



UNL
Portada

Universidad
Nacional
de Loja

Universidad Nacional de Loja

Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables.

Maestría en Telecomunicaciones

Análisis de sistemas LOS UOWC a través de software de simulación.

**Trabajo de Titulación, previa a la obtención
del título de Magíster en Telecomunicaciones.**

AUTORA:

Ing. Gema Isabel Medranda Cobeña Mg. Sc.

DIRECTOR:

Ing. Paulo Alberto Samaniego Rojas, Mg. Sc.

Loja-Ecuador

2024

Educamos para **Transformar**

Educamos para **Transformar**



Certificación

Loja, 08 de mayo de 2024

Ing. Paulo Alberto Samaniego Rojas, Mg. Sc.
DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN

CERTIFICO:

Que he revisado y orientado todo proceso de la elaboración del Trabajo de Titulación denominado: **Análisis de sistemas LOS UOWC a través de software de simulación**, previo a la obtención del título de **Magíster en Telecomunicaciones**, de la autoría de la estudiante **Gema Isabel Medranda Cobeña**, con cedula de identidad Nro. **1313371328**, una vez que el trabajo cumple con todos los requisitos exigidos por la Universidad Nacional de Loja para el efecto, autorizo la presentación para la respectiva sustentación y defensa.



Firmado electrónicamente por:
**PAULO ALBERTO
SAMANIEGO ROJAS**

Ing. Paulo Alberto Samaniego Rojas, Mg. Sc.
DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN



Autoría

Yo, **Gema Isabel Medranda Cobeña**, declaro ser autora del Trabajo de Titulación y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos de posibles reclamos y acciones legales, por el contenido del mismo. Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja la publicación del trabajo de titulación en el Repositorio Digital Institucional – Biblioteca Virtual.



Firmado electrónicamente por:
**GEMA ISABEL
MEDRANDA COBENA**

Firma:

Autora: Gema Isabel Medranda Cobeña

Cédula de Identidad: 1313371328

Fecha: 08 de mayo 2024

Correo electrónico: gema.medranda@unl.edu.ec

Teléfono: 0996015453



Carta de autorización por parte de la autora, para consulta, reproducción parcial total y/o publicación electrónica de texto completo, del Trabajo de Titulación

Yo, **Gema Isabel Medranda Cobeña**, declaro ser autora del Trabajo de Titulación denominado: **Análisis de sistemas LOS UOWC a través de software de simulación**, como requisito para optar el título de **Magíster en Telecomunicaciones**, autorizo al sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que con fines académicos muestre la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Institucional.

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el Repositorio Institucional, en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia del trabajo de titulación que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Loja, a los ocho días del mes de mayo de dos mil veinticuatro.



Firmado electrónicamente por:
**GEMA ISABEL
MEDRANDA COBENA**

Firma:

Autora: Gema Isabel Medranda Cobeña

Cédula: 1313371328

Dirección: Cdla. El progreso – Portoviejo

Correo Electrónico: gema.medranda@unl.edu.ec

Teléfono: 0996015453

DATOS COMPLEMENTARIOS:

Director del Trabajo de Titulación: Ing. Paulo Alberto Samaniego Rojas, Mg. Sc.



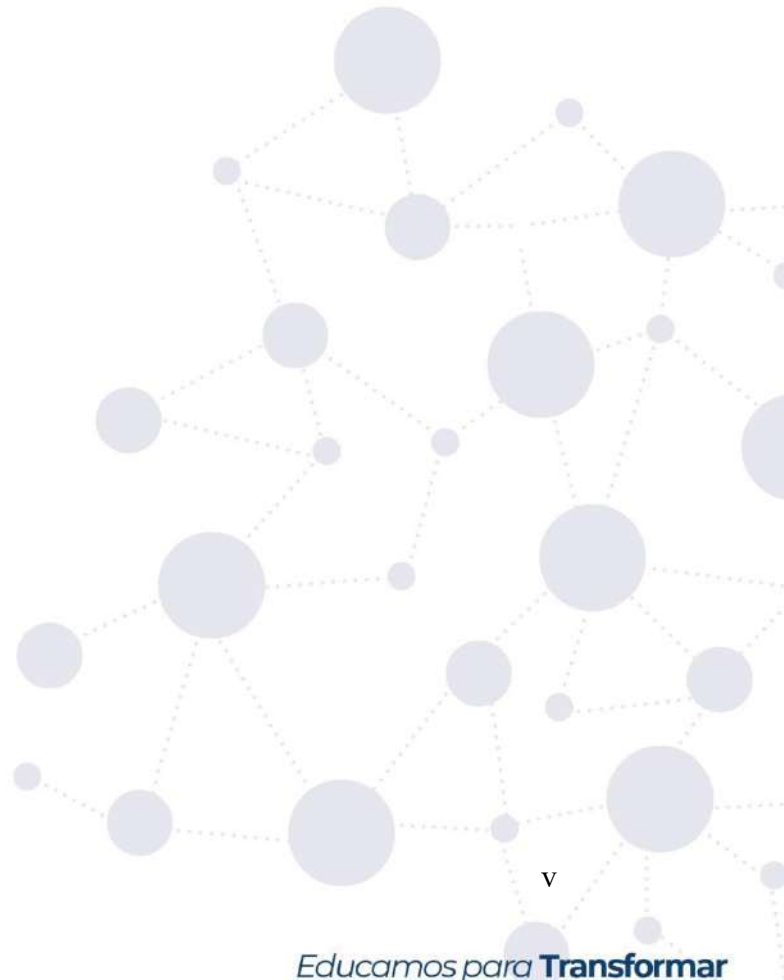
Dedicatoria

El presente Trabajo de Titulación está dedicado a Dios, a mi hija Ayumi, a mi pareja Mauro Loor, a mis padres y mis hermanos, por su amor y apoyo incondicional a lo largo de esta travesía, por ser mi motivación, ser pacientes y saber entenderme.

A mi director de titulación magister Paulo Alberto Samaniego Rojas, por su orientación, paciencia y sabiduría durante este arduo proceso de investigación. Su apoyo fue fundamental para alcanzar mis metas académicas.

A todos los que me han apoyado y participado en este trabajo de titulación, su contribución ha sido fundamental para no desmayar.

Gema Isabel Medranda Cobeña





Agradecimiento

A Dios, sin su protección y misericordia nada hubiera sido posible.

A mi hija Ayumi, por su apoyo y ánimo incondicional eres mi motivación.

A mi pareja, con mucho cariño, eres un ejemplo para mí.

A mis padres, toda mi gratitud y admiración.

A mi director del trabajo de titulación, magister Paulo Samaniego Rojas, GRACIAS por su invaluable conocimiento, paciencia y guía.

Gema Isabel Medranda Cobeña



Índice de Contenido

Portada	i
Certificación	ii
Autoría	iii
Carta de autorización	iv
Dedicatoria	v
Agradecimiento	vi
Índice de Tablas:	viii
Índice de Figuras:	ix
Índice de Anexos:	xiv
1. Título	1
2. Resumen	2
Abstract	3
3. Introducción	4
4. Marco Teórico	7
4.1. Introducción a las Comunicaciones Ópticas inalámbricas Submarinas	7
4.1.1. Fundamentos de las Comunicaciones Ópticas Underwater	7
4.2. Propiedades Ópticas y Factores del Agua en Comunicaciones Ópticas Submarinas	10
4.2.1. Propiedades Ópticas Inherentes (IOP):	11
4.2.2. Propiedades Ópticas Aparentes (AOP).	11
4.3. Sistema con Línea de Visión Directa (LOS) para Comunicaciones Ópticas inalámbricas Submarinas (UOWC)	15
4.4. Análisis de prestaciones del Software Optisystem (vs 21.1)	18
4.4.1. Características clave y funcionalidad de Optisystem.	18
4.4.2. Librerías de Optisystem	19
4.4.3. Principios de rendimiento del software especializado Optisystem para canales submarinos tipo LOS	20
5. Metodología	31
6. Resultados	33
6.1 Análisis del diseño del enlace de comunicación de línea de visión directa submarina.	33
6.2. Escenarios simulados en diferentes aguas de mar con diferentes partículas en suspensión, centelleo y turbulencia.	40
7. Discusión	43
8. Conclusiones	50
9. Recomendaciones	52
10. Bibliografía	53
11. Anexos	59



Índice de Tablas:

Tabla 1. Factores del agua de mar.....	12
Tabla 2. Expresiones para calcular de las propiedades del agua de mar que intervienen en las comunicaciones ópticas submarinas	13
Tabla 3. Ecuaciones de potencia recibida según el tipo de enlace.	16
Tabla 4. Absorción, dispersión y coeficiente de extinción Ecuaciones de potencia recibida según el tipo de enlace de diferentes tipos de agua oceánica	22
Tabla 5. Parámetros para simulación del canal considerando IOP del agua de mar, usando los datos para los tipos de agua de mar propuestos en [20].....	30
Tabla 6. Parámetros de simulación para el diodo láser y el fotoreceptor	37
Tabla 7. Análisis y mejora de los componentes del enlace LOS submarino propuesto en [14].	39
Tabla 8. Distancias máximas alcanzadas, simulación con los peores escenarios del canal submarino	40
Tabla 9. Resultados obtenidos con los canales predeterminados en el componente LOS Underwater Channel de Optisystem y los propuestos en [20], usando el Tx y Rx detallado en la tabla 6.	41

Índice de Figuras:

Figura 1 . Esquema Básico de un Sistema de Comunicación Óptica inalámbrica Submarina con línea de visión Directa.	9
Figura 2 . Penetración de la luz en el agua de mar oceánica muy clara.	12
Figura 3 . Tipos de enlace LOS: a) Punto a punto, b) LOS difusa, c) LOS MRR [2]	15
Figura 4 . Configuración principal del componente LOS Underwater Channel	23
Figura 5 . Configuración manual del tipo de atenuación.	24
Figura 6 . Modos de los parámetros del componente LOS submarino de Optisystem	25
Figura 7 . Configuraciones por default del componente LOS Underwater de Optisystem para el Centelleo	26
Figura 8 . Configuración del canal con centelleo	28
Figura 9 . Configuración de la pestaña de simulación del componente LOS submarino de Optisystem ...	29
Figura 10 . Diagramas del sistema UOWC para enlaces LOS.	33
Figura 11 . Escenarios con todos los tipos de agua de mar, con un transmisor de 650nm.	36
Figura 12 . Escenarios con interacción entre todos los tipos de agua de mar, con los datos para el transmisor y el receptor propuestos en esta investigación	42
Figura 13 . Primer diseño para el transmisor	68
Figura 14 . Segundo diseño para el transmisor	68
Figura 15 . Primer diseño para el receptor:	68
Figura 16 . Segundo diseño para el receptor:	69
Figura 17 . Transmisor propuesto en [14] reemplazando el canal por el componente LOS Underwater Channel	69
Figura 18 . Manteniendo el tipo de agua de mar de costa, y mejorando el fotoreceptor (PIN (Si e InGaAs) y filtro Gaussiano y Bessel) y las características del transmisor (frecuencia de 650nm y potencia de 30mW).	70
Figura 19 . Manteniendo el tipo de agua de mar de costa, y mejorando el fotoreceptor (PIN (Si e InGaAs) y filtro Gaussiano y Bessel) y las características del transmisor (frecuencia de 445 nm y potencia de 150 mW).	71
Figura 20 . Agua pura de mar sin turbulencias ni centelleos (mejor escenario submarino) evaluando optimización del fotoreceptor (PIN (Si e InGaAs) y filtro Gaussiano y Bessel) y las características del transmisor (frecuencia de 650 nm y potencia de 30 mW).	73

Figura 21 . Agua pura de mar sin turbulencias ni centelleos (mejor escenario submarino) evaluando optimización del fotoreceptor (PIN (Si e InGaAs) y filtro Gaussiano y Bessel) y las características del transmisor (frecuencia de 445 nm y potencia de 150 mW).....	74
Figura 22 . Tercer diseño para el receptor:	75
Figura 23 . Cuarto diseño para el receptor	75
Figura 24 . Modelo con el primer y segundo diseño del transmisor y el tercer y cuarto diseño del receptor en un canal de agua de costa.....	76
Figura 25 . Esquema con el diseño del primer y segundo transmisor, tercer y cuarto diseño del receptor en un canal ideal agua pura de mar.....	77
Figura 26 . Esquema con el diseño del primer y segundo transmisor, tercer y cuarto diseño del receptor en un canal con agua clara de mar.....	78
Figura 27 . Esquema con el diseño del primer y segundo transmisor, tercer y cuarto diseño del receptor en un canal con agua de puerto	79
Figura 28 . Esquema con el diseño del primer y segundo transmisor, tercer y cuarto diseño del receptor en un canal con agua turbia de puerto.....	80
Figura 29 . Esquema con el diseño del primer y segundo transmisor, tercer y cuarto diseño del receptor en un canal con pura de mar con pocas partículas en suspensión, centelleo y turbulencia leve.....	82
Figura 30 . Esquema con el diseño del primer y segundo transmisor, tercer y cuarto diseño del receptor en un canal con agua pura de mar con pocas partículas en suspensión, centelleo y turbulencia severo.....	83
Figura 31 . Esquema con el diseño del primer y segundo transmisor, tercer y cuarto diseño del receptor en un canal con agua clara de mar con pocas partículas en suspensión, centelleo y turbulencia leve.....	84
Figura 32 . Esquema con el diseño del primer y segundo transmisor, tercer y cuarto diseño del receptor en un canal con agua clara de mar con pocas partículas en suspensión, centelleo y turbulencia severo.....	85
Figura 33 . Esquema con el diseño del primer y segundo transmisor, tercer y cuarto diseño del receptor en un canal con agua de costa de mar con pocas partículas en suspensión, centelleo y turbulencia leve.....	86

Figura 34 . Esquema con el diseño del primer y segundo transmisor, tercer y cuarto diseño del receptor en un canal con agua de costa de mar con pocas partículas en suspensión, centelleo y turbulencia severa.....	87
Figura 35 . Esquema con el diseño del primer y segundo transmisor, tercer y cuarto diseño del receptor en un canal con agua de puerto con pocas partículas en suspensión, centelleo y turbulencia leve. ...	88
Figura 36 . Esquema con el diseño del primer y segundo transmisor, tercer y cuarto diseño del receptor en un canal con agua de puerto con pocas partículas en suspensión, centelleo y turbulencia severo.	89
Figura 37 . Esquema con el diseño del primer y segundo transmisor, tercer y cuarto diseño del receptor en un canal con agua turbia de puerto con pocas partículas en suspensión, centelleo y turbulencia leve.	90
Figura 38 . Esquema con el diseño del primer y segundo transmisor, tercer y cuarto diseño del receptor en un canal con agua turbia de puerto con pocas partículas en suspensión, centelleo y turbulencia severo.	91
Figura 39 . Esquema con el diseño del primer y segundo transmisor, tercer y cuarto diseño del receptor en un canal con agua pura de mar con mayor partículas en suspensión [20], sin centelleo ni turbulencia.....	92
Figura 40 . Esquema con el diseño del primer y segundo transmisor, tercer y cuarto diseño del receptor en un canal con agua clara de mar con mayor partículas en suspensión [20], sin centelleo ni turbulencia.....	93
Figura 41 . Esquema con el diseño del primer y segundo transmisor, tercer y cuarto diseño del receptor en un canal con agua de costa con mayor partículas en suspensión [20], sin centelleo ni turbulencia.	94
Figura 42 . Esquema con el diseño del primer y segundo transmisor, tercer y cuarto diseño del receptor en un canal con agua turbia de puerto con mayor partículas en suspensión [20], sin centelleo ni turbulencia.	95
Figura 43 . Esquema con el diseño del primer y segundo transmisor, tercer y cuarto diseño del receptor en un canal con agua pura de mar con mayor partículas en suspensión [20], centelleo y turbulencia leve.	96
Figura 44 . Esquema con el diseño del primer y segundo transmisor, tercer y cuarto diseño del receptor en un canal con agua pura de mar con mayor partículas en suspensión [20], centelleo y turbulencia severo.	97

Figura 45 . Esquema con el diseño del primer y segundo transmisor, tercer y cuarto diseño del receptor en un canal con agua clara de mar con mayor partículas en suspensión [20], centelleo y turbulencia leve.	98
Figura 46 . Esquema con el diseño del primer y segundo transmisor, tercer y cuarto diseño del receptor en un canal con agua clara de mar con mayor partículas en suspensión [20], centelleo y turbulencia severo.	99
Figura 47 . Esquema con el diseño del primer y segundo transmisor, tercer y cuarto diseño del receptor en un canal con agua de costa con mayor partículas en suspensión [20], centelleo y turbulencia leve.	100
Figura 48 . Esquema con el diseño del primer y segundo transmisor, tercer y cuarto diseño del receptor en un canal con agua de costa con mayor partículas en suspensión [20], centelleo y turbulencia severo.	101
Figura 49 . Esquema con el diseño del primer y segundo transmisor, tercer y cuarto diseño del receptor en un canal con agua turbia de puerto con mayor partículas en suspensión [20], centelleo y turbulencia leve.	102
Figura 50 . Esquema con el diseño del primer y segundo transmisor, tercer y cuarto diseño del receptor en un canal con agua turbia de puerto con mayor partículas en suspensión [20], centelleo y turbulencia severa.	103
Figura 51 . Tercer diseño para el transmisor.	104
Figura 52 . Simulación en el mejor escenario del canal (agua pura de mar, sin centelleo, ni turbulencia), con modulación NRZ, OFF y RZ.	105
Figura 53 . Cuarto diseño para el transmisor	106
Figura 54 . Simulación en el mejor escenario del canal (agua pura de mar, sin centelleo, ni turbulencia), con modulación NRZ y filtro Bessel y filtro Optico Gaussiano.	106
Figura 55 . PSK con transmisor láser independientes.	107
Figura 56 . QAM	107
Figura 57 . 16 QAM, usando fotoreceptor PIN Y APD.	108
Figura 58 . Valores predeterminados del componente LOS Underwater Channel de Optisystem, con turbulencia y centelleo leve a distancia de 5 metros para cuatro tipos de agua de mar.	109
Figura 59 . Valores predeterminados del componente LOS Underwater Channel de Optisystem, con turbulencia y centelleo severo a distancia de 5 metros para cuatro tipos de agua de mar.	110



Figura 60 . Valores predeterminados del componente LOS Underwater Channel de Optisystem, con turbulencia y centelleo leve a distancia de 10 metros para cuatro tipos de agua de mar. 111

Figura 61 . Valores predeterminados del componente LOS Underwater Channel de Optisystem, con turbulencia y centelleo severo a distancia de 10 metros para cuatro tipos de agua de mar. 112

Figura 62 . Valores predeterminados del componente LOS Underwater Channel de Optisystem, con turbulencia y centelleo leve a distancia de 15 metros para cuatro tipos de agua de mar. 113

Figura 63 . Valores predeterminados del componente LOS Underwater Channel de Optisystem, con turbulencia y centelleo severo a distancia de 15 metros para cuatro tipos de agua de mar. 114

Figura 64 . Datos de [20] para el canal LOS Underwater Channel de Optisystem, con turbulencia y centelleo leve a distancia de 5 metros para cuatro tipos de agua de mar. 115

Figura 65 . Datos de [20] para el canal LOS Underwater Channel de Optisystem, con turbulencia y centelleo severo a distancia de 5 metros para cuatro tipos de agua de mar. 116

Figura 66 . Datos de [20] para el canal LOS Underwater Channel de Optisystem, con turbulencia y centelleo leve a distancia de 10 metros para cuatro tipos de agua de mar. 117

Figura 67 . Datos de [20] para el canal LOS Underwater Channel de Optisystem, con turbulencia y centelleo severo a distancia de 10 metros para cuatro tipos de agua de mar. 118

Figura 68 . Datos de [20] para el canal LOS Underwater Channel de Optisystem, con turbulencia y centelleo leve a distancia de 15 metros para cuatro tipos de agua de mar, evaluando el canal en modo normal y sweep (10 iteraciones). 119

Figura 69 . Datos de [20] para el canal LOS Underwater Channel de Optisystem, con turbulencia y centelleo severo a distancia de 15 metros para cuatro tipos de agua de mar, evaluando el canal en modo normal y sweep (10 iteraciones) 120



Índice de Anexos:

Anexo 1 . Datos del Fabricante del Diodo Láser Transmisor	59
Anexo 2 . Datos del Fabricante del Photodetector UPD Series	62
Anexo 3 . Glosario de Términos	65
Anexo 4 . Análisis, diseño y optimización para el transmisor, receptor transmitiendo 10 Gbps en diferentes canales de agua de mar.	68
Anexo 5 . Escenarios de Simulación -- Según el tipo de agua de mar considerando los valores predeterminados del canal LOS Underwater de Optisystem.	109
Anexo 6 . Escenarios de Simulación -- Según el tipo de agua de mar considerando los datos de [20] para el canal LOS Underwater de Optisystem.	115
Anexo 7 . Tabla de los datos tabulados para demostrar la optimización del transmisor y receptor transmitiendo a 10 Gbps, en diferentes escenarios de agua de mar.	121
Anexo 8 . Evaluación de alcance y calidad de la señal transmitida en el mejor escenario de agua de mar (agua pura de mar, sin turbulencia ni centelleo).	127
Anexo 9 . Certificación de traducción del resumen	129

1. Título

Análisis de sistemas LOS UOWC a través de software de simulación

2. Resumen

El análisis de sistemas con línea de visión directa en enlaces submarinos (LOS UOWC) mediante el software de simulación Optisystem es crucial para evaluar el rendimiento de las comunicaciones ópticas submarinas. Se establecen los objetivos generales y específicos de la investigación, abordando los fundamentos de las comunicaciones ópticas submarinas y analizando las prestaciones del software Optisystem para canales submarinos tipo LOS. La metodología empleada es exploratoria y descriptiva, permitiendo comprender a fondo las características y comportamientos de los enlaces LOS en ambientes submarinos, identificando parámetros clave para la optimización de los sistemas LOS UOWC. La simulación y el análisis de resultados son esenciales, evaluando el rendimiento de los sistemas LOS UOWC a través del software de simulación. Se presentan conclusiones basadas en los resultados obtenidos y se discuten posibles recomendaciones para futuras investigaciones en este campo, resaltando la importancia de la simulación y el análisis detallado para mejorar la eficiencia y confiabilidad de las comunicaciones ópticas submarinas con línea de visión directa.

Palabras Clave: *Enlaces submarinos, canales submarinos, línea de visión directa, comunicaciones ópticas submarinas, Optisystem.*

Abstract

The analysis of direct line-of-sight systems in submarine links (LOS UOWC) using Optisystem simulation software is crucial to evaluate the performance of submarine optical communications. The general and specific objectives of the research are established, addressing the fundamentals of submarine optical communications and analyzing the performance of Optisystem software for LOS-type submarine channels. The methodology employed is exploratory and descriptive, allowing a thorough understanding of the characteristics and behaviors of LOS links in underwater environments, identifying key parameters for the optimization of LOS UOWC systems. Simulation and analysis of results are essential, evaluating the performance of LOS UOWC systems through simulation software. Conclusions are presented based on the results obtained and possible recommendations for future research in this field are discussed, highlighting the importance of simulation and detailed analysis to improve the efficiency and reliability of direct line-of-sight underwater optical communications.

Keywords: submarine links, submarine channels, direct line-of-sight, submarine optical communications, Optisystem

3. Introducción

La tecnología de comunicaciones ópticas inalámbricas submarinas (Underwater Optical Wireless Communication, UOWC) ofrece altas velocidades de transmisión de datos, que alcanzan grandes tasas de transmisión y pueden lograr comunicaciones de larga distancia de cientos de kilómetros, para lograr este propósito es necesario el uso de varios dispositivos de transmisión y recepción para ampliar el alcance de las comunicaciones más allá de las distancias de visibilidad directa (la cual suele ser corta).

La distancia máxima alcanzada depende de factores como la longitud de onda de la luz (la luz roja permite mayor alcance), la calidad del agua (agua clara favorece la transmisión) y la potencia del transmisor y la sensibilidad del receptor.

Los sistemas UOWC se clasifican de dos maneras: enlaces con línea de visión directa (Line of sight, LOS) y sin línea de visión directa (Non line of sight, NLOS). Los sistemas LOS requieren una ruta óptica directa entre el transmisor y el receptor, mientras que los sistemas NLOS pueden funcionar sin una línea de visión directa, a través de enlaces reflectivos. UOWC ofrece ventajas como alta confiabilidad y baja latencia, lo que lo hace adecuado para diversas aplicaciones de comunicación submarina como exploración petrolera, monitoreo del océano. Sin embargo, la UOWC también enfrenta desafíos como la turbulencia oceánica, la distancia de transmisión limitada debido a la atenuación de la luz en el agua y la necesidad de enlaces de comunicación estables y confiables [1][2][3][4]. Las líneas de investigación en este ámbito del conocimiento, se encuentran explorando técnicas como los sistemas centelleantes basados en fibra óptica y la luz de momento angular orbital (OAM) [2] [5] [6] para superar estos desafíos y ampliar las capacidades de la UOWC.

Los sistemas LOS utilizan los haces de luz láser los cuales son altamente direccionales y se concentran en un área específica, transmitiendo de punto a punto; esta

direccionalidad reduce la dispersión de la señal y acorta la distancia de transmisión, además la tecnología UOWC utiliza la parte del espectro óptico que va desde los 380 a los 780 nanómetros (nm), lo cual corresponde a la parte visible del espectro y del infrarrojo de 780 a 1400 nm [7] [8].

Los simuladores son fundamentales para mejorar los sistemas de comunicación subacuáticos UOWC y analizar factores importantes como lo son las propiedades ópticas inherentes (IOPs) que afectan el rendimiento; como la absorción, la dispersión, la turbulencia y el centelleo; con el objetivo de estudiar sistemas UOWC de tipo LOS eficientes y confiables.

Las comunicaciones ópticas inalámbricas submarinas (UOWC) utilizan sistemas de línea de visión directa (LOS) para transmitir información a través del agua mediante ondas electromagnéticas. Analizar estos sistemas a través de un simulador de software es un paso básico y esencial para mejorar la factibilidad, eficiencia, precisión, seguridad y rentabilidad de los sistemas de comunicación UOWC, sin incurrir en altos costos asociados con la construcción y prueba de sistemas reales y así evaluar el rendimiento del sistema en diferentes situaciones. Los simuladores también pueden ayudar a optimizar el diseño del sistema, incluida la selección de la frecuencia de transmisión, la potencia de transmisión, la modulación, codificación y decodificación de la señal, lo que contribuye para mejorar el rendimiento del sistema y aumentar la eficiencia de la transmisión.

Además, como esta tecnología está en constante desarrollo y aún es poco conocida en nuestro medio, es necesario su estudio para mejorar las consideraciones en los diseños de estos sistemas y evaluar el rendimiento en diferentes situaciones en nuestros mares.

La investigación con una metodología exploratoria, descriptiva busca realizar un estudio general de las comunicaciones FSO en UOWC tipo LOS, considerando el

comportamiento del canal y sus componentes utilizando el simulador Optisystem; para ello se plantean los siguientes objetivos:

- Investigar las características y comportamientos de los enlaces submarinos inalámbricos con línea de visión directa (LOS), considerando factores del canal como dispersión, absorción y turbulencia.
- Examinar los principios de funcionamiento y rendimiento del software especializado OptiSystem en escenarios de enlaces submarinos en línea de visión directa.
- Analizar, evaluar y optimizar los enlaces ópticos inalámbricos submarinos con línea de visión directa (LOS), teniendo en cuenta sus parámetros más relevantes mediante la utilización del software OptiSystem.

Con ello se podrá responder a la interrogante de la investigación:

¿Cómo realizar un análisis de comunicaciones ópticas inalámbricas submarinas UOWC de tipo LOS mediante uso de software de simulación?

La investigación en su marco teórico, consta de cuatro secciones a destacar; la primera sección corresponde a una introducción de las comunicaciones ópticas inalámbricas Submarinas, la segunda sección a las propiedades ópticas y factores del agua en comunicaciones ópticas submarinas, la tercera sección a los sistema con línea de visión directa (LOS) para comunicaciones ópticas inalámbricas submarinas (UOWC) y la cuarta y última sección al análisis de las prestaciones y configuraciones del software Optisystem para las simulaciones de comunicaciones LOS submarinas.

Luego de la conceptualización y descripción; ejecutamos la simulación que corresponde a otro apartado de este documento, siguiendo con la metodología que permitio definir la ruta para concluir con éxito la investigación y elaborar las conclusiones y discusiones respectivas producto del análisis realizado.

4. Marco Teórico

4.1. Introducción a las Comunicaciones Ópticas Inalámbricas Submarinas

Las comunicaciones ópticas submarinas representan una disciplina especializada que busca establecer enlaces de datos eficientes en entornos submarinos. Las comunicaciones ópticas submarinas involucran la transmisión de información a través de señales ópticas, utilizando la propagación de la luz en medios acuáticos. Este enfoque se presenta como una alternativa innovadora para la transmisión de datos en entornos submarinos, superando las limitaciones de las tecnologías convencionales [7] [8] [9].

Las comunicaciones ópticas submarinas proporcionan conexiones de alta velocidad y ancho de banda en escenarios submarinos, son utilizados ampliamente en aplicaciones como la monitorización de sistemas submarinos, exploración marina y transmisión de datos en plataformas submarinas, entre otras [9].

4.1.1. Fundamentos de las Comunicaciones Ópticas Underwater

Los fundamentos de las comunicaciones ópticas submarinas incluyen la modulación de la luz, la propagación de señales ópticas a través del agua y la detección de estas señales [6] [10] [11].

Los desafíos particulares que enfrentan las comunicaciones ópticas submarinas son la atenuación de la señal, la dispersión y los efectos ambientales que impactan la calidad de la transmisión [10].

En el contexto de las comunicaciones ópticas submarinas, un enlace LOS es factible cuando no hay obstrucciones que impidan la transmisión de la luz entre los dispositivos emisor y receptor bajo el agua. Para garantizar una comunicación óptima en entornos submarinos, resulta crucial comprender los desafíos que enfrenta el análisis de sistemas de línea de visión directa (LOS). La visibilidad directa es fundamental para la transmisión de señales ópticas, y su presencia o ausencia determina la efectividad de estas

soluciones [2]. Las aplicaciones de este tipo de análisis abarcan desde la transmisión de datos a través de cables submarinos hasta la comunicación entre drones submarinos y aéreos [1].

Los sistemas de comunicaciones ópticas bajo el agua que operan dentro del espectro de luz visible (400 a 700 nm), se basan en la propagación de la luz a través del espacio libre submarino. Esta tecnología permite la transmisión de información entre una fuente óptica ya sea un diodo emisor de luz LED (light emitting diode) o un diodo láser LD (laser diode), que sumado a otros componentes conforman un transmisor óptico, de manera adicional esta tecnología, por ahora, no tiene regulación y no necesita de licencias para operar, ya que en la actualidad no existe una normativa de telecomunicaciones que regulen estas aplicaciones tecnológicas, como lo describe [8]. La luz, al poder ser considerada como una onda electromagnética se propaga por el agua de forma similar a como lo hace en el aire; sin embargo, el agua presenta ciertas características que afectan a la propagación de la luz, como son los fenómenos de absorción y la dispersión, causando la pérdida de energía de la luz y la desviación de fotones al interactuar con las moléculas del agua; la atenuación de la luz en agua depende de la longitud de onda, siendo menor en longitudes de onda de 460 nm para agua clara de mar. Sin embargo, esta longitud de onda óptima cambia en aguas costeras, alcanzando valores alrededor de 540 nm. Por otro lado la turbulencia es la variación del índice de refracción a lo largo de la trayectoria de propagación debido a las fluctuaciones de densidad, temperatura y salinidad del entorno submarino y que afectan la intensidad en la señal del receptor, y es lo que se denomina como centelleo y degrada el rendimiento de los enlaces LOS submarinos.

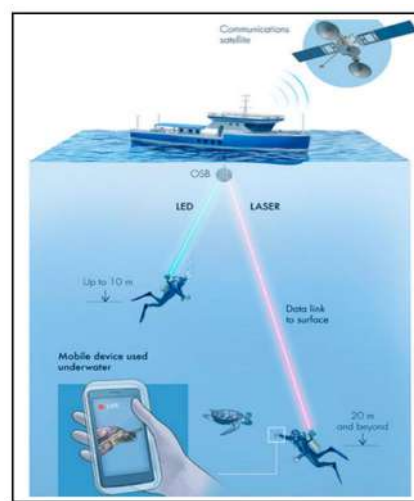
Los sistemas UOWC, son una tecnología que puede transmitir grandes cantidades de datos a una corta distancia entre el transmisor y el receptor, lo que ha causado interés en el ejército, la industria y la academia. Existen diversas técnicas de multiplexación

usadas en las comunicaciones ópticas submarinas como la Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFMD) mencionada en [5], On-Off Keying - Non-Return to Zero (NRZ-OOK) utilizada en [2] y [12], entre otras para la transmisión de datos. Para mejorar y estabilizar las comunicaciones ópticas inalámbricas submarinas en [2] [3] [5] [12] se plantearon retos específicos de los canales UOWC, contemplando turbulencias, condiciones del agua de mar y modelos de sistema para analizar la expansión del impulso y el impacto de la dispersión del agua de mar en las señales ópticas transmitidas. El modelo considera la correlación mutua de un grupo de fotones en el proceso de transmisión; simula y analiza el rendimiento del sistema bajo diferentes circunstancias, como distancias de transmisión, velocidades de bits, aperturas del receptor y potencia transmitida.

En la figura 1 se observa un esquema básico de comunicaciones considerando un receptor anclado a un barco con transmisores LED y LD a 10 y 20 metros de profundidad respectivamente.

Figura 1.

Esquema Básico de un Sistema de Comunicación Óptica inalámbrica Submarina con Línea de Visión Directa.



Fuente: Tomado de <https://www.subaquaticamagazine.es/aqua-fi-el-nuevo-sistema-de-comunicacion-inalambrica-subacuatica/>.

Los sistemas de comunicación óptica inalámbrica submarina (UOWC) utilizan la luz para transmitir información bajo el agua. La investigación realizada en [11] se centra en las Comunicaciones Ópticas Inalámbricas (Optical Wireless communication, OWC) para el Internet de las Cosas Submarinas (IoUT), destacando la capacidad de manejar grandes tasas de datos con baja latencia para aplicaciones en tiempo real. Se analiza la viabilidad para determinar el rango de comunicación para tres configuraciones de enlace en línea de visión: punto a punto, difuso y reflector retro modulante, en los diferentes tipos de agua oceánica.

Del mismo modo se analizaron los componentes óptimos, como la fuente óptica LED, definido por un modelo de radiación Lambertiano, modelo de pérdidas de propagación o path loss de Beer Lambert. Este modelo describe cómo la luz se debilita al atravesar un medio, modelando la pérdida de potencia de una señal inalámbrica (path loss) a medida que se propaga incluyendo los efectos de absorción y dispersión de los tipos de agua [12] y [11].

El modelo de propagación de ondas esféricas para describir como se propaga la luz en el agua, el fotodetector modelado por el modelo de área activa, la ganancia óptica de proyección (PO) del transmisor y ganancia óptica de captación (CO) del receptor.

4.2. Propiedades Ópticas y Factores del Agua en Comunicaciones Ópticas Submarinas

Las propiedades ópticas del agua de mar en las comunicaciones ópticas submarinas son fundamentales para comprender cómo la luz se comporta y se propaga en el medio submarino, por lo que juegan un papel importante. Estas propiedades pueden clasificarse en dos categorías distintas: inherentes y aparentes [8].

4.2.1. Propiedades Ópticas Inherentes (IOP):

Las propiedades ópticas inherentes del agua de mar se refieren a los parámetros que están intrínsecamente ligados al medio y a su composición, así como a las partículas presentes en él. Estos parámetros son fundamentales para comprender cómo la luz se propaga y se atenúa en el agua, lo que afecta directamente la calidad y la velocidad de las comunicaciones submarinas. Las principales propiedades para considerar son el índice de refracción (n), la dispersión, la absorción que están afectadas por la salinidad, la temperatura, clorofila y la longitud de onda (λ).

4.2.2. Propiedades Ópticas Aparentes (AOP).

Consecuentemente, las propiedades ópticas aparentes del agua de mar no sólo están influenciadas por el medio en sí, sino que también están relacionadas con la geometría de la iluminación. Esto implica que factores como la dirección de la luz incidente y la estructura de la fuente de luz pueden afectar la forma en que la luz se transmite a través del agua, lo que a su vez impacta en la eficacia de las comunicaciones submarinas de línea de visión directa; por ende, se deben configurar adecuadamente el ángulo azimutal y la inclinación.

Sin embargo, en el agua de mar existen factores que se deben considerar para obtener dichas propiedades [9].

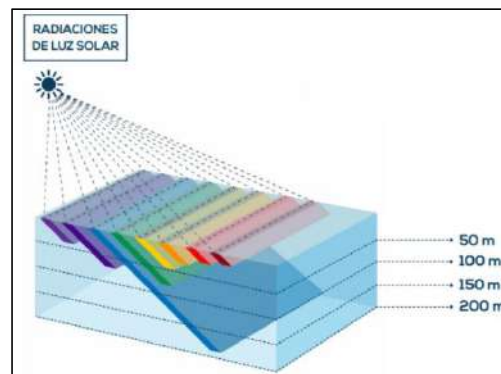
Tabla 1.

Factores del agua de mar

Factor	Descripción
Salinidad	Media del mar es 35 p.s.u o ppt
Temperatura	10° a 15° en invierno 21° a 30° en verano
Sales	Cloro, Sodio, magnesio, calcio, potasio, bromo, estroncio, boro y flúor
Gases Disueltos	Nitrógeno, oxígeno, dióxido de carbono
Biológicos	Fitoplancton, y otros organismos microscópicos
Luz solar	15 metros agua de costa 200 metros en aguas oceánicas abiertas muy claras

Figura 2.

Penetración de la luz en el agua de mar oceánica muy clara.



Fuente: Tomado de [9]. A partir de 100m a 200m de profundidad la temperatura se mantiene constante a $\pm 13^{\circ}\text{C}$, esto se debe a que los rayos solares solo pueden alcanzar hasta los 200 metros de profundidad.

En [1] [6] [8] [14] [10] [16] [17] [18] [19] [20] [21] [22] se han planteado ecuaciones para expresar tanto las propiedades y los factores del agua de mar.

Tabla 2.

Expresiones para calcular las propiedades del agua de mar que intervienen en las comunicaciones ópticas submarinas

Valor a obtener	Fórmula	Referencia
Índice de refracción estructurado de agua de mar. (Turbulencia oceánica)	$\Phi(k_x, k_y) = 0.388 * 10^{-8} C_n^2 (\sqrt{k_x^2 + k_y^2})^{-\frac{11}{3}} \left[1 + 2.35 (\sqrt{k_x^2 + k_y^2} \eta)^{\frac{2}{3}} \right] x (e^{-AT\delta} + \omega^{-2} e^{-AS\delta} - 2\omega^{-1} e^{-ATS\delta}) \quad (1)$ <p>k_x, k_y = frecuencia angular espacial de la fluctuación del índice de refracción en el eje x, y, respectivamente</p> <p>$C_n^2 = 10^{-8} \chi T \varepsilon^{-1/3}$; $AT = 1.863 * 10^{-2}$; $AS = 1.9 * 10^{-4}$; $ATS = 9.41 * 10^{-3}$; $\eta = 1 * 10^{-3} m$</p> <p>ω = relación entre la temperatura causada por la turbulencia oceánica y la salinidad su valores son [- 5,0].</p> <p>Cuando se aproxima a - 5, el gradiente de temperatura domina la turbulencia oceánica, y cuando se aproxima a 0, los gradientes de salinidad dominan la turbulencia oceánica.</p> <p>η = es la microescala de Kolmogorov. $\delta = 8.284 * (\sqrt{k_x^2 + k_y^2} \eta)^{\frac{3}{4}} + 12.978 * (\sqrt{k_x^2 + k_y^2} \eta)^2$</p>	[2] [10]
Transferencia radiativa	$L(z, \theta, \phi) = L(0, \theta, \phi) \exp(-cr) + L_K^E$ <p>$L_K^E = \frac{L^E(0, \theta, \phi) \exp(-K * r * \cos(\theta))}{c - K * \cos(\theta)} * [1 - \exp(-r(c - K * \cos(\theta)))]$ reflexiones o dispersión</p> <p>$z = distancia$</p>	[17] [18] [19] [20] [21]
Factor de propagación de pérdidas. (Beer-Lambert)	$L_p(\lambda, z) = h * \exp[-c(\lambda) * z]$ <p>$c(\lambda) = representa el coeficiente acumulado de atenuación$</p> <p>$h = 6.63 * 10^{-34} Js$; constante de Planck</p> <p>$z = distancia$</p>	[8] [19] [21] [22] (3)
Coefficiente de absorción	$a(T, S, C; \lambda) = a_w(T_r, 0; \lambda) + \Psi_T(T - T_r) + \Psi_S S + a_0^c(\lambda) \left(\frac{C}{C_0^c} \right)^{0.602} + a_f^0 C_f e^{-k_f \lambda} + a_h^0 C_h e^{-k_h \lambda}$ <p><math>a_w(T, S; \lambda) = es el coeficiente de absorción de agua pura en m^{-1} con una λ en nm</math></p> <p>$T_r = referencia de temperatura$</p> <p>$\Psi_S = coeficiente de salinidad y \Psi_T = coeficiente de temperatura$</p> <p><math>a_0^c = coeficiente de absorción de la clorofila en m^{-1}</math></p> <p><math>C = coeficiente de absorción total de la clorofila en $mg m^{-3}$</math></p>	[16] [19] [22]

Constantes: $C_c^0 = 1 \text{ mg m}^{-3}$; $a_f^0 = 35.959 \text{ m}^2 \text{ mg}^{-1}$; $a_h^0 = 18.828 \text{ m}^2 \text{ mg}^{-1}$; $k_n = 0.0189 \text{ nm}^{-1}$ para C y C_f ; $k_n = 0.01105 \text{ nm}^{-1}$ para C_h

(4)

$$b(T, S, C; \lambda) = 16.06 \left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^{4.32} * \beta_\omega(90; T, S; \lambda_0) + b_s^0(\lambda) * 0.01739 * C * e^{0.11631 * C} + b_l^0(\lambda) * 0.76284 * C * e^{0.03092 * C}$$

[16] [19]
[22]

$\lambda_0 =$ referencia de onda de la luz

$\beta_\omega(90; T, S; \lambda_0) =$ volumen de dispersión en función a 90°

Coefficiente de la dependencia espectral de:

dispersión.

$$b_s^0(\lambda) = (1.1513 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}) * \left(\frac{400}{\lambda}\right)^{1.17}$$

$$b_l^0(\lambda) = (0.3411 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}) * \left(\frac{400}{\lambda}\right)^{0.3}$$

(5)

Coefficiente de

Atenuación

$$c(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda)$$

$a(\lambda) =$ coeficiente de absorción

$b(\lambda) =$ coeficiente de dispersión

(6)

[8] [17]

[21] [22]

Albedo de

simple

dispersión

$$\omega_0 = \frac{b(\lambda)}{c(\lambda)}$$

$b(\lambda) =$ coeficiente de dispersión

$c(\lambda) =$ coeficiente de atenuación

(7)

[14] [21]

[22]

Absorbancia

$$A(\lambda) = \varepsilon(\lambda) / C$$

$\varepsilon(\lambda) =$ absortividad molar que depende de la longitud de onda

(8)

[14] [16]

[21]

Transmitancia

$$T(\lambda) = 10^{-A(\lambda)}$$

$A(\lambda) =$ Absorbancia

(10)

[14] [22]

Modelo

simplificado de

los coeficientes

de absorción y

dispersión

Absorción

$$a(\lambda) = [a_w(\lambda) + 0.06a_c(\lambda)C^{0.65}][1 + 0.2 \exp[-0.014(\lambda - 440)]]$$

Dispersión

$$b(\lambda) = 0.30 \frac{550}{\lambda} C^{0.62}$$

(11)

[8] [10]

Fuente: Para otros cálculos adicionales a considerar véase [23]

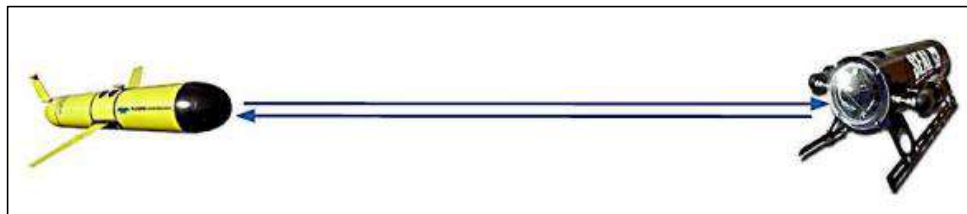
4.3. Sistema con Línea de Visión Directa (LOS) para Comunicaciones Ópticas inalámbricas Submarinas (UOWC)

Existen tres configuraciones de sistemas UWOC para enlaces LOS: punto a punto, LOS difusa, LOS de los catadióptricos modulantes (modulating retro reflection, MRR) [11].

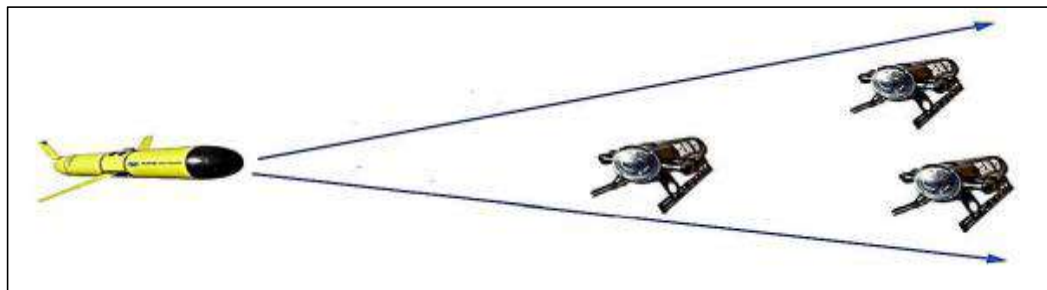
Los enlaces punto a punto son usados para nodos estacionarios, en razón de lo angosto de la apertura de los ángulos de aceptación de los detectores y del haz de luz, por ello se debe mantener una alineación precisa para poder garantizar calidad en la señal; mientras que en LOS difusa tiene estos ángulos de apertura anchos y no precisa de alineación, por ello la distancia entre el Tx y el Rx son más cortas que el anterior. La comunicación LOS con retroreflectores modulantes es semejante a LOS difusa y se usa cuando una parte del enlace ya sea el Tx o Rx tiene más recursos que la otra parte [2].

Figura 3.

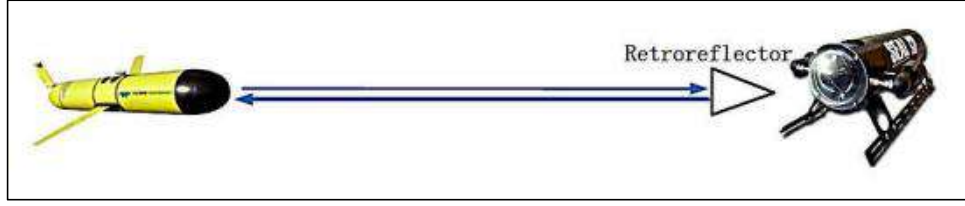
Tipos de enlace LOS: a) Punto a punto, b) LOS difusa, c) LOS MRR [2]



a)



b)



c)

Fuente: Tomado de [2]

A cada tipo de enlace le corresponde una ecuación para la potencia recibida, la cual se detallará en la siguiente tabla:

Tabla 3.

Ecuaciones de potencia recibida según el tipo de enlace.

