



**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.

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.

**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.

**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

<b>Portada.....</b>	<b>i</b>
<b>Certificación.....</b>	<b>ii</b>
<b>Autoría.....</b>	<b>iii</b>
<b>Carta de autorización.....</b>	<b>iv</b>
<b>Dedicatoria.....</b>	<b>v</b>
<b>Agradecimiento.....</b>	<b>vi</b>
<b>Índice de Contenido.....</b>	<b>vii</b>
<b>Índice de Tablas:.....</b>	<b>ix</b>
<b>Índice de Figuras: .....</b>	<b>x</b>
<b>Índice de Anexos:.....</b>	<b>xi</b>
<b>1. Título.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Resumen.....</b>	<b>2</b>
Abstract.....	3
<b>3. Introducción.....</b>	<b>4</b>
<b>4. Marco Teórico.....</b>	<b>7</b>
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): .....	10



4.2.2. Propiedades Ópticas Aparentes (AOP): .....	11
4.3. Sistema con Línea de Visión Directa (LOS) para Comunicaciones Ópticas inalámbricas Submarinas (UOWC) .....	14
4.4. Análisis de prestaciones del Software Optisystem .....	17
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
<b>5. Metodología.....</b>	<b>31</b>
<b>6. Simulación.....</b>	<b>33</b>
<b>7. Resultados.....</b>	<b>38</b>
<b>8. Conclusiones.....</b>	<b>44</b>
<b>9. Recomendaciones.....</b>	<b>45</b>
<b>10. Bibliografía.....</b>	<b>46</b>
<b>11. Anexos.....</b>	<b>52</b>

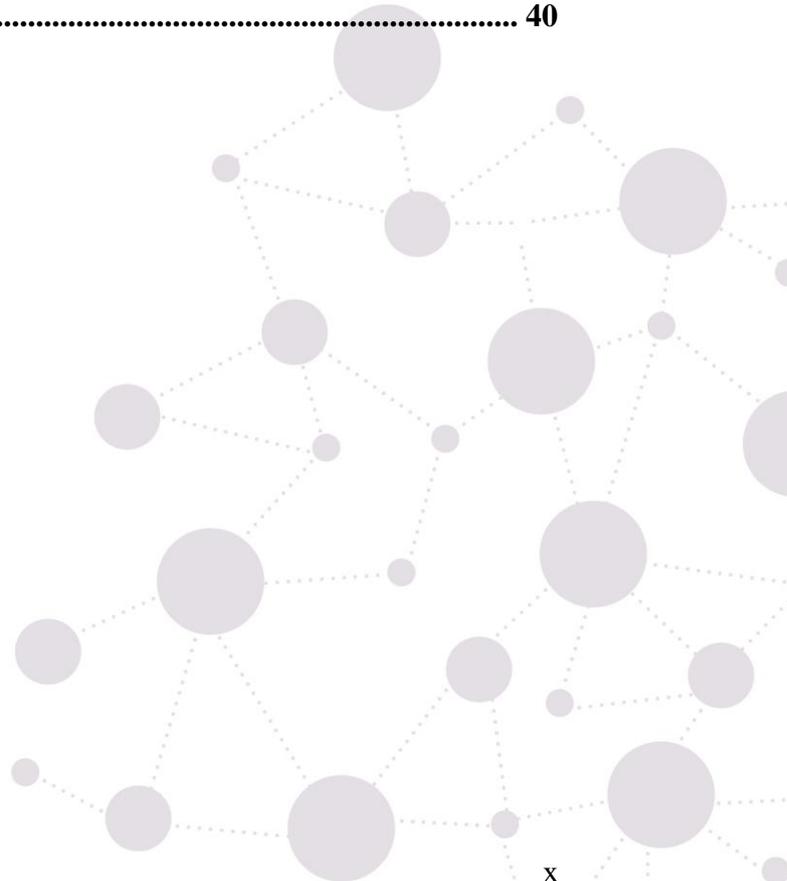


## Índice de Tablas:

<b>Tabla 1.</b> Factores del agua de mar. ....	<b>11</b>
<b>Tabla 2.</b> Expresiones para calcular de las propiedades del agua de mar que intervienen en las comunicaciones ópticas submarinas.....	<b>12</b>
<b>Tabla 3.</b> Ecuaciones de potencia recibida según el tipo de enlace. ....	<b>16</b>
<b>Tabla 4.</b> Absorción, dispersión y coeficiente de extinción de diferentes tipos de agua oceánica .....	<b>22</b>
<b>Tabla 5.</b> Parámetros para simulación del canal considerando IOP del agua de mar, usando los datos para los tipos de agua de mar propuestos en [20]. ....	<b>30</b>
<b>Tabla 6.</b> Parámetros de simulación para el diodo láser y el fotodetector. ....	<b>33</b>
<b>Tabla 7.</b> Resultados obtenidos con los datos de la tabla 4 (valores por default del canal) y los datos de la tabla 6.....	<b>38</b>
<b>Tabla 8.</b> Parámetros obtenidos con los datos de la tabla 4; y los datos de centelleo e índice de refracción $5e^{-12}$ indicado en la tabla 6 .....	<b>38</b>
<b>Tabla 9.</b> Parámetros obtenidos con los datos de la tabla 4; y los datos de centelleo e índice de refracción $5e^{-15}$ indicado en la tabla 6 .....	<b>39</b>
<b>Tabla 10.</b> Parámetros configurados con tabla 5 y 6, para un índice de refracción $5e^{-15}$ .....	<b>39</b>
<b>Tabla 11.</b> Parámetros configurados con tabla 5 y 6, para un índice de refracción $5e^{-12}$ .....	<b>39</b>
<b>Tabla 12.</b> Comparativo del canal. ....	<b>40</b>

## Índice de Figuras:

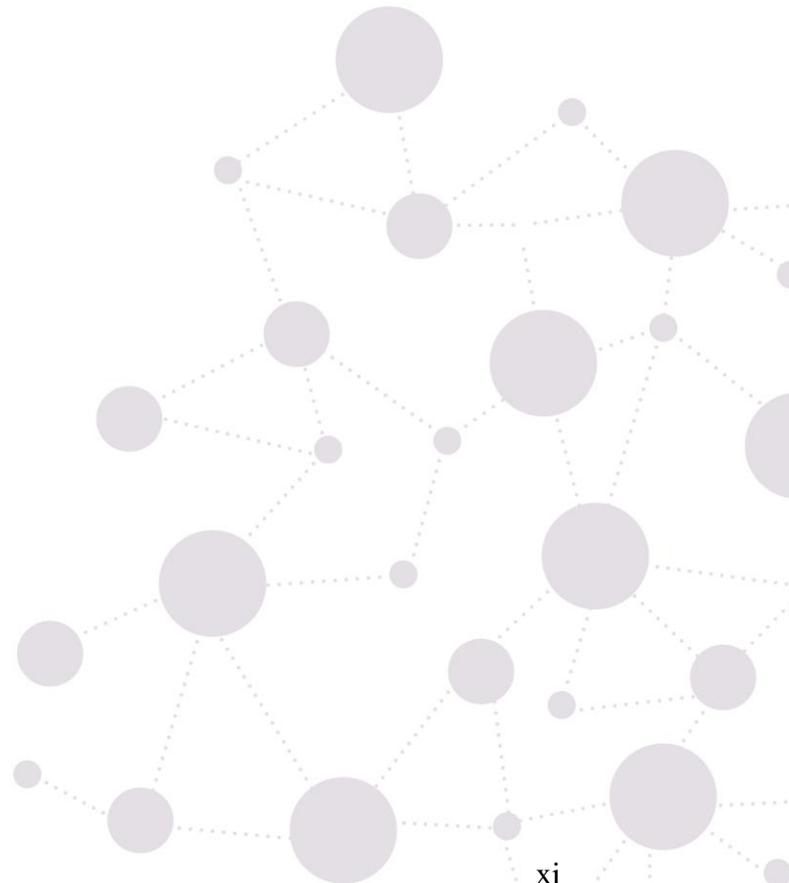
<b>Figura 1.</b> Esquema Básico de un Sistema de Comunicación Óptica inalámbrica Submarina con Línea de Vista Directa.. .....	<b>9</b>
<b>Figura 2.</b> Penetración de la luz en el agua de mar oceánica muy clara.. .....	<b>12</b>
<b>Figura 3.</b> Tipos de enlace LOS: a) Punto a punto, b) LOS difusa, c) LOS MRR [2]....	<b>15</b>
<b>Figura 4.</b> Configuración principal del componente LOS Underwater Channel .....	<b>23</b>
<b>Figura 5.</b> Configuración manual del tipo de atenuación.....	<b>24</b>
<b>Figura 6.</b> Modos de los parámetros del componente LOS submarino de Optisystem ..	<b>25</b>
<b>Figura 7.</b> Configuraciones por default del componente LOS Underwater de Optisystem para el Centelleo .....	<b>26</b>
<b>Figura 8.</b> Configuración del canal con centelleo .....	<b>28</b>
<b>Figura 9.</b> Configuración de la pestaña de simulación del componente LOS submarino de Optisystem .....	<b>29</b>
<b>Figura 10.</b> Diagramas del sistema UOWC para enlaces LOS.. .....	<b>34</b>
<b>Figura 11.</b> Espectro de la señal.....	<b>40</b>





## Índice de Anexos:

<b>Anexo 1.</b> Datos del Fabricante del Diodo Láser Transmisor .....	<b>52</b>
<b>Anexo 2.</b> Datos del Fabricante del Photodetector UPD Series .....	<b>56</b>
<b>Anexo 3.</b> Glosario de Términos .....	<b>59</b>
<b>Anexo 4.</b> Escenarios simulados.....	<b>62</b>
<b>Anexo 5.</b> Certificación de traducción del resumen .....	<b>109</b>



## **1. Título**

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

## 2. Resumen

El análisis de sistemas con línea de vista 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 vista directa.

**Palabras Clave:** *Enlaces submarinos, canales submarinos, línea de vista 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 entre otros; 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 del software Optisystem para las 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 vista 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.

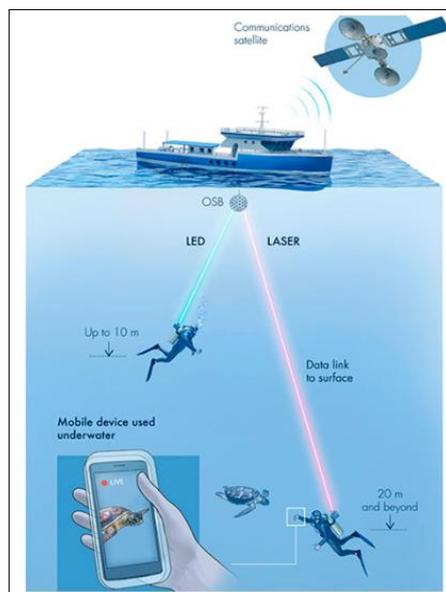
Los sistemas UOWC, son una tecnología que puede transmitir grandes cantidades de datos a una corta distancia entre el transmisor y el receptor, lo que ha causado interés en el ejército, la industria y la academia. Existen diversas técnicas de multiplexación usadas en las comunicaciones ópticas submarinas 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 1a 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 Vista 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 ( $\lambda$ ).

#### 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 vista 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].

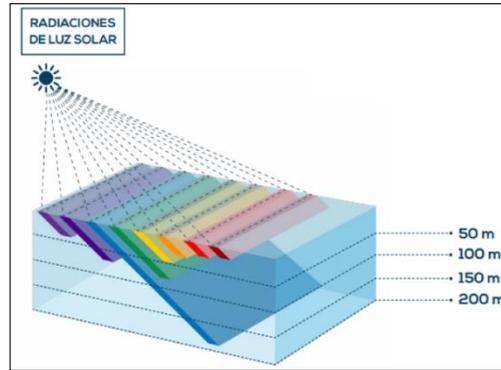
**Tabla 1.**

Factores del agua de mar.

Factor	Descripción
Salinidad	Media del mar es 35 p.s.u o ppt Mediterráneo, que fluye por abajo, tiene La salinidad y los diferentes océanos 38 PSU, y la del Atlántico, que fluye por arriba, tiene solo 36 PSU.
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 costera 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 de 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)	$\Phi(k_x, k_y) = 0.388 * 10^{-8} C_n^2 (\sqrt{k_x^2 + k_y^2})^{-\frac{11}{3}} \left[ 1 + 2.35 (\sqrt{k_x^2 + k_y^2} \eta)^{\frac{2}{3}} \right] x (e^{-AT\delta} + \omega^{-2} e^{-AS\delta} - 2\omega^{-1} e^{-ATs\delta})$ <p> <math>k_x, k_y</math> = frecuencia angular espacial de la fluctuación del índice de refracción en el eje x, y, respectivamente  <math>C_n^2 = 10^{-8} \chi T \epsilon^{-1/3}</math>; <math>AT = 1.863 * 10^{-2}</math>; <math>AS = 1.9 * 10^{-4}</math>; <math>ATS = 9.41 * 10^{-3}</math>; <math>\eta = 1 * 10^{-3} \text{m}</math>  <math>\omega</math> = relación entre la temperatura causada por la turbulencia oceánica y la salinidad su valores son [-5,0].                      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.  <math>\eta</math> = es la microescala de Kolmogorov. <math>\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</math> </p>	[2] [10]
Transferencia radiativa	$L(z, \theta, \phi) = L(0, \theta, \phi) \exp(-Cr) + L_K^E$ <p> <math>L_K^E = \frac{L^E(0, \theta, \phi) \exp(-K * r * \text{Cos}(\theta))}{c - K * \text{Cos}(\theta)} * [1 - \exp(-r(c - K * \text{Cos}(\theta)))]</math> reflexiones o dispersión  <math>z = \text{distancia}</math> </p>	[17] [18] [19] [20] [21]

(2)

	$r = z/\text{Cos}(\theta)$ $\theta = \text{inclinación y } \phi = \text{ángulo azimutal}$ $C = \text{coeficiente de absorción total de la clorofila en } \text{mg m}^{-3}$ $L(0, \theta, \phi) = \text{radiación de la luz}$ $K = \frac{1}{L(z, \theta, \phi)} * \frac{dL(z, \theta, \phi)}{dz}, \text{ coeficiente de atenuación de la radiación}$	
Factor de propagación de pérdidas.	$L_p(\lambda, z) = h * \exp[-c(\lambda) * z]$ $c(\lambda) = \text{representa el coeficiente acumulado de atenuación}$ $h = 6.63 * 10^{-34} \text{Js} ; \text{ constante de Planck}$	[8] [19] [21] [22]
(Beer-Lambert)	$z = \text{distancia}$	(3)
	$a(T, S, C; \lambda) = a_w(T_r, 0; \lambda) + \Psi_T(T - T_r) + \Psi_S S + a_0^c(\lambda) \left(\frac{C}{C_0}\right)^{0.602} + a_f^0 C_f e^{-k_f \lambda} + a_h^0 C_h e^{-k_n \lambda}$	[16] [19] [22]
Coefficiente de absorción	$a_w(T, S; \lambda) = \text{es el coeficiente de absorción de agua pura en } \text{m}^{-1} \text{ con una } \lambda \text{ en nm}$ $T_r = \text{referencia de temperatura}$ $\Psi_S = \text{coeficiente de salinidad y } \Psi_T = \text{coeficiente de temperatura}$ $a_0^c = \text{coeficiente de absorción de la clorofila en } \text{m}^{-1}$ $C = \text{coeficiente de absorción total de la clorofila en } \text{mg m}^{-3}$ $\text{Constantes: } C_c^0 = 1 \text{ mg m}^{-3} ; a_f^0 = 35.959 \text{ m}^2 \text{ mg}^{-1} ; a_h^0 = 18.828 \text{ m}^2 \text{ mg}^{-1} ; k_n = 0.0189 \text{ nm}^{-1} \text{ para } C \text{ y } C_f ; k_n = 0.01105 \text{ nm}^{-1} \text{ para } C_h$	(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]
Coefficiente de dispersión.	$\lambda_0 = \text{referencia de onda de la luz}$ $\beta_\omega(90; T, S; \lambda_0) = \text{volumen de dispersión en función a } 90^\circ$ $\text{la dependencia espectral de:}$ $b_s^0(\lambda) = (1.1513 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}) * \left(\frac{400}{\lambda}\right)^{1.17}$ $b_l^0(\lambda) = (0.3411 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}) * \left(\frac{400}{\lambda}\right)^{0.3}$	(5)
Coefficiente de Atenuación	$c(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda)$ $a(\lambda) = \text{coeficiente de absorción}$ $b(\lambda) = \text{coeficiente de dispersión}$	[8] [17] [21] [22]
Albedo de simple dispersión	$\omega_0 = \frac{b(\lambda)}{c(\lambda)}$ $b(\lambda) = \text{coeficiente de dispersión}$ $c(\lambda) = \text{coeficiente de atenuación}$	[14] [21] [22] (7)

Absorbancia	$A(\lambda) = \varepsilon(\lambda)/C$	[14] [16]
	$\varepsilon(\lambda) = \text{absortividad molar que depende de la longitud de onda}$	(8) [21]
Transmitancia	$T(\lambda) = 10^{-A(\lambda)}$	[14] [22]
	$A(\lambda) = \text{Absorbancia}$	(10)
Modelo	<b>Absorción</b>	[8] [10]
simplificado de	$a(\lambda) = [a_w(\lambda) + 0.06a_c(\lambda)C^{0.65}]\{1 + 0.2\exp[-0.014(\lambda - 440)]\}$	
los coeficientes	<b>Dispersión</b>	
de absorción y		
dispersión	$b(\lambda) = 0.30 \frac{550}{\lambda} C^{0.62}$	(11)

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

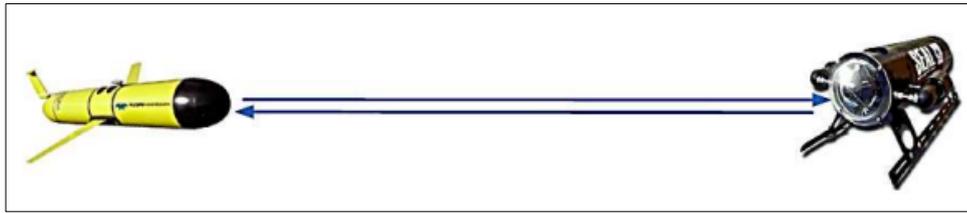
### 4.3. Sistema con Línea de Visión Directa (LOS) para Comunicaciones Ópticas inalámbricas Submarinas (UOWC)

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

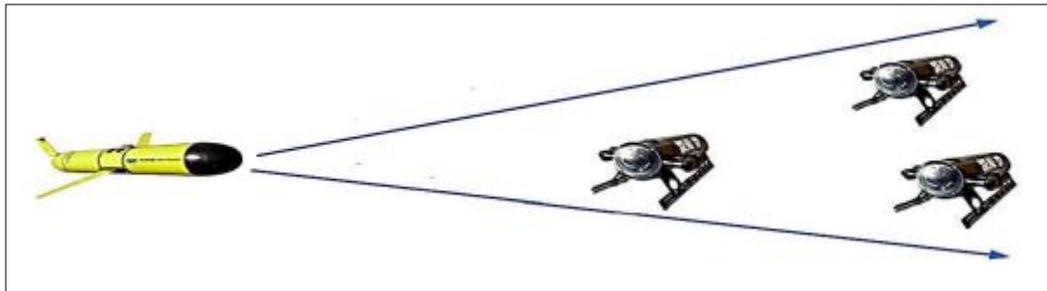
Los enlaces punto a punto son usados para nodos estacionarios, en razón de lo angosto de la apertura de los ángulos de aceptación de los detectores y del haz de luz, por ello se debe mantener una alineación precisa para poder garantizar calidad en la señal; mientras que en LOS difusa tiene estos ángulos 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 retrorreflectores 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.**

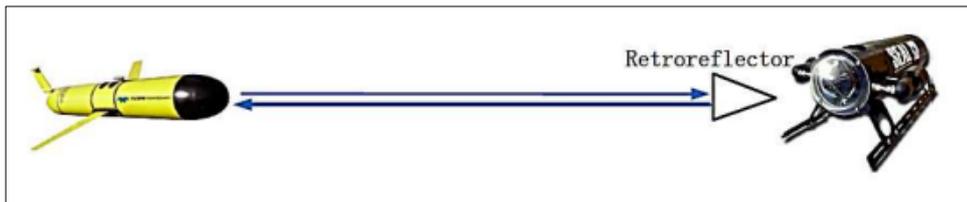
Tipos de enlace LOS: a) Punto a punto, b) LOS difusa, c) LOS MRR [2]



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	$P_r = P_t \eta_t \eta_r e^{-c(\lambda)d} \left( \frac{n^2}{\sin^2 \varphi FOV} \right) T(\varphi) \frac{A_{PD} \cos(\varphi)}{\pi d^2 (\tan \theta)^2} \Pi \left( \frac{\varphi}{\varphi FOV} \right)$ $\theta \ll \frac{\pi}{20}; \Pi \left( \frac{\varphi}{\varphi FOV} \right) = \begin{cases} 1 & \frac{\varphi}{\varphi FOV} \leq 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$ <p style="text-align: right;">(12)</p> <p><i>P<sub>t</sub></i>: Potencia óptica media del transmisor  <i>η<sub>t</sub></i>: Eficiencia óptica del transmisor  <i>η<sub>r</sub></i>: Eficiencia óptica del receptor  <i>d</i>: Alcance del enlace de comunicación entre Tx y Rx  <math>\frac{P_r}{P_t} = e^{-c(\lambda)d}</math>: Perdida del trayecto de propagación.  <i>θ</i>: ángulo de divergencia del haz del transmisor  <i>φ</i>: ángulo de incidencia del haz luminoso del receptor  <i>φ FOV</i>: ángulo del campo de visión del receptor  <i>n</i>: índice de refracción de la lente interna del concentrador en el receptor</p>
Difusa	$P_r = P_t \eta_t \eta_r e^{-c(\lambda)d} \left( \frac{m+1}{2\pi} \right) \cos^m(\theta) G(\varphi) T(\varphi) \frac{A_{PD} \cos(\varphi)}{d^2} \Pi \left( \frac{\varphi}{\varphi FOV} \right)$ <p style="text-align: right;">(13)</p> <p><i>P<sub>t</sub></i>: Potencia óptica media del transmisor  <i>η<sub>t</sub></i>: Eficiencia óptica del transmisor  <i>η<sub>r</sub></i>: Eficiencia óptica del receptor  <i>d</i>: Alcance del enlace de comunicación entre Tx y Rx  <math>\frac{P_r}{P_t} = e^{-c(\lambda)d}</math>: Perdida del trayecto de propagación.  <i>θ</i>: ángulo de divergencia del haz del transmisor  <i>φ</i>: ángulo de incidencia del haz luminoso del receptor  <i>φ FOV</i>: ángulo del campo de visión del receptor  <i>n</i>: índice de refracción de la lente interna del concentrador en el receptor  <i>APD</i>: Área de apertura del receptor activo  <i>m</i>: Orden Lambertiana de la emisión que describe la direccionalidad del haz del transmisor  <i>G(φ)</i>: Ganancia del transmisor óptico</p>

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

$P_t$ : Potencia óptica media del transmisor

$\eta_t$ : Eficiencia óptica del transmisor (14)

$\eta_r$ : 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.

