



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE TELECOMUNICACIONES

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN
CURRICULAR, PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

TEMA:

“ANÁLISIS DE COMUNICACIONES ÓPTICAS INALÁMBRICAS BASADAS EN LUZ
AZUL PARA ENTORNOS SUBACUÁTICOS”

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero en Telecomunicaciones

Línea de investigación: Desarrollo, aplicación de software y cyber security (seguridad cibernética))

AUTOR:

Fernando Paúl Ushiña Caluguillin

DIRECTOR:

MSc. Fabián Geovanny Cuzme Rodríguez

Ibarra – Ecuador

2026



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1754309753		
APELLIDOS Y NOMBRES:	USHIÑA CALUGUILLIN FERNANDO PAÚL		
DIRECCIÓN:	Cayambe – Barrio la Remonta		
EMAIL:	fpushinac@utn.edu.ec / paulf1936@gmail.com		
TELÉFONO FIJO:	No registra	TELÉFONO MÓVIL:	0997704176

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	ANÁLISIS DE COMUNICACIONES ÓPTICAS INALÁMBRICAS BASADAS EN LUZ AZUL PARA ENTORNOS SUBACUÁTICOS.
AUTOR (ES):	USHIÑA CALUGUILLIN FERNANDO PAÚL
FECHA: DD/MM/AAAA	28/01/2026
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TITULO POR EL QUE OPTA:	INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES
DIRECTOR:	MSC. FABIÁN GEOVANNY CUZME RODRÍGUEZ
ASESOR:	MSC. CARLOS ALBERTO VÁSQUEZ AYALA

2. CONSTANCIAS

El autor (es) manifiesta (n) que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 29 días del mes de enero de 2026

EL AUTOR:

Firma.....

Nombre: Fernando Paúl Ushiña Caluguillin

**CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN
CURRICULAR**

Ibarra, 29 de enero de 2026

MSc. FABIÁN GEOVANNY CUZME RODRÍGUEZ

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.

(f).....

MSc. Fabián Geovanny Cuzme Rodríguez

C.C: 1311527012

DEDICATORIA

A mis padres, por ser mi ejemplo de esfuerzo, sacrificio y amor incondicional. Su apoyo constante, ha sido la base que me ha sostenido en cada paso de este camino. Gracias por creer en mí incluso en los momentos en que yo dudé.

A mis hermanos, quienes con su compañía, consejos y paciencia me han motivado a seguir adelante, aun en los días más complicados. Su presencia ha sido un impulso silencioso pero fundamental para no rendirme.

Y a mis amigos, quienes con palabras de aliento, ayuda académica y gestos sinceros me acompañaron en esta etapa. Gracias por estar cuando más los necesité, por escucharme, por enseñarme y por hacer de este proceso algo más llevadero.

Dedico este trabajo final a todos ustedes, que con su apoyo incondicional han sido parte esencial de este logro. Este es también su triunfo.

Ushiña Caluguillin Fernando Paul

AGRADECIMIENTO

Este trabajo no hubiera sido posible sin el apoyo, la guía y la compañía de muchas personas que, de distintas formas, han dejado una huella en este proceso. Por ello, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a quienes hicieron posible la culminación de esta etapa tan importante en mi vida académica y personal.

En primer lugar, al Ing. Fabián Cuzme, tutor de esta tesis, a quien agradezco profundamente por compartir conmigo su amplio conocimiento en el campo de las redes de comunicación subacuáticas. Su dedicación, paciencia y compromiso durante todo este proceso me permitieron fortalecer no solo mis conocimientos técnicos, sino también mi criterio profesional. Siempre encontré en sus observaciones una guía clara y precisa, y en sus palabras, el impulso necesario para seguir avanzando. También extiendo mi agradecimiento al Ing. Carlos Vásquez, asesor de tesis, por su predisposición a finalizar este trabajo.

Al Ing. Jaime Michelena, por su rol fundamental como guía durante todo el proceso de titulación. Su experiencia y su forma clara de enseñar marcaron una diferencia importante en mi formación, permitiéndome tener una visión más amplia y estructurada de lo que implica desarrollar un proyecto académico con responsabilidad y sentido profesional.

