



Universidad
Nacional
de Loja

Universidad Nacional de Loja

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

Carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones

Análisis y Simulación de un sistema de comunicación óptico inalámbrico submarino (UOWC) sin línea de visión directa (NLOS)

Trabajo de Integración Curricular,
previo a la obtención del título de
Ingeniero en Telecomunicaciones.

AUTOR:

Rommel Andrés Curimilma Guamán

DIRECTOR:

Ing. Paulo Alberto Samaniego Rojas. Mg. Sc

Loja – Ecuador
2025

Certificación

Loja, 5 de Febrero de 2025

Ing. Paulo Alberto Samaniego Rojas. Mg. Sc

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICO:

Que he revisado y orientado todo el proceso de elaboración del Trabajo de Integración Curricular denominado: **Análisis y Simulación de un sistema de comunicación óptico inalámbrico submarino (UOWC) sin línea de visión directa (NLOS)**, previo a la obtención del título de **Ingeniero en Telecomunicaciones**, de la autoría del estudiante **Rommel Andrés Curimilma Guamán**, con cédula de identidad Nro. **1105887234**, una vez que el trabajo cumple con todos los requisitos exigidos por la Universidad Nacional de Loja para el efecto, autorizo la presentación del mismo para su respectiva sustentación y defensa.

Ing. Paulo Alberto Samaniego Rojas. Mg. Sc

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Autoría

Yo, **Rommel Andrés Curimilma Guamán**, declaro ser autor del presente Trabajo de Integración Curricular 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 de mi Trabajo de Integración Curricular, en el Repositorio Digital Institucional – Biblioteca Virtual.



Firma:

Cedula: 1105887234

Fecha: 5 de febrero del 2025

Correo electrónico: rommel.curimilma@unl.edu.ec

Teléfono: 0997452854

Carta de autorización por parte del autor, para consulta, reproducción parcial o total y/o publicación electrónica del texto completo del Trabajo de Integración Curricular.

Yo **Rommel Andrés Curimilma Guamán**, declaro ser autor Trabajo de Integración Curricular denominado: **Análisis y Simulación de un sistema de comunicación óptico inalámbrico submarino (UOWC) sin línea de visión directa (NLOS)**, como requisito para optar el título de **Ingeniero 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 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 Integración Curricular que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, suscribo en la ciudad de Loja, a los cinco días del mes de febrero del dos mil veinticinco.

Firma:



Autor: Rommel Andrés Curimilma Guamán

Cédula: 1105887234

Dirección: Loja

Correo electrónico: rommel.curimilma@unl.edu.ec

Teléfono: 0997452854

DATOS COMPLEMENTARIOS:

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

Dedicatoria

En primer lugar, quiero dedicar este trabajo a mis padres, Nelson y Patricia, quienes me han apoyado en lo emocional y económico a lo largo de toda mi vida. Su esfuerzo y confianza que pusieron en mi persona han sido fundamental para que pueda culminar todos mis estudios académicos.

A mis abuelos, quienes siempre me han apoyado para seguir mejorando como persona. A mis hermanos quienes han sido muy comprensivos en los buenos y malos momentos.

A mis amigos, quienes a lo largo de la carrera universitaria nos hemos apoyado mutuamente para lograr nuestros objetivos académicos.

Rommel Andrés Curimilma Guamán

Agradecimiento

Quiero agradecer al Todopoderoso, por nunca desampararme y por guiarme a lo largo del camino con su infinito amor y sabiduría.

A la Universidad Nacional de Loja, especialmente a la carrera de Telecomunicaciones donde sus docentes han demostrado ser grandes profesionales. Agradezco a todos quienes compartieron sus conocimientos para que pueda culminar mis estudios.

Quiero Agradecer a mi director de Trabajo de Integración Curricular, el Ing. Paulo Alberto Samaniego Rojas, quien de manera desinteresada me ayudó en la elaboración de este documento. Cada conocimiento compartido fue de gran ayuda para finalizar con éxito el trabajo de investigación.

Finalmente, agradecer a mi familia y amigos por brindarme su apoyo tanto en lo personal y en lo académico. Su apoyo incondicional ha sido clave para alcanzar este logro.

Rommel Andrés Curimilma Guamán

Índice de contenidos

Portada.....	i
Certificación.....	ii
Autoría.....	iii
Dedicatoria	v
Agradecimiento	vi
Índice de contenidos.....	vii
Índice de tablas:.....	xi
Índice de figuras:.....	xii
Índice de anexos:.....	xv
1. Título.....	1
2. Resumen.....	2
Abstract.....	3
3. Introducción.....	4
4. Marco Teórico.....	7
4.1. Comunicaciones ópticas inalámbricas submarinas (Underwater Optical Wireless Communication, UOWC).....	8
4.1.1. Principios y definiciones	8
4.2. Elementos que conforman un sistema UOWC	10
4.2.1. Transmisor	10
4.2.1.1. Fuentes ópticas y ángulo de divergencia.....	11
4.2.2. Canal.....	12
4.2.3. Receptor.....	12
4.3. Técnica de modulación en sistemas UWOC	15
4.3.1. Modulación de Intensidad y Detección Directa (IM/DD).....	15
4.4. Modos de Configuración de Enlace.....	16
4.4.1. Línea de Visión Directa (Line of Sight, LOS).....	16

4.4.2.	Sin Línea de Visión Directa (Non Line of Sight, NLOS)	17
4.4.3.	Enlace retro reflectivos	19
4.5.	Fenómenos de propagación óptica en canales inalámbricos submarinos	19
4.5.1.	Absorción.....	23
4.5.2.	Scattering	24
4.5.3.	Turbulencia.....	26
4.5.4.	Atenuación.....	27
5.	Metodología.....	30
5.1.	Revisión y recolección de bibliografía	30
5.2.	Análisis de equipamiento de la tecnología UOWC	31
5.3.	Estudio del software de simulación	31
5.4.	Simulación del sistema	32
6.	Equipamiento comercial de la tecnología UOWC.....	33
6.1.	Sonardyne	33
6.1.1.	BlueComm 200.....	33
6.1.2.	BlueComm 100.....	35
6.2.	Shimadzu	35
6.2.1.	MC 100.....	36
6.2.2.	MC 500.....	37
6.3.	Hydromea	37
6.3.1.	LUMA 100	38
6.3.2.	LUMA 500ER	38
6.3.3.	LUMA X.....	39
6.3.4.	LUMA X UV.....	40
6.4.	AQUATEC	40
6.4.1.	AQUA modem OP2.....	41
6.4.2.	AQUA modem OP2L	41

7.	Resultados.....	43
7.1.	Esquemas empleados para el sistema UOWC NLOS.....	43
7.1.1.	Diagrama UOWC NLOS con fuente óptica láser.....	43
7.1.2.	Diagrama UOWC NLOS con fuente óptica LED	46
7.2.	Definición de escenarios de simulación	46
7.3.	Simulación con las características del equipo MC500	48
7.3.1.	Resultados Escenario 1	48
7.3.1.1.	Análisis del Escenario 1	50
7.3.2.	Resultados Escenario 2.....	52
7.3.2.1.	Análisis del Escenario 2.....	53
7.3.3.	Resultados Escenario 3.....	54
7.3.3.1.	Análisis del Escenario 3.....	57
7.3.4.	Resultados Escenario 4:.....	58
7.3.4.1.	Análisis del Escenario 4.....	60
7.4.	Simulación con las características del equipo BlueComm 200.....	61
7.4.1.	Resultados Escenario 5.....	61
7.4.1.1.	Análisis del Escenario 5.....	63
7.4.2.	Resultados Escenario 6.....	64
7.4.2.1.	Análisis del Escenario 6.....	65
7.4.3.	Resultados Escenario 7.....	66
7.4.3.1.	Análisis del Escenario 7.....	68
7.4.4.	Resultados Escenario 8.....	69
7.4.4.1.	Análisis del Escenario 8.....	70
8.	Discusión	72
9.	Conclusiones.....	74
10.	Recomendaciones	75
11.	Bibliografía	76

12. Anexos 80

Índice de tablas:

Tabla 1. Características entre LDs y LEDs	11
Tabla 2. Concentración de clorofila para diferentes tipos de agua (mg/m ³).....	24
Tabla 3. Valores de atenuación, dispersión y coeficiente de atenuación para diferentes tipos de agua	29
Tabla 4. Características BlueComm 200.....	33
Tabla 5. Características BlueComm 200 UV	34
Tabla 6. Características BlueComm 100.....	35
Tabla 7. Características MC100	36
Tabla 8. Características MC 500	37
Tabla 9. Características LUMA 100.....	38
Tabla 10. Características LUMA 500ER	39
Tabla 11. Características LUMA X.....	40
Tabla 12. Características LUMA X UV	40
Tabla 13. Características AQUA modem OP2.....	41
Tabla 14. Características AQUA modem OP2L	42
Tabla 15. Definición de escenarios a simular.....	46
Tabla 16. Parámetros de simulación para el Escenario 1 y 2	48
Tabla 17. Parámetros de simulación para el Escenario 3 y 4.....	54
Tabla 18. Parámetros de simulación para el Escenario 5 y 6	61
Tabla 19. Parámetros de simulación para el escenario 7 y 8.....	66

Índice de figuras:

Figura 1. Clasificación del espectro electromagnético.....	8
Figura 2. Atenuación Submarina para diferentes longitudes de onda.....	9
Figura 3. Esquema típico de un sistema UOWC.....	10
Figura 4. Representación gráfica del ángulo de divergencia.	12
Figura 5. Tipos de foto-sensores en la región azul-verde	13
Figura 6. Estructura del detector PIN.....	14
Figura 7. Estructura del fotodetector APD.....	14
Figura 8. Representación FOV	15
Figura 9: OOK-RZ y OOK-NRZ	16
Figura 10. Configuración LOS.....	16
Figura 11. Enlace NLOS-Reflectivo	17
Figura 12. Configuración NLOS-Difusa.....	18
Figura 13. Enlace Retro Reflectivo	19
Figura 14. Tipos de agua de océano.....	20
Figura 15. Tipos de agua para comunicación.....	21
Figura 16. Tipos de Agua según IOPs	22
Figura 17. Diagrama de dispersión de Rayleigh y Mie.....	25
Figura 18. Atenuación por coeficiente de atenuación de haz (c)	28
Figura 19. Atenuación coeficiente de atenuación difusa	28
Figura 20. Proveedor Sonardyne.....	33
Figura 21. Equipo BlueComm 200	34
Figura 22. Equipo BlueComm 200 UV.....	34
Figura 23. Equipo BlueComm 100	35
Figura 24. Proveedor Shimadzu.....	36
Figura 25. Equipo MC100.....	36
Figura 26. Equipo MC 500.....	37
Figura 27. Proveedor Hydromea	37
Figura 28. Equipo LUMA 100	38
Figura 29. Equipo LUMA 500ER.....	39
Figura 30. Equipo LUMA X	39
Figura 31. Equipo LUMA X UV	40
Figura 32. Proveedor AQUATEC.....	40

Figura 33. Equipo AQUA modem OP2	41
Figura 34. Equipo AQUA modem OP2L.....	41
Figura 35. Diagrama UOWC NLOS con fuente óptica láser	43
Figura 36. Parámetros de "NLOS Underwater Channel"	43
Figura 37. Configuración de distancias en un sistema UOWC.....	44
Figura 38. Diagrama UOWC NLOS con fuente óptica LED.....	46
Figura 39. a) Descripción gráfica de los escenarios 1,2,5 y 6; b) Descripción gráfica de los escenarios 3,4,7 y 8	47
Figura 40. Escenario 1 a) Factor de calidad (Q); b) Potencia de Recepción; c) Bit Error Rate (BER)	48
Figura 41. Diagramas de ojo Escenario 1. a) h_1 y $h_2 = 5\text{m}$, $z=5\text{m}$; b) h_1 y $h_2 = 5\text{m}$, $z=60\text{m}$; c) h_1 y $h_2 = 5\text{m}$, $z=75\text{m}$; d) h_1 y $h_2 = 15\text{m}$, $z=5\text{m}$; e) h_1 y $h_2 = 15\text{m}$, $z=50\text{m}$; f) h_1 y $h_2 = 15\text{m}$, $z=60\text{m}$	49
Figura 42. Escenario 2. a) Factor de calidad (Q); b) Potencia de Recepción; c) Bit Error Rate (BER)	52
Figura 43. Diagramas de ojo Escenario 2. a) h_1 y $h_2 = 5\text{m}$, $z=5\text{m}$; b) h_1 y $h_2 = 5\text{m}$, $z=20\text{m}$; c) h_1 y $h_2 = 5\text{m}$, $z=30\text{m}$; d) h_1 y $h_2 = 10\text{m}$, $z=5\text{m}$; e) h_1 y $h_2 = 10\text{m}$, $z=15\text{m}$; f) h_1 y $h_2 = 15\text{m}$, $z=5\text{m}$	53
Figura 44. Escenario 3. a) Factor de calidad (Q), b) Potencia de Recepción, c) Bit Error Rate (BER)	55
Figura 45. Diagramas de ojo Escenario 3. a) $h_1=2\text{m}$ y $h_2=5\text{m}$, $z=5\text{m}$; b) $h_1=2\text{m}$ y $h_2=5\text{m}$, $z=60\text{m}$; c) $h_1=2\text{m}$ y $h_2=5\text{m}$, $z=75\text{m}$; d) $h_1=21\text{m}$ y $h_2=25\text{m}$, $z=5\text{m}$; e) $h_1=21\text{m}$ y $h_2=25\text{m}$, $z=15\text{m}$	56
Figura 46. Escenario 4. a) Factor de calidad (Q), b) Potencia de Recepción, c) Bit Error Rate (BER)	58
Figura 47. Diagramas de ojo Escenario 4. a) $h_1=2\text{m}$ y $h_2=5\text{m}$, $z=5\text{m}$; b) $h_1=2\text{m}$ y $h_2=5\text{m}$, $z=20\text{m}$; c) $h_1=2\text{m}$ y $h_2=5\text{m}$, $z=30\text{m}$; d) $h_1=6\text{m}$ y $h_2=10\text{m}$, $z=5\text{m}$; e) $h_1=6\text{m}$ y $h_2=10\text{m}$, $z=20\text{m}$; e) $h_1=6\text{m}$ y $h_2=10\text{m}$, $z=30\text{m}$	59
Figura 48. Escenario 5. a) Factor de calidad (Q), b) Potencia de Recepción, c) Bit Error Rate (BER)	61
Figura 49. Diagramas de ojo. a) h_1 y $h_2 = 5\text{m}$, $z=5\text{m}$, b) h_1 y $h_2 = 5\text{m}$, $z=60\text{m}$, c) h_1 y $h_2 = 15\text{m}$, $z=5\text{m}$, d) h_1 y $h_2 = 15\text{m}$, $z=15\text{m}$	62

Figura 50. Escenario 6. a) Factor de Calidad (Q), b) Potencia de Recepción, c) Bit Error Rate (BER)	64
Figura 51. Diagramas de ojo. a) h_1 y $h_2=5m$, $z=5m$, b) h_1 y $h_2=5m$, $z=30m$, c) h_1 y $h_2=10m$, $z=5m$	65
Figura 52. Escenario 7. a) Factor de calidad (Q), b) Potencia de Recepción, c) Bit Error Rate (BER)	66
Figura 53. Diagramas de ojo. a) $h_1=2m$ y $h_2=5m$, $z=5m$; b) $h_1=2m$ y $h_2=5m$, $z=60m$; c) $h_1=6m$ y $h_2=10m$, $z=5m$; d) $h_1=6m$ y $h_2=10m$, $z=50m$; e) $h_1=13m$ y $h_2=17m$, $z=5m$; f) $h_1=13m$ y $h_2=17m$, $z=15m$	67
Figura 54. Escenario 8. a) Factor de calidad (Q), b) Potencia de Recepción, c) Bit Error Rate (BER)	69
Figura 55. Diagramas de ojo. a) $h_1=2m$ y $h_2=5m$, $z= 5m$; b) $h_1=2m$ y $h_2=5m$, $z= 30m$; c) $h_1=4m$ y $h_2=8m$, $z= 5m$; d) $h_1=4m$ y $h_2=8m$, $z= 20m$; e) $h_1=6m$ y $h_2=10m$, $z= 5m$	70

Índice de anexos:

Anexo 1. Especificaciones técnicas BlueComm 200.....	80
Anexo 2. Especificaciones técnicas BlueComm 200 UV	82
Anexo 3. Especificaciones técnicas BlueComm 100.....	84
Anexo 4. Especificaciones técnicas MC500	86
Anexo 5. Especificaciones técnicas LUMA 100.....	87
Anexo 6. Especificaciones técnicas LUMA 500 ER	88
Anexo 7. Especificaciones técnicas LUMA X.....	89
Anexo 8. Especificaciones técnicas LUMA X UV	90
Anexo 9. Especificaciones técnicas AQUA modem OP2.....	91
Anexo 10. Especificaciones técnicas AQUA modem OP2L	93
Anexo 11. Certificado de traducción del resumen	95

1. Título

**Análisis y simulación de un sistema de comunicación óptico inalámbrico
submarino (UWOC) sin línea de visión directa (NLOS)**

2. Resumen

Las comunicaciones ópticas inalámbricas submarinas (Underwater Optical Wireless Communication, UOWC) son sistemas que trabajan en el rango de luz visible del espectro electromagnético, específicamente en las longitudes de onda de 450nm a 550 nm. Esta tecnología ofrece grandes prestaciones en comparación con otras tecnologías inalámbricas submarinas; sin embargo, el canal submarino provoca que la señal transmitida sufra efectos de absorción y dispersión. Por tal razón, el presente documento, en primer lugar, se enfoca en realizar el estudio de los fundamentos teóricos que sustentan esta tecnología, destacando los principios, modos de configuración de enlace, fenómenos en el canal inalámbrico submarino, entre otros temas importantes para una mejor comprensión de la tecnología. En segundo lugar, se presenta el panorama actual del equipamiento UOWC, en donde cada equipo investigado se los describe brevemente en base a la investigación realizada. Además, se toman las características técnicas de dos equipos para realizar las simulaciones en el modo de configuración sin línea de visión directa (Non-line-of-sight, NLOS). En tercer lugar, se desarrollan las simulaciones UOWC NLOS, para las cuales se proponen 8 escenarios. En estos escenarios, se simula a una longitud de onda de 525 nm con una fuente óptica LD (Laser Diode) y LED (Light Emitte Diode). Además, se consideran dos tipos de agua: “Clear Ocean” y “Coastal Ocean”. Se ajustan las distancias de profundidad de los nodos, configurando escenarios en los que el transmisor y receptor se encuentren a la misma profundidad y otros en el que el receptor se encuentra a mayor profundidad que el transmisor. Los resultados demostraron que al usar una fuente óptica LD se obtienen mejores resultados, especialmente en el tipo de agua “Clear Ocean”. Asimismo, se determinó que cuando el transmisor y receptor están a diferentes profundidades, la potencia de recepción, BER y factor Q mejoran.

Palabras Clave: longitud de onda, atenuación, dispersión, LD, LED, potencia de recepción.

Abstract

Underwater Optical Wireless Communications (UOWC) are systems that operate in the visible light range of the electromagnetic spectrum, specifically at wavelengths from 450 nm to 550 nm. This technology offers great features compared to other underwater wireless technologies; however, the underwater channel causes the transmitted signal to suffer absorption and scattering effects. For this reason, the present document firstly, focuses on realize the study of the theoretical foundations that support this technology, highlighting the principles, link configuration modes, and phenomena in the underwater wireless channel, among other important topics for a better understanding of the technology. Secondly, it presents the current landscape of UOWC equipment, where each research device is briefly described based on the investigation conducted. Additionally, the technical characteristics of the two devices are taken into account to carry out simulations in the non-line-of-sight (NLOS) configuration mode. Thirdly, UOWC NLOS simulations are developed, for which 8 scenarios are proposed. In these scenarios, simulation is conducted at a wavelength of 525 nm with an optical source LD (Laser Diode) and LED (Light Emitte Diode). Furthermore, two types of water are considered: “Clear Ocean” and “Coastal Ocean.” The depth distances of the nodes are adjusted, configuring scenarios in which the transmitter and receiver are at the same depth and others in which the receiver is at a greater depth than the transmitter. The results demonstrated that using an optical source LD yields better results, especially in “Clear Ocean” water type. Likewise, it was determined that when the transmitter and receiver are at different depths, the reception power, BER (Bit Error Rate), and Q factor improve.

Keywords: wavelength, attenuation, scattering, LD, LED, reception power.

3. Introducción

Las comunicaciones inalámbricas submarinas (Underwater Wireless Communication, UWC) abarcan un grupo pequeño de tecnologías, donde se destaca las señales acústicas y de radio frecuencia que han sido adaptadas para operar en las condiciones propias de los entornos submarinos. Estas tecnologías como tal, han sido útiles para muchas aplicaciones de monitoreo en la flora y fauna submarina, así como también han sido ampliamente utilizadas para comunicaciones de vehículos submarinos. No obstante, en los últimos años ha surgido la evolución de las comunicaciones ópticas inalámbricas submarinas (Underwater Optical Wireless Communication, UOWC) como una tecnología que busca mejorar las prestaciones de las tecnologías anteriormente mencionadas.

Dentro de este contexto, UOWC hace referencia a usar señales ópticas como método de transmisión de datos, en el rango de luz visible del espectro electromagnético, específicamente en las longitudes de onda de 450 nm a 550 nm (Zeng et al., 2017). Por ende, UOWC es favorable para aplicaciones en lugares de difícil acceso que permitan realizar comunicaciones de vehículos operados por control remoto (ROVs) y vehículos submarinos autónomos (AUV) (Chaudhary et al., 2023).

Esta tecnología trae algunas bondades en comparación de las señales acústicas y de radio frecuencia, y es que UOWC tiene una tasa de datos que llega hasta el orden de los Gbps lo que representa una mejora en cuanto a las tasas de datos alcanzadas de las tecnologías tradicionales (kbps para señales acústicas y Mbps para señales RF). Segundo, reduce la latencia en la comunicación ya que para sus similares este parámetro puede abarcar una latencia de hasta varios segundos. Y tercero, en cuanto al consumo de energía presenta un bajo consumo energético (Zhu et al., 2020).

Dicho esto, el presente trabajo de investigación tiene como problemática principal conocer las limitaciones de la transmisión óptica inalámbrica submarina. Debido a que, en la actualidad, para aplicaciones específicas de monitoreo y detección submarina se ve perjudicado por efectos de atenuación y dispersión en medio acuáticos. Por lo tanto, se pretende identificar estos límites, con el fin de resolver los desafíos de comunicaciones ópticas en medios turbulentos. Además, a nivel nacional, la problemática principal es que la investigación referente a nuevas tecnologías se encuentra en desarrollo y como tal se podría aportar conocimiento en este campo de estudio. Consecuente a la problemática presentada, se plantea hacer el análisis al sistema de comunicación óptico-inalámbrico UOWC en un escenario sin línea de comunicación directa, (Non-Line of Sight, NLOS).

En este contexto, se busca contribuir al campo académico universitario, específicamente en el ámbito de las comunicaciones ópticas. El enfoque propuesto consiste en profundizar en el estudio del rendimiento de estas comunicaciones, haciendo especial hincapié en la utilización de la configuración de enlace Non Line Of Sight (NLOS). De este modo, se pretende aportar conocimiento significativo ante los desafíos y oportunidades que presenta la transmisión óptica submarina, consolidando así la relevancia de esta investigación en un contexto de constante evolución tecnológica.

Asimismo, para el Ecuador la presente investigación resulta beneficiosa debido a que se aporta fundamentos para que en un futuro se pueda llegar a implementar tecnologías de exploración de la industria petrolera en el fondo marino, así como también aplicaciones para el monitoreo de vida marina, contaminación de agua, vigilancia de catástrofes naturales, entre otros, para ayudar al desarrollo económico del país.

Esto nos deriva a resaltar los objetivos de investigación que se muestran a continuación:

Objetivo General

Diseñar y simular un sistema de comunicación óptico inalámbrico submarino (UOWC) sin línea de visión directa (Non line of Sight-NLOS), a través del estudio pormenorizado de los fundamentos teóricos y uso de software especializado

Objetivos Específicos

- Realizar una revisión exhaustiva del estado del arte referente a los sistemas UOWC haciendo énfasis a enlaces NLOS
- Examinar el panorama actual del equipamiento comercial referente a la tecnología UOWC
- Diseñar y simular un sistema inalámbrico UOWC NLOS usando el software OptiSystem.

En cuanto al alcance, este trabajo de titulación se centra principalmente en estudiar la tecnología UOWC, abordando conceptos tanto teóricos como técnicos, además de realizar un análisis de equipos UOWC comerciales para llevar a cabo simulaciones de un sistema UOWC sin línea de visión directa NLOS, considerando los efectos de propagación de luz en entornos submarinos.

Por ende, las simulaciones se realizarán en el software OptiSystem versión 21, el cual se muestra a detalle en la sección de resultados del presente documento.

Finalmente, se menciona que los enlaces NLOS son aplicables para ambientes en donde existen obstrucciones marinas, resultando ventajoso en comparación para enlaces LOS. Sin

embargo, este tipo de enlaces se ve perjudicado por los efectos de absorción y dispersión del canal submarino, y la misma empeora cuando se incrementa las distancias de los enlaces.

4. Marco Teórico

- **Estado del Arte**

Previo a la elaboración al marco teórico, detallaremos de manera resumida el estado del arte referente a la tecnología UOWC, en donde los autores realizan diferentes estudios en cuanto a simulaciones trabajadas en versiones anteriores a OptiSystem versión 21.

En (AL-Din et al., 2024) presentan un diseño y simulación de un sistema UOWC con línea de visión directa (LOS, Line of Sight) utilizando el software OptiSystem versión 20. En el estudio analizan y comparan las modulaciones RZ-OOK y NRZ-OOK, fotodiodos de tipo PIN y APD. Además, trabajan con diferentes tipos de agua: “Pure Sea”, “Clear Ocean”, “Coastal Sea”, “Harbor I” y “Harbor II”. Los resultados indicaron que con la modulación NRZ-OOK y un fotodiodo de tipo APD se logran mejores resultados, especialmente para el tipo de agua “Pure Sea” en donde lograron una distancia máxima de transmisión de 28 m.

En (Kaeib, 2022) se diseña otro sistema UOWC LOS, en donde usan una fuente óptica láser junto a la modulación Mach-Zehnder, las simulaciones lo hacen para tres tipos de agua, las cuales son: “Pure Sea Water”, “Coastal Ocean” y “Turbid harbor”. Los resultados de este escenario indican que se logra una comunicación superior a los 100 m de distancia, además recalcan que se llega a las mismas distancias aun reduciendo la potencia de transmisión. No obstante, este estudio se simula el canal con las funcionalidades del bloque FSO (Free Space Optics) de OptiSystem, y usan amplificadores ópticos en la transmisión y recepción del sistema.

En el trabajo realizado por Alaa et al. (2018) realizan un estudio en el que se evalúa el canal utilizando el bloque FSO de OptiSystem. Con el propósito de mitigar los efectos que sufre la señal óptica, se emplean modulaciones como CO-OFDM (Coherent Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing), además se usa la técnica MIMO (Multi-Input-Multi-Output). Los resultados muestran que, para distancias entre 2 a 10 m de separación entre nodos, se obtienen valores favorables de parámetros de calidad y potencia de señal, siempre y cuando se use un sistema MIMO $m \times n$. Se destaca que, a mayor cantidad de transmisores y receptores en el sistema UOWC, mayor será la distancia de transmisión alcanzada.

4.1. Comunicaciones ópticas inalámbricas submarinas (Underwater Optical Wireless Communication, UOWC)

4.1.1. Principios y definiciones

Antes de desarrollar el concepto de comunicaciones ópticas inalámbricas submarinas, se debe abordar el concepto de VLC (Visible Light Communication). Esto debido a que la misma representa la forma en cómo se propaga la luz en diversos ambientes ya sean terrestres o submarinos, es por eso que resulta conveniente hacer una clasificación del espectro electromagnético dependiendo de la frecuencia y longitud de onda.

Por lo tanto, los sistemas VLC principalmente trabajan en las frecuencias de 430 THz a 790 THz, en donde autores como Riurean et al. (2021) mencionan que estas frecuencias tienen una longitud de onda de entre 380 nm a 750 nm, tal y como se muestra en la figura 1.

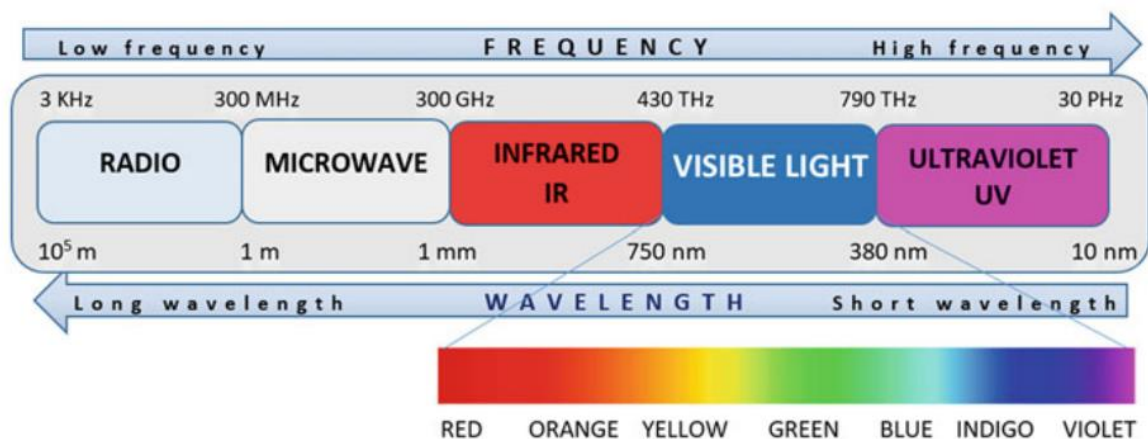


Figura 1. Clasificación del espectro electromagnético
Fuente. (Riurean et al., 2021)

Como se mencionó anteriormente, los sistemas VLC pueden trabajar en entornos submarinos, entonces se deriva las comunicaciones submarinas por luz visible (Underwater Visible Light Communication, UVLC), es por eso que M. F. Ali et al. (2022) menciona que UVLC es “una tecnología que resulta beneficiosa en la propagación en ambientes submarinos, y, por ende, tiene un amplio número de aplicaciones en lo relacionado al monitoreo y navegación submarina, además que es aplicable para rangos de transmisión de corto alcance”.

Los sistemas de comunicación óptica inalámbrica submarina principalmente se basan en la propagación del haz de luz por medios acuáticos, en donde los sistemas UWOC pueden alcanzar transmisiones de larga distancia y altas velocidades de datos usando la ventana de espectro electromagnético de 522 nm ya que la misma presenta baja atenuación (Lv et al., 2022). Además, en otros trabajos como en Zeng et al. (2017) se menciona que en las longitudes

de onda que están dentro del rango de 450 nm a 550 nm, también son frecuencias que se usa en UOWC debido a que las mismas presentan bajas atenuaciones en entornos submarinos. En la figura 2 se observa el nivel de atenuación submarina por longitud de onda.