Tipo de enlace LOS	Ecuación
Punto a punto	$P_r = P_t \eta_t \eta_r e^{-c(\lambda)d} \left(\frac{n^2}{\sin^2 \varphi FOV} \right) T(\varphi) \frac{A_{PD} \cos(\varphi)}{\pi d^2 (\tan \theta)^2} \Pi \left(\frac{\varphi}{\varphi FOV} \right)$ $\theta \ll \frac{\pi}{20}; \quad \Pi \left(\frac{\varphi}{\varphi FOV} \right) = \begin{cases} 1 & \frac{\varphi}{\varphi FOV} \leq 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$ <div style="text-align: right;">(12)</div> <p><i>P_t</i>: Potencia óptica media del transmisor</p> <p><i>η_t</i>: Eficiencia óptica del transmisor</p> <p><i>η_r</i>: Eficiencia óptica del receptor</p> <p><i>d</i>: Alcance del enlace de comunicación entre Tx y Rx</p> <p>$\frac{P_r}{P_t} = e^{-c(\lambda)d}$: Pérdida del trayecto de propagación.</p> <p><i>θ</i>: ángulo de divergencia del haz del transmisor</p> <p><i>φ</i>: ángulo de incidencia del haz luminoso del receptor</p> <p><i>φ FOV</i>: ángulo del campo de visión del receptor</p> <p><i>n</i>: índice de refracción de la lente interna del concentrador en el receptor</p>
Difusa	$P_r = P_t \eta_t \eta_r e^{-c(\lambda)d} \left(\frac{m+1}{2\pi} \right) \cos^m(\theta) G(\varphi) T(\varphi) \frac{A_{PD} \cos(\varphi)}{d^2} \Pi \left(\frac{\varphi}{\varphi FOV} \right)$ <div style="text-align: right;">(13)</div> <p><i>P_t</i>: Potencia óptica media del transmisor</p> <p><i>η_t</i>: Eficiencia óptica del transmisor</p> <p><i>η_r</i>: Eficiencia óptica del receptor</p> <p><i>d</i>: Alcance del enlace de comunicación entre Tx y Rx</p>

utilizada. La atenuación total de la señal de una señal óptica que se propaga en una masa de agua se describe mediante el coeficiente de extinción $c(\lambda)$ en m^{-1} , que se determina sumando tanto $a(\lambda)$ como $b(\lambda)$, como lo menciona también la ficha técnica del componente:

La tabla 4 muestra los valores para $a(\lambda)$, $b(\lambda)$ y $c(\lambda)$ para $\lambda = 532$ nm en los diferentes tipos de agua oceánica.

Tabla 4.

Absorción, dispersión y coeficiente de extinción de diferentes tipos de agua oceánica

Tipo de agua de mar	$a(\lambda)(m^{-1})$	$b(\lambda)(m^{-1})$	$c(\lambda)(m^{-1})$
Pure Sea	0.0405	0.0025	0.043
Clear Ocean	0.114	0.037	0.151
Costal Ocean	0.179	0.219	0.398
Harbor I	0.187	0.913	1.1
Harbor II	0.366	1.824	2.19

Fuente: Tomado de la guía/ayuda del software Optisystem, el canal está modelado para un medio ideal (no hay ruido de fondo o turbulencias por propiedades del agua de mar consideradas en el modelo).

Considerando que el transmisor debe estar perpendicular al receptor, el software utiliza la siguiente ecuación para el cálculo de potencia óptica recibida en el telescopio [11] [25].

$$P_{R los} = P_T \eta_T \eta_R \exp \left[-c(\lambda) \frac{d}{\cos(\theta)} \right] \frac{A_{Rec} \cos(\theta)}{2\pi d^2 [1 - \cos(\theta_0)]} \quad (15)$$

La simulación del canal por medio del componente LOS Underwater Channel de Optisystem, trae por defecto las configuraciones que se mostrarán en la figura 4 hasta la figura 9.

imita la propagación de la luz bajo el agua mediante la emisión y el seguimiento de un gran número de fotones. Este método es el preferido por sus resultados precisos, su facilidad de programación y su gran flexibilidad. Además, Optisystem emplea soluciones analíticas desarrolladas mediante el vector de Stokes y la aproximación de ángulo pequeño para considerar la polarización de la luz y la dispersión múltiple en el entorno submarino.

Estas soluciones numéricas son cruciales para modelar con precisión el comportamiento de la luz en canales submarinos afectados por factores como los coeficientes de absorción, dispersión, atenuación y turbulencia [1] [4] [7] [15].

En 2024, la biblioteca de Optisystem desde su versión 21.1 se amplió con la incorporación de componentes específicos para canales submarinos LOS (line-of-sight) y NLOS (non-line-of-sight) en la biblioteca Free Space Optics. Esta incorporación permite el diseño y modelado de entornos submarinos específicos para comunicaciones ópticas, considerando factores como: la temperatura, las partículas en el agua, la salinidad, las turbulencias y las burbujas de aire. Los usuarios pueden ingresar sus propios datos calculados para el canal, lo que facilita una simulación precisa del comportamiento de las comunicaciones ópticas submarinas en diferentes escenarios. Esta nueva funcionalidad representa un avance significativo para el desarrollo de las comunicaciones ópticas submarinas, ya que permite optimizar el diseño de sistemas y evaluar el impacto de diversos factores ambientales en la calidad de la señal [1] [4] [7] [15].

En consecuencia, para el diseño del canal se utilizó la ecuación 6 que se describió en [11] [15] y [25], la cual detalla que “El canal de comunicación óptica inalámbrica submarina (UWOC) es muy vulnerable a los efectos adversos tanto de la absorción $a(\lambda)$ como de la dispersión $b(\lambda)$, que causan la degradación de la señal de información óptica durante su propagación a través del canal, donde λ es la longitud de onda de la luz

detectores de umbral, circuitos de decisión para modulación PSK/QAM, fotodetectores PIN y APD, demoduladores (OFDM, frecuencia, fase-amplitud), decodificadores (PAM, QAM, PSK, etc.) y conjuntos de herramientas de procesamiento digital de señales (DSP) para sistemas PSK y QAM coherentes de polarización única y doble.

Filtros, proporciona una gran variedad de filtros eléctricos y ópticos para la simulación del diseño de subsistemas y sistemas, incluidas funciones de filtro estándar (Bessel, Gaussiano, RC, coseno elevado, etc.), filtros digitales IIR/FIR, filtros periódicos, filtros reflectantes/FBG, filtros medidos, filtro de parámetros S y acústico-ópticos.

Herramientas de diseño óptico espacial y de espacio libre, OptiSystem dispone de componentes especializados que permiten modelar canales ópticos de espacio libre como: FSO, WOC, LOS, LIFI, FSO Weather Condition, LOS Underwater Channel, NLOS Underwater Channel (características de antenas, propagación atmosférica) y el análisis espacial del acoplamiento de señales multimodo entre dispositivos (generadores multimodo, conectores espaciales, lentes delgadas, visualizadores espaciales).

Herramientas de visualización, incluyen conjuntos de pruebas y analizadores de BER, analizadores de diagramas de ojo, analizadores de espectro, osciloscopios, visualizadores ópticos en el dominio del tiempo, medidores de potencia, analizadores de polarización, visualizadores espaciales, flujo rodeado, analizador DMD (Digital Micromirror Device), analizador de todos los parámetros fotónicos, analizador de filtros y extractor de parámetros S.

4.4.3. Principios de rendimiento del software especializado Optisystem para canales submarinos tipo LOS

Para la simulación del entorno submarino el software Optisystem utiliza la simulación de Monte-Carlo o el método de diferencias finitas para resolver la Ecuación de Transferencia Radiativa (ETR), que es un solucionador numérico probabilístico que

Optisystem puede integrar herramientas anexas de Optiwave como OptiAmplifier, OptiBPM, OptiGrating, y OptiFiber. La representación de señales mixtas (ópticas y eléctricas) se logra utilizando algoritmos en función de las necesidades de precisión y eficiencia.

Para predecir el rendimiento del sistema, Optisystem en su versión 21.1 tiene componentes que calculan el BER y el factor Q (se refiere a la calidad de la señal óptica), esto lo realiza mediante análisis numéricos o técnicas semianalíticas para sistemas limitados por interferencias entre símbolos y ruido. Como software de alta eficiencia, consta con herramientas avanzadas de visualización, graficando espectros OSA, chirp de señal, diagramas de ojo, estado de polarización, diagramas de constelación, la potencia de la señal, la ganancia, la figura de ruido, la OSNR por canal, entre otros.

4.4.2. Librerías de Optisystem

Las librerías de Optisystem se clasifican según [25] en 17, solo mencionaremos las que se emplearán en el diseño del diagrama UOWC para enlaces LOS:

Librerías de transmisores, con una amplia gama de fuentes ópticas como Fabry-Perot, DFB (Distributed Feedback Laser), VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser), generadores de pulsos de señales eléctricas ópticas y viceversa como EA (Equalization Adaptive), MZ (Mach-Zehnder), QAM (Quadrature Amplitude Modulation), PAM (Pulse Amplitude Modulation), FSK (Frequency Shift Keying), OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) y generadores de señales multimodo como Laguerre – Gaussian, Hermite-Gaussian y el método de la matriz de línea de transmisión (TLMM).

Librería de receptores, contiene todos los componentes necesarios para modelar con precisión subsistemas de receptores de comunicaciones ópticas. Los componentes incluyen regeneradores (recuperación de reloj/datos, 3R), ecualizadores electrónicos,

que reflejan un haz de luz que se propaga en dirección paralela al haz de luz incidente, esta configuración evalúa los recursos del Tx y Rx, considerando los requisitos energéticos y la complejidad del sistema de comunicación como capacidad de carga y elevación [11].

4.4. Análisis de prestaciones del Software Optisystem (vs 21.1)

Optisystem es un software de simulación de sistemas de comunicación óptica, desarrollado por Optiwave Systems Inc., posee un entorno gráfico intuitivo que permite crear y modificar esquemas, simularlos en diferentes canales, con una amplia gama de funciones que constan en la biblioteca de componentes ópticos predefinidos, como láseres, moduladores, detectores, amplificadores, filtros entre otros, así como, capacidades para el diseño, y análisis (BER, potencia óptica y SNR). Para el estudio de los canales submarinos, cuenta con la posibilidad de estudiar configuraciones LOS Underwater Channel y NLOS Underwater Channel para configuración y optimización de sistemas UOWC. [24]

4.4.1. Características clave y funcionalidad de Optisystem.

El software ofrece una amplia variedad de funciones, como se detalla en las referencias [24] y [25]. Entre sus características más destacadas se incluyen: una extensa biblioteca de componentes que abarca dispositivos eléctricos y electrónicos, lo que facilita la creación de modelos precisos; bloques predefinidos que permiten la introducción de parámetros reales y la utilización de equipos de prueba y medición de diversos proveedores. Gracias a su flexibilidad, el software es compatible con MATLAB, SPICE, C++, entre otros, lo que posibilita la creación de subsistemas personalizados que no se encuentran en la biblioteca estándar o que se desean evaluar de manera específica. Además, ofrece la capacidad de ingresar parámetros, así como compartir componentes y subsistemas mediante el uso del estándar de lenguaje de programación VB Script

$\frac{P_r}{P_t} = e^{-c(\lambda)d}$: Perdida del trayecto de propagación.

θ : ángulo de divergencia del haz del transmisor

φ : ángulo de incidencia del haz luminoso del receptor

φ FOV: ángulo del campo de visión del receptor

n : índice de refracción de la lente interna del concentrador en el receptor

APD: Área de apertura del receptor activo

m : Orden Lambertiana de la emisión que describe la direccionalidad del haz del transmisor

$G(\varphi)$: Ganancia del transmisor óptico

$$P_r = P_t \eta_t \eta_r \eta_{MRR} e^{-c(\lambda)d} \left(\frac{n^2}{\sin^2 \varphi \text{FOV}} \right) T(\varphi) \frac{A_{PD} \cos(\varphi)}{\pi d^2 (\tan \theta_{MRR})^2} \frac{A_{MRR} \cos(\varphi)}{2\pi d^2 (1 - \cos \theta)} \Pi \left(\frac{\varphi}{\varphi \text{FOV}} \right)$$

P_t : Potencia óptica media del transmisor

η_t : Eficiencia óptica del transmisor

η_r : Eficiencia óptica del receptor

d : Alcance del enlace de comunicación entre Tx y Rx

$\frac{P_r}{P_t} = e^{-c(\lambda)d}$: Perdida del trayecto de propagación.

θ : ángulo de divergencia del haz del transmisor

φ : ángulo de incidencia del haz luminoso del receptor

φ FOV: ángulo del campo de visión del receptor

n : índice de refracción de la lente interna del concentrador en el receptor

η_{MRR} : Eficiencia Óptica del catadióptrico

θ_{MRR} : Ángulo de divergencia del haz del catadióptrico

A_{MRR} : Área de apertura del catadióptrico

MRR

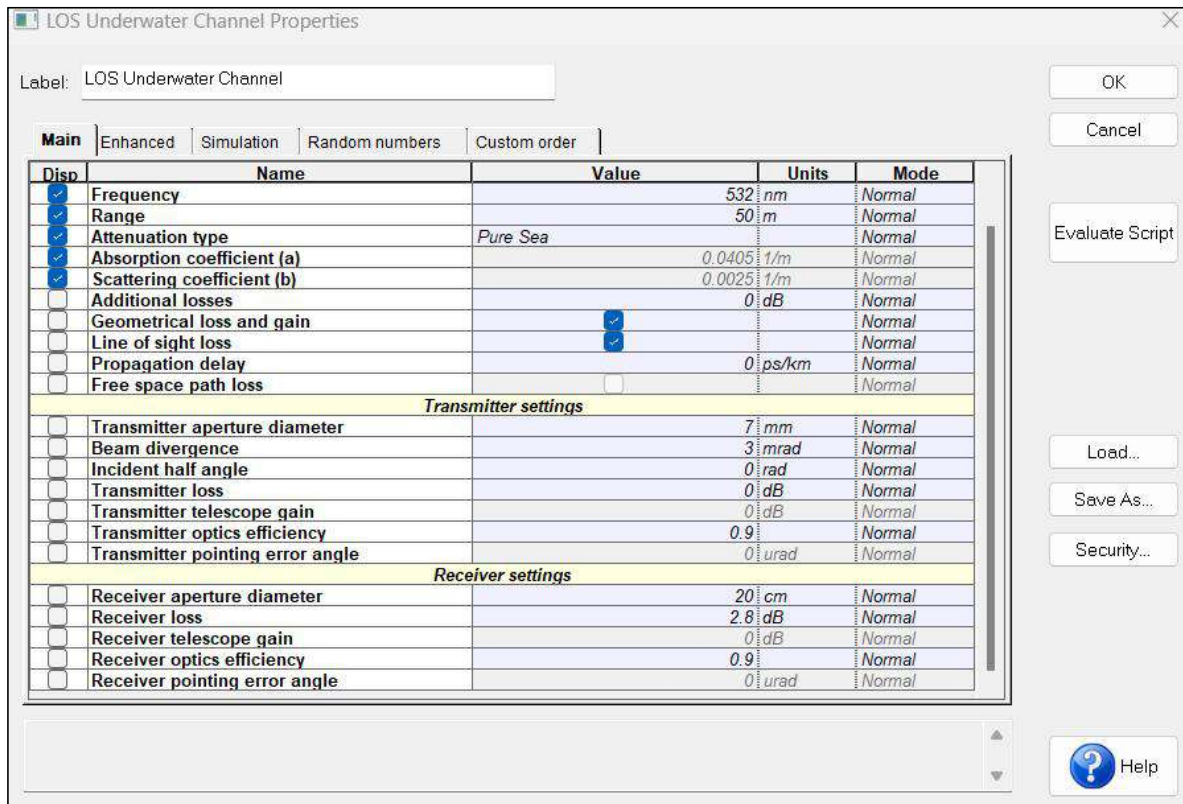
(14)

Fuente.: Basado en [2] [11]

Para obtener una comunicación eficiente es necesario considerar la posición del transmisor y receptor, así como el ángulo azimutal y la inclinación del haz de luz, como se observa en la tabla 3, considérese la ecuación 12 para nodos estacionarios ya que su ángulo de divergencia de la luz es estrecho. La ecuación 13, se emplea cuando se quiere transmitir desde un nodo a varios nodos no estacionarios, para lo cual el ángulo de divergencia del haz de luz es amplio lo que acarrea una menor distancia de comunicación. La ecuación 14 se emplea para los catadióptricos modulantes o retrorreflectores ópticos,

Figura 4.

Configuración principal del componente LOS Underwater Channel.



Fuente: La autora

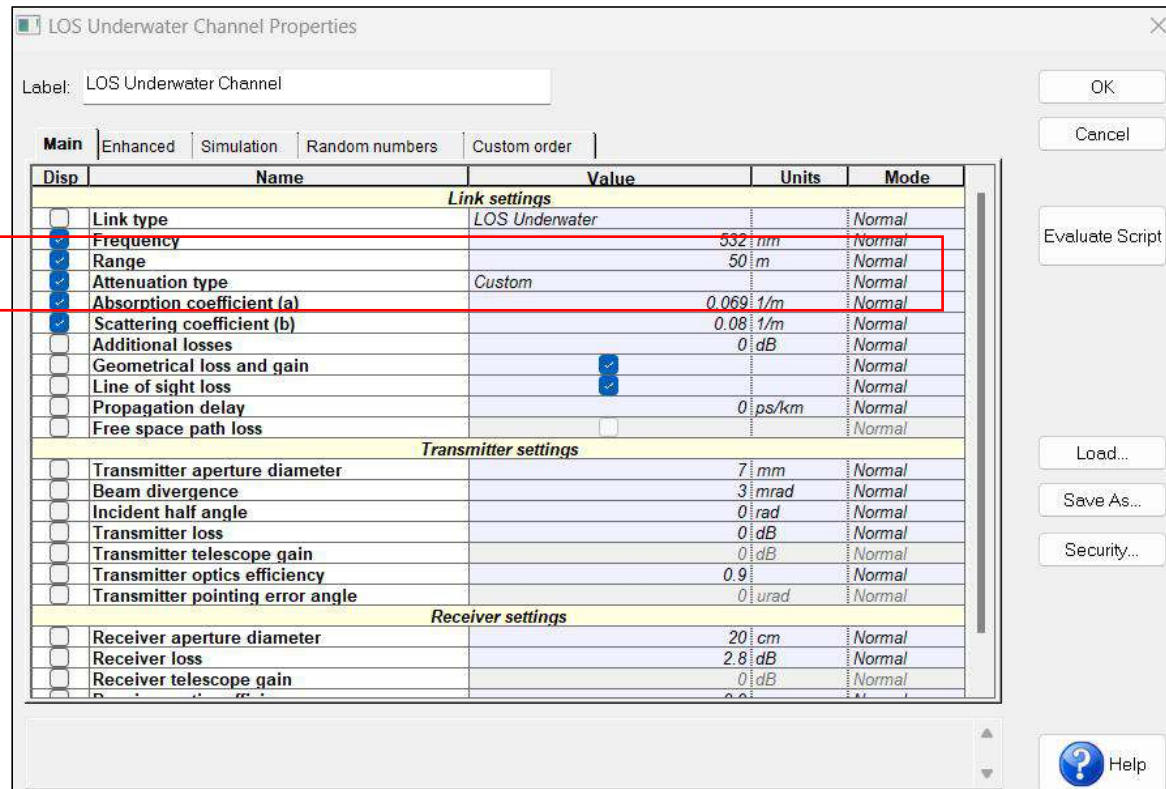
La ventana de configuración principal del software Optisystem que se observa en la figura 4, se divide en 3 secciones. Se muestran las configuraciones del canal, transmisor y receptor.

La primera sección como se mencionó considera las configuraciones generales del canal, la primera opción corresponde al tipo de enlace, es decir el modelo del canal submarino a utilizarse, que por defecto es LOS submarino, el segundo parámetro corresponde a la frecuencia en este caso se ajustará a la longitud de onda de la luz (λ) que suele ser más común en el agua oceánica debido al fitoplancton por lo cual se dejará configurado en 532 nm [11] [15] y [25].

El tercer parámetro corresponde a la distancia directa perpendicular entre los planos que tienen los telescopios transmisor y receptor, por default es 50 metros, el cual es configurable por el usuario.

Figura 5.

Configuración manual del tipo de atenuación.



Fuente: La autora

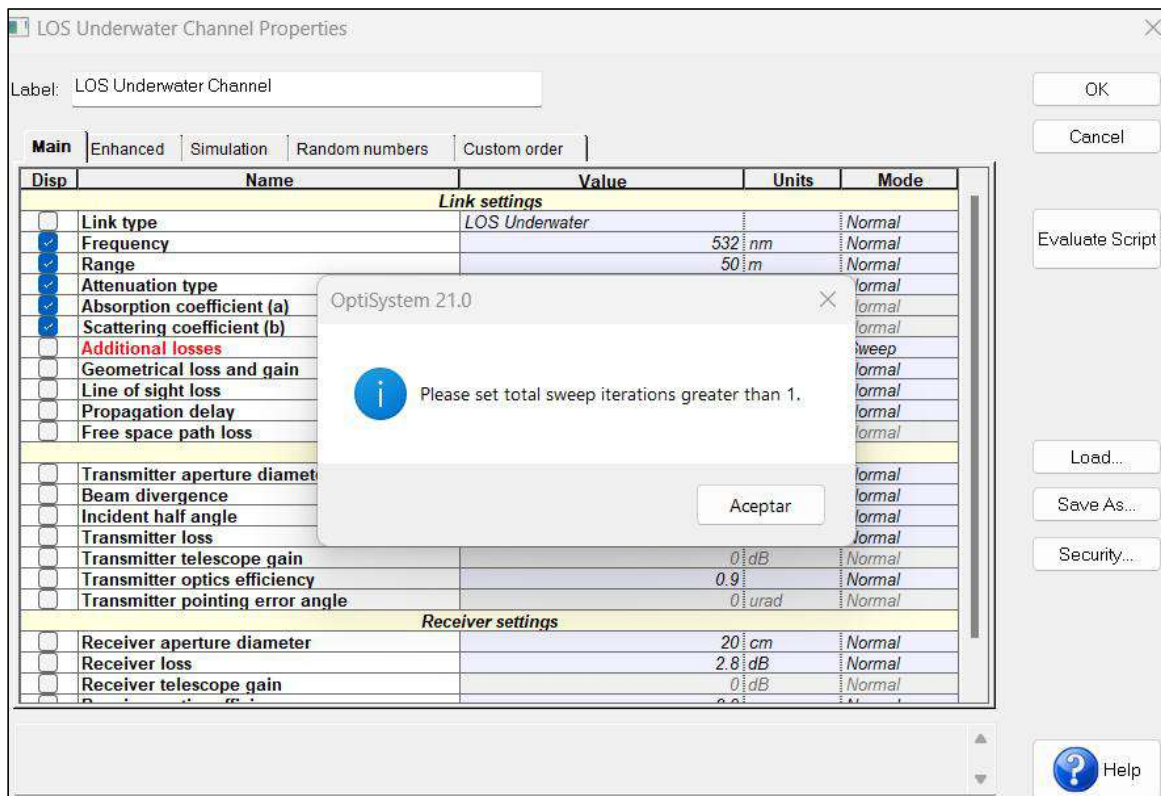
El cuarto parámetro corresponde al tipo de atenuación y depende del tipo de agua en conjunto con la longitud de onda ($\lambda = 532 \text{ nm}$ por defecto en el componente) y abarca los coeficientes de dispersión y absorción (quinto y sexto parámetro), estos parámetros solo se pueden cambiar su valor, cuando se escoge custom (personalizado) en el tipo de atenuación (cuarto parámetro). Como se observa en la figura 5, se colocó los valores para un agua muy clara de mar con partículas en concentraciones de $0.31 \text{ (mg/m}^3\text{)}$. Los parámetros subsiguientes corresponden a pérdidas adicionales que puedan generarse en el canal, valores que se fijan de decibeles (dB), con relación a las pérdidas en la potencia

(geometrical loss ang gain), en la alineación (line of sight loss) habilitaremos estas dos opciones en verdadero para poder considerar las características del diodo LED o LD y PIN o APD y en la trayectoria.

En la segunda y tercera sección tenemos las configuraciones del transmisor y receptor respectivamente, éstas vienen dadas por las características del diodo láser transmisor y del fotodiodo receptor.

Figura 6.

Modos de los parámetros del componente LOS submarino de Optisystem



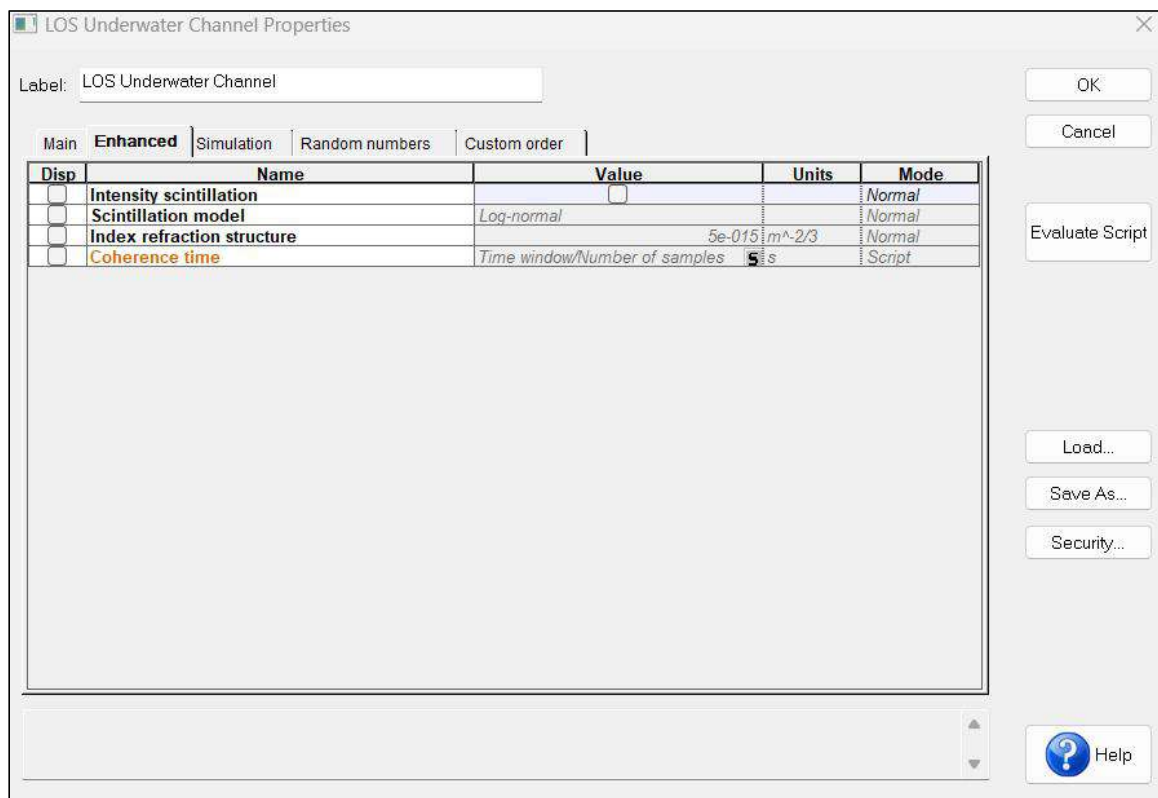
Fuente: La autora

Cada parámetro de configuración tiene 3 modos: Normal, Sweep y Script. Si, el modo es normal permite ingresar un sólo valor, si el estado es Sweep, permite al usuario ingresar varios valores creando varios escenarios de navegación en dicha simulación; sin embargo, el usuario deberá considerar que no existan conflictos con otros valores, por

ejemplo, que el total de las iteraciones de la simulación sean mayores a uno figura 6, además de otras funciones que inciden en el rendimiento.

Figura 7.

Configuraciones por default del componente LOS Underwater de Optisystem para el Centelleo y Turbulencia oceánica.



Fuente: La autora

En la figura 7, observamos la pestaña de “enhanced” o avanzada, es para configurar los parámetros que corresponden al centelleo; el primer parámetro es la intensidad del centelleo (intensity scintillation), es decir; si existe o no el centelleo, este refiere a las fluctuaciones rápidas en la intensidad de la señal de luz transmitida a través del agua. Estas fluctuaciones son causadas por variaciones aleatorias en el índice de refracción del agua, lo que afecta la propagación de la onda de luz, al habilitar ese parámetro podremos escoger el modelo del centelleo (scintillation model). Optisystem

consideró dos modelos de centelleo en el componente LOS Underwater Channel: Log-normal y Gamma-Gamma como se observa en la figura 7.

La elección del modelo adecuado para caracterizar el centelleo en las telecomunicaciones ópticas submarinas con línea de visión directa, depende de las características específicas del entorno submarino y las características de la señal de luz.

En entornos con centelleo leve, el modelo log-normal es suficiente; mientras que en entornos con centelleo severo, el modelo gamma-gamma es la opción indicada.

El tercer parámetro de la figura 7, permite especificar el índice de refracción estructurado, que por defecto el componente propone en $5e^{-15} m^{-2/3}$, el cual sirve como parámetro para indicar una turbulencia leve, mientras que; si este valor es de $5e^{-12} m^{-2/3}$ indica una turbulencia severa. Este parámetro caracteriza las variaciones espaciales y temporales del índice de refracción (n) del agua, es una propiedad física que describe cómo la velocidad de la luz se reduce en este medio en comparación con el vacío. Estas variaciones se producen debido a inhomogeneidades en la temperatura, salinidad y densidad del agua, así como a la presencia de turbulencias y partículas en suspensión.

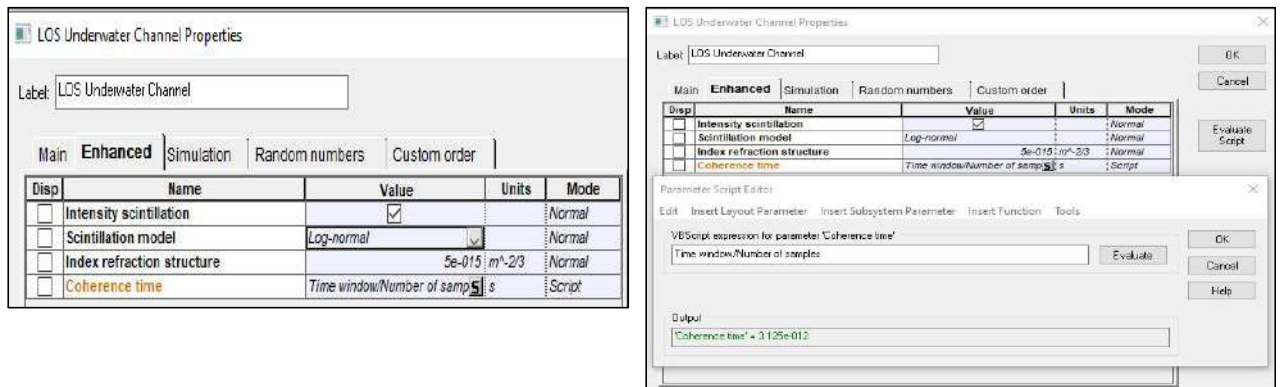
El mar genera corrientes marinas y olas, esto puede inducir fluctuaciones en el índice de refracción (n), afectando la coherencia espacial de la señal. Estos factores combinados pueden tener consecuencias negativas en el rendimiento del sistema de comunicaciones ópticas submarinas, como un aumento en la tasa de error de bit debido a la dificultad en la detección precisa de la información, limitaciones en la distancia de transmisión confiable y una degradación en la calidad de la señal.

El componente filtro pasabajo, permite configurar este parámetro y ajusta a Ventana de tiempo/Número de muestras, ya que Optisystem maneja prioritariamente la secuencia de bloques, lo que significa que la totalidad de los datos muestreados contenidos en la ventana temporal de simulación es procesada independientemente por

cada componente. Esto permite la conversión eficiente de Fourier (Fast Fourier Transform, FFT), entre los dominios temporal y frecuencial en cualquier momento de la simulación.

Figura 8.

Configuración del canal con centelleo



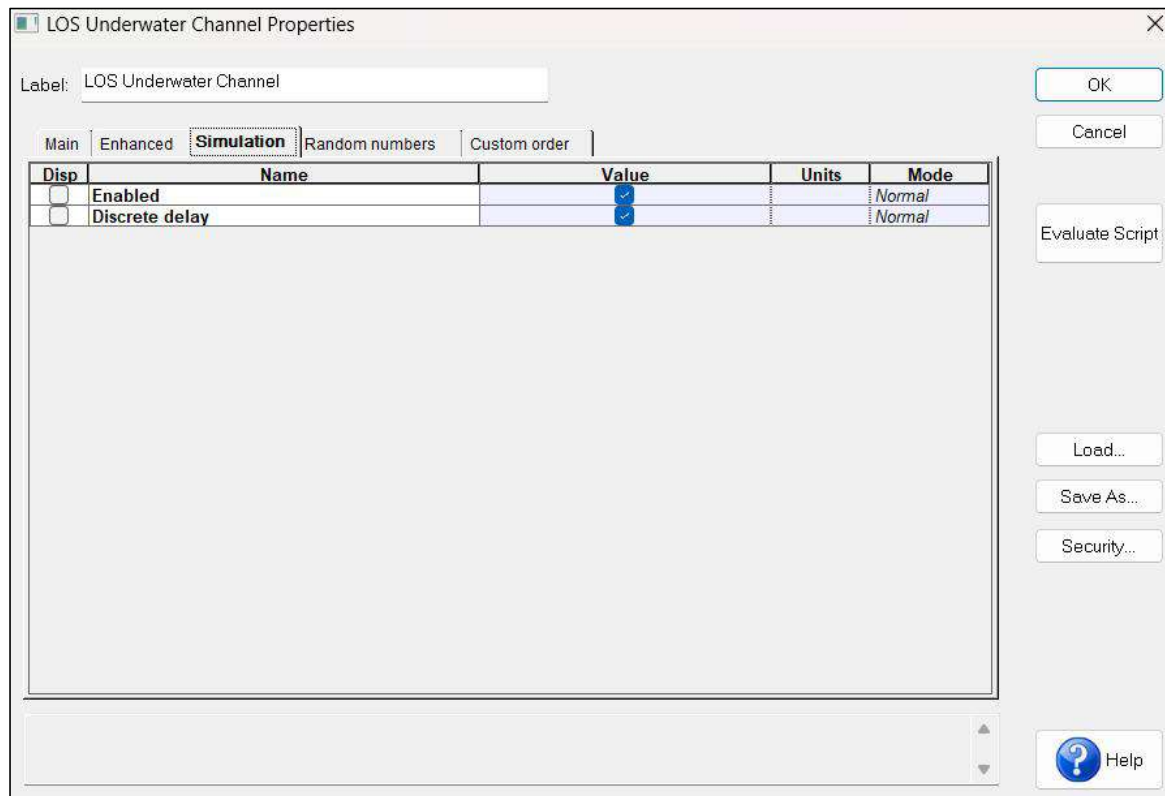
Fuente: La autora.

La configuración que se muestra en la figura 8, permite una simulación de respuesta al impulso en canales ópticos submarinos, así como; los efectos de la turbulencia (índice de refracción (n)), el centelleo en sistemas de comunicación óptica submarinos y el uso de sistemas de comunicación óptica coherente en canales submarinos turbulentos.

En la figura 9; se muestra la pestaña de simulación del componente LOS submarino, al colocar el valor como verdadero se habilita para que el componente sea considerado en el cálculo del proyecto, el segundo parámetro corresponde a un retraso discreto, este retardo redondea a un múltiplo del periodo de muestreo, de no hacerlo se aplica la propiedad de desplazamiento temporal de la transformada de Fourier, utilizando el valor exacto del retardo.

Figura 9.

Configuración de la pestaña de simulación del componente LOS submarino de Optisystem



Fuente: La autora

Para los escenarios considerados en este trabajo se tomarán en cuenta los parámetros detallados en la tabla 4 y en la tabla 5. Esto se realizó para mostrar los valores por defecto en contraparte con los datos en los que sí se ha considerando los IOP del canal submarino según el tipo de agua oceánica. En la tabla 5, se consideró dos índices de refracción, tomando el valor por defecto del componente $5e^{-15}$, para expresar una turbulencia muy débil, y $5e^{-12}$, para un canal con mayor turbulencia, en otras palabras el índice de refracción (n) en medios turbulentos disminuye con el aumento de la escala espacial de la turbulencia [2]. Esto se debe a que los remolinos de turbulencia más

grandes causan fluctuaciones más significativas en la densidad y temperatura del medio, lo que lleva a variaciones más fuertes.

Tabla 5.

Parámetros para simulación del canal considerando IOP del agua de mar, usando los datos para los tipos de agua de mar propuestos en [20].

Longitud de onda λ	532 nm	Modelo de Centelleo	<i>Log - normal</i>	
Índice de refracción estructurado	$5e^{-15}$ $5e^{-12}$	Ángulo de radiación del sol	0°	
Configuración del canal del transmisor		Configuración del canal del receptor		
Azimuth ϕ	25°	Ángulo de inclinación θ	10°	
Absorción, dispersión, coeficiente de extinción para 3 tipos de agua de mar considerando según $C(mg/m^3)$ (Concentración de partículas) y λ				
Tipos de agua de mar	$C(mg/m^3)$ [20]	$a(m^{-1})$	$b(m^{-1})$	$c(m^{-1})$
Agua pura de mar	0.005	0.053	0.003	0.056
Agua muy clara de mar	0.31	0.069	0.08	0.015
Agua de Costa	0.83	0.088	0.216	0.305
Agua de puerto	5.9	0.295	1.875	2.17

Fuente: Datos tomados de [20] [28] [29] [30].

5. Metodología

La investigación adoptó un enfoque exploratorio y descriptivo para abordar la falta de sistematización en la investigación y diseño de comunicaciones Free-Space Optical (FSO) en sistemas de Comunicación Óptica Subacuática (UOWC) con línea de visión directa. El enfoque exploratorio permitió una comprensión profunda de las características y comportamientos de los enlaces LOS en ambientes submarinos, considerando factores cruciales como la dispersión, absorción, atenuación y turbulencias.

La metodología descriptiva se utilizó para analizar las prestaciones del software especializado OptiSystem en el escenario UOWC LOS, y examinar los enlaces ópticos inalámbricos submarinos mediante este software. Este enfoque descriptivo contribuyó a identificar parámetros clave para la optimización de los sistemas LOS UOWC.

La estrategia metodológica incluyó el uso del software Optisystem, centrándose en mejorar la comprensión de las propiedades ópticas inherentes (IOPs) del medio acuático, tales como absorción, turbulencias, atenuación y dispersión. Estos elementos son esenciales para crear y operar sistemas UOWC de tipo LOS eficientes y confiables.

Esta investigación se llevó a cabo en dos fases:

Fase 1: Recopilación de información

En la primera fase, se recopiló información sobre comunicaciones submarinas con línea de visión directa. Esta información se obtuvo de fuentes bibliográficas, como artículos científicos de revistas especializadas, libros y tesis. Además, se consideran dispositivos comerciales para definir características más realistas.

Fase 2: Simulación

En la segunda fase, se utilizó el software de simulación Optisystem para analizar el rendimiento de las comunicaciones submarinas con línea de visión directa. El software

de simulación se utilizó para estudiar escenarios de prueba que representen diferentes condiciones ambientales y operativas.

6. Resultados

6.1 Análisis del diseño del enlace de comunicación de línea de visión directa submarina.

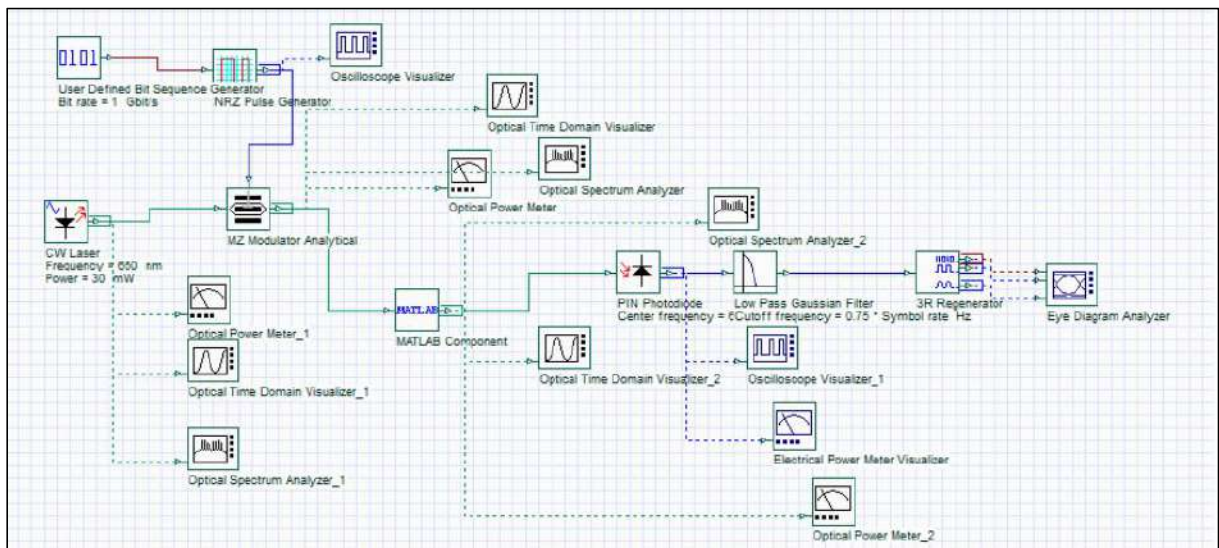
Como parte del objetivo tres se realizó el análisis, evaluación y optimización de un enlace de línea de visión directa, en concordancia con el objetivo dos examinando los principios de funcionamiento y rendimiento del software.

Para esta primera parte de los resultados la configuración del transmisor se estima como un láser con longitud de onda de 650nm y una potencia de 30mW, es decir mantenemos los valores del esquema en [14].

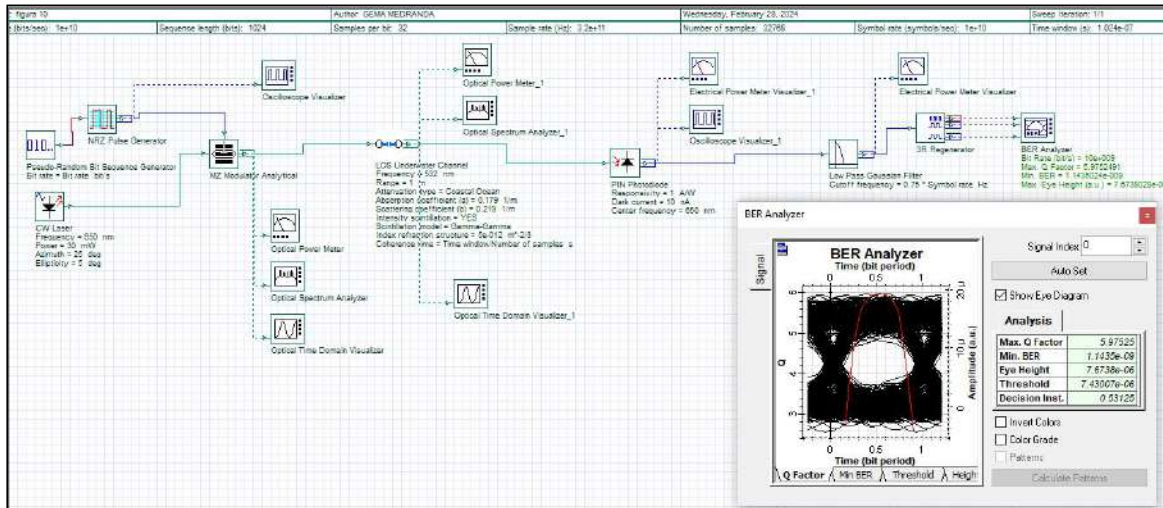
En consecuencia en la figura 10 se analiza y mejora el esquema propuesto en [14] para simular una comunicación submarina con línea de visión directa usando el software Optisystem el cual empleó una modulación OOK-NRZ, generación de pulsos y filtros Gaussianos en el transmisor y receptor. El generador de pulso tiene como unidades "a.u." (unidades arbitrarias) típicamente representa el pico de voltaje de los pulsos generados en relación con el nivel de voltaje promedio o de Corriente Continua.

Figura 10.

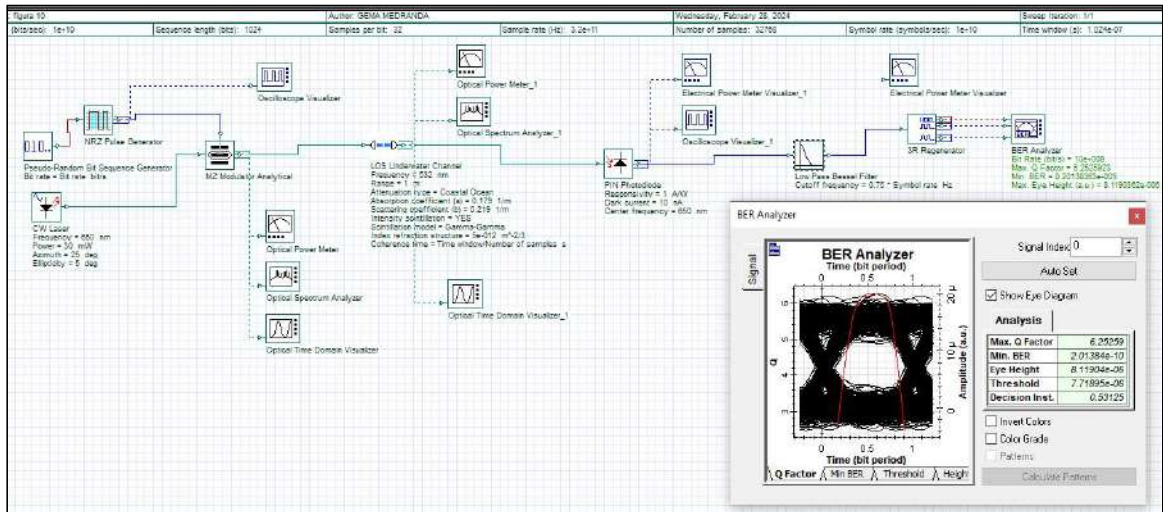
Diagramas del sistema UOWC para enlaces LOS.



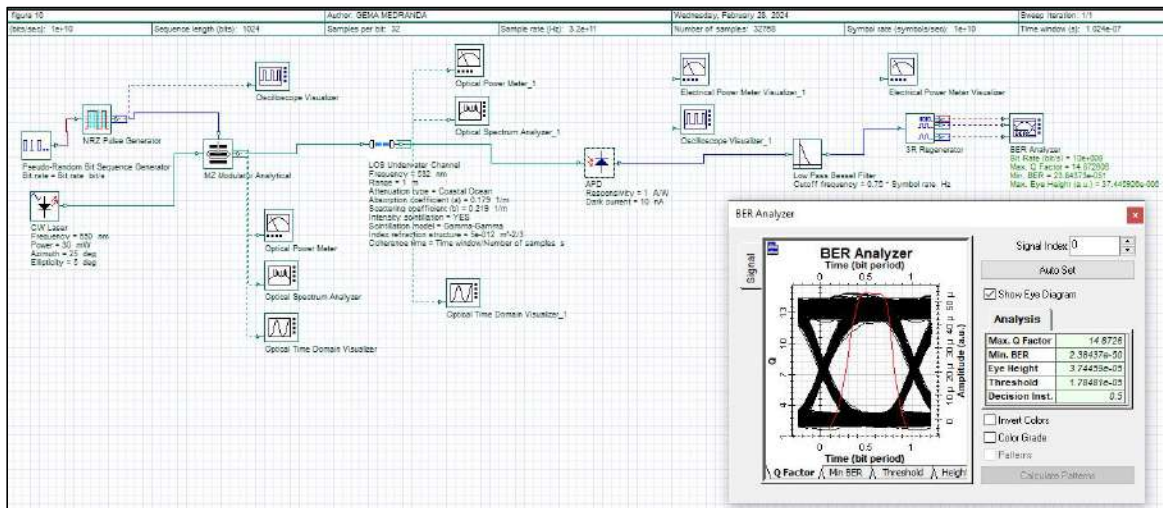
a.



b.



c.



d.

Fuente: La autora, basado en [14]. a) Diagrama LOS submarino con línea de visión directa tomado de [14] cuando debía realizarse mediante un componente de MATLAB y

no existía el componente en Optisystem para simular el canal submarino según el tipo de agua de mar, b) Diagrama de bloques basado en [14] con el componente del canal LOS UOWC, considerando la misma distancia de 1 metro y condiciones de un canal con turbulencia oceánica; c) Mejora del diagrama b con filtro Bessel; d) Optimización del canal al colocar en el receptor un fotodiodo del tipo avalancha (APD) [14] [20] y [33].

El diagrama de la investigación en [14] contempló para el canal submarino el agua de costa de mar; en la figura 5, literal a) el diodo láser transmisor tiene una longitud de onda λ : 650 nm a una potencia de 30mW, con un fotodetector de tipo diodo PIN. La elección del tipo de onda es importante en razón de que la variación de la clorofila con la profundidad forma el perfil de Gauss sesgado desde la superficie hasta el fondo [26] [27], por ende en la configuración del generador de pulsos se escoge el tipo de onda de tipo Gaussiano.