No puedo dejar de agradecer profundamente a mis padres y hermanos, quienes han sido mi base y mi mayor motivación. Su esfuerzo, su sacrificio y su amor incondicional me han sostenido en los momentos más difíciles. Gracias por creer en mí, por animarme cuando flaqueaba y por brindarme todo lo necesario para seguir adelante, incluso cuando el camino se hacía cuesta arriba.

Y a mis amigos, quienes con su compañía, consejos y apoyo académico, me acompañaron durante todo este proceso. Su presencia hizo que este camino no se sintiera tan pesado y me recordó que siempre hay alguien dispuesto a tender la mano.

A todos ustedes, gracias por ser parte de este logro. Este no es solo mi esfuerzo, sino también el reflejo del apoyo que he recibido de personas valiosas que creyeron en mí.

Ushiña Caluguillin Fernando Paul

RESUMEN

Este trabajo aborda el análisis de las comunicaciones ópticas inalámbricas aplicadas a entornos subacuáticos, enfocado en la utilización de luz azul como medio de transmisión. Esta tecnología surge como una alternativa eficiente frente a las limitaciones de otros métodos de comunicación subacuática, especialmente en términos de velocidad, latencia y capacidad de transmisión. A lo largo del desarrollo, se establecen los principios físicos que rigen la propagación de la luz en medios acuáticos, así como los factores ambientales que afectan la calidad de la señal, como la turbidez, el ruido ambiental y la atenuación.

El trabajo incluye el desarrollo de una simulación dentro del software Matlab y su apartado App Designer, la cual permite analizar el comportamiento de las comunicaciones ópticas inalámbricas frente a tecnologías tradicionales como la comunicación acústica, para interpretar su comportamiento bajo determinadas condiciones. Evaluando métricas fundamentales como la tasa de transmisión de datos, BER y la distancia efectiva de comunicación, permitiendo establecer escenarios representativos del desempeño real en aplicaciones prácticas.

Como resultado final, se genera una aplicación “Standalone” basada en la simulación desarrollada capaz de funcionar de forma independiente al software Matlab. Además, de presentar el análisis y discusión pertinente a la investigación desarrollada, donde se pretende demostrar en términos generales que la comunicación óptica inalámbrica presenta ventajas significativas en velocidad y eficiencia en distancias cortas, mientras que la comunicación acústica ofrece mayor alcance, pero con limitaciones en la tasa de transmisión. Destacando a través de esta comparativa las virtudes de cada tecnología para trabajar en diferentes escenarios, condiciones del entorno y los requerimientos del sistema.

Palabras clave: Comunicaciones ópticas inalámbricas, entornos subacuáticos, luz azul, comunicación acústica, Matlab, tasa de transmisión de datos, BER, atenuación, turbidez.

ABSTRACT

This work addresses the analysis of wireless optical communications applied to underwater environments, focusing on the use of blue light as the transmission medium. This technology emerges as an efficient alternative to the limitations of other underwater communication methods, particularly in terms of data rate, latency, and transmission capacity. Throughout the study, the physical principles governing light propagation in aquatic media are established, as well as the environmental factors that affect signal quality, such as turbidity, ambient noise, and attenuation.

The work includes the development of a simulation using MATLAB and its App Designer environment, which enables the analysis of the behavior of wireless optical communications in comparison with traditional technologies such as acoustic communication, allowing their performance to be interpreted under specific conditions. Fundamental metrics are evaluated, including data transmission rate, bit error rate (BER), and effective communication distance, making it possible to define representative scenarios of real-world performance in practical applications.

As a final result, a standalone application based on the developed simulation is generated, capable of operating independently of the MATLAB software. In addition, the study presents the corresponding analysis and discussion of the research conducted, aiming to demonstrate, in general terms, that wireless optical communication offers significant advantages in terms of speed and efficiency over short distances, while acoustic communication provides longer range but with limitations in transmission rate. Through this comparison, the strengths of each technology are highlighted for operation under different scenarios, environmental conditions, and system requirements.