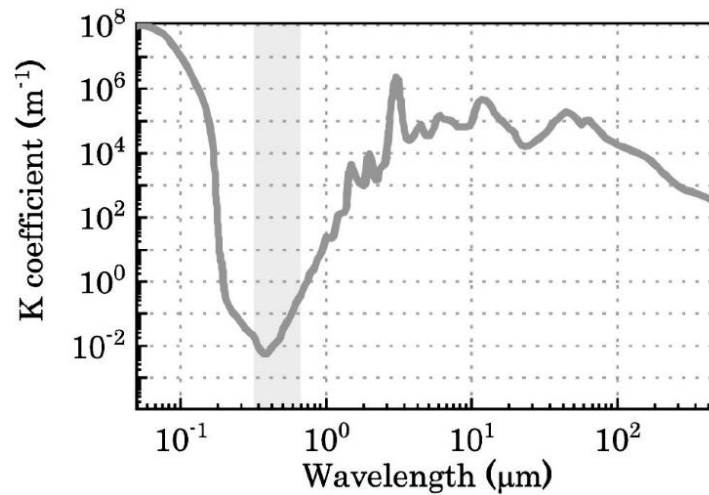


Figura 2. Atenuación Submarina para diferentes longitudes de onda
Fuente. (Lv et al., 2022)

Sin embargo, esta tecnología resulta importante para aplicaciones industriales, militares y científicas, ya que por mucho tiempo se han usado sistemas acústicos que han tenido un rendimiento aceptable para aplicaciones bajo el agua, no obstante, estos sistemas se ven limitados por diversos factores que inciden en la comunicación tales como el ancho de banda, alta latencia, pérdidas en la transmisión, propagación por trayectos múltiples y la propagación Doppler que directamente afectan al Bit Error Rate (BER). Por lo tanto, las comunicaciones de luz visible (Visible Light Communication, VLC) son otra tecnología que es aplicable en ambientes submarinos, VLC opera en el intervalo del espectro de luz visible de 400-700 nm. (Spagnolo et al., 2020b)

4.2. Elementos que conforman un sistema UOWC

Los elementos que conforman un sistema UWOC principalmente se basan en tres componentes principales, estos son: transmisor, canal y receptor. En la figura 3 se muestra el esquema del mismo.

4.2.1. Transmisor

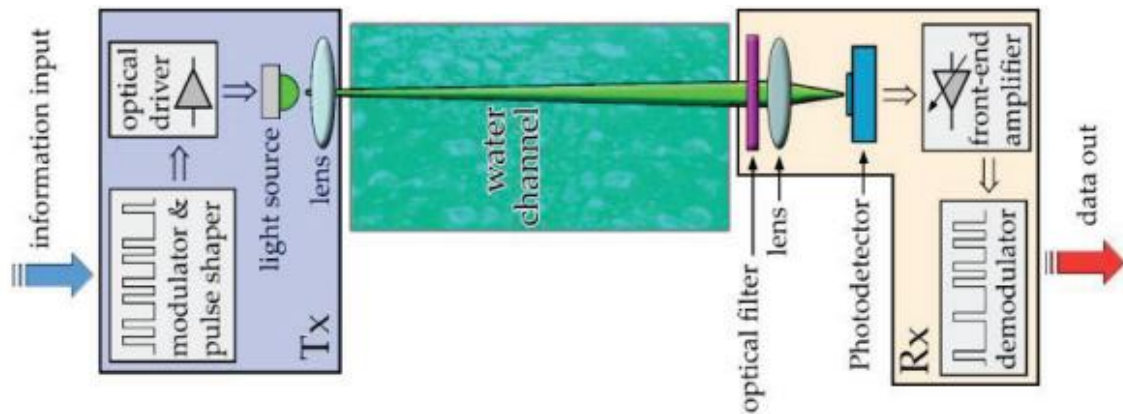


Figura 3. Esquema típico de un sistema UOWC

Fuente. (Spagnolo et al., 2020a)

Tal y como se observa en la figura 3 la parte del transmisor lo conforma los siguientes elementos:

- Modulador
- Circuito de forma de pulso
- Controlador óptico
- Fuente de Luz

Entonces, según Spagnolo et al. (2020b) este sistema funciona primeramente con la entrada de información a la parte del modulador y circuito de forma de pulso, en la modulación para estos sistemas comúnmente se usa la técnica de *modulación de intensidad* que se lo explica en el apartado 4.3, seguidamente se pasa por un circuito controlador en donde su función principal es el de convertir la señal eléctrica a una señal óptica, finalmente se pasa toda esta señal que ha sido tratada a una fuente de luz que transmite esta información y finalmente se usa el lente con el propósito de configurar el enlace óptico.

En la parte de transmisión para la fuente de luz óptica según Al-Zhrani et al. (2021) menciona que para sistemas de comunicaciones ópticas inalámbricas submarinas, principalmente se usan Diodos Laser (Laser Diodes, LDs) o en su defecto diodos emisores de luz (Light Emitting Diodes, LEDs), sin embargo aclara que ambos se usan en ambientes submarinos distintos, por ejemplo el uso más común que se le da a los LDs es para aguas poca

profundas prefiriendo principalmente los LDs azul-verde, y por otra parte para aguas oceánicas claras y que son profundas son preferiblemente usable los LEDs, se menciona la región azul-verde ya que la misma tiene potencia de salida que varía entre los 10 mW hasta los 10 W (p.167).

4.2.1.1. Fuentes ópticas y ángulo de divergencia.

- **Diodos Emisores de Luz (LED):** “los LEDs son dispositivos emisores de luz del tipo optoelectrónico de la tecnología de semiconductores, que emiten luz a diversas longitudes de onda según sea la composición de su material” (Andrés et al., 2012).
- **Diodo láser (LD):** es una fuente de luz que se produce por un cristal semiconductor, que utiliza como elemento activo la unión P-N activada por un LED dentro de una cavidad resonante, al igual que el LED, el diodo láser emite luz en una gran variedad de longitudes de onda dependiendo de la composición del material. (Lemus et al., 2011)

En la tabla 1 se presenta las características de los LED y LDs.

Tabla 1. Características entre LDs y LEDs

Característica	Diodo Laser (LD)	Diodo emisor de Luz (LED)
Longitud de onda	450-570 nm (azul-verde)	450-570 nm (azul-verde)
Divergencia del Haz	Estrecha	Dispersión
Costo	Alto	Bajo
Velocidad	Alta	Baja
Rango	Largo	Corto

Nota. Tabla tomada de (Al-Zhrani et al., 2021)

- **Ángulo de divergencia:** este ángulo representa un parámetro fundamental dentro de la emisión del haz de luz es por eso que Domínguez (2016) menciona que la divergencia “es una medida angular del incremento en el diámetro del haz de luz con respecto a la distancia desde la apertura en donde emerge el haz, este es un parámetro que a menudo se lo relaciona con los láseres ópticos”. Dentro de UOWC Al-Zhrani et al. (2021) indica que el ángulo de divergencia para una fuente láser es más estrecho en comparación al de una fuente óptica LED. La representación de este ángulo se lo puede observar en la figura 4.

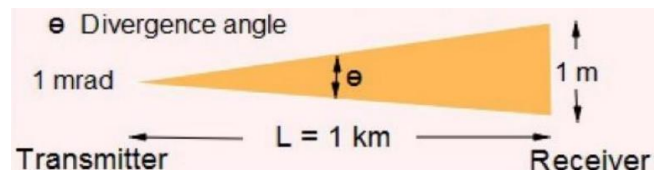


Figura 4. Representación gráfica del ángulo de divergencia.

Fuente. (M. H. Ali et al., 2021)

4.2.2. Canal

Para sistemas UWOC el canal es el agua, en donde el haz de luz viaja a través de la misma experimentando varios fenómenos tales como la absorción, dispersión, entre otros. Además, es aquí en esta etapa en donde se experimenta o aplica los modos de configuración del enlace ya sea por línea de visión directa (Line of Sight, LOS) y sin línea de visión directa (NLOS) que se los tratará más adelante en el documento.

4.2.3. Receptor

En la figura 3 podemos observar que el receptor se conforma de los siguientes elementos:

- Filtro óptico
- Fotodetector
- Amplificador Frontal
- Demodulador

En el receptor, se emplea un filtro óptico pasa banda estrecha cuya función es seleccionar la longitud de onda del sistema UOWC, excluyendo otras fuentes de luz externas al transmisor, lo cual reduce significativamente el ruido e interferencia.

Después de este procedimiento la luz recibida pasa por un proceso de conversión óptico-eléctrico que lo realiza el fotodetector integrado en el receptor. Todo este proceso anteriormente mencionado hace que la señal se atenué y se añada ruido, para solucionar este problema se hace uso de un amplificador que incrementa el nivel de la señal, para luego pasar al demodulador que como tal recupera la señal en su totalidad. (Leccese & Spagnolo, 2021)

Sin embargo, el fotodetector en la parte de recepción del sistema UOWC, es el encargado de transformar la señal óptica a una señal de tipo eléctrica. Es por eso que Al-Zhrani et al. (2021) menciona que los receptores deben tener ciertas características para operar en este tipo de sistemas, las cuales son:

- Alto FOV (Campo de Visión)
- Alta ganancia
- Rápido tiempo de respuesta

- Bajo coste
- Tamaño pequeño
- Alta fiabilidad
- Alta sensibilidad
- Alta SNR.

Además, se debe tomar en cuenta que los fotodetectores que se usan en otras aplicaciones OWC no son del todo aplicables en sistemas UOWC debido a que estos se comportan de forma diferente al estar en entornos submarinos, entre los tipos más comunes de fotodetectores tenemos: PIN, Fotodiodo de Avalancha (Avalanche Photodiode, APD), Fotoconductor, Metal semiconductor-metal fotodiodos. Sin embargo, los fotodiodos PIN y APD no son recomendables para usarse en entornos submarinos ya que debido al elevado umbral de detección y la alta intensidad del ruido, se ven afectados en cuanto a la distancia de transmisión menores a los 100 m. (Leccese & Spagnolo, 2021).

Otros autores hacen otra clasificación de los fotodetectores, enfocándose principalmente en la región azul y verde, los mismos se pueden observar en la figura 5.

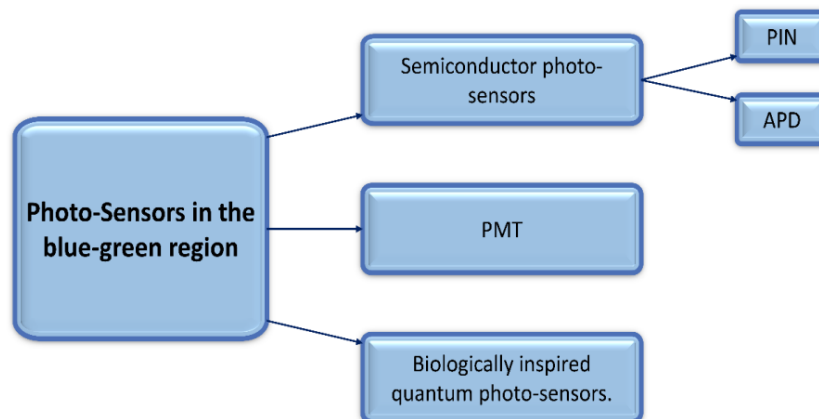


Figura 5. Tipos de foto-sensores en la región azul-verde
Fuente. (Al-Zhrani et al., 2021)

Según Al-Zhrani et al. (2021) menciona que los fotosensores de tipo PIN (P-type Intrinsic N-type) y APD (Avalanche Photodiode) son eficientes para cortas distancias ya que los mismos presentan características como tiempos de respuesta rápida, tolerancia a luz ambiental, ganancia interna amplia y eficiencia cuántica excelente. Sin embargo, se destaca que el fotosensor de tipo PIN es más eficiente para longitudes de onda corta en comparación con el APD. Siguiendo con la clasificación de la figura 5 el autor menciona que los tubos fotomultiplicadores o también conocidos como PMT (photomultiplier tube) presentan características que dificultan la implementación en sistemas UOWC ya que sufre altos suministros de voltaje y elevados costos para su implementación.

Finalmente, Al-Zhrani et al. (2021) y Leccese & Spagnolo (2021) coinciden que para sistemas UOWC resulta beneficioso aplicar fotodiodos de avalancha de fotón único (SPAD) ya que presenta una polarización inversa mayor en comparación de fotodiodos PIN, además con SPAD tiene una ventaja principal a los fotodiodos mencionados anteriormente, ya que los mismos prescinden de la necesidad de un amplificador de transconductancia, lo que conlleva a obtener alta precisión, alta detección para enlaces de larga distancia.

A continuación, daremos algunas definiciones de los parámetros mencionados.

- PIN: este es un tipo de fotodetector estándar en el cual entre la región tipo P y tipo N se encuentra una región intrínseca, en donde las mismas son dopadas para los contactos óhmicos. (Bielecki et al., 2022) En la figura 6 se observa la estructura del detector.

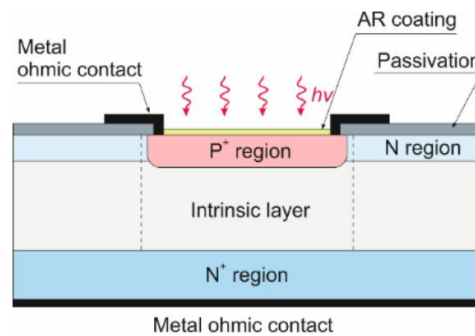


Figura 6. Estructura del detector PIN

Fuente. (Bielecki et al., 2022)

- APD: este es un fotodetector que detecta una señal óptica débil a causa de la multiplicación de portadores de avalancha. Además, la absorción de fotones generalmente se produce en la región P. Este tipo de fotodetector ofrece una combinación de alta velocidad, alta sensibilidad y alta eficiencia cuántica (Bielecki et al., 2022). Su estructura se la muestra en la figura 7.

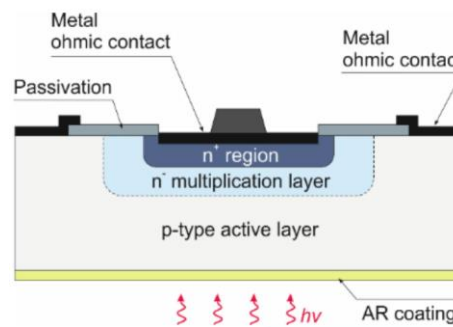


Figura 7. Estructura del fotodetector APD

Fuente. Elaboración propia

- Área Activa del fotodetector: se define como aquella área o región física que transforma la radiación óptica a una radiación eléctrica. Para detectores de superficie circular el área activa se indica en el diámetro, y para los que cuenten con superficie rectangular o cuadrada el área activa se indica la longitud y anchura. (Bielecki et al., 2022)
- Sensibilidad de recepción: se la define como el nivel mínimo de señal que llega a la entrada del receptor para que el mismo lo identifique y procese correctamente. Sus unidades pueden ser μV , $dB\mu V$, dBm (ITU, 2009).
- Campo de visión (FOV): el campo de visión es aquel ángulo cónico máximo en el que un fotodetector es capaz de detectar la radiación que llega. (Bielecki et al., 2022) . En la figura 8 se representa al mismo.

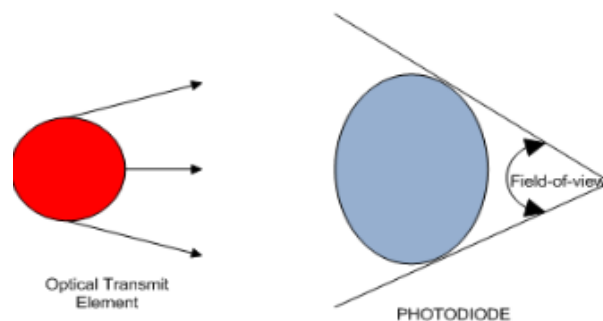


Figura 8. Representación FOV
Fuente. (Visual MIMO, n.d.)

4.3.Técnica de modulación en sistemas UWOC

Para sistemas UOWC, se usa la técnica IM/DD, la cual se explica brevemente a continuación.

4.3.1. Modulación de Intensidad y Detección Directa (IM/DD)

Esta modulación consiste en modular la intensidad de la luz que se transmite, por lo tanto, los bits se codifican en dos símbolos con diferente potencia cada uno, esto deriva que resulte en diferentes amplitudes tanto para los 1 como para los 0 (Fàbrega, 2013). Este tipo de modulación se deriva en la siguiente técnica:

- Modulación OOK (On–Off Keying)

Es un esquema de modulación que consiste en la emisión de luz en datos binarios de 1 o 0, en donde el bit 1 representa la emisión de luz y de ser el caso contrario se representa con el bit 0. De esto se deriva el formato RZ (Retorno a Cero) y NRZ (No retorno a Zero), en donde el primero ocurre cuando el pulso asociado a 1 ocupa sólo una fracción del intervalo de bit, y

el formato NRZ es cuando el pulso abarca el intervalo de bit completo (España Booquera, 2005). En la figura 9 se representa este formato de modulación

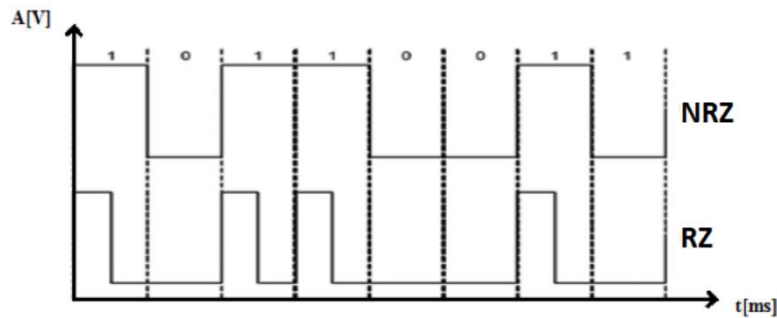


Figura 9: OOK-RZ y OOK-NRZ
Fuente. (Andrej et al., 2014)

4.4.Modos de Configuración de Enlace

4.4.1. Línea de Visión Directa (Line of Sight, LOS)

Este tipo de enlaces que son con línea de visión directa principalmente se aplican en enlaces punto a punto en donde el transmisor y receptor se encuentran estáticos, sin embargo, este tipo de configuración necesitan mecanismos de orientación y apuntamiento constante entre los nodos que sean móviles (Kaushal & Kaddoum, 2016). En la figura 10, se observa la representación de este enlace.

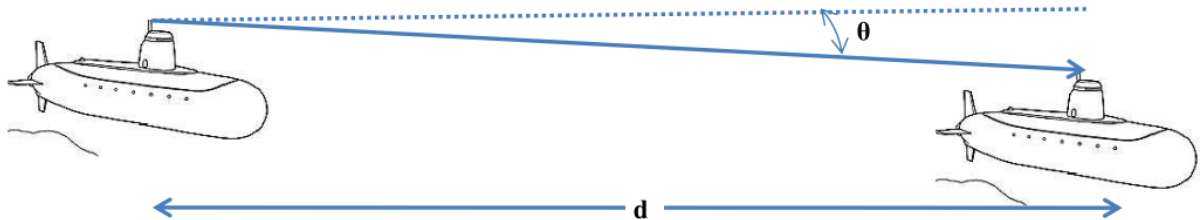


Figura 10. Configuración LOS
Fuente. (Kaushal & Kaddoum, 2016)

Por lo tanto, para este tipo de configuración, la ecuación que representa la potencia de recepción según Arnon (2010) se representa como:

$$P_{RLOS} = P_T \eta_T \eta_R L_{pr} \left(\lambda, \frac{d}{\cos \theta} \right) \frac{A_R \cos \theta}{2\pi d^2 (1 - \cos \theta_0)} \quad (1)$$

Donde P_T es la potencia promedio óptica que sale del transmisor, η_T y η_R son las eficiencias tanto de transmisión y recepción respectivamente, d es la distancia perpendicular entre el transmisor y el plano del receptor, θ es el ángulo que se forma entre la perpendicular del plano del receptor y la trayectoria del transmisor-receptor, A_R es el área de apertura del receptor, θ_0 representa el ángulo de divergencia del haz de luz.

Sin embargo, para casos cuando el ángulo de divergencia del haz de luz sea muy inferior a $\frac{\pi}{20}$ la potencia de la señal recibida se define por:

$$P_{RLOS} = P_T \eta_T \eta_R L_{pr} \left(\lambda, \frac{d}{\cos \theta} \right) \frac{A_R \cos \theta}{\pi (d \tan \theta_0)^2} \quad (2)$$

Otro parámetro importante, en la ecuación 1 y 2 es el L_{pr} el cual representa el factor de pérdida de propagación en función de la longitud de onda y la distancia z , viene dada por:

$$L_{pr}(\lambda, z) = \exp[-c(\lambda)z] \quad (3)$$

Donde c es el coeficiente de extinción del medio acuático que está regido por los coeficientes de absorción α y Scattering β (p. 2).

$$c(\lambda) = \alpha(\lambda) + \beta(\lambda) \quad (4)$$

4.4.2. Sin Línea de Visión Directa (Non Line of Sight, NLOS)

En este tipo de enlaces existen dos métodos, en donde el primero de ellos consiste en la reflexión de la señal óptica en la interfaz océano-aire, y el segundo consiste en difundir la luz óptica de los LED o láseres para aumentar el campo de visión del receptor. Como tal NLOS no se necesita mecanismos de orientación y seguimiento ya que aplica los métodos anteriormente mencionados (Kaushal & Kaddoum, 2016).

- **Configuración reflectivo y difuso**

Para el tipo de enlace NLOS reflectivo, ya no se requiere apuntamiento desde un transmisor hacia un receptor, por lo tanto, se usa una comunicación de tipo reflectante debido a las obstrucciones marinas, tales como vida marina, vegetación marina, formaciones geológicas, sedimentos y/o partículas en suspensión que dificultan una comunicación de tipo directa, esto puede verse representando en la figura 11.

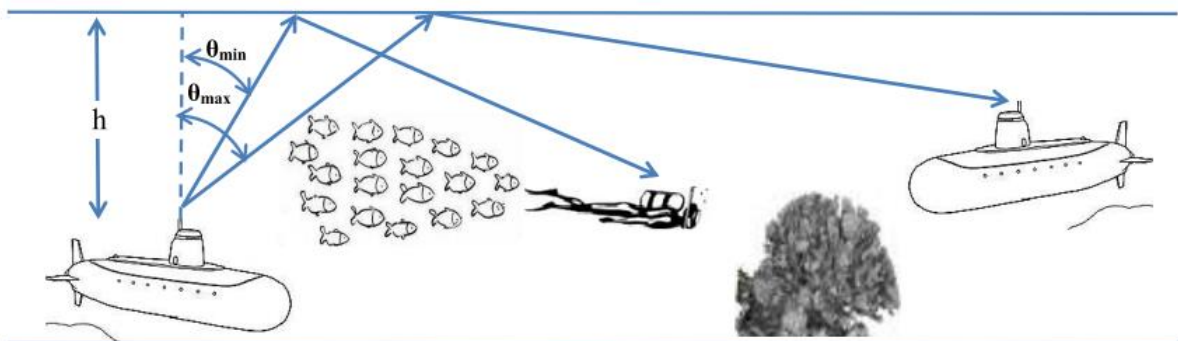


Figura 11. Enlace NLOS-Reflectivo
Fuente. (Kaushal & Kaddoum, 2016)

Según Arnon (2010) menciona:

Para que se de este tipo de comunicación el transmisor láser emite un cono de luz que se define con un ángulo interior y exterior, de forma ascendente tal y como se muestra en la figura 11, entonces el proceso de reflectividad sucede cuando el haz incidente de luz llega a la interfaz océano-aire y la misma es devuelta debido a que los índices de refracción del aire y el agua son distintos, es decir ocurre la Reflexión Interna Total (RIT) dado que el índice de refracción del agua ($n = 1.33$) es mayor que el índice de refracción del aire ($n = 1$), por lo tanto, el rayo de luz que incide en la superficie oceánica se refleja nuevamente en el agua. No obstante, se aclara que el haz de luz al llegar a la superficie del agua, ilumina un área anular, entonces cuando el transmisor está en una profundidad h la superficie anular iluminada con igual densidad de potencia a la profundidad x viene dada por la siguiente ecuación:

$$A_{aan} = 2\pi(h + x)^2(\cos \theta_{min} - \cos \theta_{max}) \quad (5)$$

Por lo que la potencia recibida viene dada por:

$$P_{RNLOS}(\theta) = A_R f_R(\theta) \quad (6)$$

Donde f_R es una ecuación auxiliar que depende de P_T (ver ecuación 7), A_{aan} , η_T , η_R , $(h + x)$, y el ángulo de transmisión θ_t (Kaushal & Kaddoum, 2016).

$$f_R = \frac{P_T \cos \theta}{A_{aan}} \left\{ \begin{array}{l} \eta_T \eta_R L_{pr} \left(\lambda, \frac{h+x}{\cos \theta} \right) \frac{1}{2} \left\{ \left[\frac{\tan(\theta_t - \theta)}{\tan(\theta_t + \theta)} \right]^2 + \left[\frac{\sin(\theta_t - \theta)}{\sin(\theta_t + \theta)} \right]^2 \right\}, \theta_{min} \leq \theta < \theta_c \\ \eta_T \eta_R L_{pr} \left(\lambda, \frac{h+x}{\cos \theta} \right), \theta_c \leq \theta < \theta_{max} \end{array} \right. \quad (7)$$

Sin embargo, este tipo de enlaces también pueden darse en la configuración de tipo difusa, como se muestra en la figura 12, y su principio de funcionamiento es similar ya que desde el transmisor se emite un cono de luz, pero en este caso no se usa la reflexión para llegar hasta el receptor, si no que el mismo debe estar en el área de cobertura del haz de luz.

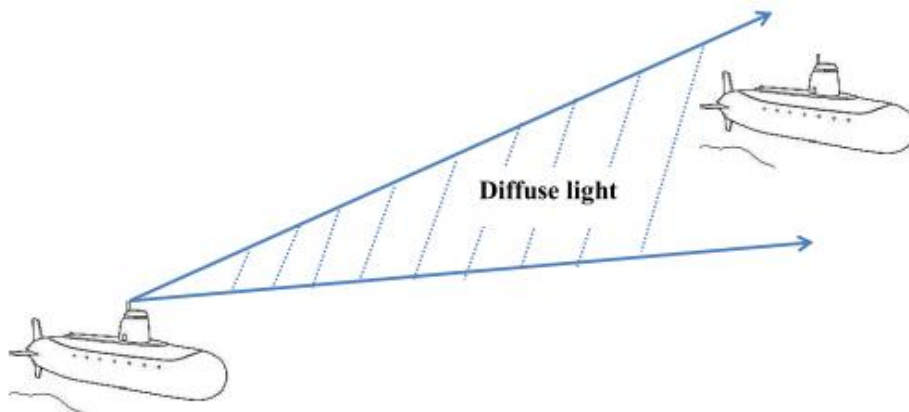


Figura 12. Configuración NLOS-Difusa
Fuente. (Kaushal & Kaddoum, 2016)

4.4.3. Enlace retro reflectivos

Según como menciona Zeng et al. (2017) los enlaces retro reflectivos pueden ser considerados como una extensión del tipo de enlace Line of Sight (LOS), sin embargo, está enfocado para otro tipo de transmisores y receptores ópticos, como por ejemplo aquellos sistemas que carecen de potencia y peso. Además, este tipo de configuración de enlace es útil para comunicaciones UOWC dúplex, el funcionamiento de este tipo de enlaces consiste, en que el transmisor emite un haz de luz que llega al receptor, este último al detectar el haz de luz va a reflejar la luz transmitida mediante un retrorreflector modulado, mientras ocurre este proceso toda la información se codifica en la luz que es reflejada, como se muestra en la figura 13. Sin embargo, este tipo de configuración trae consigo ciertas limitaciones, que se basan en la retrodispersión de la señal transmitida, ya que causa interferencia con la señal que es reflejada por el retrorreflector modulado trayendo consecuencias en el SNR y BER del sistema.

Otros autores nombran al retrorreflector modulado con el nombre de catadióptico óptico, que cumple las mismas características de reflejar la señal una vez que haya sido detectada (Kaushal & Kaddoum, 2016), por lo tanto, la potencia recibida se expresa como:

$$P_{R_Retro} = P_T \eta_T \eta_R \eta_{Retro} L_P \left(\lambda, \frac{d}{\cos \theta} \right) \frac{A_{Retro} \cos \theta}{2\pi d^2 (1 - \cos \theta_d)} \times \frac{A_R \cos \theta}{\pi (d \tan \theta_{Retro})^2} \quad (8)$$

Donde η_{Retro} , es la eficiencia óptica del retrorreflector, A_{Retro} es el área de apertura del retrorreflector y θ_{Retro} es el ángulo de divergencia del retrorreflector.

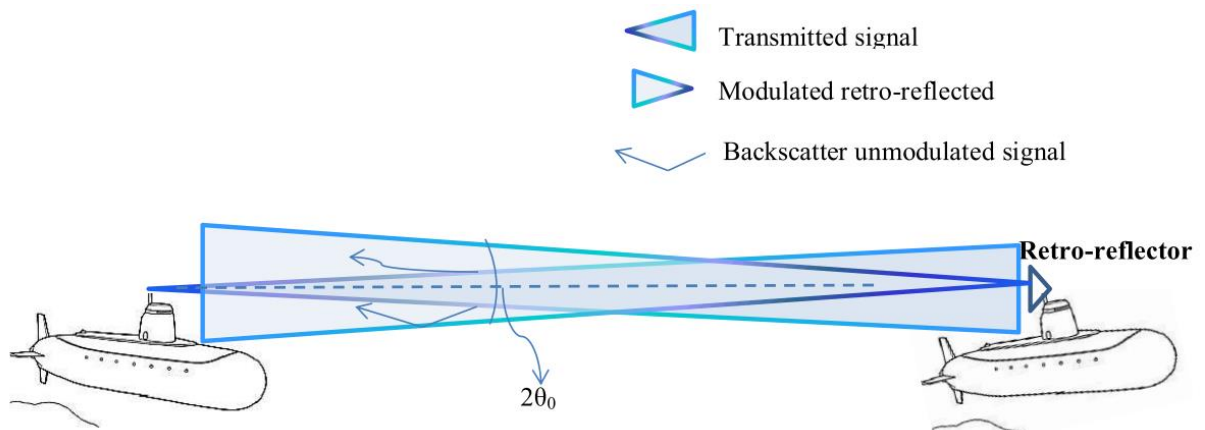


Figura 13. Enlace Retro Reflectivo
Fuente. (Kaushal & Kaddoum, 2016)

4.5. Fenómenos de propagación óptica en canales inalámbricos submarinos

En muchas aplicaciones de enlaces ópticos submarinos, tienden verse afectados por fenómenos propios del medio de transmisión tales como la absorción, dispersión (scattering), atenuación, turbulencia, entre otros, que trataremos más adelante. Sin embargo, antes de profundizar en estos temas, debemos considerar las propiedades ópticas del agua.

Las propiedades ópticas del agua, principalmente se clasifican en dos grupos: propiedades ópticas inherentes (Inherent Optical Properties, IOPs) y propiedades ópticas aparentes (Apparent Optical Properties AOPs).

- Propiedades ópticas inherentes (IOPs)

Este tipo de propiedades son las que depende solamente del medio por el cual se propaga el haz de luz, por lo que se excluye la luz ambiental dentro del medio, en este grupo podemos identificar IOP fundamentales las cuales son: el coeficiente de absorción, la función de dispersión volumétrica, índice de refracción y el coeficiente de atenuación del haz (Mobley, 1994).

Entonces las IOPs se asocian principalmente en la absorción y dispersión. Entonces de esto se deriva el coeficiente de atenuación, que se expresa como:

$$c(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda) \quad (9)$$

- Propiedades ópticas aparentes (AOPs)

Este tipo es contrario a IOPs ya que AOPs se centra tanto en el medio como la estructura geométrica del campo de luz ambiental. Los AOPs más comunes son, la reflectancia de la irradiancia (cantidad de energía óptica sobre una superficie), cosenos medios y distintos coeficientes de atenuación difusa (Mobley, 1994). Este tipo de propiedades se aplican para sistemas UOWC que estén cerca de la superficie del océano (Zeng et al., 2017).

No obstante, también debemos poner atención a los diferentes tipos de agua que existen en este tipo de ambientes submarinos, por eso M. F. Ali et al. (2020) hace una clasificación en tres grupos, los cuales son: agua de océano, agua para comunicación, y tipos de agua de mar, en donde las características de cada esta clasificación se plasman en las figuras 14, 15 y 16.

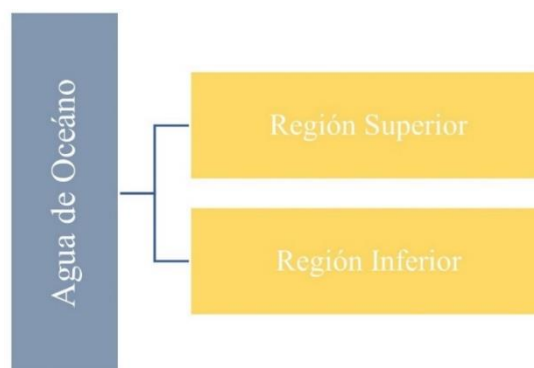


Figura 14. Tipos de agua de océano

Fuente. (M. F. Ali et al., 2020)

De la figura 14 se puede mencionar que en la región superior generalmente tiende a tener temperaturas más altas, debido a la luz solar que estas reciben, en cambio para la región inferior su temperatura va disminuyendo según vaya aumentando la profundidad del mismo, pasando por la región intermedia o también llamada termoclina. (M. F. Ali et al., 2020).