MRR

$\theta$ : ángulo de divergencia del haz del transmisor

$\varphi$ : ángulo de incidencia del haz luminoso del receptor

$\varphi FOV$ : ángulo del campo de visión del receptor

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

$\eta_{MRR}$ : Eficiencia Óptica del catadióptrico

$\theta_{MRR}$ : Ángulo de divergencia del haz del catadióptrico

$A_{MRR}$ : Área de apertura del catadióptrico

---

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, 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

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

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 tiene componentes que calculan el BER y el factor Q, 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, 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 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 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  $\lambda$  es la longitud de onda de la luz 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).*

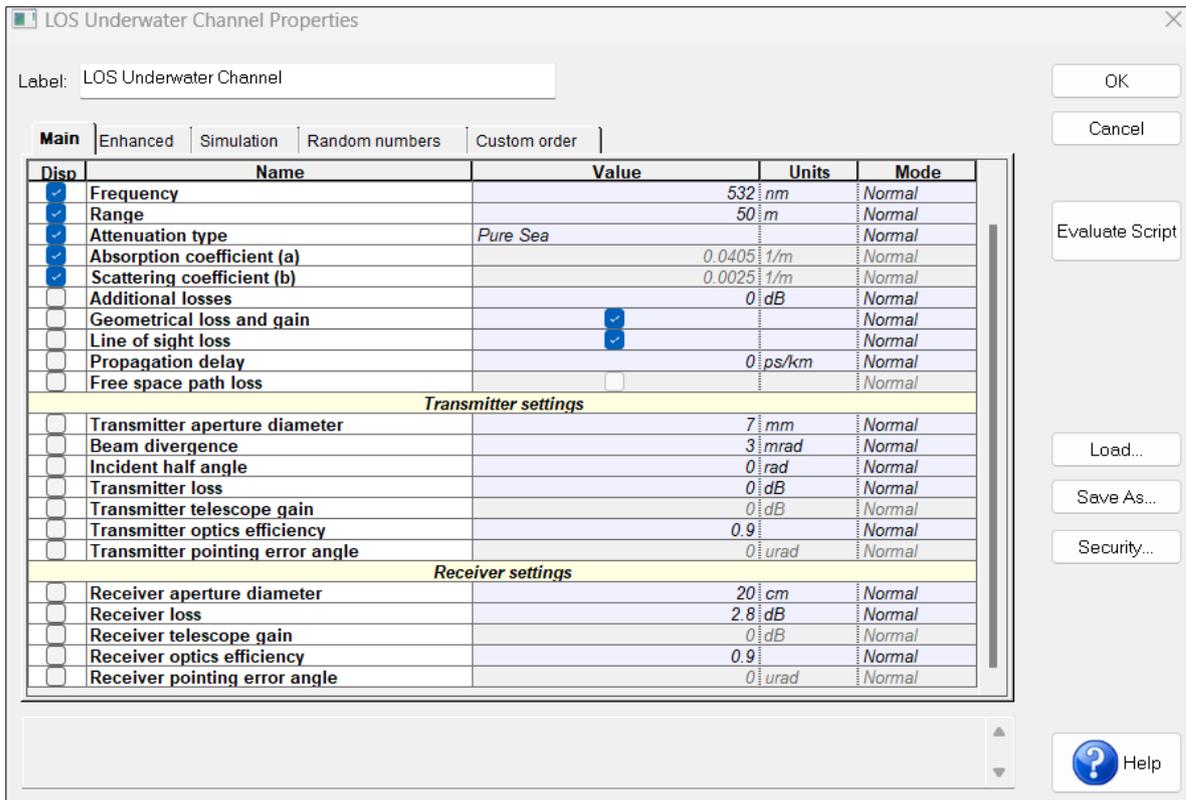
Considerando que el transmisor debe estar perpendicular al receptor, el software utiliza la siguiente ecuación para el cálculo de potencia óptica recibida en el telescopio [11] [25].

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

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.

**Figura 4.**

Configuración principal del componente LOS Underwater Channel



*Fuente: La autora*

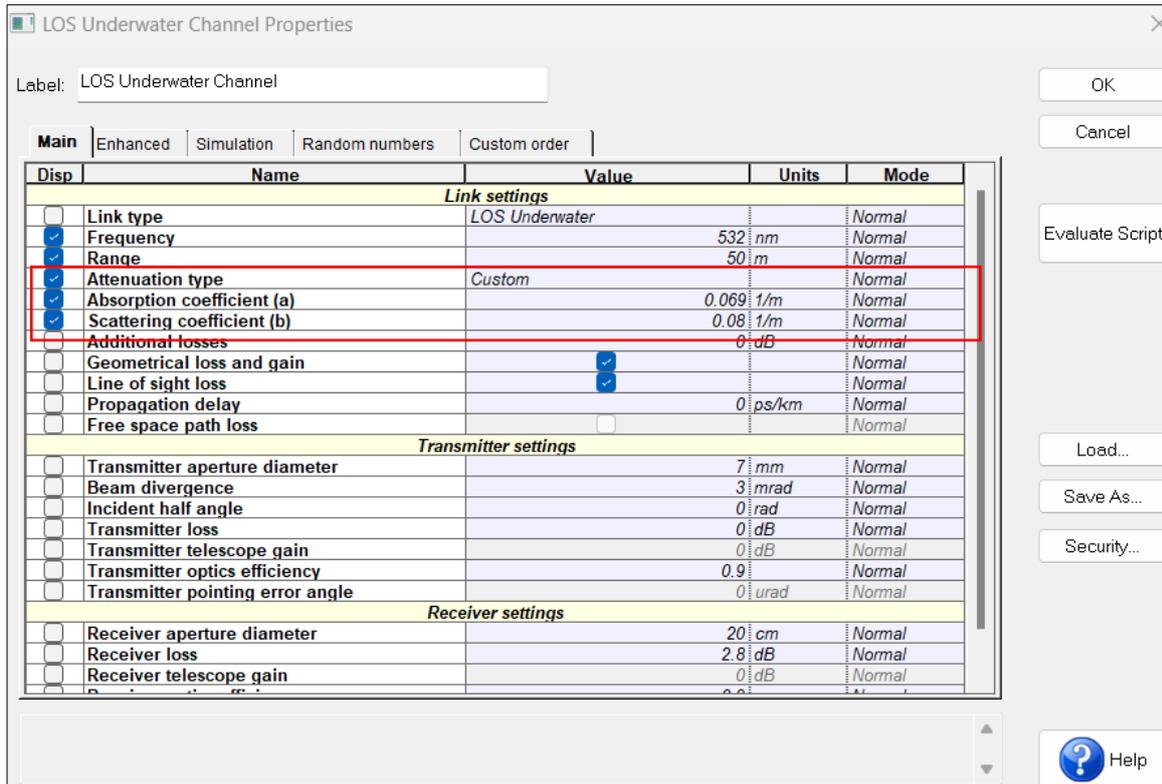
La ventana de configuración principal del software Optisystem que se observa en la figura 4, se divide en 3 secciones. Se muestran las configuraciones del canal, transmisor y receptor.

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 ( $\lambda$ ) que suele ser más común en el agua oceánica debido al fitoplancton por lo cual se dejará configurado en 532 nm.

El tercer parámetro corresponde a la distancia directa perpendicular entre los planos que tienen los telescopios transmisor y receptor, en este caso se ha considerado 50 metros.

**Figura 5.**

Configuración manual del tipo de atenuación.



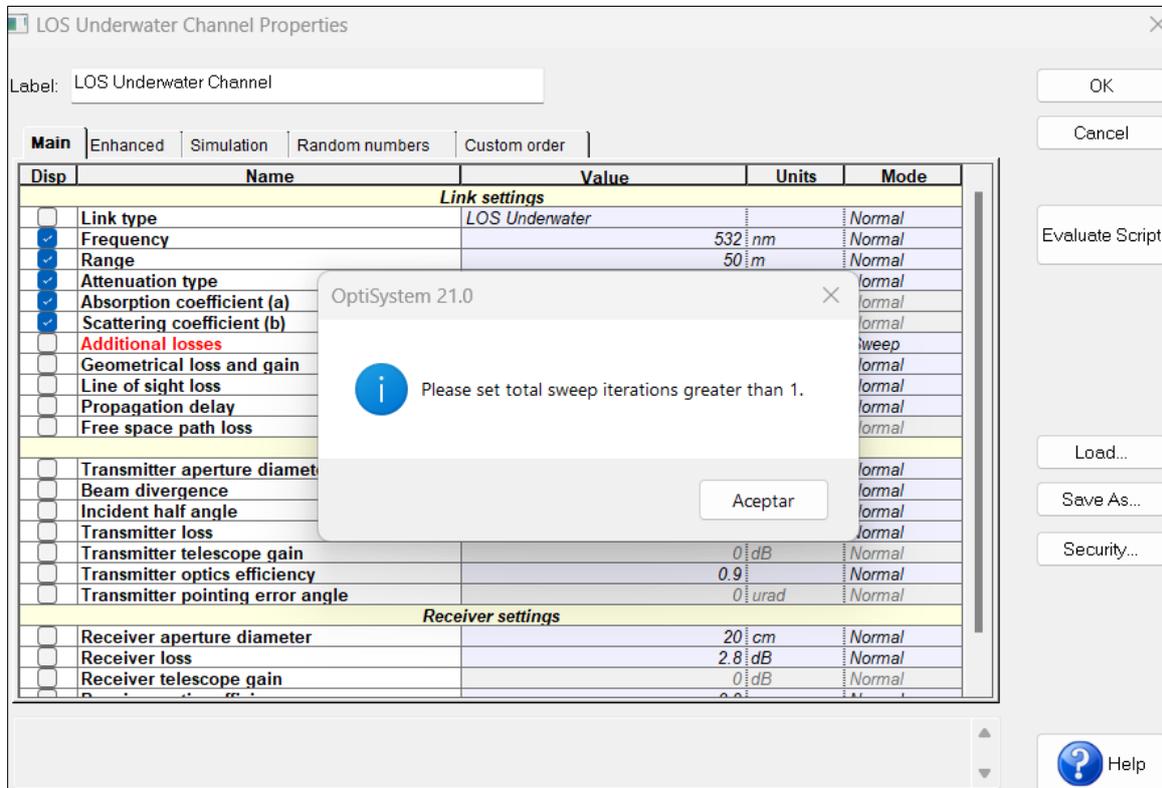
Fuente: La autora

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 and 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

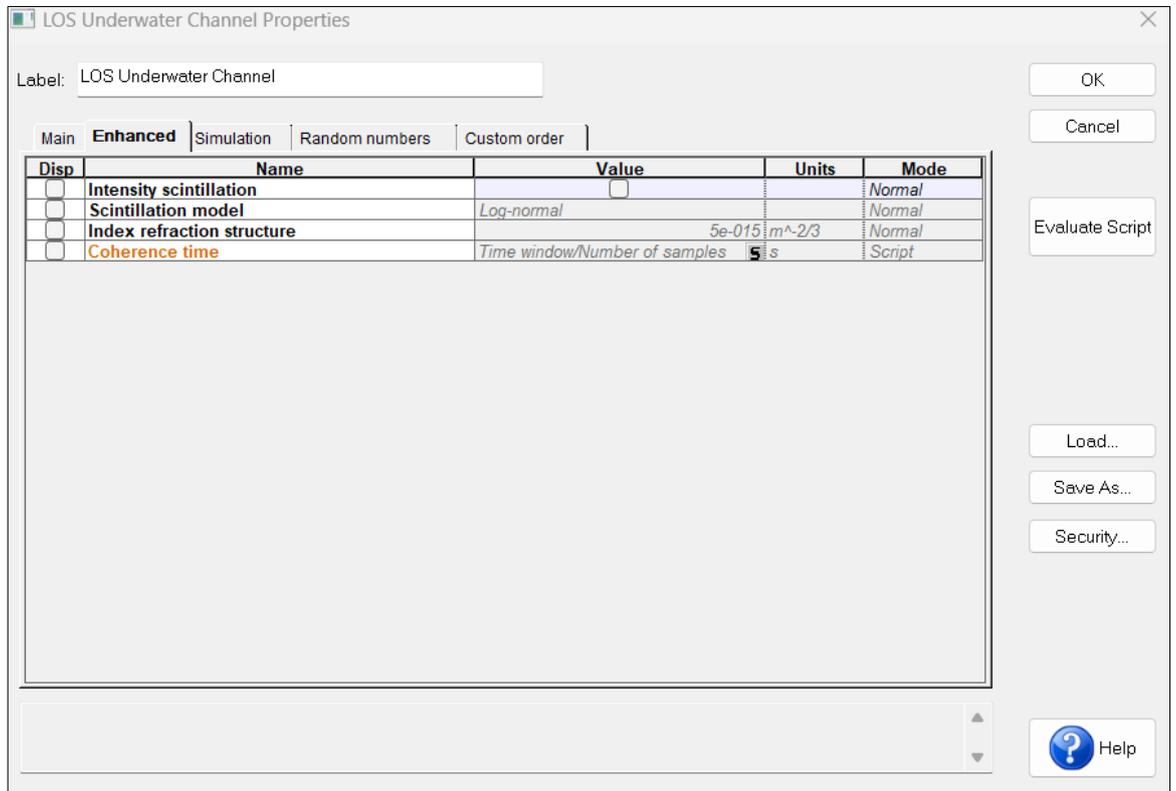


*Fuente: La autora*

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 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



*Fuente: La autora*

En la figura 7, observamos la pestaña de “enhanced” o avanzada para configurar los parámetros que corresponden al centelleo, el primer parámetro es la intensidad del centelleo (intensity scintillation), 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 muestra en la figura 7; la elección del modelo adecuado para caracterizar el centelleo en las telecomunicaciones ópticas

submarinas con línea de vista 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 una mejor opción.

El tercer parámetro de la figura 7, permite especificar el índice de refracción estructurado, que por defecto el componente propone en  $5e^{-15} m^{-2/3}$ . 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 material suspendido.

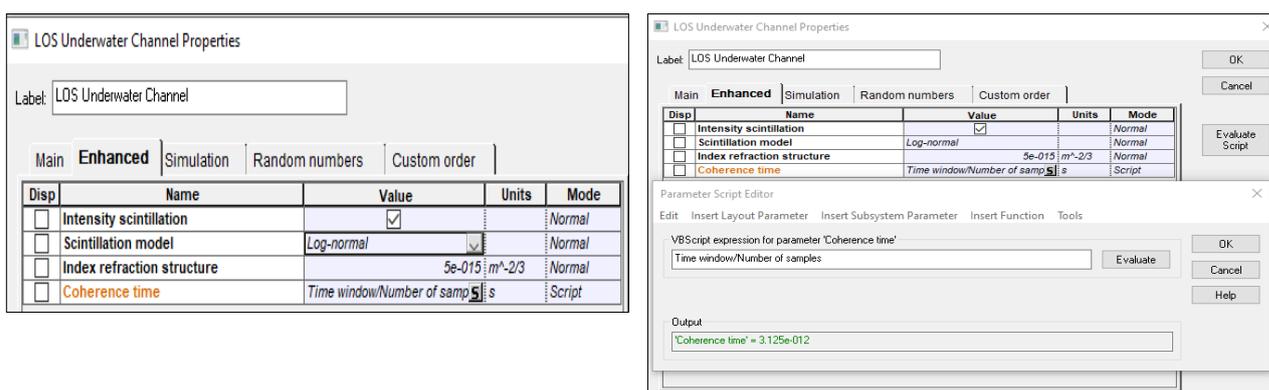
En el último parámetro es un factor esencial para mantener una fase constante de la luz durante un intervalo de tiempo determinado, y se ve impactado por varios factores en entornos submarinos con línea de visión directa. En este contexto, el tiempo de coherencia se ve afectado por la dispersión cromática, que separa los pulsos de luz en sus componentes espectrales debido a la dependencia del índice de refracción del agua ( $n$ ) con la longitud de onda ( $\lambda$ ), reduciendo así la coherencia temporal de la señal.

Además, las turbulencias del agua, generadas por corrientes marinas y olas, pueden 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. Este parámetro se 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**



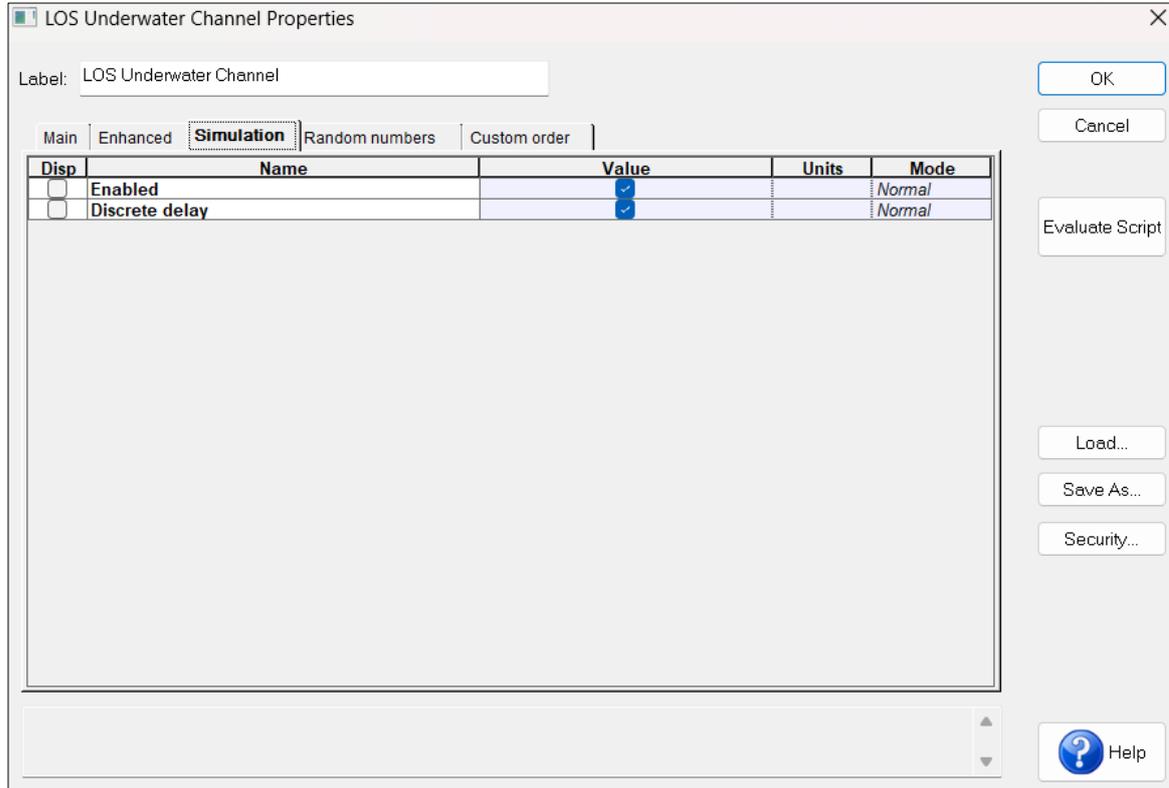
*Fuente: La autora.*

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  $5e^{-13}$ , para un canal con mayor turbulencia, en otras palabras el índice de refracción 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 $\lambda$	532 nm	Modelo de Centelleo	<i>Log - normal</i>	
Índice de refracción estructurado	$5e^{-15}$ $5e^{-13}$	Ángulo de radiación del sol	$0^\circ$	
Configuración del canal del transmisor		Configuración del canal del receptor		
Azimuth $\phi$	$25^\circ$	Ángulo de inclinación $\theta$	$10^\circ$	
Absorción, dispersión, coeficiente de extinción para 3 tipos de agua de mar considerando según $C(mg/m^3)$ (Concentración de partículas) y $\lambda$				
Tipos de agua de mar	$C(mg/m^3)$ [20]	$a(m^{-1})$	$b(m^{-1})$	$c(m^{-1})$
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 vista 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. Simulación.

Para el estudio detallado del canal de comunicación y comprobar como inciden las partículas existentes en el agua de mar, se realizaron simulaciones con el canal definido por el software Optisystem en su componente LOS submarino indicado en la tabla 4 y el propuesto en esta investigación en la tabla 5, para lo cual se consideran tres tipos de agua de mar: agua clara de mar, agua de mar costera y agua de puerto. Se evaluará a distancias entre nodos de: 5, 10 y 15 metros.

**Tabla 6.**

Parámetros de simulación para el diodo láser y el fotodetector.