Keywords: Wireless optical communications, underwater environments, blue light, acoustic communication, Matlab, data transmission rate, BER, attenuation, turbidity.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	5
AGRADECIMIENTO	6
RESUMEN	8
ABSTRACT.....	9
ÍNDICE DE CONTENIDOS	10
ÍNDICE DE FIGURAS.....	15
ÍNDICE DE TABLAS	17
Capítulo I: Antecedentes.....	18
1.1. Tema	18
1.2. Problema	18
1.3. Objetivos.....	21
1.3.1. Objetivo General.....	21
1.3.2. Objetivos Específicos.....	21
1.4. Alcance	21
1.5. Justificación	24
Capítulo II: Fundamentación Teórica	27
2.1. Comunicaciones Inalámbricas Subacuáticas (UWC)	27
2.1.1. Características de una UWC	27
2.1.2. Ventajas y limitaciones de una UWC	29
2.2. Tipos de Comunicaciones Inalámbricas Subacuáticas (UWC)	30
2.2.1. Comunicaciones acústicas	31
2.2.2. Comunicaciones ópticas.....	32

2.2.3. Comunicaciones por ondas electromagnéticas (EM).....	34
2.3. Luz azul como medio de transmisión en UWC	34
2.3.1. Características de la luz azul en UWC.....	35
2.3.2. Ventajas y limitaciones de la luz azul en aplicaciones de UWC	36
2.3.3. Comparación de la luz azul en UWC frente a la luz roja y verde.....	37
2.4. Modulaciones utilizadas en las UWC basadas en luz azul.	39
2.4.1. Modulación por Desplazamiento de Frecuencia (FSK).....	40
2.4.2. Modulación por Desplazamiento de Fase (PSK)	40
2.4.3. Modulación de Amplitud en Cuadratura (QAM).....	41
2.4.4. Modulación por Posición de Pulso (PPM).....	41
2.4.5. Modulación por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM)	42
2.5. Comunicaciones Punto a Punto (P2P).	42
2.5.1. Características de las comunicaciones punto a punto	43
2.5.2. Arquitectura de las comunicaciones punto a punto	43
2.6. Factores que intervienen en la propagación de la luz azul en medios subacuáticos	44
2.6.1. Absorción.....	45
2.6.2. Dispersión	45
2.6.3. Turbidez del agua.....	45
2.6.4. Ruido óptico ambiental	45
2.6.5. Distancia	45
2.6.6. Alineación del transmisor y receptor	46

2.6.7. Interferencia de organismos marinos	46
2.7. Matlab	46
2.7.1. Matlab en la Ingeniería	46
2.7.2. App Designer	47
2.8. Fórmulas fundamentales para el análisis de comunicaciones subacuáticas.....	47
Capítulo III: Simulación	50
3.1. Análisis de situación actual.....	50
3.2. Metodología Incremental.....	52
3.2.1. Fases de la metodología incremental	53
3.2.2. Fases de la metodología incremental – Enfoque del TIC	54
3.3. Metodología de Simulación Basada en Agentes.....	58
3.4. Métricas del Entorno de Simulación.....	59
3.4.1. Métricas para el modelado de una UWC	60
3.4.2. Métricas para Evaluar la Calidad de una UWC	61
3.5. Entorno de Simulación.....	62
3.5.1. Componentes del Sistema	62
3.5.2. Métricas de Evaluación.....	63
3.5.3. Configuración de Parámetros.....	64
3.5.4. Funcionalidad.....	64
3.5.5. Características de los Usuarios	65
3.5.6. Selección de Software de Simulación.....	66
3.5.7. Validación de Software.....	67