Siguiendo con la clasificación, agua para comunicación, en la figura 15 se tiene los siguientes subgrupos:

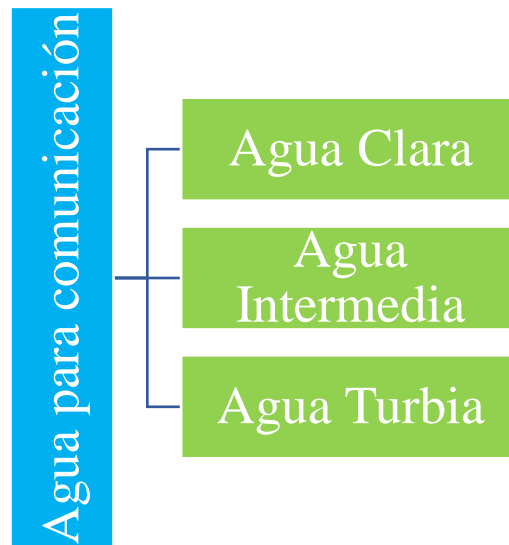


Figura 15. Tipos de agua para comunicación
Fuente. Elaborada por el autor

La clasificación vista en la figura 15 es vista por ubicación geográfica debido a que estos tipos de agua se presentan en diversas regiones en el mundo, por ejemplo, para el tipo de agua clara se encuentra en el Atlántico y en el Pacífico medio, para el tipo de agua intermedia se encuentra en el Pacífico Norte y finalmente el agua turbia se la encuentra en las regiones del Mar del Norte y el Atlántico Oriental. (Jerlov, 2013, como se citó en Ali et al., 2020)

Sin embargo, para UOWC se hace la clasificación según las propiedades ópticas inherentes como se muestra en la figura 16, es por eso que M. F. Ali et al. (2020) define a las misma de la siguiente manera:

Agua oceánica clara: este tipo de agua tiene la cualidad de concentrar y disolver materias orgánicas, sales y componentes minerales.

Agua de mar Pura: en este tipo de agua se menciona que las señales ópticas son menos eficaces en comparación con aguas turbias y costeras.

Agua oceánica costera: es robusta poniendo en comparación al agua oceánica clara, debido que muestra una alta tasa de disolución de partículas en suspensión, lo que deriva

a dispersión y absorción, y por ende para este tipo de agua tiende a ofrecer menos capacidad de propagación a través de ella.

Agua Turbia de puerto: generalmente posee una tasa de concentración de partículas en suspensión baja y elevada. Poniendo en comparación con el agua oceánica costera, el agua turbia de puerto presenta elevadas tasas de absorción y dispersión.

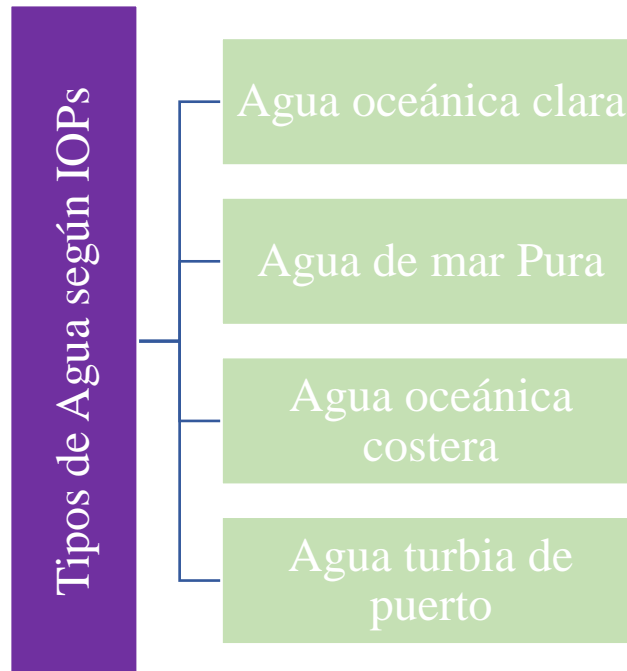


Figura 16. Tipos de Agua según IOPs

Fuente. Elaborada por el autor

En todos estos tipos de agua están presentes varios fenómenos o partículas que deterioran la señal óptica transmitida, es por eso que Gkoura et al. (2017) menciona:

- Componentes como Cloruro de Sodio (NaCl), Cloruro de Magnesio (MgCl₂), entre otros, son componentes que absorben la luz para determinadas longitudes de onda
- Componentes como arena, óxidos metálicos, contribuyen a la dispersión y absorción
- Los ácidos fúlvicos y húmicos que se comportan como materias orgánicas disueltas, afectan a la absorción en la longitud de onda azul y ultravioleta.
- La retrodispersión que se ve afectado en la longitud de onda azul, la causa principalmente virus, bacterias y detritus orgánicos.

- El fitoplancton con clorofila-A tienen dos comportamientos, en donde en la región azul-roja ocurre el fenómeno de absorción y en la región verde se da el fenómeno de dispersión. (p. 224)

4.5.1. Absorción

Cuando se habla de absorción bajo el agua principalmente se abarca conceptos de como la energía cambia cuando se encuentra con ciertas partículas marinas, por ejemplo, la energía de los fotones que atraviesa por el medio acuático tiende a convertirse en energías como la térmica y química (Li et al., 2021).

Sin embargo, otros autores como Joseph & Anandan (2022) mencionan que la absorción depende netamente de la longitud de onda y además definen a la absorción como la degradación que sufre la energía a medida que está se propaga por el medio submarino, lo que conlleva a que el receptor detecte una poca cantidad de fotones.

Como anteriormente se mencionó la absorción depende netamente de la longitud de onda, sin embargo, estos valores también se ven afectados por el tipo de agua en el que este el sistema UOWC, por ende, se usan diversos valores de concentración de clorofila para diferenciar estos tipos de agua (Spagnolo et al., 2020b).

Entonces, la expresión para la absorción, según Spagnolo et al. (2020b) es:

$$a(\lambda) = [a_w(\lambda) + 0.06a_c(\lambda)C^{0.65}] \{1 + 0.2 \exp[-0.014(\lambda - 440)]\} \quad (10)$$

Donde a_w representa el coeficiente de absorción de agua pura, a_c es el coeficiente de absorción específico para la clorofila y C es la concentración de la clorofila ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)

Sin embargo, otros autores como Li et al. (2021), formulan la absorción del agua en función del ácido fúlvico, ácido húmico y la clorofila ya que determinan que estos son los principales componentes de absorción del agua, la ecuación queda expresada como:

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + a_c(\lambda) + a_f(\lambda) + a_h(\lambda) \quad (11)$$

Donde $a_w(\lambda)$, $a_c(\lambda)$, $a_f(\lambda)$ y $a_h(\lambda)$ son los coeficientes de absorción causados por agua, clorofila, ácido fúlvico y ácido húmico respectivamente.

Las ecuaciones para cada una de estos coeficientes lo propone, Vijayakumari & Sumathi (2019), las cuales son:

$$a_w(\lambda) = a_w^0(\lambda) \left(\frac{w_c}{w_c^0} \right)^{a_w^0} \quad (12)$$

$$a_{cl}(\lambda) = a_c^0(\lambda) \left(\frac{C_c}{C_c^0} \right)^{a_c^0} \quad (13)$$

$$a_h(\lambda) = a_h^0 c_h \exp(-k_h \lambda) \quad (14)$$

$$a_f(\lambda) = a_f^0 c_f \exp(-k_f \lambda) \quad (15)$$

En donde a_w^0 , a_c^0 , a_h^0 , a_f^0 representan los coeficientes de absorción característicos del tipo de agua, clorofila, ácido húmico y ácido fúlvico respectivamente. Por otro parte, k_f y k_h son parámetros constantes que tienen como valor 0.0189 m^{-1} y 0.0111 m^{-1} respectivamente. C_c representa la concentración de clorofila, en donde en la tabla 2 se muestra los valores de la misma en diferentes tipos de agua, c_f y c_h son la concentración de ácido fúlvico, y ácido húmico (Li et al., 2021) que se expresan como:

$$c_f = 1.74098 C_c \exp(0.12327 C_c / C_c^0) \quad (16)$$

$$c_h = 0.19334 C_c \exp(0.12327 C_c / C_c^0) \quad (17)$$

C_c^0 es un valor constante (1 mg/m^3).

Tabla 2. Concentración de clorofila para diferentes tipos de agua (mg/m³)

	Pura	Oceánica Clara	Costeras	Turbia de Puerto
C_c	0	0.31	0.83	5.99

Nota. Tabla tomada de (Li et al., 2021)

4.5.2. Scattering

El scattering o la dispersión sucede por la misma naturaleza en el transporte de fotones, estos como tal se propagan en un canal de agua en donde experimentan de forma aleatoria la dispersión múltiple, por ende, genera que en el receptor la información llegue con retrasos en comparación en la que en un inicio se propaga. (Majlesein et al., 2021)

Otros autores como Geldard et al. (2020) también coinciden con el concepto anteriormente mencionado ya que afirman que la dispersión se produce por la interacción que ocurre en el fotón-partícula, lo que lleva al haz de luz tener un cambio en su trayectoria de propagación. Este efecto, desde el punto de vista del receptor puede verse observado como una atenuación y dispersión a causa de la propagación multi trayecto.

La dispersión también es clasificada según el radio de la partícula que lo provoca, así, se tiene la siguiente clasificación: Dispersión molecular, dispersión turbulenta y dispersión por partículas de gran tamaño. Al-Zhrani et al. (2021) las define como:

“La dispersión molecular también conocida como dispersión Rayleigh ocurre cuando la molécula es mucho menor que la longitud de onda de la luz incidente, en este tipo la intensidad es directamente proporcional a la sexta potencia de su diámetro e

inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de onda. En cambio, la dispersión turbulenta ocurre cuando la partícula es mucho mayor a la longitud de onda del haz de luz, y resulta ser proporcional al cuadrado del diámetro de la partícula y la variación aleatoria del índice de refracción del mar va a depender de la temperatura, salinidad, presión y temperatura de agua. Finalmente, la dispersión por partículas grandes, como su nombre mismo lo indica las partículas son de un tamaño diez veces mayor que la longitud de onda, y generalmente es provocada por partículas orgánicas e inorgánicas del mar” (p. 159).

Para expresar la cantidad esperada de dispersión se hace uso de la ecuación de dispersión de Rayleigh para casos de agua de mar pura, en cambio se aplica la teoría de dispersión de Mie para determinar la dispersión de fotones por partículas cuando alcanza su máximo en la dirección de avance (Johnson et al., 2014). Dicho en otras palabras, la dispersión de Rayleigh ocurre cuando el tamaño de las partículas es menor al de la longitud de onda usado, y la dispersión Mie se da debido a la interacción de partículas de mayor tamaño de la longitud de onda. En esta última, la dispersión varía según el tamaño de la partícula, como se muestra en la figura 17 b) y c).

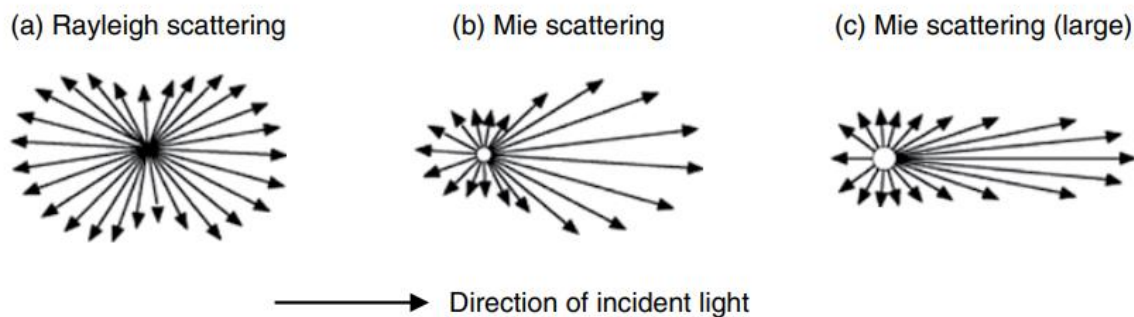


Figura 17. Diagrama de dispersión de Rayleigh y Mie
Fuente. (Johnson et al., 2014)

Como la dispersión varía según el tamaño de la partícula, Gkoura et al. (2017) afirma que “las partículas grandes tienen un índice de refracción igual a 1,15 mientras que partículas pequeñas presentan un índice de refracción igual a 1,03” (p. 225).

Además, Gkoura et al. (2017) menciona que la dispersión puede ser tomada como una relación entre la energía disipada de una potencia incidente por una unidad de distancia y es la suma de la dispersión hacia atrás $b_b(\lambda)$ y del coeficiente de dispersión hacia adelante, y las ecuaciones para la misma, se expresan de la siguiente manera:

$$b(\lambda) = b_w(\lambda) + b_s^0(\lambda)C_s + b_l^0(\lambda)C_l \quad (18)$$

$$b_B(\lambda) = 0.5 b_w(\lambda) + B_s b_s^0(\lambda)C_s + B_l b_l^0(\lambda)C_l \quad (19)$$

Donde, $b_s^0(\lambda)$ y $b_l^0(\lambda)$, representa el coeficiente dispersión grande y pequeño respectivamente y se expresan como:

$$b_s^0(\lambda) = 1.151302(m^2/g) \left(\frac{400}{\lambda}\right)^{1.7} \quad (20)$$

$$b_l^0(\lambda) = 0.341074(m^2/g) \left(\frac{400}{\lambda}\right)^{0.3} \quad (21)$$

C_s y C_l son las concentraciones de clorofila expresadas por:

$$C_s = 0.01739(g/mg)C_c e^{0.11631\left(\frac{C_c}{C_c^0}\right)} \quad (22)$$

$$C_l = 0.76284(g/mg)C_c e^{0.03092\left(\frac{C_c}{C_c^0}\right)} \quad (23)$$

Vijayakumari & Sumathi (2019) menciona que $b_w(\lambda)$ es el coeficiente de dispersión espectral del haz del agua, y se representa como:

$$b_w(\lambda) = 0.005826 \left(\frac{0.4}{\lambda}\right)^{4.322}, m^{-1} \quad (24)$$

4.5.3. *Turbulencia*

Este efecto se refiere a la poca homogeneidad de la temperatura o la salinidad del medio submarino o también puede referirse a la presencia de burbujas de agua en el trayecto por donde se propaga la luz óptica. Este efecto como tal puede verse afectado en la potencia óptica que le llega al receptor ya que dicha potencia va a presentar fluctuaciones, degradando de esta manera al rendimiento y fiabilidad de los sistemas UOWC. (Popoola et al., 2021)

Otros autores también definen a la turbulencia como un fenómeno que se presenta en sistemas UOWC, y que es causada por las corrientes oceánicas y por ende hace variaciones en el medio acuático, tales como la temperatura, salinidad, presión, densidad, entre otros. Este fenómeno como tal va a producir un cambio el índice de refracción del agua y por ende presenta fluctuaciones en la intensidad de señal en el receptor, las fluctuaciones también se las denomina como centelleo. (Zeng et al., 2017)

Para el modelado matemático de la turbulencia, según como mencionan varios autores se lo realiza mediante el mismo modelado matemático que se usa en FSO (Free Space Optics), es decir mediante el modelado de la turbulencia atmosférica, ya que está presenta los mismos mecanismos físicos de la turbulencia submarina.

Entonces, estas fórmulas se las muestra a continuación, Kaushal & Kaddoum (2016):

$$\Phi_n(k) = K_3 k^{-\frac{11}{3}} \quad (25)$$

Donde $K_3 = \chi \epsilon^{-1/3}$ se refiere a la fuerza de la turbulencia en ambientes submarinos, χ representa la tasa de disipación de las variaciones de temperatura y salinidad, ϵ es la tasa de disipación de energía cinética que tiene rangos de variación de 10^{-3} a $10^{-11} \text{ m}^2\text{s}^{-3}$ para aguas naturales, y k es la frecuencia espacial escalar.

Adicional a esto, Saeed et al. (2018) menciona que el centelleo se representa mediante una distribución log normal, representado como:

$$f_I(I) = \frac{1}{I\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{(\ln(I) - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (26)$$

Donde I es la intensidad recibida, μ representa la intensidad luminosa logarítmica media y σ^2 es el índice de centelleo que según Geldard et al. (2020), se calcula con la siguiente ecuación:

$$\sigma^2 = \frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2} \quad (27)$$

Donde $\langle . \rangle$ denota la media del conjunto.

4.5.4. Atenuación

La atenuación puede ser vista desde el punto de vista de la irradiancia que sale de un transmisor y la cantidad de irradiancia que llega al receptor, en donde esta última se ve minorizada debido a los efectos que se habló anteriormente.

Es por ello que Giles & Bankman (2005) mencionan que la atenuación tiene dos clasificaciones, la primera de ellas se modela por el coeficiente de atenuación de haz c , y la segunda se modela por atenuación de luz difusa K , a continuación, se habla acerca del modelo matemático por coeficiente de atenuación de haz:

$$I_t = I_o \exp(-cz) \quad (28)$$

En donde en esta ecuación describe la atenuación de un haz de luz colimado; I_t representa la irradiancia transmitida, I_o describe la irradiancia de luz original medida en watts/m², y el parámetro z es la longitud de la trayectoria. Este tipo de clasificación, la podemos ver representada en la figura 18.

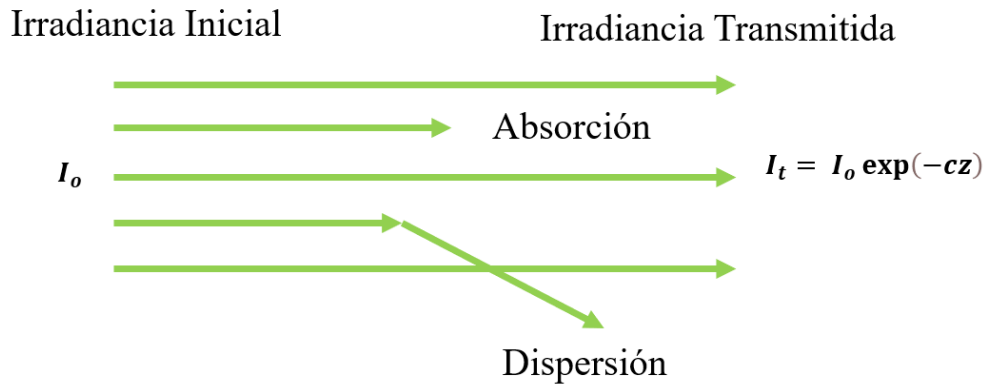


Figura 18. Atenuación por coeficiente de atenuación de haz (c)
Fuente. (Giles & Bankman, 2005)

En cambio, para la atenuación de luz difusa, la ecuación viene definida como:

$$I_t = I_0 \exp(-Kz) \quad (29)$$

En donde I_t e I_0 , representa los mismos parámetros de la ecuación 27, sin embargo, z es la longitud de la trayectoria vertical del haz, que se la representa en la figura 19. La ecuación 28 como tal, es más aplicable para calcular la atenuación de la luz solar que incide en el entorno submarino y por ende se la toma en consideración en aspectos de calcular el ruido de fondo que afectan a los sistemas submarinos. (p. 2)

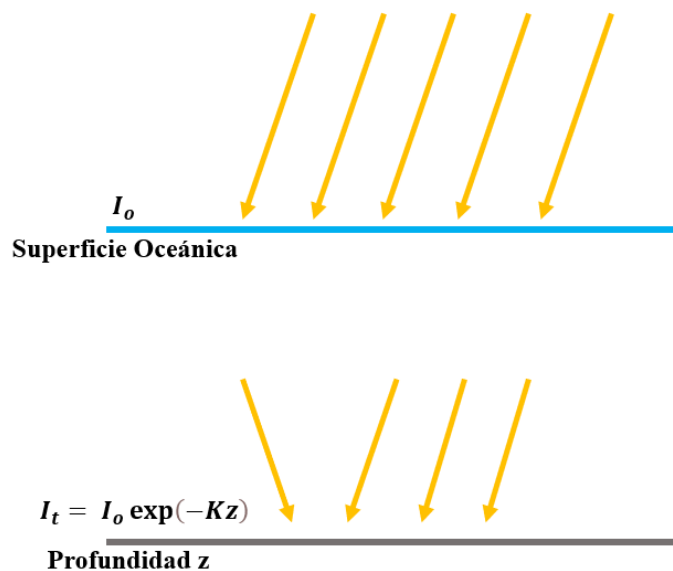


Figura 19. Atenuación coeficiente de atenuación difusa
Fuente. (Giles & Bankman, 2005)

Sin embargo, estudios más recientes como Abdalkarim (2015) indican que la atenuación puede ser vista, como la complementación del coeficiente de atenuación, además se indica que para señales ópticas esta atenuación viene determinada haciendo uso de la ley de Beer, para una distancia representada con d . Entonces, la ley de Beer se determina como:

$$I = I_0 e^{-c(\lambda)d} \quad (30)$$

Donde $c(\lambda)$ es el coeficiente de atenuación, en donde las unidades de toda esta ecuación vienen dadas en m^{-1} , la ecuación 24 sigue la misma metodología de las ecuaciones 27 y 28, sin embargo, resulta diferente debido a que el coeficiente de atenuación varía según la longitud de onda que se use el sistema UOWC, y por ende van a tener diferentes valores de atenuación y dispersión según el tipo de agua, estos valores los podemos observar en la tabla 3.

Tabla 3. Valores de atenuación, dispersión y coeficiente de atenuación para diferentes tipos de agua

Tipo de agua	$a(\lambda)$	$b(\lambda)$	$c(\lambda)$
Agua de mar pura	0.053	0.003	0.056
Agua oceánica clara	0.114	0.037	0.151
Agua oceánica costera	0.179	0.219	0.398
Agua de turbia de puerto	0.266	1.824	2.19

Nota. Tabla tomada de (Zeng et al., 2017) y (Cochenour et al., 2008)

En la tabla 3 se observa que el coeficiente de atenuación es la sumatoria tanto del coeficiente de atenuación y dispersión, además, en el agua turbia de puerto es en donde se presenta mayores valores de atenuación por las características que presenta la misma.

5. Metodología

En la presente sección se muestra los pasos metodológicos que se siguieron para el cumplimiento de los objetivos planteados, en donde los mismos se exponen de forma secuencial. En consecuencia, el presente trabajo tiene un método de estudio inductivo-deductivo debido a que se basa en el estudio de la teoría de UOWC y por otro lado mediante la simulación se busca probar y verificar la teoría previamente estudiada.

Además, el trabajo tiene un enfoque de investigación mixta por la razón que se emplea el estudio teórico de la tecnología, y consecuente a esto, se hace un análisis de datos que se los recopila en la simulación del sistema. Finalmente, el tipo de investigación empleado es de tipo documental y experimental, ya que como se explicó anteriormente el presente trabajo en primer lugar busca proporcionar un marco contextual y en segundo lugar se experimenta mediante varias simulaciones para probar la teoría que rodea a las comunicaciones ópticas inalámbricas submarinas.

A continuación, se muestra los pasos secuenciales realizados:

5.1.Revisión y recolección de bibliografía

Para el presente trabajo de investigación se hizo la revisión y recopilación documental de la tecnología en estudio en diversas bases de datos científicas de alta reputación. Posteriormente, se elaboró el estado del arte de UOWC para determinar la fase actual de la tecnología en cuanto a experimentación y simulación.

Después de haber concluido este primer paso se procedió a realizar la organización de fundamentos teóricos esenciales de UOWC para de este modo proporcionar un estudio ordenado en cuanto a las definiciones importantes de la tecnología, entre los temas que se involucraron están:

- Principios y definiciones
- Esquema general de un sistema UOWC
- Modos de configuración de enlace
- Fenómenos de propagación

Además, para tener un orden en la redacción y formación de la estructura del documento se usó un gestor bibliográfico para categorizar los temas abordados en el marco teórico, de este modo permite tratar temas específicos que aborde los objetivos de investigación.

5.2. Análisis de equipamiento de la tecnología UOWC

A continuación, se hizo la investigación de los equipos UOWC que actualmente se encuentran disponibles en el mercado, para ello, primeramente, se investigó cuáles son los fabricantes que elaboran estos equipos, posteriormente, se recurrió a los sitios web de dichos fabricantes en donde cada uno de estos presentaban varios modelos de módems de comunicación óptica inalámbrica submarina y daban una especificación general de los mismos.

Además, se recurrió a la hoja de datos de cada modem investigado con el propósito de analizar qué equipo tiene las mejores prestaciones, y por ende escoger los equipos para llevar a cabo las simulaciones. Entre las características principales que se analizó para cada equipo están:

- Tasa de transferencia de datos
- Alcance de transmisión
- Potencia de transmisión óptica
- Longitud de onda
- Tipo de fuente óptica

Después de analizar todas estas características, se llegó a determinar que los equipos más adecuados para realizar la simulación fueron el BlueComm 200 de Sonardyne y el MC500 de Shimadzu. En la sección 6 se muestra las características de los mismos y demás equipos investigados.

5.3. Estudio del software de simulación

El software destinado para la simulación es OptiSystem, debido a que el mismo ofrece la capacidad de simular comunicaciones ópticas, específicamente se escogió la versión 21 debido a que permite configurar parámetros de la tecnología UOWC lo que lo hace ideal para el presente trabajo de investigación. Entre las características y mejoras de **OptiSystem 21**, el portal web Optiwave (2023), menciona:

- Simulación en sistemas ópticos QKD
- Transmisión submarina en espacio libre (UOWC)
- Diseño y simulación de redes 5G
- Simulaciones de redes IoT
- Simulación de tecnología LiDAR, sensores entre otros.
- Cálculo de atenuaciones para diversos cambios climáticos en FSO

Después, se procedió a obtener el software para su análisis y estudio, en donde en el lapso de dos semanas se lo analizó y estudio para entender las funcionalidades del mismo, tales como el ordenamiento de bloques de un sistema óptico, generación de gráficas, manipulación de datos, con el propósito de llevar una correcta y ágil simulación del sistema UOWC.

5.4.Simulación del sistema

Para llevar a cabo la simulación, se implementó el diagrama UOWC que emplea AL-Din et al. (2024) , sin embargo, para el presente trabajo se realizaron varias modificaciones, las cuales incluyeron el cambio del bloque que simula el canal submarino y el uso de dos fuentes ópticas, LD y LED. En la sección de resultados se muestra los esquemas adaptados para el presente trabajo de investigación.

Para la validación de enlaces, se consideraron 3 parámetros esenciales en comunicaciones ópticas, las cuales son: BER, factor Q, y potencia de recepción, adicional a esto también se consideró los diagramas de ojo para cada simulación con el propósito de analizar el SNR que existe en el sistema.

Para analizar los datos de los parámetros mencionados anteriormente, se hizo uso de las herramientas de visualización de OptiSystem 21. El BER y factor Q se los obtuvo a partir del bloque “BER ANALYZER” ya que en el mismo a partir de la gráfica del diagrama de ojo se indica los valores de dichos parámetros. Finalmente, para medir la potencia de recepción, se usó el bloque “Optical Power Meter”.

6. Equipamiento comercial de la tecnología UOWC

Actualmente, en Ecuador no existen proveedores referentes a la tecnología UOWC, es por eso que se realizó la investigación de los proveedores actuales de estos equipos, en donde se llegó a determinar que industrias internacionales en años recientes han llevado la investigación y fabricación de estos dispositivos ópticos submarinos. La investigación de estos equipos se realizó para obtener los parámetros necesarios para llevar a cabo la simulación, por lo que se consideró varios criterios para su elección tales como distancia de transmisión, tasa de datos, potencia de transmisión, profundidad de operación, longitudes de onda, entre otros.

6.1. Sonardyne



Figura 20. Proveedor Sonardyne

Fuente. (Sonardyne, 2024)

La empresa Sonardyne ha desarrollado tecnología para medios submarinos desde el año 1971, en donde en sus inicios se han dedicado a la construcción de sistemas acústicos, sin embargo, en los últimos años también han desarrollado módems de comunicación óptica inalámbrica submarina. Además, diseñan sus productos para aplicaciones de monitoreo, navegación, posicionamiento, comunicación, medición, etc., enfocados principalmente para la industria marina, científica y en alta mar. (Sonardyne, 2024)

Entre sus productos tenemos:

6.1.1. BlueComm 200

Este producto tiene características de proveer enlaces submarinos, además que puede operar hasta una profundidad de 4 km en el fondo marino, el producto como tal se constituye de un arreglo de diodos emisores de luz (LED) de alta potencia y un receptor fotomultiplicador que ayuda en gran medida a la distancia de transmisión. En el *anexo 1* se puede observar sus especificaciones, sin embargo, en la tabla 4 se muestra sus características generales:

Tabla 4. Características BlueComm 200

BlueComm 200	
Tasa de datos	2.5 – 10 Mbps
Rango de Operación	Hasta 150 m
Potencia de Transmisión Óptica	6 w
Longitud de onda	450 nm (azul) y 400 -800 nm (blanco)
Interfaz de Comunicación	10/100 Base-T Ethernet (Dirección IP estática)
Ángulo de recepción	180° omnidireccional
Material	Aluminio anodizado o titanio

Nota. Datos obtenidos por (Sonardyne, 2024). En el *anexo 1* se proporciona su hoja de datos.

En la figura 21 se observa el equipo BlueComm 200:



Figura 21. Equipo BlueComm 200
Fuente. (Sonardyne, 2024)

Dentro de la serie BlueComm 200, cabe destacar que existe una variante que se denomina BlueComm 200 UV, que presenta sus mismas características, pero lo que difiere, es que trabaja a una longitud de onda mucho más corta, y además le permite operar en presencia de fuentes de luz artificiales. En la tabla 5 se observa las características particulares del producto (*anexo 2* características completas), en donde se observa que en el rango de operación es mucho más corto que el BlueComm 200. En la figura 22 se puede apreciar su modelo.

Tabla 5. Características BlueComm 200 UV

BlueComm 200 UV	
Tasa de datos	2.5 – 10 Mbps
Rango de Operación	Hasta 75 m
Potencia de Transmisión Óptica	6 w
Longitud de onda	405 nm (ultravioleta)
Interfaz de Comunicación	10/100 Base-T Ethernet (Dirección IP estática)
Ángulo de recepción	180° omnidireccional
Material	Aluminio anodizado o titanio

Nota. Obtenido de (Sonardyne, 2024). En el *anexo 2* se proporciona su hoja de datos.



Figura 22. Equipo BlueComm 200 UV
Fuente. (Sonardyne, 2024)

6.1.2. BlueComm 100

Este es un modem de comunicación de corto alcance, ideal para aguas poco profundas, al igual que las anteriores versiones se usa una serie de diodos emisores de luz de alta potencia y en la parte del receptor se usan fotodiodos capaces de maximizar el rendimiento en cualquier escenario submarino. (Sonardyne, 2024) . En la figura 23 se observa este equipo:



Figura 23. Equipo BlueComm 100
Fuente. (Sonardyne, 2024)

En la tabla 6, destacamos sus características principales:

Tabla 6. Características BlueComm 100

BlueComm 100	
Tasa de datos	1 – 5 Mbps
Rango de Operación	1 -15 m
Potencia de Transmisión Óptica	6 W
Longitud de onda	450 nm (azul)
Interfaz de Comunicación	Ethernet 10/100 Base-T (dirección IP estática)
Tipo de Comunicación	Bidireccional, Multiplexación por División de Tiempo
Ángulo de recepción	60 °
Material	Cúpula de titanio y cristal

Nota. Obtenido de (Sonardyne, 2024). En el *anexo 3* se proporciona su hoja de datos.