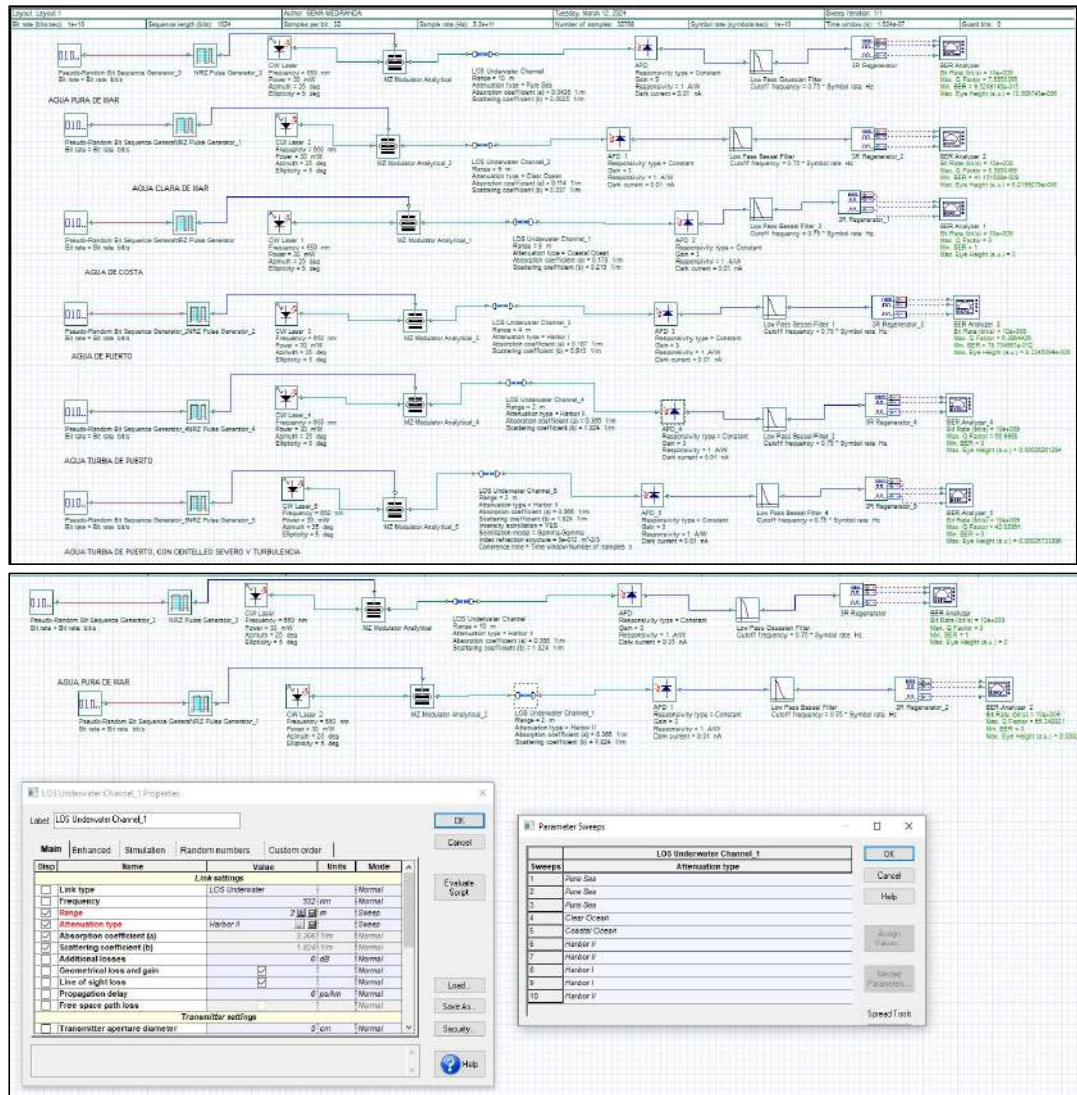
Con el fin de mejorar la simulación en el literal b) se procede a reemplazar el bloque de MATLAB donde se emula el canal submarino utilizando el componente desarrollado para comunicación con línea de visión directa de Optisystem, en cual se ingresaron los parámetros de atenuación, dispersión y turbulencias para el tipo de agua de costa. En los siguientes literales se irá añadiendo los cambios para mejorar el BER, en el literal c de la figura 5, se cambia el filtro pasabajo de Gaussiano a Bessel y como se observó en el analizador del BER hay una mejora en el factor Q. En el literal d de la Fig. 5, se reemplazó el fotodetector PIN por el fotodetector de tipo avalancha (APD) por sus características para captar la luz; lo cual nos muestra un BER de 1×10^{-51} y un factor Q de 15.09.

Las características del diodo láser transmisor y del fotodetector del receptor están basadas en las fichas técnicas del fabricante [31] [32], se escogieron intencionalmente por sus características de transmisión y recepción. En consecuencia; en el receptor para

mantener el criterio de calidad, la potencia óptica a la entrada debe ser superior a la sensibilidad del mismo.

Figura 11.

Escenarios con todos los tipos de agua de mar, con un transmisor de 650nm.



Fuente: La autora.

Para una longitud de onda del transmisor de 650nm y una potencia de 30mW, con un fotoreceptor APD de material InGaAs(Arseniuro de Indio y Galio) y filtro pasabajo Bessel, se evaluó los 5 diferentes tipos de agua de mar con los valores predeterminados del componente LOS Underwater Channel (pocas partículas en suspensión) como se observa en la figura 11, obteniendo distancias máximas de 10 y 2 metros en el agua pura

de mar (canal submarino ideal, sin turbulencias ni centelleos) y agua turbia de puerto (peor canal submarino, sin turbulencias ni centelleos) respectivamente, se puede apreciar que incluso en desplazamiento al pasar por diferentes tipos de agua de mar y durante las interacciones; mientras se mantenga una distancia de 2 metros la comunicación es estable.

Se evaluó otros tipos de modulaciones como OFF, RZ, PSK, QAM y 16-QAM OFDM (ver anexo 4), pero la mejor modulación para este tipo de enlace de comunicación de línea de visión directa fue NRZ-OOK [14][33]. La modulación deberá ser NRZ para mantener el balance de tiempos de subida, es decir que la modulación no podrá exceder la velocidad de respuesta del conjunto Tx+Lc+Rx (transmisor+perdida+receptor). Del lado del transmisor debe considerarse también que el radio de extinción al escogerse una codificación NRZ deberá situarse entre 5 a 10 dB, y que el ancho de la línea podría ser angosto si el canal tiene menos ruido.

En la figura 10 literal d, se muestra el esquema de la comunicación con la cual se realizarán las simulaciones, se ha considerado tomar valores de componente reales para los escenarios que se analizarán en el desarrollo de este apartado.

Tabla 6.

Parámetros de simulación para el diodo láser y el fotoreceptor.

Parámetros	Valores
Nombre-Modo de Operación del láser comercial (Transmisor:Tx)	445HP-Dot-LM -Automático-Alta Potencia
Longitud de onda	445 (nm) – color azul
Potencia de salida del láser	150mW
Espesor del haz de luz	2.5 mm
Divergencia del haz	3 mrad
Diámetro del haz	7 mm
Velocidad de bits del generador de secuencias de bits.	10 GHz
Amplitud del impulso NRZ	1 a.u.
Nombre-Modo de Operación del fotodetector (Receptor:Rx)	Serie UPD-2M-IR2-P (Ultrafast Photodetector)
Corriente oscura del detector	5 nA
Sensibilidad del receptor	1 A/W

Rango espectral de detección	900 – 1700 nm
Frecuencia de corte del filtro	0.75*Bit rate

Fuente: Datos tomados de [31] [32] para LD y APD comerciales escogidos.

En la tabla 6, se sintetizan los datos más relevantes de los componentes de la fuente láser 445HP-Dot-LM y el fotodetector Serie UPD-2M-IR2-P, considerados en el estudio.

Luego de una evaluación y comparativa de alcance y calidad de señal, se tomó como referencia el diseño de la investigación en [14], el cual se observa en la figura 10 literal a; con el fin de cumplir con los objetivos específicos de esta investigación se optimizó y concluyó en el propuesto por esta investigación; luego de analizarse detalladamente a lo largo del anexo 4, se simula en todos los escenarios factibles y reales en el Anexo 5; logrando mejorar el factor Q de la señal en recepción, considerando la atenuación y la dispersión de la luz en el agua, así como; la turbulencia y el centelleo que puede existir en el canal.

La tabla 7 muestra los valores obtenidos durante primera evaluación y optimización del esquema, tomando los valores por default (predeterminado) del componente LOS submarino de Optisystem (ver tabla 4) en dos ambientes ideales de agua de mar sin turbulencia ni centelleo, usando en el transmisor una frecuencia de 445 nm y una potencia de 150 mW (ver tabla 6) y en el receptor un fotodiodo PIN de dos tipos de materiales con los valores propuestos en [14].

Tabla 7.

Análisis y mejora de los componentes del enlace LOS submarino propuesto en [14].

Transmisor		Receptor		Canal sin centelleo, turbulencia y pocas partículas en suspensión.			
Frecuencia (λ)	Potencia	PIN [14]	APD (UPD- 2M- IR2-P)	Distancia en Agua Pura de Mar	BER	Distancia en Agua de Costa	BER
650 nm	30mW	Si		6	1.17E-57	4	0.18E-33
		InGaAs		1	1	1	
		InGaAs		12	48.42E-12	7	0.20E-12
445nm	150mW	Si		7	6.08E-15	5	0.53E-24
		InGaAs		1	1	1	
		InGaAs		17	7.69E-9	9	0.44E-12

Fuente: La autora, ver anexo 4.

Al verificar los datos de la tabla 7, donde se han considerado el mejor escenario agua pura de mar sin centelleo ni turbulencias y un escenario de mediana dificultad agua de costa sin centelleo ni turbulencia; y no lograr mejores distancias se procede a optar por un fotoreceptor de avalancha como el propuesto en [33]. Con el cambio realizado a un fotodiodo avalancha en el receptor APD_(Ver tabla 6), la comunicación es óptima a distancias mayores, evaluando los escenarios mediante el software Optisystem las distancias obtenidas son las que se muestran en la tabla 8, tomando el peor escenario de turbulencia y centelleo severo en cada tipo de agua de mar con diferentes partículas en suspensión.

Por otra parte, en un ambiente ideal de agua de costa se logran distancias de hasta 5 metros con un fotoreceptor PIN; mejorando las características del transmisor y cambiando a un fotoreceptor avalancha APD_(Ver tabla 6) alcanzamos hasta 9 metros en ambiente ideal sin turbulencia y centelleo; manteniendo una transmisión de 10Gbps; como se puede apreciar en la tabla 7, mientras que para el mejor canal en agua pura de mar se alcanza distancias de hasta 17 metros con fotoreceptor avalancha APD_(Ver tabla 6).

Tabla 8.

Distancias máximas alcanzadas, simulación con los peores escenarios del canal submarino.

Tipo de canal	Valores predeterminados del canal LOS Underwater de Optisystem, con turbulencia y centelleo severo	Datos para simular el canal tomados de [20], con turbulencia y centelleo severo
<i>Agua pura de mar</i>	15	14
<i>Agua Clara de Mar</i>	12	10
<i>Agua de Costa</i>	8	9
<i>Agua Turbia de Puerto</i>	3	3

Fuente: La autora.

6.2. Escenarios simulados en diferentes aguas de mar con diferentes partículas en suspensión, centelleo y turbulencia.

En el canal submarino con línea de visión directa, influyen factores como la turbulencia, la absorción, la dispersión y la atenuación, estos parámetros afectan la precisión de las simulaciones, en términos de alcance de la señal y calidad de la comunicación. Por ello, es crucial emular el entorno submarino y determinar la respuesta al impulso ajustando estos parámetros en las simulaciones del Optisystem, considerando el tamaño de las partículas en suspensión así como los efectos de turbulencia y centelleo que podrían existir.

Tabla 9.

Resultados obtenidos con los canales predeterminados en el componente LOS Underwater Channel de Optisystem y los propuestos en [20], usando el Tx y Rx detallado en la tabla 6.

<i>Tipo de agua de mar</i>	<i>Valores predeterminados del componente LOS Underwater Channel de Optisystem.</i>				<i>Valores propuestos es [20] para el canal LOS Underwater Channel de Optisystem.</i>			
	<i>Canal con turbulencia y centelleo severo</i>		<i>Canal con turbulencia y centelleo severo.</i>		<i>Canal con turbulencia y centelleo severo</i>		<i>Canal con turbulencia y centelleo severo.</i>	
	<i>Distancia</i>	<i>BER</i>	<i>Distancia</i>	<i>BER</i>	<i>Distancia</i>	<i>BER</i>	<i>Distancia</i>	<i>BER</i>
<i>Agua pura de Mar</i>	17 metros	0.38E-12	15 metros	43.31E-15	15 metros	0.15E-24	14 metros	92.81E-18
<i>Agua Clara de Mar</i>	13 metros	0.12E-9	12 metros	0.36E-12	12 metros	26.95E-24	11 metros	1.34E-21
<i>Agua de Costa</i>	8 metros	3.15E-30	8 metros	0.29E-21	9 metros	0.31E-30	9 metros	0.13E-18
<i>Agua Turbia de Puerto</i>	3 metros	90.31E-72	3 metros	0.15E-60	3 metros	0.26E-84	3 metros	0.26E-69

Fuente: La autora. Para los datos simulados con los valores predeterminado del canal añadiendo turbulencia y centelleo véase anexo 4 desde la figura 29 hasta la figura 38 y para los datos simulados del canal propuestos en [20] con centelleo y turbulencia, véase anexo 4 desde la figura 43 hasta 50 .

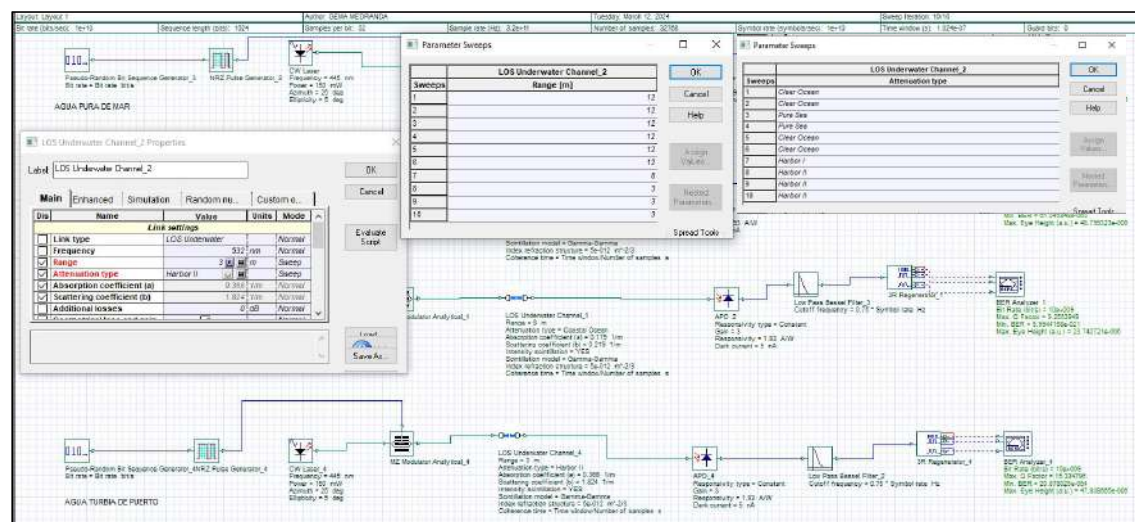
En la tabla 9 se observan los alcances máximos de los enlaces LOS submarinos según los diferentes tipos de agua sometidos a centelleo y turbulencia tanto leve como moderada, es importante destacar que el BER debe ser mayor o igual a E-9, para que exista comunicación en el enlace y que si un BER es de 1, no hay comunicación, ya que todos sus bits serían erróneos; en otras palabras significa al tener un BER de E-9, hay un error de bits por cada 1 billón de bits transmitidos.

Esto es especialmente importante en aplicaciones que requieren una precisión alta en la detección y localización de objetos submarinos, como en el caso de los sistemas de visión subacuática utilizados en ROVs (Remotely Operated Vehicles) o AUVs (Autonomous Underwater Vehicles).

Como se muestra en la tabla 9, se obtienen diferencias de entre 1 a 2 metros en el mismo tipo de absorción y dispersión en cada tipo de agua de mar y varía dependiendo si el centelleo es leve o severo, se observa que en el agua de costa con los valores propuestos para el canal en la investigación en [20], se mejora el alcance (pasando de 8 a 9 metros) con un BER de E-18 en el peor escenario, por lo cual es importante destacar que; en el canal predeterminado por Optisystem la absorción y dispersión en agua de costa es de 0.179 y 0.219 respectivamente; mientras que en el propuesto en [20] es de 0.088 y 0.216 para los coeficientes de absorción y dispersión (véase tabla 4 y tabla 5), demostrando que la cantidad de partículas en suspensión influyen también en el alcance del enlace sin perder la calidad en la comunicación.

Figura 12.

Escenarios con interacción entre todos los tipos de agua de mar, con los datos para el transmisor y el receptor propuestos en esta investigación



Fuente: La autora.

Si comparamos los alcances simulados en la figura 11 y figura 12, se aprecia que mientras se mantengan las distancias máximas para cada tipo de agua de mar, existirá comunicación, para el caso de la figura 12, su límite de distancia es de 3 metros para agua turbia de puerto.

7. Discusión

La comunicación siempre ha sido una parte crítica y crucial en cualquier operación submarina; por medio de enlaces de línea de visión directa (LOS) submarinos se permite una mejor y mayor transmisión de datos, lo que es beneficioso para el estudio del océano. En este sentido y considerando tanto el comportamiento del canal como sus componentes, se ha utilizado el simulador Optisystem en su versión 21.1 para realizar un estudio general de las comunicaciones submarinas con línea de visión directa.

Este estudio ha proporcionado un aporte valioso sobre el comportamiento del canal submarino, la inclusión del componente de simulación del canal submarino LOS en la versión 21.1 de Optisystem marca un avance significativo en la modelación realista de estos sistemas, por lo cual no es necesario realizar programación adicional para el análisis del mismo.

Los enlaces submarinos de línea de visión directa (LOS) para comunicaciones ópticas enfrentan dos desafíos principales: las turbulencias oceánicas y las propiedades ópticas inherentes (IOPs) del agua de mar. Las turbulencias oceánicas causan centelleo del haz, expansión y retrodispersión, mientras que las IOPs causan absorción, dispersión y atenuación, lo cual repercute en la calidad y alcance de la comunicación.

La absorción reduce la intensidad de la señal a medida que la luz se propaga por el agua, mientras que la dispersión provoca la distorsión del haz e introduce ruido, reduciendo la relación señal/ruido (SNR). Estos efectos combinados provocan atenuación de la señal, distorsión del haz, ruido e interferencias y limitaciones del alcance.

Estos factores combinados degradan la calidad de la señal, aumentan la pérdida de datos y limitan el rango de transmisión. El diseño cuidadoso del sistema que aborde adecuadamente estos desafíos, es fundamental para lograr una comunicación óptica submarina LOS confiable y de alto rendimiento.

Para examinar el funcionamiento y rendimiento del software, es necesario configurar el sistema y modelar el canal con diferentes escenarios simulando efectos submarinos específicos. Las estrategias de mitigación incluyen la selección de la longitud de onda, técnicas avanzadas de modulación, conformación del haz y códigos de corrección de errores. Para que las comunicaciones ópticas submarina sean fiables y de alto rendimiento, es esencial un diseño cuidadoso del sistema que tenga en cuenta los IOP.

Al examinar los principios de funcionamiento del software Optisystem, se revelan aspectos clave del rendimiento del sistema óptico simulado, incluyendo tasas de transmisión, pérdidas ópticas, relación señal-ruido, distancias entre nodos, tipos de configuraciones y evaluación de escenarios.

Los resultados del análisis y mejora del enlace óptico submarino LOS propuesto en [14] se presentan en la Tabla 7; comparando el rendimiento de diferentes configuraciones de transmisores y receptores en agua pura de mar y agua de costa, bajo condiciones ideales. Se evaluaron longitudes de onda de 650 nm y 445 nm, con potencias de 30 mW y 150 mW respectivamente, utilizando fotoreceptores PIN de silicio e InGaAs y APD (UPD-2M-IR2-P).

Los resultados muestran que el fotoreceptor APD (InGaAs) logró el mejor rendimiento en ambos tipos de agua, alcanzando distancias de hasta 12 m en agua pura de mar y 7 m en agua de costa para 650 nm; y 17 m en agua pura de mar y 9 m en agua de costa para 445 nm. De modo particular, se observa que; en un escenario ideal de agua de costa, se logran distancias de hasta 5 m con un fotoreceptor PIN, mientras que con un APD se alcanzan hasta 9 m, manteniendo una tasa de transmisión de 10 Gbps. Por otra parte, en el mejor escenario de agua pura de mar, se logran distancias de hasta 17 m utilizando el fotoreceptor APD. Por ende, el cambio a un fotodiodo de avalancha (APD)

mejoró significativamente el rendimiento, permitiendo alcanzar mayores distancias en comparación con los receptores PIN, con una tasa de transmisión de 10 Gbps.

Estos resultados, obtenidos en condiciones ideales, demuestran la importancia de la selección adecuada de componentes en el diseño de enlaces ópticos submarinos.

Posteriormente, se realizaron simulaciones en escenarios más desafiantes, incluyendo turbulencia y centelleo severos en diferentes tipos de agua de mar con diversas partículas en suspensión, cuyos resultados se presentan en la Tabla 8, comparando los valores predeterminados del canal LOS Underwater de OptiSystem con datos específicos de [20]. Las distancias máximas alcanzadas varían significativamente según el tipo de agua: en agua pura de mar se lograron 15 m y 14 m respectivamente; en agua clara de mar, 12 m y 10 m; en agua de costa, 8 m y 9 m; y en agua turbia de puerto, ambos conjuntos de parámetros resultaron en 3 m. La consistencia en los resultados para agua turbia de puerto (3 m) indica que en entornos altamente desafiantes, las limitaciones físicas del medio predominan sobre las variaciones en los modelos de simulación.

Se observa una clara disminución de las distancias alcanzables a medida que aumenta la turbidez del agua, resaltando el impacto de las partículas en suspensión y la calidad del agua en el rendimiento de los enlaces ópticos submarinos. La similitud general entre los resultados valida la robustez de ambos modelos, aunque las pequeñas discrepancias, especialmente en agua de costa, sugieren la importancia de utilizar datos específicos del entorno para simulaciones más precisas. Estos hallazgos son fundamentales para el diseño y la implementación de sistemas de comunicación óptica submarina, permitiendo anticipar limitaciones de distancia en diversos entornos acuáticos y optimizar la configuración del sistema según las condiciones específicas del medio.

Finalmente la tabla 9, revelan aspectos cruciales sobre el rendimiento de los enlaces ópticos submarinos en diversos tipos de agua de mar y condiciones atmosféricas. Se observa una clara relación entre la calidad del agua y el alcance máximo del enlace, con distancias que varían desde 17 metros en agua pura de mar hasta solo 3 metros en agua turbia de puerto.

La comparación entre los valores predeterminados de OptiSystem y los propuestos en [20] muestra diferencias sutiles pero significativas, particularmente en agua de costa, donde los parámetros de [20] permitieron un aumento de 1 metro en el alcance (de 8 a 9 metros) con un BER mejorado de E-18 en el peor escenario. Esto subraya la importancia de una caracterización precisa del medio acuático, ya que pequeñas variaciones en los coeficientes de absorción y dispersión pueden tener un impacto notable en el rendimiento del sistema.

Es crucial mantener un BER mayor o igual a E-9 para asegurar una comunicación efectiva, lo cual es particularmente relevante en aplicaciones que requieren alta precisión, como sistemas de visión subacuática para ROVs y AUVs. La comparación entre diferentes escenarios de turbulencia y centelleo (leve y severo) demuestra variaciones de 1 a 2 metros en el alcance, enfatizando la necesidad de considerar estas condiciones atmosféricas en el diseño de sistemas robustos. Estos hallazgos tienen implicaciones significativas para el desarrollo y optimización de sistemas de comunicación óptica submarina, sugiriendo la necesidad de adaptar las configuraciones del sistema a las condiciones específicas del medio acuático para maximizar el alcance y la calidad de la comunicación.

Al analizar los enlaces ópticos inalámbricos submarinos de línea de visión directa y simular el canal submarino de línea de visión directa, las investigaciones previas usaban el método de MonteCarlo [1][19][20][21][28] y programación en

Matlab[1][12][33][14]. Desde inicio de 2024 el Software Optisystem consta con un componente que emula el canal submarino para cada tipo de agua oceánica, teniendo predefinido los siguientes: agua pura de mar, agua clara de mar, agua de costa, agua de puerto y agua turbia de puerto, y la opción de Custom para simular otros escenarios de agua de mar, el componente tiene por nombre LOS Underwater Channel, y permite considerar la absorción, dispersión, cantidad de partículas presentes en el agua de mar, centelleo y turbulencia tal como se ha evidenciado a lo largo de esta investigación (véase Anexo 4, 5, 6, 7 y 8).

Al evaluar el enlace óptico LOS UOWC se observa que cuanto más grandes son las células fitoplancton, mayor es el "aplanamiento", es decir; se limita el espectro de absorción lo cual conlleva a efectos no deseados en el alcance y calidad de la comunicación (Morel y Bricaud, 1981; Sathyendranath et al., 1987; Ciotti et al., 2002) mencionados en [20] [28] [29] [30], los cuales también mencionan que; si el tamaño de las partículas suspendidas es inferior a la longitud de onda de propagación, el modelo corresponde a la dispersión de Rayleigh, si es mayor al modelo de dispersión de Mie [19].

En consecuencia, en la figura 11 y anexos 4y 5, se muestra como el tipo de agua de mar influye en las comunicaciones ópticas por las propiedades ópticas inherente de las mismas, dicho de otra manera, la dispersión y absorción depende del tipo de agua de mar por la cantidad de partículas presentes en el agua; por ende al cambiar entre tipos de agua de mar se observa el efecto en los parámetros de alcance del enlace de comunicación.

Del mismo modo en el anexo 5, se observan tanto las configuraciones del sistema simulado y algunos de sus resultados, como por ejemplo; diagramas de ojo, factor Q y BER para los enlaces considerados. El criterio para simular ha sido que; se ha variado la distancia horizontal entre el transmisor y receptor con los datos propuestos en esta investigación a distancias de 5, 10 y 15 metros manteniendo fijo la profundidad de los

nodos para de esta manera mostrar como se degrada la señal según el tipo de agua de mar. A 5 metros en agua turbia de puerto ya no existe comunicación, con un BER de 1 y un factor Q de 0, es decir; todos los bits enviados fueron errados, mientras que los demás escenarios mantienen comunicación.

Al cambiar la distancia entre nodos a 10 metros con centello y turbulencia severa también se pierde la comunicación en un canal de agua de costa, pero se mantiene comunicación satisfactoria en los dos tipos de agua mar restantes, es decir; en agua clara de mar y agua pura de mar.

Por otro lado, al considerar la distancia entre los nodos a 15 metros no es viable la comunicación en agua clara de mar, por lo cual hasta el momento el único escenario de simulación que aún sigue transmitiendo es el canal de agua pura de mar con un BER E-15 con un factor Q de 7.65; cabe resaltar que todos los escenarios estaban transmitiendo a 10Gbps.

En la comparativa anterior es necesario enfatizar que entre mayor sea el valor de Q, la señal es más fuerte y clara reduciendo la probabilidad de error en la transmisión; por otro lado entre menor sea el BER la señal es más confiable y se transmiten correctamente la mayoría de los bits.

Luego se trabajó en optimizar la calidad de la señal al mismo tiempo que el alcance del enlace LOS submarino; para ello se investigó, analizó y evaluó cada componente del esquema para mejorar el BER.

Continuando con el análisis del enlace el receptor deberá ser de tipo APD (fotodiodo avalancha de tipo InGaAs) por su característica de sensibilidad, en caso de elegir un fotodetector PIN se recomienda escoger de tipo Si(silicio), para compensar la sensibilidad y mejorar el BER.

El tipo del filtro pasabajo mejora notablemente la calidad de la señal, en [14] se consideró un filtro pasabajo Gaussiano, sin embargo en esta investigación para optimizar el canal y mejorar la distorsión de la señal, se colocó solo el filtro pasabajo de Bessel obteniendo un mejor factor Q, esto se debe a que los filtros Bessel muestran mejor rendimiento en la atenuación por Rayleigh (considera las partículas) y ofrece un mejor ancho de banda, lo que se mostró mediante la simulación en la figura 10.

En la figura 10, se observa que los valores que determinan la calidad de la comunicación varían dependiendo también del filtro pasabajos utilizado, siendo así que al usar un filtro pasabajos Gaussiano obtenemos un factor Q de 5.97 y un BER de $1.14E-9$, lo cual si bien es cierto cumple los mínimos parámetros de calidad estos pueden ser mejorados. La mejora considerada en este trabajo, emplea un filtro pasabajo de tipo Bessel el cual ha permitido obtener valores para un factor Q de 6.25 y un BER $2.01E-9$.

8. Conclusiones

En relación a los objetivos planteados en esta investigación sobre el análisis de sistemas LOS UOWC a través de software de simulación, se concluye que:

- Con relación al objetivo macro, realizar un estudio general de las comunicaciones FSO en UOWC tipo LOS, considerando el comportamiento del canal y sus componentes utilizando el simulador Optisystem; se ha logrado un análisis detallado del comportamiento del canal y sus componentes mediante el uso del simulador OptiSystem. Los resultados obtenidos demuestran que la consideración de los factores característicos del agua de mar, presentados en la Tabla 1, permite modelar con precisión el comportamiento del canal para diversos tipos de agua marina, incluyendo agua pura de mar, agua clara de mar, agua de costa, agua de puerto y agua turbia de puerto. Este modelado se fundamenta en los cálculos detallados en la Tabla 2, proporcionando una base sólida para la simulación y análisis de los sistemas de comunicación óptica submarina en diferentes entornos acuáticos.

También se expuso en la tabla y figura 3, las configuraciones que puede tener este tipo de enlaces de línea de visión directa (LOS) submarinos, mostrando así en la ecuación 15 el modelo de configuración que utiliza el software Optisystem, destacando que el componente que simula el canal submarino LOS, está disponible desde su versión 21.1 de inicios de 2024; por otra parte los componentes empleados se pueden encontrar desde las librerías del software Optisystem que han sido detalladas en la sección 4.4.2 .

- Se investigó de manera exitosa los fundamentos de las comunicaciones ópticas submarinas, enfocándose en las propiedades ópticas del agua de mar y su impacto en los enlaces LOS submarinos y con el fin de obtener una comprensión más detallada del comportamiento de estos enlaces.

- El análisis del software OptiSystem para enlaces ópticos submarinos de línea de visión directa (LOS) ha revelado su robustez y versatilidad en la modelación precisa de estos sistemas complejos. El software demostró alta fidelidad en la representación de las características del canal submarino, incluyendo efectos de absorción, dispersión, turbulencia y centelleo. Su flexibilidad en la configuración de componentes y sus avanzadas herramientas de análisis de rendimiento permiten una evaluación cuantitativa rigurosa de la eficacia del sistema, incluso en condiciones extremas. La buena concordancia con modelos teóricos y datos experimentales valida su uso como herramienta de investigación y diseño.

OptiSystem se revela como un recurso invaluable tanto para la investigación académica como para el desarrollo de aplicaciones prácticas en comunicaciones ópticas submarinas. Su capacidad para simular escenarios adversos, optimizar sistemas y facilitar la exploración de nuevas técnicas de modulación y procesamiento de señales fomenta la innovación en el campo.

- En el análisis, evaluación y optimización de los enlaces ópticos inalámbricos submarinos LOS, se observó una fuerte correlación inversa entre la turbidez del agua y el alcance máximo del enlace, variando desde 17 metros en agua pura hasta 3 metros en agua turbia de puerto. La optimización de componentes, especialmente el uso de fotodiodos de avalancha (APD), mejoró significativamente el rendimiento del sistema, permitiendo mantener tasas de error de bit aceptables incluso en condiciones adversas.
- El estudio de este tipo de enlaces por su capacidad de transferencia de datos, es útil en la exploración, análisis y protección del suelo marino, en actividades que van desde la extracción petrolera, prácticas militares, la industria, investigaciones y la academia.

9. Recomendaciones

- Se recomienda hacer estudios experimentales, equipando los laboratorios de las universidades para el desarrollo de este tipo de tecnologías, y poder evaluar escenarios y alcances.
- Estudiar a fondo varios esquemas de modulación aplicados a esta tecnologías.
- Desarrollar herramientas código abierto y utilizar software de análisis matemático para crear simuladores que evalúen los canales submarinos.
- Empezar las simulaciones por el mejor escenario para verificar alcance con relación del ancho de banda a transmitir; si en el escenario ideal, la comunicación no es satisfactoria en relación con los requerimientos; se recomienda descartar escenarios más complejos y evaluar con otros modelos de modulación, transmisor y receptor.
- Si el fotoreceptor es un fotodiodo PIN se recomienda usar de Silicio(Si), ya que tienen un ancho de banda prohibido más amplio lo que permite una mayor velocidad de operación y mayor sensibilidad a la luz [34].
- Si el fotoreceptor es un fotodiodo APD se recomienda usar de tipo InGaAs (Arseniuro de Indio y Galio), este tipo de fotodiodo mejora la calidad de la señal y el alcance.
- Se recomienda el uso del filtro pasabajo Bessel para mejorar la calidad de la recepción de la señal mejorando el BER y el factor Q, para enlaces con una longitud de onda de color azul, mientras que si la onda es roja el filtro pasabajo Gaussiano resulta más apropiado.
- Se recomienda también que es necesario el uso de un regenerador de señal, para analizar los bits errados en la transmisión de manera más eficiente, ya que permite convertir la señal óptica en eléctrica.

10. Bibliografía

- [1] Y. Guo, S. Marie, M. Kong, M. Sait, Tien Khee Ng, and B. S. Ooi, “Underwater turbulence on scintillating-fiber based omnidirectional underwater wireless optical communication system,” King Abdullah University of Science and Technology Repository (King Abdullah University of Science and Technology), Mar. 2022, doi: <https://doi.org/10.1117/12.2607365>.
- [2] X. Li, L. Sun, J. Huang, and F. Zeng, “Channel Polarization Scheme for Ocean Turbulence Channels in Underwater Visible Light Communication,” *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 11, no. 2, pp. 341–341, Feb. 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/jmse11020341>.
- [3] U. Arun Kumar, S. Banerjee, and R. Murthy, “Bit error rate performance of underwater optical wireless communication test bed simulating the seawater conditions,” *Optik*, vol. 251, pp. 168434–168434, Feb. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.168434>.
- [4] G. Song and J. Xu, “Review on Long-distance Underwater Wireless Optical Communication,” Aug. 2021, doi: <https://doi.org/10.1109/icocn53177.2021.9563681>.
- [5] S. C. Tokgoz, Rubén Boluda-Ruiz, Serhan Yarkan, and K. A. Qaraqe, “ACO-OFDM Transmission over Underwater Pipeline for VLC-based Systems,” Sep. 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/pimrc.2019.8904379>.
- [6] B. Zhiyan, L. Wei, Z. Jianhe “Underwater communication system based on visible light,” *SciSpace - Paper*, Feb. 15, 2019. <https://typeset.io/papers/underwater-communication-system-based-on-visible-light-pvfa9ba2gb> (accessed Nov. 11, 2023).

- [7] P. K. Sajmath, R. V. Ravi, and K. Majeed, “Underwater Wireless Optical Communication Systems: A Survey,” 2020 7th International Conference on Smart Structures and Systems (ICSSS), Jul. 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/icsss49621.2020.9202150>.
- [8] G. S. Spagnolo, L. Cozzella, and F. Leccese, “Underwater Optical Wireless Communications: Overview,” *Sensors*, vol. 20, no. 8, pp. 2261–2261, Apr. 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/s20082261>.
- [9] Medclíc. “Programa educativo sobre el Mediterráneo y su litoral.” https://medclíc.es/uploads/filer_public/8e/91/8e91b273-6459-467f-9ae8-6be61d948287/u2_aguademar_medclíc_cast.pdf
- [10] VV, Nikishov. Espectro de fluctuaciones turbulentas del índice de refracción del agua de mar. En t. J. Mec. de fluidos. Res. 2000, 27, 82–98. DOI: 10.1615/InterJFluidMechRes.v27.i1.70
- [11] M. M. Zayed, M. Shokair, S. Elagooz, and H. Elshenawy, “Feasibility Analysis of Line of Sight (LOS) Underwater Wireless Optical Communications (UWOCs) via Link Budget,” doi: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3953384/v1>.
- [12] X. Ji, H. Yin, F. Xing, and Z. Shen, “Modeling and Simulation Analysis of UOWC System in Consideration of Impluse Expansion,” Sep. 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/icspcc46631.2019.8960906>.
- [13] C. Fang, S. Li, and K. Wang, “Accurate Underwater Optical Wireless Communication Model With Both Line-of-Sight and Non-Line-of-Sight Channels,” *IEEE Photonics Journal*, vol. 14, no. 6, pp. 1–12, Dec. 2022, doi: <https://doi.org/10.1109/jphot.2022.3216599>.

- [14] O. A. Ojediran, A. A. Ponnle, and S. A. Oyetunji. Study on Transmission of Visible Light in Selected Water Bodies of Southwest Nigeria for Underwater Wireless Optical Communication ./JEA Vol. 04(03) 2023, pp 80-89. 10.38032/jea.2023.03.004
- [15] S. Kumar, S. Prince, Jinka Venkata Aravind, and S. V. G, “Analysis on the effect of salinity in underwater wireless optical communication,” *Marine Georesources & Geotechnology*, vol. 38, no. 3, pp. 291–301, Mar. 2020, doi: <https://doi.org/10.1080/1064119x.2019.1569739>.
- [16] Y. Ata, A. Hanaa, L. Bariah, S. Muhaidaty M. A. Imran, «Intelligent Reflecting Surfaces for Underwater Visible Light Communications,» *IEEE Photonics Journal*, vol. 15, n° 1, pp. 1-10, 2023. <https://eprints.gla.ac.uk/289272/1/289272.pdf>
- [17] M. Jain, N. Sharma, A. Gupta, D. Rawaly P. Garg, «Performance Analysis of NOMA Assisted Underwater Visible Light Communication System,» *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 9, n° 8, pp. 1291-1294, 2020
- [18] Y. Weng, J. Pajarinen, R. Akrou, T. Matsuda, J. Peters y T. Maki, «Reinforcement Learning Based Underwater Wireless Optical Communication Alignment for Autonomous Underwater Vehicles,» *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 47, n° 4, pp. 1231-1245, 2022.
- [19] Z. Xu, X. Guo, L. Shen, and D. K. P. Yue, “Radiative transfer in ocean turbulence and its effect on underwater light field,” *Journal of Geophysical Research: Oceans*, vol. 117, no. C7, p. n/a-n/a, Mar. 2012, doi: <https://doi.org/10.1029/2011jc007351>
- [20] C. Gabriel, M.-A. Khalighi, S. Bourenane, P. Leon, and V. Rigaud, “Channel Modeling for Underwater Optical Communication.” Available: <https://archimer.ifremer.fr/doc/00120/23109/20957.pdf>

- [21] M.G. Rafael, L Kraemer., M. Pessoa, and H. M. Salgado, “Monte Carlo Radiative Transfer Modeling of Underwater Channel,” IntechOpen eBooks, May 2020, doi: <https://doi.org/10.5772/intechopen.85961>.
- [22] United Nations Educational, Scientific and Culture Organization. The international thermodynamic equation of seawater – 2010: Calculation and use of thermodynamic properties. 2010. UNESCO. http://www.teos-10.org/pubs/TEOS-10_Manual.pdf
- [23] Institut de Ciències del Mar, Csic.es, Calculadores-Utilitats de l'Equació Termodinàmica d'Estat de l'Aigua de Mar (Utilitats TEOS-10-GSW). 2024. <https://www.physocean.icm.csic.es/Utilities/calculators/teos-ca.html> (accessed Mar. 23, 2024).
- [24] Optisystem. “OptiSystem. Optical Communication System and Amplifier Design Software - PDF Free Download,” Docplayer.net, 2014. <https://docplayer.net/124200604-Optisystem-optical-communication-system-and-amplifier-design-software.html> .
- [25] Optisystem. “OptiSystem Overview,” Optiwave, Aug. 17, 2022. <https://optiwave.com/optisystem-overview>
- [26] H. Kaushal y G. Kaddoum. Comunicación inalámbrica óptica submarina. Acceso IEEE, 4, 1518-1547. https://www.researchgate.net/publication/301202694_Underwater_Optical_Wireless_Communication
- [27] L. Xiangyuan, R. He, H. Sun, D. Liu, H. Yuan, and K. Tang, “Energy focusability of spatial incoherent beam combining for pulse laser propagation in marine atmosphere,” Optics Express, vol. 31, no. 17, pp. 28515–28515, Aug. 2023, doi:

- <https://doi.org/10.1364/oe.497441>. Available:
<https://opg.optica.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-31-17-28515&id=536434>.
- [28] G. Funes, D. Gabriel, P. Codirector, and L. Zunino, Desarrollo, análisis y aplicación de nuevos modelos para la propagación láser en medios turbulentos. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de La Plata. Argentina. 2014 [Online]. Available:https://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/44120/Documento_completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [29] F. Hanson, and S. Radic. High Bandwidth Underwater Optical Communication. Applied Optics 2008.47 (2): 277–83. doi:10.1364/AO.47.000277
- [30] J. Meler, D. Litwicka, and M. Zabłocka, “Variability of light absorption coefficients by different size fractions of suspensions in the southern Baltic Sea,” Biogeosciences, vol. 20, no. 12, pp. 2525–2551, Jun. 2023, doi: <https://doi.org/10.5194/bg-20-2525-2023>. Available: <https://bg.copernicus.org/articles/20/2525/2023/bg-20-2525-2023.pdf>. [Accessed: Mar. 27, 2024]
- [31] Berlin Lasers. “445nm 150mW-500mW Módulo Láser de Punto Azul de Alta Potencia,” Berlinlasers.com, 2024. Available: <https://www.berlinlasers.com/es/445nm-150mw-500mw-m%C3%B3dulo-l%C3%A1ser-de-punto-azul-de-alta-potencia>.
- [32] ALPHALAS. “ALPHALAS - Ultrafast Photodetectors: UPD Series,” Alphalass.com, 2024. Available: https://www.alphalass.com/images/stories/products/laser_diagnostic_tools/Ultrafast_Photodetectors_UPD_ALPHALAS.pdf

- [33] Shen, C., Guo, Y., Oubei, H.M., Ng, T.K., Liu, G., Park, K.H., Ho, K.T., Alouini, M.S. and Ooi, B.S., 2016. 20-meter underwater wireless optical communication link with 1.5 Gbps data rate. *Optics express*, 24(22), pp.25502-25509.
- [34] Hong, N., Geum, D., Kim, T.S., Ahn, S., Han, J., Jung, D., Ryu, G., Kim, S., Yu, K.J., & Choi, W.J. 2020. Flexible GaAs Photodetectors with Ultrathin Thermally Grown Silicon Dioxide as a Long-Lived Barrier for Chronic Biomedical Implants. *Advanced Photonics Research*.

11. Anexos

Anexo 1. Datos del Fabricante del Diodo Láser Transmisor

445nm 150mW-500mW Módulo Láser de Punto Azul de Alta Potencia



El **445nm módulo láser de punto azul de alta potencia** reúne la emisión de rayo láser azul más potente e intenso del 445nm diodo láser azul importado dentro

de 150mW a 500mW. Integrado con una fuente de alimentación de entrada de DC externa y un sistema de enfriamiento de disipador de calor de metal separado, el láser azul de alta potencia de emisión directa de diodos de 445nm asegura una emisión térmica agradable superior, la mejor fuente de luz láser azul emisora, el precio más competitivo y la alineación de puntos láser azul más confiable para todo tipo de experimentos de laboratorio, universidades e institutos, etc.

DETAILS

No tan brillante como el sistema 473nm láser azul DPSS, el módulo láser de punto azul de emisión directa de diodos de 445nm obtiene la estructura más compacta y duradera, logrando una mayor estabilidad en la proyección del punto de referencia azul en el trabajo continuo. Se ha realizado teniendo en cuenta plenamente el rendimiento de emisión térmica, incluida la parte emisora térmica separada, APC, ACC circuito de conducción dentro del tubo de carcasa de metal, asegurando un excelente ciclo de luz láser y la proyección de puntos láser azul más clara para múltiples aplicaciones, incluida la tecnología de la información, monitoreo ambiental, diagnósticos médicos e investigación científica, etc.

◆ Importación de 445nm diodo láser azul que asegura la mejora de la estabilidad del haz en el uso a largo plazo.

El módulo láser de punto azul de alta potencia es un 445nm diodo láser azul de importación autónomo dentro de 150mW a 500mW, APC, ACC Placa de circuito de

conducción en un diámetro de tubo de tamaño bastante compacto, manteniendo una potencia de salida constante y un suministro de corriente eléctrica. Alcanza hasta un 80% de estabilidad del haz en un período de 8 a 10 horas de uso diario.

◆ Proyectos precisos de puntos azules de lentes ópticos calificados.

El módulo de punto azul de alta calidad integra una óptica de lente esférica de vidrio calificada y una lente cilíndrica de vidrio ajustable desde la apertura del haz, lo que garantiza la mejor concentración de luz láser azul, produciendo el mejor y más preciso punto láser azul en la distancia.

◆ Fuente de alimentación constante de la fuente de alimentación de entrada de DC.

Al aceptar una corriente eléctrica de amplio rango de 100V a 240V, el 445nm módulo láser de punto azul de alta potencia permite un uso fácil. La extensión de cables eléctricos tanto para el láser azul como para la fuente de alimentación de DC se caracteriza por una alta temperatura y una fuerte resistencia a la corrosión, lo que garantiza la proyección de puntos de láser azul más confiable en condiciones de trabajo difíciles.

Características clave:

◆ Las pruebas de estabilidad del rayo láser altamente estrictas garantizan la alineación de puntos láser azul más confiable en situaciones de trabajo difíciles.

◆ El diseño de enfoque ajustable asegura una fácil concentración de la luz láser y una proyección de puntos azules muy claros en la distancia.

◆ Modulación CW

Parámetros técnicos:

Elemento	Módulo láser de punto azul de alta potencia
Longitud de onda (nm)	445nm
Potencia de salida (mW)	150mW, 200mW, 300mW, 400mW, 500mW
Clase de láser	IIIB, IV
Espesor del haz en la apertura (mm)	<2.5mm
Divergencia del haz (mrad)	3mrad

Modo haz (antes de óptica)	TEM
¿Enfoque ajustable?	sí
Modulación TTL	NO
Voltaje de funcionamiento (v)	DC=9V
Corriente de funcionamiento (mA)	I<1000mA
Temperatura de funcionamiento (°C)	10°C~30°C
Temperatura de almacenamiento (°C)	-10°C~50°C
Dimensión	D26mm×L171mm
Vida útil esperada (horas)	8000 horas
Período de garantía	180 días

Nota: ¡Advertencia! La poderosa radiación láser azul y el reflejo del módulo láser de punto azul de alta potencia son peligrosos para los ojos humanos, causan serios peligros tanto para los ojos como para la piel. En dispositivos de alineación especiales, solo debe permitir la operación por parte de usuarios o profesionales capacitados.

Evite la exposición directa de los ojos a la apertura del rayo láser a corta distancia. Para cualquier uso de láser azul de alta potencia de hasta 50mW, genera energía térmica. Recuerde usar anteojos de seguridad para láser con una longitud de onda de 445nm durante todo el tiempo que utilice módulos láser de alta potencia.

Fuente de alimentación:

Entrada: AC 100-240V, 1.0A, 50 / 60Hz

Salida: DC 9V, 1000mA

Dimensión: 70 mm × 46 mm × 27 mm

Longitud de la línea de entrada de CA: 116 cm

Longitud de la línea de salida de CC: 126 cm

Lista de empaque:

1. módulo láser de punto azul de alta potencia

2. Fuente de alimentación de entrada de DC

Atención: Para 445nm módulos láser de punto azul de alta potencia OEM, contáctenos gratis en support@berlinlasers.com.