Parámetros	Valores
Nombre-Modo de Operación del láser comercial	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.	1 GHz
Amplitud del impulso NRZ	1 a.u.
Nombre-Modo de Operación del fotodetector	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

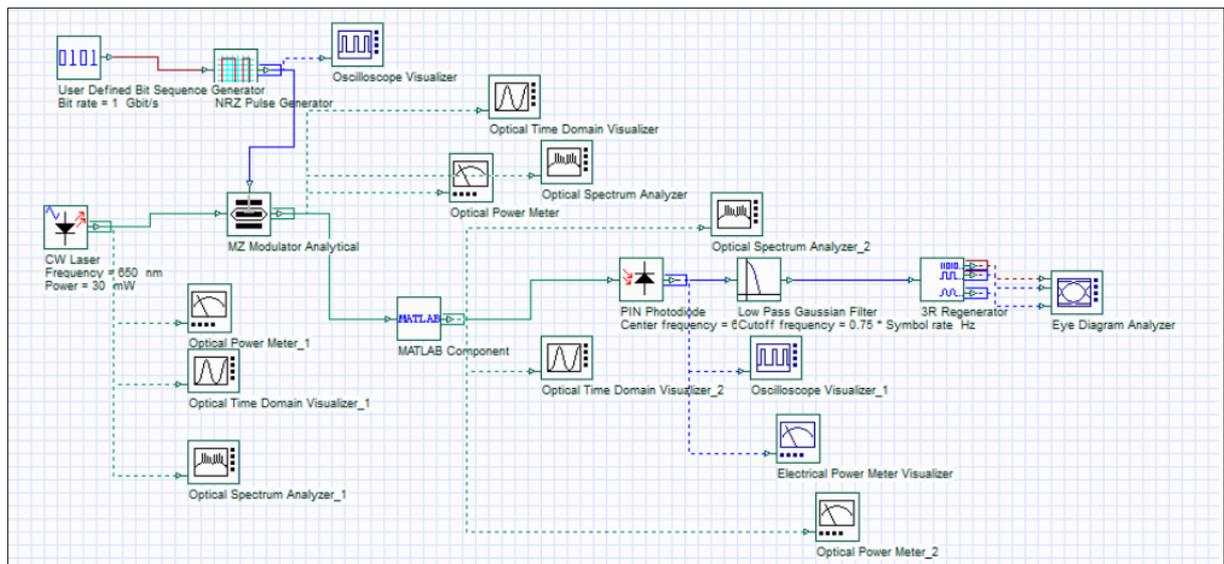
*Fuente: . Datos tomados de LD y APD comerciales [31] [32]*

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. 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, en conjunto con los datos propuestos en esta investigación. El

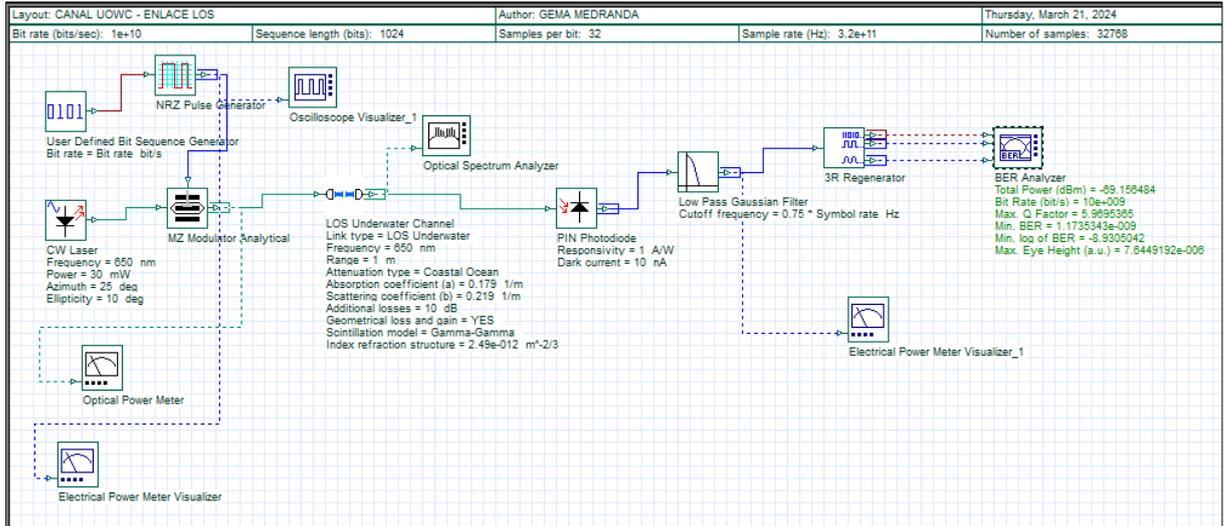
generador de pulso tiene como unidades "a.u." (unidades arbitrarias) típicamente representa el pico de voltaje de los pulsos generados en relación con el nivel de voltaje promedio o de Corriente Continua.

**Figura 10.**

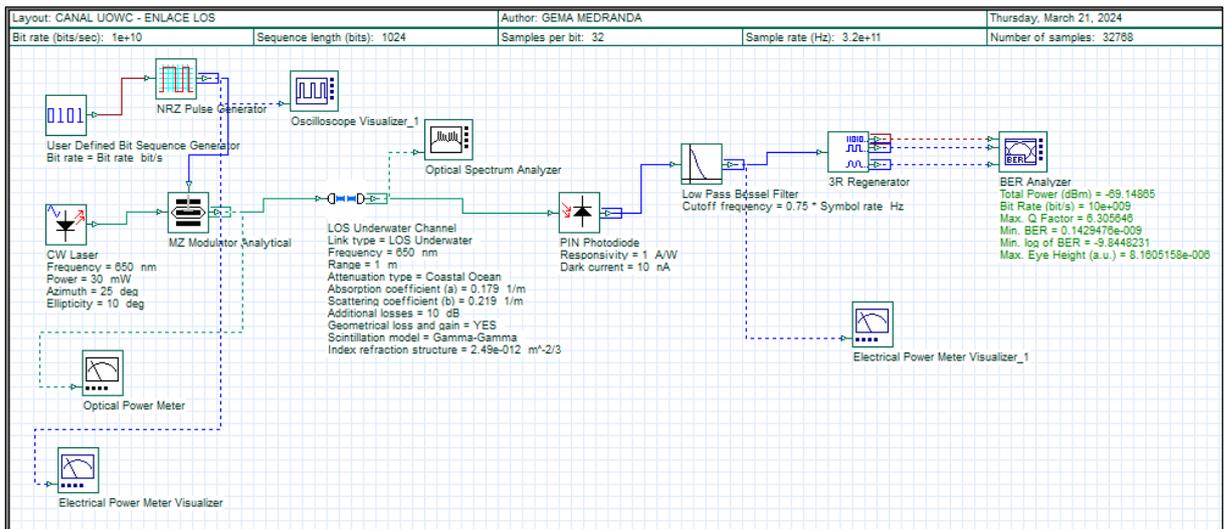
Diagramas del sistema UOWC para enlaces LOS. a) Diagrama LOS submarino con línea de vista directa tomado de [14] cuando debía realizarse mediante un componente de MATLAB y no existía el componente en Optisystem para simular el canal submarino según el tipo de agua de mar, b) Diagrama de bloques basado 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].



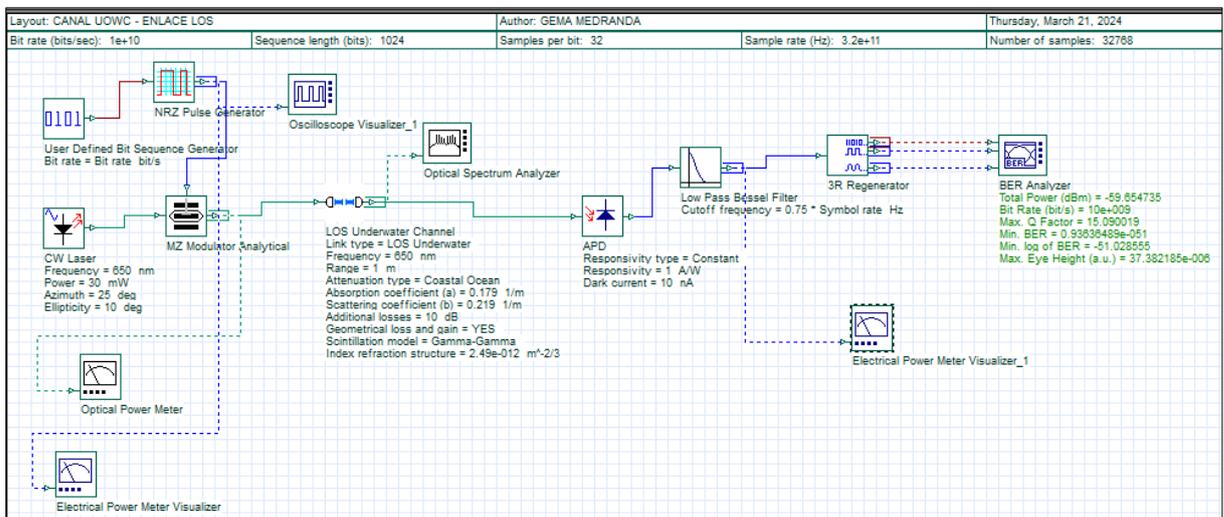
a.



b.



c.



d.

Fuente: La autora

El diagrama de la investigación en [14] contempló para el canal submarino el agua costera de mar; en la figura 5, literal a) el diodo láser transmisor tiene una longitud de onda  $\lambda$ : 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 costera. 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  $\times 10^{-51}$  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. 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.

## 7. Resultados

En el canal submarino con línea de visión directa influyen factores como la turbulencia, la absorción, la dispersión y la atenuación, que pueden afectar a la precisión de las simulaciones. Por ello, es crucial emular el entorno submarino y determinar la respuesta al impulso ajustando los parámetros en las simulaciones del Optisystem para tener en cuenta el tamaño de las partículas y las propiedades únicas del agua de mar.

Es parte del objetivo de esta investigación evaluar y optimizar este tipo de comunicaciones por lo cual se analiza también como afecta en la comunicación submarina de enlace con línea de visión directa, el fenómeno de centelleo y la exclusión de las partículas en los cálculos de absorción y dispersión. Para esto se evalúa el canal a una distancia entre el Tx y el Rx de 5, 10 y 15 metros.

**Tabla 7.**

Resultados obtenidos con los datos de la tabla 4 (valores por default del canal) y los datos de la tabla 6

Valores por default del canal									
Distancia	5 metros			10 metros			15 metros		
Tipo de agua	Agua muy clara de mar	Agua de costa	Agua de Puerto	Agua muy clara de mar	Agua de costa	Agua de Puerto	Agua muy clara de mar	Agua de costa	Agua de Puerto
<b>Max. Q Factor</b>	907.46	446.40	47.83	107.31	14.63	0	15.80	0	0
<b>Min. BER</b>	0	0	0	0	0.87E-048	1	1.54E-42	1	1

Fuente: La autora

**Tabla 8.**

Parámetros obtenidos con los datos de la tabla 4; y los datos de centelleo e índice de refracción  $5e^{-12}$  indicado en la tabla 6

Valores por default del canal con centelleo e índice de refracción $5e^{-12}$									
Distancia	5 metros			10 metros			15 metros		
Tipo de agua	Agua muy clara de mar	Agua de costa	Agua de Puerto	Agua muy clara de mar	Agua de costa	Agua de Puerto	Agua muy clara de mar	Agua de costa	Agua de Puerto
<b>Max. Q Factor</b>	205.61	197.18	41.21	69.20	15.17	0	15.66	0	0
<b>Min. BER</b>	0	0	0	0	0.24e-051	1	0.13e-054	1	1

Fuente: La autora

**Tabla 9.**

Parámetros obtenidos con los datos de la tabla 4; y los datos de centelleo e índice de refracción  $5e^{-15}$  indicado en la tabla 6

Valores por default del canal con centelleo e índice de refracción $5e^{-15}$									
Distancia	5 metros			10 metros			15 metros		
Tipo de agua	Agua muy clara de mar	Agua de costa	Agua de Puerto	Agua muy clara de mar	Agua de costa	Agua de Puerto	Agua muy clara de mar	Agua de costa	Agua de Puerto
Max. Q	591.58	319.43	43.38	107.97	13.74	0	15.73	0	0
Factor									
Min. BER	0	0	0	0	0.28e-042	1	4.69e-048	1	1

Fuente: La autora

**Tabla 10.**

Parámetros configurados con tabla 5 y 6, para un índice de refracción  $5e^{-15}$

Valores del canal configurados con los datos de la tabla 6 para un índice de refracción $5e^{-15}$									
Distancia	5 metros			10 metros			15 metros		
Tipo de agua	Agua muy clara de mar	Agua de costa	Agua de Puerto	Agua muy clara de mar	Agua de costa	Agua de Puerto	Agua muy clara de mar	Agua de costa	Agua de Puerto
Max. Q	821.85	595.89	0	110.28	32.07	0	15.95	0	0
Factor									
Min. BER	0	0	1	0	5.55e-226	1	1.27e-57	1	1

Fuente: La autora

**Tabla 11.**

Parámetros configurados con tabla 5 y 6, para un índice de refracción  $5e^{-12}$

Valores del canal configurados con los datos de la tabla 6 para un índice de refracción $5e^{-12}$									
Distancia	5 metros			10 metros			15 metros		
Tipo de agua	Agua muy clara de mar	Agua de costa	Agua de Puerto	Agua muy clara de mar	Agua de costa	Agua de Puerto	Agua muy clara de mar	Agua de costa	Agua de Puerto
Max. Q	72.70	71.46	0	30.95	25.15	0	12.22	0	0
Factor									
Min. BER	0	0	1	6.88e-211	5.40E-140	1	1.081e-34	1	1

Fuente: La autora

En la tabla 7, se observa como la comunicación es óptima con los valores considerados por el sistema en un ambiente sin turbulencia o centelleos, en contraparte se analizan los valores de las tablas 8 y 9, donde los valores de los coeficientes de absorción,

dispersión y atenuación se mantienen con la configuración por defecto pero se añaden las condiciones de centelleo y turbulencia en diferentes escalas ( $5e^{-12}$  y  $5e^{-15}$ ).

La Tabla 10 y 11 se han plasmado los parámetros de calidad para un canal submarino con partículas en suspensión, dispersión, atenuación, centelleo y turbulencia oceánica (leve y moderada).

**Tabla 12.**

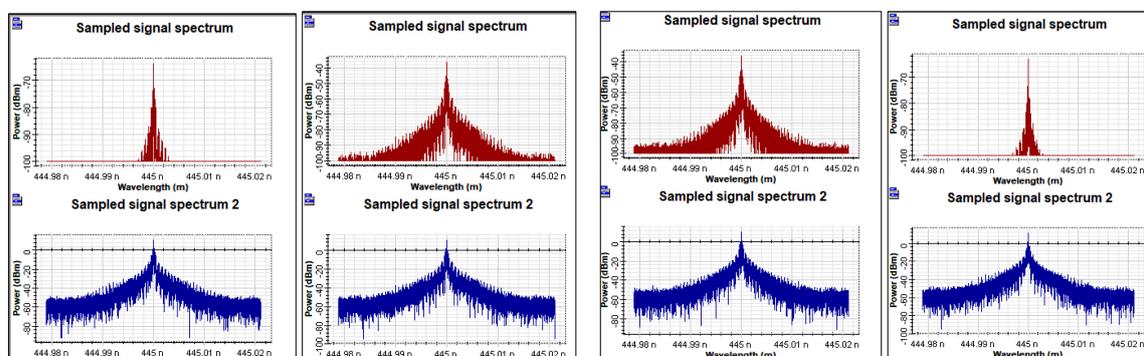
Comparativo del canal correspondiente a agua de puerto y efecto de turbulencia por centelleo e índice de refracción, manteniendo las configuraciones en el diodo láser y el photoreceptor.

Efecto de Centelleo en agua de puerto a su distancia máxima de 6 metros por la configuración			
	Centelleo	Max. Q Factor	Min. BER
Valores por default del componente LOS Underwater	No	9.56	0.58e-020
	$10^{-15}$	9.12	38.48e-021
	$10^{-13}$	8.91	0.25e-018
Configuración del canal según tabla 6	$10^{-15}$	0	0
	$10^{-13}$	1	1

Fuente: La autora

**Figura 11.**

Espectro de la señal con los datos de la tabla 6 para el canal y con los valores por default del componente LOS Underwater de Optisystem, a) con un índice de refracción de  $5e^{-15}$  y b) con un índice de refracción de  $5e^{-12}$



a)

b)

Fuente: La autora

La Figura 11 muestra las características de la señal utilizada en el sistema de comunicación óptica submarina con línea de vista. La fuente de luz es un diodo láser que emite luz azul (445 nm) con una potencia de salida de 150 mW y una divergencia del haz de 3 mrad. Esta configuración permite la transmisión de una secuencia de bits de 1 Gbps. La elección de la luz azul, el uso de un diodo láser, el nivel de potencia y la divergencia del haz se seleccionan cuidadosamente para optimizar la propagación de la señal y la transmisión de datos a través de distancias submarinas, con una sensibilidad en el receptor de 1 A/W.

En la tabla 12 y figura 11, se muestra como al integrar todos los parámetros al canal se ha limitado la comunicación a tan solo 1 metro para agua de puerto. Estos parámetros, esenciales para emular el ambiente submarino y determinar la respuesta al impulso, dependen del tamaño de las partículas y propiedades del agua. En la siguiente sección, se desprecian estos factores para analizar el caso ideal de comunicaciones submarinas de línea de visión directa, evidenciando su impacto en las comunicaciones reales.

El receptor deberá ser de tipo APD (fotodiodo avalancha) 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.

Cuanto más grandes son las células fitoplancton, mayor es el "aplanamiento" del espectro de absorción ( 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].

El tipo del filtro pasabajo mejora notablemente la calidad de la señal, en [11] 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 y se

obtuvo 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, obteniendo valores de 5.96 y 1.17 para Max Q y BER usando filtro Gaussiano en comparación con el filtro Bessel con valores de 6.30 y 0.14 para Max Q y BER respectivamente.

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.

La diferencia entre el valor máximo y el mínimo a la salida del Mach-Zehnder da una idea de cuál es la profundidad de la modulación que el modulador permite obtener, definiéndose como la relación de extinción o ER (Extinction Ratio).

Las propiedades ópticas inherentes al agua de mar, como la absorción y la dispersión, afectan considerablemente a los enlaces de comunicaciones ópticas submarinas con línea de visión directa. 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. 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 subacuáticas sean fiables y de alto rendimiento, es esencial un diseño cuidadoso del sistema que tenga en cuenta los IOP.

Los enlaces submarinos de línea de vista 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,

vagabundeo, expansión y retrodispersión, mientras que las IOPs causan absorción, dispersión y atenuación. 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.

El tipo de agua de mar influye en las comunicaciones ópticas por las propiedades ópticas inherente de las mismas, como se observó en las tablas desde la 7 hasta la 11 la comunicación empeorará entre más cerca se este de la costa; en el tipo de agua muy clara de mar se muestra que aún en condiciones de turbulencia, centelleo y con concentraciones de partículas de  $03.1 \text{ mg/m}^3$  a una 15 metros el factor Q fue de 12.22 con un BER de  $1.08 e^{-34}$  (tabla 11), mientras que para el mismo escenario no se tiene comunicación en los tipos de agua de mar de costa y de puerto; es notable como se reduce la distancia de comunicación a 10 metros en agua de costa con un factor Q fue de 25.15 con un BER de  $5.40e^{-140}$  e incluso a 5 metros no existe comunicación alguna si el agua es de puerto en esas condiciones.

De los resultados es necesario enfatizar que desde las tablas 7 hasta la tabla 9, se esta considerando los parámetros del componente donde las concentraciones de partículas son pequeñas, y se ha ido integrando las condiciones de centelleo y turbulencia  $5e^{-12}$ , por lo cual la comunicación en el agua de puerto a 5 metros si es posible con considerando un factor Q fue de 41.21 con un BER de 0 (tabla 8).

## 8. Conclusiones

En esta investigación se ha estudiado de manera general las comunicaciones ópticas submarinas con enlace de línea de visión directa con el uso del software Optisystem, para evidenciar como los factores de absorción, dispersión y atenuación en el canal de comunicación se afectan. Se obtuvo los datos de las simulaciones de otras investigaciones en las cuales se consideró la salinidad y la temperatura, y ya que en estas no existía el componente LOS Underwater poder someterlo a verificación, en el modelo se consideró las turbulencias de las IOP con modelos matemáticos que constan en el software.

Con los datos obtenidos en las simulaciones, hemos examinado el rendimiento del software con enlaces LOS submarinos, por su escalabilidad es ideal para probar nuevos conceptos que están en desarrollo, así como analizar y potenciar este tipo de comunicaciones, para evaluar el canal y los efectos que pueden producirse se utilizó diferentes concentraciones de clorofila y turbulencias, las cuales juegan un papel importante en la transferencia radiativa submarina y estas a su vez influyen en los niveles o concentraciones de la clorofila y otras partículas presentes en el agua de mar.

En condiciones típicas oceánicas como las propuestas por Optisystem, se omite la turbulencia y al ser magnitudes pequeñas, suelen despreciarse, pero como se evidenció en la tabla 9, 10 y 11 influyendo en el alcance de la comunicación de manera significativa.

Es necesario evaluar los conceptos teóricos, en la práctica y en las simulaciones, Optisystem mantiene un equipo abierto a la integración de observaciones en casos de error en algún aspecto del software, ya sea de forma o de fondo, lo que permite a este sistema ser pionero en la industria.

## **9. Recomendaciones**

Realizar un estudio de las condiciones del canal submarino; de las partículas presentes en el agua así como de las IOP del agua de mar, para una simulación más precisa.

Configurar los componentes del canal submarino tomando como referencia las fichas técnicas de los fabricantes.

## 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](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. Akrouf, 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](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](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](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,” Alphalas.com, 2024. Available: [https://www.alphalas.com/images/stories/products/laser\\_diagnostic\\_tools/Ultrafast\\_Photosensors\\_UPD\\_ALPHALAS.pdf](https://www.alphalas.com/images/stories/products/laser_diagnostic_tools/Ultrafast_Photosensors_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.

## 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](mailto:support@berlinlasers.com).

## Anexo 2. Datos del Fabricante del Photodetector UPD Series

# Ultrafast Photodetectors

*UPD Series*

NEW MODEL S:  
Faster Rise Times & Wider  
Wavelength Ranges



**T**he 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  $\Omega$  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.

