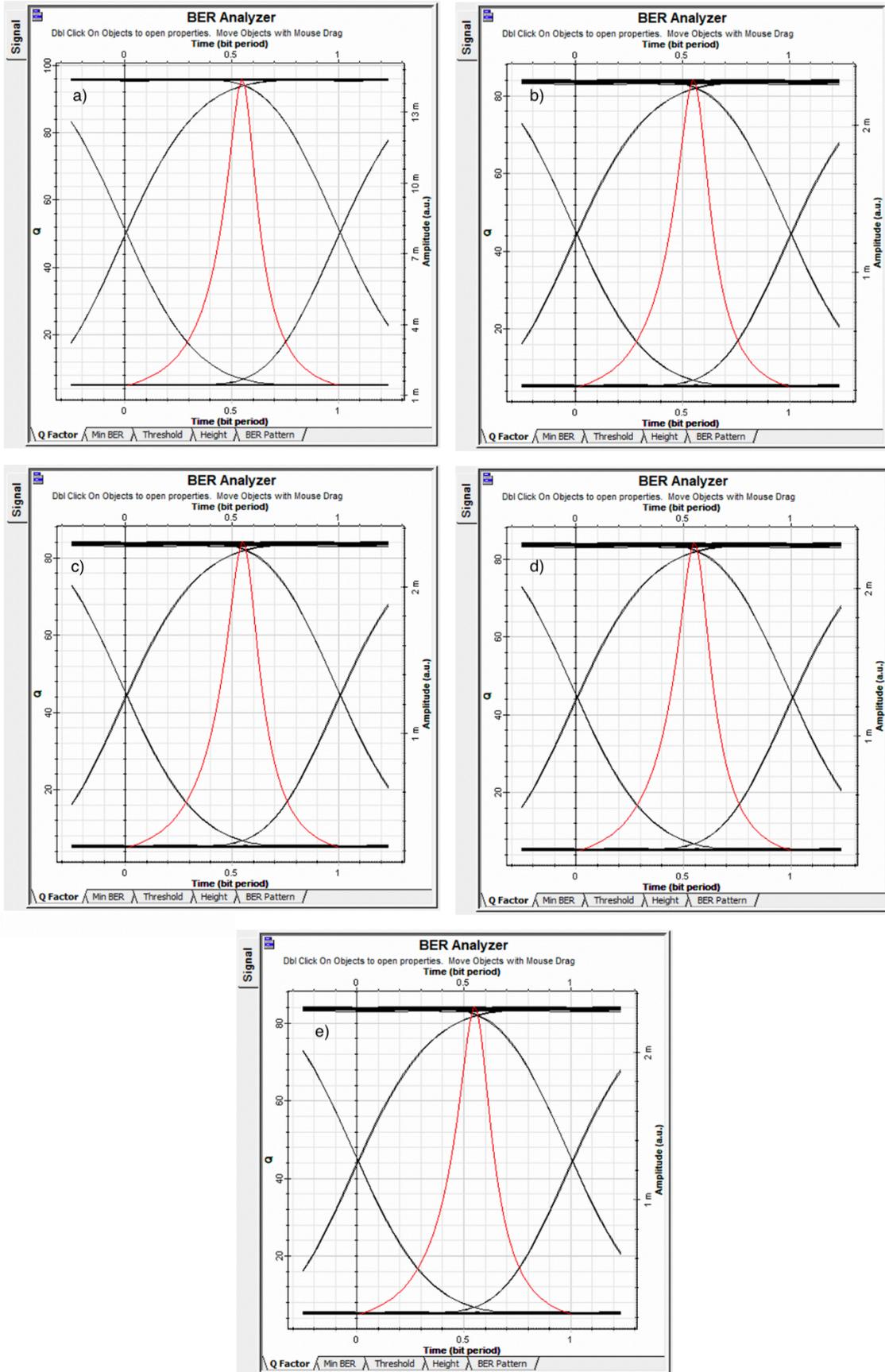


Figura a. 26: Diagrama de ojo y factor Q para 10TX/10RX con longitud de onda de 1350nm y 43dB/Km a a) 1Km, b) 5Km, c) 10Km, d) 30Km y e) 50Km.
Elaborado por: Autor.