3.5.8. Interfaces Externas.....	70
3.6 Establecimiento de Requerimientos.....	71
3.6.1. Descripción General.....	72
3.6.2. Suposiciones y Dependencias.....	72
3.6.3. Requerimientos según el enfoque de Agentes	73
3.6.7. Requerimientos Futuros.....	75
3.7 Diseño del Escenario de Simulación.....	75
3.8 Métricas de Comparación entre UWC bajo el enfoque Óptico y Acústico	78
3.9 Simulación	81
3.9.1 Codificación.....	81
3.9.2 Diseño de la Simulación en App Designer	86
Capítulo IV: Resultados.....	87
4.1 Rendimiento de simulación en App Designer.	87
4.1.1. Vista general de la interfaz App Designer	87
4.1.2. Parámetros de simulación.	88
4.2 Exportación y visualización de resultados	91
4.2.1. Pruebas de validación de contenido exportable	92
4.3 Análisis de estabilidad de la simulación.	97
4.4 Discusión comparativa.....	98
4.5 Socialización y Encuestas	100
4.5.1. Esquema de socialización	101
4.5.2. Encuesta	102

4.5.3 Resumen de la Encuesta.....	103
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	115
Conclusiones	115
Recomendaciones	117
BIBLIOGRAFIA	118
ANEXOS	122
Anexo A. Repositorio GitHub.	122
Anexo B. Encuesta de validación del software de simulación.	122
Anexo C. Manual de Usuario.....	126
Anexo C. 1. Instalación.....	126
Anexo C. 2. Indicaciones de Uso.....	129
Anexo C. 3. Desinstalación.....	133

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Árbol de causas y efectos enfocados al análisis de comunicaciones ópticas inalámbricas basadas en luz azul para entornos subacuáticos.	20
Figura 2 Modelo básico de comunicación óptica inalámbrica “Punto a Punto”, aplicando luz	24
Figura 3 Tipos de UWC.....	30
Figura 4 Ejemplo de tecnología UWC basada en ondas acústicas, comunmente denominada "Sonar".....	31
Figura 5 Ejemplo de UWC basada en una topología hibrida entre comunicaciones ópticas y acústicas.	33
Figura 6 Estructura básica de las arquitecturas Cliente-Servidor y P2P.....	44
Figura 7 Fases de la Metodología Incremental.....	53
Figura 8 Escenario de simulación P2P.	76
Figura 9 Diagrama de bloques y parámetros que intervienen en la arquitectura de simulación.	77
Figura 10 Diagrama de flujo de la simulación en el software Matlab.....	77
Figura 11 Interfaz gráfica desarrollada en App Designer	86
Figura 12 GUI de la simulación de una comunicación P2P basada en tecnología óptica y acústica con parámetros configurables.	88
Figura 13 Parámetros de configuración del entorno físico.	89
Figura 14 Sliders de configuración de parámetros ambientales de simulación, influyentes directamente en la calidad de la comunicación.	89
Figura 15 Área de visualización del contenido multimedia transmitido y recibido. ..	90

Figura 16 Sección de visualización de métricas de rendimiento de la transmisión P2P tanto para la tecnología óptica como acústica.....	90
Figura 17 Obtención de resultados numéricos en base al número de ejecuciones realizadas en la simulación, representadas a través de un archivo de Excel.....	91
Figura 18 Graficas de tendencias generadas en el archivo xlsx del primer escenario, con parámetros de frecuencia: 15 [KHz] y distancia entre nodos: 50 [m] para la comunicación óptica.....	92
Figura 19 Graficas de tendencias generadas en el archivo xlsx del primer escenario, con parámetros de frecuencia: 15 [KHz] y distancia entre nodos: 50 [m] para la comunicación acústica.	93
Figura 20 Graficas de tendencias generadas en el archivo xlsx del segundo escenario, con parámetros de frecuencia: 150 [KHz] y distancia entre nodos: 100 [m] para la comunicación óptica.....	94
Figura 21 Graficas de tendencias generadas en el archivo xlsx del segundo escenario, con parámetros de frecuencia: 150 [KHz] y distancia entre nodos: 100 [m] para la comunicación acústica.	95
Figura 22 Graficas de tendencias generadas en el archivo xlsx del tercer escenario, con parámetros de frecuencia: 150 [KHz] y distancia entre nodos: 2000 [m] para la comunicación óptica.....	96
Figura 23 Graficas de tendencias generadas en el archivo xlsx del tercer escenario, con parámetros de frecuencia: 150 [KHz] y distancia entre nodos: 2000 [m] para la comunicación acústica.	97
Figura 24 Diagrama de bloques del proceso de socialización de la App.	101