Anexo 2. Datos del Fabricante del Photodetector UPD Series

Ultrafast Photodetectors

UPD Series

NEW MODELS:
Faster Rise Times & Wider Wavelength Ranges



42 Unique Models

The UPD series of ultrafast photodetectors are best suited for measurement of optical waveforms from DC to 25 GHz. Various models feature rise times as short as 15 ps and cover the spectral range from 170 to 2600 nm.

All photodetectors are enclosed in compact and solid aluminum housings and can be biased with a battery or an external power supply.

The UV-extended versions of the silicon type photodetectors are the only commercial products that cover the spectral range from 170 to 1100 nm.

Another type of unique UV-sensitive InGaAs photodetectors can be used for detecting laser pulses in the range from 350 to 1700 nm, thus having the widest spectral range and the highest speed commercially available.

Perfect impedance matching and state-of-the-art microwave technology assure pulse form measurements without any ringing or artefacts. The customer is free to use a 50 Ω terminating resistor for highest speed operation, or a high impedance load for obtaining large signals. This guarantees maximum flexibility for diverse applications.

In combination with our BBA series of wideband high-gain amplifiers, the high-speed photodetectors are an advantageous alternative to the expensive and cumbersome avalanche photodiodes.

The UPD series high-speed photodetectors are indispensable tools for laser and photonics research.

New Models Available: Faster Rise Times & Wider Wavelength Ranges
• UPD-15-1R1-F-C: Ultrafast InGaAs PIN photodetector, rise time < 15 ps, bandwidth > 25 GHz, spectral range 300 - 1700 nm, fiber-coupled input with FC/APC connector
• UPD-15-1R1-P, UPD-15-1R1-D: Ultrafast InGaAs PIN photodetectors, rise time < 35 ps, bandwidth > 10 GHz, spectral range 300 - 1700 nm, with polished or diffuse window
• UPD-15-UV1R-P, UPD-15-UV1R-D: Ultrafast InGaAs PIN photodetectors, rise time < 35 ps, bandwidth > 10 GHz, spectral range 350 - 1700 nm, with polished or diffuse window
• UPD-50-5P, UPD-50-5D, UPD-50-5U, UPD-50-5F: Ultrafast Si PIN photodetectors, rise time 50 ps, fall time 50 ps, bandwidth > 7 GHz, spectral range 170- 1100nm or 320- 1100nm, with polished or diffuse window
• UPD-100-1R1-P: Ultrafast Ge photodetector, rise time < 100 ps, pulsewidth (FWHM) 100 ps, spectral range 400 - 2000 nm
• UPD-3N-1R1-P: Fast InGaAs photodetector, extended infrared range up to 2.1 μ m, rise time 150 ps
• UPD-5N-1R1-P: Fast InGaAs photodetector, extended infrared range up to 2.6 μ m, rise time 100 ps

Features
• Ultra High-Speed Operation
• Rise Times: starting from 15 ps
• Bandwidths: up to 25 GHz
• Spectral Ranges: 170 - 2600 nm
• Compact Design
• Battery or External Power Supply
• Models for Free-Space Beam, or with FC/PC Receptacle or Pigtailed with SM Fiber

Applications
• Pulse Form Measurements
• Pulse Duration Measurements
• Precise Synchronization
• Mode Beating Monitoring
• Heterodyne Measurements

LASERS, OPTICS, ELECTRONICS
MADE IN GERMANY
WWW.ALPHALAS.COM



UPD Series - Available Models

Model	Rise Time (ps)	Bandwidth (GHz)	Spectral Range (nm)	Quantum Efficiency @ Peak	Sensitive Area (Dia. μm / mm^2)	Noise Equiv. Power (W/Hz)	Dark Current (nA)	Material	Optical Input / Window Type ¹	RF Output Connect. Type
UPD-15-IR2-FC	< 15	> 25	800 - 1700	75%	Fiber, 9 μm	1.0×10^{-16}	0.1	InGaAs	Fiber w. TC/APC ²	SMA
UPD-30-VIS-P	< 30	> 10	320 - 900	40%	200x200 / 0.04	3.0×10^{-16}	0.1	GaAs	Polished, glass	SMA
UPD-35-IR2-P	< 35	> 10	800 - 1700	80%	55 / 0.0024	1.0×10^{-16}	0.3	InGaAs	Polished, glass	SMA
UPD-35-IR2-D	< 35	> 10	800 - 1700	80%	55 / 0.0024	1.0×10^{-16}	0.3	InGaAs	Diffuse, quartz	SMA
UPD-35-IR2-FR	< 35	> 10	800 - 1700	80%	55 / 0.0024	1.0×10^{-16}	0.3	InGaAs	TC/PC receptacle ³	SMA
UPD-35-IR2-FC	< 35	> 10	800 - 1700	80%	Fiber, 9 μm	1.0×10^{-16}	0.3	InGaAs	Fiber w. TC/APC ²	SMA
UPD-35-UVIR-P	< 35	> 10	350 - 1700	80%	55 / 0.0024	1.0×10^{-16}	0.3	InGaAs ⁴	Polished, InG ⁵	SMA
UPD-35-UVIR-D	< 35	> 10	350 - 1700	80%	55 / 0.0024	1.0×10^{-16}	0.3	InGaAs ⁴	Diffuse, quartz	SMA
UPD-40-VIS-P	< 40	> 8.5	500 - 1890	40%	200x200 / 0.04	3.0×10^{-16}	5000	InGaAs	Polished, glass	SMA
UPD-40-IR2-P	< 40	> 8.5	800 - 1700	80%	60 / 0.0028	1.1×10^{-16}	0.5	InGaAs	Polished, glass	SMA
UPD-40-IR2-D	< 40	> 8.5	800 - 1700	80%	60 / 0.0028	1.1×10^{-16}	0.5	InGaAs	Diffuse, quartz	SMA
UPD-40-IR2-FR	< 40	> 8.5	800 - 1700	80%	60 / 0.0028	1.1×10^{-16}	0.5	InGaAs	TC/PC receptacle ³	SMA
UPD-40-IR2-FC	< 40	> 8.5	800 - 1700	80%	Fiber, 9 μm	1.1×10^{-16}	0.5	InGaAs	Fiber w. TC/APC ²	SMA
UPD-40-UVIR-P	< 40	> 8.5	350 - 1700	80%	60 / 0.0028	1.1×10^{-16}	0.5	InGaAs ⁴	Polished, InG ⁵	SMA
UPD-40-UVIR-D	< 40	> 8.5	350 - 1700	80%	60 / 0.0028	1.1×10^{-16}	0.5	InGaAs ⁴	Diffuse, quartz	SMA
UPD-50-SP	< 50	> 7.0	320 - 1100	45%	100 / 0.0079	1.2×10^{-16}	0.001	Si	Polished, glass	SMA
UPD-50-SD	< 50	> 7.0	320 - 1100	45%	100 / 0.0079	1.2×10^{-16}	0.001	Si	Diffuse, quartz	SMA
UPD-50-UP	< 50	> 7.0	170 - 1100	45%	100 / 0.0079	1.2×10^{-16}	0.001	Si ⁶	Polished, InG ⁵	SMA
UPD-50-UD	< 50	> 7.0	170 - 1100	45%	100 / 0.0079	1.2×10^{-16}	0.001	Si ⁶	Diffuse, quartz	SMA
UPD-70-IR2-P	< 70	> 5.0	800 - 1700	80%	80 / 0.005	2.0×10^{-16}	0.8	InGaAs	Polished, glass	SMA
UPD-70-IR2-D	< 70	> 5.0	800 - 1700	80%	80 / 0.005	2.0×10^{-16}	0.8	InGaAs	Diffuse, quartz	SMA
UPD-70-IR2-FR	< 70	> 5.0	800 - 1700	80%	80 / 0.005	2.0×10^{-16}	0.8	InGaAs	TC/PC receptacle ³	SMA
UPD-70-IR2-FC	< 70	> 5.0	800 - 1700	80%	Fiber, 9 μm	2.0×10^{-16}	0.8	InGaAs	Fiber w. TC/APC ²	SMA
UPD-70-UVIR-P	< 70	> 5.0	350 - 1700	80%	80 / 0.005	2.0×10^{-16}	0.8	InGaAs ⁴	Polished, InG ⁵	SMA
UPD-70-UVIR-D	< 70	> 5.0	350 - 1700	80%	80 / 0.005	2.0×10^{-16}	0.8	InGaAs ⁴	Diffuse, quartz	SMA
UPD-100-IR1-P ⁷	< 100	> 3.0	400 - 2000	80%	80 / 0.005	3.0×10^{-16}	700	Ge	Polished, glass	SMA
UPD-200-SP	< 175	> 2.0	320 - 1100	85%	400 / 0.126	1.5×10^{-16}	0.001	Si	Polished, glass	BNC
UPD-200-SD	< 175	> 2.0	320 - 1100	85%	400 / 0.126	1.5×10^{-16}	0.001	Si	Diffuse, quartz	BNC
UPD-200-UP	< 175	> 2.0	170 - 1100	85%	400 / 0.126	1.5×10^{-16}	0.001	Si ⁶	Polished, InG ⁵	BNC
UPD-200-UD	< 175	> 2.0	170 - 1100	85%	400 / 0.126	1.5×10^{-16}	0.001	Si ⁶	Diffuse, quartz	BNC
UPD-300-SP	< 300	> 1.0	320 - 1100	90%	600 / 0.283	3.0×10^{-16}	0.01	Si	Polished, glass	BNC
UPD-300-SD	< 300	> 1.0	320 - 1100	90%	600 / 0.283	3.0×10^{-16}	0.01	Si	Diffuse, quartz	BNC
UPD-300-UP	< 300	> 1.0	170 - 1100	90%	600 / 0.283	3.0×10^{-16}	0.01	Si ⁶	Polished, InG ⁵	BNC
UPD-300-UD	< 300	> 1.0	170 - 1100	90%	600 / 0.283	3.0×10^{-16}	0.01	Si ⁶	Diffuse, quartz	BNC
UPD-500-SP	< 500	> 0.6	320 - 1100	90%	800 / 0.5	3.5×10^{-16}	0.01	Si	Polished, glass	BNC
UPD-500-SD	< 500	> 0.6	320 - 1100	90%	800 / 0.5	3.5×10^{-16}	0.01	Si	Diffuse, quartz	BNC
UPD-500-UP	< 500	> 0.6	170 - 1100	90%	800 / 0.5	3.5×10^{-16}	0.01	Si ⁶	Polished, InG ⁵	BNC
UPD-500-UD	< 500	> 0.6	170 - 1100	90%	800 / 0.5	3.5×10^{-16}	0.01	Si ⁶	Diffuse, quartz	BNC
UPD-3N-IR2-P	< 150 [*]	> 0.4 [*]	800 - 2100	75%	300 / 0.07	1.5×10^{-16}	90	InGaAs	Polished, glass	BNC
UPD-5N-IR2-P	< 200 [*]	> 0.3 [*]	800 - 2600	70%	300 / 0.07	7.0×10^{-17}	2000	InGaAs	Polished, glass	BNC
UPD-2M-IR2-P	< 75000	> 0.004	900 - 1700	80%	2000 / 3.14	4.0×10^{-14}	5	InGaAs	Polished, glass	BNC
UPD-2M-IR2-P-ITEC ⁸	< 75000	> 0.004	900 - 1700	75%	2000 / 3.14	1.0×10^{-14}	0.3	InGaAs	Polished, glass	BNC

Notes: ¹ The diffuse window reduces the positioning accuracy requirements and increases the damage threshold at the cost of a reduced sensitivity by a factor of approx. three to five. Recommended for high peak power lasers only.

² This model has negative output. All other models have positive output by default but may be ordered with negative output if required.

³ With TEC cooling module, non-standard housing.

⁴ Modified material with increased blue / UV sensitivity.

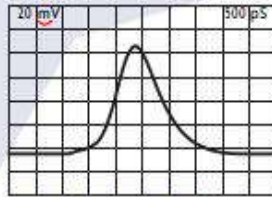
⁵ Not compatible with the optional filter holder.

⁶ Greatly improved performance.

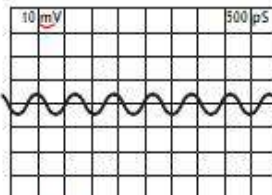
Lasers, Optics, Electronics
MADE IN GERMANY
WWW.ALPHALAS.COM



Ultrafast Photodetectors



High-fidelity pulse for measurement with UPD-200-SP and 1 GHz oscilloscope. The light source is our PULNELASR-P-1064-100 subnanosecond Q-switched laser.



Longitudinal mode beating of a He-Ne laser (633 nm) recorded with UPD-200-SP photodetector and 1 GHz oscilloscope. The modulation depth of the 1.5 GHz beating signal is limited to 25% by the oscilloscope bandwidth.

Power Sources for UPD Series (depend on the photodetector model)

Low-Noise Power Supply
European Standard
Input: 230 V AC
Output: 12 V DC
Model: PS-UPD-12-EU

Low-Noise Power Supplies
Worldwide Usage
Input: 100 - 240 V AC

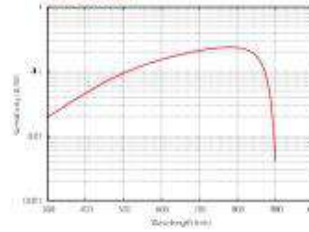
Output: 6 V DC
Model: PS-UPD-6-WW

Output: 9 V DC
Model: PS-UPD-9-WW

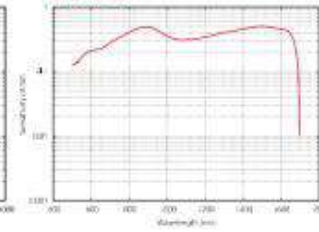
Output: 12 V DC
Model: PS-UPD-12-WW

Bias Battery
6 V
Model: BAT-UPD-6V

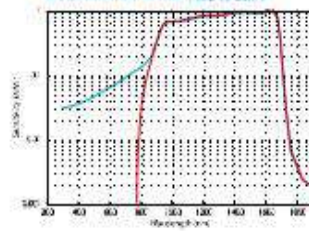
Spectral Response GaAs Schottky
Ultrafast Photodetectors
UPD-30-VSG-P



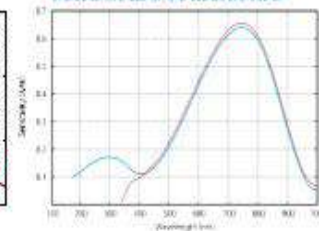
Spectral Response InGaAs Schottky
Ultrafast Photodetectors
UPD-40-VSI-P



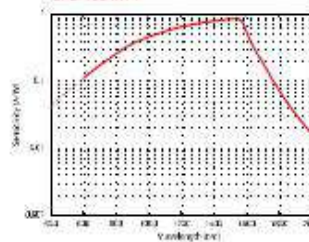
Spectral Response InGaAs
Ultrafast Photodetectors
UPD-35-IR2-P, UPD-40-IR2-P, UPD-70-IR2-P,
UPD-31-IR10-P, UPD-40-IR10-P, UPD-70-IR10-P



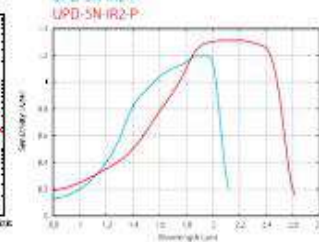
Spectral Response Si PIN
Ultrafast Photodetectors
UPD-50-SI, UPD-200-SI, UPD-300-SI, UPD-500-SI,
UPD-50-IF, UPD-200-IF, UPD-300-IF, UPD-500-IF



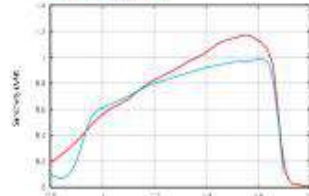
Spectral Response Ge pn
Ultrafast Photodetectors
UPD-100-IR1-P



Spectral Response InGaAs PIN
Ultrafast Photodetectors
UPD-5N-IR2-P,
UPD-5N-IR2-P



Spectral Response InGaAs PIN
Ultrafast Photodetectors
UPD-2M-IR2-P,
UPD-2M-IR2-P-TEC



Important notice: The sensitivity curves are for reference only and are not recommended to be used for calibration or amplitude measurement purposes.

Related Products

- Broadband Amplifiers BBA Series (amplitude gain: +10, +100 or variable +1=100)
- BNC 50 Ω Terminating Load
- SMA (male) to BNC (female) Adapter
- SMA to SMA Adapter
- Attenuator Filter Adapter

ALPHALAS GMBH
Bertha-von-Suttner-Str. 5
D-37085 Goettingen
Germany

TEL: +49 - 551 - 77 06 147
FAX: +49 - 551 - 77 06 146
E-MAIL: sales@alphalas.com
WEB: www.alphalas.com

LABS, OFFICE, ELECTRONICS
MADE IN GERMANY
WWW.ALPHALAS.COM



Copyright © ALPHALAS GmbH, Inndorf, Germany - UPD-121162

Anexo 3. Glosario de Términos

AOP: Apparent optical proprieties (Propiedades Ópticas Aparentes). Son las propiedades ópticas que se observan en un medio, como la absorción y la dispersión, y que dependen de las propiedades ópticas inherentes del medio y de la geometría del sistema de comunicación.

AUV: Autonomous Underwater Vehicle (Vehículo Submarino Autónomo). Son vehículos que operan bajo el agua sin necesidad de un piloto humano a bordo.

BER: Bit Error Rate (Tasa de Bits Erróneos). Es la tasa de bits errados en una comunicación.

DFB: Distributed Feedback Laser (Láser de retroalimentación distribuida). Fuente de luz de alta potencia y alta calidad para comunicaciones submarinas.

DMD Analyzer: DMD Analyzer Tool (Analizador DMD). Herramienta para el análisis del comportamiento y rendimiento de los dispositivos Modulación Digital.

DSP: Digital Signal Processor (Procesador de Señal Digital)

EA: Equalization (Ecuación Adaptativa). Se utiliza para compensar la distorsión del canal y mejorar la calidad de la señal.

FACTOR Q: Quality factor (Factor de Calidad). Parámetro utilizado para evaluar la calidad de las transmisiones ópticas. Se define como la relación entre la tasa de errores de bits (BER) y la tasa de errores de bits tolerable (BERT). Es un indicador importante para medir el rendimiento de los sistemas de comunicación óptica, ya que refleja la capacidad del sistema para transmitir datos sin errores. Un factor Q alto indica una mayor calidad de la transmisión, mientras que un factor Q bajo puede indicar una mayor tasa de errores y una menor calidad

FBG: Fiber Bragg Grating (Filtro de Bragg de Fibra). Es un dispositivo óptico que se utiliza para reflejar o transmitir luz a una longitud de onda específica.

FOV: Field of View (Ángulo del Campo de Visión). Es el ángulo que abarca el haz de luz emitido por un transmisor óptico.

FSK: Frequency Shift Keying (Modulación por Desplazamiento de Frecuencia). Un método de modulación digital que utiliza dos o más frecuencias de luz para representar información.

IIR/FIR: Infinite Impulse Response/Finite Impulse Response (Filtros Infinitos/Finitos de Impulso). Son dos tipos de filtros digitales que se utilizan para eliminar o modificar ciertas frecuencias de una señal.

IOP: Inherent Optical Properties (Propiedades Ópticas Inherentes). Son las propiedades ópticas que caracterizan a un material, como el índice de refracción y la absorción.

IoUT: Underwater Internet of Things (Internet de las Cosas Submarina). Se refiere a la red de dispositivos conectados que se encuentran bajo el agua.

MZ: Mach-Zehnder Modulator (Modulador de Mach-Zehnder). Un tipo de modulación óptica que utiliza un interferómetro Mach-Zehnder para codificar información en la fase de la luz.

OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing (Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal). Un método de modulación que divide el canal de frecuencia en subportadoras ortogonales, permitiendo la transmisión de datos en paralelo.

OWC: Optical Wireless Communication (Comunicación Óptica Inalámbrica). Es la transmisión de información a través de ondas de luz en el espacio libre.

PAM: Pulse Amplitude Modulation (Modulación por Amplitud de Pulso). Un método de modulación digital que utiliza la amplitud de pulsos de luz para representar información.

PAPR: Peak-to-Average Power Ratio (Relación Potencia Pico a Promedio). Es la relación entre la potencia máxima y la potencia promedio de una señal.

PSO: Particle Swarm Optimization (Optimización de Enjambre de Partículas). Es un algoritmo de optimización que se inspira en el comportamiento de los enjambres de abejas.

PTS: Partial Transmit Sequences (Secuencias de Transmisión Parcial). Son técnicas que se utilizan para mejorar la eficiencia energética de las comunicaciones ópticas submarinas.

QAM: Quadrature Amplitude Modulation (Modulación por Amplitud en Cuadratura). Un método de modulación digital que utiliza cuatro puntos en el plano complejo para representar dos bits de información.

RC: Resistance-Capacitance (Resistencia-Capacitancia). Se refiere a un circuito eléctrico que está compuesto por resistencias y condensadores.

TLMM: Transmission Line Matrix Method (Método de Matriz de Líneas de Transmisión). Es un método numérico para analizar el comportamiento de las ondas electromagnéticas en estructuras de guía de ondas.

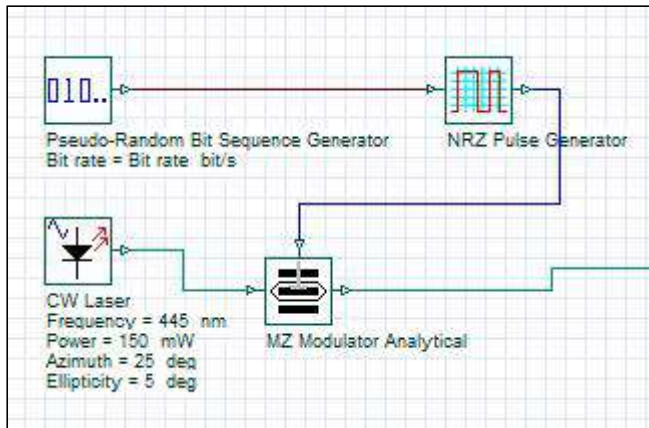
UUV: Unmanned Underwater Vehicle (Vehículo Submarino No Tripulado). Son vehículos que operan bajo el agua sin necesidad de un piloto humano a bordo.

VCSEL: Vertical Cavity Surface Emitting Laser (Láser de emisión vertical por cavidad superficial). Fuente de luz compacta y eficiente para comunicaciones submarinas.

Anexo 4. Análisis, diseño y optimización para el transmisor, receptor transmitiendo 10 Gbps en diferentes canales de agua de mar.

Figura 13.

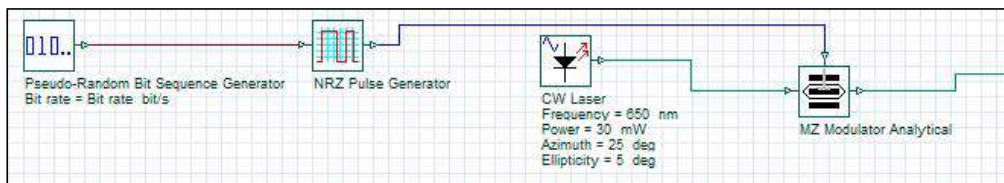
Primer diseño para el transmisor



Fuente: La autora

Figura 14.

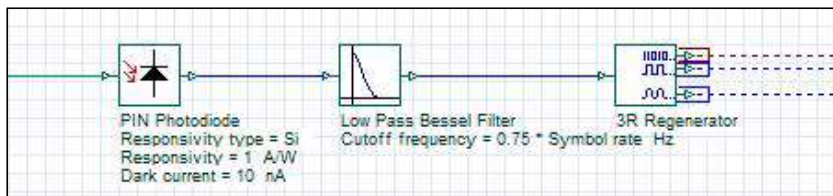
Segundo diseño para el transmisor



Fuente: La autora

Figura 15.

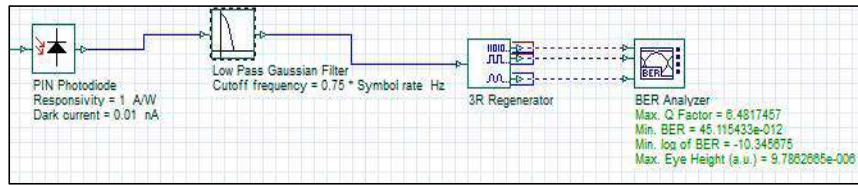
Primer diseño para el receptor:



Fuente: La autora

Figura 16.

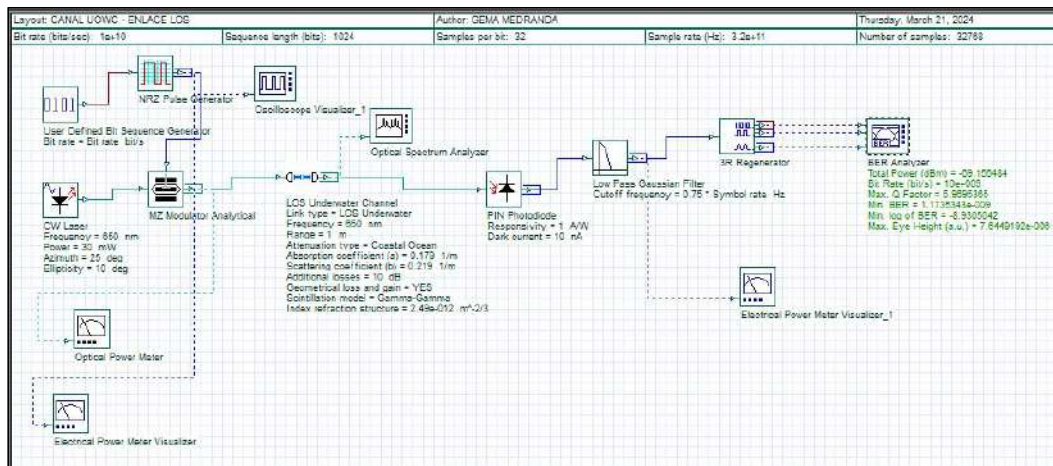
Segundo diseño para el receptor:



Fuente: La autora

Figura 17.

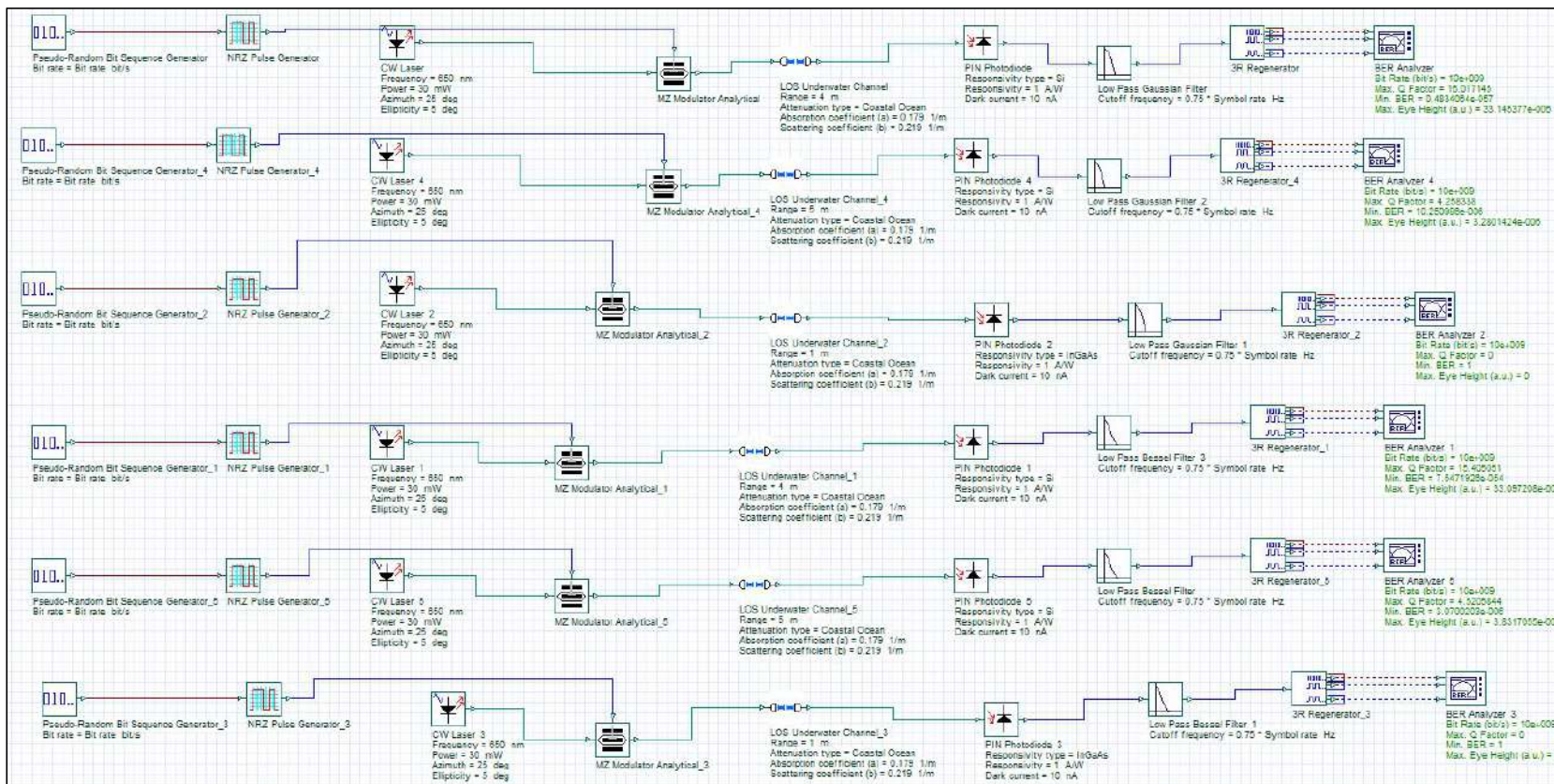
Transmisor propuesto en [14] reemplazando el canal por el componente LOS Underwater Channel.



Fuente: La autora

Figura 18.

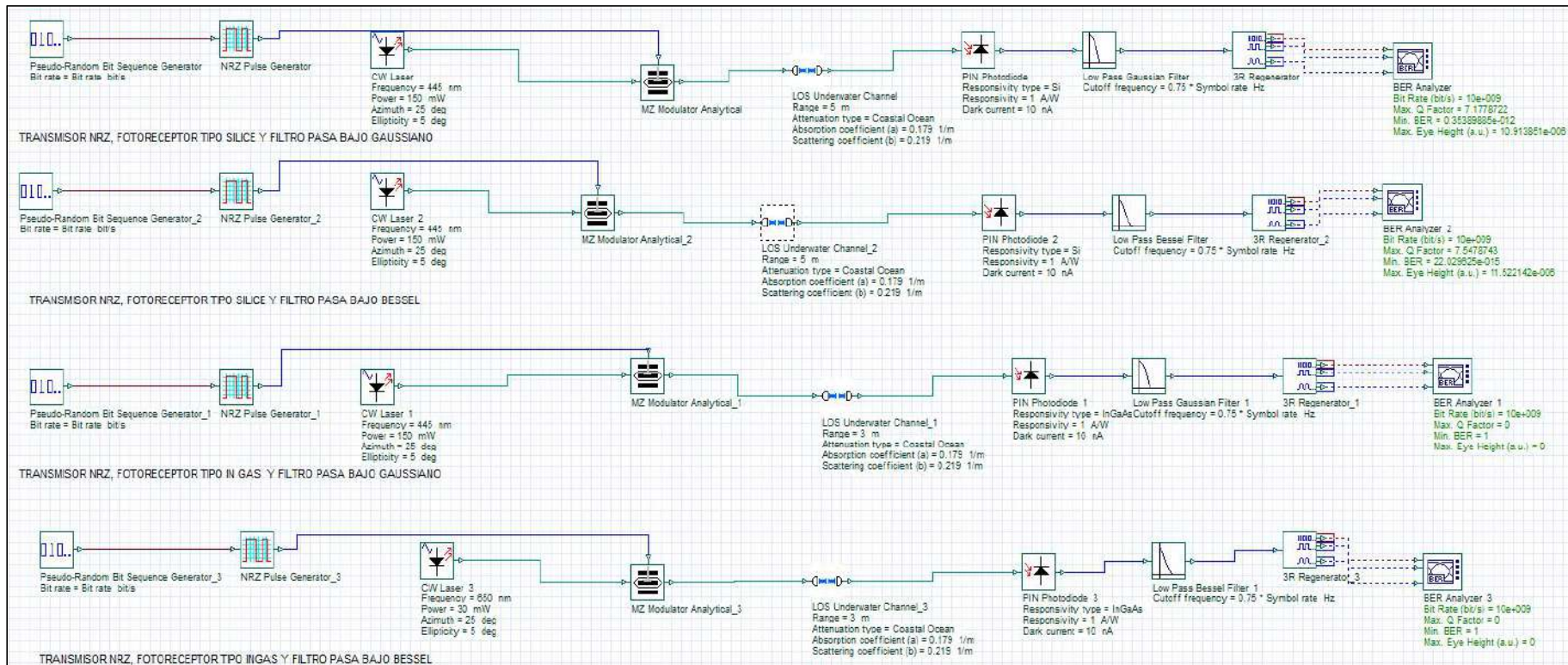
Manteniendo el tipo de agua de mar de costa, y mejorando el fotoreceptor (PIN (Si e InGaAs) y filtro Gaussiano y Bessel) y las características del transmisor (frecuencia de 650nm y potencia de 30mW).



Fuente: La autora

Figura 19.

Manteniendo el tipo de agua de mar de costa, y mejorando el fotoreceptor (PIN (Si e InGaAs) y filtro Gaussiano y Bessel) y las características del transmisor (frecuencia de 445 nm y potencia de 150 mW).



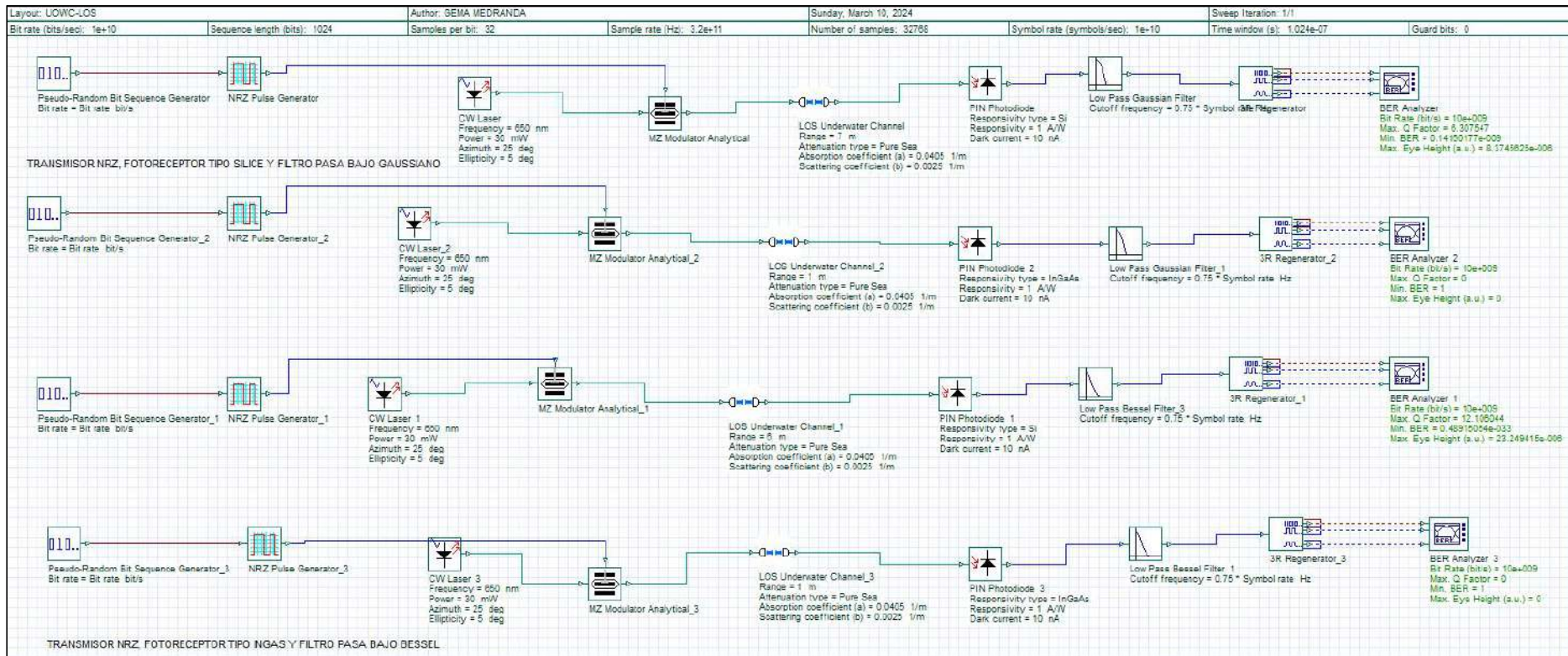
Fuente: La autora

Se evaluán 4 escenarios manteniendo los parámetros de la investigación en [14], realizando cambios en el material del fotodetector y del filtro pasabajo, es decir; para el transmisor se consideró un láser de 650 nm a una potencia de 30 mW, se simula con un fotoreceptor PIN y se evalúa el material del cual están compuestos considerando: un PIN de silicio y otro de Arseniuro de Inidio-Galio; con una corriente oscura de 10 nA y una sensibilidad de 1A/W, intercalando entre un filtro pasabajo Gaussiano y un filtro pasabajo Bessel; para un canal submarino de agua de mar de costa. Los resultados muestran que se alcanza una distancia de hasta 4 metros con un BER 10^{-57} lo cual es bastante alto, mientras que para una distancia de 5 metros el BER es de 10^{-6} lo cual es muy bajo, estableciéndose una gran diferencia en la calidad de la transmisión de datos, usando un fotoreceptor de tipo Silicio, en la siguiente figura 20 se observa que si mejoramos el transmisor con una frecuencia de 445nm y una potencia de 150mW, manteniendo el material de Silice en el fotoreceptor, tenemos una excelente comunicación a distancias de 5 metros, con un BER de 10^{-12} , con un filtro Bessel.

En la figura 19, se observan los parámetros propuestos para el transmisor en esta investigación, realizando cambios en el material del fotodetector y del filtro pasabajo, es decir; con un láser a 445nm a una potencia de 150 mW, se simula la con un fotoreceptor PIN evaluando el material del cual están compuestos considerando un PIN de Silicio (Si) y otro de Arseniuro de Inidio-Galio (InGaAs) con una corriente oscura de 10 nA y una sensibilidad de 1A/W, con un filtro pasabajo Gaussiano y un filtro pasabajo Bessel. Si el receptor es de tipo InGaAs, la comunicación no es satisfactoria sin importar que se mejore el transmisor o el canal, tal como se observa en la siguiente figura, donde se esta considerando un canal ideal de agua pura de mar sin centelleo ni turbulencia y con pocas partículas en suspensión.

Figura 20.

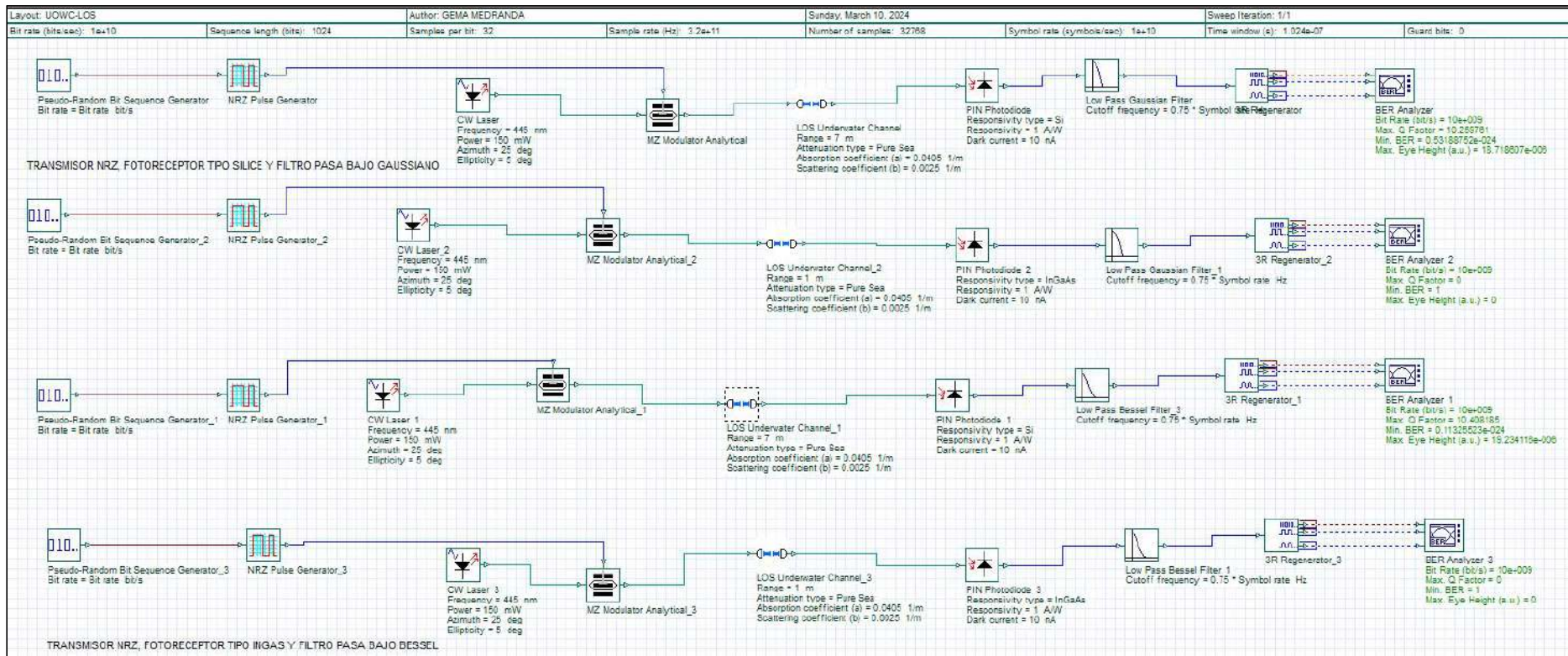
Agua pura de mar sin turbulencias ni centelleos (mejor escenario submarino) evaluando optimización del fotoreceptor (PIN (Si e InGaAs) y filtro Gaussiano y Bessel) y las características del transmisor (frecuencia de 650 nm y potencia de 30 mW).



Fuente: La autora

Figura 21.

Agua pura de mar sin turbulencias ni centelleos (mejor escenario submarino) evaluando optimización del fotoreceptor (PIN (Si e InGaAs) y filtro Gaussiano y Bessel) y las características del transmisor (frecuencia de 445 nm y potencia de 150 mW).

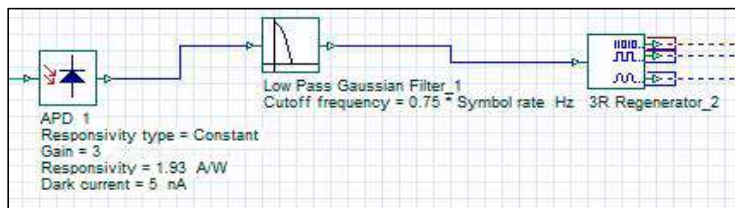


Fuente: La autora

En las dos figuras anteriores se demuestra que aún en el mejor canal, si el material del fotoreceptor no es el apropiado, la comunicación no será exitosa (fotoreceptor PIN(InGaAs), por lo cual no se sigue evaluando otros canales submarinos, se opta por un fotoreceptor como el propuesto en [33].

Figura 22.

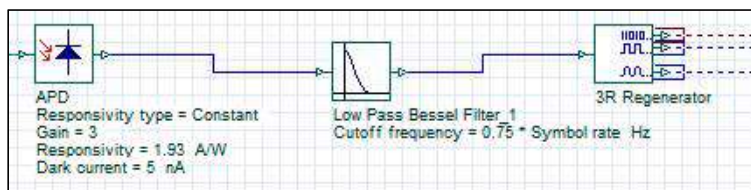
Tercer diseño para el receptor:



Fuente: La autora

Figura 23.

Cuarto diseño para el receptor

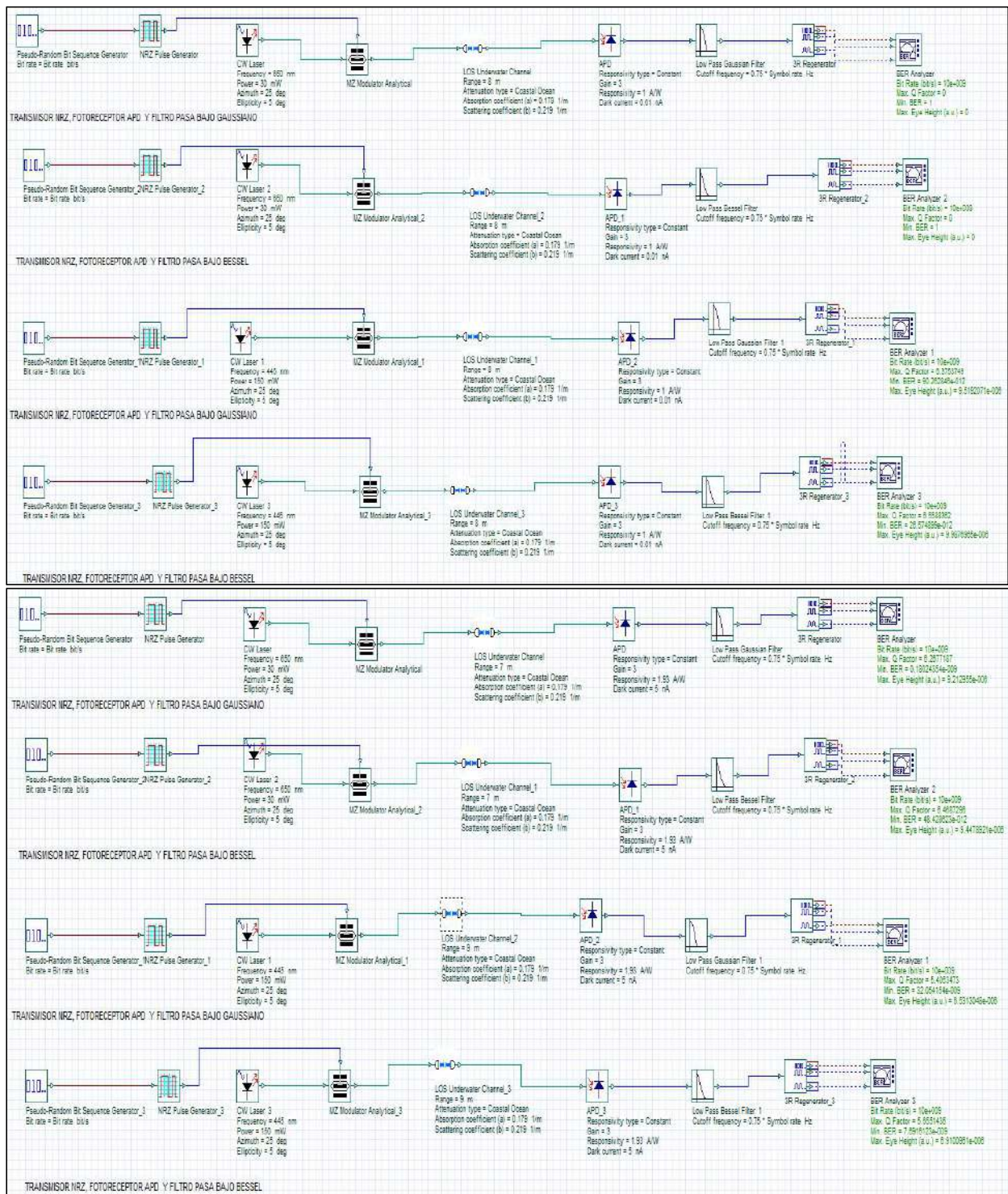


Fuente: La autora

En las dos figuras siguientes, se evaluarán modelos manteniendo los parámetros propuestos en [14] y los propuestos en esta investigación, realizando cambios en el material del fotodetector y del filtro pasabajo, es decir; con un transmisor láser de frecuencia 650 nm a una potencia de 30 mW, y otro a transmisor a 445 nm y una potencia de 150 mW, son simulados con un fotoreceptor APD (diodo avalancha) de Arseniuro de Indio y Galio (InGaAs) con una corriente oscura de 0.01 nA y una sensibilidad de 1AW, y el otro fotoreceptor APD (InGaAs) con una corriente oscura de 5nA y una sensibilidad de 1.93 AW, considerando también dos tipos de filtros pasabajo: uno de tipo Gaussiano y otro de tipo Bessel, por sus características.