**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

**New Models Available: Faster Rise Times & Wider Wavelength Ranges**

- UPD-15-IR2-FC : Ultrafast InGaAs PIN photodetector, rise time < 15 ps, bandwidth > 25 GHz, spectral range 800 - 1700 nm, fiber-coupled input with FC/APC connector
- UPD-35-IR2-P , UPD-35-IR2-D : Ultrafast InGaAs PIN photodetectors, rise time < 35 ps, bandwidth > 10 GHz, spectral range 800 - 1700 nm, with polished or diffuse window
- UPD-35-UVIR-P , UPD-35-UVIR-D : Ultrafast InGaAs PIN photodetectors, rise time < 35 ps, bandwidth > 10 GHz, spectral range 350 - 1700 nm, with polished or diffuse window
- UPD-50-SP , UPD-50-SD , UPD-50-UD , UPD-50-UP : 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-IR1-P : Ultrafast Ge photodetector, rise time < 100 ps, pulsewidth (FWHM) 300 ps, spectral range 400 - 2000 nm
- UPD-3N-IR2-P : Fast InGaAs photodetector, extended infrared range up to 2.1  $\mu$ m, rise time 150 ps
- UPD-5N-IR2-P : Fast InGaAs photodetector, extended infrared range up to 2.6  $\mu$ m, rise time 200 ps

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. $\mu\text{m}$ / $\text{mm}^2$ )	Noise Equiv. Power (W/Hz)	Dark Current (nA)	Material	Optical Input / Window Type <sup>1)</sup>	RF Output Connector Type
UPD-15-IR2-FC	< 15	> 25	800 - 1700	75%	Fiber, 9 $\mu\text{m}$	$1.0 \times 10^{-16}$	0.1	InGaAs	Fiber w. FC/APC <sup>2)</sup>	SMA
UPD-30-V3G-P	< 30	> 10	320 - 900	40%	200x200 / 0.04	$3.0 \times 10^{-16}$	0.1	GaAs	Polished, glass	SMA
UPD-35-IR2-P	< 35	> 10	800 - 1700	80%	55 / 0.0024	$1.0 \times 10^{-16}$	0.3	InGaAs	Polished, glass	SMA
UPD-35-IR2-D	< 35	> 10	800 - 1700	80%	55 / 0.0024	$1.0 \times 10^{-16}$	0.3	InGaAs	Diffuse, quartz	SMA
UPD-35-IR2-FR	< 35	> 10	800 - 1700	80%	55 / 0.0024	$1.0 \times 10^{-16}$	0.3	InGaAs	FC/PC receptacle <sup>3)</sup>	SMA
UPD-35-IR2-FC	< 35	> 10	800 - 1700	80%	Fiber, 9 $\mu\text{m}$	$1.0 \times 10^{-16}$	0.3	InGaAs	Fiber w. FC/APC <sup>2)</sup>	SMA
UPD-35-UVIR-P	< 35	> 10	350 - 1700	80%	55 / 0.0024	$1.0 \times 10^{-16}$	0.3	InGaAs <sup>4)</sup>	Polished, $\text{MgF}_2$	SMA
UPD-35-UVIR-D	< 35	> 10	350 - 1700	80%	55 / 0.0024	$1.0 \times 10^{-16}$	0.3	InGaAs <sup>4)</sup>	Diffuse, quartz	SMA
UPD-40-V3I-P	< 40	> 8.5	500 - 1690	40%	200x200 / 0.04	$3.0 \times 10^{-16}$	5000	InGaAs	Polished, glass	SMA
UPD-40-IR2-P	< 40	> 8.5	800 - 1700	80%	60 / 0.0028	$1.1 \times 10^{-16}$	0.5	InGaAs	Polished, glass	SMA
UPD-40-IR2-D	< 40	> 8.5	800 - 1700	80%	60 / 0.0028	$1.1 \times 10^{-16}$	0.5	InGaAs	Diffuse, quartz	SMA
UPD-40-IR2-FR	< 40	> 8.5	800 - 1700	80%	60 / 0.0028	$1.1 \times 10^{-16}$	0.5	InGaAs	FC/PC receptacle <sup>3)</sup>	SMA
UPD-40-IR2-FC	< 40	> 8.5	800 - 1700	80%	Fiber, 9 $\mu\text{m}$	$1.1 \times 10^{-16}$	0.5	InGaAs	Fiber w. FC/APC <sup>2)</sup>	SMA
UPD-40-UVIR-P	< 40	> 8.5	350 - 1700	80%	60 / 0.0028	$1.1 \times 10^{-16}$	0.5	InGaAs <sup>4)</sup>	Polished, $\text{MgF}_2$	SMA
UPD-40-UVIR-D	< 40	> 8.5	350 - 1700	80%	60 / 0.0028	$1.1 \times 10^{-16}$	0.5	InGaAs <sup>4)</sup>	Diffuse, quartz	SMA
UPD-50-SP	< 50	> 7.0	320 - 1100	45%	100 / 0.0079	$1.2 \times 10^{-16}$	0.001	Si	Polished, glass	SMA
UPD-50-SD	< 50	> 7.0	320 - 1100	45%	100 / 0.0079	$1.2 \times 10^{-16}$	0.001	Si	Diffuse, quartz	SMA
UPD-50-UP	< 50	> 7.0	170 - 1100	45%	100 / 0.0079	$1.2 \times 10^{-16}$	0.001	Si <sup>4)</sup>	Polished, $\text{MgF}_2$	SMA
UPD-50-UD	< 50	> 7.0	170 - 1100	45%	100 / 0.0079	$1.2 \times 10^{-16}$	0.001	Si <sup>4)</sup>	Diffuse, quartz	SMA
UPD-70-IR2-P	< 70	> 5.0	800 - 1700	80%	80 / 0.005	$2.0 \times 10^{-16}$	0.8	InGaAs	Polished, glass	SMA
UPD-70-IR2-D	< 70	> 5.0	800 - 1700	80%	80 / 0.005	$2.0 \times 10^{-16}$	0.8	InGaAs	Diffuse, quartz	SMA
UPD-70-IR2-FR	< 70	> 5.0	800 - 1700	80%	80 / 0.005	$2.0 \times 10^{-16}$	0.8	InGaAs	FC/PC receptacle <sup>3)</sup>	SMA
UPD-70-IR2-FC	< 70	> 5.0	800 - 1700	80%	Fiber, 9 $\mu\text{m}$	$2.0 \times 10^{-16}$	0.8	InGaAs	Fiber w. FC/APC <sup>2)</sup>	SMA
UPD-70-UVIR-P	< 70	> 5.0	350 - 1700	80%	80 / 0.005	$2.0 \times 10^{-16}$	0.8	InGaAs <sup>4)</sup>	Polished, $\text{MgF}_2$	SMA
UPD-70-UVIR-D	< 70	> 5.0	350 - 1700	80%	80 / 0.005	$2.0 \times 10^{-16}$	0.8	InGaAs <sup>4)</sup>	Diffuse, quartz	SMA
UPD-100-IR1-P <sup>5)</sup>	< 100	> 3.0	400 - 2000	80%	80 / 0.005	$3.0 \times 10^{-16}$	700	Ge	Polished, glass	SMA
UPD-200-SP	< 175	> 2.0	320 - 1100	85%	400 / 0.126	$1.5 \times 10^{-16}$	0.001	Si	Polished, glass	BNC
UPD-200-SD	< 175	> 2.0	320 - 1100	85%	400 / 0.126	$1.5 \times 10^{-16}$	0.001	Si	Diffuse, quartz	BNC
UPD-200-UP	< 175	> 2.0	170 - 1100	85%	400 / 0.126	$1.5 \times 10^{-16}$	0.001	Si <sup>4)</sup>	Polished, $\text{MgF}_2$	BNC
UPD-200-UD	< 175	> 2.0	170 - 1100	85%	400 / 0.126	$1.5 \times 10^{-16}$	0.001	Si <sup>4)</sup>	Diffuse, quartz	BNC
UPD-300-SP	< 300	> 1.0	320 - 1100	90%	600 / 0.283	$3.0 \times 10^{-16}$	0.01	Si	Polished, glass	BNC
UPD-300-SD	< 300	> 1.0	320 - 1100	90%	600 / 0.283	$3.0 \times 10^{-16}$	0.01	Si	Diffuse, quartz	BNC
UPD-300-UP	< 300	> 1.0	170 - 1100	90%	600 / 0.283	$3.0 \times 10^{-16}$	0.01	Si <sup>4)</sup>	Polished, $\text{MgF}_2$	BNC
UPD-300-UD	< 300	> 1.0	170 - 1100	90%	600 / 0.283	$3.0 \times 10^{-16}$	0.01	Si <sup>4)</sup>	Diffuse, quartz	BNC
UPD-500-SP	< 500	> 0.6	320 - 1100	90%	800 / 0.5	$3.5 \times 10^{-16}$	0.01	Si	Polished, glass	BNC
UPD-500-SD	< 500	> 0.6	320 - 1100	90%	800 / 0.5	$3.5 \times 10^{-16}$	0.01	Si	Diffuse, quartz	BNC
UPD-500-UP	< 500	> 0.6	170 - 1100	90%	800 / 0.5	$3.5 \times 10^{-16}$	0.01	Si <sup>4)</sup>	Polished, $\text{MgF}_2$	BNC
UPD-500-UD	< 500	> 0.6	170 - 1100	90%	800 / 0.5	$3.5 \times 10^{-16}$	0.01	Si <sup>4)</sup>	Diffuse, quartz	BNC
UPD-3N-IR2-P	< 150 <sup>6)</sup>	> 0.4 <sup>6)</sup>	800 - 2100	75%	300 / 0.07	$1.5 \times 10^{-16}$	90	InGaAs	Polished, glass	BNC
UPD-5N-IR2-P	< 200 <sup>6)</sup>	> 0.3 <sup>6)</sup>	800 - 2600	70%	300 / 0.07	$7.0 \times 10^{-17}$	2000	InGaAs	Polished, glass	BNC
UPD-2M-IR2-P	< 75000	> 0.004	900 - 1700	80%	2000 / 3.14	$4.0 \times 10^{-14}$	5	InGaAs	Polished, glass	BNC
UPD-2M-IR2-P-ITEC <sup>7)</sup>	< 75000	> 0.004	900 - 1700	75%	2000 / 3.14	$1.0 \times 10^{-14}$	0.3	InGaAs	Polished, glass	BNC

Notes: <sup>1)</sup> 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.

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

<sup>3)</sup> With TEC cooling module, non-standard housing.

<sup>4)</sup> Modified material with increased blue / UV sensitivity.

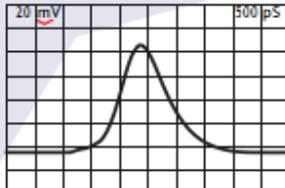
<sup>5)</sup> Not compatible with the optional filter holder.

<sup>6)</sup> Greatly improved performance.

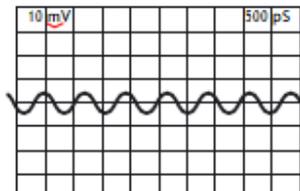
Lasers, Optics, Electronics  
MADE IN GERMANY  
WWW.ALPHALAS.COM



## Ultrafast Photodetectors



High fidelity pulse for measurement with UPD-200-SP and 1 GHz oscilloscope. The light source is our PULSELASER-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

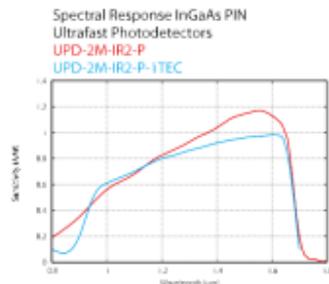
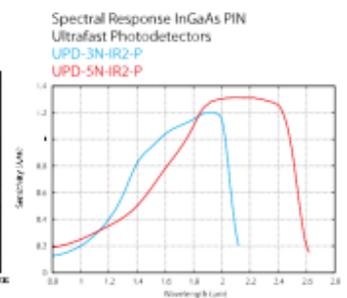
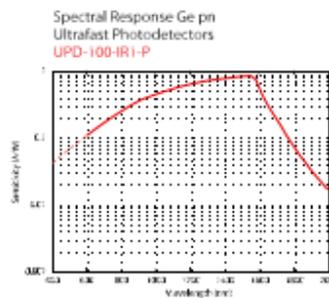
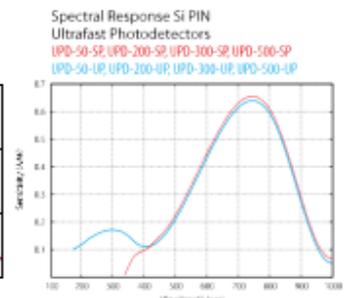
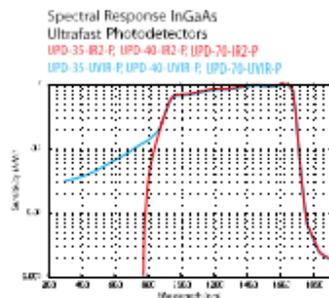
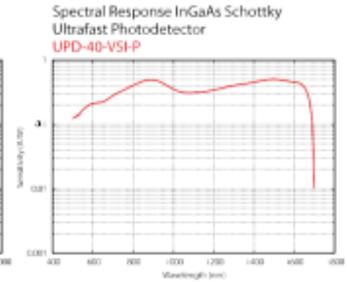
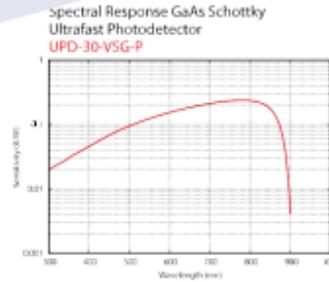
**Low-Noise Power Supplies**  
Worldwide Usage  
Input: 100 - 240 V AC

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**  
6V  
Model: BAT-UPD-6V



### Related Products

- Broadband Amplifiers BBA Series (amplitude gain:  $\times 10$ ,  $\times 100$  or variable  $\times 1-100$ )
- BNC 50  $\Omega$  Terminating Load
- SMA (male) to BNC (female) Adapter
- SMA to SMA Adapter
- Attenuator Filter Adapter

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

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

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



### **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.

**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.

**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.

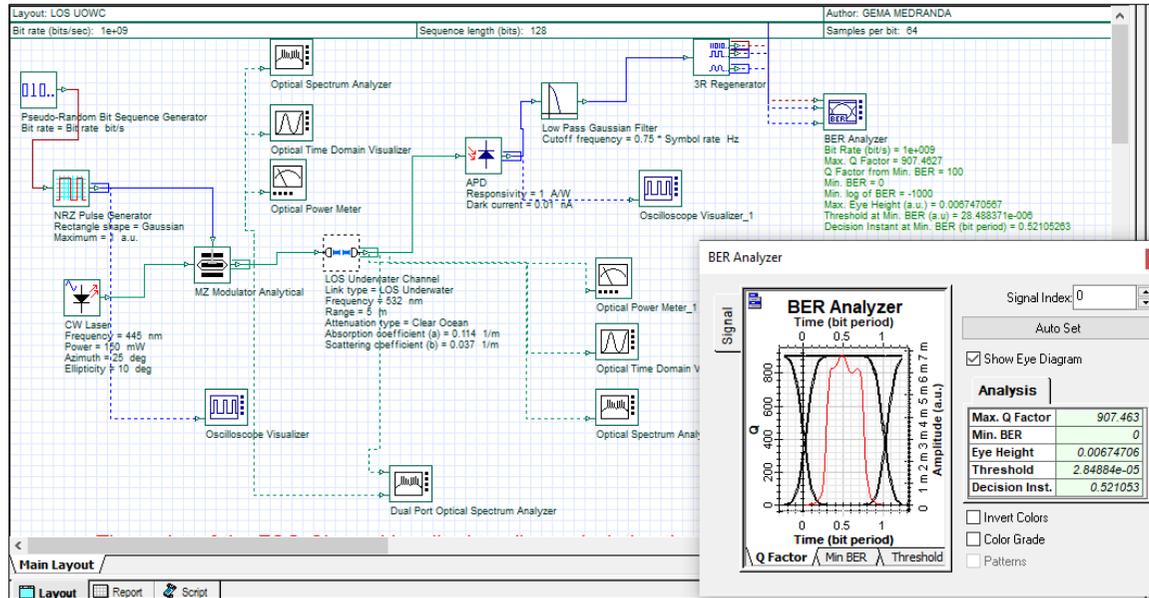
**TLMM: Transmission Line Matrix Method** (Método de Matriz de Líneas de Transmisión). Es un método numérico para analizar el comportamiento de las ondas electromagnéticas en estructuras de guía de ondas.

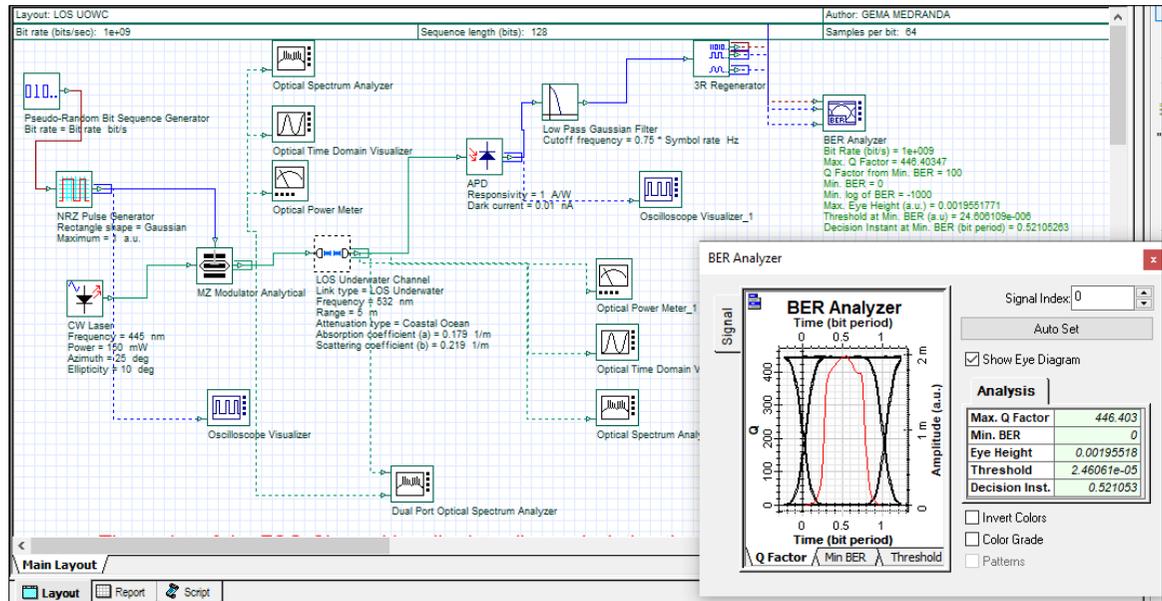
**UUV: Unmanned Underwater Vehicle** (Vehículo Submarino No Tripulado). Son vehículos que operan bajo el agua sin necesidad de un piloto humano a bordo.

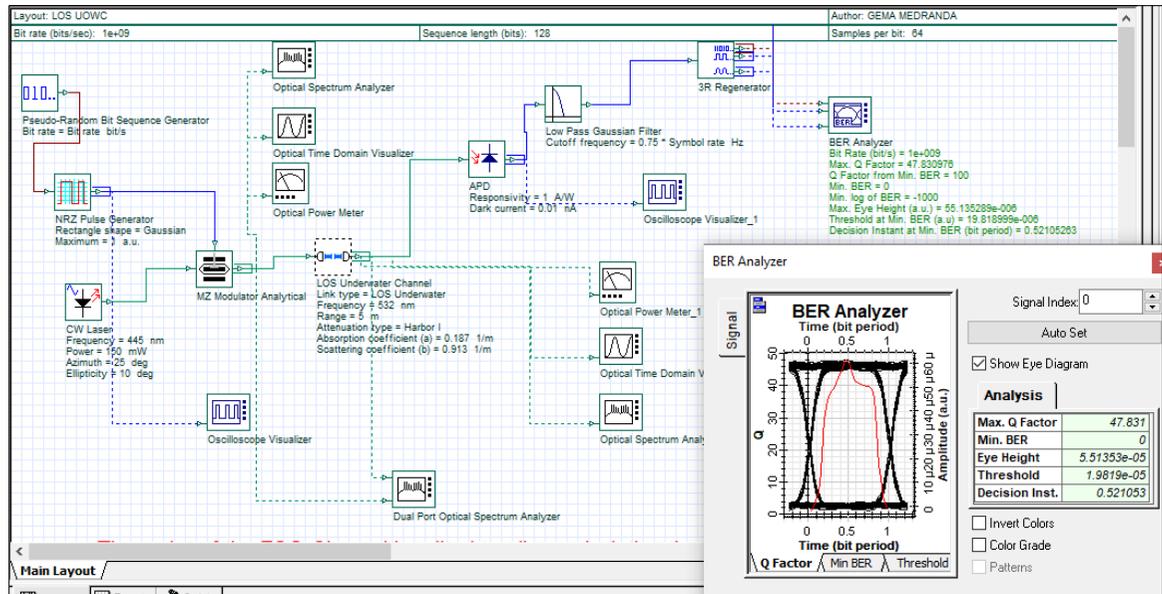
**VCSEL: Vertical Cavity Surface Emitting Laser**( Láser de emisión vertical por cavidad superficial). Fuente de luz compacta y eficiente para comunicaciones submarinas.