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Características de las Comunicaciones Inalámbricas Subacuáticas.....	28
Tabla 2	Ventajas y limitaciones de las Comunicaciones Inalámbricas Subacuáticas.	29
Tabla 3	Características técnicas de la luz azul como medio de Tx en UWC.....	36
Tabla 4	Ventajas y limitaciones del uso de Luz azul en Comunicaciones Inalámbricas Subacuáticas (UWC).....	37
Tabla 5	Comparativa entre la luz azul, verde y roja para aplicaciones (UWC).....	39
Tabla 6	Principales características de las comunicaciones P2P.....	43
Tabla 7	Fórmulas para análisis de comunicaciones subacuáticas.....	47
Tabla 8	Métricas para el modelado de una UWC	60
Tabla 9	Métricas para evaluar la calidad de un UWC	61
Tabla 10	Comparativa de softwares de simulación.	66
Tabla 11	Validación del Software Matlab a través de la normativa ISO/IEC 25010.	67
Tabla 12	Listado de requerimientos basado en Experimentos Virtuales.	73
Tabla 13	Listado de requerimientos para Agentes Virtuales.	74
Tabla 14	Listado de requerimientos enfocados al Entorno.....	74
Tabla 15	Parámetros comparativos entre comunicaciones ópticas y acústicas.	79
Tabla 16	Resultados experimentales de la comparativa óptica y acústica.....	80

Capítulo I: Antecedentes

1.1. Tema

ANÁLISIS DE COMUNICACIONES ÓPTICAS INALÁMBRICAS BASADAS EN LUZ AZUL PARA ENTORNOS SUBACUÁTICOS

1.2. Problema

Los sistemas de comunicación subacuática antiguos y actuales han manejado métodos de comunicación basados principalmente en la propagación de ondas acústicas presentes en los diversos tipos de sonares de aplicaciones militares o científicas, ondas electromagnéticas (EM) utilizadas comunicaciones de radio submarina y métodos emergentes como las comunicaciones por señales ópticas (Sandra et al., 2011).

Sin embargo, cada uno de los presentes métodos de comunicaciones para entornos subacuáticos presentan limitaciones significativas en términos de velocidad, alcance y consumo energético bajo el agua. Estas limitaciones pueden afectar negativamente el desempeño de sistemas de comunicación críticos, como los utilizados en aplicaciones militares, de exploración submarina o en la monitorización de infraestructuras submarinas (Peng & Ma, 2023). Además, el aumento de la demanda de ancho de banda y la necesidad de una transmisión de datos más rápida y confiable en entornos acuáticos plantean desafíos adicionales para los sistemas de comunicación subacuática existentes.