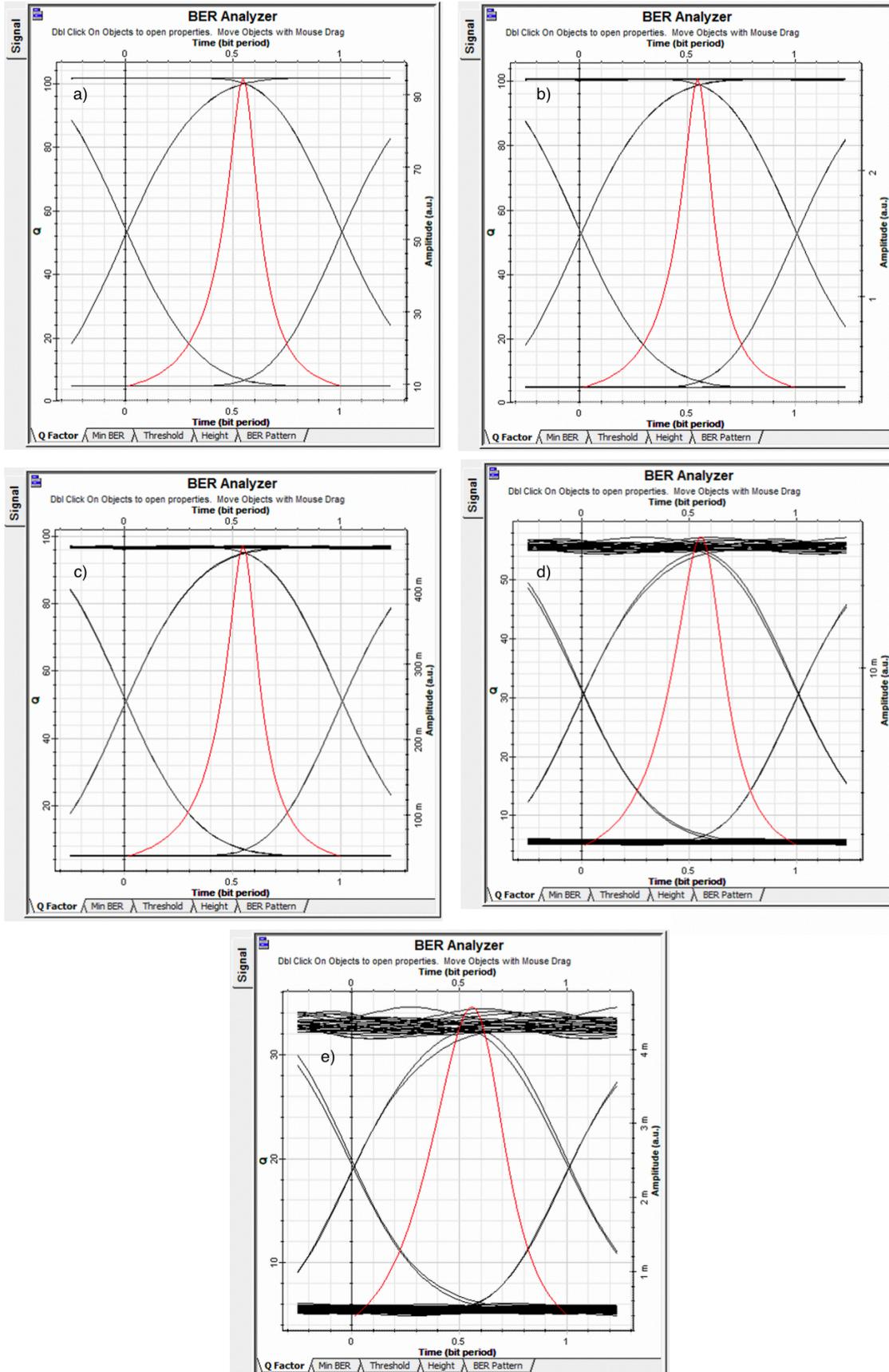


Figura a. 27: Diagrama de ojo y factor Q para 10TX/10RX con longitud de onda de 1550nm y 0.43dB/Km a a) 1Km, b) 5Km, c) 10Km, d) 30Km y e) 50Km.
Elaborado por: Autor.