## Anexo 4. Escenarios simulados

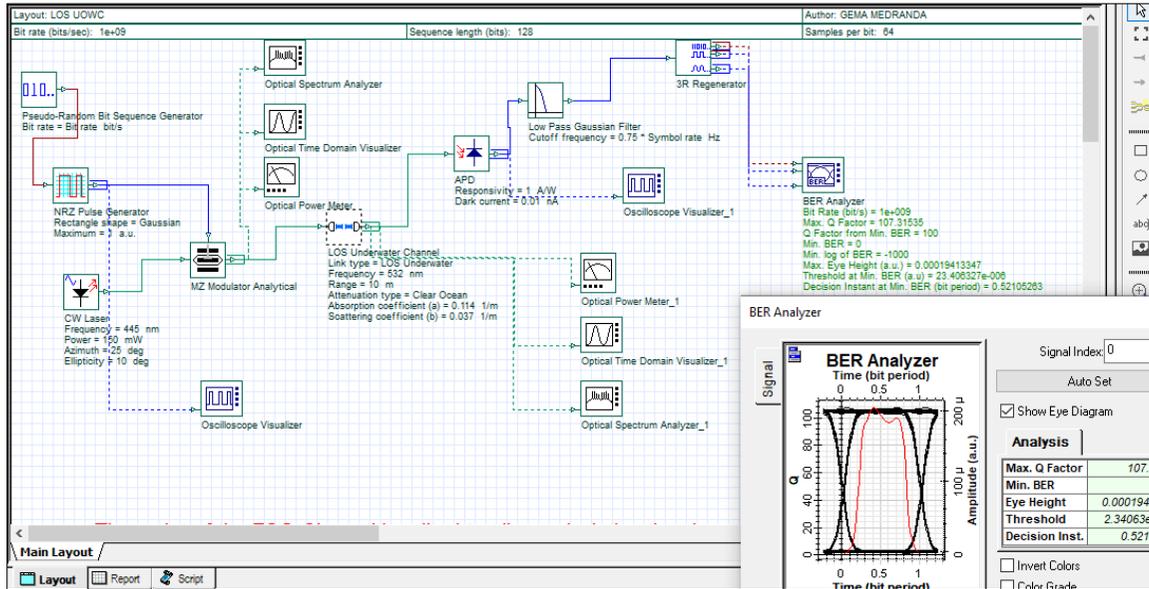
### 5 METROS

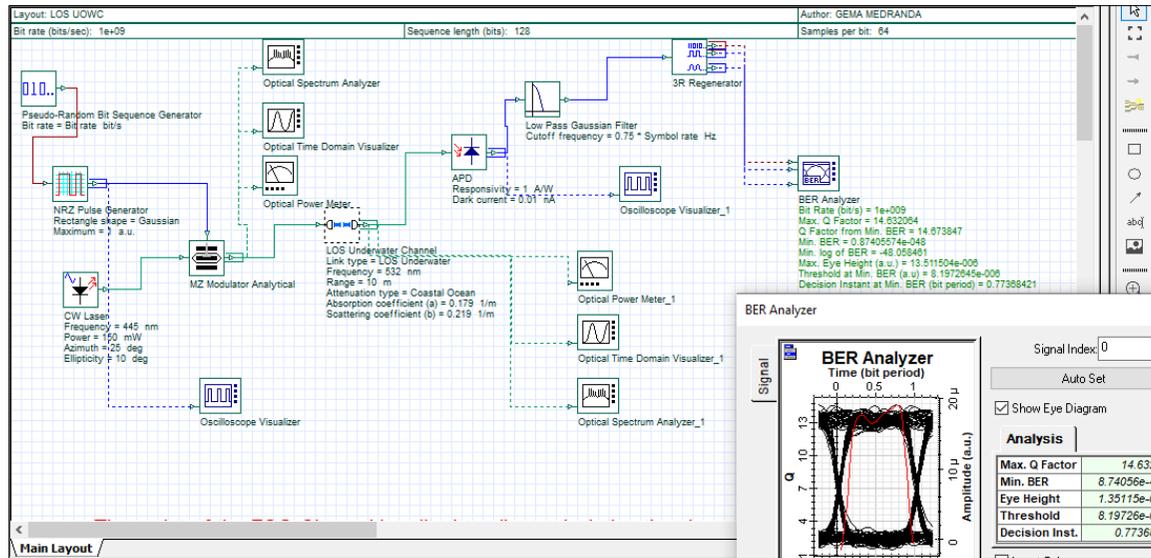






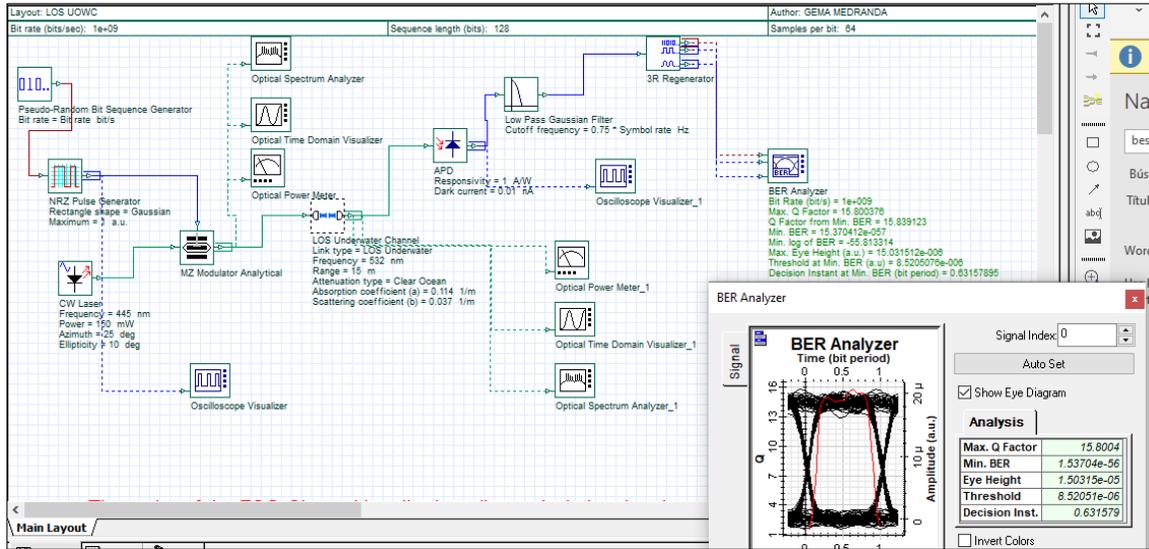
# 10 METROS

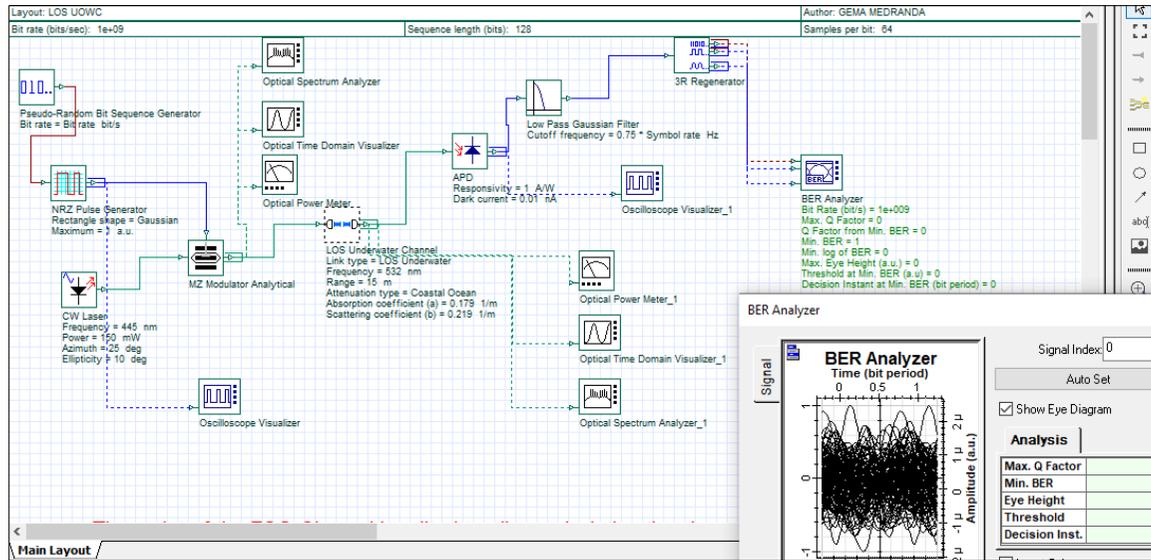


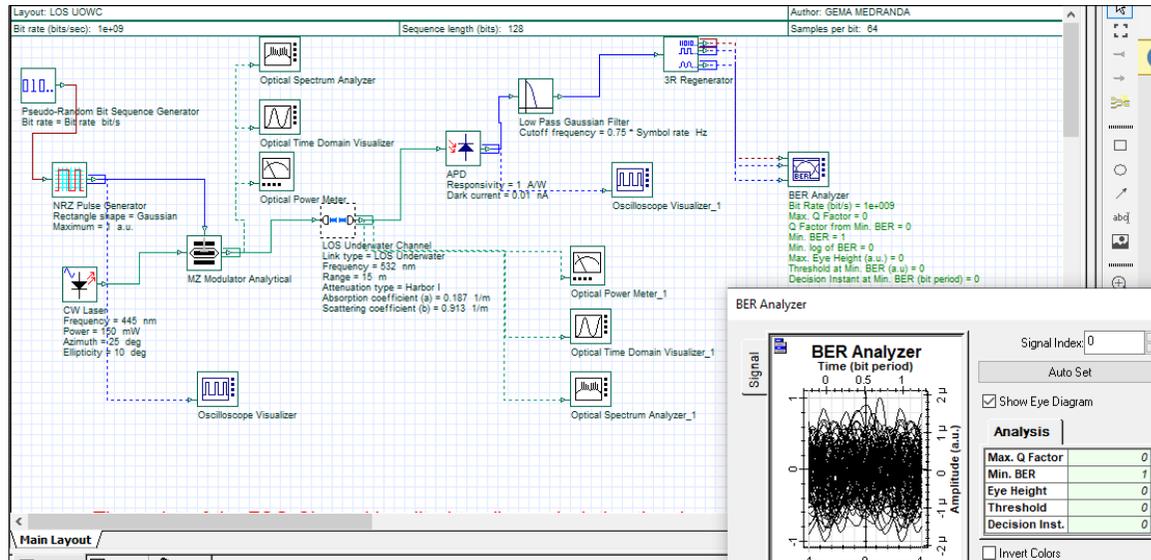




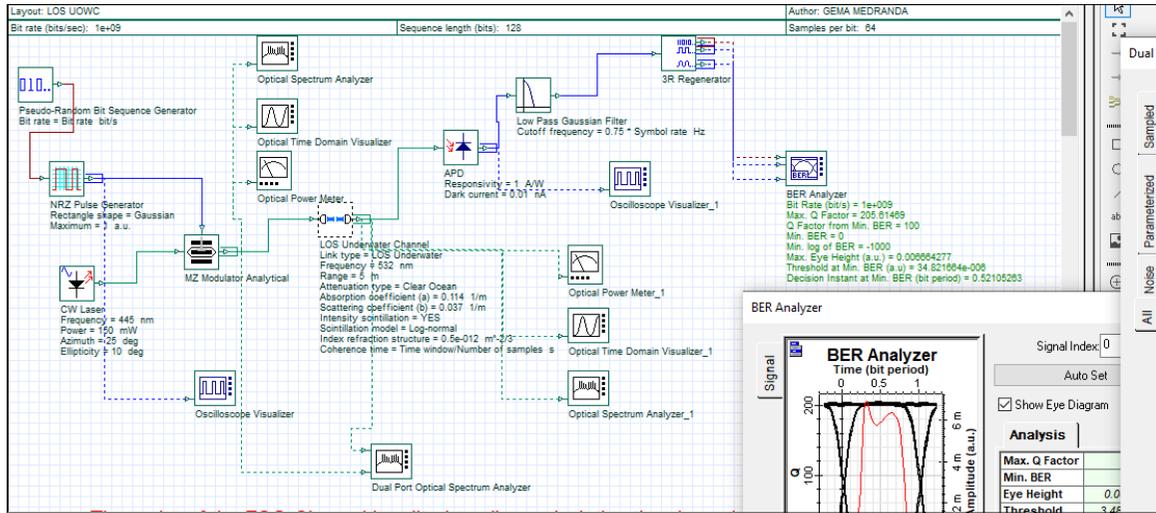
# 15 METROS

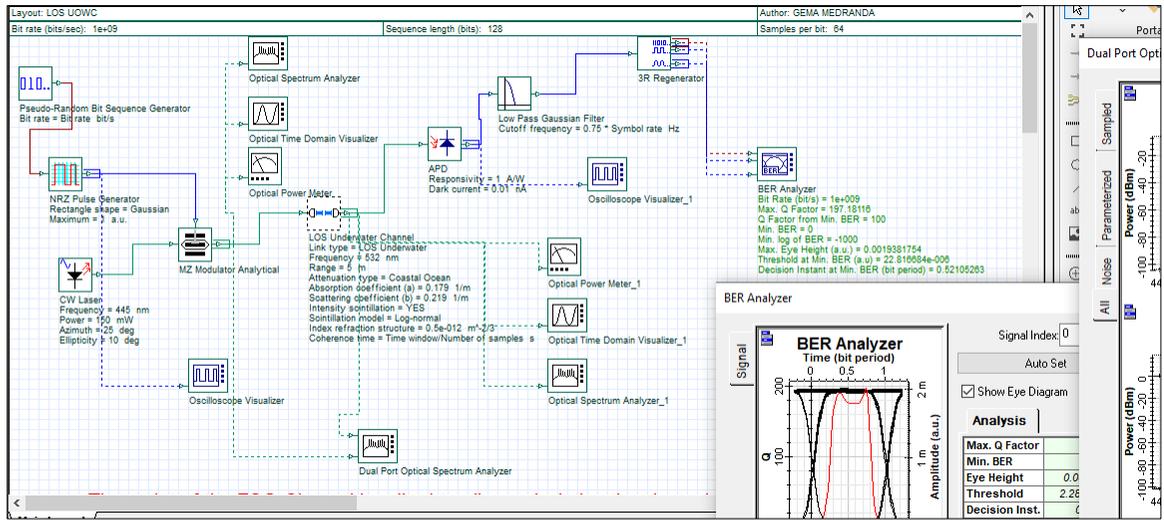


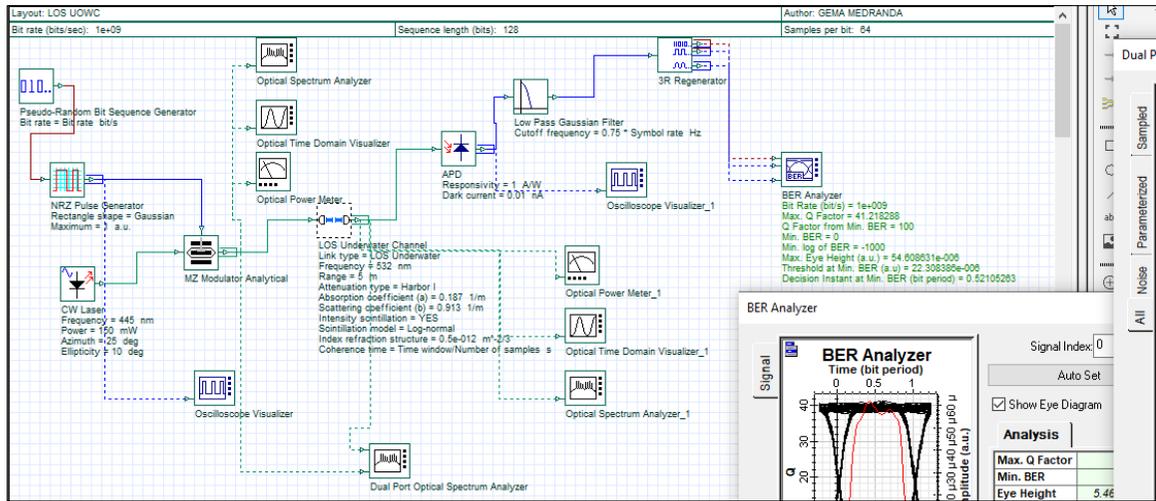




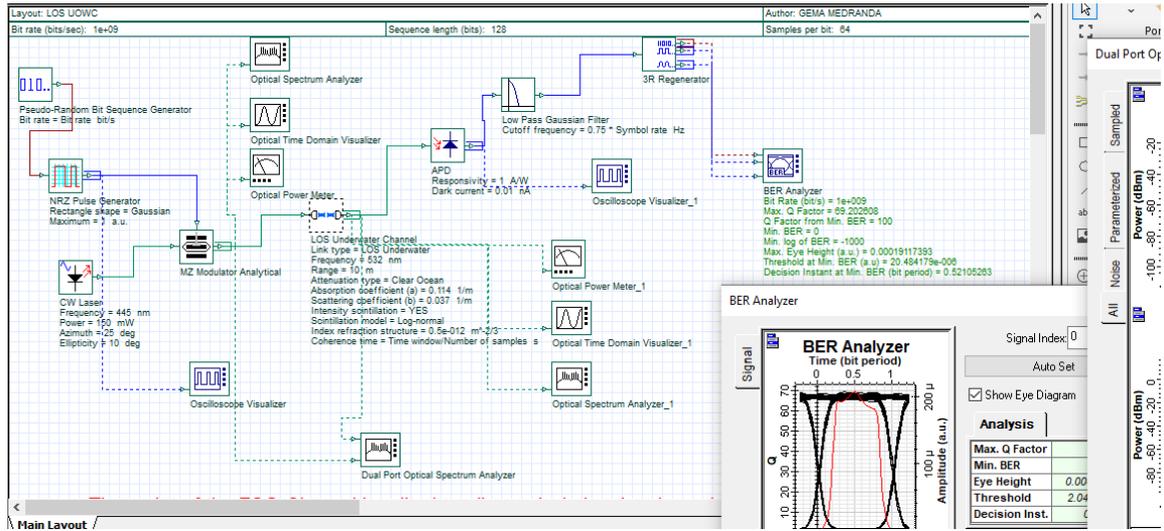
CON CENTELLEO- MANTENIENDO LOS VALORES POR DEFAULT DEL COMPONENTE 5 METROS E INDICE DE REFRACCIÓN -12

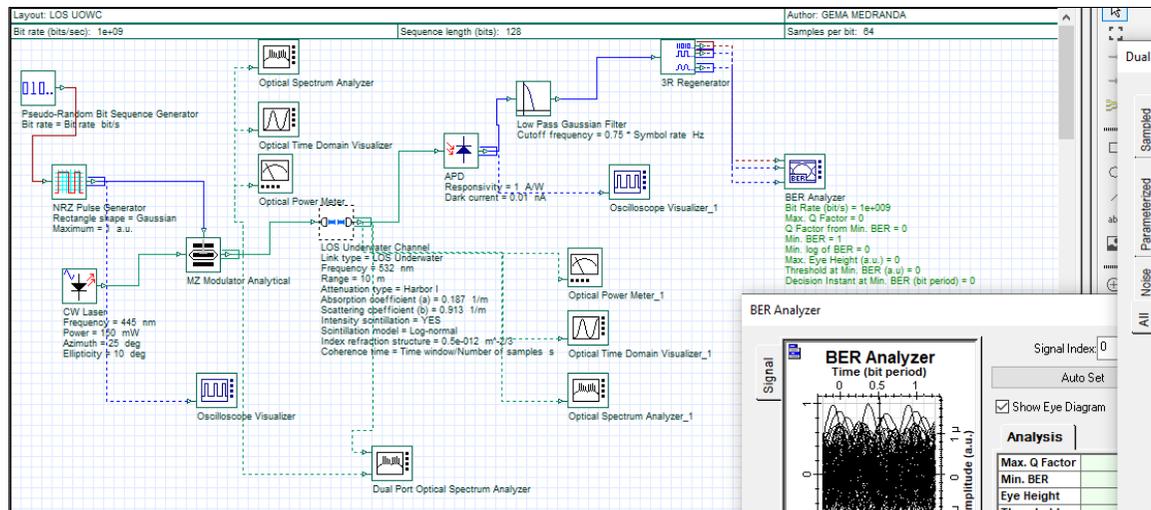
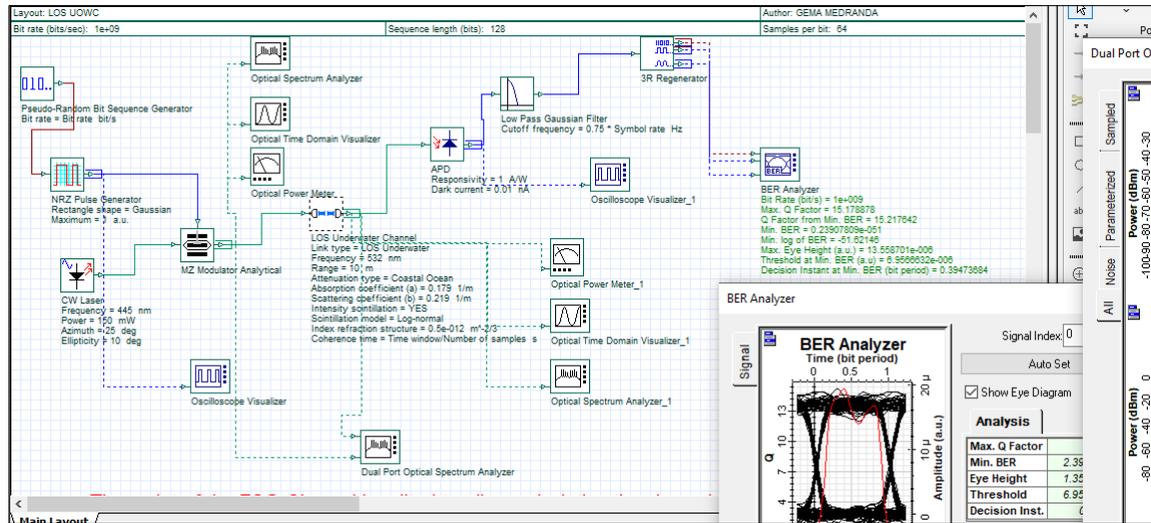




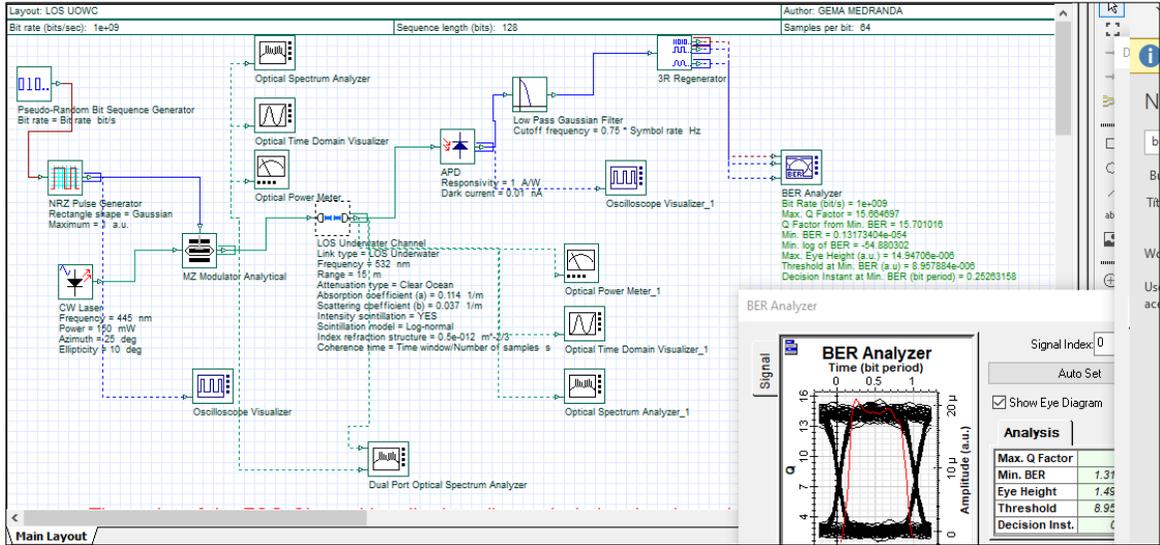


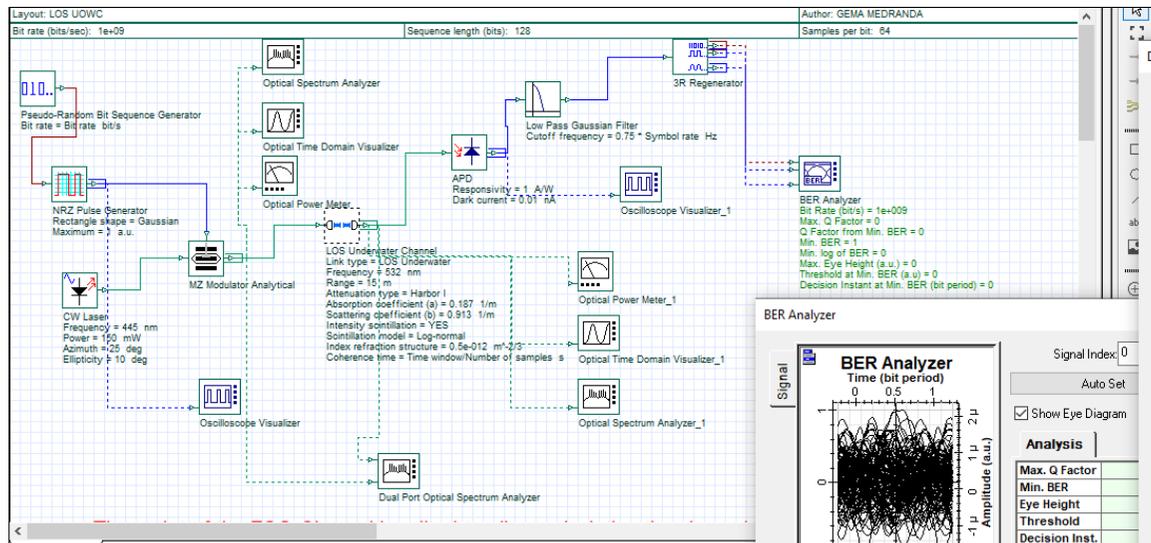
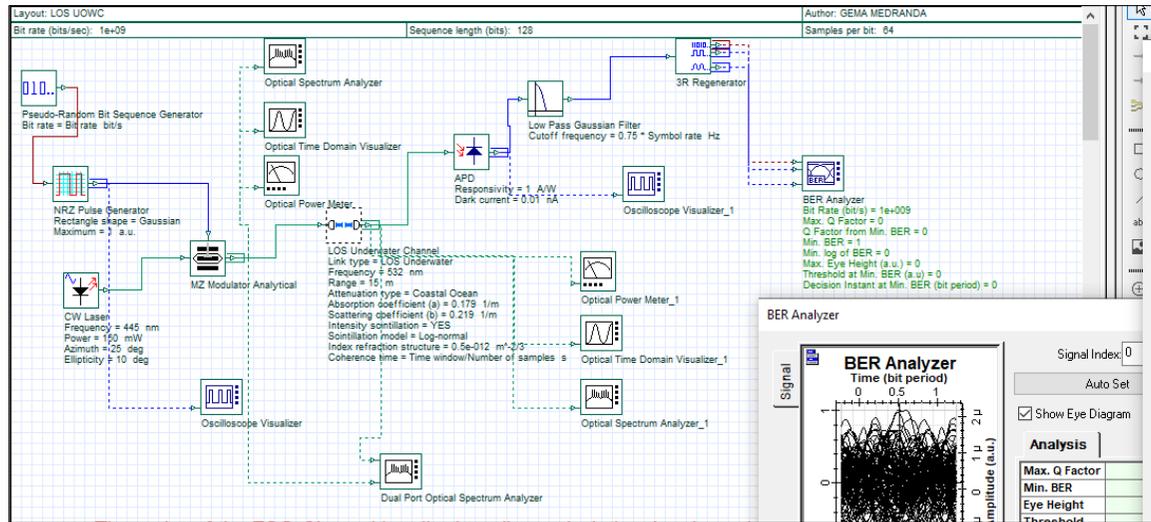
# 10 METROS