6.2. Shimadzu

Shimadzu es una empresa que se dedica en diversos campos de la ciencia, como son en el desarrollo de tecnologías centrales en las áreas de análisis avanzado, biotecnología innovadora, diseño y control de equipos que desempeñan funciones de productos básicos, entre otros. En su portal web, indican que hacen el desarrollo de nuevos productos que mejoren las tecnologías actuales y tecnologías comunes, es por eso que desde el año 2020 han desarrollado módems de la tecnología UOWC, específicamente la empresa ha desarrollado dos equipos de esta tecnología, los cuales serán mencionados más adelante.



SHIMADZU

Excellence in Science

Figura 24. Proveedor Shimadzu
Fuente. (Shimadzu, 2024)

6.2.1. MC 100

Este modem fue desarrollado por Shimadzu en colaboración con la Agencia Japonesa de Ciencia y Tecnología Marina-Tierra (JAMSTEC), como tal este equipo usa una fuente de luz láser semiconductor con direccionalidad y velocidad de respuesta alta. El MC100 se considera un equipo confiable para comunicaciones de entornos submarinos para operar en AUV, ROV, entre otros vehículos submarinos (Shimadzu, 2024). En la figura 25 se muestra el modelo, además en la tabla 7 se presenta sus características principales.



Figura 25. Equipo MC100
Fuente. (Shimadzu, 2024)

Tabla 7. Características MC100

MC 100	
Tasa de datos	Superiores a 95 Mbps
Rango de Operación	Superiores a 10 m
Longitud de onda	Región Azul-Verde
Profundidad máxima de operación	3500 m
Peso	2.85 kg
Dimensiones	113 mm (diámetro) x 250 mm (largo)

Nota. Obtenido de (Shimadzu, 2024).

6.2.2. MC 500

Este modem realiza las comunicaciones ópticas inalámbricas mediante luz laser verde y azul y como tal es el sucesor del modelo anteriormente mencionado, además que se considera como de largo alcance ya que tiene un rango de transmisión de 80 metros. (Shimadzu, 2024)

En la tabla 8 se resume sus características principales, además en la figura 26 se puede apreciar el modelo físico del MC500.



Figura 26. Equipo MC 500
Fuente. (Shimadzu, 2024)

Tabla 8. Características MC 500

MC 500	
Tasa de datos	Conmutable (1 Mbps/ 10 Mbps / 20 Mbps)
Rango de operación	80 m
Atenuación	0.3 dBm
Potencia de transmisión óptica	Azul: 17.5 W; Verde: 9 W
Longitud de onda	Azul: 445 nm; Verde: 525 nm
Interfaz de comunicación	100BASE-TX
Ángulo de Haz	40°
Profundidad Máxima de Operación	3000 m

Nota. Obtenido de (Shimadzu, 2024), En el *anexo 4* se proporciona su hoja de datos

6.3. Hydromea

Hydromea es una empresa suiza que destaca en la robótica submarina y en las redes comunicación inalámbrica a través del agua, desarrolla productos y soluciones de comunicaciones de alta velocidad y gran volumen en tiempo real. (Hydromea, 2024)



Figura 27. Proveedor Hydromea
Fuente.(Hydromea, 2024)

6.3.1. LUMA 100

Es un modem óptico que funciona como transceptor por lo tanto permite tener una comunicación semidúplex, además en cuanto a términos energéticos resulta ser eficiente ya que el mismo puede tener fuentes de alimentación mediante baterías. Al ser un equipo compacto el mismo puede entrar en reposo al detectar inactividad en el sistema y entrar en operación a través de otro módem cuando el enlace vuelva a estar en operación. En la figura 28, se observa el equipo físico y en la tabla 9 sus características.



Figura 28. Equipo LUMA 100
Fuente. (Hydromea, 2024)

Tabla 9. Características LUMA 100

LUMA 100	
Tasa de datos	115 kbps
Rango de operación	Hasta 2 m
Consumo de potencia	TX:1-2 W, RX: 0.5 W
Longitud de onda	475 nm
Interfaz	RS232 / RS485
Ángulo de Haz	Cono de 120°
Profundidad Máxima de Operación	6 km

Nota. Obtenido de (Hydromea, 2024), En el *anexo 5* se proporciona su hoja de datos

6.3.2. LUMA 500ER

Es una versión mejorada de sus predecesores ya que tiene un rango de transmisión superior, además es un modem que se puede usar para la transmisión inalámbrica de video, descarga de datos de sensores y la interconexión inalámbrica entre ROVs, AUVs e infraestructuras de aguas profundas. El emisor cuenta con 12 LEDs de alta potencia, en donde hay que tomar en cuenta que para tener un rango de operación mayor todos sus LED deben de operar en paralelo.

En la figura 29 se puede observar este arreglo de LEDs, y las características técnicas del modem se muestra en la tabla 10.



Figura 29. Equipo LUMA 500ER
Fuente. (Hydromea, 2024)

Tabla 10. Características LUMA 500ER

LUMA 500ER	
Tasa de datos	500 kbps
Rango de operación	Hasta 50 m
Consumo de potencia	TX: 2-5 W, RX: 1W
Longitud de onda	475 nm
Interfaz	RS232 / RS485
Ángulo de Haz	Cono de 120°
Profundidad Máxima de Operación	6 km

Nota. Obtenido de (Hydromea, 2024), En el *anexo 6* se proporciona su hoja de datos

6.3.3. LUMA X

Este modem se considera de largo alcance según la especificación del fabricante (ver *anexo 7*), además ofrece un transceiver completamente bidireccional aplicable para redes ad-hoc. (Hydromea, 2024). En la figura 30 se observa su diseño físico.



Figura 30. Equipo LUMA X
Fuente. (Hydromea, 2024)

En la tabla 11, se muestra sus características principales.

Tabla 11. Características LUMA X

LUMA X	
Tasa de datos	Hasta 10 Mbps
Rango de operación	Hasta 50 m
Consumo de potencia	TX: 2-17 W, RX: 2W
Longitud de onda	480 nm
Interfaz	Ethernet, RS232 / RS485
Ángulo de Haz	Cono de 120°
Profundidad Máxima de Operación	6 km, 12 km (a petición)

Nota. Obtenido de (Hydromea, 2024) En el *anexo 7* se proporciona su hoja de datos

6.3.4. LUMA X UV

Este dispositivo es eficiente hablando en términos de consumo de energía, además al integrar el espectro UV lo hace ideal para operar en un entorno en donde se presente luz ambiental. (Hydromea, 2024). En la figura 31 se observa su diseño físico.



Figura 31. Equipo LUMA X UV
Fuente. (Hydromea, 2024)

Las características técnicas del LUMA X UV se presentan en la tabla 12.

Tabla 12. Características LUMA X UV

LUMA X UV	
Tasa de datos	Hasta 10 Mbps
Rango de operación	Hasta 50 m
Consumo de potencia	TX: 2-17 W, RX: 2W
Longitud de onda	395 nm
Interfaz	Ethernet, RS232 / RS485
Ángulo de Haz	Cono de 60°
Profundidad Máxima de Operación	6 km, 12 km (a petición)

Nota. Obtenido de (Hydromea, 2024), En el *anexo 8* se proporciona su hoja de datos

6.4.AQUATEC



Figura 32. Proveedor AQUATEC
Fuente. (AQUATEC, 2024)

Es una empresa que ha desarrollado tecnología para propósitos de exploración submarina desde el año 1990, como tal se destacan por elaborar instrumentos, servicios y soluciones para la medición, el monitoreo y las comunicaciones en medios submarinos, entre las tecnologías de interés que se desarrollan en la empresa es la acústica y óptica; en donde en este última se han elaborado dos productos, las cuales se mencionan a continuación.

6.4.1. AQUA modem OP2



Figura 33. Equipo AQUA modem OP2
Fuente. (AQUATEC, 2024)

En la figura 33 se puede observar el modem OP2, que tal como lo indica su proveedor es de corto alcance y permite interrogaciones, comandos y descarga de datos para el equipo de monitoreo submarino (AQUATEC, 2024). En la tabla 13 se destacan sus características.

Tabla 13. Características AQUA modem OP2

AQUA modem OP2	
Tasa de datos	10.2 kBytes/s
Rango de operación	1-2 m
Longitud de onda	Luz color cian (486 nm)
Interfaz	RS232 (RS485 opcional)
Profundidad máxima de operación	3.5 km
Material	Acero inoxidable 316 con ventana de metacrilato

Nota. Obtenido de (AQUATEC, 2024), En el *anexo 9* se proporciona su hoja de datos

6.4.2. AQUA modem OP2L



Figura 34. Equipo AQUA modem OP2L
Fuente. (AQUATEC, 2024)

El modelo que se puede visualizar en la figura 34, ofrece una comunicación de corto de alcance, además de ser compatible con AQUA modem OP2. Entre sus aplicaciones tenemos el monitorio oceánico, visualización de datos en tiempo real, descarga de datos submarinos, entre otros que se lo especifica en la página web del fabricante (AQUATEC, 2024).

En la tabla 14 se resume sus características principales.

Tabla 14. Características AQUA modem OP2L

AQUA modem OP2L	
Tasa de datos	10.2 kBytes/s
Rango de operación	1 m
Longitud de onda	Luz color cian (486 nm)
Interfaz	RS232
Profundidad máxima de operación	500 m
Material	Acetal con ventana de metacrilato

Nota. Obtenido de (AQUATEC, 2024), En el *anexo 10* se proporciona su hoja de datos

En esta recopilación de transceptores UOWC, se puede concluir, que la mayor parte de estos equipos usan fuente óptica LED, a excepción de los transceptores fabricados por SHIMADZU que usan una fuente LD, además se constató que la tasa de datos para estos equipos oscila alrededor de los 10 kbps hasta los 20 Mbps.

Por lo tanto, después de haber analizado cada uno de los transceptores presentados, se han seleccionado dos equipos para la simulación; el primero de ellos es el MC 500 de Shimadzu y el segundo el BlueComm 200 de Sonardyne. Se escogió ambos por la razón de presentar las mejores prestaciones en cuanto a rango de operación, tasa de datos, entre otros factores que favorecen al sistema UOWC. Además, dichos equipos se diferencian porque el primero de ellos usa una fuente óptica LD y el último una fuente óptica LED.

7. Resultados

7.1. Esquemas empleados para el sistema UOWC NLOS

7.1.1. Diagrama UOWC NLOS con fuente óptica láser.

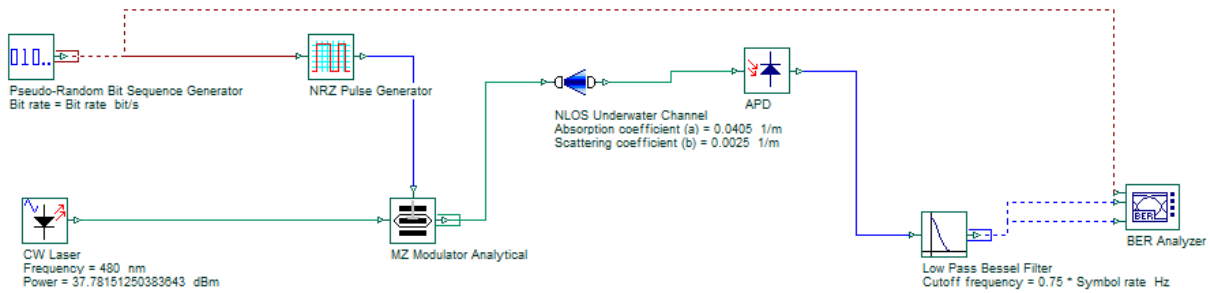


Figura 35. Diagrama UOWC NLOS con fuente óptica láser
Fuente. Elaboración propia

Transmisor

En la etapa de transmisión de la figura 35 se observa que se usa una fuente óptica de tipo láser, además también se emplea un generador de secuencia de bits pseudoaleatorio que está configurando con una tasa de bits según las especificaciones técnicas de los equipos seleccionados para la simulación, después se empleó la técnica de codificación no retorno a cero (Non-return-to-zero, NRZ) para codificar los bits, seguidamente se implementa un modulador MZ con el propósito de realizar modulaciones de intensidad de señal.

Canal

En el software de simulación existe un bloque el cual representa el canal óptico submarino sin línea de visión directa, por lo que en este bloque de OptiSystem se deben configurar varios parámetros, los cuales se observan en la figura 36.

Disp	Name	Value	Units	Mode
Link settings				
<input type="checkbox"/>	Frequency	525	nm	Normal
<input type="checkbox"/>	Temperature	24	Celsius	Normal
<input type="checkbox"/>	Salinity	3.42	%	Normal
<input type="checkbox"/>	Index of refraction Air	1.0003		Normal
<input type="checkbox"/>	Attenuation type	Clear Ocean		Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Absorption coefficient (a)	0.114	1/m	Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Scattering coefficient (b)	0.037	1/m	Normal
<input type="checkbox"/>	Transmitter depth	21	m	Normal
<input type="checkbox"/>	Receiver depth	25	m	Normal
<input type="checkbox"/>	Horizontal distance	15	m	Normal
<input type="checkbox"/>	Inner angle (theta min)	18.0604	deg	Normal
<input type="checkbox"/>	Outer angle (theta max)	18.6333	deg	Normal
<input type="checkbox"/>	Surface incident angle	18.06047193619919	deg	Normal
<input type="checkbox"/>	Additional losses	0	dB	Normal
<input type="checkbox"/>	Propagation delay	0	ps/km	Normal
Transmitter settings				
<input type="checkbox"/>	Transmitter aperture diameter	14.9	cm	Normal
<input type="checkbox"/>	Transmitter loss	0	dB	Normal
<input type="checkbox"/>	Transmitter gain	0	dB	Normal
<input type="checkbox"/>	Transmitter optics efficiency	0.9		Normal
Receiver settings				
<input type="checkbox"/>	Receiver aperture diameter	14.9	cm	Normal
<input type="checkbox"/>	Receiver loss	0	dB	Normal
<input type="checkbox"/>	Receiver gain	0	dB	Normal
<input type="checkbox"/>	Receiver optics efficiency	0.9		Normal

Figura 36. Parámetros de "NLOS Underwater Channel"
Fuente. Elaboración propia

A continuación, se detalla los parámetros modificados de la figura 36:

- El parámetro “Frequency” hace referencia a la longitud de onda que se emplea en el sistema y por ende se debe ingresar el valor correspondiente a la longitud de onda que emite el transmisor.
- Seguidamente, tenemos los parámetros “Temperature” y “Salinity” que hacen referencia a las propiedades físico-químicas del agua. Por lo tanto, para la presente investigación se toma valores que son presentados por el Instituto Oceanográfico y Antártico de la armada (INOCAR, 2024) en donde estudios realizados en el mar ecuatoriano indican que se tiene una salinidad promedio de 34.2 UPS (Unidades Prácticas de Salinidad). En cambio, la Cámara Nacional de Pesquería (CNP, 2023) menciona que se tiene un valor promedio de Temperatura Superficial del Mar (TSM) de 24 °C.
- En cuarto lugar, tenemos “Attenuation Type” en donde se da la opción a escoger el tipo de agua a simular, para el caso particular del presente trabajo se escogió el tipo de agua “Clear Ocean” y “Coastal Ocean”.
- Los parámetros siguientes corresponde a la configuración geométrica del sistema, en donde “Transmitter Depth” y “Receiver Depth” corresponde a la distancia de profundidad del transmisor y receptor medida desde la superficie marina (Para esta versión de OptiSystem se considera una **superficie marina plana**). “Horizontal Distance” es la distancia de separación horizontal entre el transmisor y receptor. Estos parámetros se los puede visualizar en la figura 37.

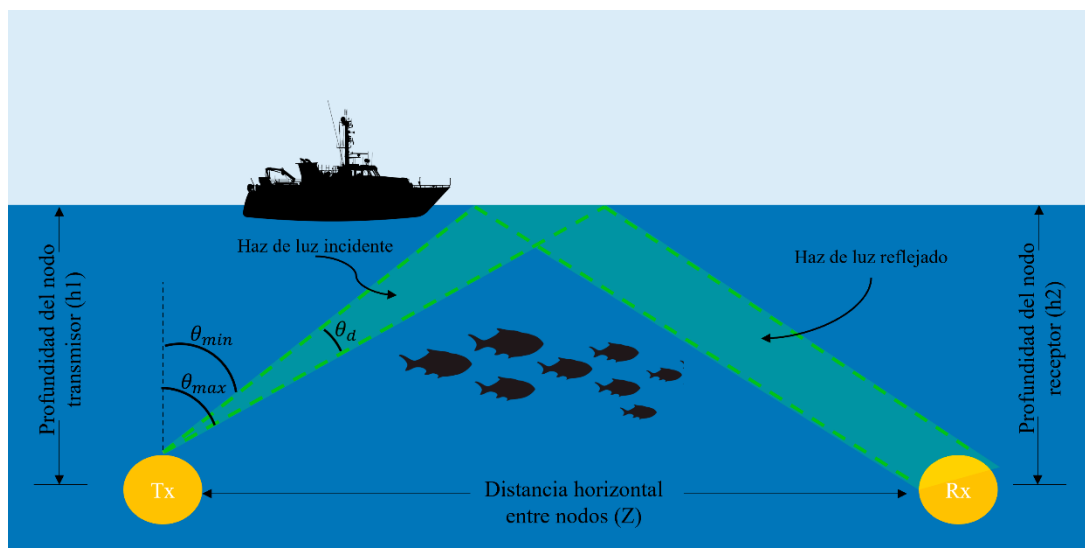


Figura 37. Configuración de distancias en un sistema UOWC
Fuente. Elaboración Propia

- Seguidamente, en el bloque de canal se definen dos ángulos, los cuales son “Inner angle (theta min)” y “Outer angle (theta max)”, que como tal son los ángulos que se observa en la figura 37. Dichos ángulos son importantes para el apuntamiento del haz de luz que emite el transmisor y llega el receptor. Como se mencionó en el marco teórico para que se dé la comunicación en una configuración NLOS se necesita que el haz de luz se refleje desde la superficie marina hacia la posición del receptor, por ende, para el presente trabajo se hace el cálculo de los ángulos mencionados anteriormente, considerando la profundidad del transmisor (h_1) y receptor (h_2), así como también la distancia de separación entre nodos (Z). Por lo tanto, primero se calculó el ángulo de incidencia del haz con respecto a la superficie marina, en donde se obtuvo la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}
 Z &= (h_1 + h_2) \tan \theta_i \\
 \tan \theta_i &= \frac{Z}{h_1 + h_2} \\
 \theta_i &= \tan^{-1} \left(\frac{Z}{h_1 + h_2} \right)
 \end{aligned} \tag{31}$$

- Con estas ecuaciones podremos determinar si el ángulo de incidencia es mayor al ángulo crítico y de esta manera verificar si en la configuración geométrica UOWC existe una reflexión interna total del haz de luz. Para calcular θ_{min} , se hicieron las mismas relaciones descritas anteriormente, en donde se llegó a determinar que $\theta_{min} = \theta_i$, por lo tanto, tenemos:

$$\theta_{min} = \tan^{-1} \left(\frac{Z}{h_1 + h_2} \right) \tag{32}$$

Para θ_{max} se sumo el valor de divergencia del haz θ_d , a partir del valor de θ_{min} . Es decir, $\theta_{max} = \theta_{min} + \theta_d$

- Finalmente, en el bloque de canal del sistema UOWC se modifica los valores de “Transmitter aperture diameter” y “Receiver aperture diameter”, que corresponde al diámetro que posee el lente del modem transmisor y receptor respectivamente.

Receptor

En la parte del receptor se observa en la figura 35 que lo compone un fotodiodo de tipo APD debido a que presenta mayor sensibilidad al momento de captar la señal óptica, seguido por un filtro pasa bajo para eliminar frecuencias no deseadas.

7.1.2. Diagrama UOWC NLOS con fuente óptica LED

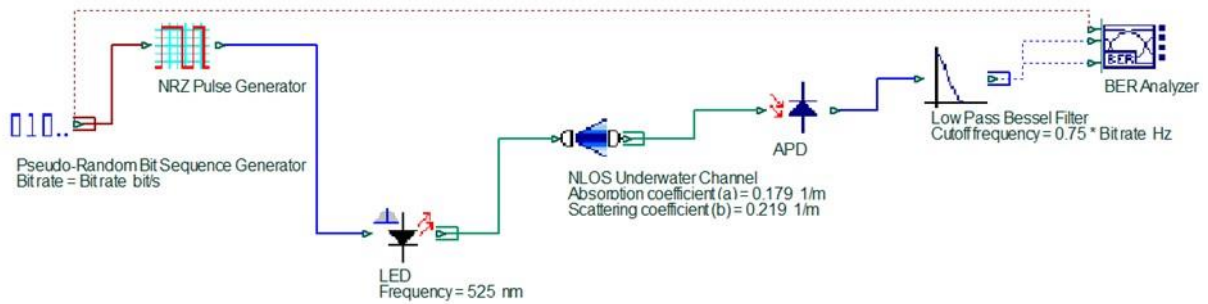


Figura 38. Diagrama UOWC NLOS con fuente óptica LED
Fuente. Elaboración propia

Transmisor

En la figura 38 se muestra una configuración diferente del transmisor, en primer lugar, se cambia la fuente óptica de láser a una LED, por ende, aquí se elimina el bloque del modulador MZ ya que el bloque LED realiza internamente el cambio de pulsos eléctricos a una salida de luz óptica.

Canal

Para este diagrama el canal NLOS se adopta a la misma configuración mostrada en el apartado anterior, sin embargo, al simular una fuente óptica LED el valor de ángulo de divergencia entre θ_{min} y θ_{max} es superior debido a que la fuente óptica LED se caracteriza por poseer un ángulo de divergencia ancho en comparación con una fuente óptica láser.

Receptor

En el receptor igualmente se emplea un fotodiodo de tipo APD por las mejores prestaciones que brinda en comparación con otro tipo de fotodiodos. Seguidamente, se emplea un filtro pasa bajas para eliminar frecuencias no deseadas.

7.2. Definición de escenarios de simulación

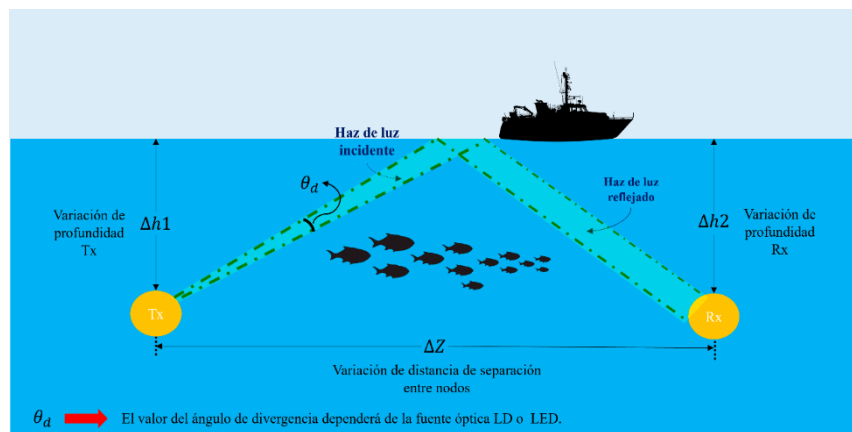
En este trabajo se plantean 8 escenarios de simulación, los 4 primeros corresponde a la simulación con las características del equipo MC500, y los cuatro últimos con las características del equipo BlueComm 200. En la tabla 15, se describe cada uno de estos escenarios.

Tabla 15. Definición de escenarios a simular

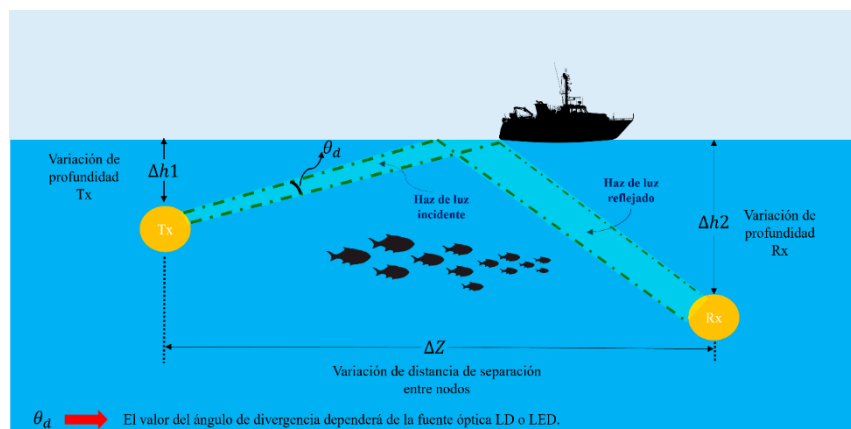
Escenarios	Descripción
Escenario 1 y 2	En este escenario se simula el sistema UOWC con una fuente óptica láser (LD). Para el escenario 1 se simula con un tipo de agua clear ocean water y para el escenario 2 con coastal ocean water. Para ambos escenarios se toma la configuración geométrica de la figura 39 a). En estos escenarios $h1=h2$
Escenario 3 y 4	En este escenario se simula el sistema UOWC con una fuente óptica láser (LD). Para el escenario 3 se

	<p>simula con un tipo de agua clear ocean water y para el escenario 4 con coastal ocean water. Para ambos escenarios se toma la configuración geométrica de la figura 39 b). En estos escenarios $h1 < h2$</p>
Escenario 5 y 6	<p>En este escenario se simula el sistema UOWC con una fuente óptica LED. Para el escenario 5 se simula con un tipo de agua clear ocean water y para el escenario 6 con coastal ocean water. Para ambos escenarios se toma la configuración geométrica de la figura 39 a). En estos escenarios $h1 = h2$</p>
Escenario 7 y 8	<p>En este escenario se simula el sistema UOWC con una fuente óptica LED. Para el escenario 7 se simula con un tipo de agua clear ocean water y para el escenario 8 con coastal ocean water. Para ambos escenarios se toma la configuración geométrica de la figura 39 b). En estos escenarios $h1 < h2$</p>

Nota. Elaboración propia.



a)



b)

Figura 39. a) Descripción gráfica de los escenarios 1,2,5 y 6; b) Descripción gráfica de los escenarios 3,4,7 y 8

Fuente. Elaboración propia

7.3.Simulación con las características del equipo MC500

7.3.1. Resultados Escenario 1

Los parámetros de simulación para este escenario se muestran en la tabla 16, para este escenario $h_1 = h_2$. En la figura 40 se muestra los resultados para este escenario.

Tabla 16. Parámetros de simulación para el Escenario 1 y 2

Especificación	Valor
Frecuencia	525 nm(verde)
Potencia	9 W
Temperatura	24°C
Salinidad	3.42%
Tasa de datos	20 Mbps
Profundidades de Transmisor (h1)	5m,10m,15m,30m, 50m
Profundidades de Receptor (h2)	5m,10m,15m,30m, 50m
Distancia Horizontal(Z)	5m,15m,20m,30m, 50m, 60m,75m,150m
Angulo de divergencia (θ_d)	10 mrad
Diámetro de apertura del transmisor	14.9 cm
Diámetro de apertura del receptor	14.9 cm
Fuente óptica	Láser (LD)
Tipo de Agua	Escenario 1: Clear Ocean Escenario 2: Coastal Ocean

Nota. En la tabla se detalla los parámetros para el escenario 1 y 2, en donde para este último se hará el cambio de tipo de agua

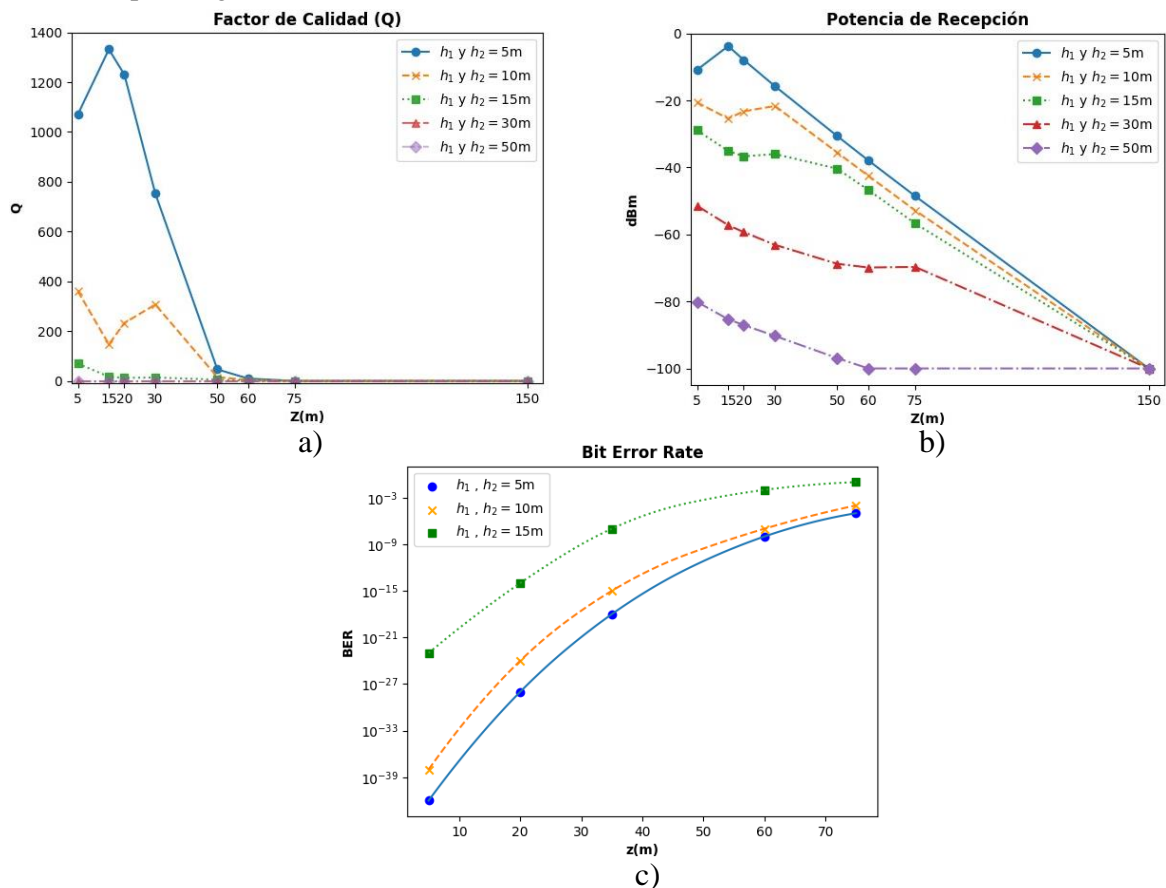


Figura 40. Escenario 1 a) Factor de calidad (Q); b) Potencia de Recepción; c) Bit Error Rate (BER)

Fuente. Elaboración propia

En la Fig. 40 a) se muestra el factor de calidad (Q) que se obtuvo para cada distancia simulada. Se considera que para considerar un enlace como óptimo, $Q \geq 6$. Para h_1 y $h_2 = 5, 10$ y 15 m, el valor de Q, cumple con el valor mínimo. Sin embargo, para h_1 y $h_2 = 5$ y 10 m se obtiene un Q por debajo del valor definido cuando $z \geq 75$ m, esto también se muestra en los valores de la tasa de bits errados (Bit Error Rate, BER) mostrados en la Fig. 40 c). Por su parte, para $h = 30$ y 50 m, Q es igual a 0 para todos los valores de z y por ende los valores de BER indican que todos los bits contienen errores. (*Nota.* En las gráficas de BER, únicamente se representaron las curvas correspondientes a los casos más relevantes, para garantizar la legibilidad de los resultados).

En relación con la potencia de recepción P_{rx} , al simular todos los escenarios se estableció un umbral de recepción empírico de -40 dBm. Por consiguiente, si la potencia de recepción es menor al umbral, el enlace no funcionaría. En la Fig. 40 b) se observan P_{rx} por encima del umbral definido, cuando el transmisor (h_1) y receptor (h_2) se encuentran a $5, 10$ y 15 m. No obstante, para estas profundidades la P_{rx} empieza a empeorar cuando se tiene una separación entre nodos de 75 m o superiores. Además, en dicha figura se observa que para h_1 y $h_2 \geq 30$ y 50 m, las P_{rx} se encuentran por debajo del umbral para todos los valores de z simulados.