Figura 24.

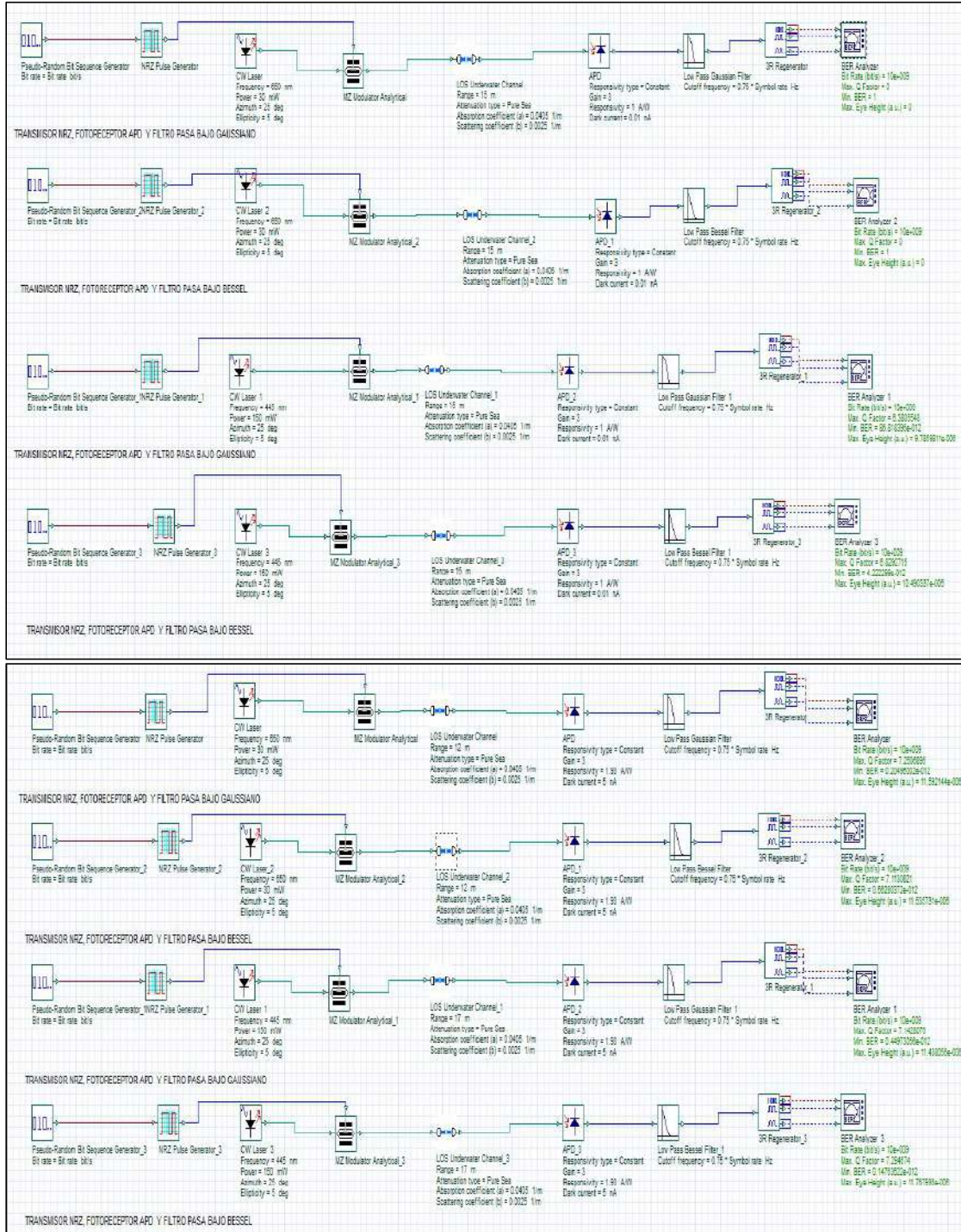
Modelo con el primer y segundo diseño del transmisor y el tercer y cuarto diseño del receptor en un canal de agua de costa.



Fuente: La autora

Figura 25.

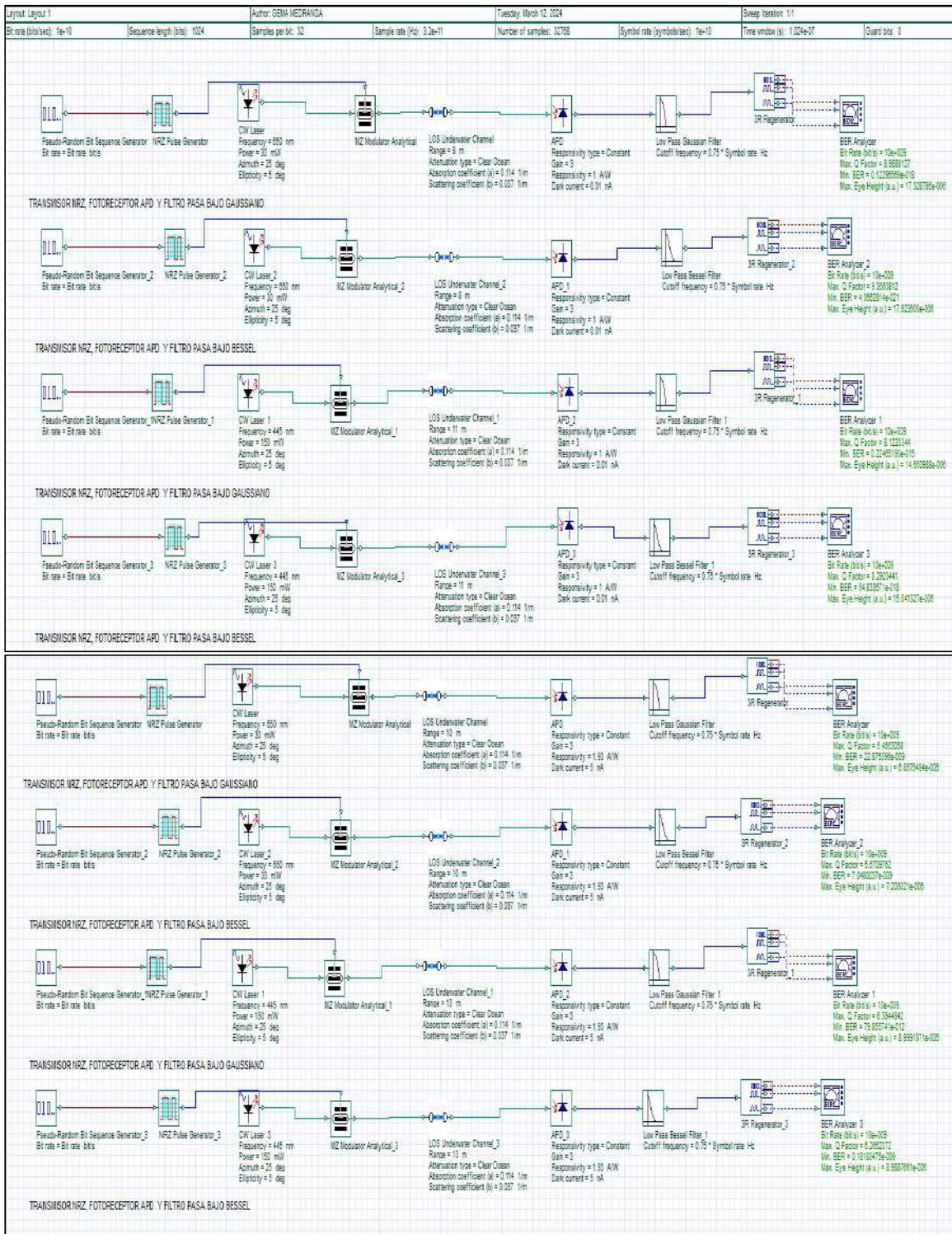
Esquema con el diseño del primer y segundo transmisor, tercer y cuarto diseño del receptor en un canal ideal agua pura de mar.



Fuente: La autora.

Figura 26.

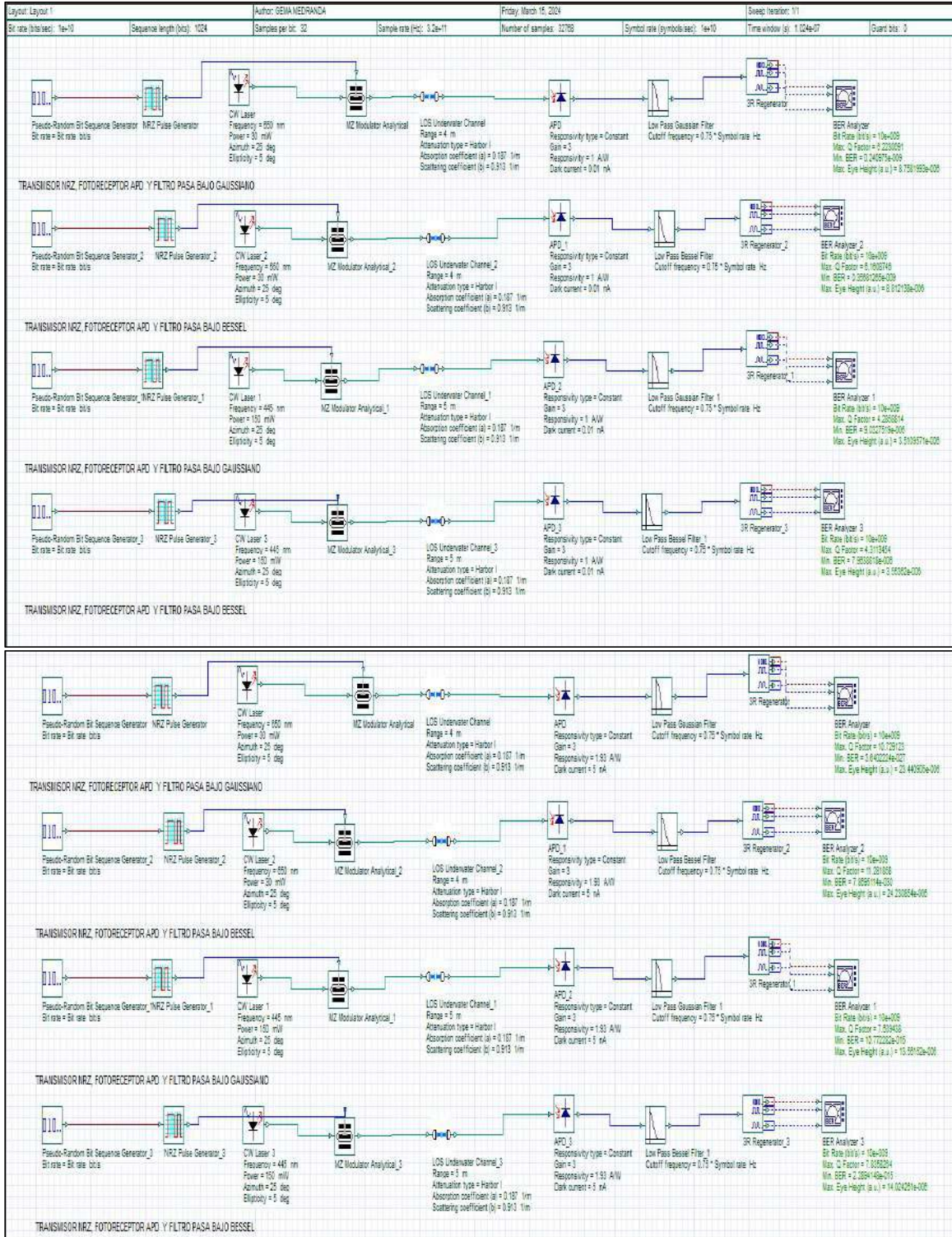
Esquema con el diseño del primer y segundo transmisor, tercer y cuarto diseño del receptor en un canal con agua clara de mar.



Fuente: La autora.

Figura 27.

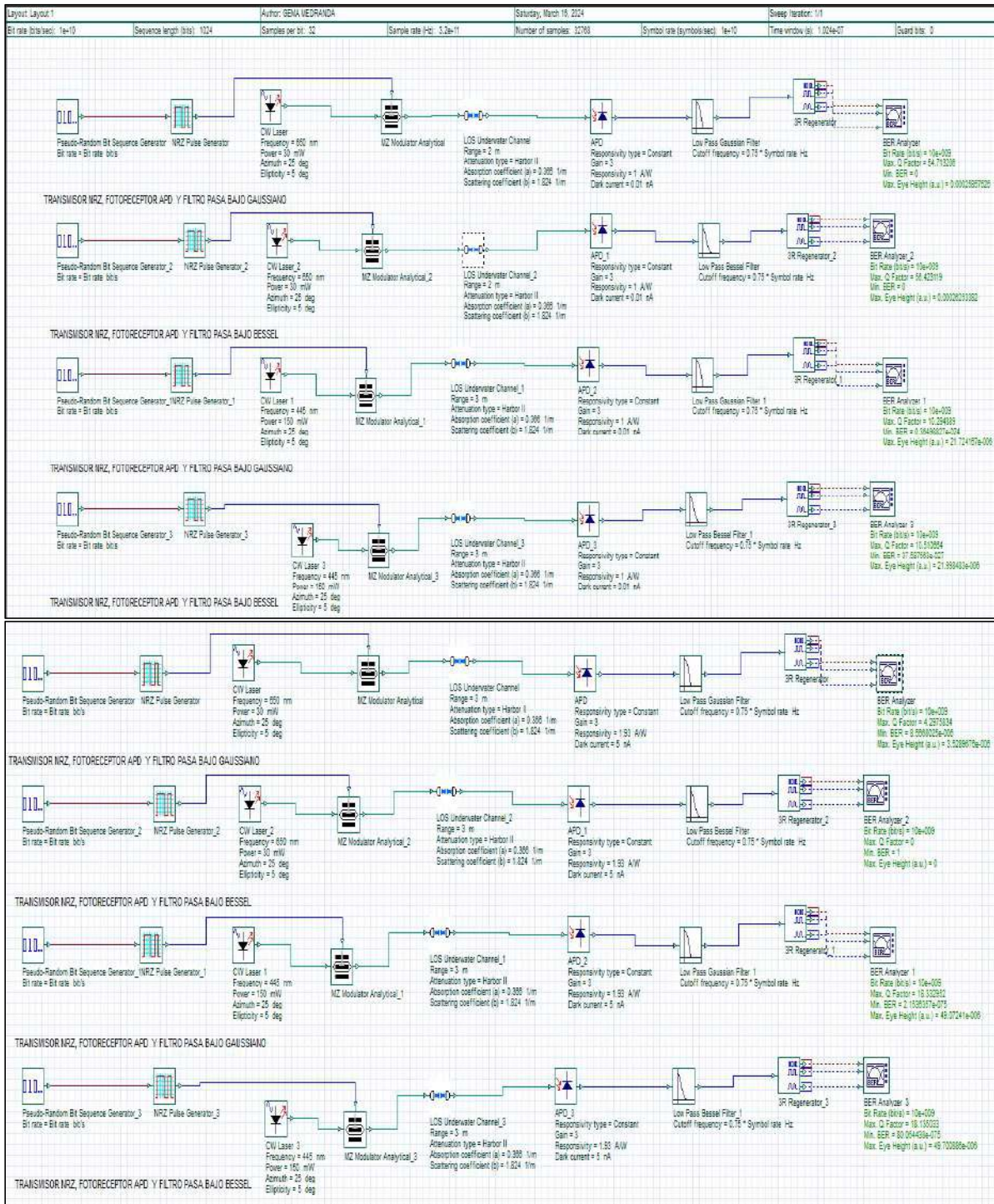
Esquema con el diseño del primer y segundo transmisor, tercer y cuarto diseño del receptor en un canal con agua de puerto



Fuente: La autora.

Figura 28.

Esquema con el diseño del primer y segundo transmisor, tercer y cuarto diseño de receptor en un canal con agua turbia de puerto.



Fuente: La autora.

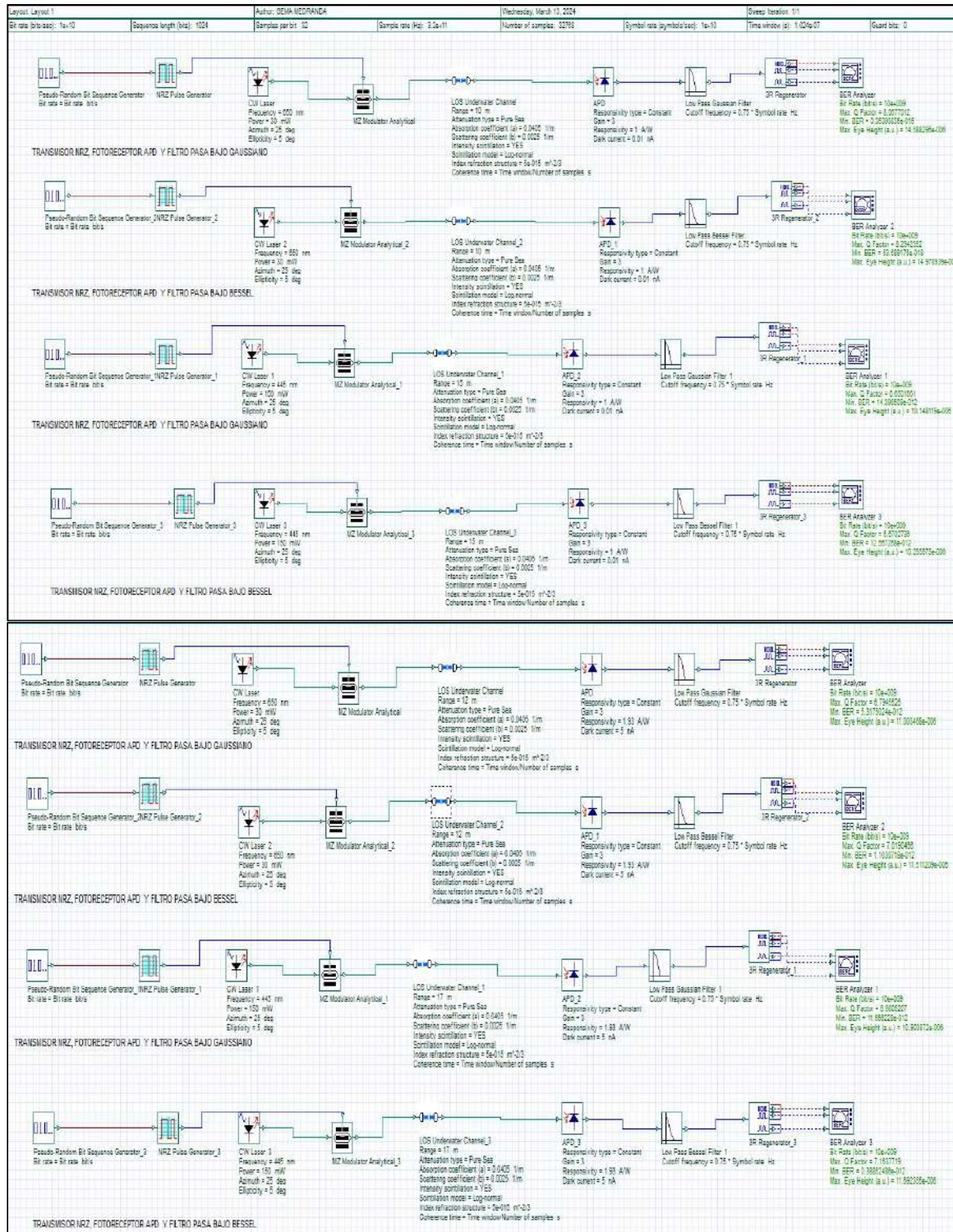
En la 5 figuras anteriores se aprecian todas las combinaciones para el esquema propuesto considerando los mejores escenario submarino en todos los tipos de agua oceánica (sin turbulencia ni centelleo y con pocas partículas en suspensión) transmitiendo 10Gbps, con los datos de la investigación en [14] y los propuestos en esta investigación(tabla 6), logrando con esta última una distancia de hasta 17 metros en agua pura de mar, en agua clara de mar hasta 13 metros, en agua de costa hasta 9 metros, agua de puerto hasta de 5 metros y agua turbia de puerto hasta 3 metros; en cada escenario se aprecia, como el cambio del filtro pasabajo mejora el alcance y la calidad de la comunicación del enlace.

Sin embargo, estas simulaciones se han realizado sin considerar las demás situaciones que existen en el canal submarino; como lo son el centelleo y la turbulencia, mientras tanto para lograr todos los escenarios; se mantendrán los valores predeterminados por el canal LOS Underwater Channel de Optisystem(pocas partículas en suspensión) y luego se evaluará aumentando la cantidad de partículas presentes en el agua, para simular otros escenarios de absorción y dispersión del canal submarino con línea de visión directa y comprobar alcance y calidad del enlace.

Por ello en las siguientes 10 figuras se evaluará el comportamiento del enlace sometido a centelleo y turbulencia tanto leve como severa, con los valores predeterminado por el componente LOS Underwater Channel de Optisystem.

Figura 29.

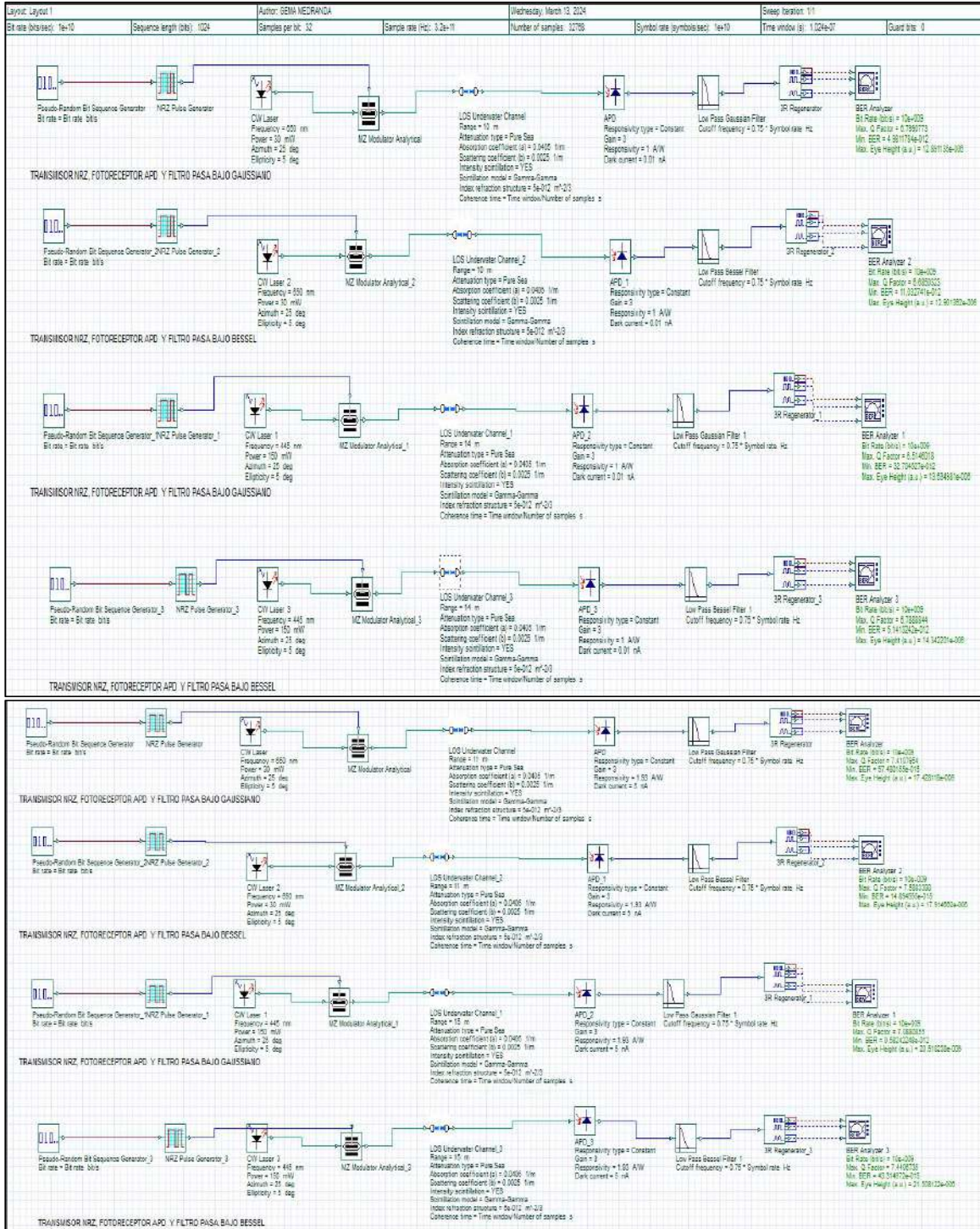
Esquema con el diseño del primer y segundo transmisor, tercer y cuarto diseño del receptor en un canal de mar con pocas partículas en suspensión, centelleo y turbulencia leve.



Fuente: La autora

Figura 30.

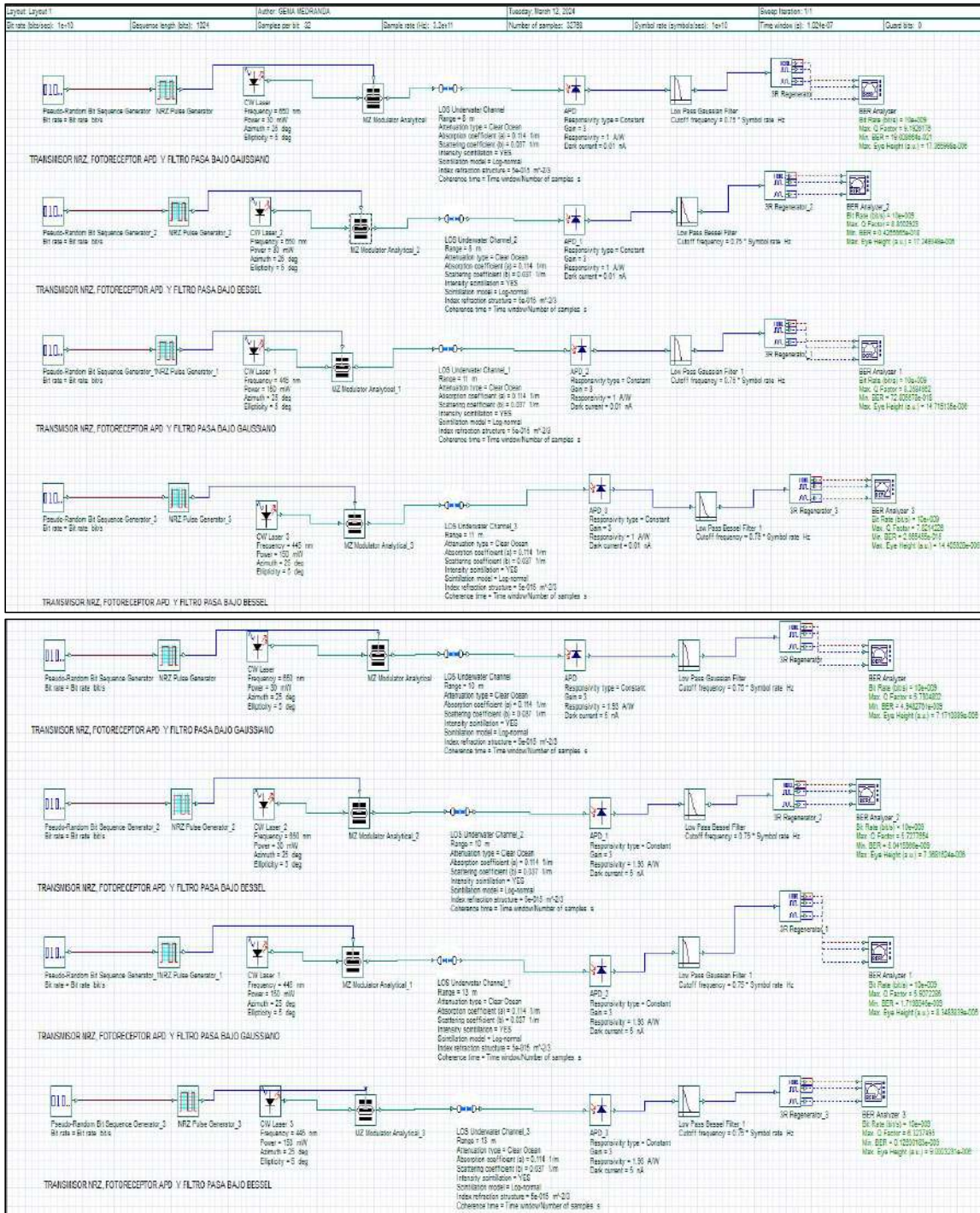
Esquema con el diseño del primer y segundo transmisor, tercer y cuarto diseño del receptor en un canal con agua pura de mar con pocas partículas en suspensión, centelleo y turbulencia severo.



Fuente: La autora

Figura 31.

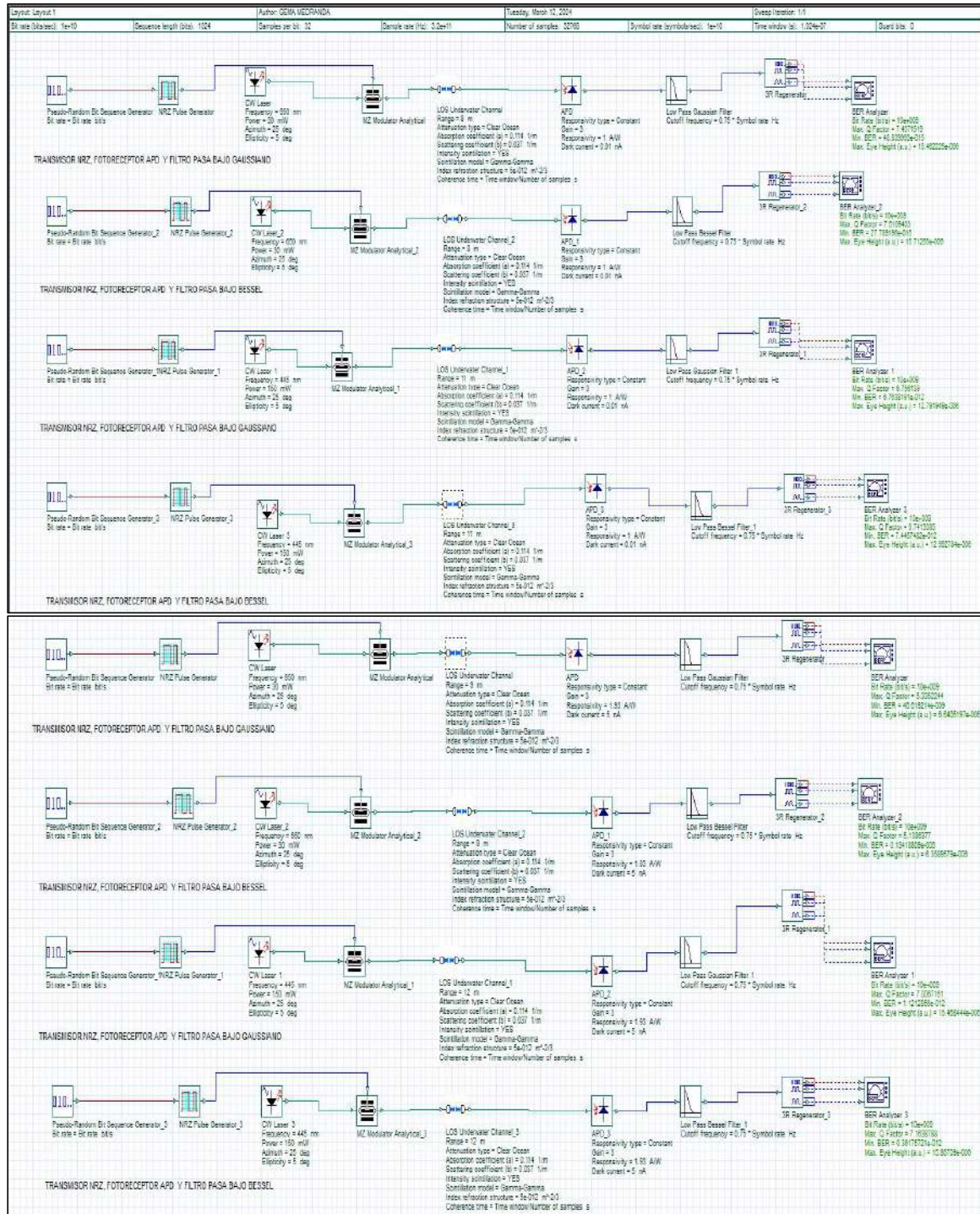
Esquema con el diseño del primer y segundo transmisor, tercer y cuarto diseño del receptor en un canal con agua clara de mar con pocas partículas en suspensión, cunelleo y turbulencia leve.



Fuente: La autora.

Figura 32.

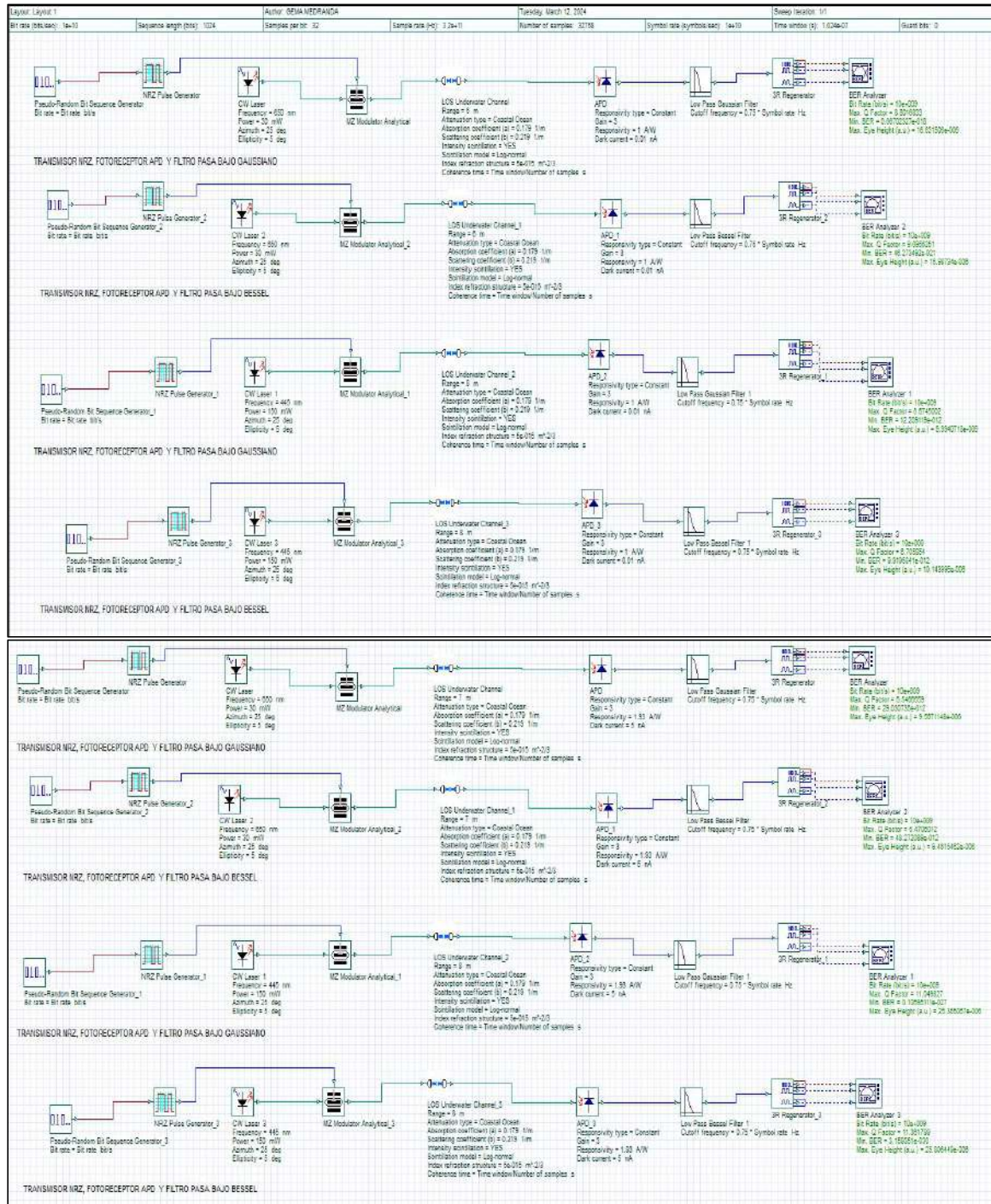
Esquema con el diseño del primer y segundo transmisor, tercer y cuarto diseño del receptor NRZ en un canal con agua clara de mar con pocas partículas en suspensión, centelleo y turbulencia severo.



Fuente: La autora.

Figura 33.

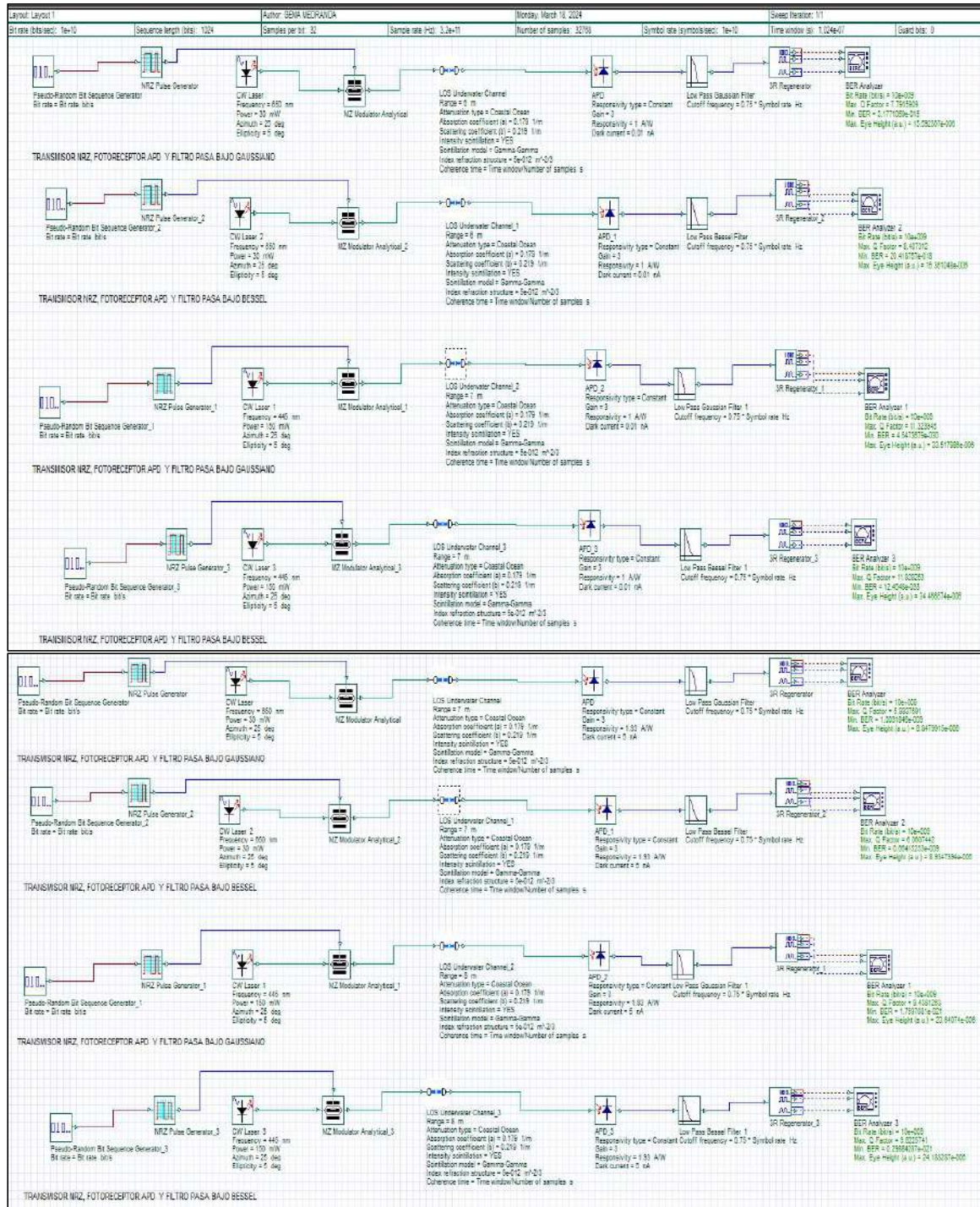
Esquema con el diseño del primer y segundo transmisor, tercer y cuarto diseño del receptor en un canal con agua de costa de mar con pocas partículas en suspensión, centelleo y turbulencia leve.



Fuente: La autora.

Figura 34.

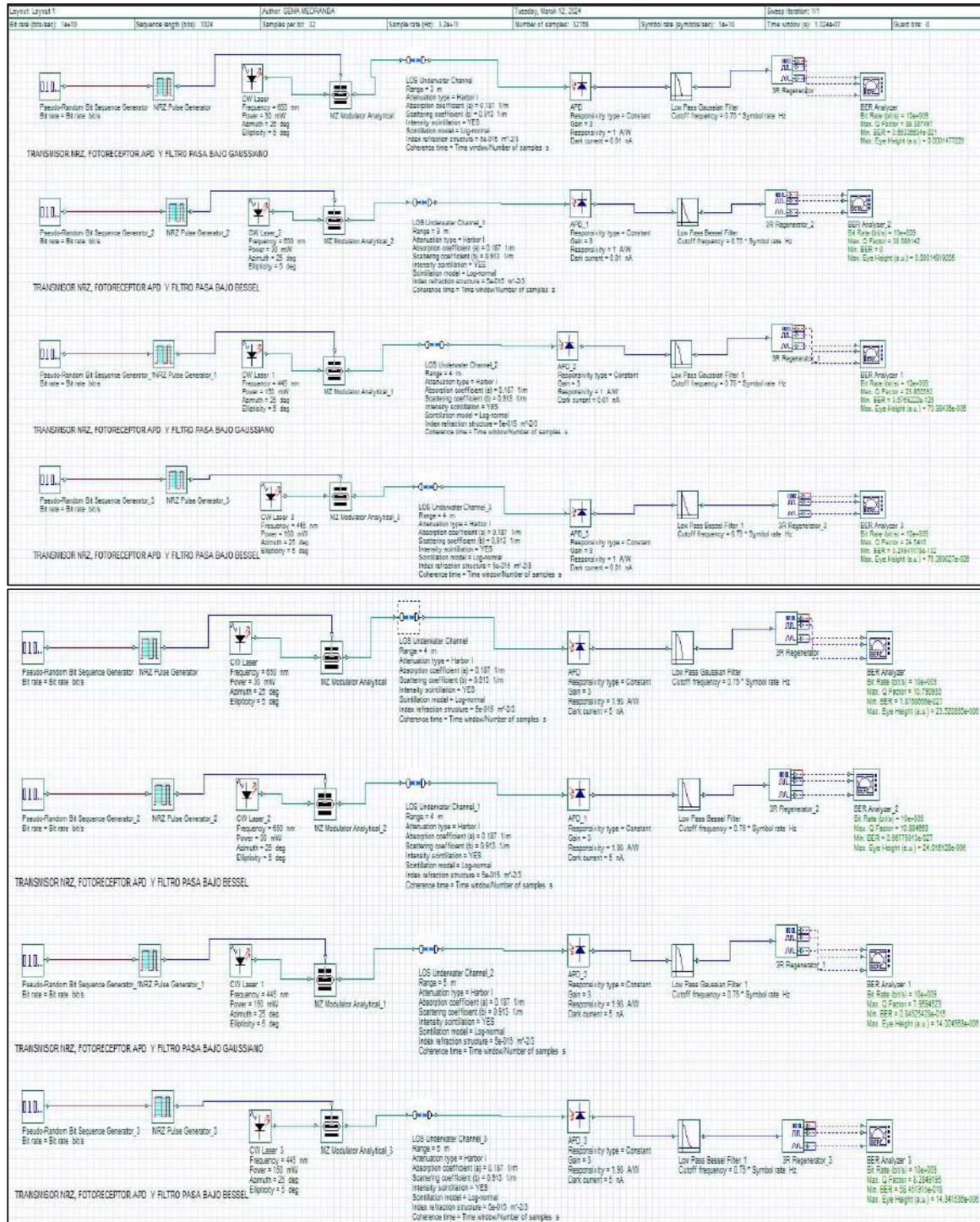
Esquema con el diseño del primer y segundo transmisor, tercer y cuarto diseño de receptor en un canal con agua de costa de mar con pocas partículas en suspensión, centelleo y turbulencia severa.



Fuente: La autora.

Figura 35.

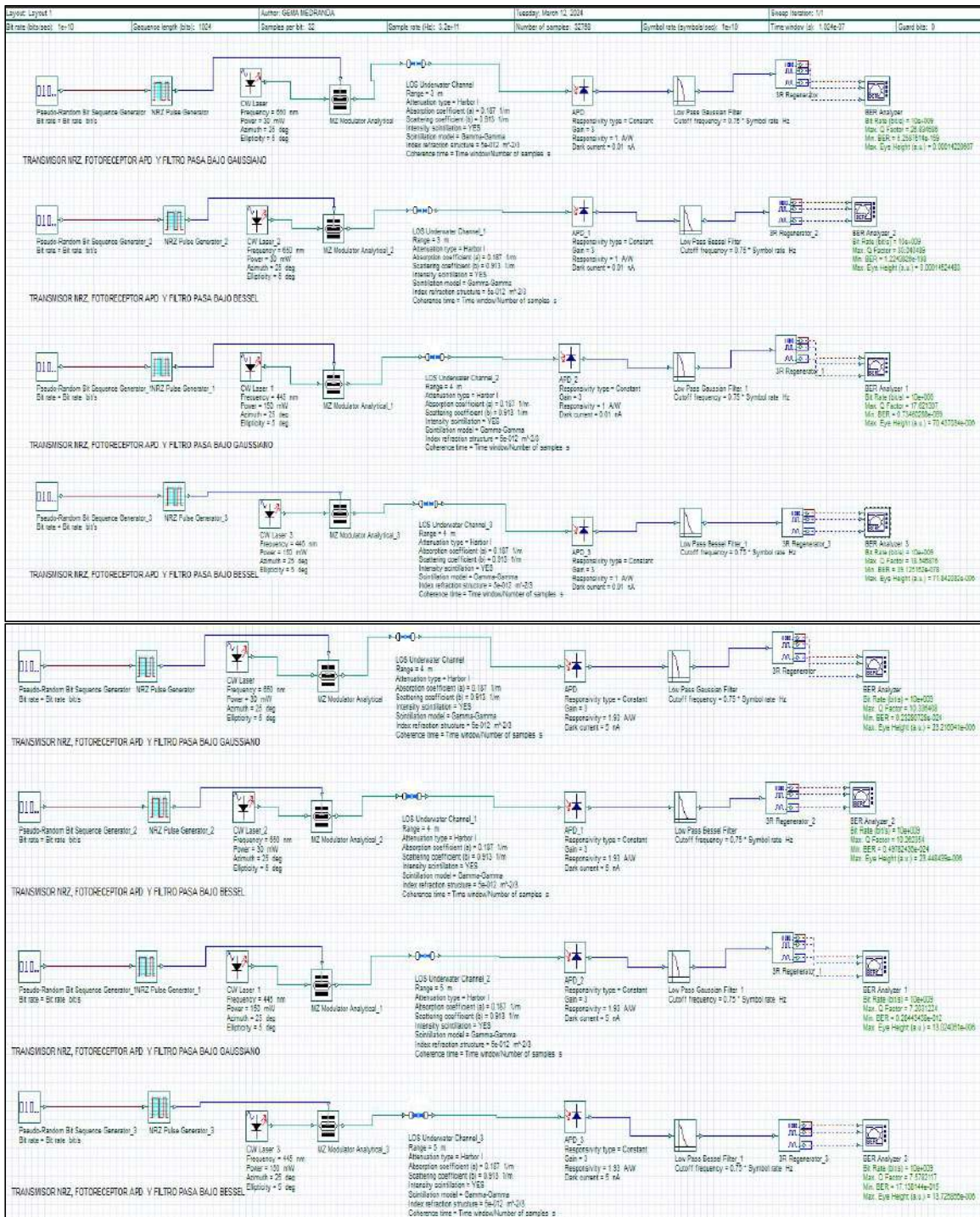
Esquema con el diseño del primer y segundo transmisor, tercer y cuarto diseño del receptor en un canal con agua de puerto con pocas partículas en suspensión, centelleo y turbulencia leve.