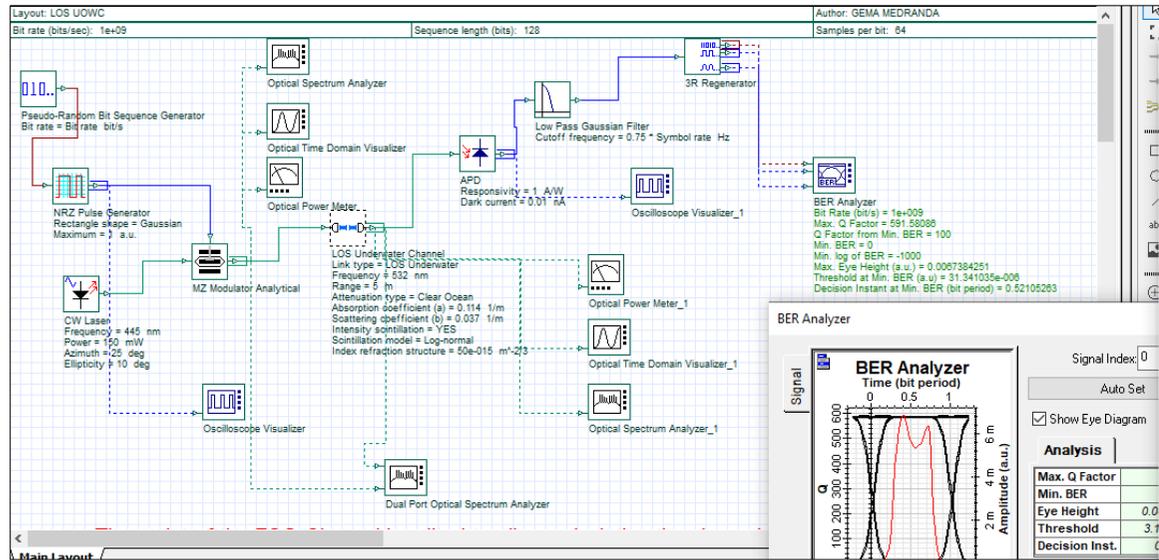


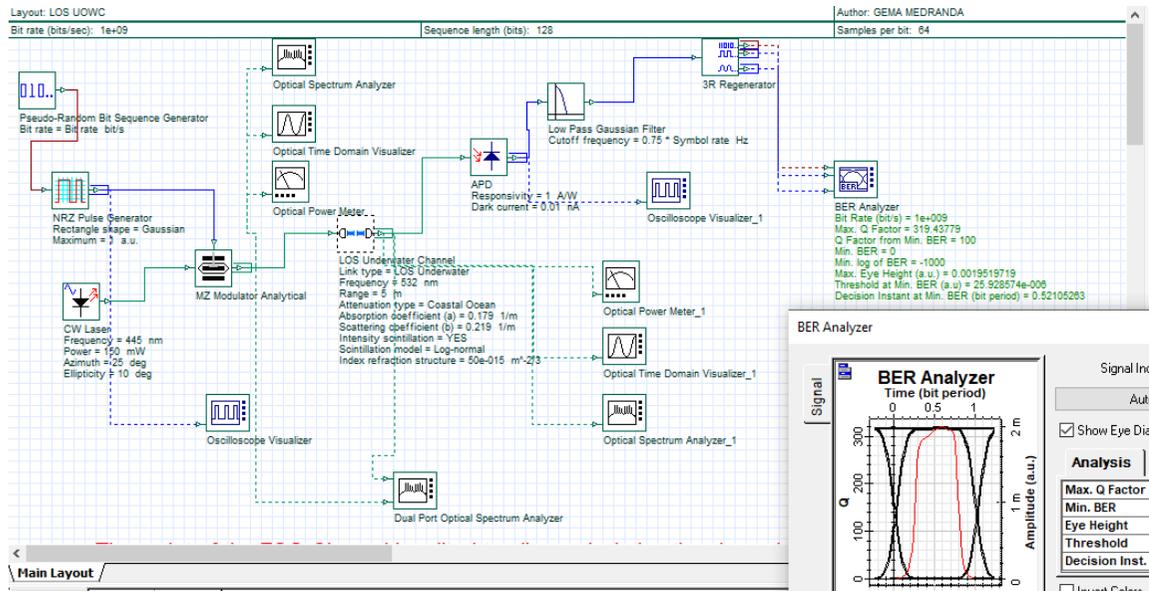
# 15 METROS

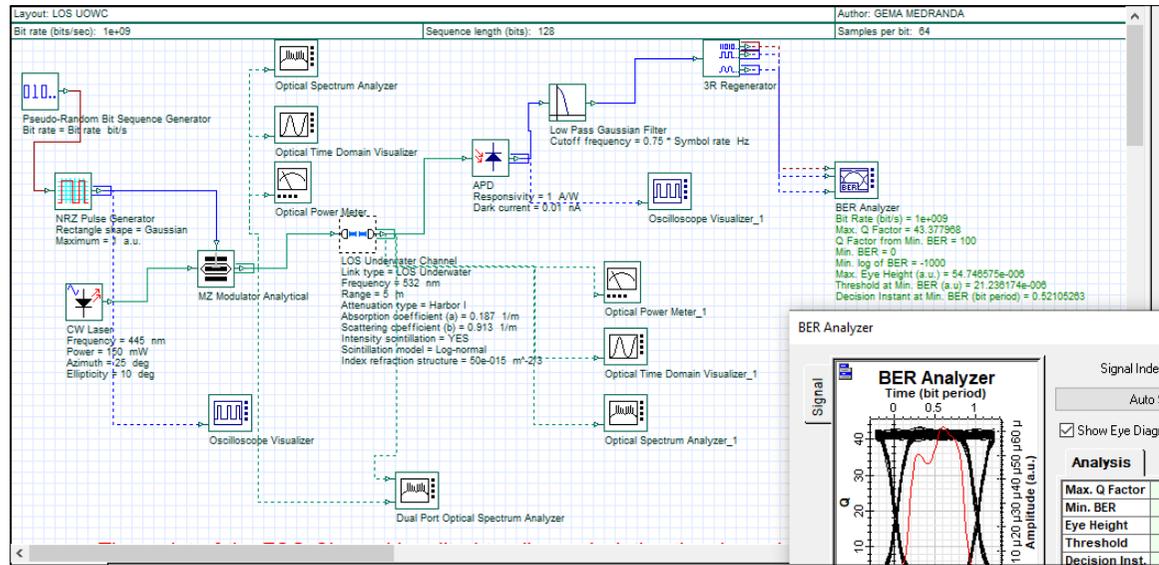




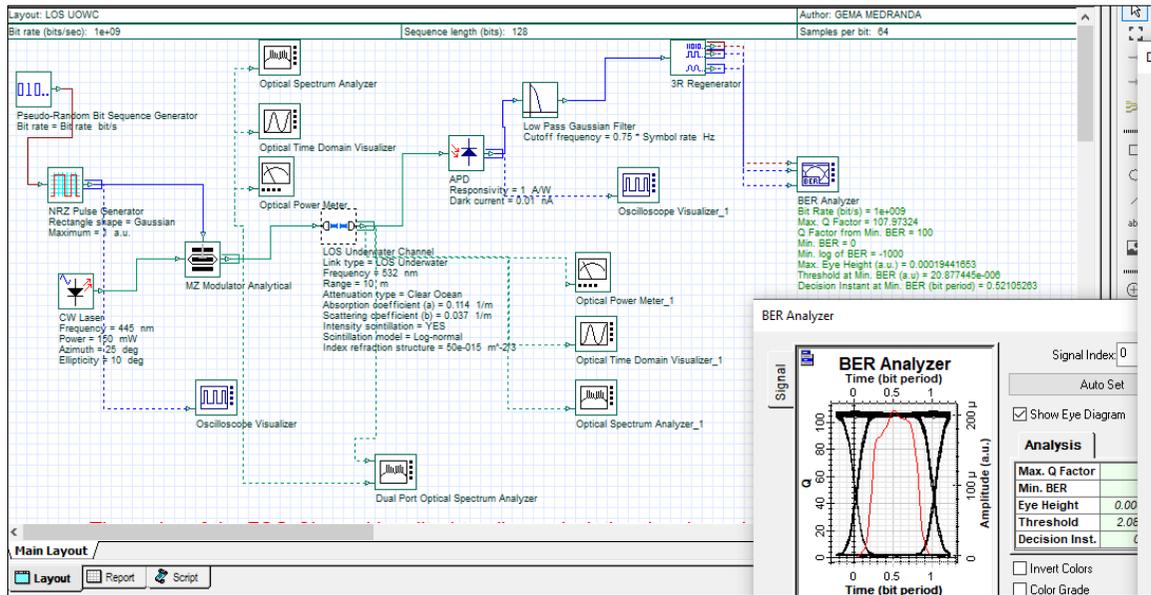
# 5 METROS CON LOS PARÁMETROS DEL COMPONENTE OPTISYSTEM E INDICE DE REFRACCIÓN -15