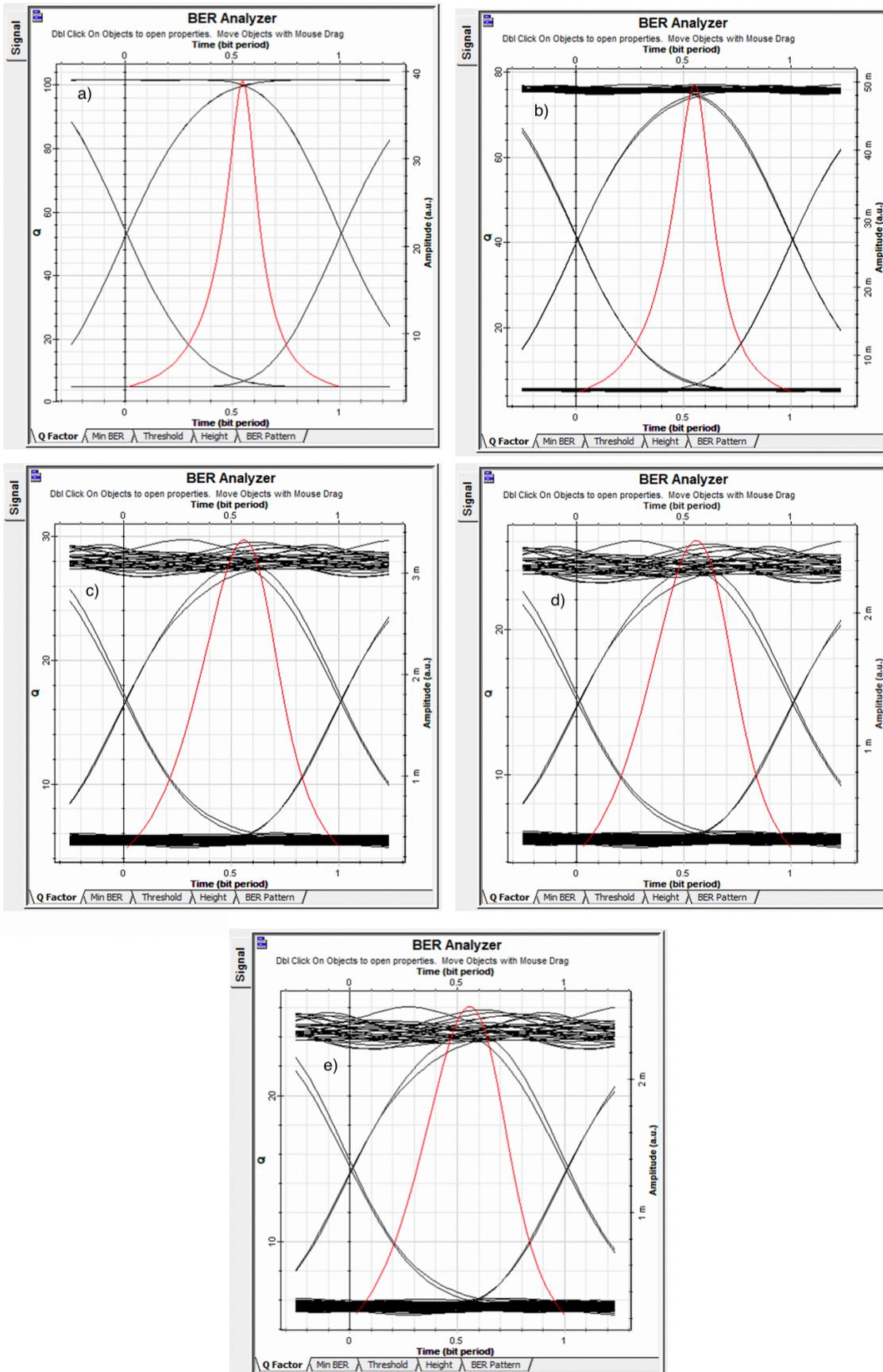


Figura a. 28: Diagrama de ojo y factor Q para 10TX/10RX con longitud de onda de 1550nm y 4.3dB/Km a a) 1Km, b) 5Km, c) 10Km, d) 30Km y e) 50Km.
Elaborado por: Autor.