Fuente: La autora.

Figura 36.

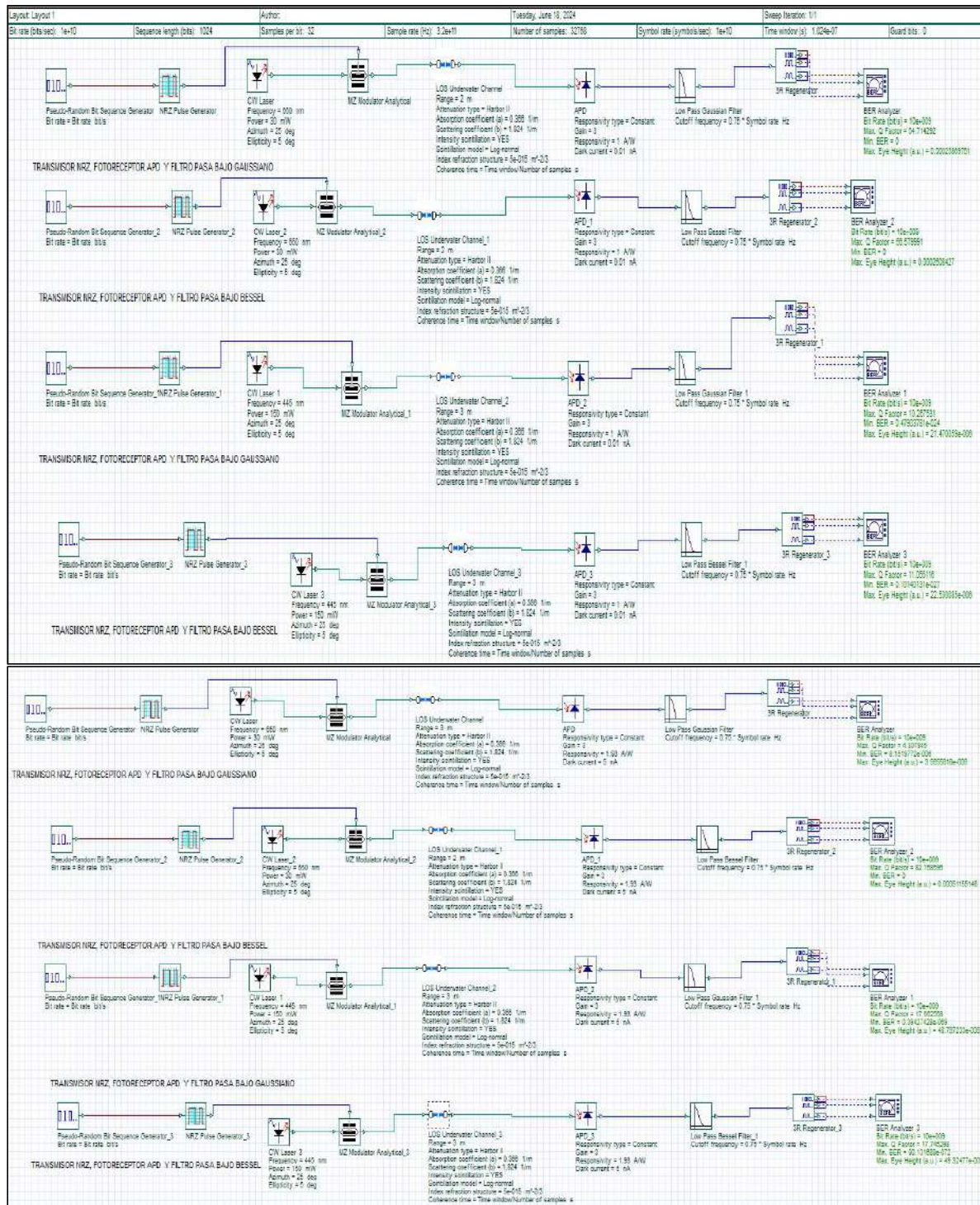
Esquema con el diseño del primer y segundo transmisor, tercer y cuarto diseño del receptor en un canal con agua de puerto con pocas partículas en suspensión, centelleo y turbulencia severo.



Fuente: La autora.

Figura 37.

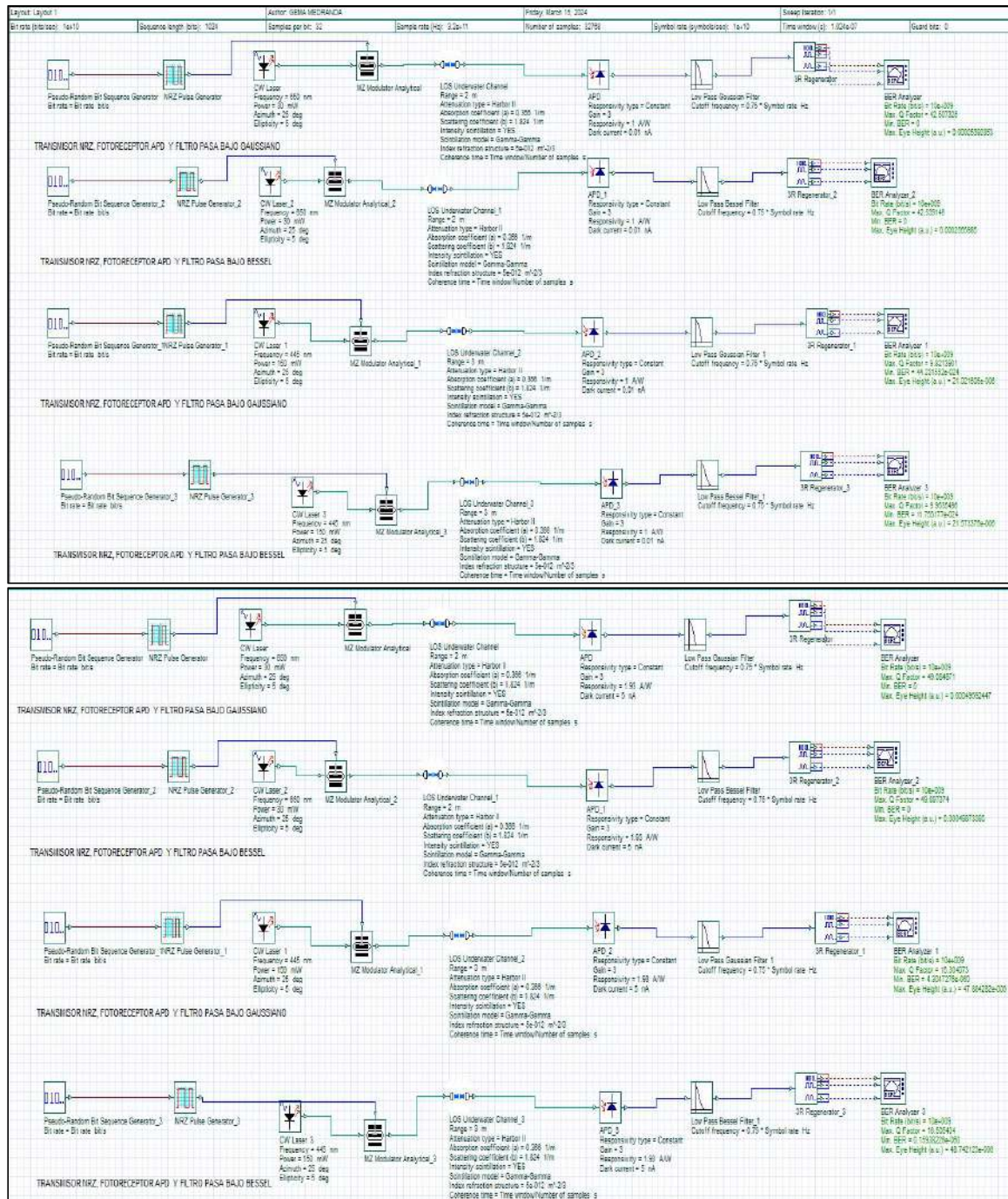
Esquema con el diseño del primer y segundo transmisor, tercer y cuarto diseño del receptor en un canal con agua turbia de puerto con pocas partículas en suspensión, centelleo y turbulencia leve.



Fuente: La autora.

Figura 38.

Esquema con el diseño del primer y segundo transmisor, tercer y cuarto diseño del receptor en un canal agua con agua turbia de puerto con pocas partículas en suspensión, centelleo y turbulencia severo.

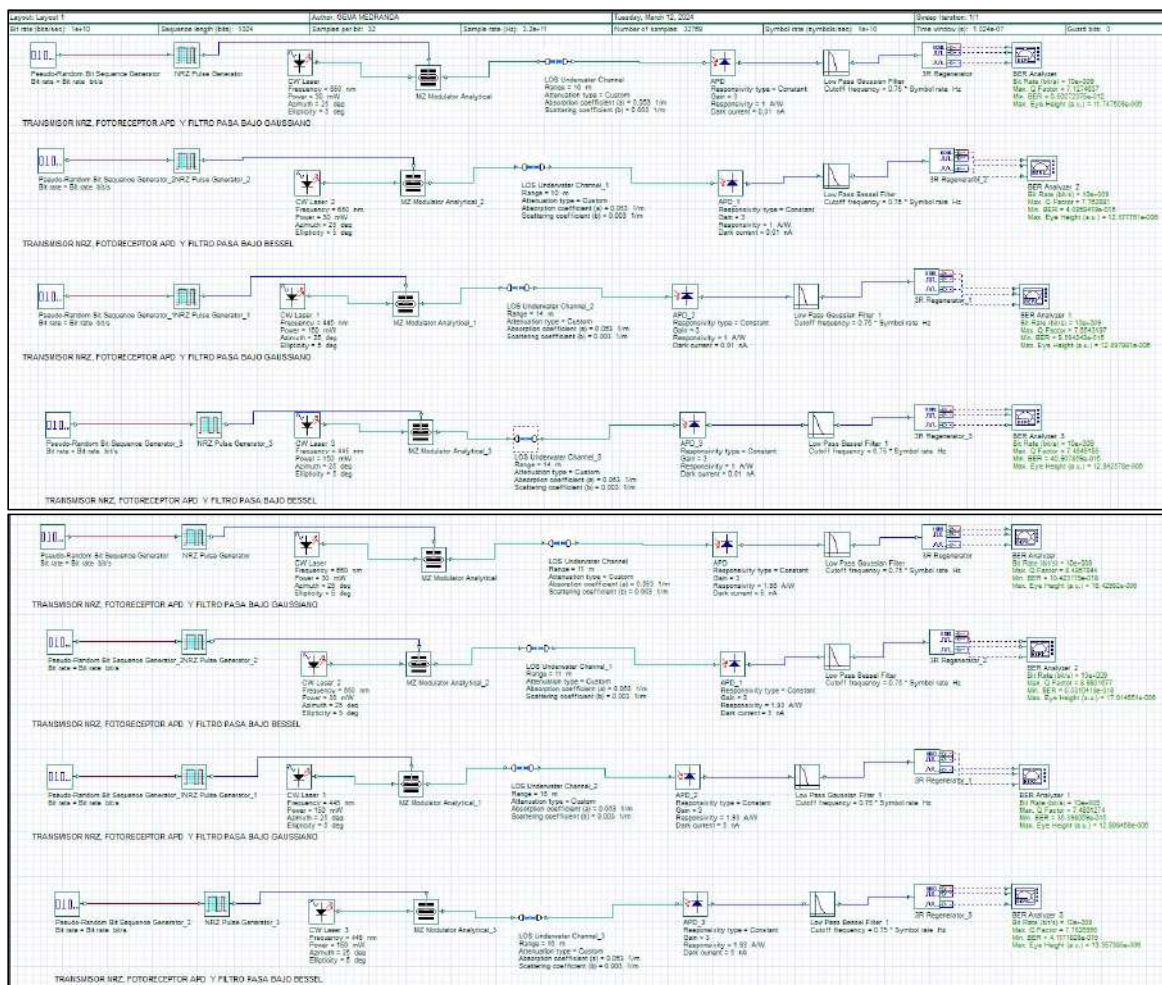


Fuente: La autora.

Las próximas 4 figuras serán simuladas en los siguientes tipos de agua de mar: agua pura de mar, agua clara de mar, agua de costa y agua turbia de puerto; considerando una mayor cantidad de partículas en suspensión, sin centelleo ni turbulencias; para lo cual se toman los datos de la investigación en [20], dejando por fuera el tipo de agua de puerto; ya que dicha investigación no la considera como tal y pasa directamente al agua turbia de puerto, en consecuencia al no tener un respaldo científico actualizado no se puede considerar para el siguiente bloque de simulación.

Figura 39.

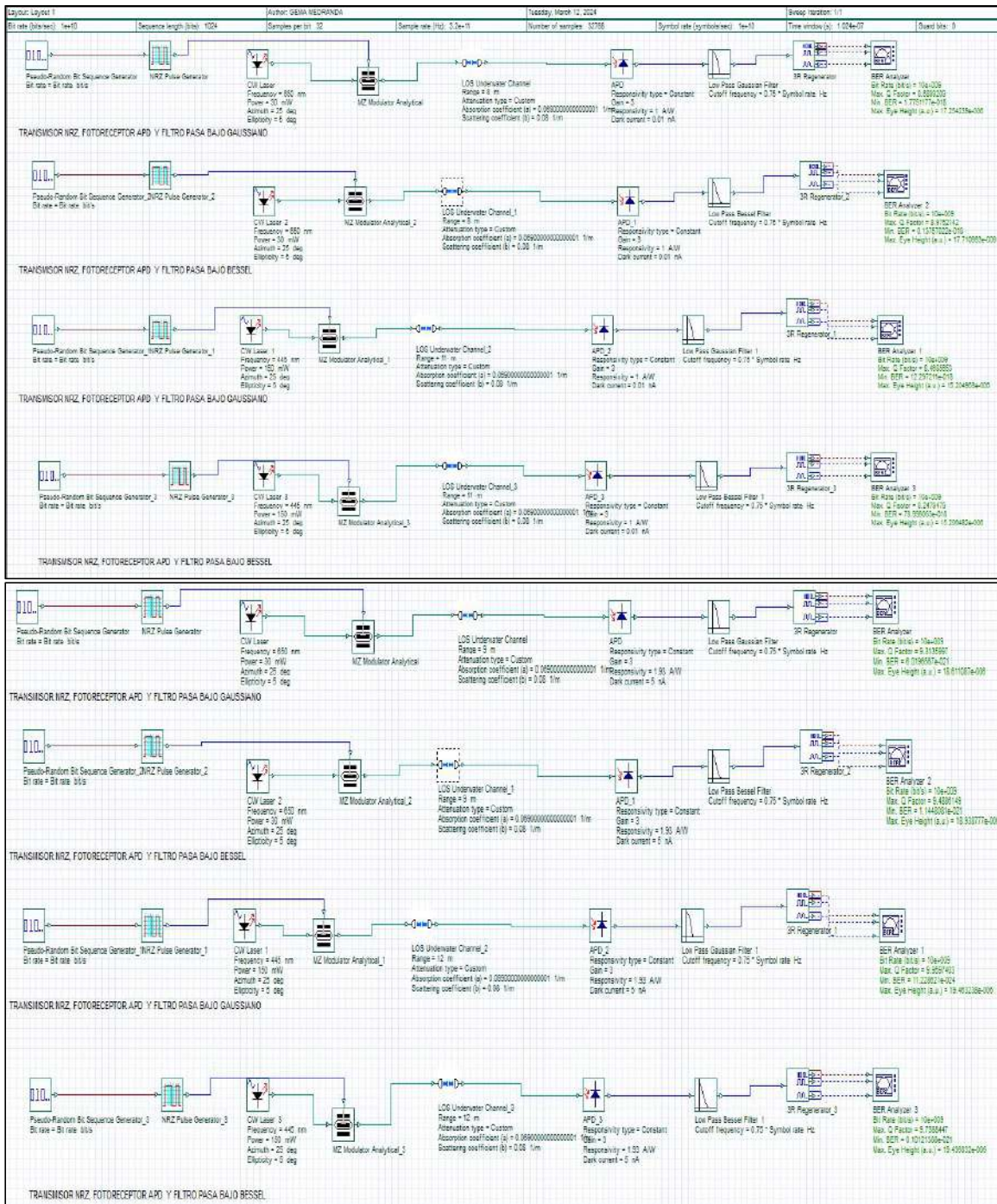
Esquema con el diseño del primer y segundo transmisor, tercer y cuarto diseño del receptor en un canal con agua pura de mar con mayor partículas en suspensión [20], sin centelleo ni turbulencia



Fuente: La autora.

Figura 40.

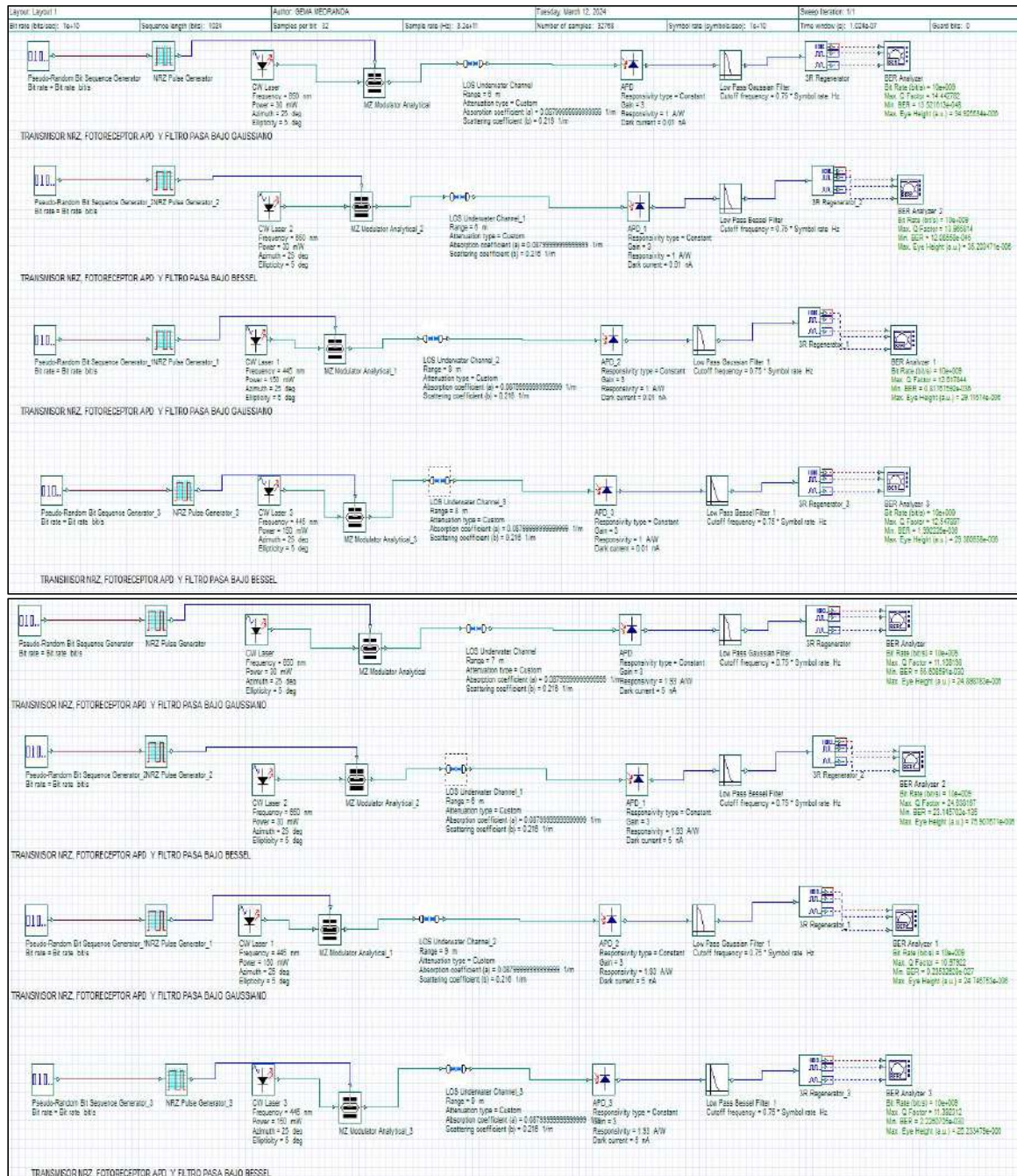
Esquema con el diseño del primer y segundo transmisor, tercer y cuarto diseño del receptor en un canal con agua clara de mar con mayor partículas en suspensión [20], sin centelleo ni turbulencia



Fuente: La autora.

Figura 41.

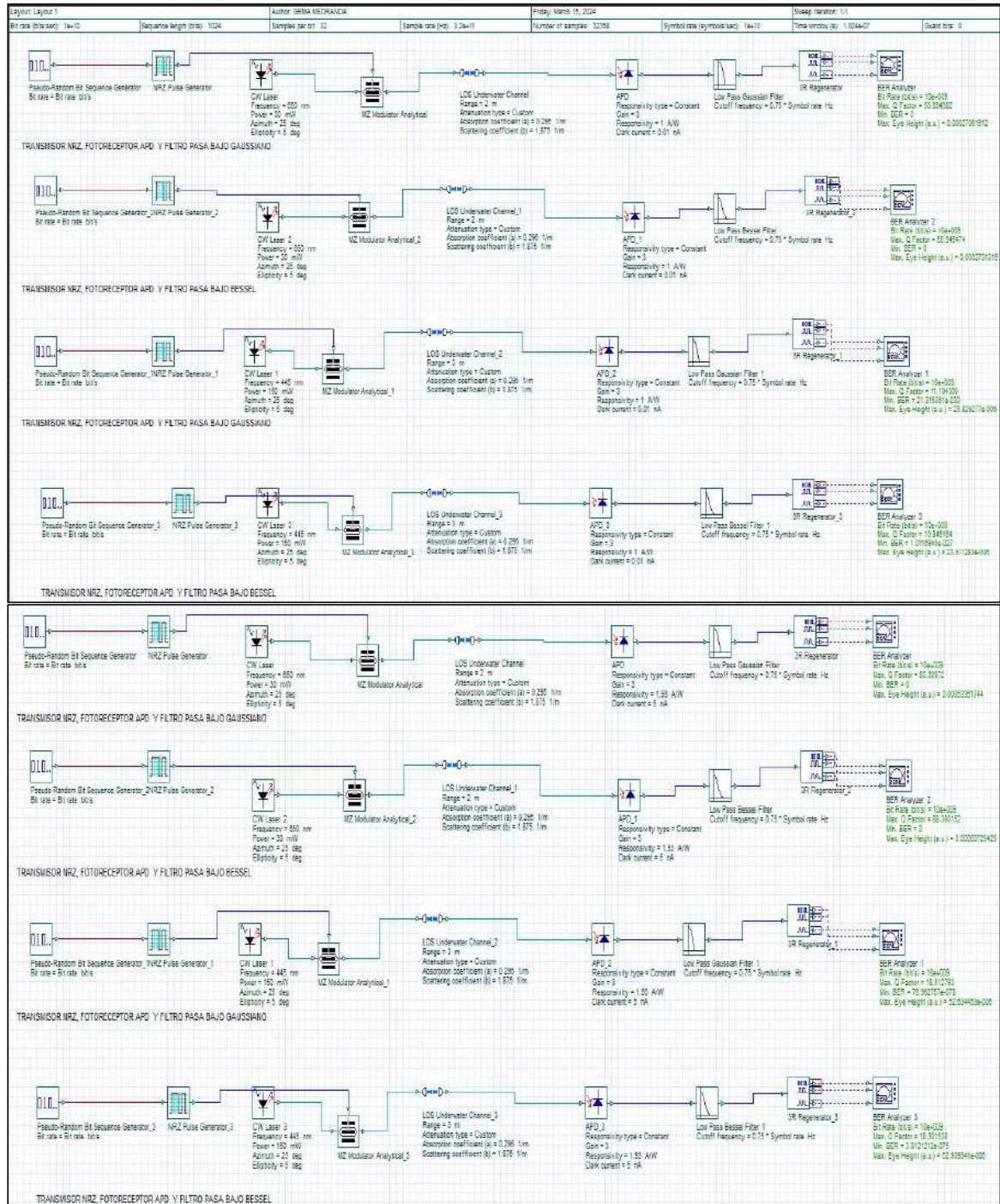
Esquema con el diseño del primer y segundo transmisor, tercer y cuarto diseño del receptor en un canal con agua de costa con mayor partículas en suspensión [20], sin centelleo ni turbulencia.



Fuente: La autora.

Figura 42.

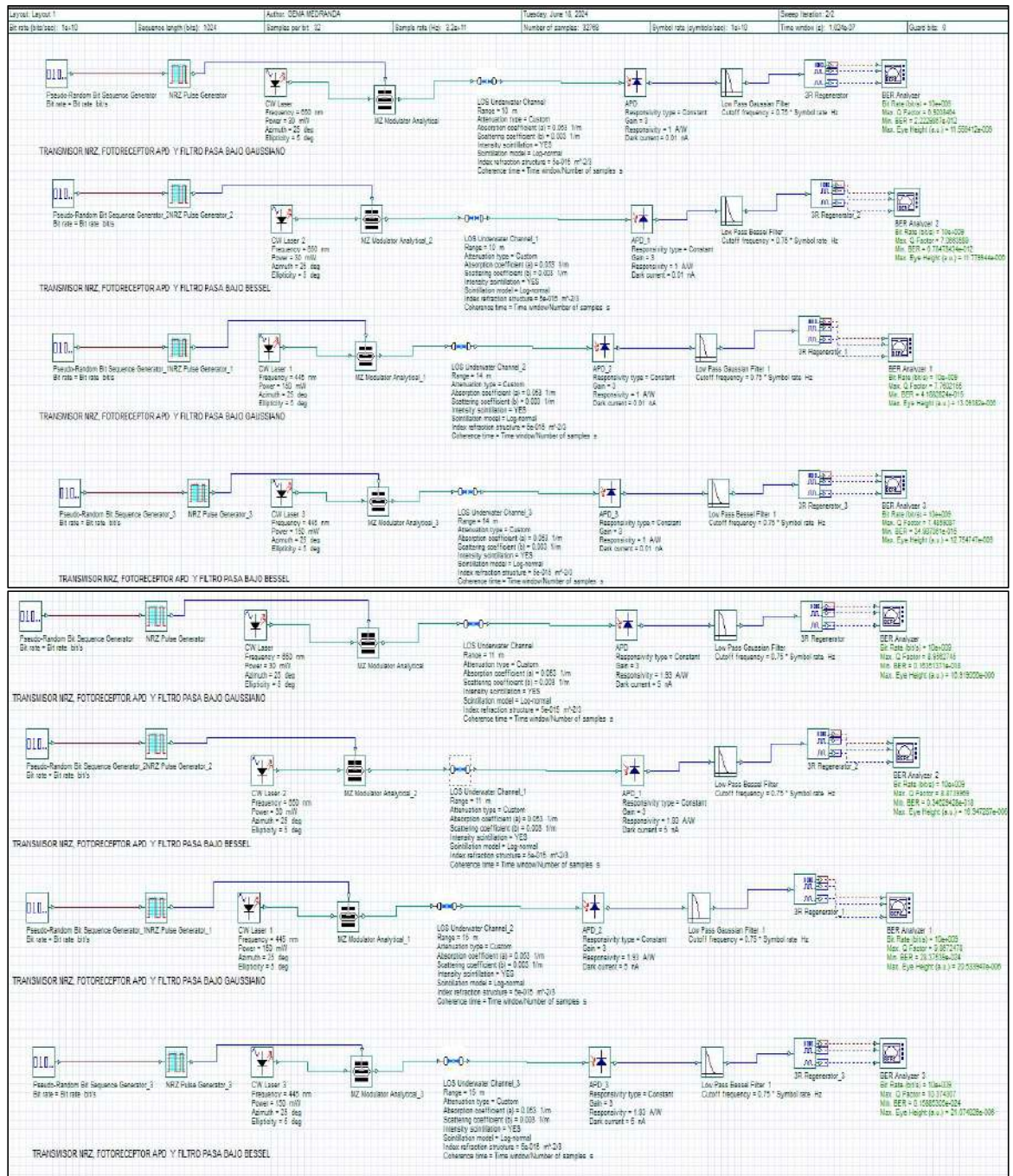
Esquema con el diseño del primer y segundo transmisor, tercer y cuarto diseño de receptor en un canal con agua turbia de puerto con mayor partículas en suspensión [20], sin centelleo ni turbulencia.



Fuente: La autora.

Figura 43.

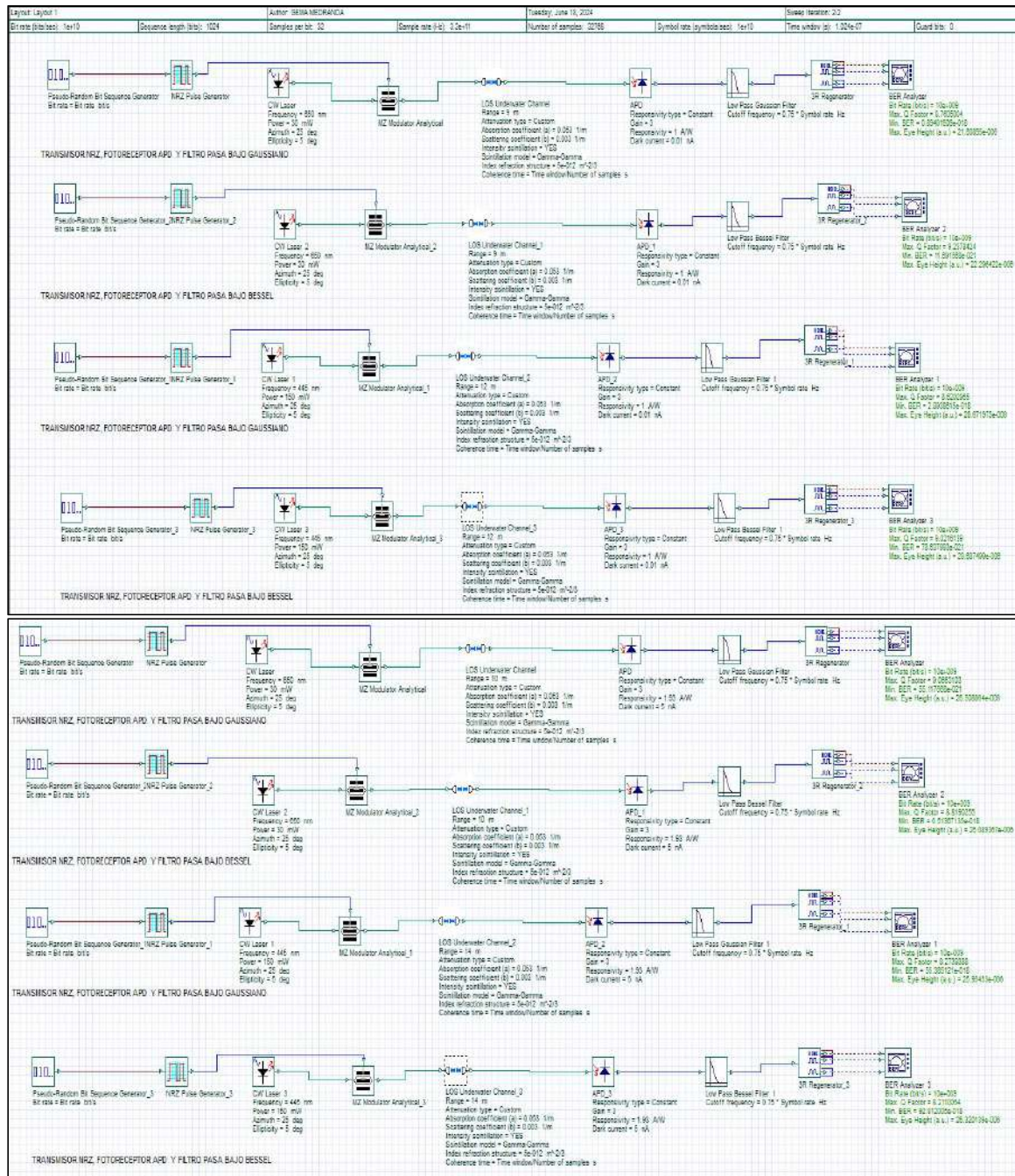
Esquema con el diseño del primer y segundo transmisor, tercer y cuarto diseño del receptor en un canal con agua pura de mar con mayor partículas en suspensión [20], centelleo y turbulencia leve.



Fuente: La autora.

Figura 44.

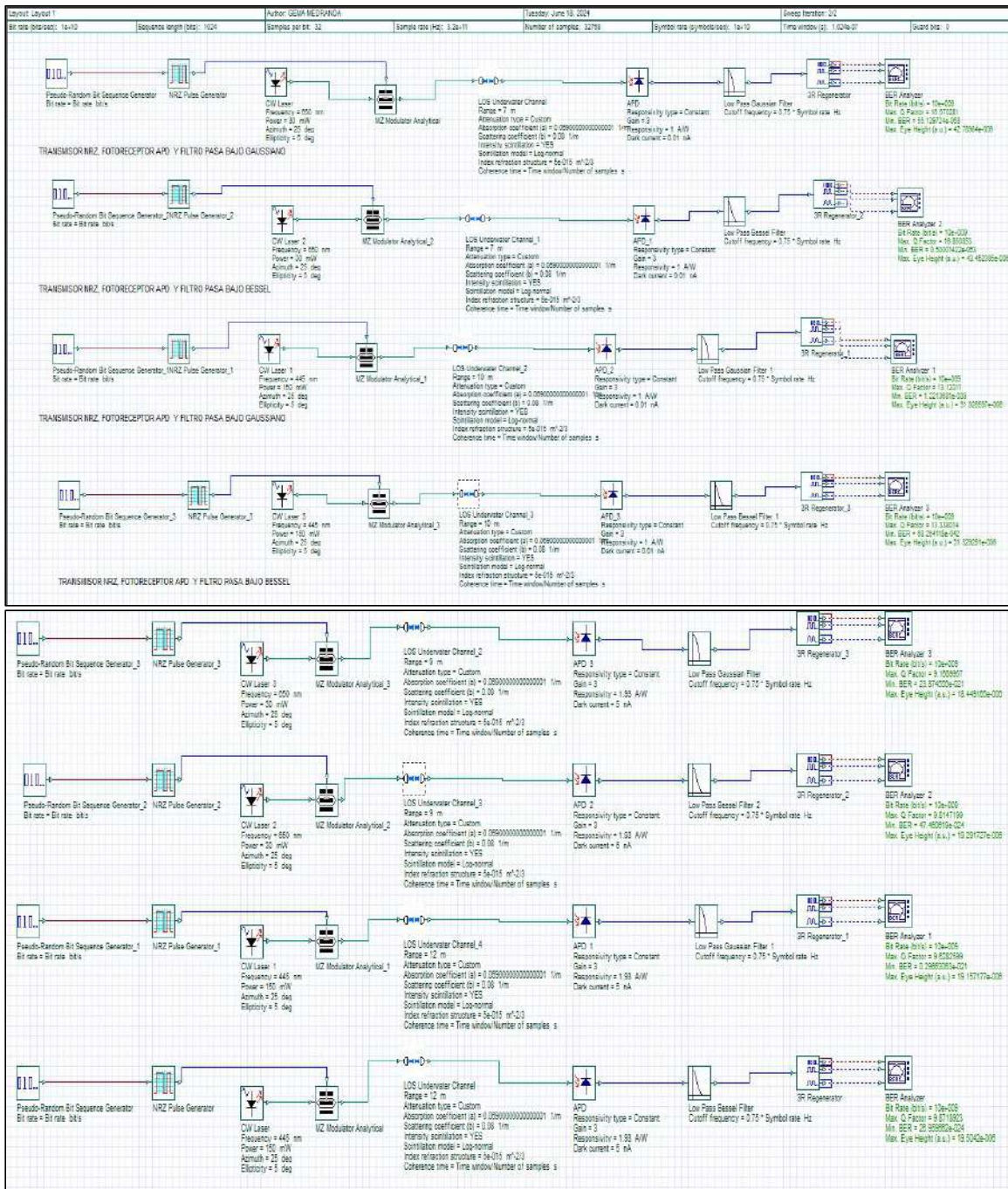
Esquema con el diseño del primer y segundo transmisor, tercer y cuarto diseño del receptor en un canal con agua pura de mar con mayor partículas en suspensión [20], centelleo y turbulencia severo.



Fuente: La autora.

Figura 45.

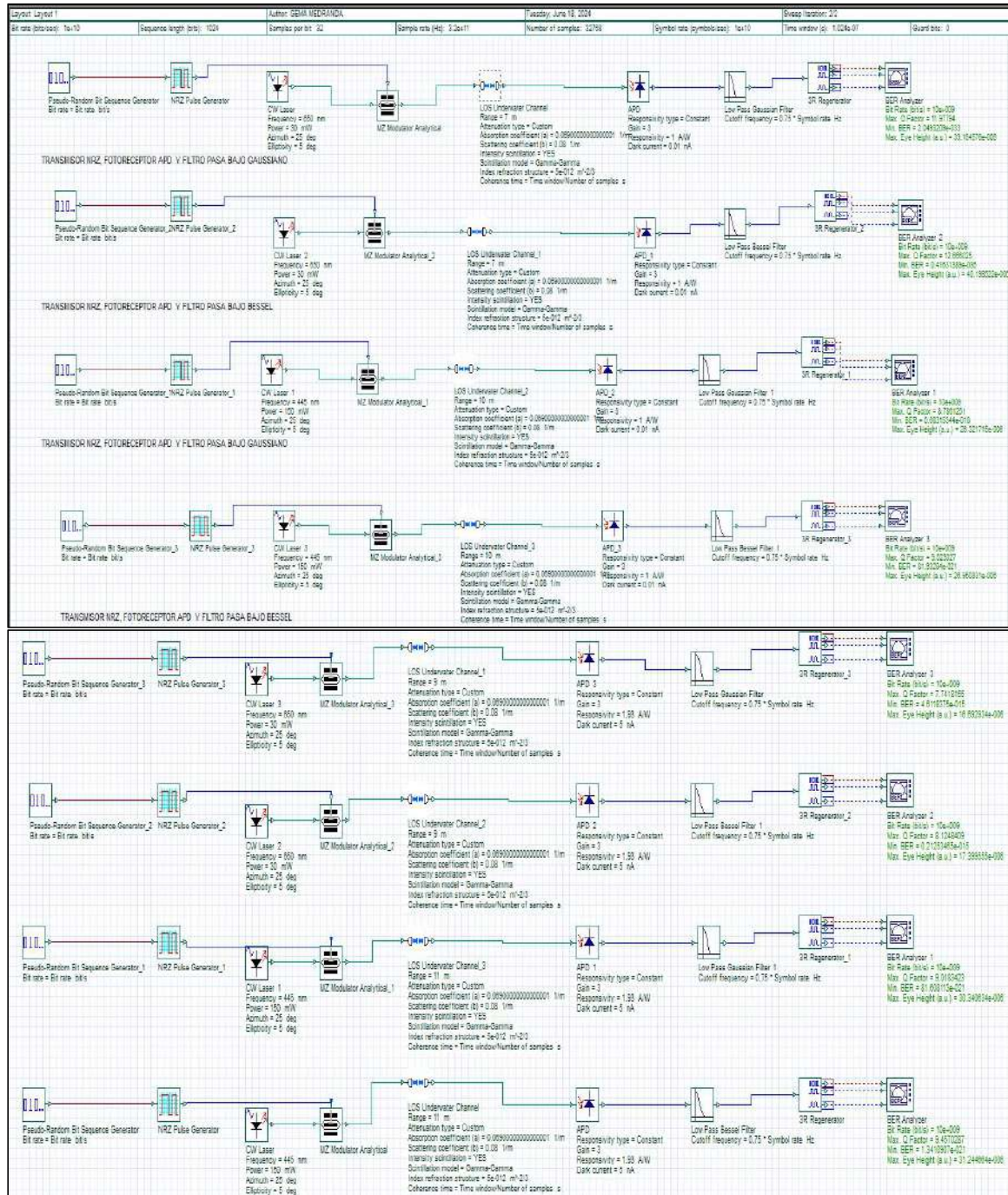
Esquema con el diseño del primer y segundo transmisor, tercer y cuarto diseño del receptor en un canal con agua clara de mar con mayor partículas en suspensión [20], centelleo y turbulencia leve.



Fuente: La autora.

Figura 46.

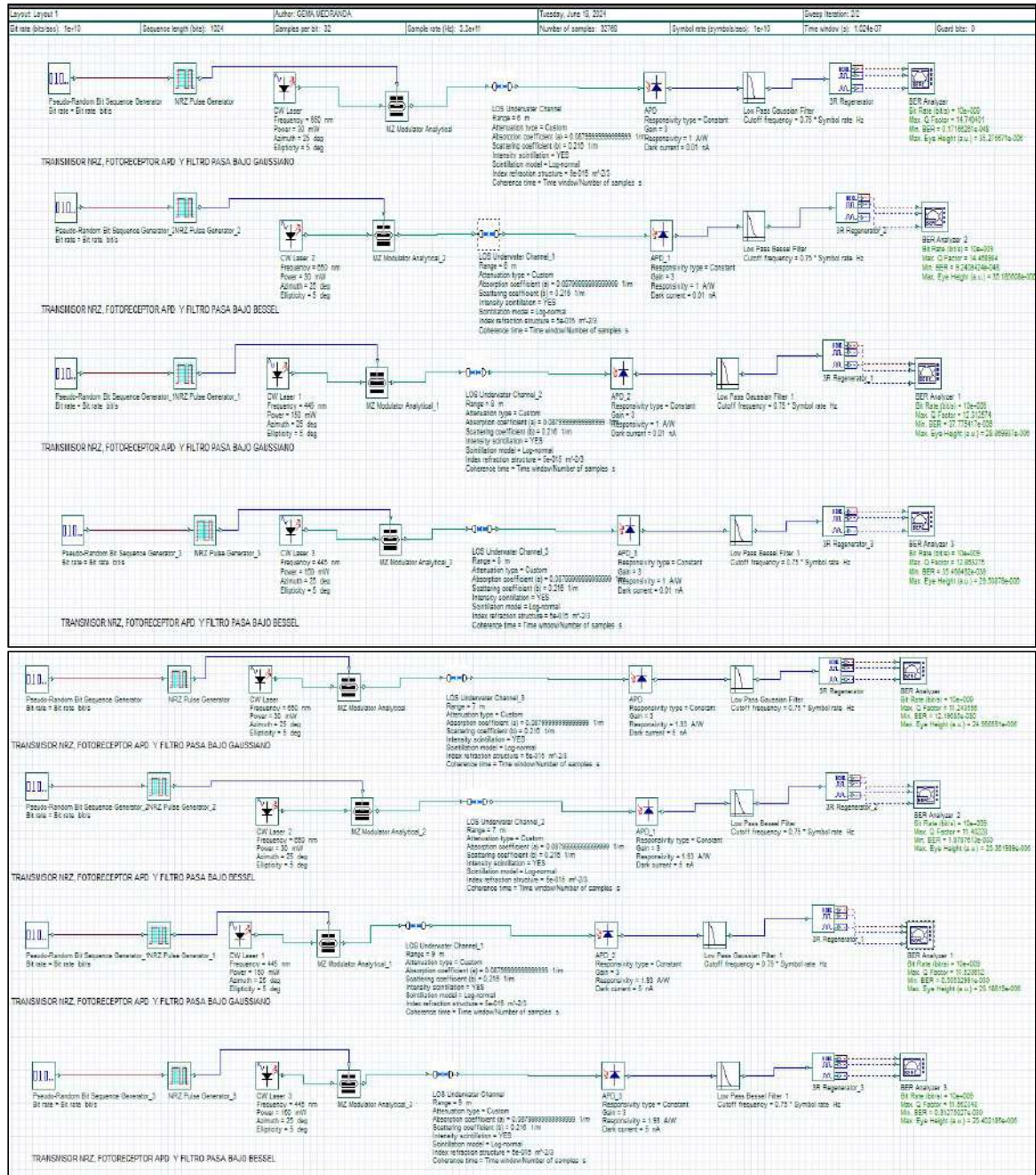
Esquema con el diseño del primer y segundo transmisor, tercer y cuarto diseño del receptor en un canal con agua clara de mar con mayor partículas en suspensión [20], centelleo y turbulencia severo.



Fuente: La autora.

Figura 47.

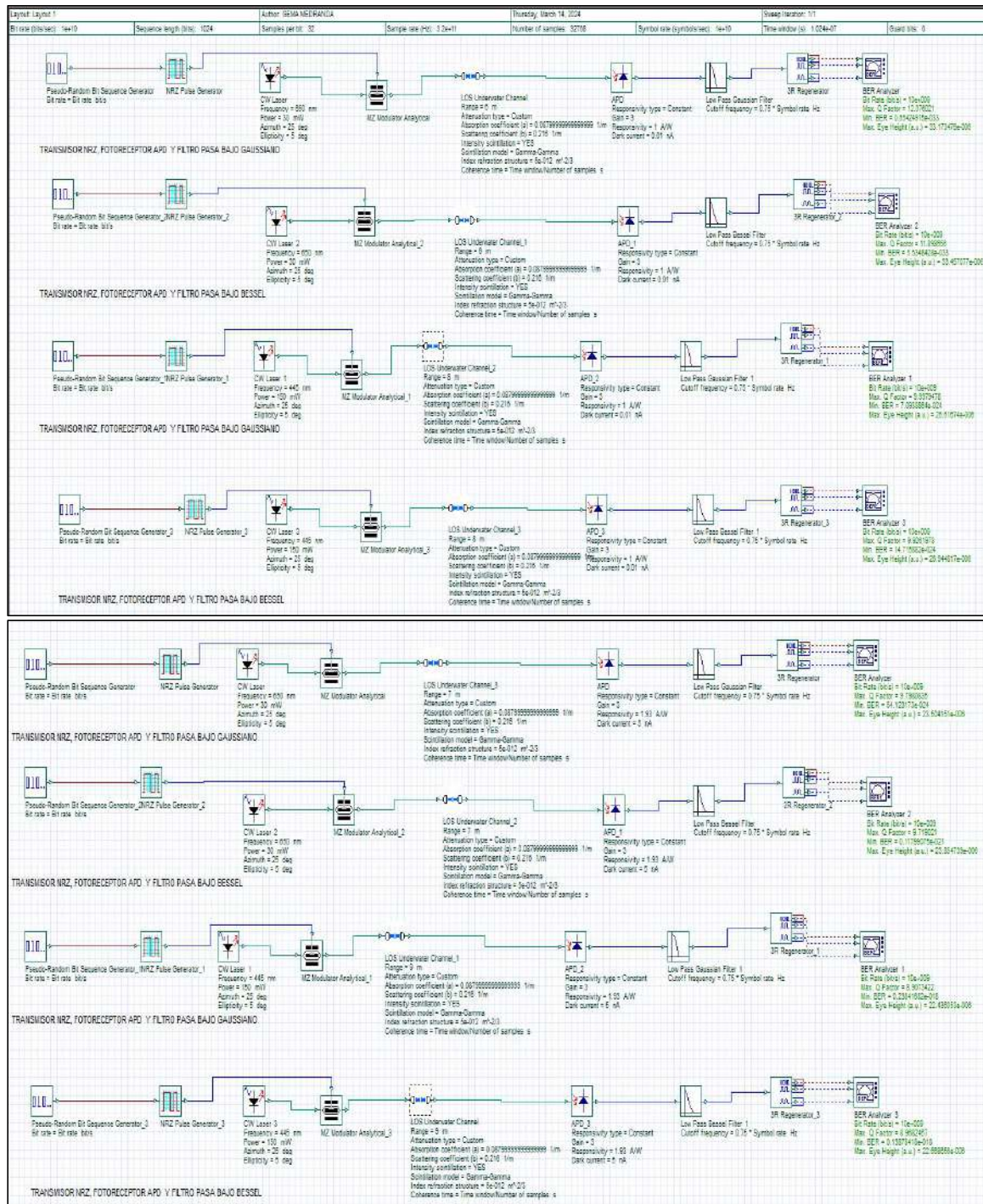
Esquema con el diseño del primer y segundo transmisor, tercer y cuarto diseño del receptor en un canal con agua de costa de costa con mayor partículas en suspensión [20], centelleo y turbulencia leve.



Fuente: La autora.

Figura 48.