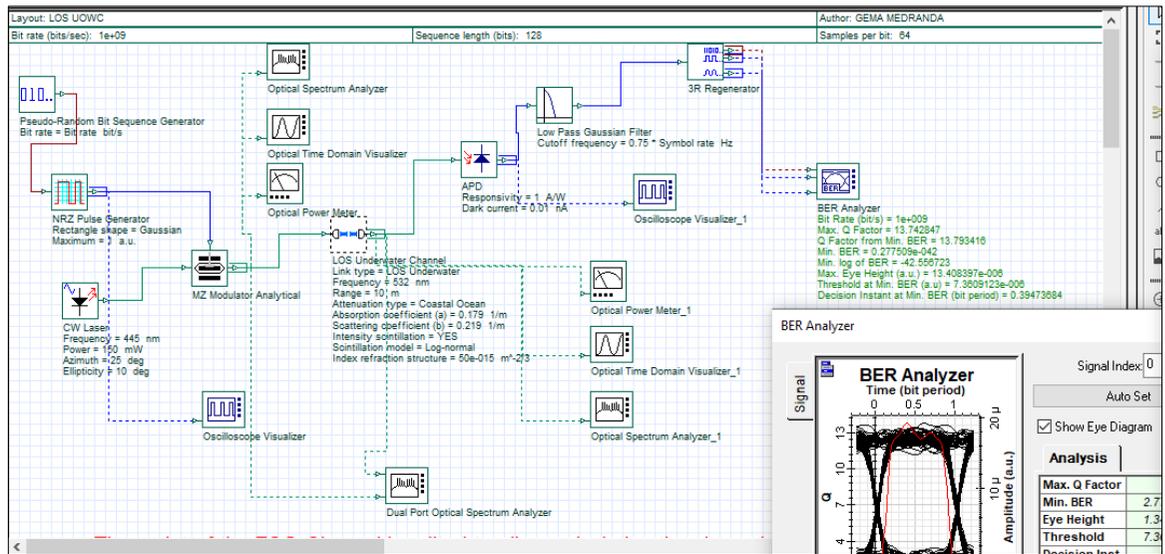


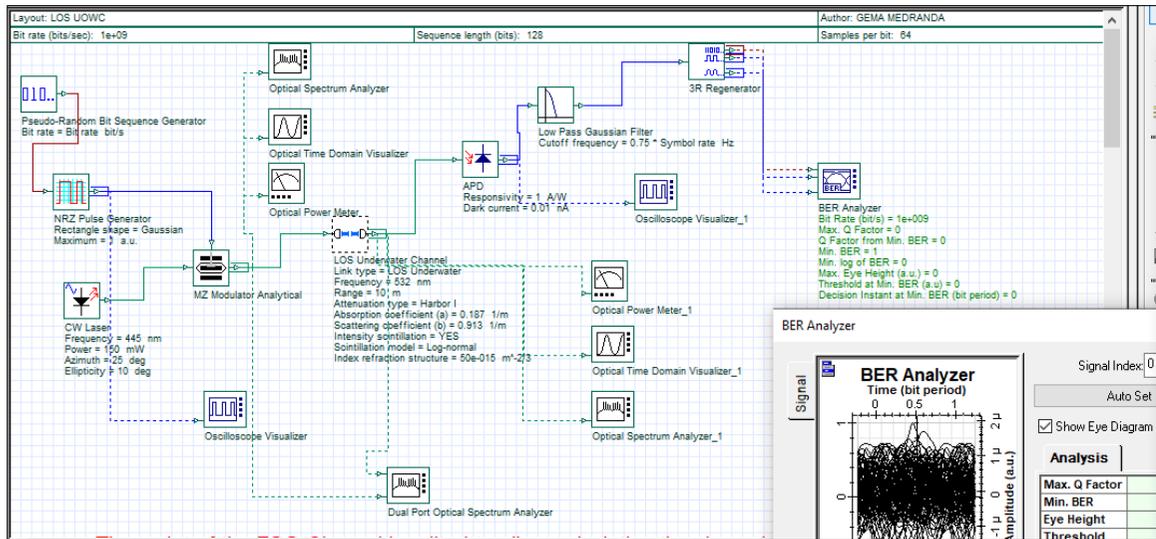




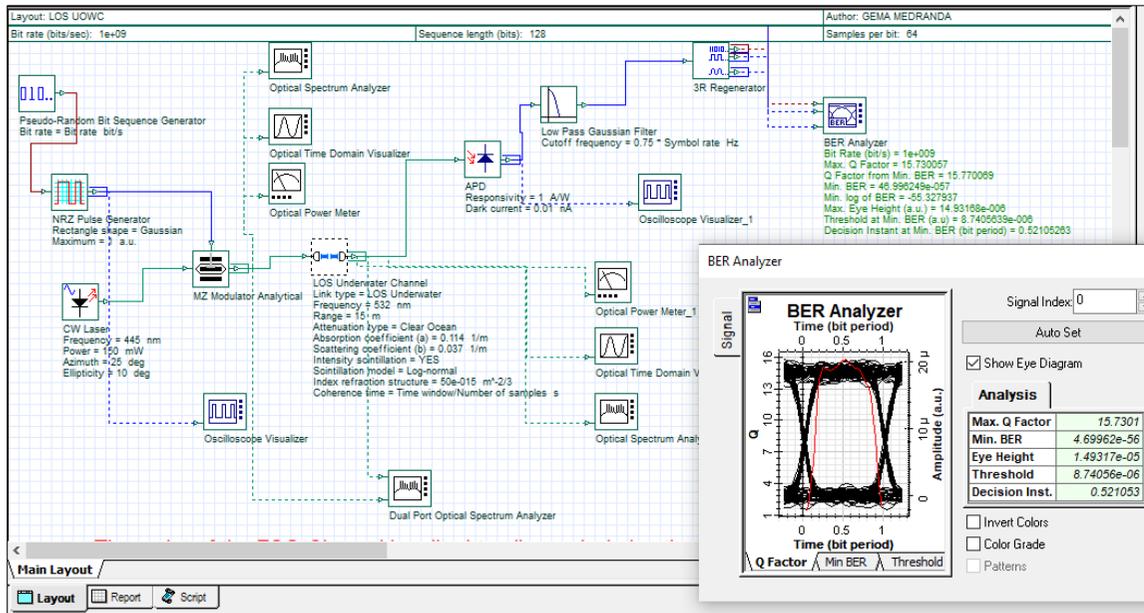
# A 10 METROS

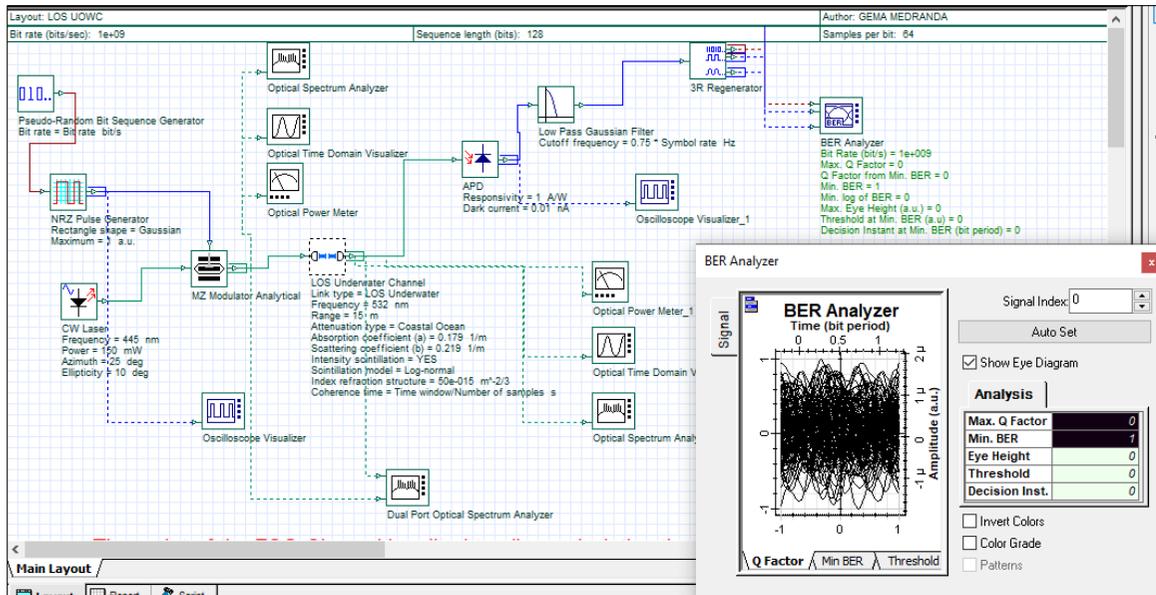


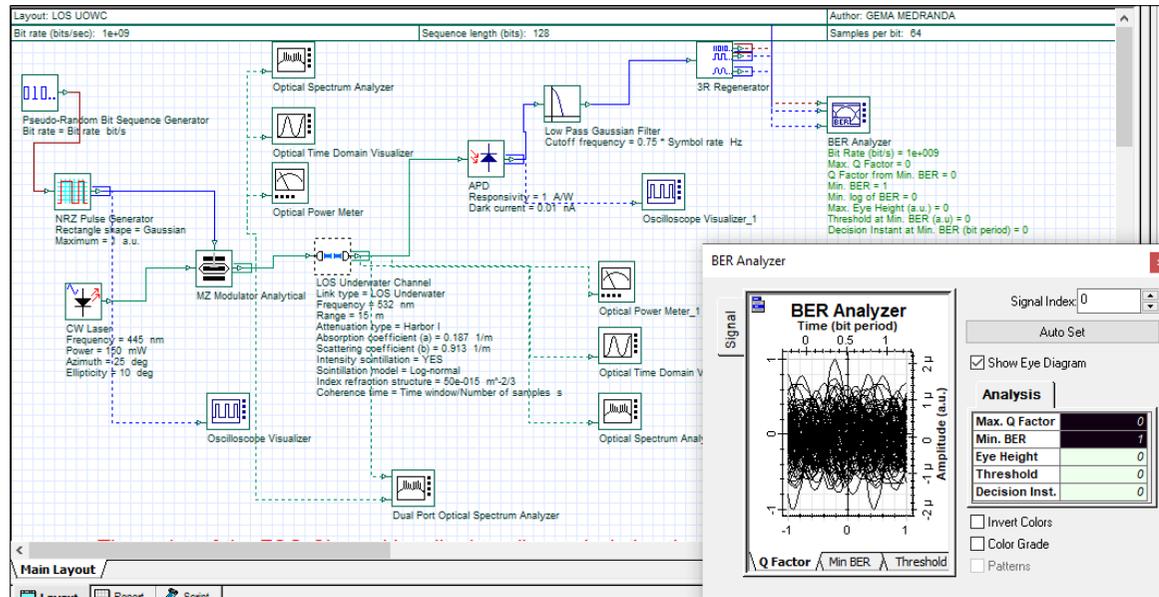




# A 15 METROS



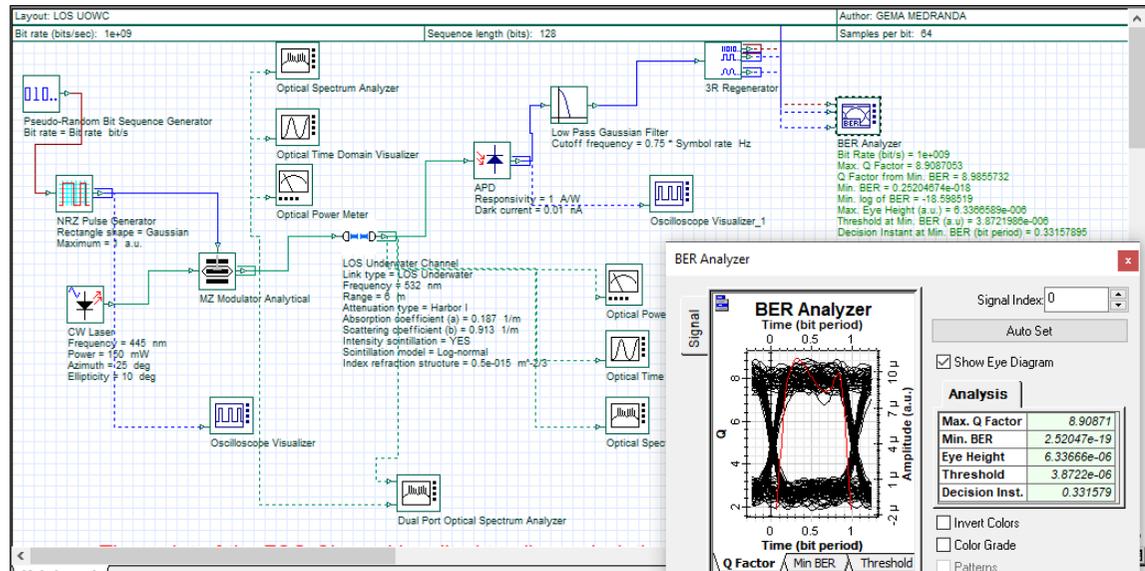


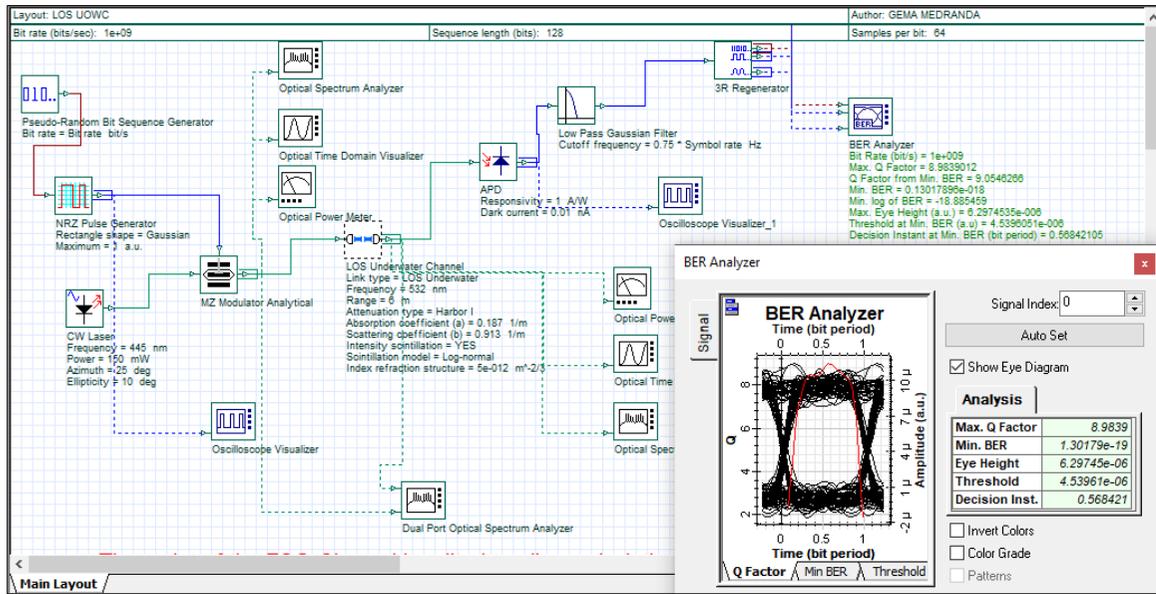


## EVALUANDO EL PEOR CANAL

CON CENTELLEO MANTENIENDO LOS VALORES DE ABSORCIÓN, DISPERSIÓN Y ATENUACIÓN DEL SOFTWARE

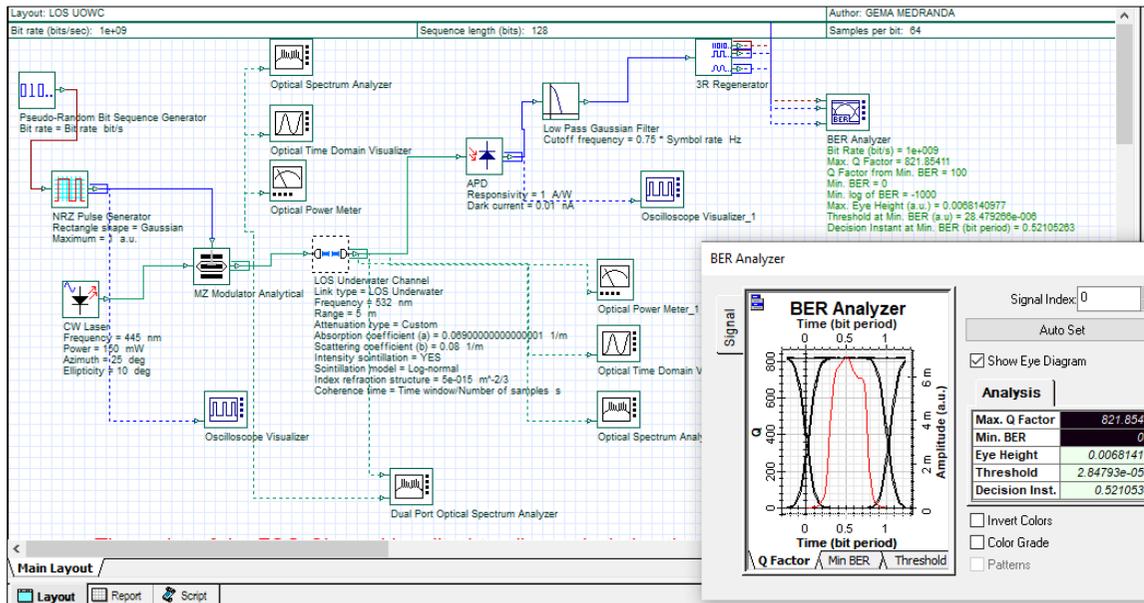
### OPTISYSTEM

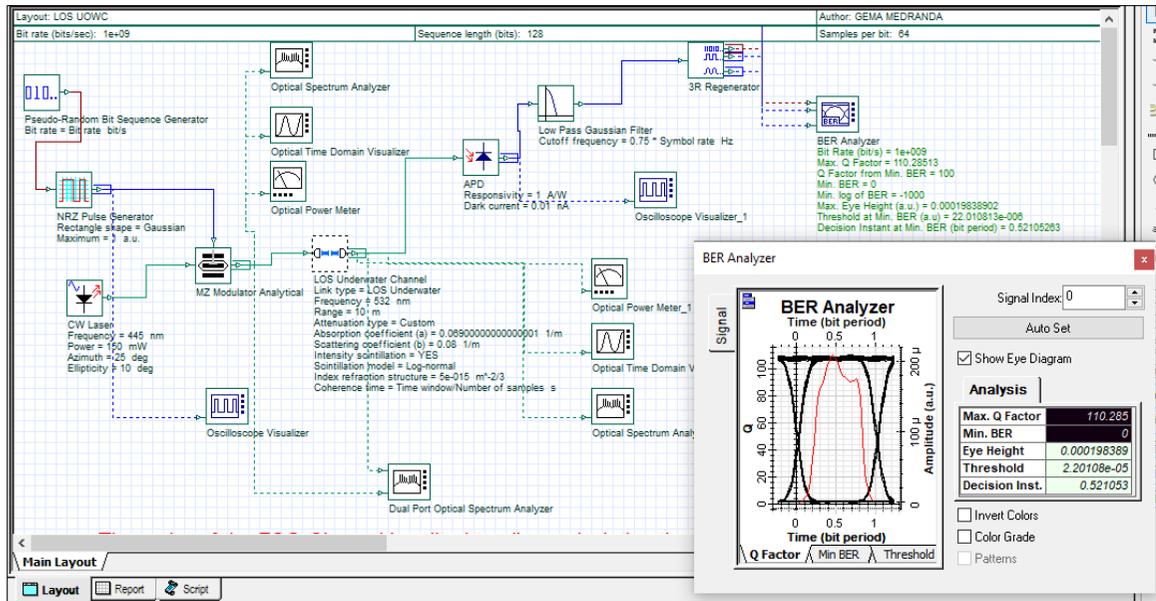


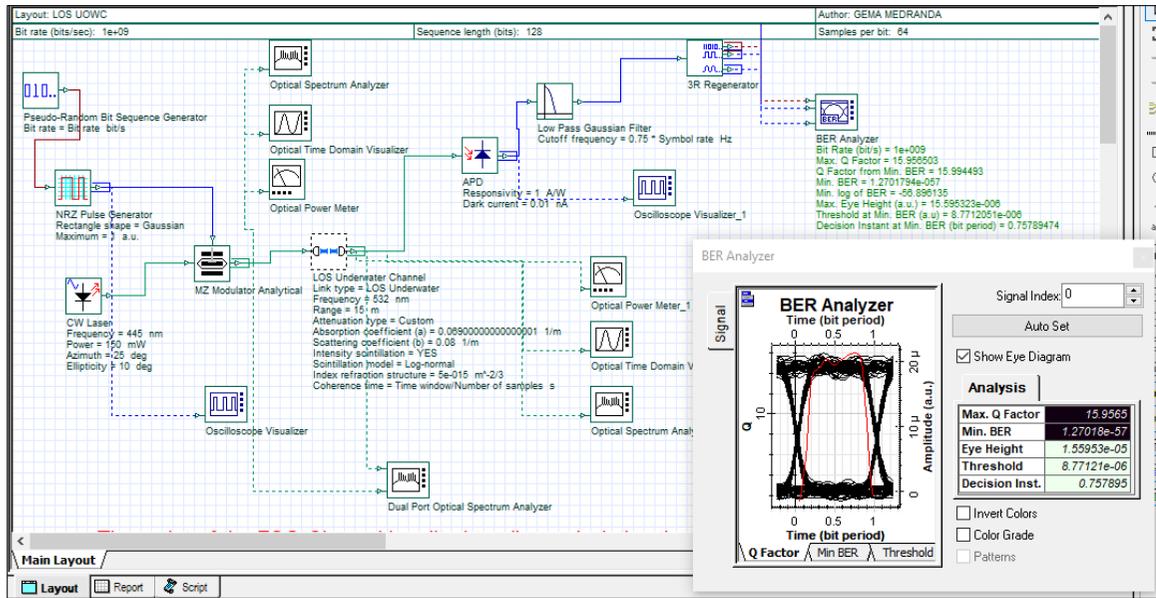




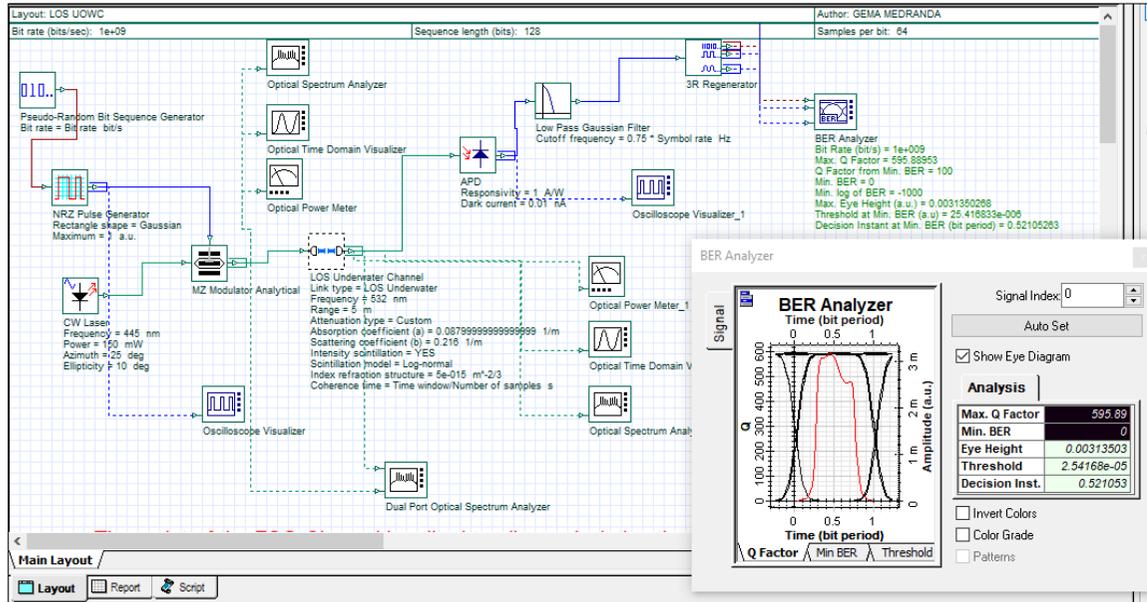
PARÁMETROS CONFIGURADOS CON TABLA 6Y 7. SIMULANDO EL CANAL DE AGUA PURA DE MAR A DISTANCIAS DE 5,10 Y 15 METROS  
 AGUA CLARA DE MAR