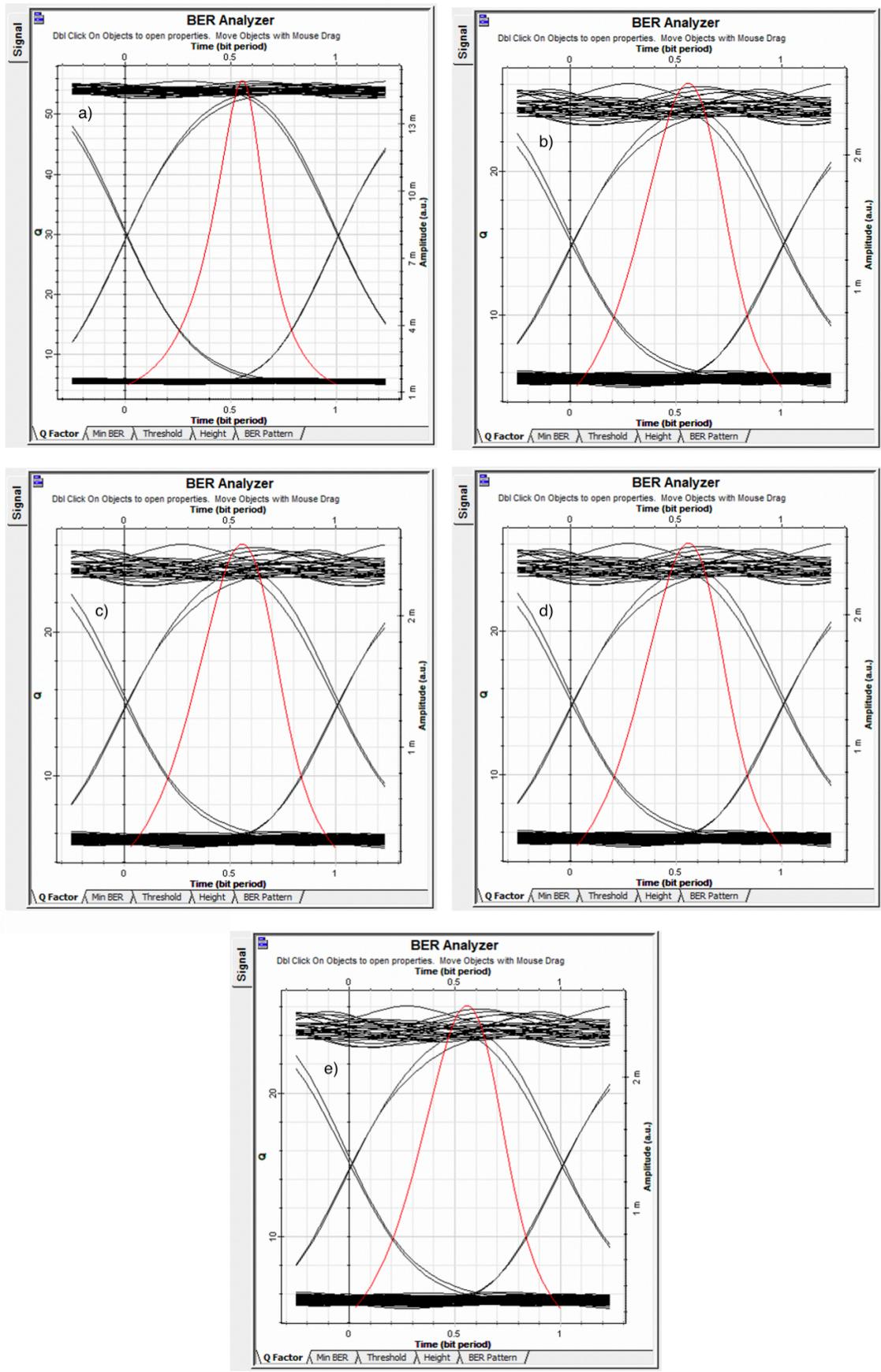


Figura a. 29: Diagrama de ojo y factor Q para 10TX/10RX con longitud de onda de 1550nm y 43dB/Km a a) 1Km, b) 5Km, c) 10Km, d) 30Km y e) 50Km.
Elaborado por: Autor.



DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Giler León, Jhon Francisco** con C.C: # 120749179-4 autor del Trabajo de Titulación: **Diseño y simulación de sistemas de comunicación óptica por el espacio libre usando múltiples transmisores/receptores mediante OptiSystem** previo a la obtención del título de **INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 11 de Marzo de 2018

f. _____

Nombre: Giler León, Jhon Francisco

C.C: 120749179-4



Presidencia
de la República
del Ecuador



Plan Nacional
de Ciencia, Tecnología,
Innovación y Saberes



SENESCYT
Secretaría Nacional de Educación Superior,
Ciencia, Tecnología e Innovación

REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

TÍTULO Y SUBTÍTULO:	Diseño y simulación de sistemas de comunicación óptica por el espacio libre usando múltiples transmisores/receptores mediante OptiSystem.		
AUTOR	GILER LEÓN, JHON FRANCISCO		
REVISOR/TUTOR	M. Sc. ZAMORA CEDEÑO, NÉSTOR ARMANDO		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo		
CARRERA:	Ingeniería en Telecomunicaciones		
TÍTULO OBTENIDO:	Ingeniero en Telecomunicaciones		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	11 de Marzo de 2018	No. DE PÁGINAS:	124
ÁREAS TEMÁTICAS:	Comunicaciones Inalámbricas		
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	FSO, SISTEMAS, COMUNICACIONES, FACTOR Q, BER, TRANSMISOR, RECEPTOR.		