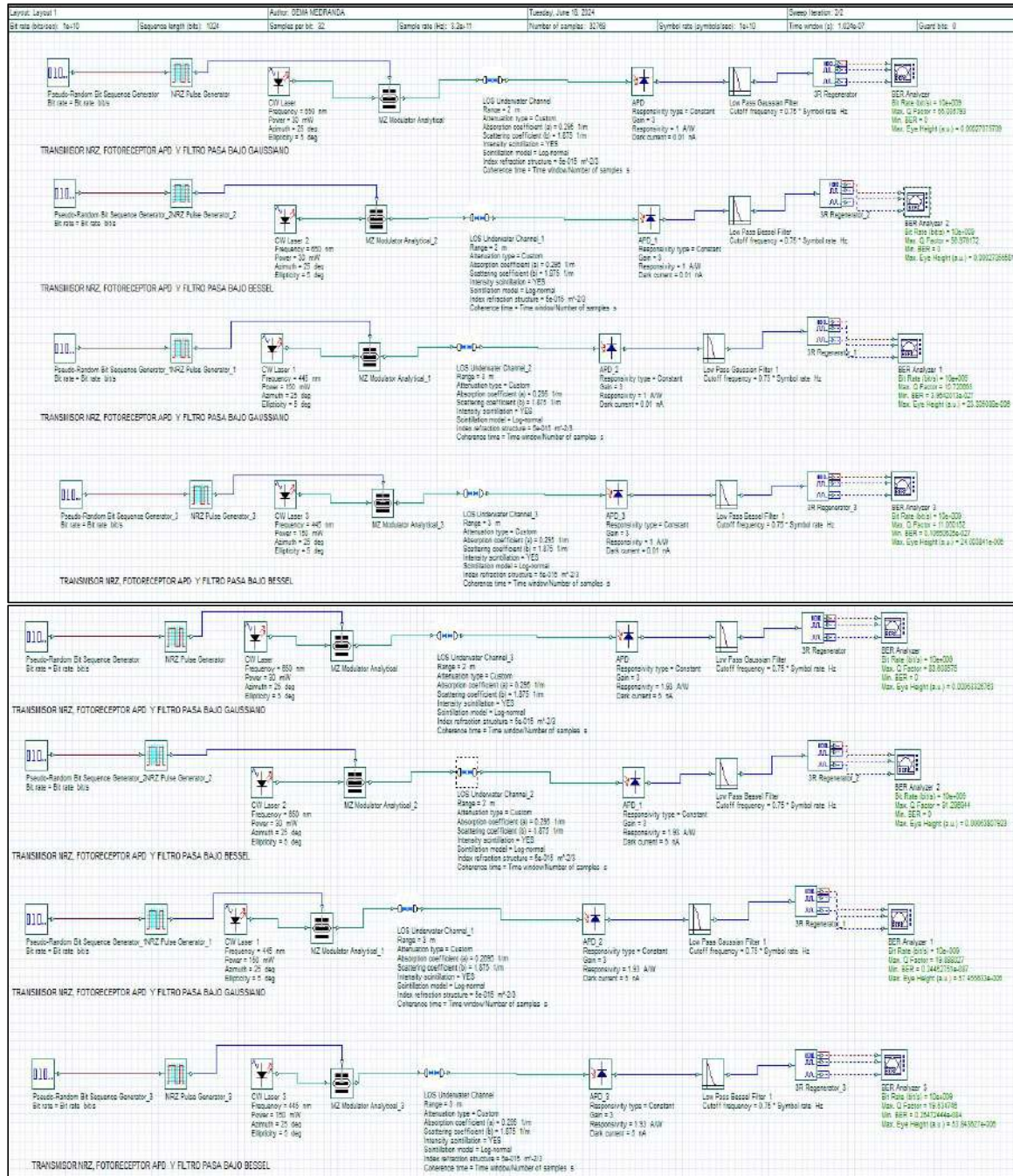
Esquema con el diseño del primer y segundo transmisor, tercer y cuarto diseño del receptor en un canal con agua de costa con mayor partículas en suspensión [20], centelleo y turbulencia severo.



Fuente: La autora.

Figura 49.

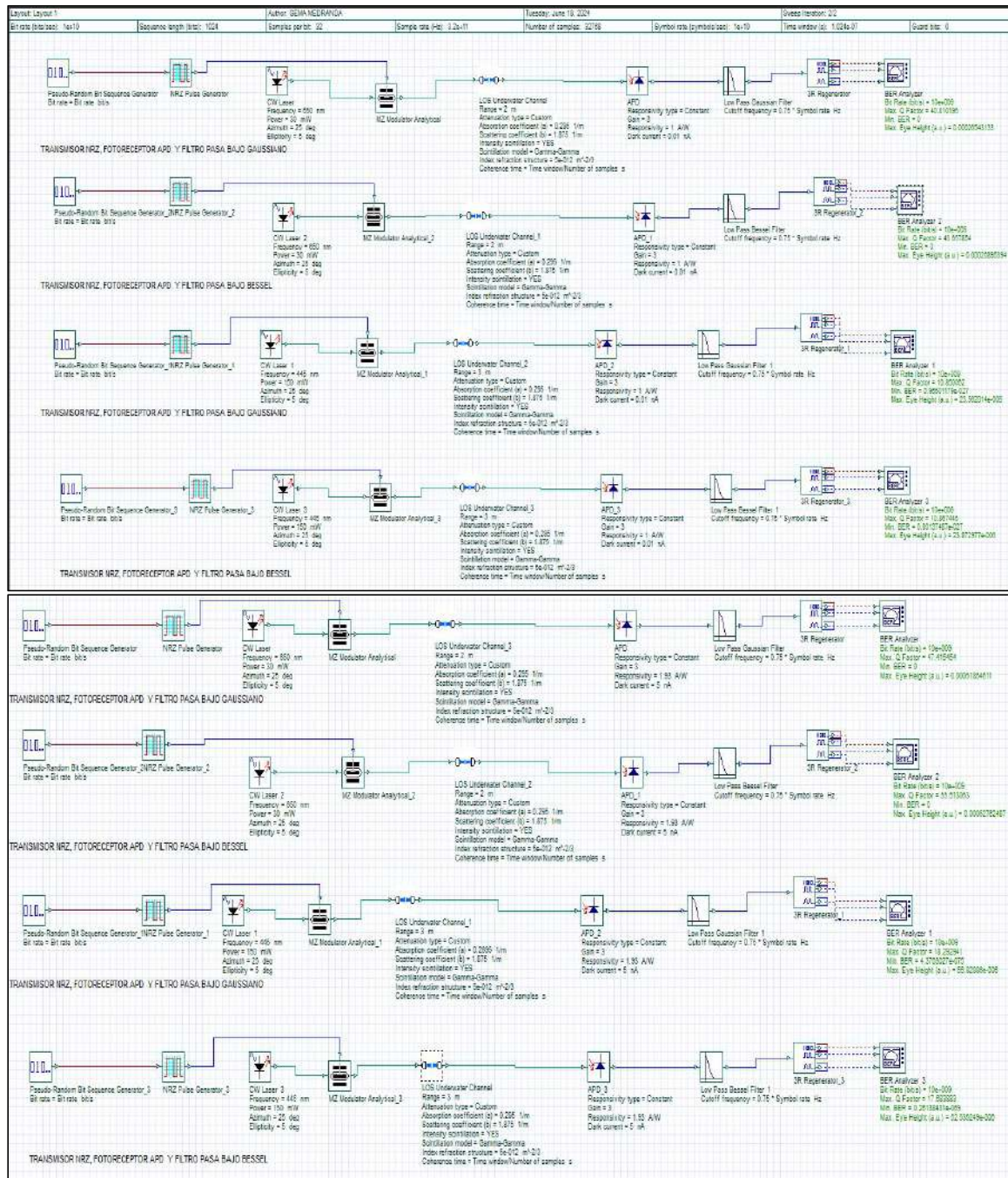
Esquema con el diseño del primer y segundo transmisor, tercer y cuarto diseño del receptor en un canal con agua turbia de puerto con mayor partículas en suspensión [20], centelleo y turbulencia leve.



Fuente: La autora.

Figura 50.

Esquema con el diseño del primer y segundo transmisor, tercer y cuarto diseño del receptor en un canal con agua turbia de puerto modo con mayor partículas en suspensión [20], centelleo y turbulencia severa.



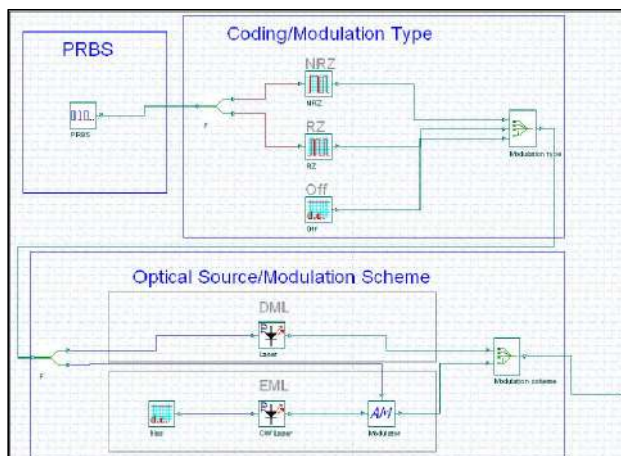
Fuente: La autora.

El esquema del enlace LOS Underwater de Optisystem(vs 21.1), con los componentes seleccionados y configurados en el software, muestran que las distancias máximas tomando el peor escenario son: Agua pura de mar:14 metros; agua clara de mar: 10 metros; agua de costa: 9 metros; agua turbia de puerto: 3 metros, de la misma manera luego de haber simulado todos los canales con el esquema se nota una diferencia de entre 1 a 3 metros entre el mejor y el peor escenario, considerando que se esta transmitiendo a **10Gbps**.

A pesar de haber obtenido excelentes resultados como indicaban investigaciones previas se realiza otras simulaciones para constatar con los datos de los componentes en el canal ideal de agua de mar.

Figura 51.

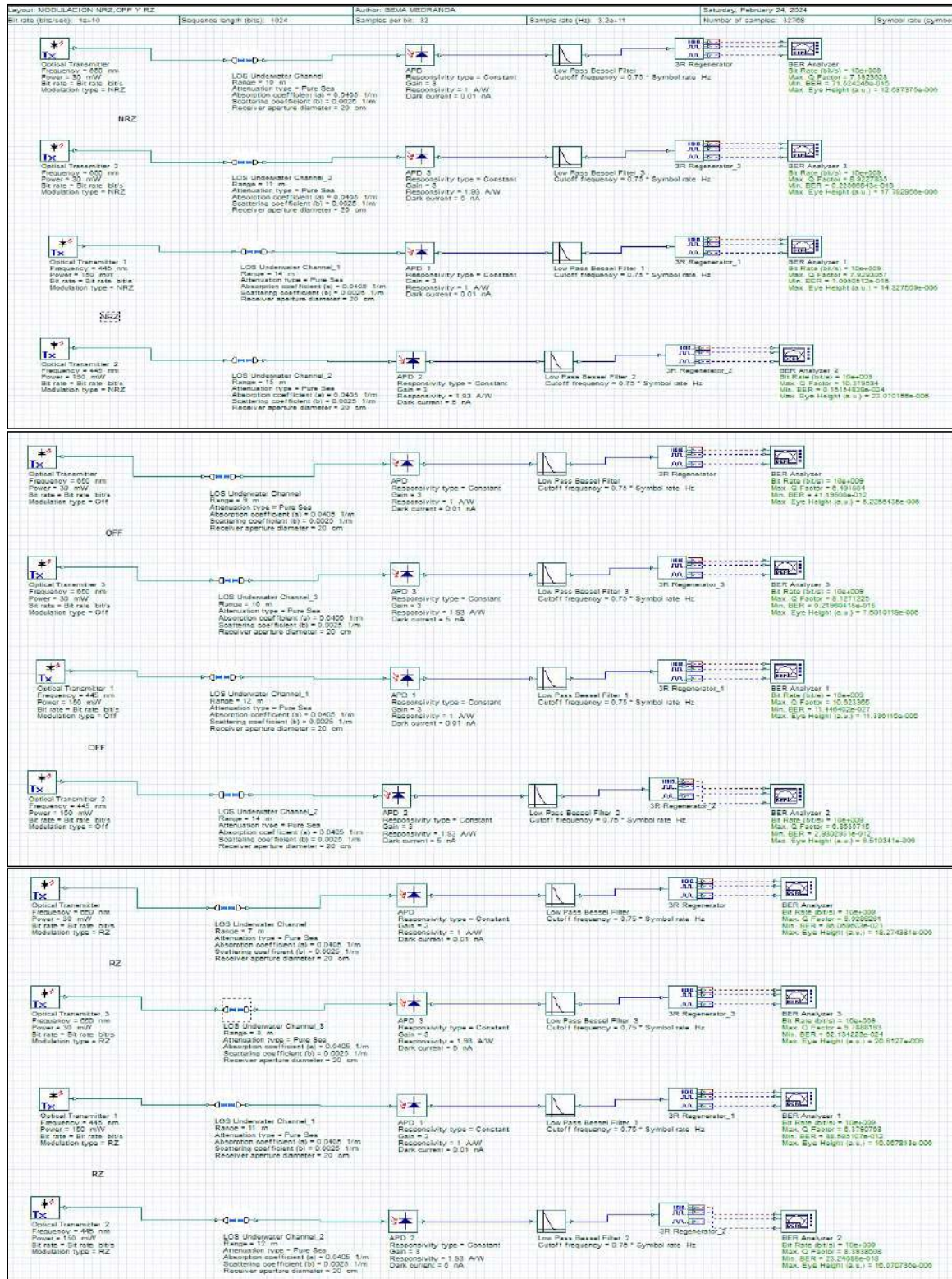
Tercer diseño para el transmisor.



Fuente: La autora.

Figura 52.

Simulación en el mejor escenario del canal (agua pura de mar, sin centelleo, ni turbulencia), con modulación NRZ, OFF y RZ.

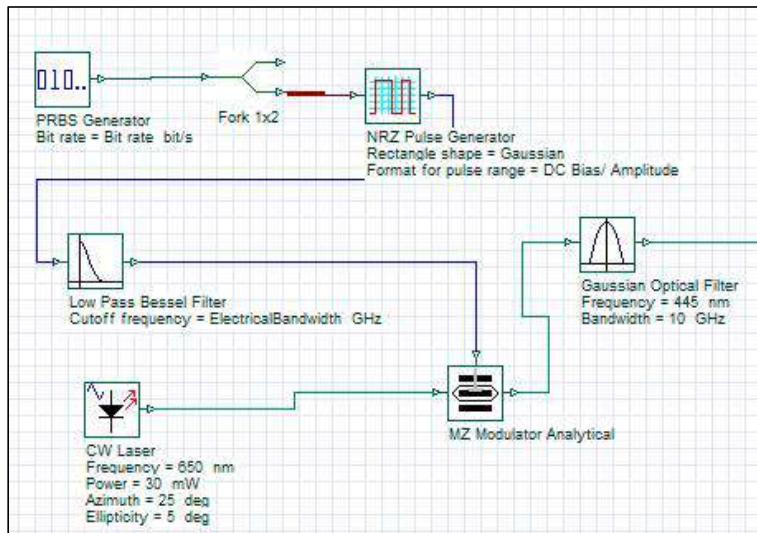


Fuente: La autora.

Como mostró la figura anterior, la modulación para NRZ sigue siendo la mejor, en comparación con OFF y RZ, y al no existir un mejor alcance manteniendo la calidad del enlace, se procederá a evaluar nuevos escenarios con otro diseño para el transmisor.

Figura 53.

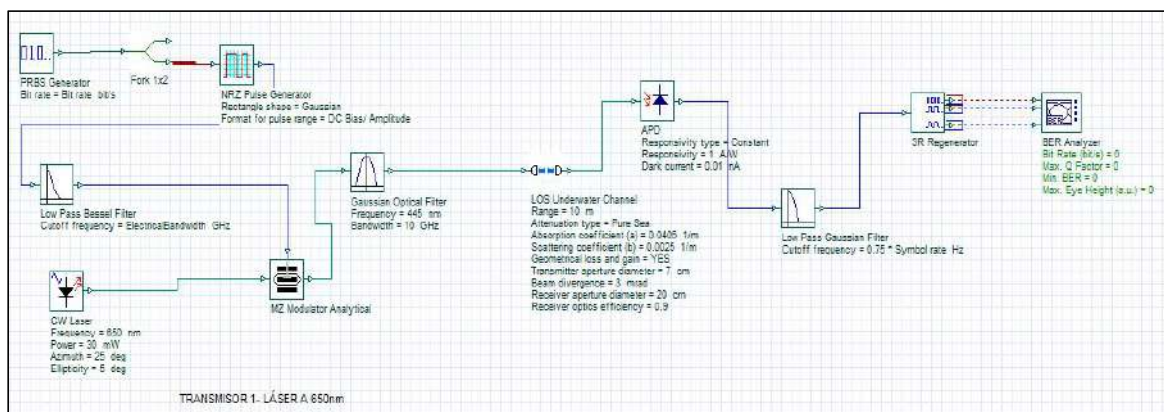
Cuarto diseño para el transmisor



Fuente: La autora.

Figura 54.

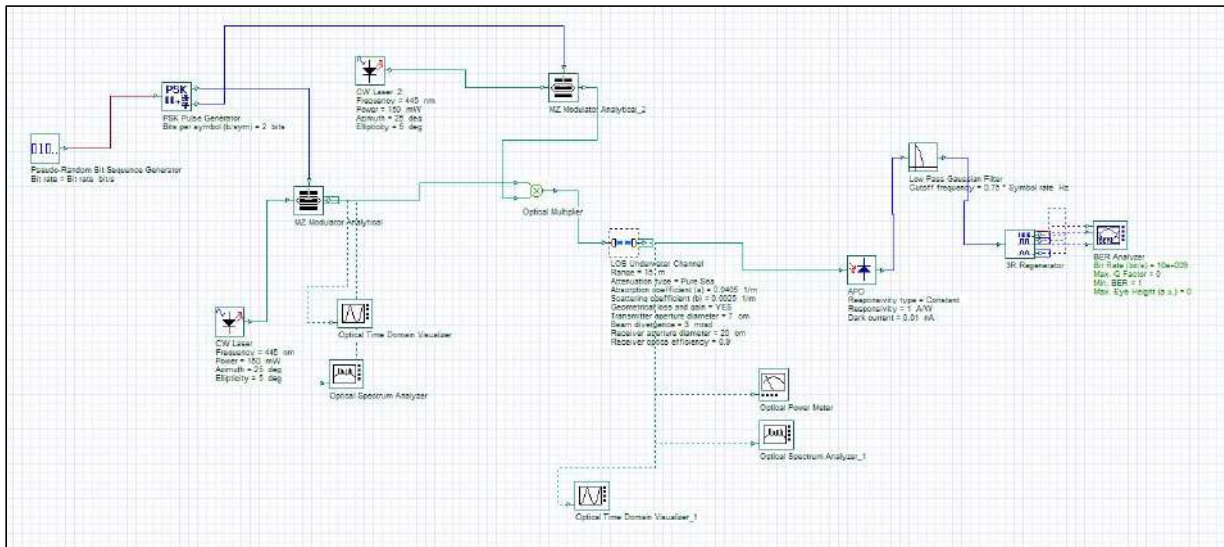
Simulación en el mejor escenario del canal (agua pura de mar, sin centelleo, ni turbulencia), con modulación NRZ y filtro Bessel y filtro Optico Gaussiano.



Fuente: La autora.

Figura 55.

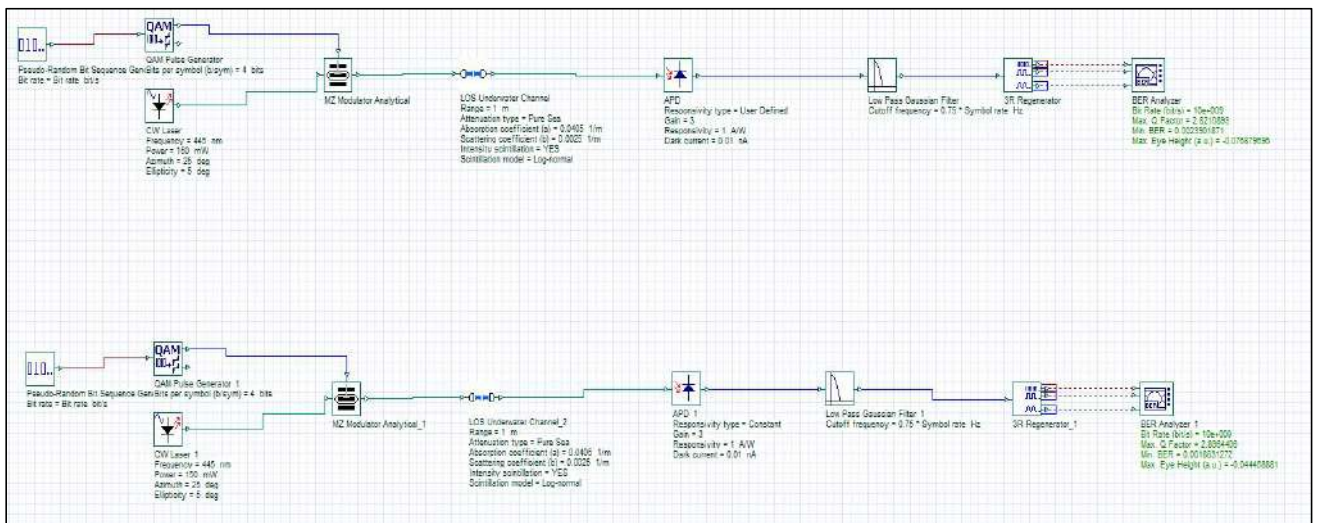
PSK con transmisor láser independientes.



Fuente: La autora.

Figura 56.

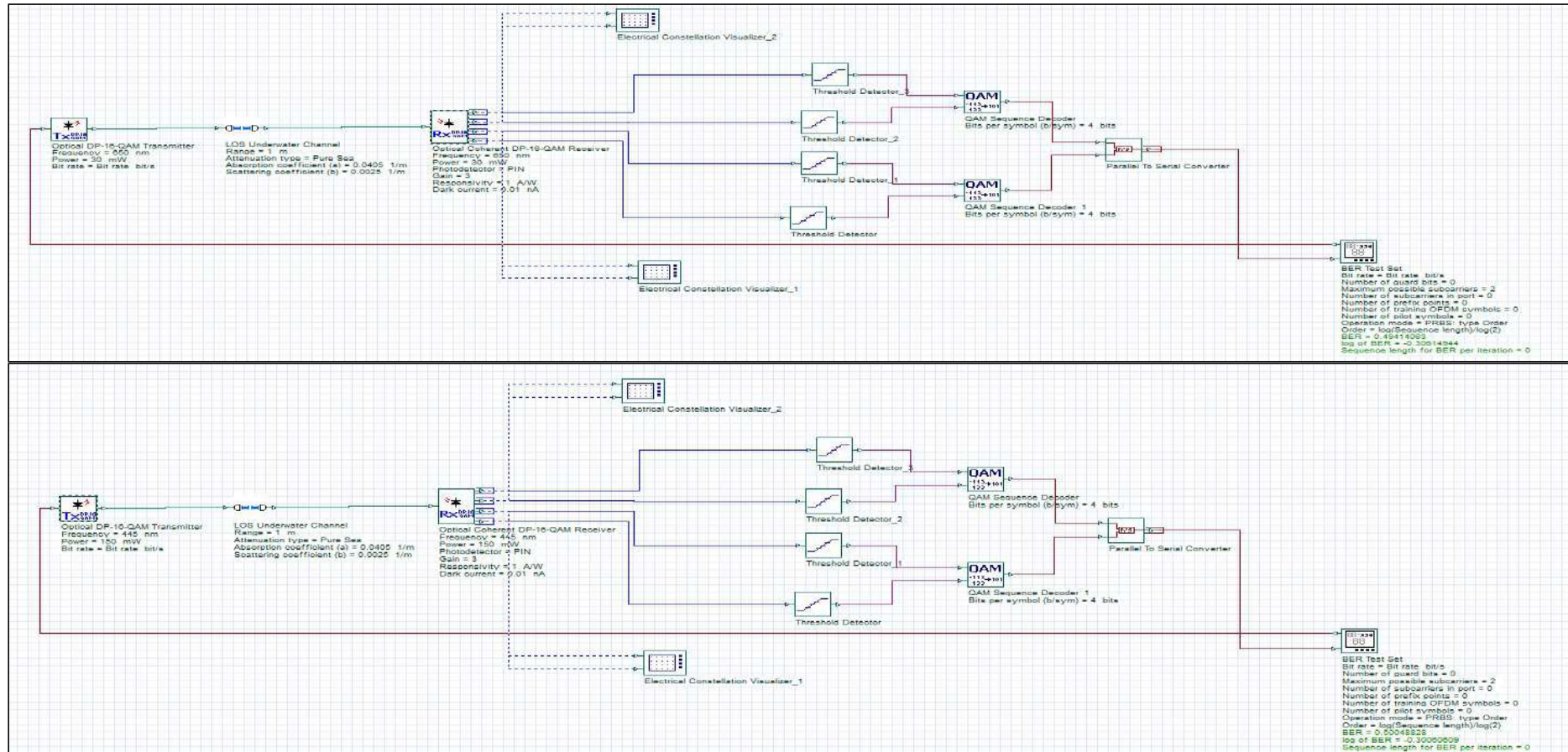
QAM



Fuente: La autora.

Figura 57.

16 QAM, usando fotoreceptoror PIN Y APD

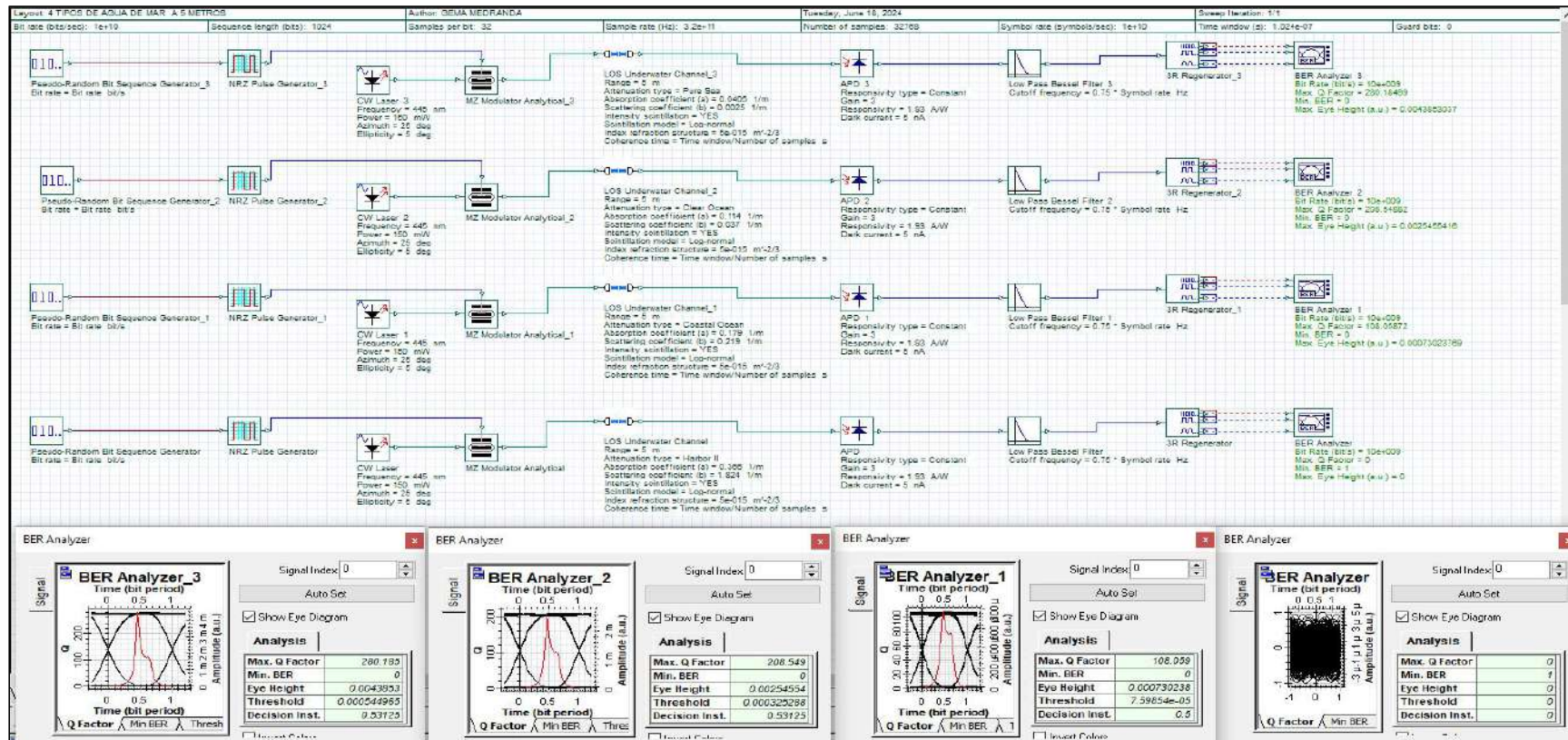


Fuente: La autora.

Anexo 5. Escenarios de Simulación -- Según el tipo de agua de mar considerando los valores predeterminados del canal LOS Underwater de Optisystem.

Figura 58.

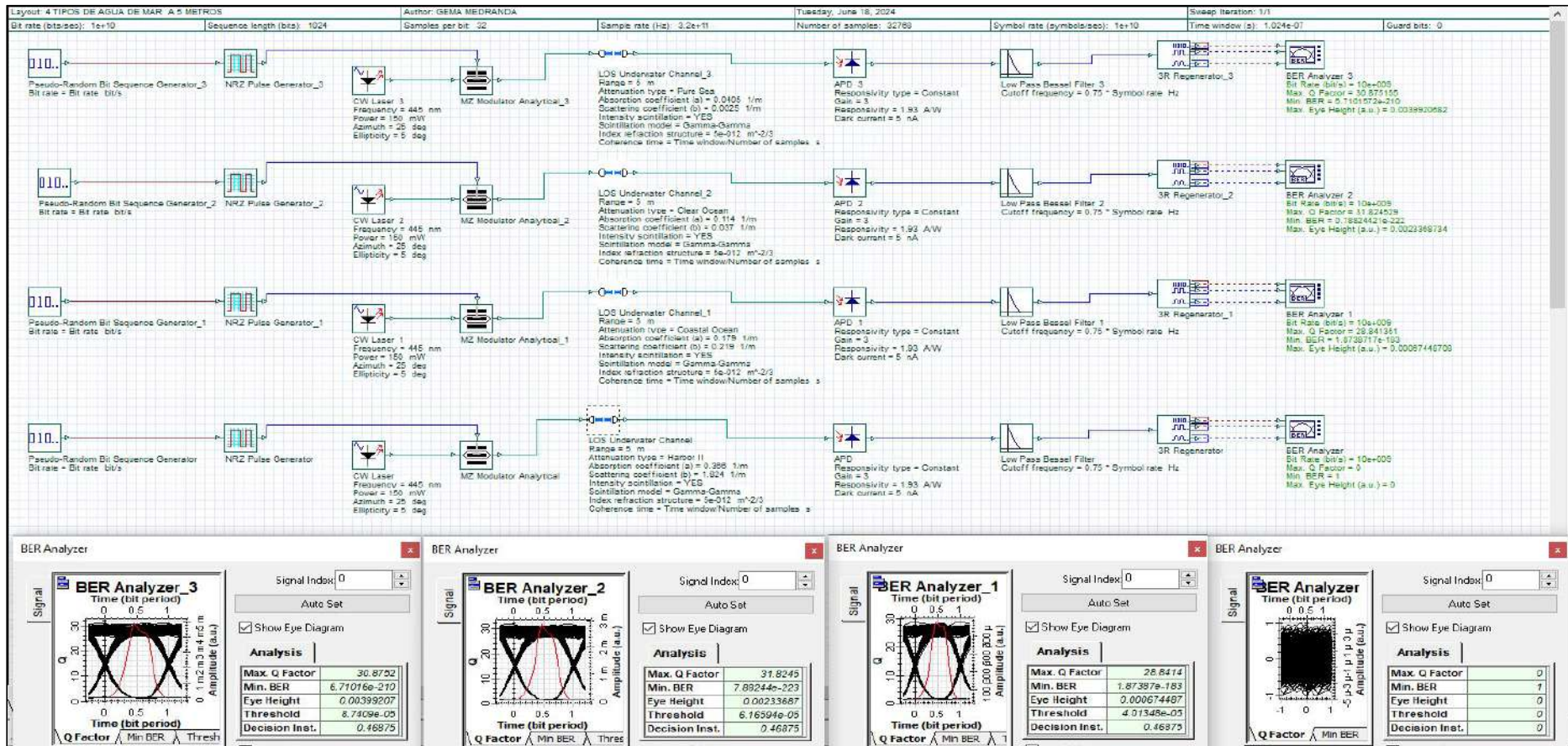
Valores predeterminados del componente LOS Underwater Channel de Optisystem, con turbulencia y centelleo leve a distancia de 5 metros para cuatro tipos de agua de mar.



Fuente: La autora

Figura 59.

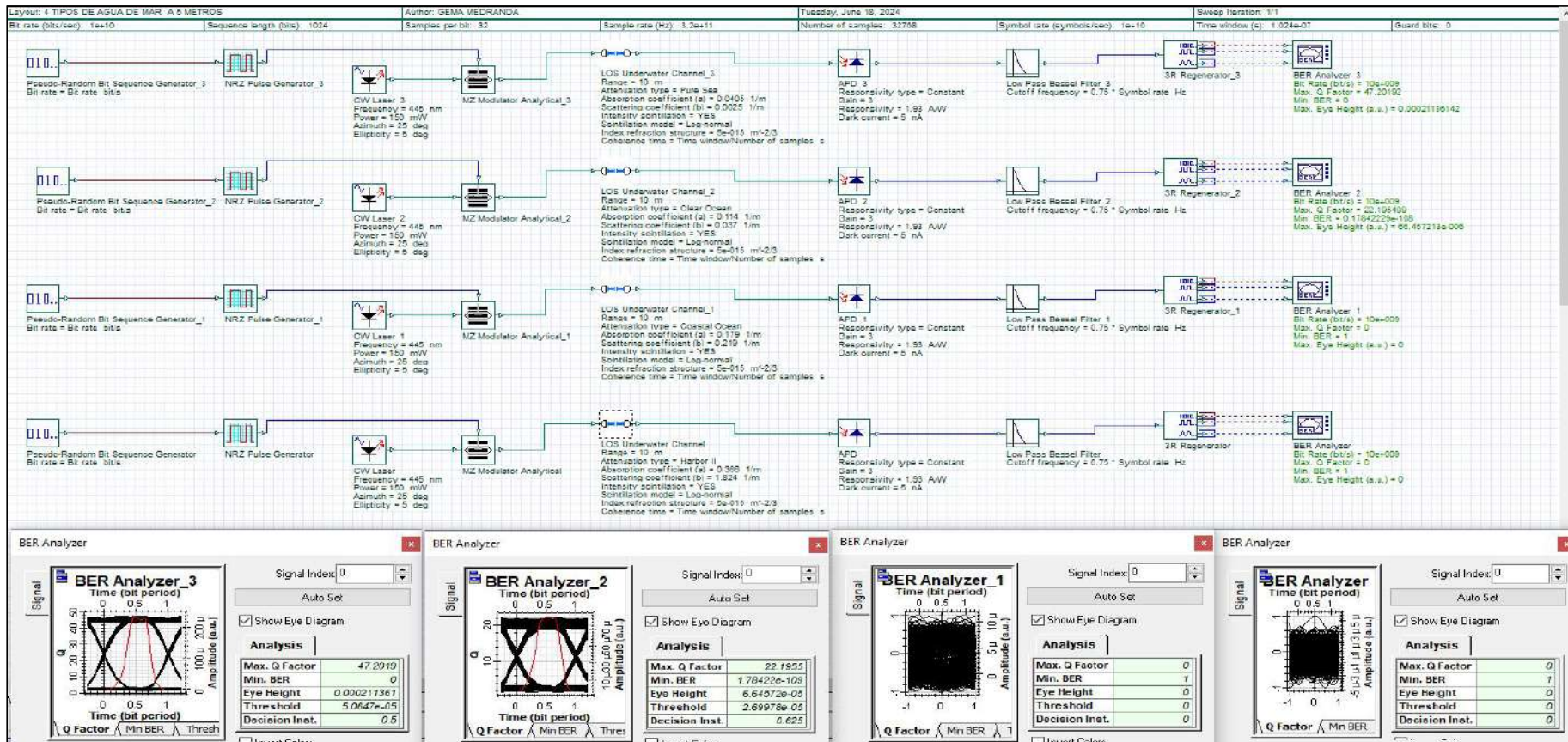
Valores predeterminados del componente LOS Underwater Channel de Optisystem, con turbulencia y centelleo severo a distancia de 5 metros para cuatro tipos de agua de mar.



Fuente: La autora

Figura 60.

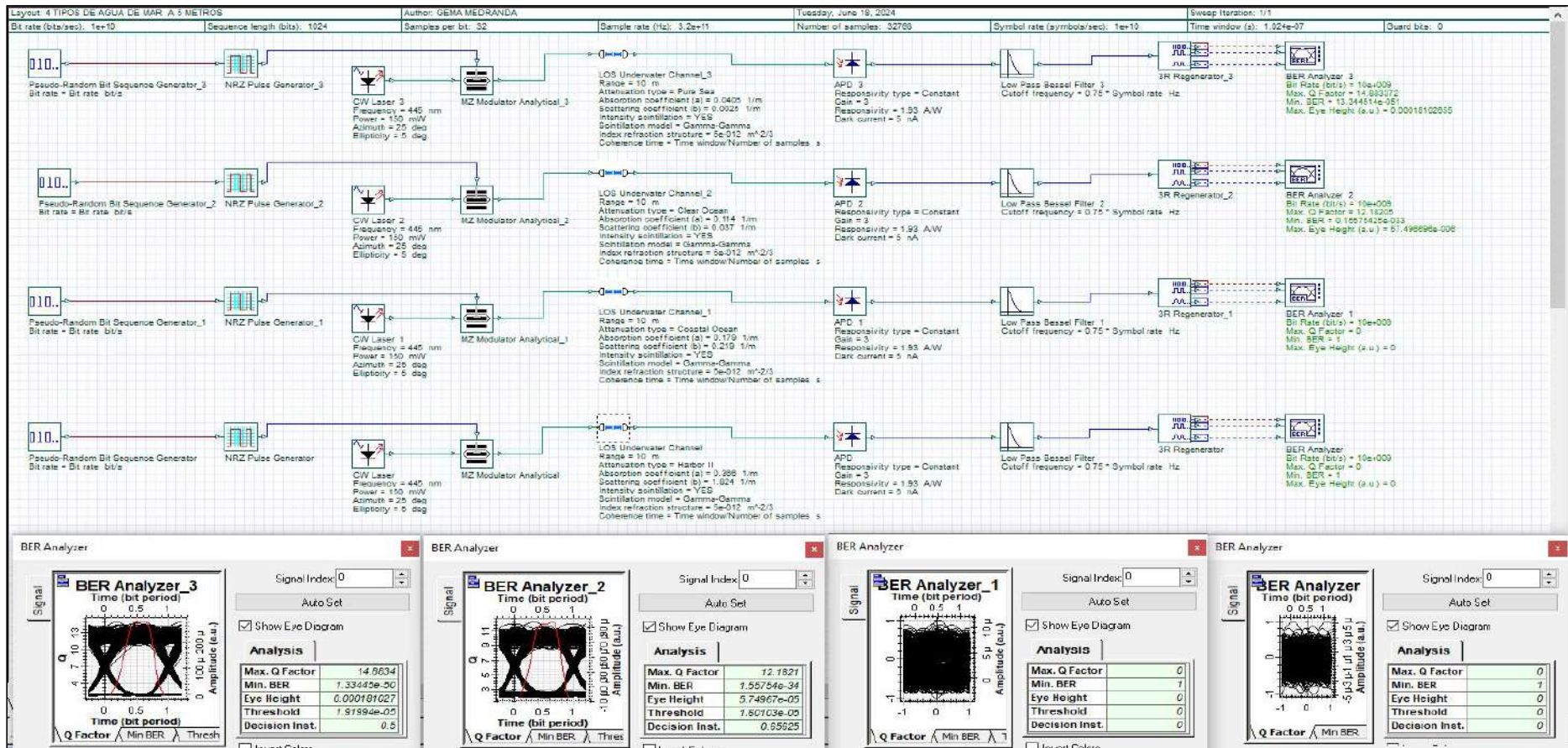
Valores predeterminados del componente LOS Underwater Channel de Optisystem, con turbulencia y centelleo leve a una distancia de 10 metros para cuatro tipos de agua de mar.



Fuente: La autora

Figura 61.

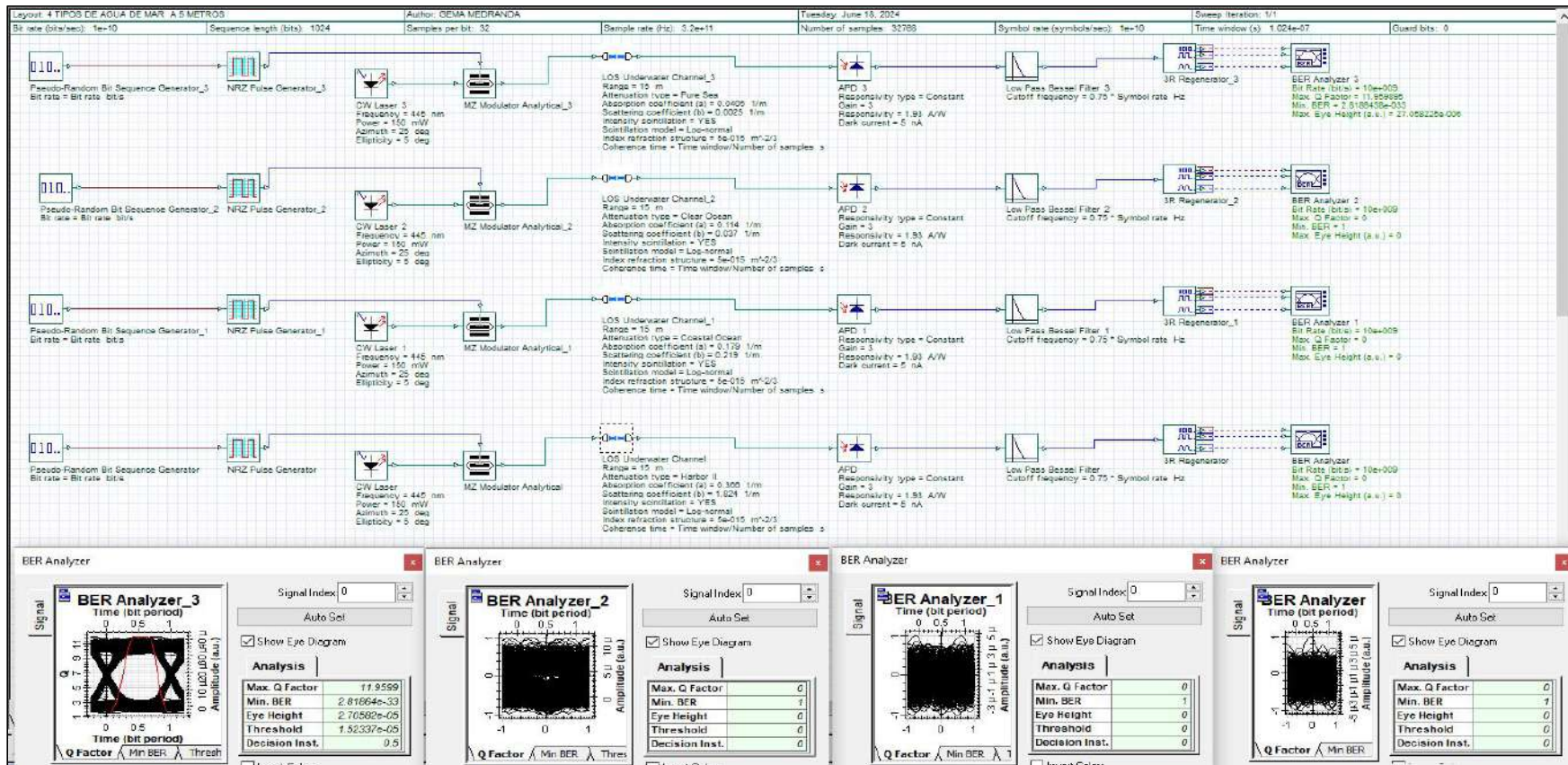
Valores predeterminados del componente LOS Underwater Channel de Optisystem, con turbulencia y centelleo severo a distancia de 10 metros para cuatro tipos de agua de mar.



Fuente: La autora

Figura 62.

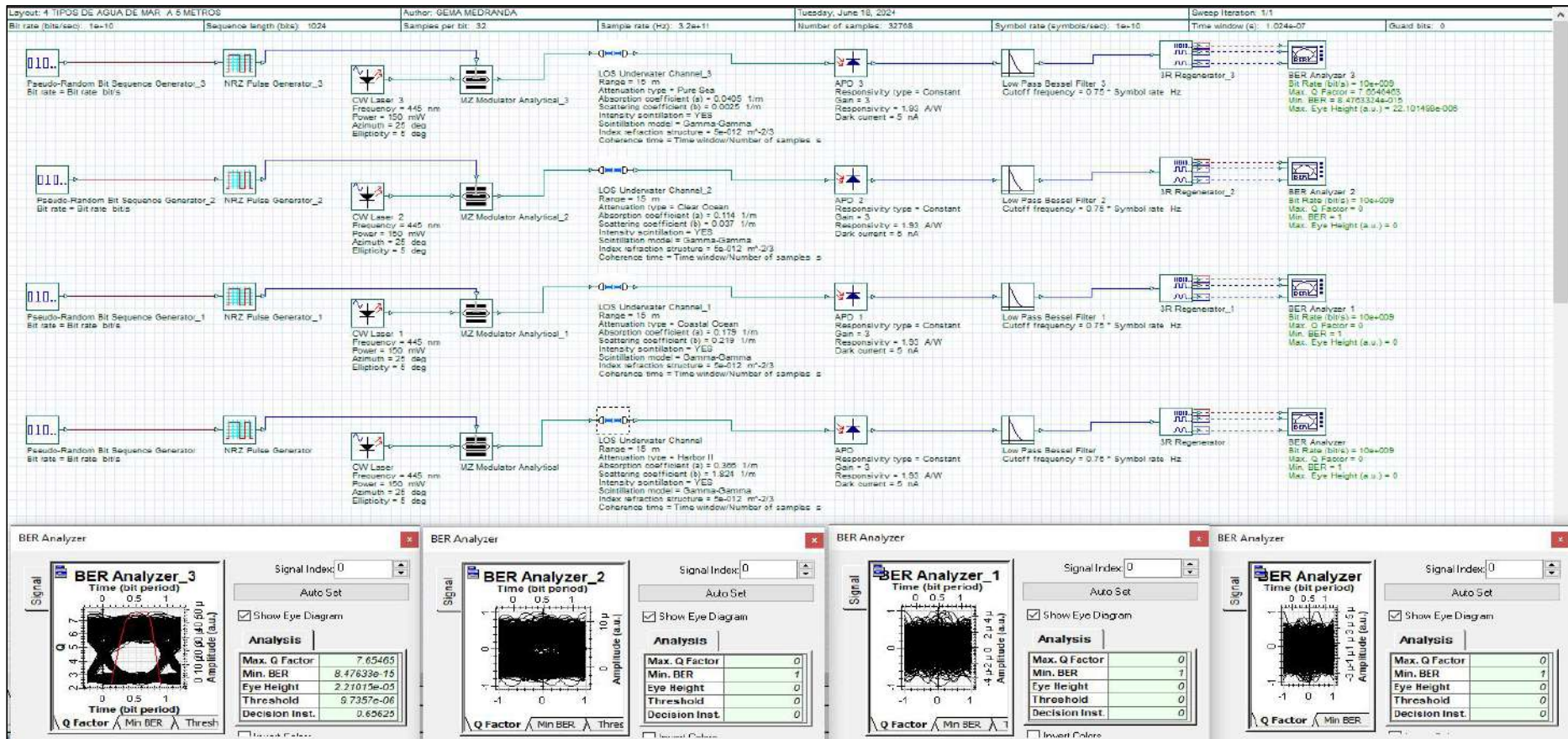
Valores predeterminados del componente LOS Underwater Channel de Optisystem, con turbulencia y centelleo leve a distancia de 15 metros para cuatro tipos de agua de mar.