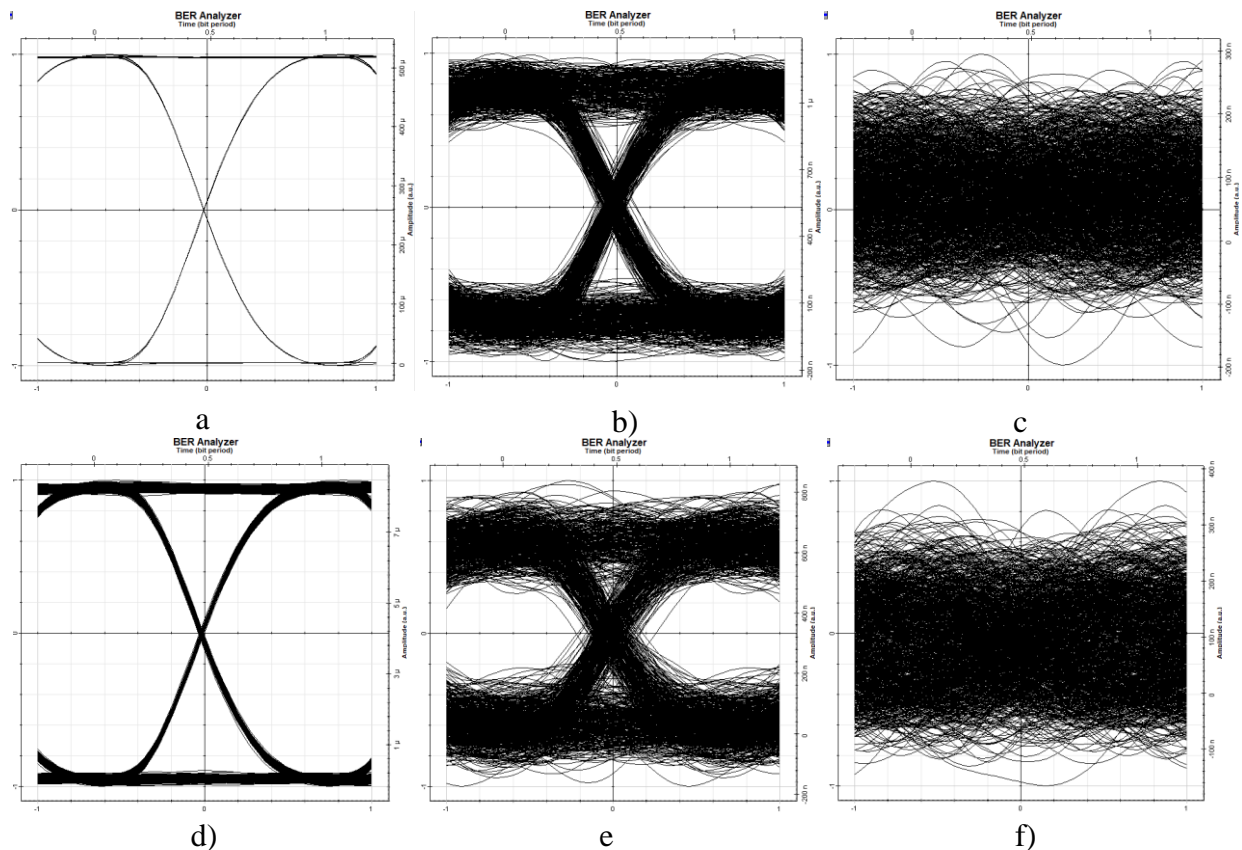


Figura 41. Diagramas de ojo Escenario 1. a) h_1 y $h_2 = 5$ m, $z=5$ m; b) h_1 y $h_2 = 5$ m, $z=60$ m; c) h_1 y $h_2 = 5$ m, $z=75$ m; d) h_1 y $h_2 = 15$ m, $z=5$ m; e) h_1 y $h_2 = 15$ m, $z=50$ m; f) h_1 y $h_2 = 15$ m, $z=60$ m.

Fuente. Elaboración propia

En la figura 41 se observa los patrones de ojo para algunas distancias simuladas, en donde las figuras 41 a), b) y c) corresponde cuando h_1 y $h_2= 5\text{m}$. En la figura 41 a) el ojo tiene una apertura ideal ya que no existe la presencia de ruido, para la figura 41 b) se observa que para la distancia indicada el patrón de ojo empieza a presentar niveles de ruido en ambos niveles lógicos y finalmente en la figura 41 c) el patrón de ojo está totalmente distorsionado cuando z equivale a 75 m, indicando que no existe comunicación en el sistema.

Por otro lado, en la figura 41 d), e) y f) los patrones de ojo corresponden cuando se tiene una profundidad de h_1 y $h_2= 15\text{m}$. Para el caso de la figura 41 d) el ojo a pesar de presentar una apertura amplia, se muestra con niveles mínimos de interferencia; al seguir aumentando la distancia z , como el caso de la figura 41 e) se observa que la apertura del ojo disminuye para esta configuración de profundidad. Finalmente, en la figura 41 f) se tiene un patrón de ojo distorsionado cuando z equivale a los 60 m.

7.3.1.1. Análisis del Escenario 1

Para este escenario, se observa que los diagramas de ojos empiezan a presentar altos niveles de ruido, interferencia y jitter cuando las profundidades de los nodos y la distancia de separación de los mismos empieza a incrementar. Es por ello, que como se discutió en las figuras 41, los diagramas de ojo presentan una apertura amplia cuando las configuraciones de profundidad son cortas, lo que implica que se tiene un SNR alto para estas configuraciones, por otro lado, cuando se aumenta la profundidad y la distancia de separación de los nodos, la apertura de los “ojos” se ve muy reducida o en su defecto no existe una apertura, lo que indica que el SNR es muy bajo y por ende se da el hecho que el diagrama de ojo se vea totalmente distorsionado por el ruido.

En la figura 40 a) se visualiza el factor de calidad para cada distancia simulada, sin embargo, en esta parte hacemos hincapié al incremento del valor de Q cuando z pasa de 5 m a 15 m con h_1 y $h_2= 5\text{m}$. Dicho incremento se explica porque, para $z = 5\text{ m}$, el ángulo de incidencia resulta menor al ángulo crítico del sistema, y al ser menor no se asegura la RIT si no una reflexión parcial del haz de luz, y en consecuencia existe una pérdida de la energía radiada. Por otro lado, cuando $z = 15\text{ m}$ el ángulo de incidencia para esta configuración es mayor al ángulo crítico por lo tanto se garantiza una RIT completa del haz de luz evitando pérdidas de la energía radiada durante la reflexión del haz. Cabe señalar que, cuando $z > 15\text{ m}$, el ángulo de incidencia sigue siendo mayor que el ángulo crítico, pero se visualiza que el factor Q disminuye. Esta disminución, no se debe al ángulo de incidencia, sino al incremento en la distancia de separación entre los nodos (z).

Por otro lado, el BER se lo puede observar en la figura 40 c), en donde se obtiene valores favorables cuando los nodos están a profundidades de 5, 10 y 15 m sin embargo el mismo se empieza a perjudicar para profundidades mayores a los 60 m. Además, se tiene que para profundidades de 30 y 50 m el BER es igual a 1, que indica claramente que todos los bits fueron transmitidos erróneamente.

Finalmente, en la figura 40 b), las potencias de recepción fueron favorables para las tres primeras profundidades (5m,10m,15m), debido a que en estos casos no se supera el umbral de los -40 dBm, siempre y cuando Z sea menor a los 75 m. En esta figura también se aprecia el mejoramiento de la potencia de recepción cuando los nodos se ubican a 5 m de profundidad con una distancia Z de 15 m, y esto se da por la misma razón del ángulo de incidencia con respecto al ángulo crítico explicada anteriormente.

7.3.2. Resultados Escenario 2

Los parámetros de simulación para este escenario se presentan en la tabla 16, en donde se simula con el tipo de agua coastal ocean water. Aquí $h_1 = h_2$.

En la figura 42 se observa los resultados referentes al escenario 2. Con respecto al factor de calidad, en la figura 42 a) se observa que solamente es favorable para h_1 y $h_2 = 5$ m hasta una $z = 20$ m, para los demás casos se observa que el factor Q tiene un valor igual a cero. Así mismo para profundidades de h_1 y $h_2 \geq 10$ m, el factor de calidad es de cero para todos los valores de z simulado.

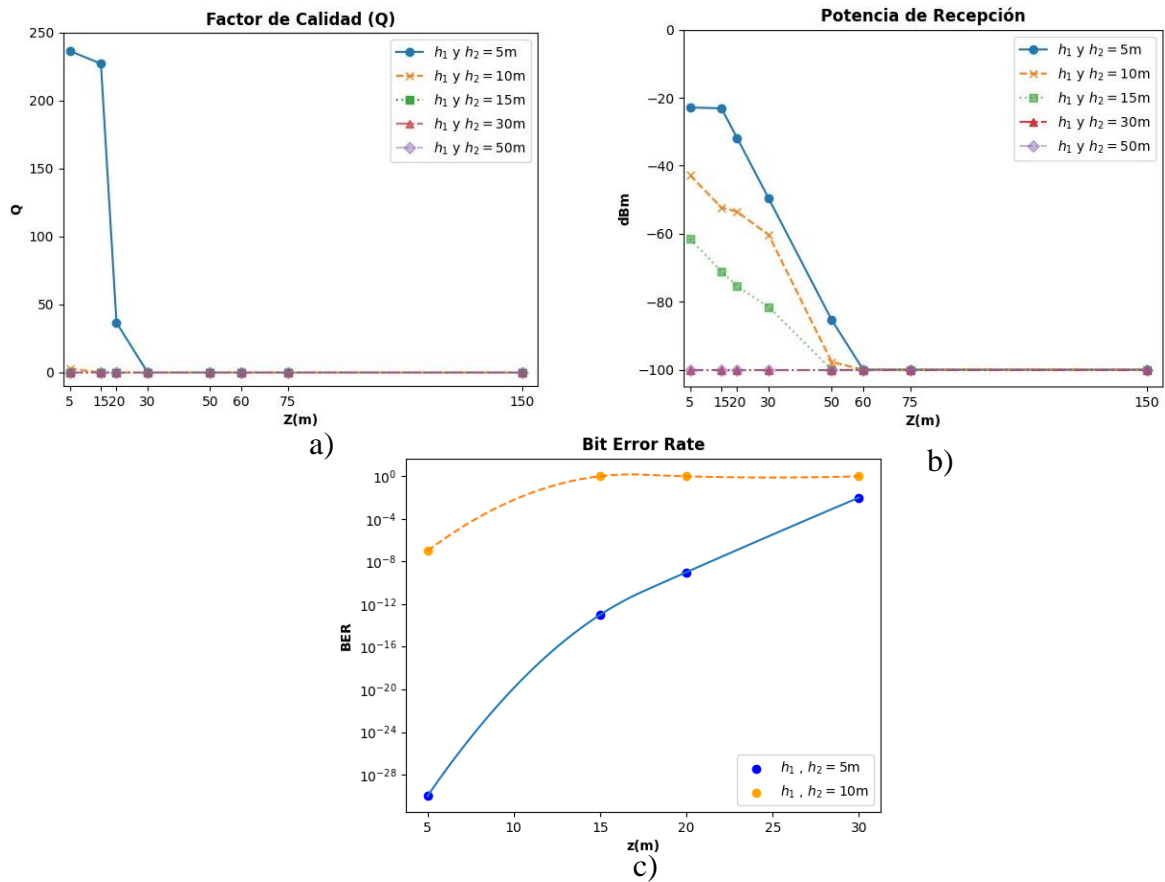


Figura 42. Escenario 2. a) Factor de calidad (Q); b) Potencia de Recepción; c) Bit Error Rate (BER)
Fuente. Elaboración propia

En la figura 42 b) la potencia de recepción también se muestra favorable para h_1 y $h_2 = 5$ m hasta cuando $z = 20$ m, ya que para estos casos la P_{rx} oscila entre -20 dBm a -30 dBm, para las demás distancias de z la P_{rx} es menor al umbral de los -40 dBm, indicando que la señal es débil. Así mismo, la P_{rx} es baja para h_1 y $h_2 \geq 10$ m con todos los valores de z simulados.

En la figura 42 c), el BER se muestra favorable para las distancias señaladas anteriormente, además para h_1 y $h_2 \geq 10$ m, el BER tiende a 1, indicando que se tiene que los bits contienen errores para estas distancias y el tipo de agua en particular.

Finalmente, los diagramas de ojo se muestran en la figura 43. Para la configuración de profundidad de h_1 y $h_2 = 5$ m, se tiene los patrones de ojo de las figuras a), b) y c), en donde para el primer caso el ojo se mantiene con bajos niveles de interferencia, en la figura 43 b) se observa que cuando $z = 20$ m, el patrón de ojo empieza a presentar ruido en sus niveles lógicos, pero la apertura del mismo se mantiene amplia, sin embargo, en la figura 43 c) se observa que no existe comunicación para una $z = 30$ m, ya que el ojo se encuentra distorsionado en su totalidad.

En la figura 43 d) y e) los diagramas de ojo son referente a la configuración de profundidad de h_1 y $h_2 = 10$ m, para el inciso d) como tal muestra que la comunicación es ineficiente cuando $z = 5$ m, y la misma empeora cuando $z = 15$ m (figura 43 e)).

Al aumentar la profundidad de los nodos a 15 m, el patrón de ojo de la figura 43 f), revela que no existe comunicación incluso para las mínimas distancias de z .

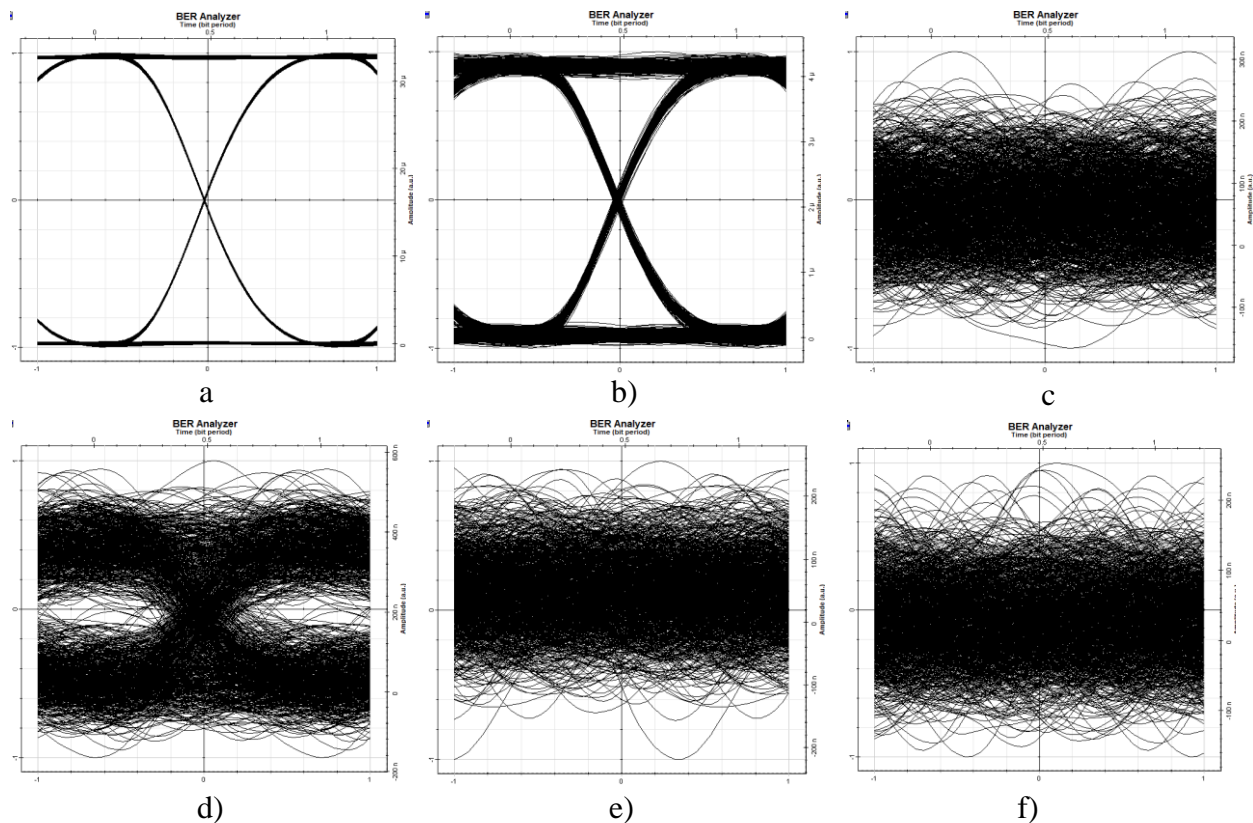


Figura 43. Diagramas de ojo Escenario 2. a) h_1 y $h_2 = 5$ m, $z = 5$ m; b) h_1 y $h_2 = 5$ m, $z = 20$ m; c) h_1 y $h_2 = 5$ m, $z = 30$ m; d) h_1 y $h_2 = 10$ m, $z = 5$ m; e) h_1 y $h_2 = 10$ m, $z = 15$ m; f) h_1 y $h_2 = 15$ m, $z = 5$ m.

Fuente. Elaboración Propia

7.3.2.1. Análisis del Escenario 2

Para este escenario se simuló el tipo de agua Coastal Ocean en donde se observó que este tipo de agua al presentar coeficientes de absorción y dispersión más altos, los resultados

del BER, factor Q, potencia de recepción, variaron significativamente en comparación con la simulación de Clear Ocean.

Los diagramas de ojos mostrados en la figura 43 se visualiza que la relación señal a ruido es baja para la mayoría de los casos ya que se observa que el “ojo” presenta interferencias en los símbolos transmitidos. Además, en la visualización de los mismos se tiene bajos niveles de ruido y jitter cuando el transmisor y receptor están a una profundidad de 5 m para una distancia z de 5 a 20 m.

Analizando la potencia de recepción para coastal ocean water de la figura 42 b) se obtienen valores por debajo de los -40 dbm cuando z es inferior a los 25 m, con una profundidad de 5 m. Para el caso donde la profundidad del sistema es de 10 y 15 m para todos los valores de z se tiene potencias de recepción muy bajas y esta potencia va disminuyendo conforme se aumenta la profundidad, por ejemplo, para distancias mayores o iguales a los 30 m la potencia de recepción es de -100 dBm, un valor que indica que no hay comunicación porque la señal sufre una gran atenuación debido a la gran distancia recorrida por el haz de luz desde el transmisor a la superficie marina y desde dicha superficie al receptor.

Finalmente, analizando el factor Q y el BER para este escenario, cuando la profundidad del transmisor y receptor se encuentra a 5 m y con distancias Z de hasta 20 metros se obtuvo un valor de Q superior a 6 y por ende el Bit Error Rate para este caso se tienen el valor de 0, indicando que no hubo errores en la transmisión.

Para valores superiores, cuando la profundidad es de 10,15,30 y 50 m, se obtiene un factor Q menor a 6 indicando una calidad de señal mala y por ende una alta tasa de bit errados llegando al valor de 1, lo que significa que todos los bits transmitidos fueron receptados erróneamente.

7.3.3. Resultados Escenario 3

Los parámetros de simulación para este escenario se muestran en la tabla 17, para este escenario $h_1 < h_2$.

Tabla 17. Parámetros de simulación para el Escenario 3 y 4.

Especificación	Valor
Frecuencia	525 nm(verde)
Potencia	9 W
Temperatura	24°C
Salinidad	3.42%
Tasa de datos	20 Mbps
Profundidad de Transmisor (h1)	2m,4m,6m,13m, 19m,21m
Profundidad de Receptor (h2)	5m,8m,10m,17m, 23m, 25m
Distancia Horizontal (Z)	5m,15m,20m,30m, 50m, 60m,75m,150m
Angulo de divergencia (θ_d)	10 mrad

Diámetro de apertura del transmisor	14.9 cm
Diámetro de apertura del receptor	14.9 cm
Fuente óptica	Láser (LD)
Tipo de Agua	Escenario 1: Clear Ocean Escenario 2: Coastal Ocean

Nota. En la tabla se detalla los parámetros para el escenario 3 y 4, en donde para este último se hará el cambio de tipo de agua.

Las gráficas del factor Q para el escenario 3 se muestran en la figura 44 a), como tal se observa que los valores son relativamente altos para las 3 primeras configuraciones de profundidad y una z que varía de los 5 hasta los 40 m. Sin embargo, también se observa que la calidad de la señal se ve reducida drásticamente cuando $h_1 = 13$ m y $h_2 = 17$ m, y para profundidades superiores el factor de calidad de la señal es de cero.

En la figura 44 c), se indica que, para profundidades cortas, el BER se mantiene por encima de los valores mínimos permitidos en comunicaciones ópticas, sin embargo, para todos los casos se observa que para distancias $z > 75$ m todos los bits transmitidos fueron transmitidos erróneamente. Para configuraciones de profundidad mayores el BER tiene una alta tasa de error en la transmisión de los bits como en los casos anteriores.

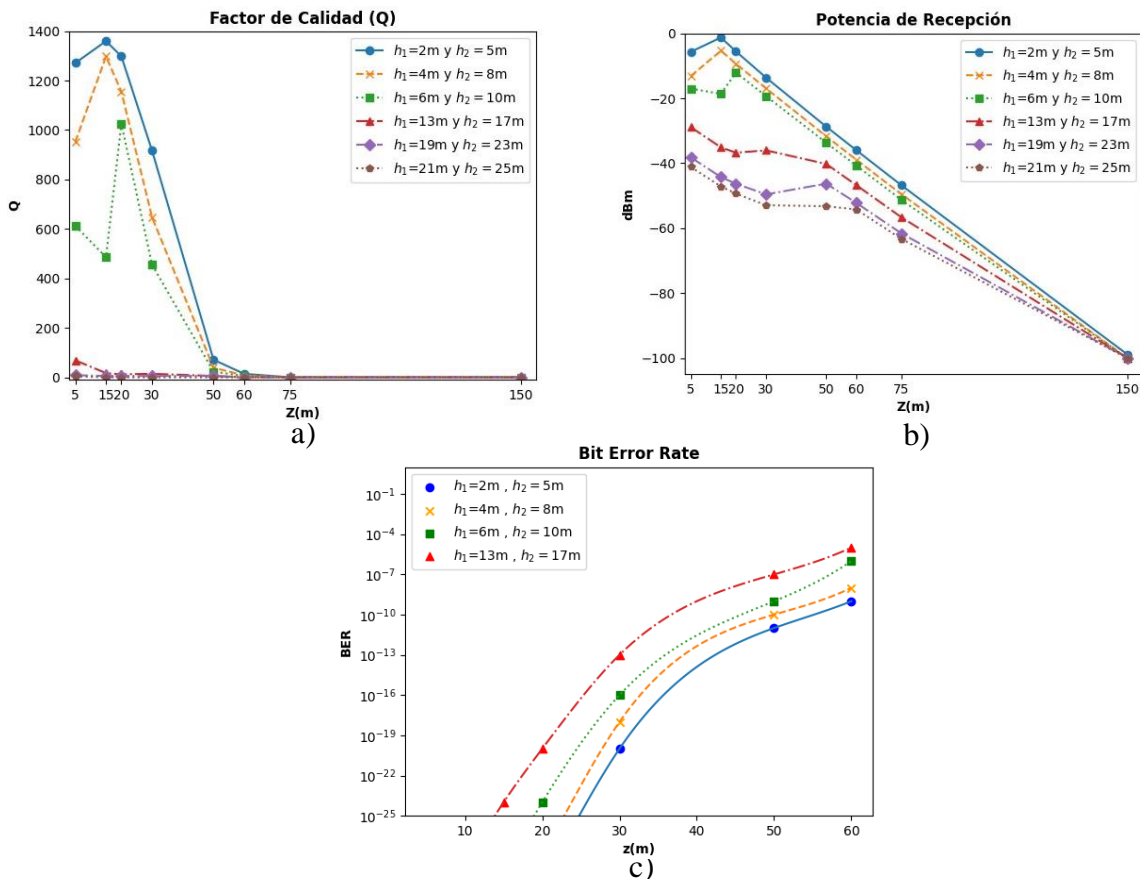


Figura 44. Escenario 3. a) Factor de calidad (Q), b) Potencia de Recepción, c) Bit Error Rate (BER)

Fuente. Elaboración propia

La potencia de recepción se muestra en la figura 44 b), en la misma se observa que para las 4 primeras configuraciones de profundidad se mantiene niveles de potencia superiores a los -40 dBm, sin embargo, como en todos los casos la potencia de recepción supera el umbral cuando la distancia z llega a distancias mayores, para este escenario en particular se observa que en promedio la potencia está por debajo de los -40 dBm cuando $z > 65$ m. Así mismo, se observa que los niveles de recepción son bajos para los valores mínimos de Z para las dos últimas configuraciones de profundidad (línea morada y café de la figura 44 b))

En la figura 45 se muestra algunos patrones de ojos obtenidos para este escenario. En los incisos a), b) y c) de dicha figura se tiene los diagramas de ojos para esta configuración de profundidad, $h_1 = 2$ m y $h_2 = 5$ m. En el inciso a) se obtuvo un ojo ideal cuando $z = 5$ m ya que no presenta interferencias y ruido. Para el inciso b) se considera que $z = 60$ m, en este caso el ojo tiene un alto jitter con una apertura de ojo amplia, sin embargo, para el inciso c) se indica que para $z = 75$ m el ojo se distorsiona en su totalidad.

Finalmente, en las figuras 45 d) y e), están los diagramas de ojo para $h_1 = 21$ m y $h_2 = 55$ m. En el inciso d) el ojo presenta una apertura pequeña en donde la comunicación es mala, en cambio en la figura 45 e) esta apertura se cierra en su totalidad cuando $z = 15$ m.

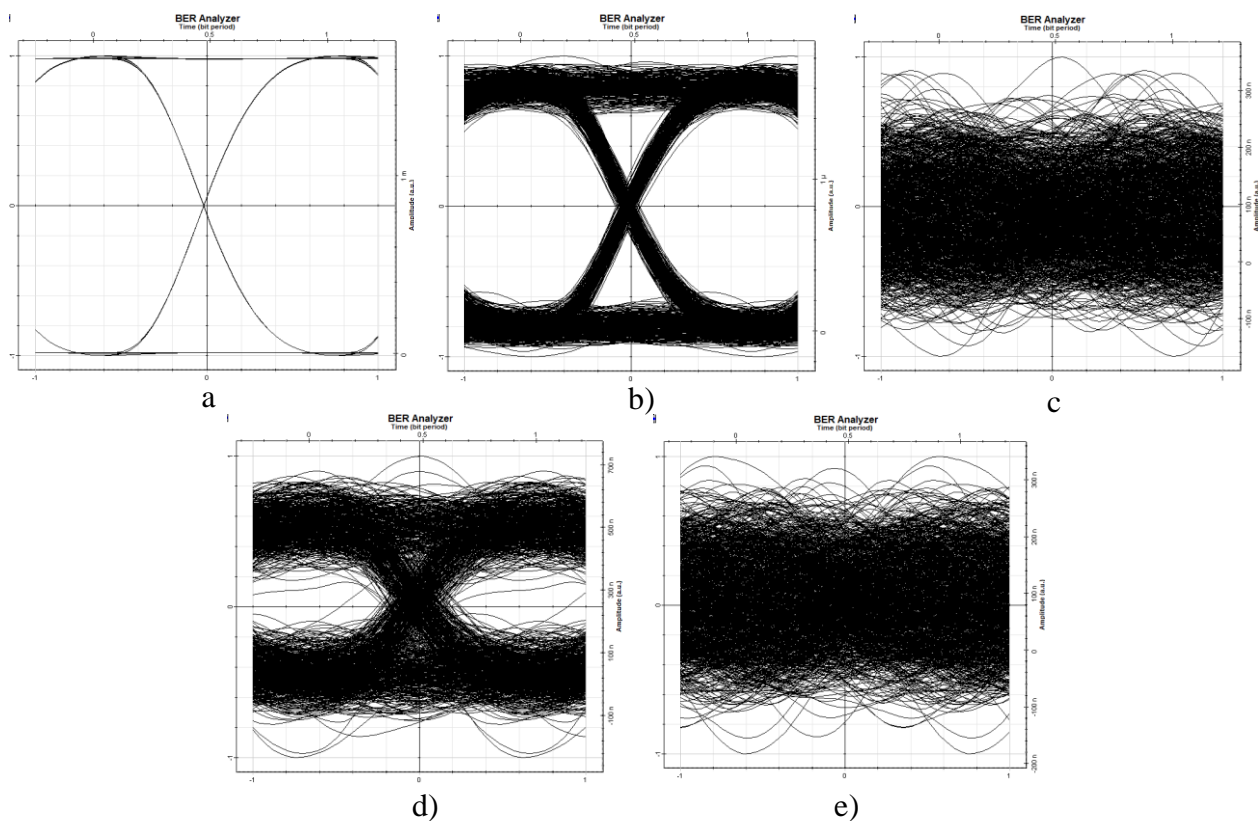


Figura 45. Diagramas de ojo Escenario 3. a) $h_1=2$ m y $h_2=5$ m, $z=5$ m; b) $h_1=2$ m y $h_2=5$ m, $z=60$ m; c) $h_1=2$ m y $h_2=5$ m, $z=75$ m; d) $h_1=21$ m y $h_2=25$ m, $z=5$ m; e) $h_1=21$ m y $h_2=25$ m, $z=15$ m.

Fuente. Elaboración propia

7.3.3.1. Análisis del Escenario 3

Para este escenario en donde se simuló profundidades diferentes en cuanto al transmisor y receptor, con el tipo de agua Clear Ocean, se obtuvo mejores resultados de los que se obtuvo en el escenario 1.

Los diagramas de ojo indican que el SNR presenta un nivel alto cuando el transmisor se encuentra a una profundidad menor que el receptor. Sin embargo, a medida que se aumente la distancia de transmisión del haz, los bits transmitidos se ven perjudicados por la interferencia del canal submarino. Cuando los nodos están a profundidades mayores a 19 m, los diagramas de ojo muestran una apertura reducida, llegando en algunos casos a no presentar ninguna apertura.

En la potencia de recepción también se consiguió potencias menores a las simuladas en el escenario 1, en la cual se evidenció que para configuraciones pocas profundas se obtienen potencias menores a los -40 dbm cuando $z < 60$ m, y cuando la profundidad aumenta la potencia que llega al receptor disminuye para las distancias z simuladas. El peor caso se obtuvo fue cuando $h_1 = 21\text{m}/h_2 = 25\text{m}$, en la cual para toda distancia z se obtuvo potencias menores a los -40 dbm.

Finalmente, el factor Q y el BER se visualiza que la calidad de la señal es mala cuando se llega a una distancia z de 75 metros en adelante y se empeora para los casos en donde el sistema se configura a una mayor profundidad, que consecuente a esto se obtiene una alta tasa de bit errados que aumenta conforme se incrementa Z y la profundidad del sistema.

Se obtuvieron mejores resultados que en el escenario 1 debido a que, cuando el transmisor y receptor están a diferentes profundidades, el ángulo de incidencia respecto a la superficie marina aumenta, por ende, hay mejor reflexión del haz de luz desde la superficie marina hasta el receptor. Por lo tanto, es muy importante considerar que dicho ángulo sea mayor o cercano al ángulo crítico para tener una reflexión interna total en el sistema y por ende obtener un mejor apuntamiento entre transmisor y receptor.

7.3.4. Resultados Escenario 4:

. Se tomas los parámetros de simulación de la tabla 17, pero se simula con coastal ocean water. Aquí $h_1 < h_2$. El factor Q, potencia de recepción y BER se muestra en la figura 46.