RESUMEN/ABSTRACT:	<p>Las diversas tecnologías de comunicación a través de enlaces ópticos inalámbricos pueden lograr velocidades de transmisión de datos en el orden de los Gbps, convirtiéndolas así en soluciones eficaces para zonas de dificultoso acceso o en donde la implementación de sistemas físicos de fibra óptica es muy compleja, tales como regiones campestres, terminales aéreos o territorios apartados. Es así como la tecnología FSO permite a los usuarios movilizarse sin perder conectividad dentro de la zona de cobertura, es de sencilla instalación y gestión y está libre de licencias de espectro, lo que reduce costos. La seguridad presente en esta tecnología dentro de la transferencia de información y la considerable inmunidad a interferencias y efectos de dispersión, son prerrogativas para tener en cuenta. En este trabajo se efectúa un análisis de la tecnología señalada previamente y se simulan diversos escenarios y configuraciones utilizando la aplicación OptiSystem 7.0. A través del presente estudio se evaluó el comportamiento del sistema mediante indicadores como la tasa de bits erróneos (BER), diagrama de ojo y el factor de calidad Q, lo que posibilitó comprobar el exitoso funcionamiento del enlace.</p>		
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: +593-9-93107405	E-mail: jhongiler@aol.com	
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN: COORDINADOR DEL PROCESO DE UTE	Nombre: M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando		
	Teléfono: +593-9-67608298		
	E-mail: edwin.palacios@cu.ucsg.edu.ec		
SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA			
Nº. DE REGISTRO (en base a datos):			
Nº. DE CLASIFICACIÓN:			
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):			