Fuente: La autora

Figura 63.

Valores predeterminados del componente LOS Underwater Channel de Optisystem, con turbulencia y centelleo severo a distancia de 15 metros para cuatro tipos de agua de mar.

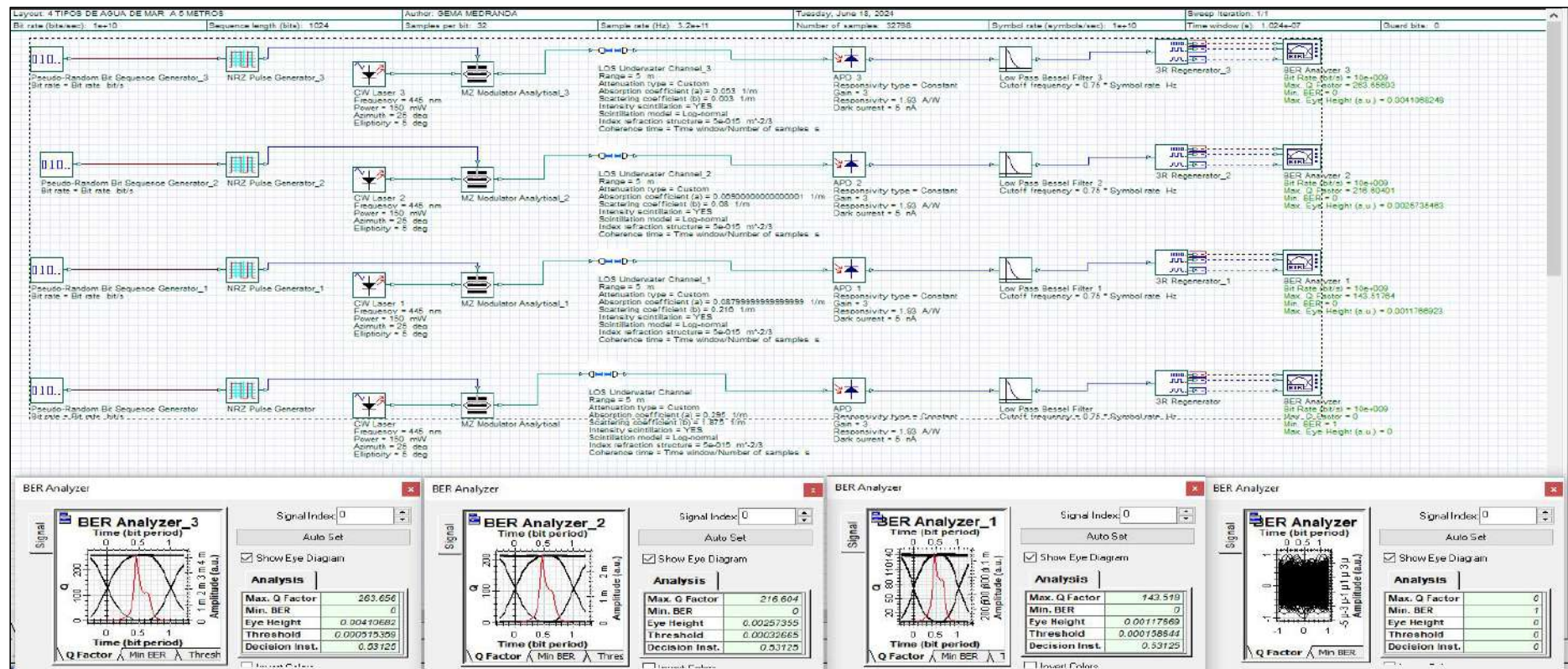


Fuente: La autora

Anexo 6. Escenarios de Simulación -- Según el tipo de agua de mar considerando los datos de [20] para el canal LOS Underwater de Optisystem.

Figura 64.

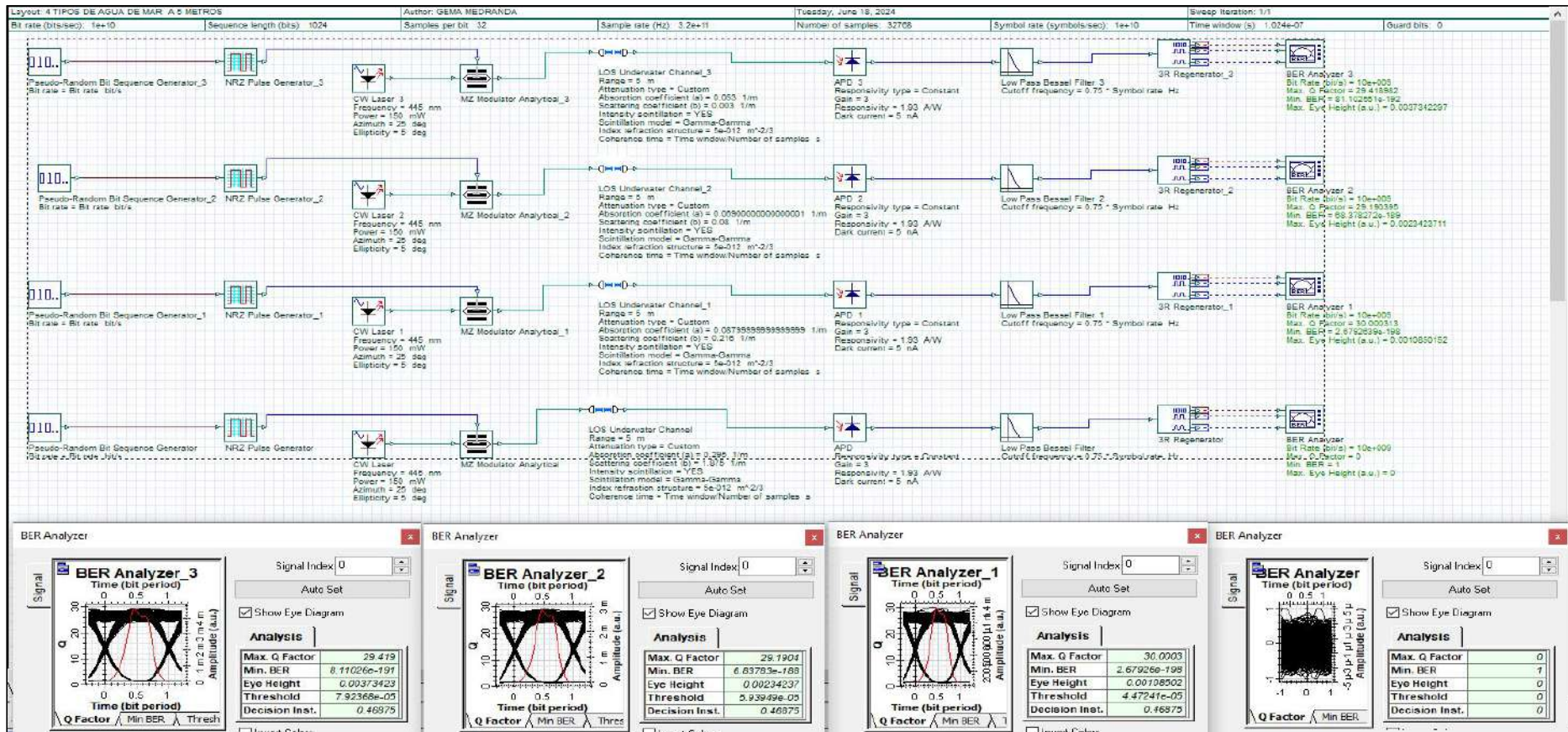
Datos de [20] para el canal LOS Underwater Channel de Optisystem, con turbulencia y centelleo leve a distancia de 5 metros para cuatro tipos de agua de mar.



Fuente: La autora

Figura 65.

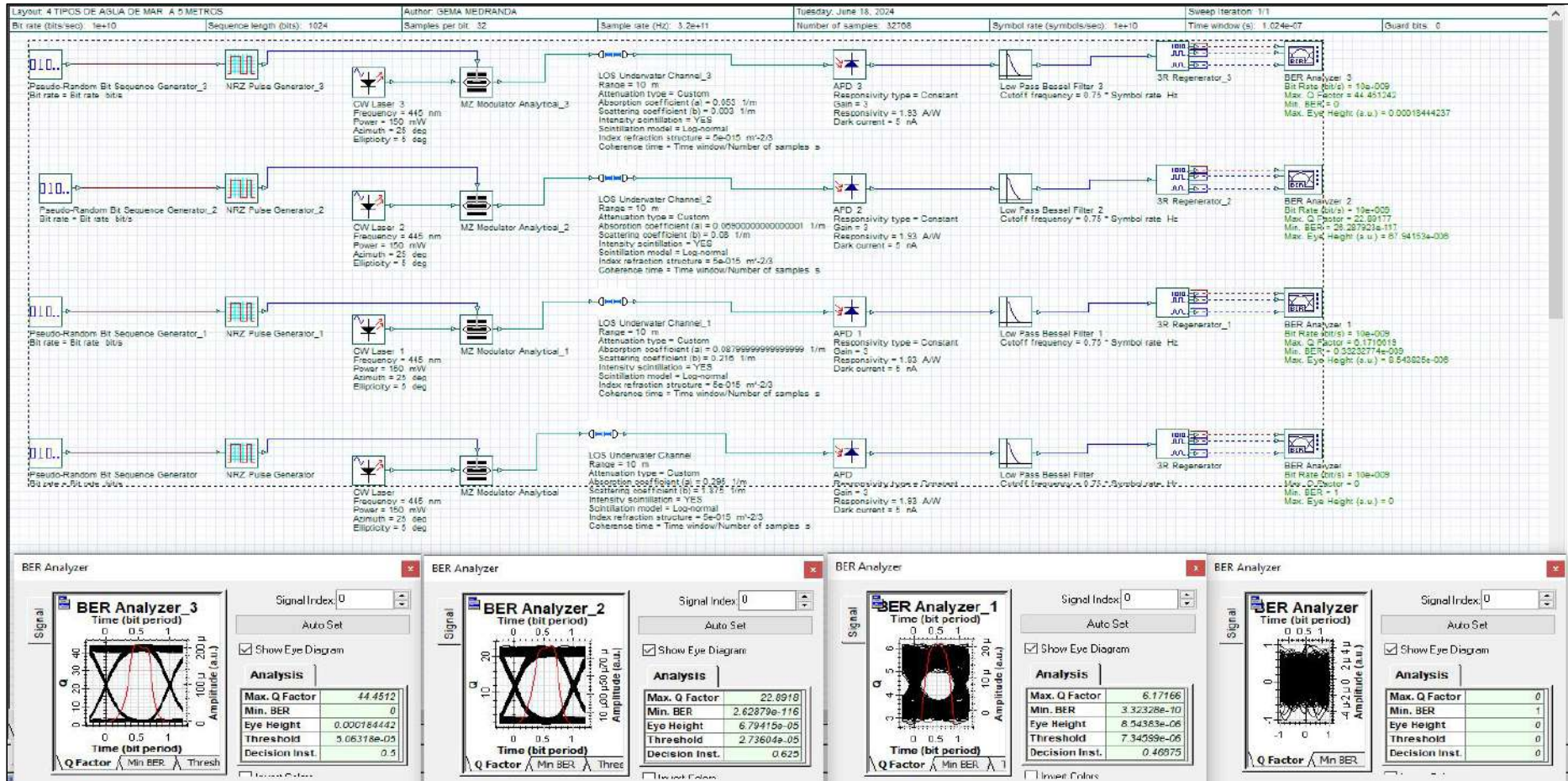
Datos de [20] para el canal LOS Underwater Channel de Optisystem, con turbulencia y centelleo severo a distancia de 5 metros para cuatro tipos de agua de mar.



Fuente: La autora

Figura 66.

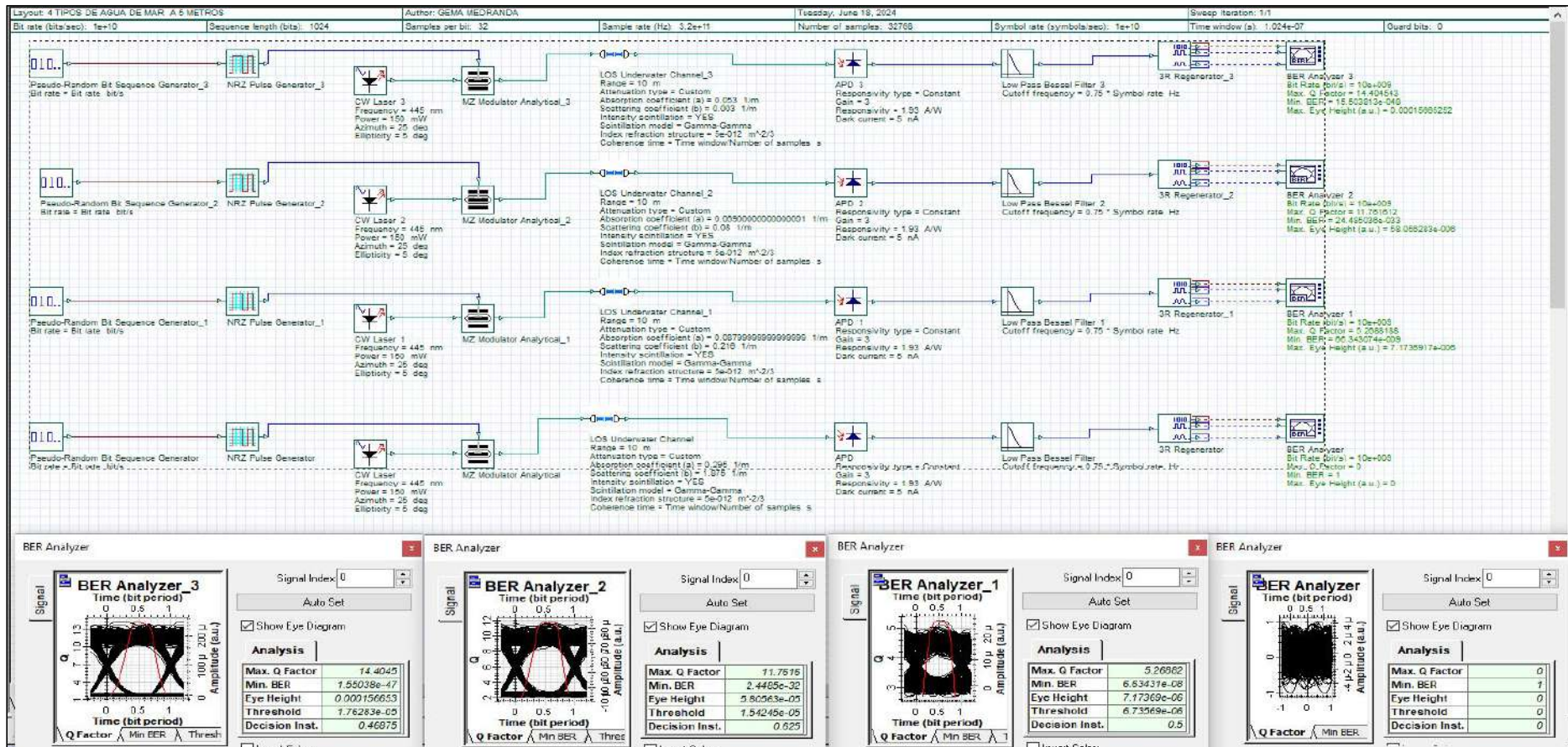
Datos de [20] para el canal LOS Underwater Channel de Optisystem, con turbulencia y centelleo leve a distancia de 10 metros para cuatro tipos de agua de mar.



Fuente: La autora

Figura 67.

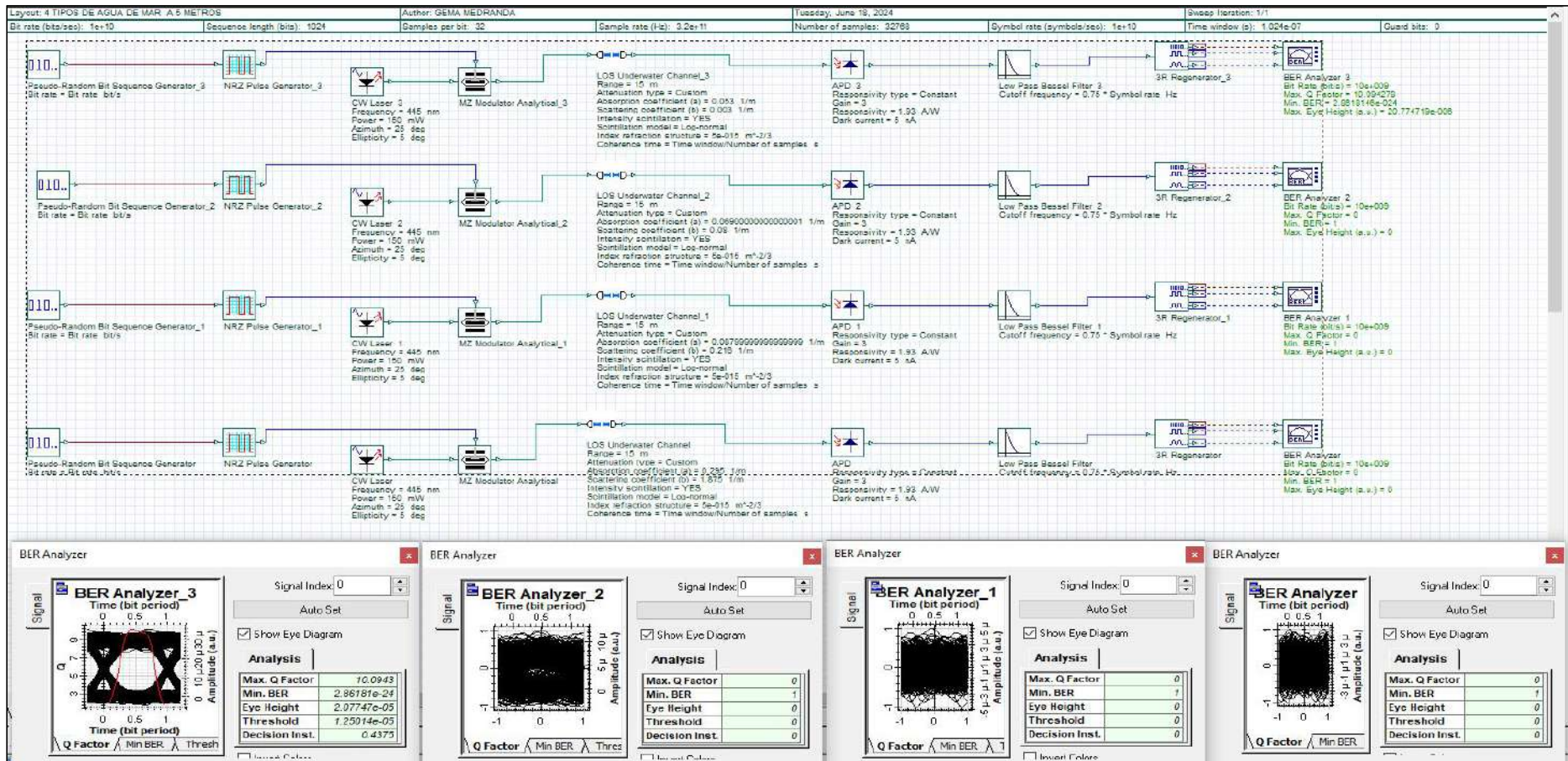
Datos de [20] para el canal LOS Underwater Channel de Optisystem, con turbulencia y centelleo severo a distancia de 10 metros para cuatro tipos de agua de mar.



Fuente: La autora

Figura 68.

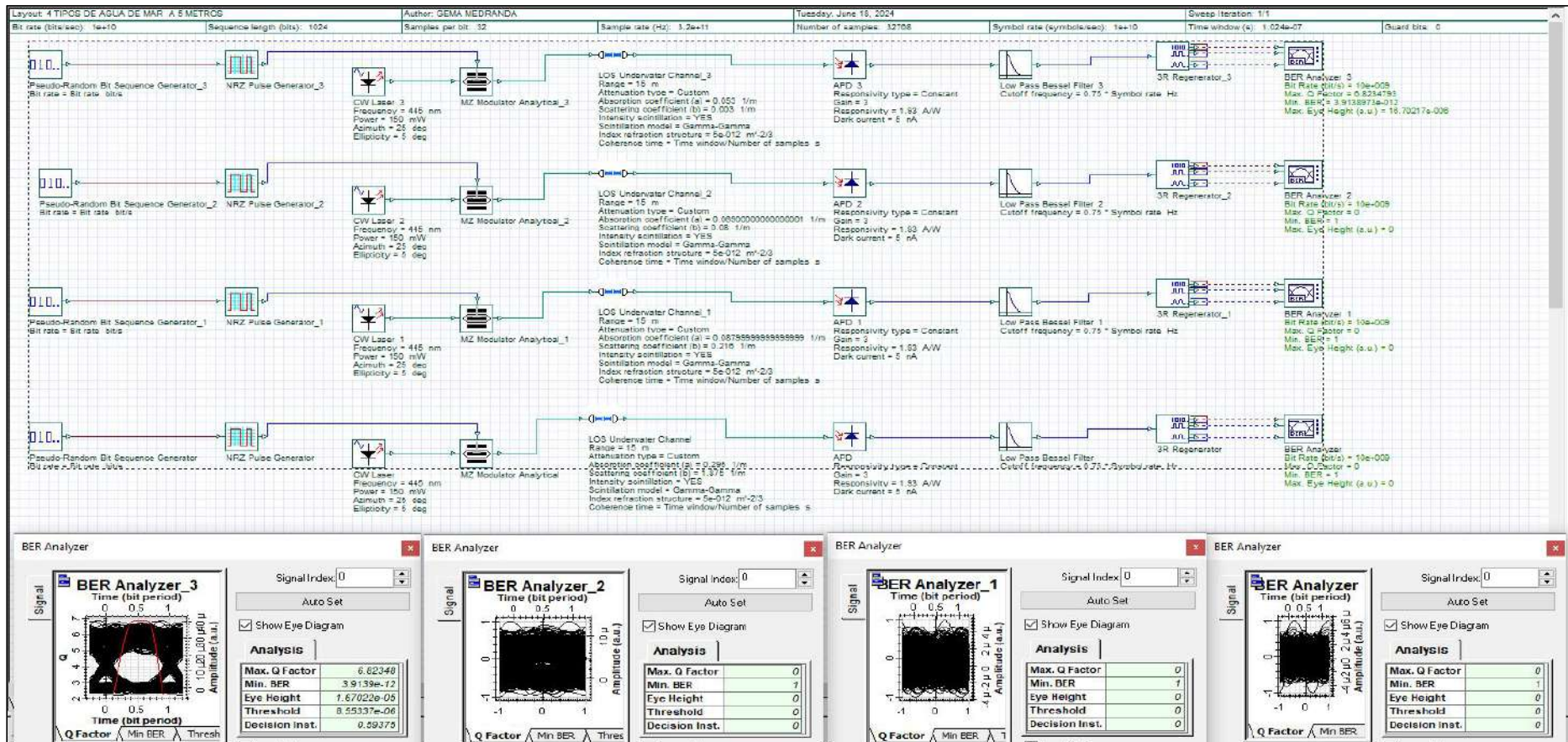
Datos de [20] para el canal LOS Underwater Channel de Optisystem, con turbulencia y centelleo leve a distancia de 15 metros para cuatro tipos de agua de mar, evaluando el canal en modo normal y sweep (10 iteraciones).



Fuente: La autora

Figura 69 .

Datos de [20] para el canal LOS Underwater Channel de Optisystem, con turbulencia y centelleo severo a distancia de 15 metros para cuatro tipos de agua de mar, evaluando el canal en modo normal y sweep (10 iteraciones)



Fuente: La autora.

Anexo 7. Tabla de los datos tabulados para demostrar la optimización del transmisor y receptor transmitiendo a 10 Gbps, en diferentes escenarios de agua de mar.

Tipo de agua de Mar	Transmisor		Canal			Receptor		Filtro pasabaj o (G=Filtro pasabajo GAUSSIA N; B=Filtro pasabajo BESSEL)	Distancia (metro)	Factor Q	BER	
	Primer diseño (frecuencia=445, potencia 150mW)	Segundo diseño (frecuencia=650, potencia 30mW)	Sin centelleo ni turbulencia	Con centelleo y turbulencia leve (centelleo=Log-normal Turbulencia=5E-15)	Con centelleo y turbulencia severo (centelleo=Gamma-Gamma Turbulencia=5E-12)	Primer diseño (PIN=Si, Sensibilidad= 1 A/W, Corriente Oscura=10nA)	Segundo diseño (PIN=InGaAs Sensibilidad= 1 A/W, Corriente Oscura=10nA)					
Agua de Costa		X	X			X		G	5	16.01	0.48E-57	
		X				X		G	4	4.25	10.25E-6	
		X					X	G	1	0	1	
		X					X	B	4	15.40	7.54E-54	
		X						B	5	4.52	3.07E-6	
		X						B	1	0	1	
	X						X	G	5	7.17	0.35E-12	
	X						X	B	5	7.54	22.02E-15	
	X							X	G	3	0	1
Agua Pura de Mar		X				X		G	7	6.30	0.14E-9	
		X					X	G	1	0	1	
		X				X		B	6	12.10	0.48E-33	
		X					X	B	1	0	1	
	X					X		G	7	10.25	0.53E-24	
	X						X	G	1	0	1	
	X					X		B	7	10.40	0.11E-24	
						X	B	1	0	1		
Tipo de Agua de mar	TRANSMISOR		CANAL			RECEPTOR		G=Filtro pasabajo GAUSSIA N; B=Filtro pasabajo BESSEL	Distancia (metro)	Factor Q	BER	
	Frecuencia= 445, potencia 150mW	Frecuencia =650, potencia 30mW	Sin centelleo ni turbulencia	Con centelleo y turbulencia leve (centelleo=Log-normal Turbulencia=5E-15)	Con centelleo y turbulencia severo (centelleo=Gamma-Gamma Turbulencia=5E-12)	APD=InGaAs, Sensibilidad = 1 A/W, Corriente Oscura= 0.01 nA	APD=InGaAs, Sensibilidad= 1.93 A/W, Corriente Oscura=5 nA					
Agua pura de Mar Coeficiente de Absorción a = 0.0405 /m Coeficiente de Dispersión b = 0.0025 /m		X	X			X		G	15	0	1	
		X				X		B		0	1	
	X						X	G		6.38	86.81E-12	
	X						X	B		6.82	4.22E-12	
		X						X		G	7.25	0.20E-12
		X						X		B	7.13	0.56E-12
	X					X	G	17	7.14	0.44E-12		

	X					X	B		7.29	0.14E-12			
		X		X		X	G	10	8.06	0.35E-15			
		X				X	B		8.29	53.68E-18			
	X					X	G	15	6.65	14.39E-12			
	X					X	B		6.67	12.58E-12			
		X					X	G	12	6.79	5.31E-12		
		X					X	B		7.01	1.10E-12		
	X						X	G	17	6.68	11.65E-12		
	X						X	B		7.16	0.38E-12		
		X			X		X	G	10	6.79	4.98E-12		
		X					X	B		6.68	11.03E-12		
	X						X	G	14	6.51	32.70E-12		
	X						X	B		6.78	5.14E-12		
		X					X	G	11	7.41	57.48E-15		
		X					X	B		7.58	14.89E-15		
	X						X	G	15	7.08	0.58E-12		
	X						X	B		7.44	43.31E-15		
Agua Clara de Mar Coeficiente de Absorción $a = 0.114 \text{ /m}$ Coeficiente de Dispersión $b = 0.037 \text{ /m}$		X					X	G	8	8.98	0.12E-18		
		X					X	B		9.35	4.06E-21		
	X						X	G	11	8.12	0.22E-15		
	X						X	B		8.29	54.83E-18		
		X		X				X	G	10	5.46	22.87E-9	
		X						X	B		5.67	7.04E-9	
	X							X	G	13	6.39	79.85E-12	
	X							X	B		6.26	0.18E-9	
		X						X	G	8	9.19	19.01E-21	
		X						X	B		8.85	0.42E-18	
	X							X	G	11	8.25	72.80E-18	
	X			X				X	B		7.82	2.56E-15	
		X						X	G	10	5.73	4.98E-9	
		X						X	B		5.27	5.04E-9	
	X							X	G	13	5.90	1.71E-9	
	X							X	B		6.23	0.12E-9	
		X						X	G	8	7.43	48.83E-15	
		X						X	B		7.51	27.78E-15	
	X							X	G	11	6.75	6.76E-12	
	X							X	B		6.74	7.44E-12	
	X				X			X	G	9	5.35	42.62E-9	
	X							X	B		5.31	0.13E-6	
X								X	G	12	7.01	1.12E-12	
X								X	B		7.16	0.36E-12	
Agua de Costa Coeficiente de Absorción $a = 0.179 \text{ /m}$ Coeficiente de Dispersión $b = 0.219 \text{ /m}$		X					X	G	8	0	1		
		X					X	B		0	1		
	X						X	G		6.37	90.26E-12		
	X						X	B		6.55	26.57E-12		
		X		X				X	G	7	6.26	0.18E-9	
		X						X	B		6.48	48.42E12	
	X							X	G	9	5.40	32.05E-9	
	X							X	B		5.65	7.69E-9	
		X						X	G	6	8.80	0.66E-18	
		X						X	B		9.09	43.27E-21	
	X							X	G	8	6.67	12.21E-12	
	X							X	B		6.71	9.91E-12	
		X		X					X	G	7	6.54	29.03E-12
		X							X	B		6.47	48.27E-12
X								X	G	8	11.04	0.11E-27	
X								X	B		11.36	3.15E-30	

		X				X		G	6	7.79	3.17E-15	
		X				X		B		8.40	20.41E-18	
	X					X		G	7	11.32	4.54E-30	
	X					X		B		11.82	12.45E-33	
		X			X			X	G	7	5.99	1.00E-9
		X						X	B		6.06	0.66E-9
	X							X	G	8	9.43	1.75E-21
	X							X	B		9.62	0.29E-21
Agua de puerto Coeficiente de Absorción a = 0.187 /m Coeficiente de Dispersión b = 0.913 /m		X				X		G	4	6.22	0.24E-9	
		X				X		B		6.16	0.35E9	
	X					X		G	3	4.28	9.03E-6	
	X					X		B		4.31	7.96E-6	
		X	X					X		G	10.72	3.64E-27
		X						X		B	11.28	7.86E-30
	X							X	G	5	7.63	10.77E-15
	X							X	B		7.83	2.28E-15
		X					X		G	3	38.33	0.66E-321
		X					X		B		38.68	0
	X						X		G	4	23.86	3.67E-126
	X				X		X		B		24.54	0.24E-132
		X						X	G		10.79	1.87E-27
		X						X	B		10.88	0.66E-27
	X							X	G	5	7.95	0.84E-15
	X							X	B		8.28	58.45E-18
		X					X		G	3	26.83	5.25E-159
		X					X		B		30.04	1.22E-198
	X						X		G	4	17.62	0.73E-9
	X						X		B		18.54	39.12E-78
	X				X		X	G		10.33	0.23E-24	
	X						X	B		10.26	0.49E-24	
X							X	G	5	7.20	0.28E-12	
X							X	B		7.57	17.13E-15	
Agua Turbia de Puerto Coeficiente de Absorción a = 0.366 /m Coeficiente de Dispersión b = 1.824 /m		X				X		G	2	54.71	0	
		X				X		B		56.42	0	
	X					X		G	3	10.29	0.36E-24	
	X					X		B		10.51	37.58E-27	
		X	X					X		G	4.29	8.56E-6
		X						X		B	0	1
	X							X	G	18.33	2.15E-75	
	X							X	B	18.13	80.05E-75	
		X					X		G	2	54.71	0
		X					X		B		56.57	0
	X						X		G	3	10.26	0.17E-24
	X				X		X		B		11.05	0.010E-27
		X						X	G		4.30	8.15E-6
		X						X	B	2	82.76	0
	X							X	G	3	17.66	0.39E-69
	X							X	B		17.74	90.13E-72
		X					X		G	2	42.50	0
		X					X		B		42.53	0
	X						X		G	3	9.82	44.23E-24
	X						X		B		9.95	11.75E-24
	X				X		X	G	2	49.08	0	
	X						X	B		49.89	0	
X							X	G	3	16.30	4.30E-60	
X							X	B		16.50	0.15E-60	
Agua pura de		X	X			X		G	10	7.12	0.50E-12	

Mar Coeficiente de Absorción $a = 0.053 \text{ /m}$ Coeficiente de Dispersión $b = 0.003 \text{ /m}$		X			X		B	14	7.76	4.08E-15	
	X				X		G		7.65	9.59E-15	
	X				X		B		7.46	40.90E-15	
		X				X	G	11	8.48	10.42E-18	
		X				X	B		8.88	0.33E-18	
	X					X	G	16	7.48	36.39E-15	
	X					X	B		7.76	4.11E-15	
		X				X	G	10	6.92	2.22E-12	
		X				X	B		7.06	0.78E-12	
	X					X	G	14	7.76	4.18E-15	
	X					X	B		7.48	34.98E-15	
		X		X			G	11	8.95	0.16E-18	
		X				X	B		8.87	0.34E-18	
	X					X	G	15	9.86	28.37E-24	
	X					X	B		10.37	0.15E-24	
		X				X	G	9	8.76	0.89E-18	
		X				X	B		9.23	11.69E-21	
	Agua Clara de Mar Coeficiente de Absorción $a = 0.069 \text{ /m}$ Coeficiente de Dispersión $b = 0.08 \text{ /m}$	X				X		G	8	8.69	1.77E-18
		X				X		B		8.97	0.13E-18
		X				X		G	11	8.47	12.29E-18
X					X		B		8.24	78.99E-18	
		X		X			G	9	9.31	6.01E-21	
		X				X	B		9.48	1.14E-21	
X						X	G	12	9.95	11.22E-24	
X						X	B		9.73	0.10E-21	
		X				X	G	7	16.57	55.12E-63	
		X				X	B		16.85	0.50E-63	
X						X	G	10	13.12	1.22E-39	
X						X	B		13.33	68.26E-42	
		X		X			G	9	9.16	23.87E-21	
		X				X	B		9.81	47.46E-24	
X						X	G	12	9.62	0.29E-21	
X						X	B		9.87	26.95E-24	
		X				X	G	7	11.97	2.04E-33	
		X				X	B		12.66	0.42E-36	
Agua de Costa Coeficiente de Absorción $a = 0.088 \text{ /m}$ Coeficiente de Dispersión $b = 0.216 \text{ /m}$		X				X		G	10	8.786	0.63E-18
		X				X		B		9.02	81.63E-21
		X		X			G	9	7.74	4.61E-15	
		X				X	B		8.12	0.21E-15	
	X					X	G	11	9.018	81.60E-21	
	X					X	B		9.45	1.34E-21	
		X				X	G	6	14.44	13.52E-48	
		X				X	B		13.96	12.08E-45	
	X					X	G	8	12.61	0.81E-36	
	X					X	B		12.54	1.99E-36	
		X		X			G	7	11.10	55.60E-30	
		X				X	B	6	24.63	23.14E-135	
	X				X		G	9	10.97	0.23E-27	
	X				X		B		11.39	2.23E-30	
		X		X			G	6	14.74	0.17E-48	
		X				X	B		14.46	9.24E-48	

	X					X		G	8	12.31	37.77E-36	
	X					X		B		12.86	35.47E-39	
		X					X	G	7	11.24	12.19E-30	
		X					X	B		11.40	1.97E-30	
	X						X	G	9	11.52	0.50E-30	
	X						X	B		11.56	0.31E-30	
		X				X		G	6	12.07	0.65E-33	
		X				X		B		11.89	5.53E-33	
	X					X		G	8	9.99	7.09E-24	
	X					X		B		9.92	14.71E-24	
		X			X		X	G	7	9.79	54.12E-24	
		X					X	B		9.71	0.11E-21	
	X						X	G	9	8.90	0.23E-18	
	X						X	B			8.96E-18	
Agua turbia de puerto Coeficiente de Absorción a = 0.295 /m Coeficiente de Dispersión b = 1.875 /m		X				X		G	2	53.89	0	
		X				X		B		55.34	0	
	X					X		G	3	11.19	21.31E-30	
	X					X		B		10.84	1.01E-27	
		X					X	G	2	83.30	0	
		X					X	B		88.38	0	
	X						X	G	3	18.51	76.96E-78	
	X						X	B		18.30	3.81E-75	
		X					X		G	2	55.03	0
		X					X		B		56.97	0
	X						X		G	3	10.72	3.96E-27
	X						X		B		11.05	0.11E-27
		X						X	G	2	83.60	0
		X						X	B		91.29	0
	X							X	G	3	19.88	0.24E-87
	X							X	B		19.53	0.26E-84
		X					X		G	2	40.51	0
		X					X		B		43.65	0
	X						X		G	3	10.85	0.96E-27
	X						X		B		10.86	0.80E-27
	X				X		X	G	2	47.41	0	
	X						X	B		55.51	0	
X							X	G	3	18.29	4.37E-75	
X							X	B		17.68	0.26E-69	

Tipo de agua de Mar	Transmisor	Receptor	Canal			Filtro pasabajo BESSEL	Distancia (metro)	Factor Q	BER
	Frecuencia=445, potencia 150mW	APD=InGaAs, Sensibilidad=1.93 A/W, Corriente Oscura=5 nA	Absorción y Dispersión	Con centelleo y turbulencia leve (centelleo=Log-normal Turbulencia=5 E-15)	Con centelleo y turbulencia severo (centelleo=Gamma-Gamma Turbulencia=5 E-12)				
Agua Pura de Mar	X	X	a=0.0405 <i>l/m</i> , b=0.025 <i>l/m</i>	X		X	5	280.18	0
					X			30.87	6.7E-210
			a=0.053 <i>l/m</i> , b=0.03 <i>l/m</i>	X				263.65	0
					X		29.41	81.10E-192	
			a=0.0405 <i>l/m</i> , b=0.025 <i>l/m</i>	X			10	47.20	0
					X			14.88	13.34E-51
			a=0.053 <i>l/m</i> , b=0.03 <i>l/m</i>	X				44.45	0
					X		14.40	15.50E-48	
			a=0.0405 <i>l/m</i> , b=0.025 <i>l/m</i>	X			15	11.95	2.82E-33
					X			7.65	8.47E-15
			a=0.053 <i>l/m</i> , b=0.03 <i>l/m</i>	X				10.09	2.86E-24
					X		6.82	3.19E-12	
Agua Clara de Mar			a=0.114 <i>l/m</i> , b=0.037 <i>l/m</i>	X			5	208.54	0
					X			31.82	0.78E-222
			a=0.069 <i>l/m</i> , b=0.08 <i>l/m</i>	X				216.64	0
					X		29.19	63.37E-189	
			a=0.114 <i>l/m</i> , b=0.037 <i>l/m</i>	X			10	22.19	0.17E-108
					X			12.18	0.15E-33
			a=0.069 <i>l/m</i> , b=0.08 <i>l/m</i>	X				22.89	26.28E-117
					X		11.76	24.48E-33	
			a=0.114 <i>l/m</i> , b=0.037 <i>l/m</i>	X			15	11.95	2.81E-33
					X			7.65	8.47E-15
			a=0.069 <i>l/m</i> , b=0.08 <i>l/m</i>	X				0	1
					X		0	1	
Agua de Costa			a=0.179 <i>l/m</i> , b=0.216 <i>l/m</i>	X			5	0	1
					X			28.84	1.87E-183
			a=0.088 <i>l/m</i> , b=0.216 <i>l/m</i>	X				143.51	0
					X		30.00	2.67E-198	
			a=0.179 <i>l/m</i> , b=0.216 <i>l/m</i>	X			10	0	1
					X			0	1
			a=0.088 <i>l/m</i> , b=0.216 <i>l/m</i>	X				6.17	0.33E-9
					X		5.26	66.34E-9	
			a=0.179 <i>l/m</i> , b=0.216 <i>l/m</i>	X			15	0	1
					X			0	1
			a=0.088 <i>l/m</i> , b=0.216 <i>l/m</i>	X				0	1
					X		0	1	
Agua Turbia de puerto			a=0.369 <i>l/m</i> , b=1.824 <i>l/m</i>	X			5	0	1
					X			0	1
			a=0.295 <i>l/m</i> , b=1.875 <i>l/m</i>					0	1

			a=0.369 l/m, b=1.824 l/m	X		10	0	1
				X			0	1
			a=0.295 l/m, b=1.875 l/m				0	1
							0	1
			a=0.369 l/m, b=1.824 l/m	X			0	1
				X			0	1
			a=0.295 l/m, b=1.875 l/m			15	0	1
							0	1
			a=0.369 l/m, b=1.824 l/m				0	1
							0	1
			a=0.295 l/m, b=1.875 l/m				0	1
							0	1

Anexo 8. Evaluación de alcance y calidad de la señal transmitida en el mejor escenario de agua de mar (agua pura de mar, sin turbulencia ni centelleo).

Escenarios	Distancia	Factor Q	BER
Primer diseño del transmisor($\lambda = 445\text{nm}$; 150mW), primer receptor PIN(Si)	7	10.25	0.53E-24
Primer diseño del transmisor($\lambda = 445\text{nm}$; 150mW), segundo receptor PIN(Si)	7	10.40	0.11E-24
Primer diseño del transmisor($\lambda = 445\text{nm}$; 150mW), primer receptor PIN(InGaAs)	1	0	1
Primer diseño del transmisor($\lambda = 445\text{nm}$; 150mW), segundo receptor PIN(InGaAs)	1	0	1
Segundo diseño del transmisor($\lambda = 650\text{nm}$; 30mW), tercer receptor PIN(InGaAs)	1	0	1
Segundo diseño del transmisor($\lambda = 650\text{nm}$; 30mW), segundo receptor PIN(InGaAs)	1	0	1
Segundo diseño del transmisor($\lambda = 650\text{nm}$; 30mW), segundo receptor PIN(Si)	7	6.30	0.14E-9
Segundo diseño del transmisor($\lambda = 650\text{nm}$; 30mW), primer receptor PIN(InGaAs)	1	12.10	0.48E-33
Segundo diseño del transmisor($\lambda = 650\text{nm}$; 30mW), primer receptor PIN(Si)	6	0	1
Primer diseño del transmisor($\lambda = 445\text{nm}$; 150mW), tercer receptor APD(sensibilidad=1 A/W, corriente oscura=0.01nA) (Filtro Gaussiano)	15	6.38	88.81e-12
Segundo diseño del transmisor($\lambda = 650\text{nm}$; 30mW), tercer receptor APD (sensibilidad=1 A/W, corriente oscura=0.01nA)	15	0	1
Primer diseño del transmisor($\lambda = 445\text{nm}$; 150mW), cuarto receptor APD(sensibilidad=1 A/W, corriente oscura=0.01nA) (Filtro Bessel)	15	6.82	4.22E-12
Segundo diseño del transmisor($\lambda = 650\text{nm}$; 30mW), cuarto receptor APD(sensibilidad=1 A/W, corriente oscura=0.01nA)	15	0	1
Primer diseño del transmisor($\lambda = 445\text{nm}$; 150mW), tercer receptor APD(sensibilidad=1.93 A/W, corriente oscura=5 nA) (Filtro Gaussiano)	17	7.14	0.44E-12
Segundo diseño del transmisor($\lambda = 650\text{nm}$; 30mW), tercer receptor APD (sensibilidad=1.93 A/W, corriente oscura=5 nA)	12	7.25	0.020E-12
Primer diseño del transmisor($\lambda = 445\text{nm}$; 150mW), cuarto receptor APD(sensibilidad=1.93 A/W, corriente oscura=5 nA) (Filtro Bessel)	17	7.29	0.14E-12
Segundo diseño del transmisor($\lambda = 650\text{nm}$; 30mW), cuarto receptor APD(sensibilidad=1.93 A/W, corriente oscura=5 nA)	12	7.11	0.56E-12
Tercer diseño del transmisor($\lambda = 650\text{nm}$; 30mW), cuarto receptor(sensibilidad=1 A/W, corriente oscura=0.01nA) (modulación a NRZ)	10	7.39	71.52E-15
Tercer diseño del transmisor($\lambda = 650\text{nm}$; 30mW), cuarto receptor(sensibilidad=1.93 A/W, corriente oscura=5 nA) (modulación a NRZ)	11	8.92	0.22E-18

Tercer diseño del transmisor($\lambda = 445\text{nm}$; 150mW), cuarto receptor(sensibilidad=1 A/W, corriente oscura=0.01nA) (modulación a NRZ)	14	7.29	1.09E-15
Tercer diseño del transmisor($\lambda = 445\text{nm}$; 150mW), cuarto receptor(sensibilidad=1.93 A/W, corriente oscura=5 nA) (modulación a NRZ)	15	10.37	0.15E-24
Tercer diseño del transmisor($\lambda = 650\text{nm}$; 30mW), cuarto receptor(sensibilidad=1 A/W, corriente oscura=0.01nA) (modulación a OFF)	9	6.49	41.19E-12
Tercer diseño del transmisor($\lambda = 650\text{nm}$; 30mW), cuarto receptor(sensibilidad=1.93 A/W, corriente oscura=5 nA) (modulación a OFF)	10	8.12	0.12E-15
Tercer diseño del transmisor($\lambda = 445\text{nm}$; 150mW), cuarto receptor(sensibilidad=1 A/W, corriente oscura=0.01nA) (modulación a OFF)	12	8.12	0.21E-15
Tercer diseño del transmisor($\lambda = 445\text{nm}$; 150mW), cuarto receptor(sensibilidad=1.93 A/W, corriente oscura=5 nA) (modulación a OFF)	14	6.85	2.91E-12
Tercer diseño del transmisor($\lambda = 650\text{nm}$; 30mW), cuarto receptor(sensibilidad=1 A/W, corriente oscura=0.01nA) (modulación a RZ)	7	9.02	86.06E-21
Tercer diseño del transmisor($\lambda = 650\text{nm}$; 30mW), cuarto receptor(sensibilidad=1.93 A/W, corriente oscura=5 nA) (modulación a RZ)	8	9.78	62.13E-24
Tercer diseño del transmisor($\lambda = 445\text{nm}$; 150mW), cuarto receptor(sensibilidad=1 A/W, corriente oscura=0.01nA) (modulación a RZ)	11	6.37	62.13E-24
Tercer diseño del transmisor($\lambda = 445\text{nm}$; 150mW), cuarto receptor(sensibilidad=1.93 A/W, corriente oscura=5 nA) (modulación a RZ)	12	8.39	23.24E-18
Cuarto diseño del transmisor($\lambda = 445\text{nm}$; 150mW), cuarto receptor(sensibilidad=1 A/W, corriente oscura=0.01nA) (modulación a RZ)	11	6.37	88.58E-12
Quinto diseño del transmisor($\lambda = 445\text{nm}$; 150mW), cuarto receptor(sensibilidad=1.93 A/W, corriente oscura=5 nA) (modulación a NRZ)	10	0	0
Diseño del transmisor PSK ($\lambda = 445\text{nm}$; 150mW), cuarto receptor(sensibilidad=1 A/W, corriente oscura=0.01nA) (modulación a PSK)	15	0	1
Diseño del transmisor QAM ($\lambda = 445\text{nm}$; 150mW), cuarto receptor(sensibilidad=1 A/W, corriente oscura=0.01nA) (modulación a QAM)	1	2.82	0.0002
Diseño del transmisor 16 - QAM ($\lambda = 445\text{nm}$; 150mW), cuarto receptor(sensibilidad=1 A/W, corriente oscura=0.01nA) (modulación a QAM)	1		- 0.30

Anexo 9. Certificación de traducción del resumen

Loja, 7 de Mayo de 2024

CERTIFICACIÓN DE TRADUCCIÓN

Doctora.
Erika Lucía González Carrión, Ph.D.

CERTIFICO:

En mi calidad de traductora del idioma Inglés, con capacidades que pueden ser probadas a través de las traducciones realizadas para revistas de alto impacto como: Comunicar(Q1): <https://bit.ly/3v0JggL> así como a través de la Certificación de conocimiento del Inglés, nivel B2, que la traducción del Resumen (Abstract) del Trabajo de Titulación denominado: **“Análisis de sistemas LOS UOWC a través de software de simulación”**, de autoría del estudiante: **Gema Isabel Medranda Cobeña** con CI: **1313371328**, es correcta y completa, según las normas internacionales de traducción de textos.

Es cuanto puedo certificar en honor a la verdad, facultando al interesado, **Gema Isabel Medranda Cobeña**, hacer uso legal del presente, según estime conveniente.

Atentamente,



Dra. Erika González Carrión. Ph.D.