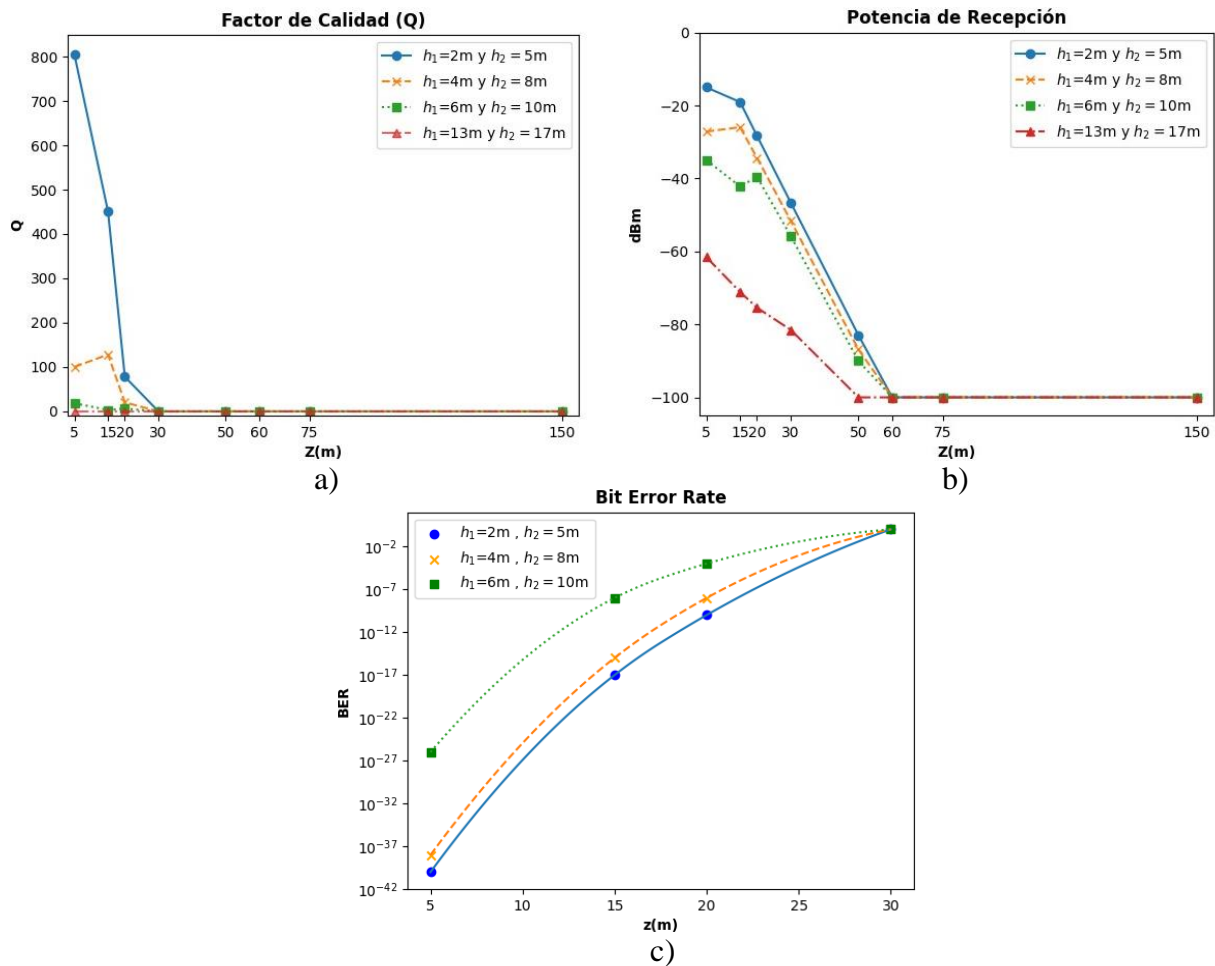


Figura 46. Escenario 4. a) Factor de calidad (Q), b) Potencia de Recepción, c) Bit Error Rate (BER)
Fuente. Elaboración Propia

El factor Q para este escenario se mostró elevado para la primera configuración de profundidad, sin embargo, el mismo se ve perjudicado cuando $z \geq 30$ m. Para las dos configuraciones de profundidad siguientes se tiene valores de Q por encima del valor mínimo permitido, siempre y cuando $z < 30$ m. Finalmente en la gráfica se observa que para la última configuración de profundidad el factor Q indica que la señal tiene una calidad mala para todos los valores de z .

En la figura 46 c) se muestra los valores de BER para cada distancia simulada que como tal se tienen valores en los valores mínimos permitidos ($10^{-9}, 10^{-12}$) para las distancias anteriormente señaladas.

La potencia de recepción mostrado en la figura 46 b), se observa la caída de potencia cuando $z = 30$ m para las tres primeras configuraciones de profundidad. Para la última

configuración de profundidad se obtienen valores por debajo de los -40 dbm para todas las distancias z simuladas.

Los diagramas de ojo se muestran en la figura 47. Los incisos a), b) y c) de la figura corresponden cuando se tenía una configuración de profundidad de $h_1 = 2\text{m}$, $h_2 = 5\text{m}$, como tal se observa que la apertura del ojo se cierra en su totalidad cuando $z = 30\text{m}$, para valores inferiores el patrón de ojo indica que la señal se recepta de buena manera.

En cambio, en los incisos d), e) y f) los diagramas de ojo corresponden a la configuración de profundidad de $h_1 = 6\text{m}$, $h_2 = 10\text{m}$. Como tal se observa que, a mayor profundidad, el ojo presenta ruido en sus niveles lógicos, además que para $z \geq 20\text{m}$ la señal óptica se degrada a gran escala debido a las condiciones del tipo de agua simulado.

Cabe destacar que los diagramas de ojo para la última configuración de profundidad el patrón de ojo resultó altamente distorsionado para todos los valores de z simulados.

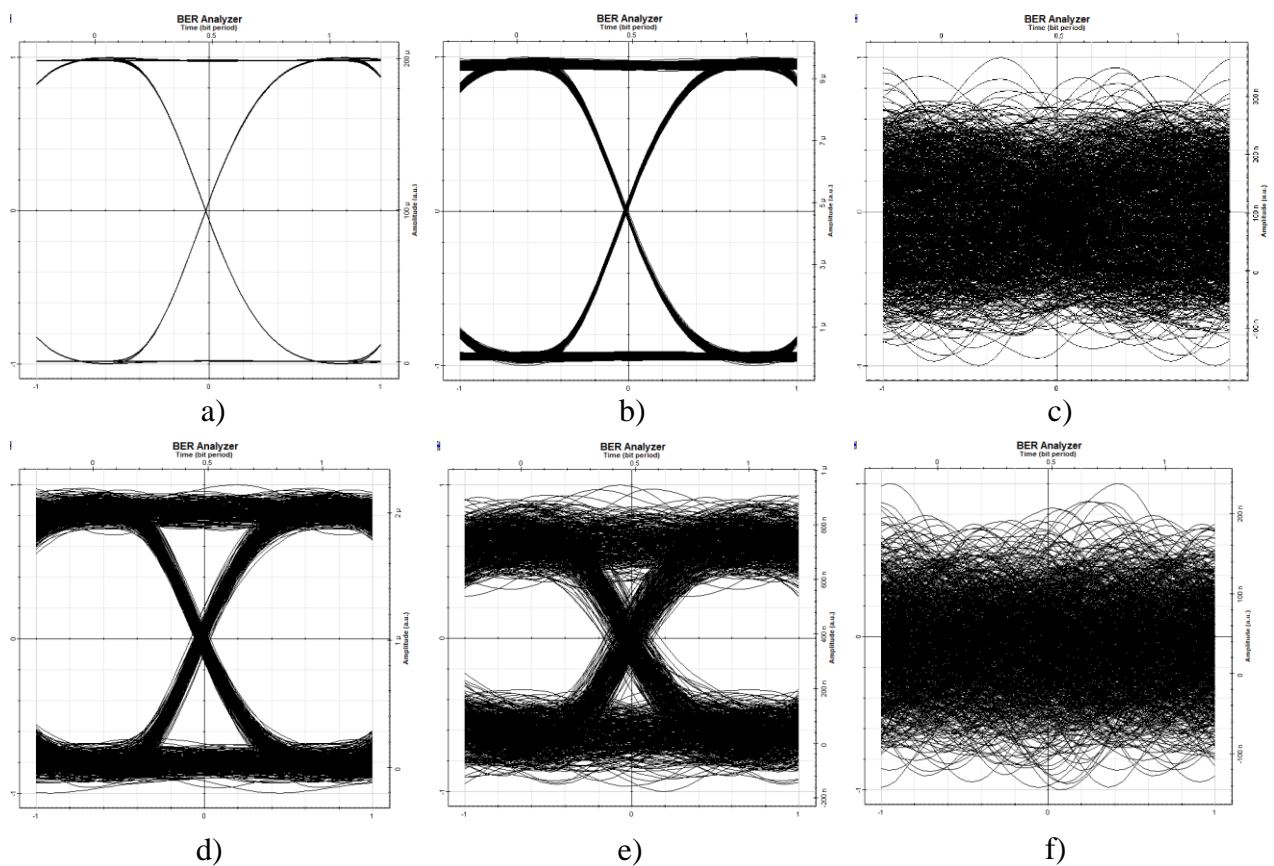


Figura 47. Diagramas de ojo Escenario 4. a) $h_1=2\text{m}$ y $h_2=5\text{m}$, $z=5\text{m}$; b) $h_1=2\text{m}$ y $h_2=5\text{m}$, $z=20\text{m}$; c) $h_1=2\text{m}$ y $h_2=5\text{m}$, $z=30\text{m}$; d) $h_1=6\text{m}$ y $h_2=10\text{m}$, $z=5\text{m}$; e) $h_1=6\text{m}$ y $h_2=10\text{m}$, $z=20\text{m}$; e) $h_1=6\text{m}$ y $h_2=10\text{m}$, $z=30\text{m}$

Fuente. Elaboración propia

7.3.4.1. Análisis del Escenario 4

Finalmente se realizó la simulación para Coastal Ocean cuando el transmisor y receptor se encuentran a profundidades diferentes, por el tipo de agua que se usó se obtuvo resultados muy variados en comparación con los mostrados en el escenario 3.

Por ejemplo, los diagramas de ojo mostraron que el SNR se ve afectado cuando $z \geq 30$ m, en donde en comparación con el escenario 3 se tiene una reducción promedio de 25 m en cuanto a la separación de los nodos. Entonces, los diagramas de ojo se ven perjudicados por los coeficientes de atenuación y dispersión del tipo de agua simulado (Coastal Ocean).

Esto también se puede ver relacionado con las potencias de recepción obtenidas ya que, para las distancias de z anteriormente mencionadas, los niveles de recepción están por debajo del umbral de los -40 dBm. Por último, el factor Q y el BER corroboran que para este tipo de agua simulado se tienen niveles superiores a los umbrales cuando $z < 30$ m. Además, estos valores decrecen conforme la configuración de profundidad del sistema aumente.

7.4. Simulación con las características del equipo BlueComm 200.

7.4.1. Resultados Escenario 5

Los parámetros de simulación se muestran en la tabla 18. Aquí $h_1 = h_2$. Así mismo, en la figura 48 se muestran los resultados para el presente escenario.

Tabla 18. Parámetros de simulación para el Escenario 5 y 6

Especificación	Valor
Frecuencia	525 nm(verde)
Potencia	6 W
Temperatura	24°C
Salinidad	3.42%
Tasa de datos	10 Mbps
Profundidad de Transmisor (h_1)	5m,10m,15m,30m,50m
Profundidad de Receptor (h_2)	5m,10m,15m,30m,50m
Distancia Horizontal(z)	5m,15m,20m,30m, 50m, 60m,75m,150m
Angulo de divergencia (θ_d)	7.5 °
Diámetro de apertura del transmisor	13.6 cm
Diámetro de apertura del receptor	13.6 cm
Fuente óptica	LED
Tipo de Agua	Escenario 1: Clear Ocean Escenario 2: Coastal Ocean

Nota. En la tabla se detalla los parámetros para el escenario 5 y 6, en donde para este último se hará el cambio de tipo de agua

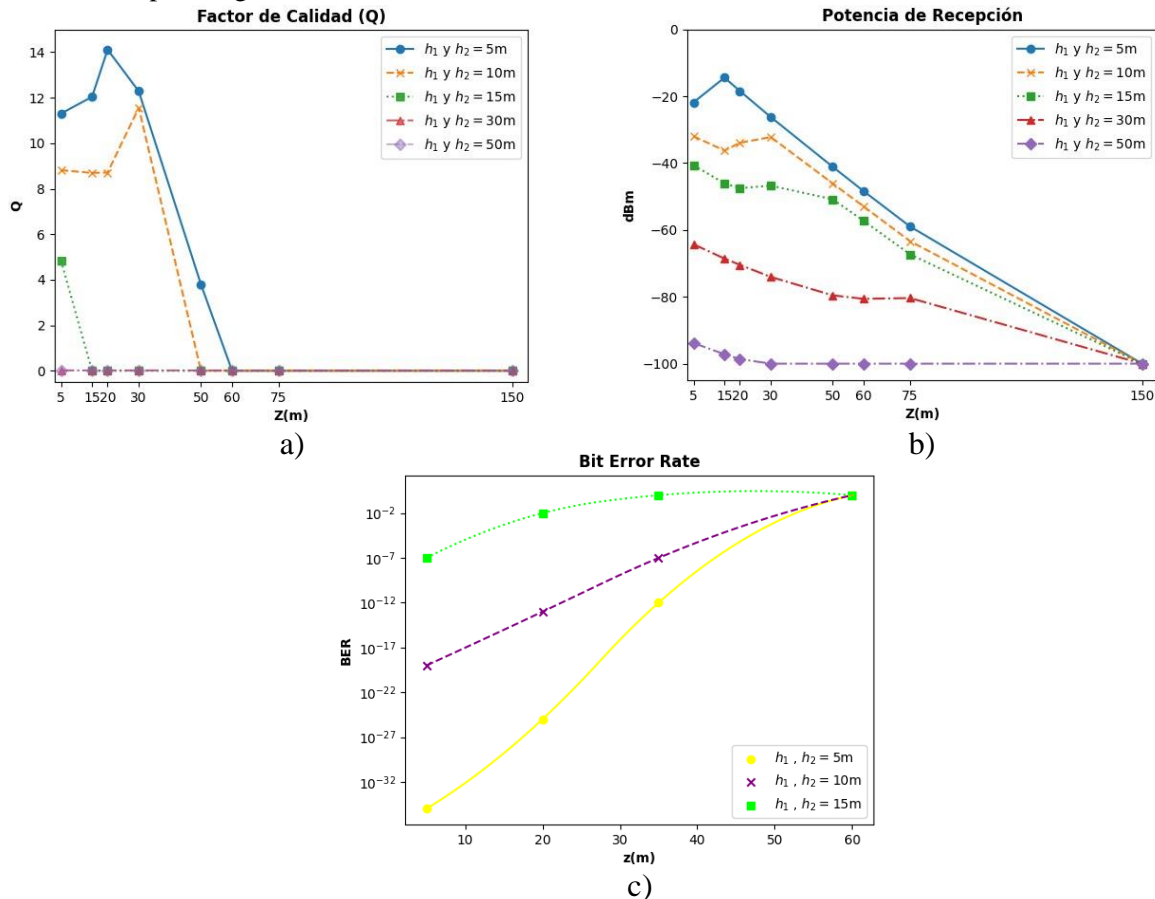


Figura 48. Escenario 5. a) Factor de calidad (Q), b) Potencia de Recepción, c) Bit Error Rate (BER)

Fuente. Elaboración propia

En relación con el factor Q, la figura 48 a), indica que para profundidades de 5 y 10 metros se tienen buenos valores de Q cuando $Z \leq 30$ m. Para distancias superiores de profundidad y de z el factor Q decrece por debajo del umbral mínimo de 6.

Este mismo análisis se aplica al BER obtenido para las distancias simuladas, en donde en la figura 48 c) se visualiza que, para h_1 y $h_2 = 5$ m y una $Z \leq 30$ m, se presentan valores menores a 10^{-20} , un valor que indica que el sistema no presenta bit transmitidos erróneamente, para casos mayores de profundidad, por ejemplo, de 15 m todos los bits transmitidos se corrompen en la transmisión y por ende el BER es igual a la unidad.

Las curvas de potencia de recepción se muestran en la figura 48 b). Para las profundidades de 5 y 10 m se obtienen niveles de recepción por debajo de los -40 dBm cuando $z \leq 30$ m, para las demás distancias la potencia de recepción es baja ocasionado que el receptor no capta la señal enviada por el transmisor

Los patrones de ojo de este escenario se muestran en la figura 49.

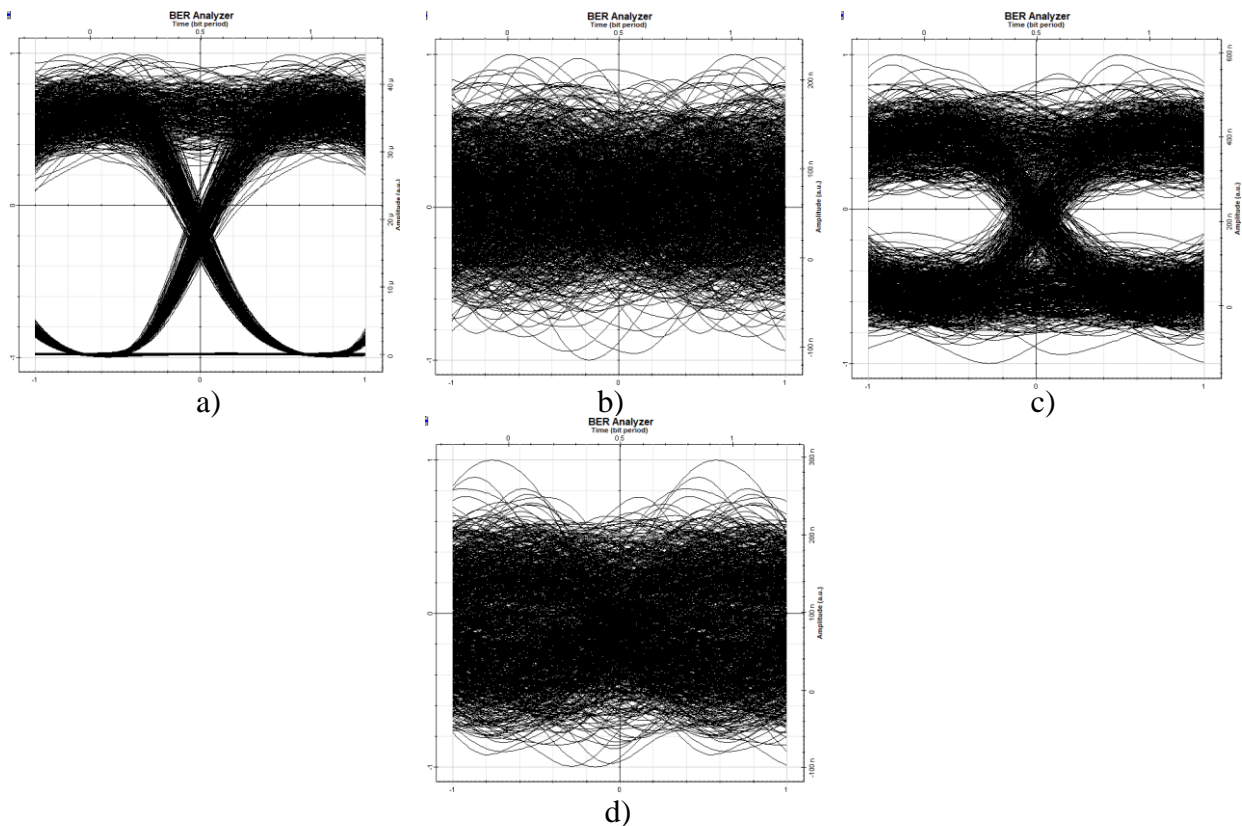


Figura 49. Diagramas de ojo. a) h_1 y $h_2 = 5$ m, $z=5$ m, b) h_1 y $h_2 = 5$ m, $z=60$ m, c) h_1 y $h_2 = 15$ m, $z=5$ m, d) h_1 y $h_2 = 15$ m, $z=15$ m

Fuente. Elaboración propia

Finalmente, en la figura 49 a) y b) se tienen los diagramas de ojo referentes a la configuración h_1 y $h_2 = 5$ m, por su parte en la figura a) se observa que el nivel de ruido es

considerable para el nivel lógico 1 del ojo y se presenta un jitter en los cruces por cero; en la figura b) se indica que cuando $z = 60$ m el ojo se distorsiona completamente.

En la figura 49 c) y d) los patrones de ojos corresponden a h_1 y $h_2 = 15$ m con $z = 5$ m y 15 m, respectivamente. Por su parte en la figura c) se observa que el ojo a esta profundidad presenta una apertura pequeña, con presencia de interferencias en sus niveles lógicos. Para la figura d) se indica que para $z = 15$ m no existe comunicación ya que el diagrama de ojo solo presenta ruido.

7.4.1.1. Análisis del Escenario 5

Los diagramas de ojo mostrados, se puede observar una diferencia respecto a los diagramas obtenidos cuando se simuló para los 4 escenarios anteriores, es por eso que cuando se inicia con profundidades y distancias horizontales cortas se presentan mayor cantidad de ruido en el nivel lógico 1 del “ojo”, sin embargo, aún se tiene una apertura aceptable. Cuando h_1 y $h_2 = 5$ m, se observó que cuando z alcanza los 50 metros el diagrama de ojo, se distorsiona en gran magnitud, teniendo una apertura muy cerrada. A medida que se fue variando la profundidad, por ejemplo, a los 10 metros, se visualizó que la apertura del ojo se reduce cuando $z = 30$ m, y al seguir aumentando la profundidad a 15 m, en cambio el diagrama de ojo tiene una apertura cerrada cuando $z = 15$ m.

En consecuencia, el factor de calidad y BER también disminuyeron, sin embargo, para algunos casos aún se tiene valores que sobrepasan los umbrales permitidos para comunicaciones ópticas, por ejemplo, cuando h_1 y $h_2 = 5$ y 10 m, se tiene un factor Q mayor a 6 siempre y cuando $z < 30$ metros ya que cuando $z = 50$ m se indica que la señal óptica tiene un factor de calidad muy bajo. Cuando el sistema se configura a una profundidad mayor, por ejemplo, a 15, 30 y 50 m para todos los casos de z , el factor de calidad es cercano o igual a cero, denotando que la señal receptada es errónea. Por lo tanto, el BER tuvo las mismas implicaciones para las distancias anteriormente señaladas.

Analizando la potencia de recepción para este escenario, se puede indicar que al usar una fuente óptica LED, la potencia que percibe el receptor es menor en comparación a una fuente óptica láser, sin embargo, se mantiene el umbral de -40 dBm. Por lo tanto, para este escenario se obtuvo potencias de recepción buenas cuando h_1 y $h_2 = 5$ y 10 metros, igualmente al aumentar la distancia z a 50 m y para profundidades mayores la potencia de recepción cae por debajo del umbral especificado.

7.4.2. Resultados Escenario 6

En la tabla 18 se indican los parámetros de simulación, se cambia a coastal ocean water, y $h_1 = h_2$.

En la figura 50 a) se obtienen valores de Q por encima del valor mínimo requerido cuando h_1 y $h_2 = 5\text{m}$ siempre y cuando $z \leq 15\text{ m}$. Para las demás distancias simuladas se obtiene que la calidad de la señal es deficiente. En la figura 50 c) se corrobora que para la primera configuración de profundidad se obtienen valores menores a 10^{-9} de BER cuando $z \leq 15\text{ m}$, y para el resto de configuraciones se tienen BER iguales a 1.

Por otro lado, en la figura 50 b) la Prx es inferior al umbral de los -40 dBm para h_1 y $h_2 \geq 10\text{ m}$, sin embargo, existe la excepción cuando h_1 y $h_2 = 5\text{m}$ y $z = 5$ y 15 m , para estas distancias se observa que el nivel de potencia en el receptor esta alrededor de los -35 dBm .

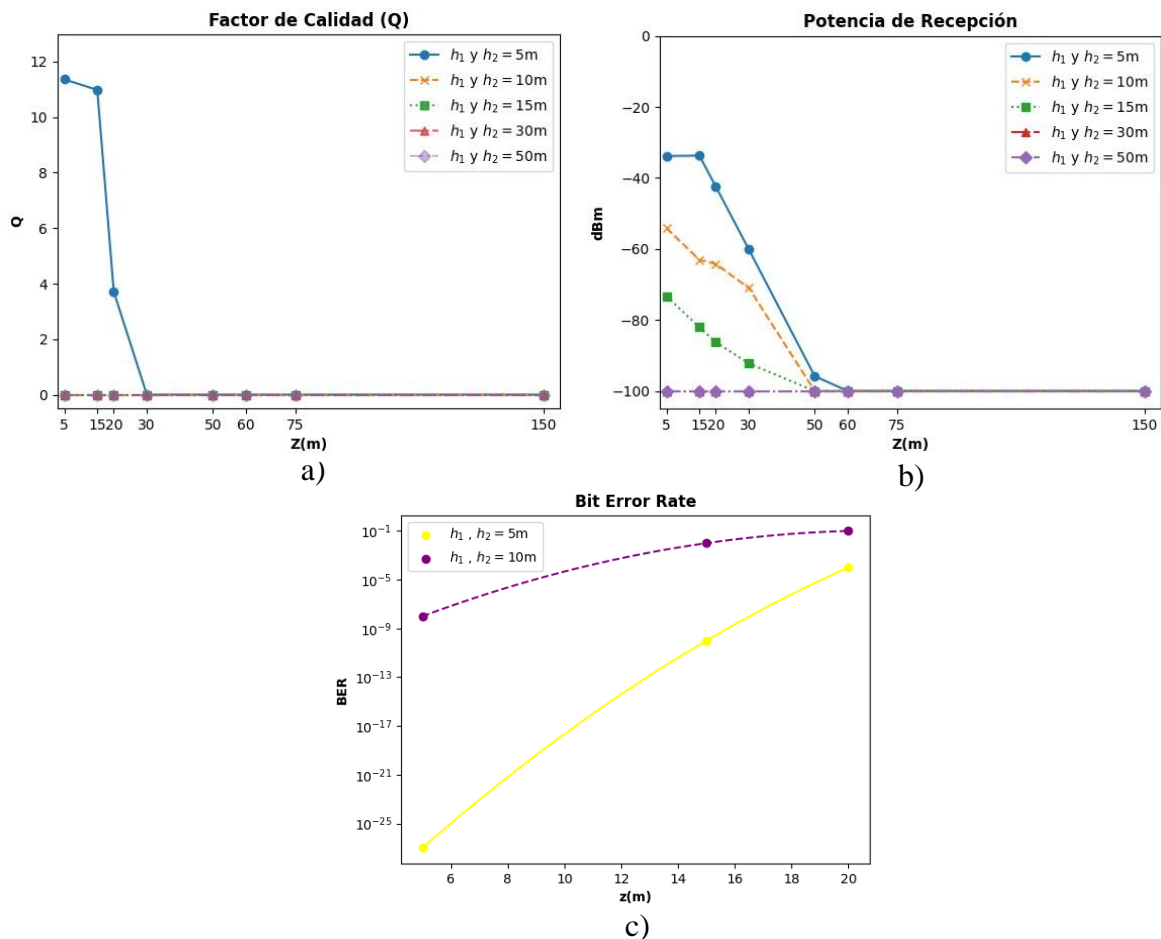


Figura 50. Escenario 6. a) Factor de Calidad (Q), b) Potencia de Recepción, c) Bit Error Rate (BER)
Fuente. Elaboración propia

Finalmente, en la figura 51 a) y b) se tienen los diagramas de ojo del mejor y peor caso para la configuración de profundidad h_1 y $h_2 = 5\text{m}$, en donde para $z = 5\text{ m}$ el patrón de ojo a pesar de tener una apertura aceptable, presenta ruido en sus dos niveles lógicos, para $z = 30\text{ m}$

la comunicación presenta un alto nivel de interferencia. En la figura 51 c) el diagrama de ojo indica que para h_1 y $h_2 = 5\text{m}$ con $z = 5\text{m}$, no es posible la comunicación a estas distancias con el tipo de agua simulado.

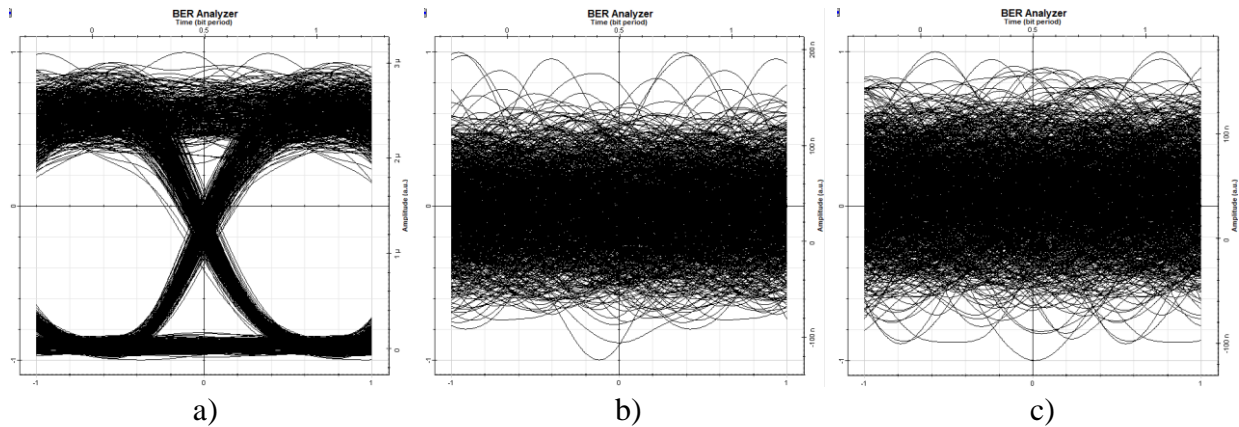


Figura 51. Diagramas de ojo. a) h_1 y $h_2=5\text{m}$, $z=5\text{m}$, b) h_1 y $h_2=5\text{m}$, $z=30\text{m}$, c) h_1 y $h_2=10\text{m}$, $z=5\text{m}$
Fuente. Elaboración propia

7.4.2.1. Análisis del Escenario 6

Para coastal ocean water se observó que la señal óptica al proceder de una fuente óptica LED, sufre en mayor medida los fenómenos del canal submarino. Primeramente, analizando los diagramas de ojos, se visualiza que para una profundidad de 5 m se obtienen aperturas aceptables cuando $z \leq 15\text{m}$, al aumentar esta distancia, por ejemplo, a los 20 m, la apertura del “ojo” se reduce en gran medida y para distancias z mayores se observa que el ruido e interferencia aumentan, por lo tanto, el diagrama de ojo se ve muy distorsionado. Por otro lado, al tener profundidades de 10 m, se obtuvo que el SNR del sistema es bajo ya que el ruido y distorsión del sistema son mayores en el sistema.

El factor Q, tiene las mismas implicaciones en cuanto a las distancias simuladas, debido a que solo se obtuvo buena calidad de la señal cuando h_1 y $h_2 = 5\text{m}$ con $z = 15\text{m}$. Para las demás distancias simuladas se obtuvo un factor de calidad igual a 0. Del mismo modo, este análisis aplica al BER, en donde se obtienen valores de $2.50e^{-30}$, $1.8e^{-28}$ cuando $z = 5$ y 15m respectivamente, para una configuración de 5 m de profundidad.

En la figura 50 b), se graficaron las potencias de recepción para todas las configuraciones de profundidad simuladas, y tal como se observa para la mayoría de los casos la potencia de recepción presenta un nivel muy por debajo de los -40dbm . Por lo tanto, podemos mencionar que para una fuente óptica LED, la señal óptica se absorbe y dispersa en mayor medida.

7.4.3. Resultados Escenario 7

Los parámetros de simulación se muestran en la tabla 19, y los resultados de este escenario se muestran en la figura 52. Aquí $h_1 \leq h_2$.