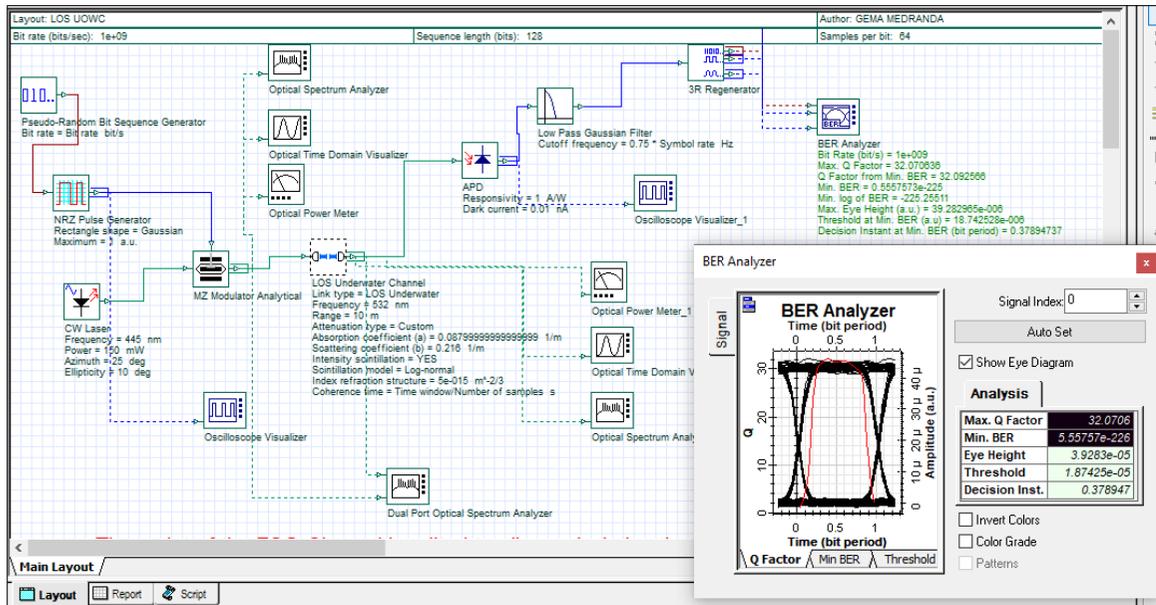


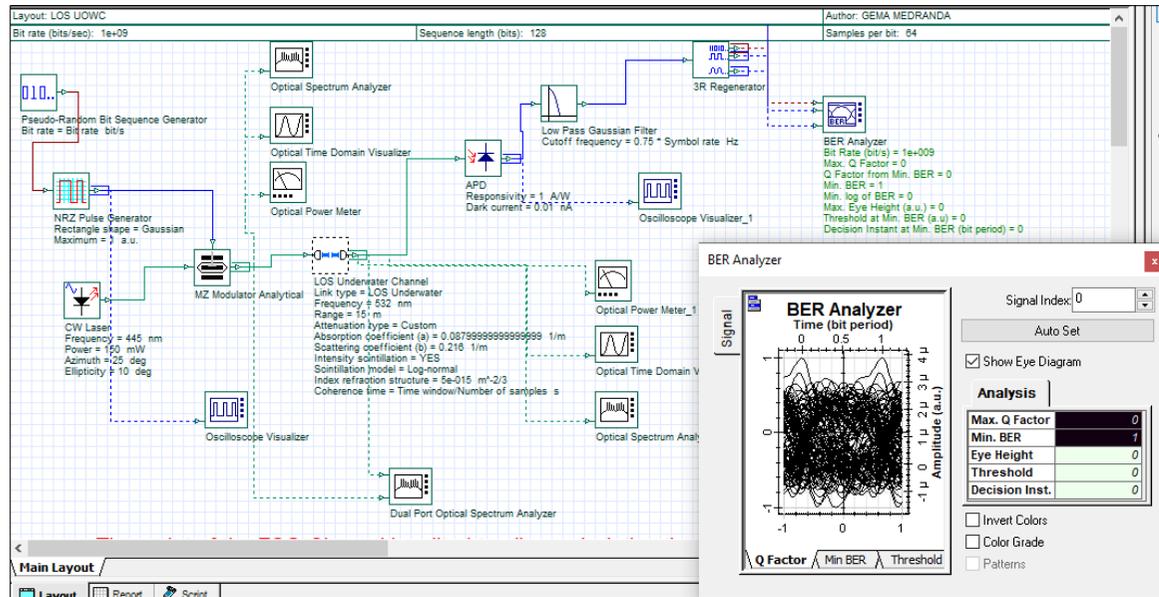




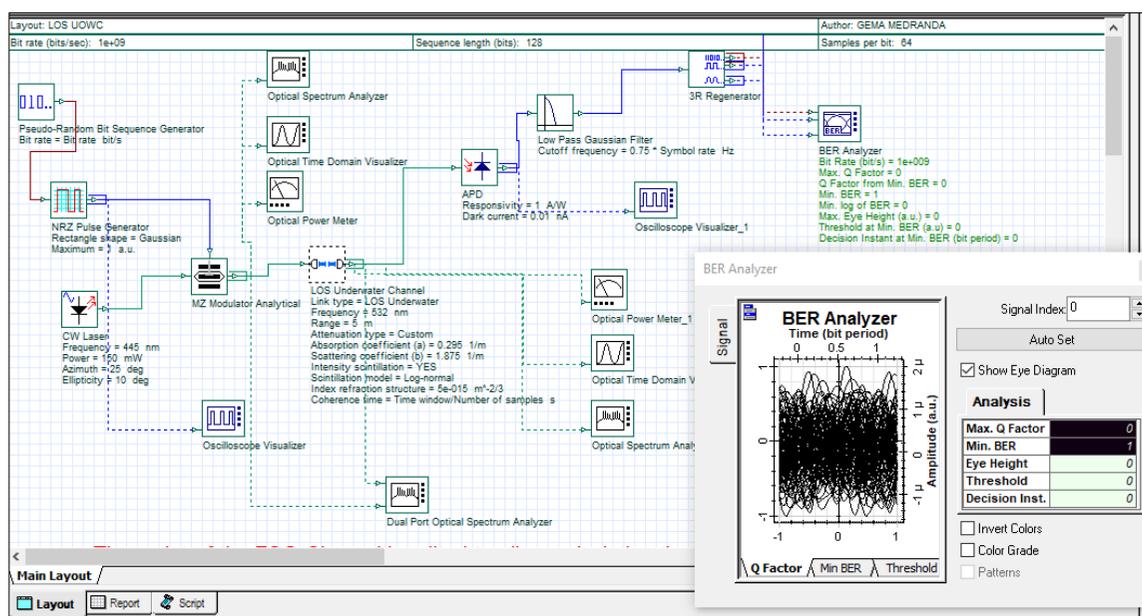
# AGUA COSTERA

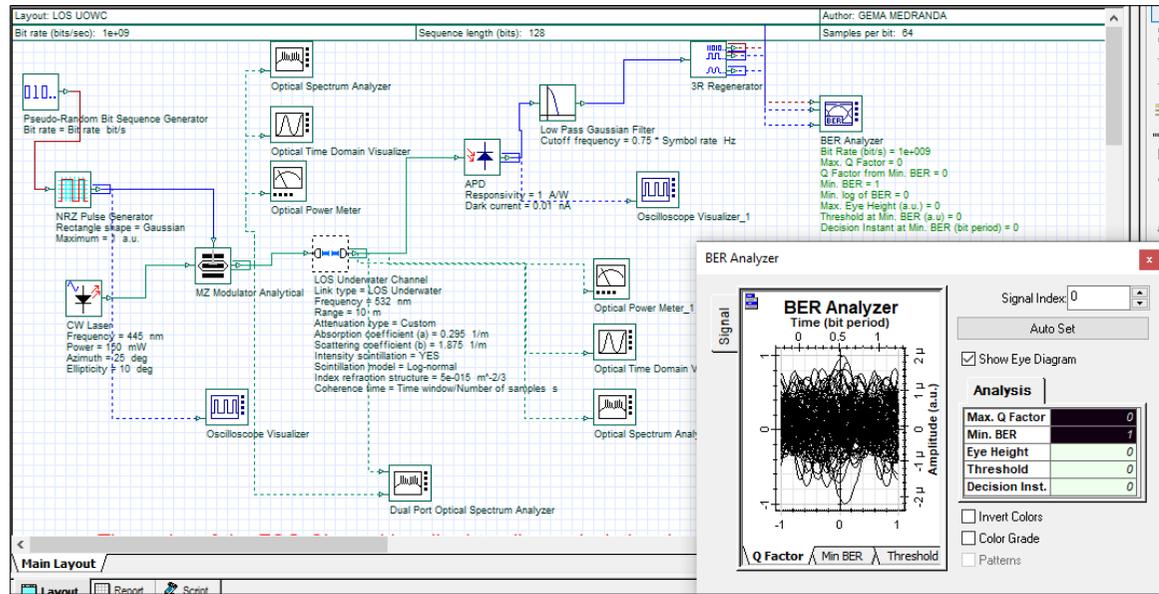


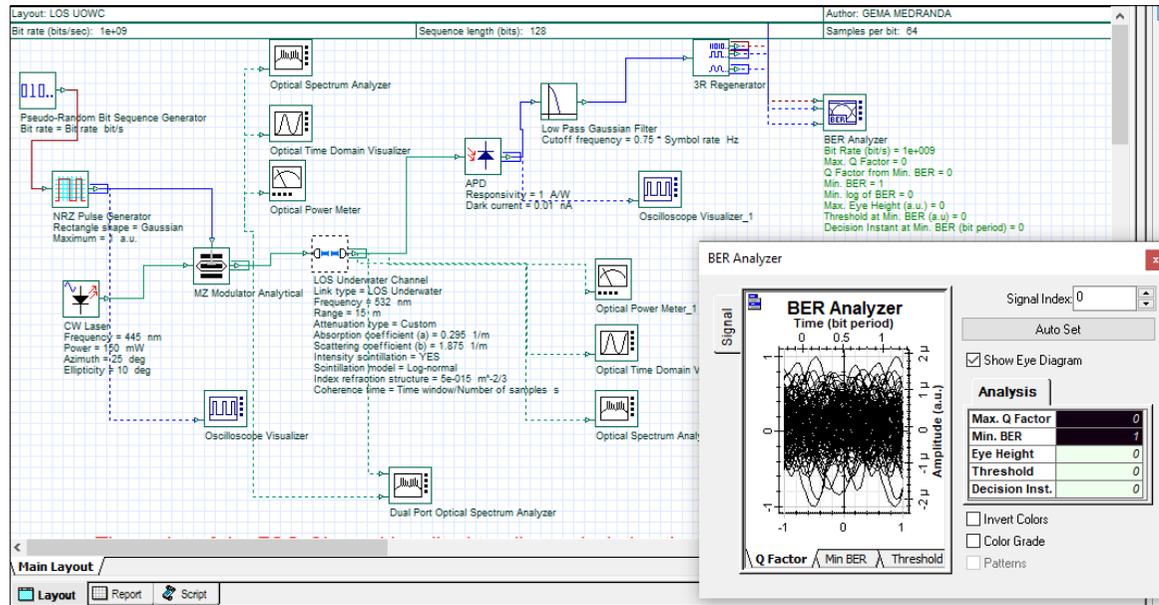


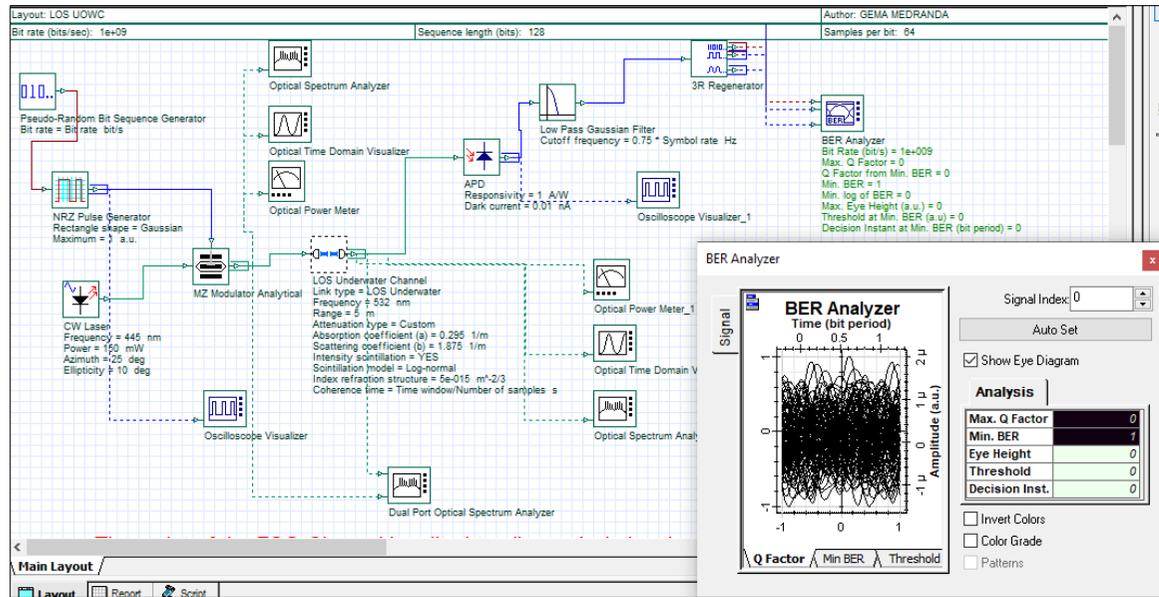


# AGUA DE PUERTO

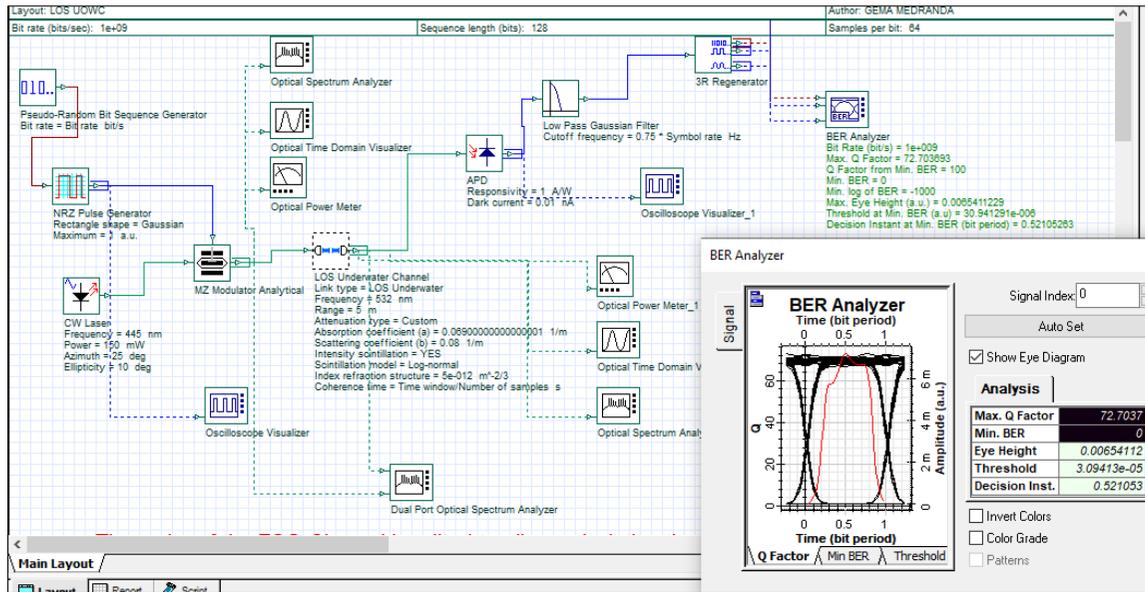


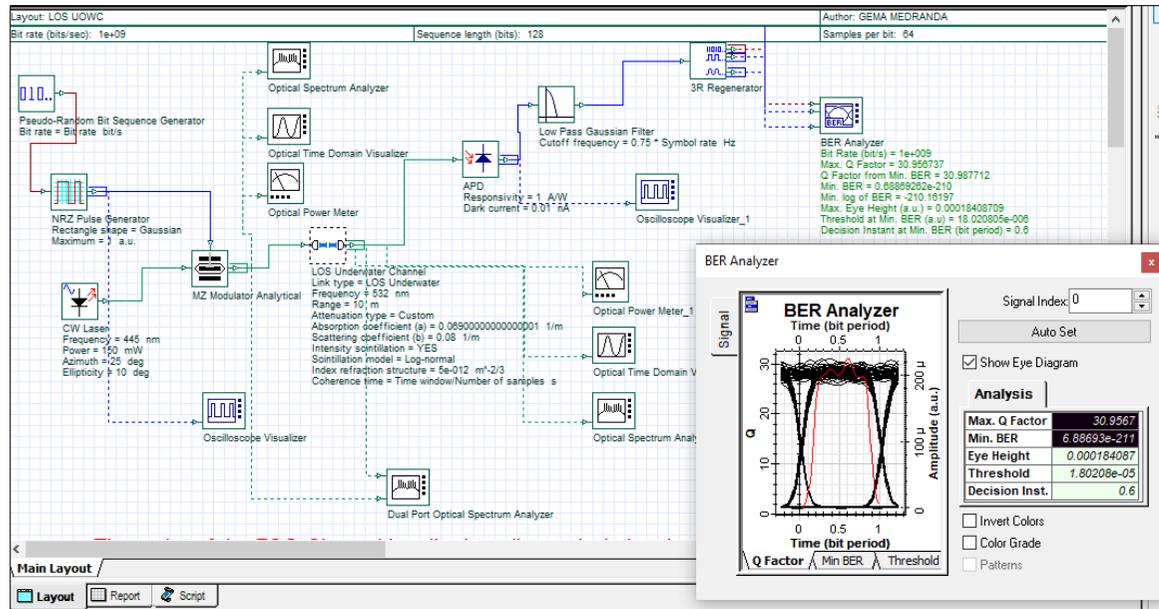


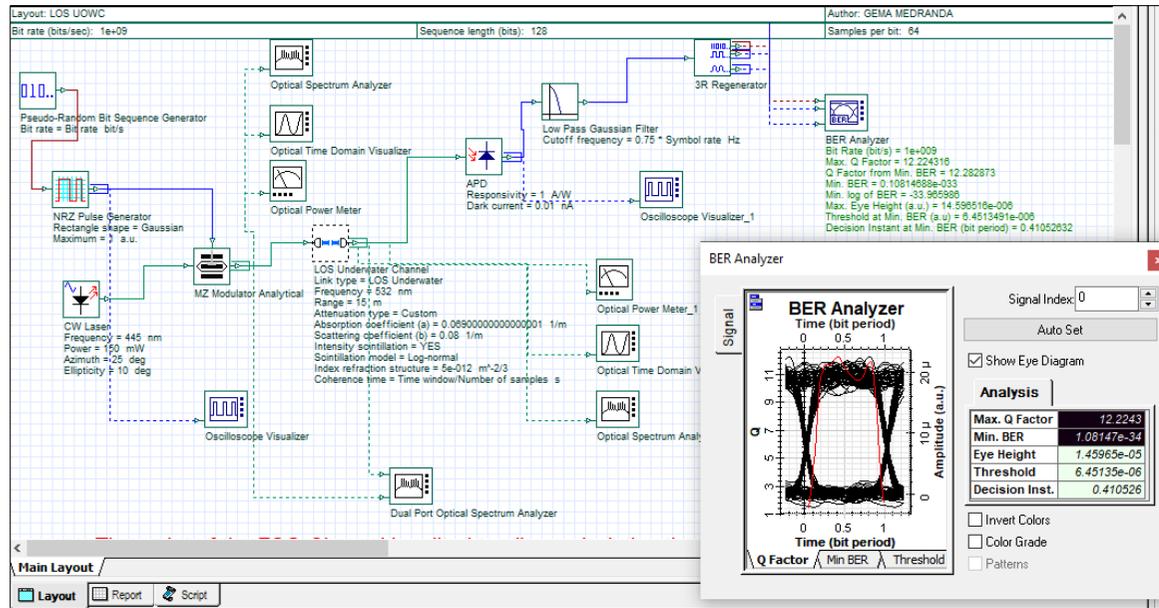




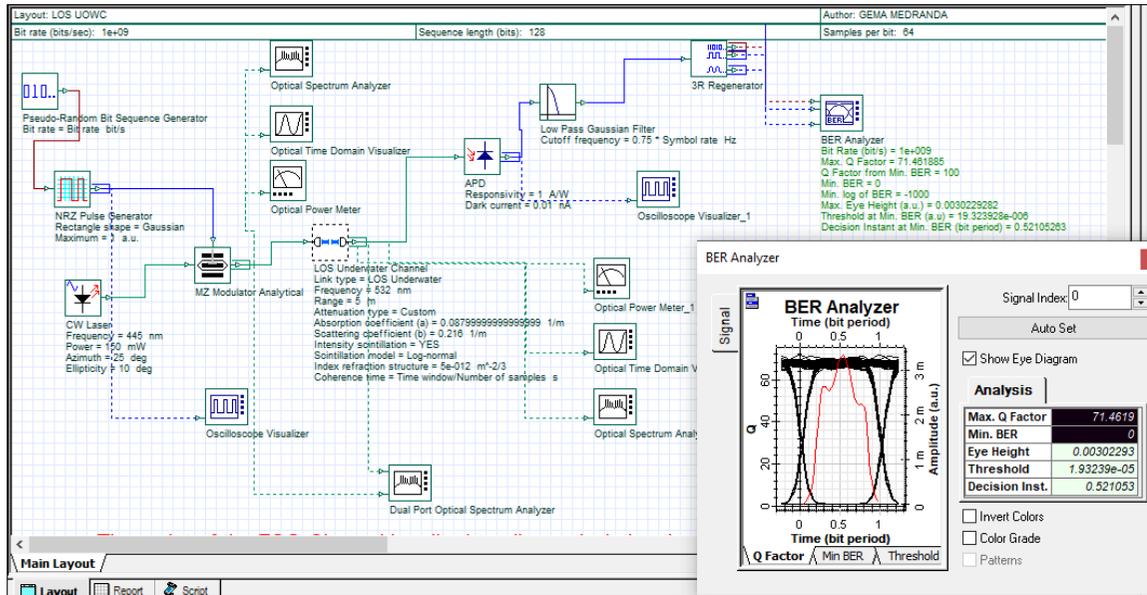
CON ÍNDICE AL  $5E^{-12}$  --AGUA CLARA DE MAR



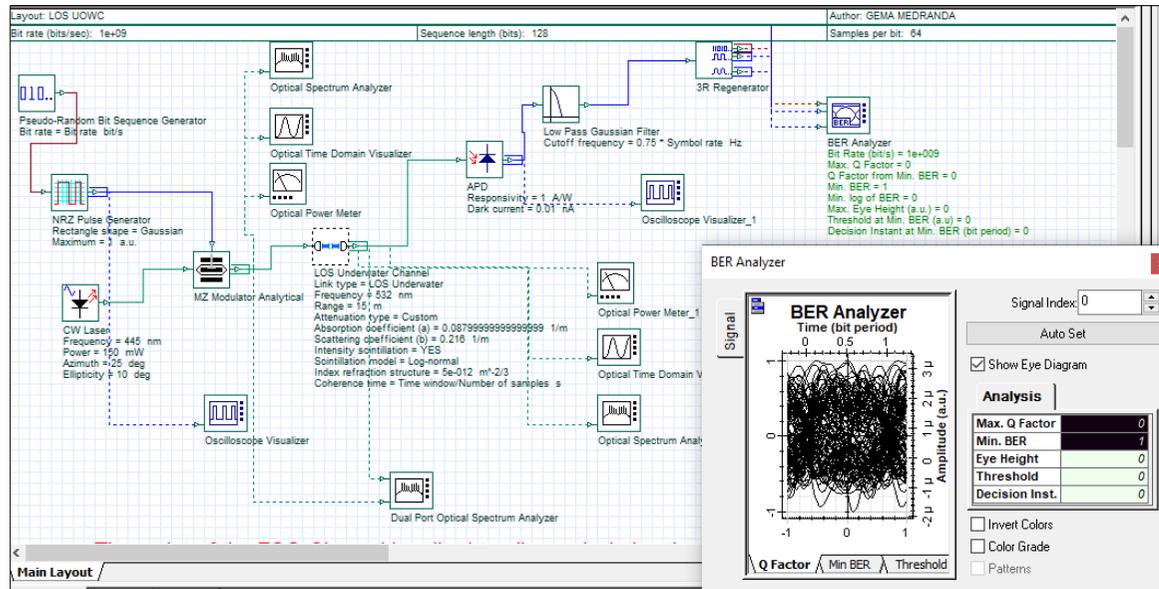




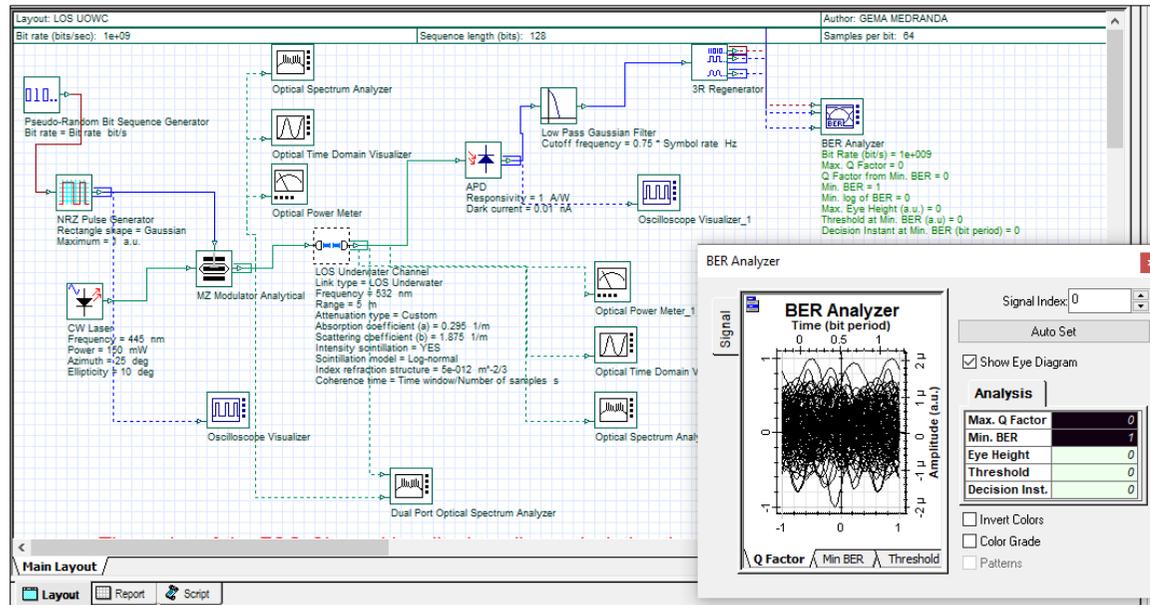
# AGUA COSTERA

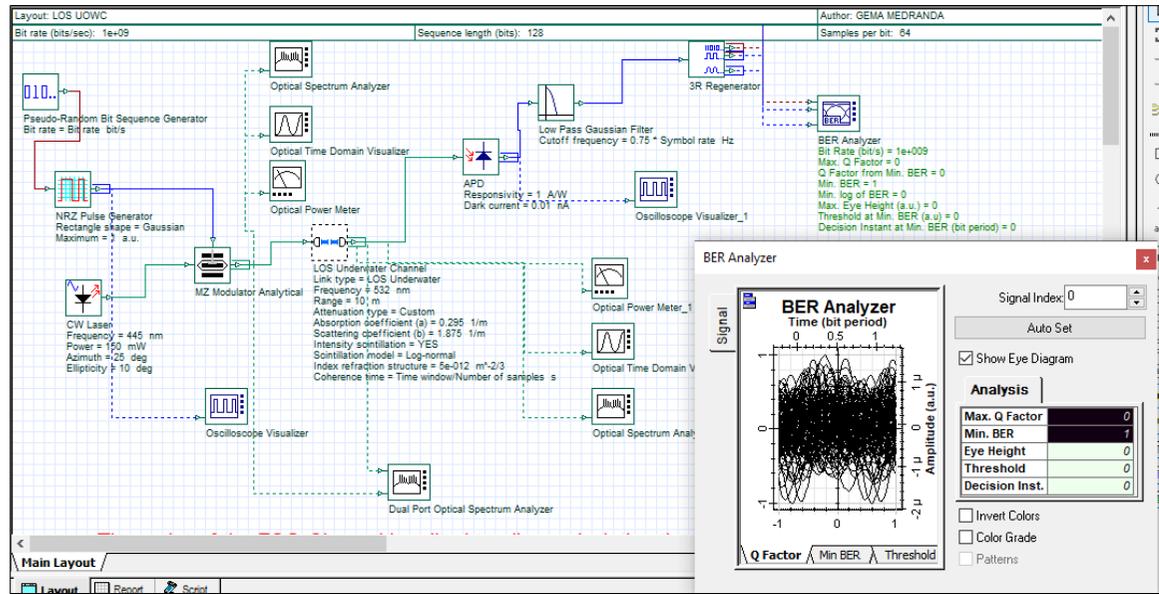


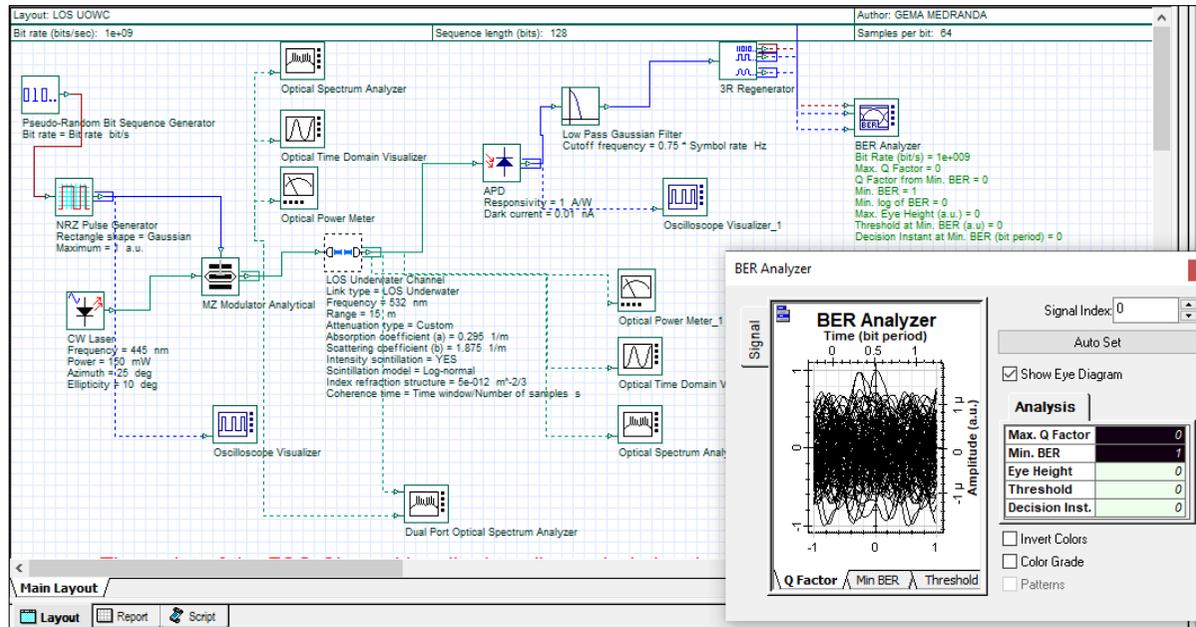




# AGUA DE PUERTO







## Anexo 5. 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,



Escaneado electrónicamente por:  
ERIKA LUCIA  
GONZALEZ  
CARRION

**Dra. Erika González Carrión. PhD.**