Tabla 19. Parámetros de simulación para el escenario 7 y 8

Especificación	Valor
Frecuencia	525 nm(verde)
Potencia	6 W
Temperatura	24°C
Salinidad	3.42%
Tasa de datos	10 Mbps
Profundidad de Transmisor (h1)	2m,4m,6m,13m
Profundidad de Receptor (h2)	5m,8m,10m,17m
Distancia Horizontal (Z)	5m,15m,20m,30m, 50m, 60m,75m,150m
Angulo de divergencia (θ_d)	7.5 °
Diámetro de apertura del transmisor	13.6 cm
Diámetro de apertura del receptor	13.6 cm
Fuente óptica	LED
Tipo de Agua	Escenario 1: Clear Ocean Escenario 2: Coastal Ocean

Nota. En la tabla se detalla los parámetros para el escenario 7 y 8, en donde para este último se hará el cambio de tipo de agua

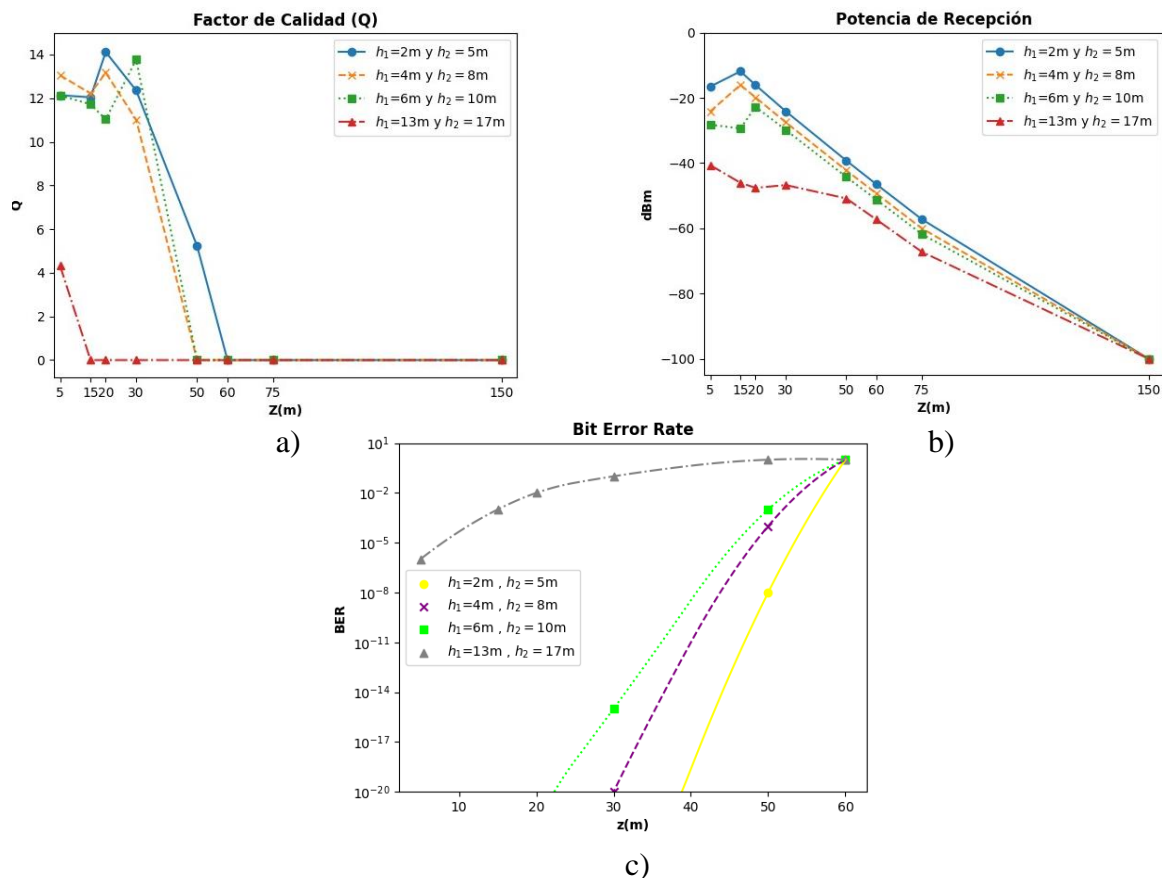


Figura 52. Escenario 7. a) Factor de calidad (Q), b) Potencia de Recepción, c) Bit Error Rate (BER)

Fuente. Elaboración propia

El factor de calidad, figura 52 a), los valores adoptan un comportamiento variado, ya que para ciertas distancias z el valor de Q se incrementa en comparación con el valor obtenido para una z de menor distancia. De forma general, se puede mencionar que hasta $z \leq 40$ m la calidad de la señal es buena, siempre y cuando h_1 y $h_2 \leq 6$ y 10 m respectivamente. Para profundidades mayores la señal es mala, como, por ejemplo, la línea roja de la figura 52 a) indica que, para valores mínimos de z , el valor de Q es inferior al mínimo valor requerido.

El BER mostrados en la figura 52 c), se observa que el sistema se ve perjudicado cuando la profundidad de los nodos transmisor y receptor se encuentra a 13m y 17 m respectivamente.

La potencia de recepción, se muestra en la figura 52 b). Se observa que la misma se mantiene por debajo de los -40 dBm cuando h_1 y h_2 están a 13 y 17 m de profundidad respectivamente. Para profundidades menores, como las que se muestran en las líneas azul, naranja y verde, la potencia de recepción es buena cuando $z < 40$ m.

Los diagramas de ojo de la figura 53 a) y b) indican que la señal sufre de interferencia cuando $z = 60$ m cuando h_1 y $h_2 = 2$ y 5 m respectivamente. Al tener, $h_1 = 6$ m y $h_2 = 10$ m, el patrón de ojo se muestra con ruido cuando $z = 50$ m. Sin embargo, la señal sufre de gran interferencia cuando los nodos se ubican a $h_1 = 13$ m y $h_2 = 17$ m (figura 53 e)), así mismo en la figura 53 f) la señal se distorsiona completamente cuando $z = 15$ m.

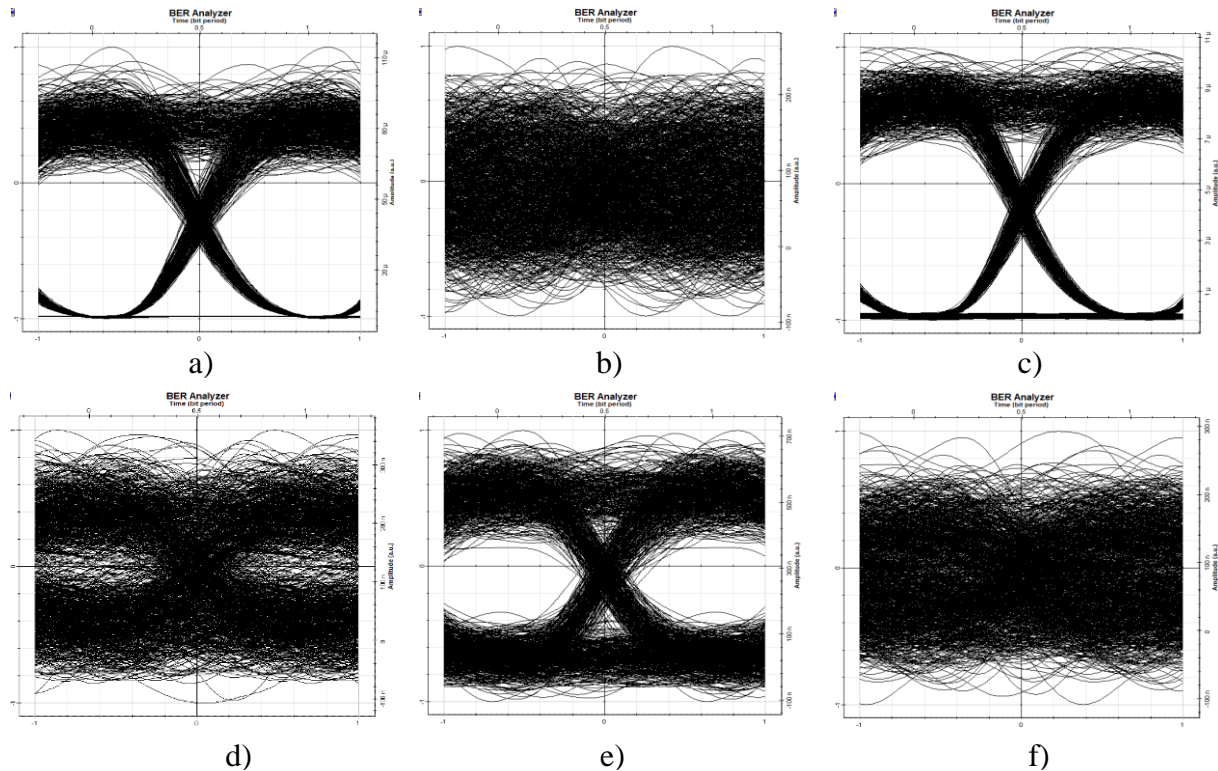


Figura 53. Diagramas de ojo. a) $h_1=2$ m y $h_2=5$ m, $z=5$ m; b) $h_1=2$ m y $h_2=5$ m, $z=60$ m; c) $h_1=6$ m y $h_2=10$ m, $z=5$ m; d) $h_1=6$ m y $h_2=10$ m, $z=50$ m; e) $h_1=13$ m y $h_2=17$ m, $z=5$ m; f) $h_1=13$ m y $h_2=17$ m, $z=15$ m

Fuente. Elaboración propia

7.4.3.1. Análisis del Escenario 7

En este escenario en el cual solamente se fue cambiando varias profundidades, y tal como se mencionó en el escenario 3, cuando el receptor se encuentra más profundo que el transmisor se obtuvieron valores más favorables.

En las simulaciones se obtuvieron diagramas de ojo con una apertura amplia, cuando el transmisor y receptor estaban a estas profundidades $h_1 = 2m/h_2 = 5m$, sin embargo, aún se mantuvo ruido en el nivel 1 del “ojo”, además para esta configuración de profundidad el diagrama de ojo mostró una apertura medianamente aceptable cuando Z era igual a 50 m (sin embargo el ruido para este caso es considerable para ambos niveles del “ojo”), y para valores superiores del mismo, por ejemplo 60 m, el diagrama de ojo se vio distorsionado en su totalidad.

Para configuraciones con mayor profundidad, el diagrama de ojo empieza a aumentar sus niveles de ruido, por lo que sugiere que el SNR del sistema se ve afectado al empezar a configurar a mayor distancia los nodos.

El factor Q y el BER, revelan que para este escenario la señal se mantiene con una buena calidad y una baja tasa de error de bits. El factor Q tiene un promedio de 12 para estas profundidades: $h_1 = 2m/h_2 = 5m$, $h_1 = 4m/h_2 = 8m$ y $h_1 = 6m/h_2 = 10m$, lo que señala que la calidad es buena ya que supera el umbral mínimo necesario del factor Q . Por otra parte, el BER para este escenario se mantuvo relativamente mejor que el umbral mínimo, no obstante, cabe aclarar que en el inicio de este análisis se mencionó que cuando se tenía $h_1 = 2m, h_2 = 5m, Z = 50m$ la apertura de ojo era medianamente aceptable, sin embargo, en el BER y factor Q del mismo, se tienen valores de $8.11e^{-8}$ y 5.2307 respectivamente, que son valores que están por debajo del umbral.

La potencia de recepción se mantuvo relativamente mejor, teniendo un rango de -11.885 dBm hasta los -29 dBm cuando z oscilaba entre los 5 y 30 m, y para la configuración más profunda simulada, es decir $h_1 = 13m, h_2 = 17m$, para todos los valores que tomaba z se obtuvo valores -40.63 dBm o inferiores, lo que señala que para estas distancias es el límite en que el equipo simulado puede operar, en una configuración NLOS para este tipo de Agua.

7.4.4. Resultados Escenario 8

En la tabla 19 se muestra los parámetros de simulación, sin embargo, se usa coastal ocean water, con $h_1 \leq h_2$. El factor Q se muestran en la figura 54 a) para el caso $h_1 = 4m, h_2 = 8m, z = 5m$ se indica que la calidad de la señal está por debajo del valor mínimo de 6 y después aumenta cuando $z = 15m$, para las dos últimas configuraciones de profundidad el factor de calidad es igual a cero.

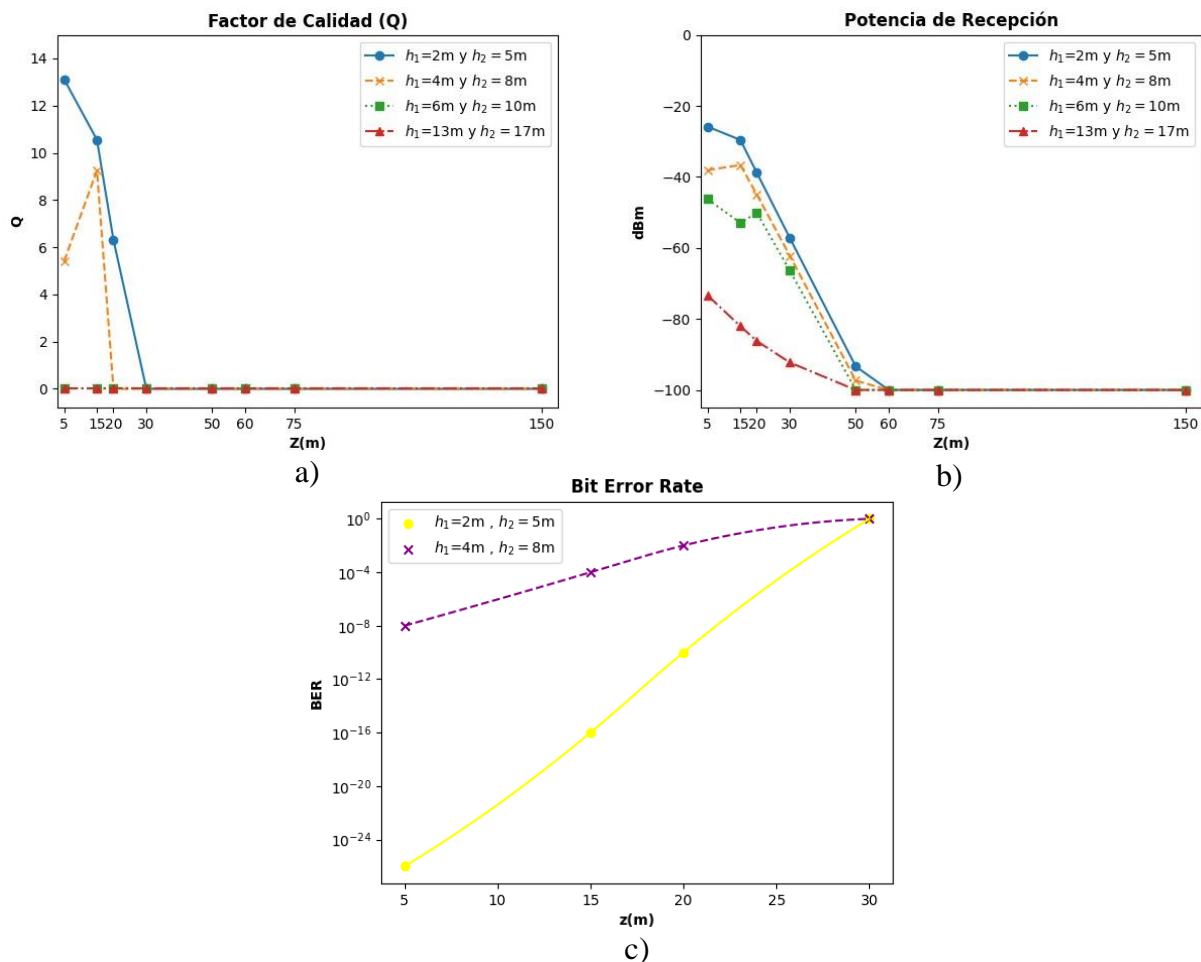


Figura 54. Escenario 8. a) Factor de calidad (Q), b) Potencia de Recepción, c) Bit Error Rate (BER)
Fuente. Elaboración propia

En la figura 54 b), se observa que la potencia de recepción no es favorable para la mayoría de las distancias simuladas ya que se obtienen valores menores a los -40 dbm, a excepción para las dos primeras configuraciones de profundidad (línea azul y naranja de la figura 54 b)) en donde para una distancia máxima de z de 15 m se obtienen niveles de recepción mayores al umbral especificado anteriormente.

En la figura 54 c), el BER indica que para la mayoría de las distancias simuladas todos los bits son receptados incorrectamente, salvo para las distancias anteriormente señaladas.

Para una configuración de $h_1 = 2\text{m}$, $h_2 = 5\text{m}$ los diagramas de ojo de la figura 55 a) y b) indican cuando $z = 30\text{ m}$ se pierde la comunicación. En cambio, cuando $h_1 = 4\text{m}$, $h_2 = 8\text{m}$, el patrón de ojo se distorsiona cuando $z = 20\text{ m}$. Finalmente, para una configuración de $h_1 = 6\text{m}$, $h_2 = 10\text{m}$, el diagrama de ojo de la figura 55e) indica que no es posible una comunicación cuando z toma el valor mínimo.

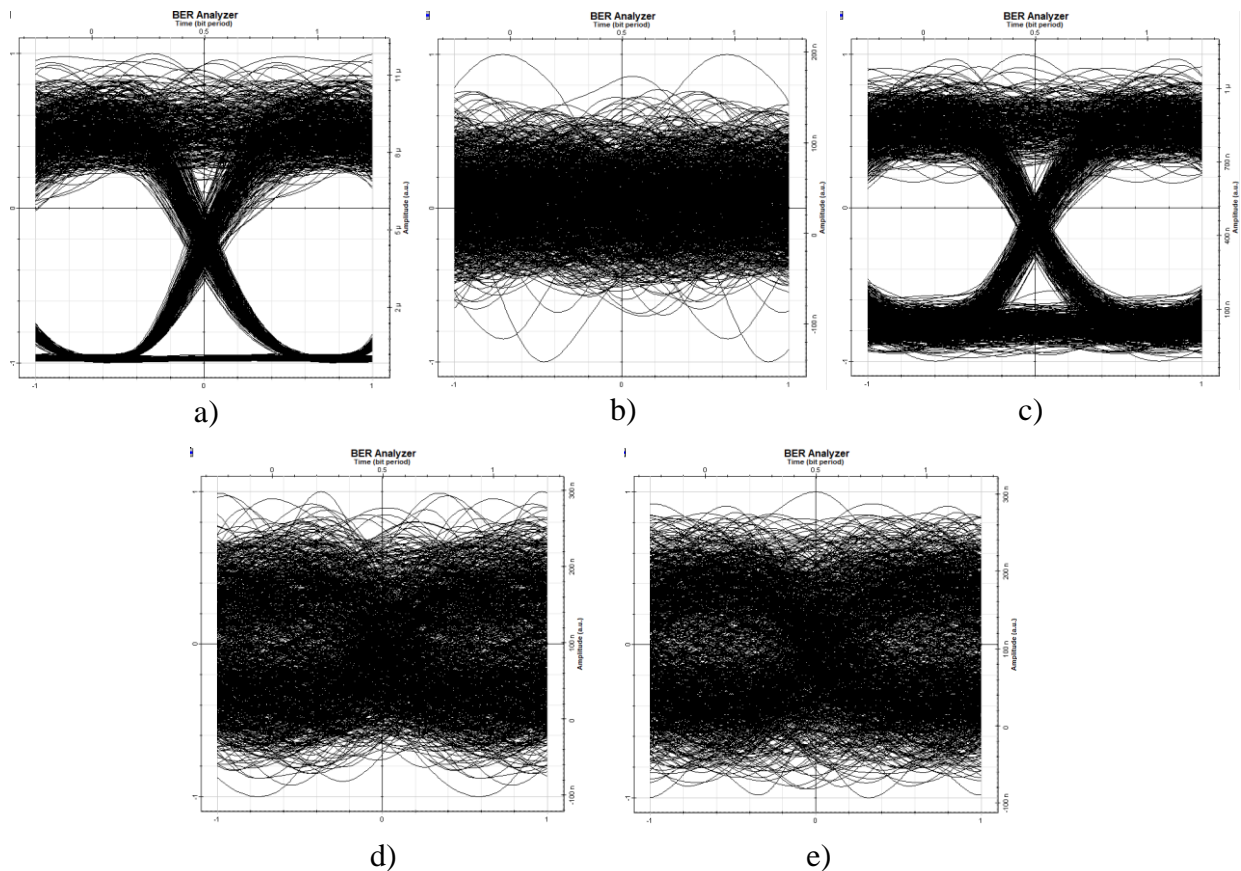


Figura 55. Diagramas de ojo. a) $h_1=2\text{m}$ y $h_2=5\text{m}$, $z = 5\text{m}$; b) $h_1=2\text{m}$ y $h_2=5\text{m}$, $z = 30\text{m}$; c) $h_1=4\text{m}$ y $h_2=8\text{m}$, $z = 5\text{m}$; d) $h_1=4\text{m}$ y $h_2=8\text{m}$, $z = 20\text{m}$; e) $h_1=6\text{m}$ y $h_2=10\text{m}$, $z = 5\text{m}$.

Fuente. Elaboración propia

7.4.4.1. Análisis del Escenario 8

Para una fuente óptica LED, y teniendo un tipo de agua Coastal Ocean los diagramas de ojos mostraron que el sistema solamente es factible cuando se tienen distancias cortas de transmisión, además para $z > 20\text{ m}$ el ojo se envuelve en gran cantidad de interferencia inter simbólica, así mismo, se tiene este mismo comportamiento al aumentar la profundidad de los nodos. El factor Q y el BER indican que el sistema es favorable para las primeras configuraciones de profundidad, siempre y cuando $z < 20\text{ m}$, así mismo se destaca que el ángulo de incidencia juega un papel importante para la segunda configuración ya que para la distancia $z=15\text{m}$ se observa un incremento de Q y BER en comparación con la distancia anterior de $z (5\text{m})$. Finalmente, la potencia de recepción sigue el mismo comportamiento anteriormente

mencionado, ya que, el nivel de recepción es inferior a los -40 dBm al superar la distancia z de 20 m y al tener los nodos a profundidades mayores.

8. Discusión

En este estudio, las simulaciones ejecutadas demuestran mayor eficiencia del sistema UOWC para clear ocean water, en comparación con los resultados obtenidos en coastal ocean water. Esta mayor eficiencia se atribuye por la diferencia en los coeficientes de absorción y dispersión de los tipos de agua simulados. Dado a que los coeficientes determinan la atenuación de la señal, en clear ocean water el haz de luz se vio menos afectado por la menor concentración de partículas en el agua en comparación con coastal ocean water. Así mismo se determinó que al usar una fuente óptica láser (LD) se obtuvieron mejores resultados al simular con una fuente óptica LED.

Además, la configuración geométrica del sistema UOWC juega un rol fundamental, ya que los resultados indican que, al tener el transmisor y receptor a distintas profundidades, los parámetros medidos tales como BER, factor Q, potencia de recepción mejoran sustancialmente en comparación cuando el transmisor y receptor tienen la misma profundidad.

Estos resultados están relacionados al ángulo de incidencia del haz de luz respecto a la superficie marina. En el caso de que dicho ángulo sea menor que el ángulo crítico, habrá una reducción en los parámetros de prestaciones medidos, al no cumplirse la reflexión interna total. Esto explica porque en las gráficas existe una mejora de los valores obtenidos cuando z aumenta a los 15 m, ya que para estos casos el ángulo de incidencia es mayor en comparación al ángulo de incidencia que se obtiene para z igual a 5 m.

Los diagramas de ojo en los escenarios planteados, revelan que la SNR muestra valores altos para el tipo de agua clear ocean water, por lo tanto, en estos escenarios se garantiza que todos los bits transmitidos sean correctamente recibidos. Por su parte, la definición empírica del umbral de recepción de -40 dBm ha servido para identificar los escenarios donde la potencia recibida en el receptor es insuficiente para lograr comunicación. Para coastal ocean water, los resultados muestran que este umbral fue inferior, especialmente cuando la distancia z y las profundidades de los nodos aumentaba.

Respecto al factor Q, los valores obtenidos en los escenarios, están por encima del umbral mínimo necesario en sistemas de comunicaciones digitales cuando se tiene distancias cortas de transmisión, igualmente, el BER demuestra una baja tasa de bits errados cuando el tipo de agua es clear ocean water. Así mismo, estos valores se ven perjudicados por las propiedades ópticas inherentes del agua cuando la distancia entre el transmisor y receptor son largas y a su vez cuando el sistema se simula en coastal ocean water.

Los resultados difieren del estudio presentado en (AL-Din et al., 2024) donde se alcanzaron distancias máximas de transmisión de 18.5 m en clear ocean water y 11.5 m en coastal ocean water. Además, el factor Q y BER superó el valor mínimo requerido hasta esas distancias. Los resultados del estudio mencionado anteriormente difieren del presente trabajo, ya que emplean una configuración LOS y utilizan una potencia de transmisión menor (15 dBm). En contraste, en el presente estudio se utilizó una configuración NLOS, logrando distancias máximas de transmisión de 60 m en clear ocean water y 20 m en coastal ocean water, debido a la potencia de transmisión de 9 W (39.54 dBm).

Haciendo énfasis en las simulaciones desarrolladas con el equipo que emplea una fuente óptica LED, los resultados indican que hubo una reducción en la potencia de recepción y demás parámetros medidos. Por lo tanto, se concluye que el LED al tener un mayor ángulo de divergencia con respecto al LD, la señal óptica se atenúa más debido a los efectos del canal submarino.

Aunque los resultados del presente estudio son prometedores, el mismo se ve limitado debido a que el sistema UOWC fue simulado con un modelo de superficie marina plana. En un escenario real, las ondulaciones aleatorias de la superficie marina afectarían el rendimiento del sistema UOWC NLOS. Asimismo, otra limitación radica en la no consideración de la herramienta respecto a la cantidad de energía que permanece en el medio cuando no se cumple reflexión interna total.

Este trabajo demuestra que los enlaces UOWC NLOS son viables para el monitoreo de entornos submarinos, ya que permite alcanzar distancias relativamente buenas. Esto lo hace adecuado para escenarios en donde las obstrucciones marinas dificultan la comunicación ofreciendo un potencial reemplazo o complemento a las tecnologías inalámbricas submarinas convencionales tales como acústica o radiofrecuencia.

Finalmente, estudios futuros se podrían enfocar en simular el sistema UOWC donde se considere una superficie marina ondulada, además, también se puede considerar transceptores UOWC en donde se especifique un umbral de recepción con el propósito de analizar de mejor manera el rendimiento del sistema.

9. Conclusiones

- En la revisión de los fundamentos teóricos se analizaron y estudiaron diversos conceptos, en donde se destacó principalmente temas como: elementos que conforman un sistema UOWC, modulaciones, modos de configuración de enlaces, los fenómenos que afectan a la señal óptica, así como también se comparó las ventajas y desventajas de la tecnología en comparación con otras tecnologías de comunicaciones inalámbricas submarinas.
- Se examinó el equipamiento comercial que existe en la actualidad para comunicaciones ópticas inalámbricas submarinas, esto se puede ver en el apartado 5 del presente documento. En el mismo, se concluye que se encontró 4 fabricantes, en donde todos a excepción de Shimadzu usan como fuente óptica el LED, que tal como se muestra en los resultados y discusión tienen un rendimiento menor en comparación a usar equipos que cuente con LD como fuente óptica.
- Se diseñó y simuló un sistema de UOWC con una configuración NLOS, en donde en primer lugar se configuró la temperatura y salinidad del agua con parámetros reales para el mar ecuatoriano, además en el mismo se trabajó con dos tipos de agua, Clear Ocean y Coastal Ocean, en donde los resultados obtenidos indican que con el primer tipo de agua la comunicación se da de mejor manera ya que el factor Q y el BER muestran valores superiores a los valores mínimos necesarios.
- Se determinó que para configuraciones de profundidad en donde el transmisor se encuentra a diferente profundidad del receptor, se obtienen mejores resultados, debido a que el ángulo de incidencia es cercano o mayor al ángulo crítico del sistema, por ende, este es un aspecto que se debe tomar en consideración.
- El ángulo de divergencia del haz, juega un rol importante en un enlace NLOS debido a que, si se tiene un ángulo de divergencia pequeño, como por ejemplo de 10 mrad que se usó en el láser (Equipo MC500) se tiene un mejor rendimiento del sistema. Y cuando dicho ángulo aumenta como es en el caso de la fuente óptica LED (Equipo BlueComm 200) se tiene una reducción en la potencia óptica y demás parámetros medidos, y por ende se tiene menores distancias de transmisión.

10. Recomendaciones

- Para llevar a cabo este tipo de simulaciones se recomienda hacerlo en el software OptiSystem en su versión 21, ya que el mismo incluye bloques para simulación comunicación óptica inalámbrica submarina, teniendo principalmente la configuración LOS y NLOS.
- Se recomienda estudiar los conceptos teóricos, para de esta manera entender el funcionamiento del sistema UOWC, especialmente comprender el modo de configuración NLOS para que al momento de realizar las simulaciones entender cada parámetro a modificar en el software OptiSystem.
- Para trabajos futuros se recomienda considerar pérdidas de transmisión adicionales, debido a que en el presente trabajó no se consideró este parámetro, y además que en escenarios reales este es un factor que siempre está presente en la comunicación. Además, también se puede considerar otros tipos de agua que se mencionaron en el marco teórico del documento.
- Adicionalmente, para trabajos futuros se recomienda trabajar con un arreglo de LEDs para determinar si con este arreglo se logra un mejor rendimiento del sistema con este tipo de fuente óptica.

11. Bibliografía

- Abdalkarim, F. (2015). *OPEN OCEAN UNDERWATER WIRELESS OPTICAL COMMUNICATION: CHLOROPHYLL AND DEPTH DEPENDENT VARIATION IN ATTENUATION*.
- Alaa, A., Shehab, K., & Hasan, A. (2018). *Next Generation UWOC System Based on MIMO and QAM-OFDM Modulation Techniques*. IEEE. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8684207>
- AL-Din, M. B., Alkareem, R. A. S. A., & Ali, M. A. A. (2024). Transmission Of 10 Gb/s For Underwater Optical Wireless Communication System. *Journal of Optics (India)*. <https://doi.org/10.1007/s12596-024-01825-x>
- Ali, M. F., Jayakody, D. N. K., Chursin, Y. A., Affes, S., & Dmitry, S. (2020). Recent Advances and Future Directions on Underwater Wireless Communications. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 27(5), 1379–1412. <https://doi.org/10.1007/s11831-019-09354-8>
- Ali, M. F., Jayakody, D. N. K., & Li, Y. (2022). Recent Trends in Underwater Visible Light Communication (UVLC) Systems. *IEEE Access*, 10, 22169–22225. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3150093>
- Ali, M. H., Ajel, R. I., & Hussain, S. A. K. (2021). Performance analysis of beam divergence propagation through rainwater and snow pack in free space optical communication. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 10(3), 1395–1404. <https://doi.org/10.11591/eei.v10i3.2857>
- Al-Zhrani, S., Bedaiwi, N. M., El-Ramli, I. F., Barasheed, A. Z., Abduldaiem, A., Al-Hadeethi, Y., & Umar, A. (2021). Underwater Optical Communications: A Brief Overview and Recent Developments. *Engineered Science*, 16, 146–186. <https://doi.org/10.30919/es8d574>
- Andrej, L., Perecar, F., Jaros, J., Papes, M., Koudelka, P., Latal, J., Cubik, J., & Vasinek, V. (2014). Features and range of the FSO by use of the OFDM and QAM modulation in different atmospheric conditions. *Wireless Sensing, Localization, and Processing IX*, 9103, 910300. <https://doi.org/10.1117/12.2050279>
- Andrés, M., Morocho, R., & Vargas Hernández, C. (2012). Caracterización óptica de Diodos emisores de Luz mediante sus espectros de emisión y patrones de radiación. In *Scientia et Technica Año XVII* (Vol. 51).
- AQUATEC. (2024). *Aquatec Group*. <https://www.aquatecgroup.com/>

- Arnon, S. (2010). Underwater optical wireless communication network. *Optical Engineering*, 49(1), 015001. <https://doi.org/10.1117/1.3280288>
- Bielecki, Z., Achtenberg, K., Kopytko, M., Mikołajczyk, J., Wojtas, J., & Rogalski, A. (2022). Review of photodetectors characterization methods. In *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences* (Vol. 70, Issue 2). Polska Akademia Nauk. <https://doi.org/10.24425/bpasts.2022.140534>
- Cámara Nacional de Pesquería CNP. (2023). *Condiciones oceanográficas durante septiembre 2023*. <https://camaradepesqueria.ec/condiciones-oceanograficas-durante-septiembre-2023/>
- Chaudhary, S., Sharma, A., Khichar, S., Shah, S., Ullah, R., Parnianifard, A., & Wuttisittikulij, L. (2023). A Salinity-Impact Analysis of Polarization Division Multiplexing-Based Underwater Optical Wireless Communication System with High-Speed Data Transmission. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/jsan12050072>
- Cochenour, B. M., Mullen, L. J., & Laux, A. E. (2008). Characterization of the beam-spread function for underwater wireless optical communications links. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 33(4), 513–521. <https://doi.org/10.1109/JOE.2008.2005341>
- Domínguez, E. (2016). *Desarrollo de un sistema de sincronización espacial para comunicaciones ópticas satelitales*. CICESE.
- España Booquera, M. Carmen. (2005). *Comunicaciones ópticas: conceptos esenciales y resolución de ejercicios*. Díaz de Santos.
- Fàbrega, J. M. (2013). *Sistemas ópticos de transmisión*.
- Geldard, C. T., Thompson, J., & Popoola, W. O. (2020). *Effects of Turbulence Induced Scattering on Underwater Optical Wireless Communications*. <http://arxiv.org/abs/2008.01152>
- Giles, J. W., & Bankman, I. N. (2005). *UNDERWATER OPTICAL COMMUNICATIONS SYSTEMS PART 2: BASIC DESIGN CONSIDERATIONS*.
- Gkoura, L. K., Roumelas, G. D., Nistazakis, H. E., Sandalidis, H. G., Vavoulas, A., Tsigopoulos, A. D., & Tombras, G. S. (2017). Underwater Optical Wireless Communication Systems: A Concise Review. In *Turbulence Modelling Approaches - Current State, Development Prospects, Applications*. InTech. <https://doi.org/10.5772/67915>

- Hydromea. (2024). *Hydromea - Automating remote inspection of submerged assets - Switzerland*. <https://www.hydromea.com/>
- INOCAR. (2024). *Temperatura Superficial del Mar*. <https://www.inocar.mil.ec/web/index.php/productos/temperatura-superficial-del-mar>
- ITU. (2009). *Procedimiento de prueba para medir la sensibilidad de los receptores de comprobación técnica radioeléctrica que utilizan señales con modulación analógica*.
- Johnson, L. J., Jasman, F., Green, R. J., & Leeson, M. S. (2014). Recent advances in underwater optical wireless communications. *Underwater Technology*, 32(3), 167–175. <https://doi.org/10.3723/ut.32.167>
- Joseph, L., & Anandan, S. (2022). A Review on Feasible and Reliable Underwater Wireless Optical Communication System for achieving High Data Rate and Longer Transmission Distance. In *International Journal of Electronics and Telecommunications* (Vol. 68, Issue 4, pp. 815–823). Polska Akademia Nauk. <https://doi.org/10.24425/ijet.2022.143890>
- Kaeib, A.-A.-A.-G. (2022). *Designing and Analysis of Underwater Optical Wireless Communication System*.
- Kaushal, H., & Kaddoum, G. (2016). Underwater Optical Wireless Communication. *IEEE Access*, 4, 1518–1547. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2552538>
- Leccese, F., & Spagnolo, G. S. (2021). Number 4 | 25 Citation: Fabio Leccese, Giuseppe Schirripa Spagnolo, State-of-the art and perspectives of underwater optical wireless communications. In *Acta IMEKO* (Vol. 10, Issue 4). identifier. www.imeko.org
- Lemus, J., Serra, R., & Collazo, R. (2011). Los diodos láser en la Enseñanza de la Física en Ingeniería I. INTRODUCCIÓN. *Am. J. Phys. Educ*, 5(4). <http://www.lajpe.org>
- Li, C., Liu, Z., Chen, D., Deng, X., Yan, F., Li, S., & Hu, Z. (2021). Experimental demonstration of high-sensitivity underwater optical wireless communication based on photocounting receiver. *Photonics*, 8(11). <https://doi.org/10.3390/photonics8110467>
- Lv, Z., He, G., Yang, H., Chen, R., Li, Y., Zhang, W., Qiu, C., & Liu, Z. (2022). The Investigation of Underwater Wireless Optical Communication Links Using the Total Reflection at the Air-Water Interface in the Presence of Waves. *Photonics*, 9(8). <https://doi.org/10.3390/photonics9080525>
- Majlesein, B., Gholami, A., & Ghassemlooy, Z. (2021). Investigation of the Scattering Noise in Underwater Optical Wireless Communications. *Sci*, 3(2). <https://doi.org/10.3390/sci3020027>
- Mobley, C. (1994). *Light and Water: Radiative Transfer in Natural Waters*.

- Optiwave. (2023). *Optiwave Releases OptiSystem 21.0 | Blog | Optiwave*.
<https://optiwave.com/latest-news/optiwave-releases-optisystem-21-0/>
- Popoola, W., Guler, E., Wang, J., & Geldard, C. (2021). *Gbps Underwater Optical Wireless Communication in Turbulence and Random Sea Surface; Gbps Underwater Optical Wireless Communication in Turbulence and Random Sea Surface*.
<https://doi.org/10.1111/11111111.1122456>
- Riurean, S. M., Leba, M., & Ionica, A. C. (2021). Application of Visible Light Wireless Communication in Underground Mine. In *Application of Visible Light Wireless Communication in Underground Mine*. Springer International Publishing.
<https://doi.org/10.1007/978-3-030-61408-9>
- Saeed, N., Celik, A., Al-Naffouri, T. Y., & Alouini, M.-S. (2018). *Underwater Optical Wireless Communications, Networking, and Localization: A Survey*.
<http://arxiv.org/abs/1803.02442>
- Shimadzu. (2024). *SHIMADZU CORPORATION*. <https://www.shimadzu.com/>
- Sonardyne. (2024). *Sonardyne | Underwater technology and engineering services*.
<https://www.sonardyne.com/>
- Spagnolo, G. S., Cozzella, L., & Leccese, F. (2020a). *A Brief Survey on Underwater Optical Wireless Communications*.
- Spagnolo, G. S., Cozzella, L., & Leccese, F. (2020b). Underwater optical wireless communications: Overview. In *Sensors (Switzerland)* (Vol. 20, Issue 8). MDPI AG.
<https://doi.org/10.3390/s20082261>
- Vijayakumari, P., & Sumathi, M. (2019). Physical implementation of underwater optical wireless system using spatial mode laser sources with optimization of spatial matching components. *Results in Physics*, 14. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.102503>
- Visual MIMO. (n.d.). *Camera Based Optical Wireless*. Retrieved July 19, 2024, from
<https://www.winlab.rutgers.edu/~aashok/visualmimo/Overview.html>
- Zeng, Z., Fu, S., Zhang, H., Dong, Y., & Cheng, J. (2017). A Survey of Underwater Optical Wireless Communications. In *IEEE Communications Surveys and Tutorials* (Vol. 19, Issue 1, pp. 204–238). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
<https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2618841>
- Zhu, S., Chen, X., Liu, X., Zhang, G., & Tian, P. (2020). Recent progress in and perspectives of underwater wireless optical communication. In *Progress in Quantum Electronics* (Vol. 73). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.pquantelec.2020.100274>

12. Anexos

Anexo 1. Especificaciones técnicas BlueComm 200



Datasheet

BlueComm 200 – optical communications system



BlueComm®200 provides subsea wireless optical communications up to 10 Mbps at ranges up to 150 m.

The system is most effective in low ambient light conditions such as deep water or shallow water night-time operations. It is capable of data transmission rates from 2.5–10 Mbps, enabling a range of application options including wireless telemetry from several concurrent video cameras and tether-free subsea vehicle control.

BlueComm 200 uses an array of high power light emitting diodes (LEDs) that are rapidly modulated to transmit data. Highly sensitive receivers detect the extremely small light signals in order to decode this data and to present it to the user via an Ethernet link.

BlueComm 200 uses Time Division Multiple Access (TDMA) methods to providing a bi-directional high speed low latency link that supports TCP/IP based network protocols. Allocation of bandwidth ratios in each direction is user selectable and fully flexible.

The allocation of bandwidths is ideal for applications where high-speed data transfer is mostly required in only one direction such as for extraction of large data volumes from seafloor instrumentation or sensors.

Optional integrated acoustic positioning and communications provide methods for locating the device, waking it up and managing the optical link. Once a connection is established, BlueComm 200 will immediately begin transferring buffered data.

Optical data transmission is highly efficient, enabling more than 9 GB of data to be transferred using only the energy contained in a single lithium D sized battery cell.

Key features

- 2.5–10 Mbps at ranges up to 150 m
- Suitable for moderate to low turbidity dark water, (>200 m depth or night-time) applications
- Highly energy efficient communications provide long battery life
- Data recovery by AUV, ROV or surface deployed dunker system
- Up to 4,000 m depth operation
- Additional white light emitter available for video illumination
- ROV/AUV remote control

Specifications

BlueComm 200 – optical communications system



Feature		Type 8361
Depth rating		Up to 4,000 m operation
Data rate		2.5–10 Mbps
Optical communication range		Up to 150 m
Mechanical construction		Anodized aluminium or titanium
Supply voltage		24–36 V dc
Communications interface		10/100 Base-T Ethernet (static IP address)
Command interface		Graphical user interface or Ethernet UDP command set
Receiver unit		
Receive wavelength		Broadband visible light
Receive angle		180° (omni-directional)
Receiver weight in air/water*		7.3/3.1 kg
Power consumption		10 W
Emitter unit		
Optical transmit power		6 W (radiated light)
Optical wavelength options		450 nm (royal blue), 400–800 nm (white)
Emitter beam shape		180° (omni-directional)
Emitter weight in air/water*		3.6/2.6 kg
Power consumption		15 W (bandwidth allocation dependant)
Environmental and dimensions		
Operating temperature		-5 to 40°C
Storage temperature		-20 to 55°C
Dimensions (length x diameter)		Receiver 384 x 136 mm Emitter 199 x 136 mm

Specifications subject to change without notice – 05/2023



For further information, contact us at

E sales@sonardyne.com

Datasheet

BlueComm 200 UV – optical communications system



BlueComm®200 UV provides subsea wireless optical communications up to 10 Mbps at ranges up to 75 m. Enabling a range of application options including wireless telemetry from several concurrent video cameras and tether-free subsea vehicle control.

The standard BlueComm 200 UV is optimized for maximum ranges up to 150 m, the range is however limited by ambient light which is seen as noise. The UV based system has a lower maximum range but a much higher tolerance to ambient light, designed for high ambient light operations closer to the surface or ROV operations.

The system uses a UV band pass optical filter to achieve better performance in high ambient light conditions.

BlueComm 200 UV uses an array of high-power light emitting diodes (LEDs) that are rapidly modulated to transmit data. Highly sensitive receivers detect the extremely small light signals in order to decode this data and to present it to the user via an Ethernet link.

BlueComm 200 UV uses Time Division Multiple Access (TDMA) methods to providing a bi-directional high speed low latency link that supports TCP/IP based network protocols. Allocation of bandwidth ratios in each direction is user selectable and fully flexible.

The allocation of bandwidths is ideal for applications where high-speed data transfer is mostly required in only one direction such as for extraction of large data volumes from seafloor instrumentation or sensors.

Optional integrated acoustic positioning and communications provide methods for locating the device, waking it up and managing the optical link. Once a connection is established, BlueComm 200 UV will immediately begin transferring buffered data.

BlueComm 200 UV has a highly efficient optical data transmission, enabling more than 2 GB of data to be transferred using only the energy contained in a single lithium D sized battery cell.

Key features

- 2.5–10 Mbps at ranges up to 75 m
- Suitable for moderate to low turbidity water and high ambient visible light conditions
- Data recovery by AUV, ROV or surface deployed dunker system
- Up to 4,000 m depth operation
- ROV/AUV remote control

Specifications

BlueComm 200 UV – optical communications system



Feature	Type 8361	
Depth rating	Up to 4,000 m operation	
Data rate	2.5–10 Mbps	
Optical communication range	Up to 75 m	
Mechanical construction	Anodized aluminium or titanium	
Supply voltage	24–36 V dc	
Communications interface	10/100 Base-T Ethernet (static IP address)	
Command interface	Graphical user interface or Ethernet UDP command set	
Receiver unit		
Receive wavelength	UV (band pass filter blocking visible light)	
Receive angle	180° (omni-directional)	
Receiver weight in air/water	7.3/3.1 kg	
Power consumption	10 W	
Emitter unit		
Optical transmit power	6 W (radiated light)	
Optical wavelength options	405 nm (ultra violet)	
Emitter beam shape	180°(omni-directional)	
Emitter weight in air/water	3.6/2.6 kg	
Power consumption	30 W (bandwidth allocation dependant)	
Environmental and dimensions		
Operating temperature	-5 to 40°C	
Storage temperature	-20 to 55°C	
Dimensions (length x diameter)	Receiver	384 x 136 mm
	Emitter	199 x 136 mm

Specifications subject to change without notice – 01/2024

Just moved Datasheet

BlueComm 100 – Optical Communications System



The BlueComm®100 optical communications system provides subsea wireless telemetry at broad band speeds and ranges up to 15 m.

BlueComm 100 can be used in all water conditions including shallow water daytime conditions where high ambient light is present. It is capable of data transmission rates from 1 to 5 Mbps.

The system uses an array of high power light emitting diodes (LEDs) that are rapidly modulated to transmit data. Sensitive receivers are capable of detecting low energy light signals and decoding the communication data in the presence of significant ambient noise generated by daylight operation.

BlueComm 100 supports bi-directional optical communications and can be combined with an acoustic link for long range command and control.

The system is bi-directional using Time Division Multiple Access (TDMA) methods to provide a high speed low latency link that supports TCP/IP based network protocols. Allocation of bandwidth ratios in each direction is user selectable and fully flexible.

The software supplied with BlueComm 100 enables system configuration and provides link diagnostics during operation.

Application examples include data recovery from seafloor instruments, wireless video transfer and also tether-free subsea vehicle control.

The optional acoustic link provides a method for locating and waking up a seafloor instrument prior to data recovery. The low latency feature of the system enables human-in-the-loop vehicle control.

Optical data transmission is highly efficient, enabling more than 1 GB of data to be transferred by BlueComm 100 using only the equivalent energy contained in a single lithium D sized battery cell.

BlueComm 100 has a titanium housing with a 4,000 m depth rating, matching the depth rating of most work-class ROVs.

Typical Applications

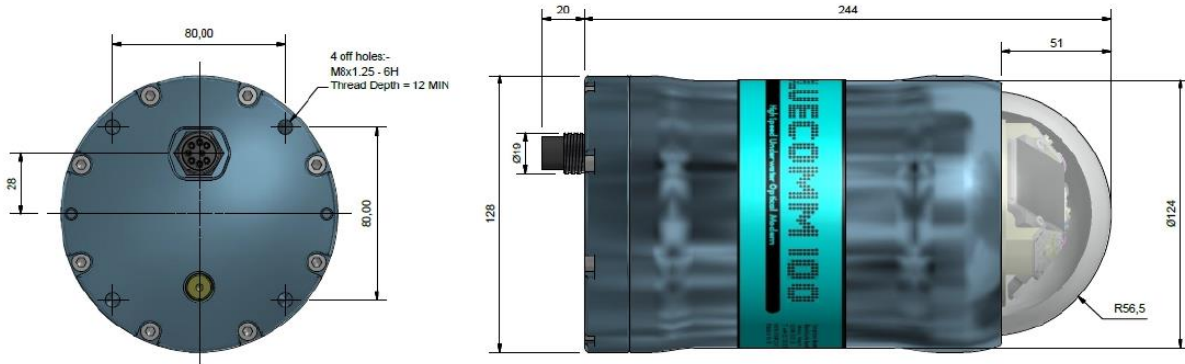
- Live video transmission
- Harvesting of large data sets from subsea instrumentation
- Tether-free subsea vehicle control

Key Features

- 1–5 Mbps at ranges of up to 15 m
- Suitable for shallow or deep water applications
- Highly energy efficient communications provide long battery life
- Optional integrated long range acoustic communications and positioning for command and control
- Data recovery from seafloor instruments and tether-free subsea vehicle control
- 4,000 m depth operation

Specifications

BlueComm 100 – Optical Communications System



Feature	Type 8360-100 Specification
Depth Rating	4,000 m
Data Rate	1–5 Mbps
Optical Communication Range	1–15 m
Mechanical Construction	Titanium and glass dome
Supply Voltage	24–36 V dc
Communications Interface	10/100 Base-T ethernet (static IP address)
Command Interface	Graphical User Interface / UDP Command Set
Rear Connector Type	Subconn MCBH8F Ti
Communications Type	Bidirectional, Time Division Multiplexing
Optical Transmit Power	6 W (radiometric)
Optical Wavelength	450 nm (royal blue)
Emitter Beam Shape	60° (half angle)
Receive Beam Shape	60° (half angle)
Power Consumption	10–30 W (dependent on transmit ratio)
Environmental and Dimensions	
Operating Temperature	-5 to 40°C
Storage Temperature	-20 to 55°C
Dimensions (Length x Diameter)	264 x 128 mm
Weight in Air/Water	5.2/2.4 kg

Specifications subject to change without notice – 06/2021

Anexo 4. Especificaciones técnicas MC500

Communication	Data rate	1Mbps / 10Mbps / 20Mbps (Switchable)
	Range	80m (attenuation rate 0.3dB/m)
	Interface	100BASE-TX
	Beam Angle	40 degrees
Electrical feature ^{*1}	Power Consumption	≦90W
	Supply voltage	DC24V
	Interface	SubConn: DBH13M
Optical feature	Wavelength	445nm(Blue), 525nm(Green)
	Laser power	Blue: 17.5W Green: 9.0W
	Laser class	Class 4 JIS C 6802:2018 (IEC 60825-1:2014,ISH1,ISH2)
Weight in air ^{*1}		9kg
Weight in water ^{*2}		5.5kg
Temperature range	Operating temperature	-5°C to 35°C
	Storage temperature	-20°C to 60°C
Water pressure resistance		≧31Mpa(3,000m)



LUMA 100

Ultra-efficient wireless optical node

The Hydromea LUMA 100 optical node combines outstanding performance and energy efficiency in a very compact form factor. Optical communication offers superior data rates, low latency and lower power requirements compared to acoustic modems. It also serves as an ideal replacement of electrical wet mate connectors, making the job of an ROV pilot much easier and faster. This makes it the perfect choice for wireless interfacing between ROVs/AUVs and deep sea instruments.

It is extremely energy efficient, which makes it ideal for battery-powered applications. It can be configured to enter a sleep mode after a specified time of inactivity, and optically woken up from sleep by another modem when the link is re-established.

The software-configurable serial cable interface can be set to RS232 or RS485, which makes the LUMA 100 the ideal drop-in replacement for cabled connections in many existing systems.

Features

- Ultra-low power sleep mode with optical wake-up
- Wide beam to establish connection easily
- Ultra-compact and low weight, ideal for small ROVs/AUVs
- Four transmission power levels: 2 - 5 W
- Wide supply voltage range
- Ambient light capable (indirect daylight)

Applications

- Wireless readout of landers and subsea instruments with ROV/AUV
- Low power communication for battery-powered underwater devices



Specifications*

Dimensions	100 x 50 x 30 mm
Weight in air	250 g
Weight in water	50 g
Data rate:	Optical link: 115 Kbit/s Cable interface: 9.6 - 512 Kbit/s
Software features	Error detection, FEC, auto-wakeup (upgradeable for additional features)
Range	up to 2 m
Supply voltage	12 - 36 V
Power consumption:	
- sleep mode	< 10 mW
- active, receiving	0.5 W
- transmitting	2 - 5 W (typ.)
Beam pattern	120 deg. cone
Interface:	RS232 / RS485
Depth rating	6000 m
Connector	SubConn MCIL6M or as requested

**Subject to change without notice*



LUMA 500ER

Long range optical modem

The Hydromea LUMA 500ER optical modem combines outstanding performance and energy efficiency in a very compact form factor. Optical communication offers superior data rates, low latency and lower power requirements compared to acoustic modems. This makes it the perfect choice for applications such as wireless video transmission, data download from submerged sensors and data loggers, as well as wireless interfacing between ROVs/AUVs and deep sea infrastructure.

The LUMA 500ER has an outstanding communication range on a very low power budget. The maximum range is achieved in dark conditions (night time, or deep sea) and clear water.

The software-configurable serial cable interface can be set to RS232 or RS485, which makes the LUMA 500ER the ideal drop-in replacement for cabled connections in many existing systems.

Features

- Superior range with wide beam
- Low power consumption
- Ultra-compact and low weight, ideal for small ROVs/AUVs
- Four transmission power levels: 2 - 5 W
- Wide supply voltage range
- Tolerates moderate ambient light (twilight)
- Encryption of data link, mesh networking (optional, on request)

Applications

- Wireless access points for deep-sea infrastructure
- Data harvesting with gliders or AUVs
- Bottom to surface data upload (at night)
- Wireless video streaming for mini ROVs
- Subsea networks at deep sea sites



Specifications*

Dimensions	100 x 50 x 30 mm
Weight in air	250 g
Weight in water	50 g
Data rate:	Optical link: 500 Kbit/s Cable interface: 9.6 - 512Kbit/s
Software features	Error detection, FEC, auto-wakeup (upgradeable for additional features)
Range	50 m (100 m in air)
Supply voltage	12 - 36 V
Power consumption:	
- active, receiving	1 W
- transmitting	2 - 5 W (typ.)
Beam pattern	120 deg. cone
Interface:	RS232 / RS485
Depth rating	6000 m
Connector	SubConn MCIL6M or as requested

* Preliminary specifications - may change without notice

Anexo 7. Especificaciones técnicas LUMA X

LUMA X

HYDROMEIA

High-speed, long range wireless optical modem

The Hydromea LUMA X optical modem combines long range with high data rate in a very compact form factor. Optical communication offers superior data rates, low latency and lower power requirements compared to acoustic modems. This makes it the perfect choice for applications such as data download from submerged sensor platforms (landers), as well as wireless interfacing between ROVs/AUVs and deep-sea infrastructure.

The LUMA X is very energy efficient, which makes it ideal for battery-powered applications.

The software-configurable cable interface can be set to Ethernet, RS232 or RS485, which makes the LUMA X the ideal drop-in replacement for cabled connections in many existing systems.

Features

- High data rate
- Long range
- Complete bi-directional transceiver
- Ultra-compact and low weight, ideal for small ROVs/AUVs
- Wide supply voltage range
- Ad-hoc networking (optional, on request)

Applications

- Wireless readout of landers and subsea infrastructure with ROV/AUV
- Low-power high-speed communication for battery-powered underwater devices
- Wireless HD video streaming for AUVs/ROVs
- Subsea networks at deep sea sites



Specifications*

Dimensions	Length: 126 mm Length with connector: 178 mm Diameter: 60 mm
Weight in air	530 g
Weight in water	125 g
Data rates:	up to 10 Mbit/sec
Software features	Error detection, FEC, auto-wakeup (upgradeable for additional features)
Range	up to 50 m
Supply voltage	12 - 36 V
Power consumption	
- active, receiving	2 W
- transmitting	2 - 17 W (typ.)
Beam pattern	120 deg. cone
Interface	Ethernet RS232 / RS485
Depth rating	6000 m 12000 m (on request)
Connector	SubConn Circular 8 pins DBH8MTI

* Preliminary specifications - may change without notice



HYDROMEAA

High-speed, long range wireless optical modem

The Hydromea LUMA X-UV optical modem combines long range with high data rate in a very compact form factor. Optical communication offers superior data rates, low latency and lower power requirements compared to acoustic modems. This makes it the perfect choice for applications such as data download from submerged sensor platforms (landers), as well as wireless interfacing between ROVs/AUVs and deep-sea infrastructure.

The LUMA X-UV is very energy efficient, which makes it ideal for battery-powered applications and by working in the UV spectrum it is very resilient to ambient light.

The software-configurable cable interface can be set to Ethernet, RS232 or RS485, which makes the LUMA X-UV the ideal drop-in replacement for cabled connections in many existing systems.

Features

- High data rate
- Complete bi-directional transceiver
- Ultra-compact and low weight, ideal for small ROVs/AUVs
- Wide supply voltage range
- Ad-hoc networking (optional, on request)
- High ambient light resilience

Applications

- Wireless readout of landers and subsea infrastructure with ROV/AUV
- Low-power high-speed communication
- Wireless HD video streaming for AUVs/ROVs
- Subsea networks at deep sea sites



Specifications*

Dimensions	Length: 126 mm Length with connector: 178 mm Diameter: 60 mm
Weight in air	530 g
Weight in water	125 g
Data rates:	up to 10 Mbit/sec
Software features	Error detection, FEC, auto-wakeup (upgradeable for additional features)
Range	up to 50 m
Supply voltage	12 - 36 V
Power consumption	
- active, receiving	2 W
- transmitting	2 - 17 W (typ.)
Beam pattern	60 deg. cone
Interface	Ethernet RS232 / RS485
Depth rating	6000 m 12000 m (on request)
Connector	SubConn Circular 8 pins DBH8MTI

* Preliminary specifications - may change without notice

SUBSEA OPTICAL MODEM

AQUAmodem[®] Op2

The AQUAmodem[®] Op2 enables wireless subsea data connectivity to underwater instruments using light, this creates a robust optical link that performs like a virtual wired link through water. The modems manage all aspects of link maintenance and error handling. The system allows real-time remote access to subsea instruments for monitoring, control or download.



KEY FEATURES

- Short range interrogation, control and data download from subsea instruments
- Fully transparent operation (cable replacement)
- Automatic link management
- Compatible with instruments with RS232 serial interfaces (RS485 compatibility optional)
- Depth rated to 3,500 m
- High speed wireless data transfer
- Suitable for work class ROVs

APPLICATIONS

- Hydrotest monitoring
- Real time data view
- Instrument status checks
- Data download while subsea
- Redeploying instruments subsea in different operating modes

SPECIFICATIONS

Depth rating	3,500 m
Temperature	Operating: -5°C to 40°C, Storage: -40°C to 65°C
Light band	Cyan visible light
Operating range	Typically 1-2 m depending on environment
Transmission type	Digitally coded telemetry with error detection
Data throughput*	10.2 kBytes/s
Dimensions	285 mm long by 72 mm max diameter; main housing diameter 60 mm
Weight	4 kg in air, 3 kg in water
Material	Stainless Steel 316 with Perspex window
External power	ROV unit: 9 – 36 Vdc, Subsea unit: 6.5 - 32 Vdc
Serial wake up	ROV unit, optional on Subsea unit
Optical wake up	ROV and Subsea unit
Interface	RS232 (RS485 optional)
Protocol	Transparent link (cable replacement functionality)
Baud rate	115,200 baud

* Measured by transmitting packets of 2,000 bytes, sending a packet every 250 ms. An average of 100 transmissions was used to calculate the speed.

ACCESSORIES

ROV cable	5-metre unterminated ROV to Modem cable
Test cable	Optical modem, power and communication cable
ROV handle	Fishtail handle for ROV manipulator, includes cable-strain relief

VARIANTS

AQUAmodem® Op2L	Neutrally buoyant model for divers or small ROVs - 1,000 m depth rating
------------------------	---

ALSO AVAILABLE



HYDROskid™
Standalone hydrotest monitoring system
(Various configurations available)



SURFACE TESTER
Battery Powered Optical Communications
Tester for Deck Use

AQUAmodem® is a trademark of Aquatec Group Limited. All other trademarks & registered trademarks are acknowledged. Aquatec Group Ltd. reserves the right to make changes to the specifications contained in this document without notice in the interests of maintaining or improving product quality. Document ©2024 copyright Aquatec Group Limited. Apr 15 - V3.

Aquatec Group Ltd.

Aquatec House, Stroudley Road, Basingstoke RG24 8FW, UK | aquatecgroup.com | inquiry@aquatecgroup.com | +44 (0) 1256 416010

DATASHEET

AQUAmodem™ Op2L

Lightweight subsea optical modem



KEY FEATURES

- Short range interrogation, commanding and data download from subsea instruments
- Create a wireless serial data link
- Compatible with instruments with RS232 serial interfaces (RS485 compatibility optional)
- Depth rated to 500 m
- New higher speed data transfer
- Ideal for small ROVs and divers
- Compatible with the AQUAlogger 310TY advanced turbidity logger and AQUAlogger 310PT temperature and depth logger

APPLICATIONS

- Ocean observation and monitoring
- Real time data view
- Instrument status checks
- Subsea data download
- Redeploying instruments subsea

MODEM PACKAGES

- Complete modem set - including modem pair, subsea battery pack, and ROV, surface & subsea cable sets
- ROV side modem set - including ROV and test cables
- Subsea modem set - including subsea cable set and battery

Technical specification

Environmental	Operating Depth	500 m
	Temperature	Operating: -5°C to 40°C Storage: -40°C to 65°C
Telemetry	Light band	Cyan visible light
	Operating Range	Typically 1 m depending on environment
	Transmission type	Digitally coded telemetry with error detection
	Typical Maximum Data Throughput*	10.2 kBytes/s
	Addressing	Up to 3 unique addresses, plus a universal / broadcast address
Mechanical	Dimensions	285 mm long by 72 mm max diameter; main housing diameter 60 mm
	Weight	~1 kg in air, ~0 kg in water
	Material	Acetal with Perspex window
Power	External Power	ROV unit 9 – 36 Vdc Subsea unit 6.5 - 32 Vdc
Wake up	Serial Wake Up	On receipt of RS232 serial data for subsea unit Optional on receipt of RS232 serial data for ROV unit
	Optical Wake Up	On receipt of optical interrogation
Interface	Electrical	RS232 levels
	Protocol	Any format – transparent link (link deals with the communication protocol)
	Baud rate	115200 baud

* Measured by transmitting packets of 2000 bytes, sending a packet every 250 ms. An average of 100 transmissions was used to calculate the speed.

Options

AQUAmodem Op2L - complete package	Pair of optical modems, including external battery pack, cables – Y cable, ROV cable, test cable
AQUAmodem Op2L - ROV side package	Single optical modem, including ROV cable, test cable
AQUAmodem Op2L - Subsea package	Single optical modem, including external battery pack, Y cable

Individual modems and accessories also available

Compatible with



AQUAlogger 310TY

Also available



AQUAmodem Op2

Contact us

☎ +44 (0)1256 416010 (UK) ☎ +1-281-220-6035 (USA) ✉ inquiry@aquatecgroup.com www.aquatecgroup.com

Aquatec House, Stroudley Road, Basingstoke, Hampshire, RG24 8FW, UK

AQUAmodem™ is a trademark of Aquatec Group Limited. All trademarks & registered trademarks are acknowledged. Aquatec reserves the right to make changes to the specifications contained in this document without notice in the interests of maintaining or improving product quality. Document copyright ©2018 Aquatec Group. E&OE. AQMOp2LD-Jan18v1. Aquatec Group Ltd, Aquatec House, Stroudley Road, Basingstoke, RG24 8FW. Registered in England & Wales No 2523284

Anexo 11. Certificado de traducción del resumen



Loja, 07 de enero de 2025

Lic. Karina Yajaira Martínez Luzuriaga

LICENCIADA EN CIENCIAS DE LA EDUCACIÓN MENCIÓN INGLÉS

CERTIFICO:

Yo, Karina Yajaira Martínez Luzuriaga con cédula de identidad Nro. 1104902679, **Licenciada en Ciencias de la Educación Mención Inglés** por la Universidad Técnica Particular de Loja, con número de registro 1031-2022-2574017 en la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación, señalo que el presente documento es fiel traducción del idioma español al idioma inglés del resumen del Trabajo de Integración Curricular denominado **Análisis y Simulación de un sistema de comunicación óptico inalámbrico submarino (UOWC) sin línea de visión directa (NLOS)**., elaborado por el Sr. Rommel Andrés Curimilma Guamán, con cédula de identidad Nro. 1105887234, estudiante de la carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones de la Universidad Nacional de Loja.



Lic. Karina Yajaira Martínez Luzuriaga

C.I. 1104902679

REGISTRO SENESCYT N°: 1031-2022-2574017