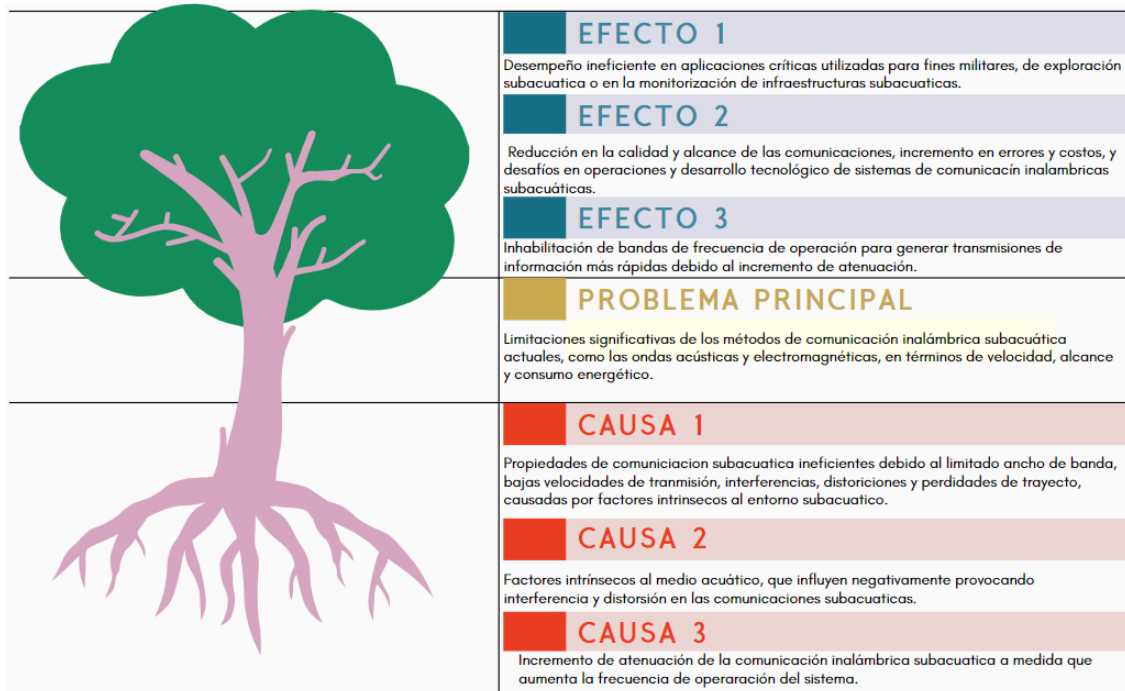
El creciente interés en desarrollar sistemas de comunicaciones subacuáticas más eficientes y confiables debido al aumento de aplicaciones en entornos acuáticos, han llevado a realizar análisis en base a comunicaciones enfocadas a ondas acústicas, no obstante, al igual que las ondas electromagnéticas representan limitaciones considerables con respecto al medio marino que puede crear atenuaciones como canal de transmisión de ondas acústicas, mismas que aumentan dependiendo de la frecuencia de operación (Shanthi et al., 2023). De acuerdo

con el estudio de la profesora Milica Stojanovic profesional en la Universidad Northeastern de Boston, estas atenuaciones pueden estar entre los 40 dB/Km a una frecuencia de 100KHz, hasta los 300dB/Km usando frecuencias de 1000KHz (Gradiant, 2010).

Adicionalmente, las comunicaciones basadas en tecnología acústicas inalámbricas enfrenta limitaciones significativas debido a una serie de factores intrínsecos al medio acuático. El ancho de banda limitado restringe la cantidad de datos que pueden transmitirse eficientemente, afectando la velocidad y la calidad de la comunicación. Además, el fenómeno del multitrayecto extendido, donde las señales reflejan múltiples veces antes de llegar al receptor, provoca interferencias y distorsiones (Rodríguez, 2017). Este entorno también presenta desvanecimientos severos, causados por la absorción y dispersión de las ondas sonoras, que debilitan la señal de manera considerable. Las propiedades refractivas del medio, que varían con la temperatura, salinidad y presión, alteran la trayectoria de las ondas acústicas, complicando la predictibilidad de la transmisión (Isaac & Tacoronte, 2017). Las rápidas variaciones de tiempo introducen fluctuaciones en las condiciones del canal de comunicación, haciendo que la adaptación en tiempo real sea un desafío constante. Finalmente, los grandes desplazamientos Doppler, resultantes del movimiento relativo entre el transmisor y el receptor, desajustan la frecuencia de la señal, dificultando aún más la estabilidad y la coherencia de la comunicación subacuática (Higuera, 2018). Todas las limitaciones e inconvenientes planteados como problemática se establecen de forma sintetizada en la fig. 1 a través de un árbol de causas y efectos.

Figura 1

Árbol de causas y efectos enfocados al análisis de comunicaciones ópticas inalámbricas basadas en luz azul para entornos subacuáticos.



Por lo tanto, las tecnologías tradicionales basadas en ondas acústicas han enfrentado desafíos significativos debido a la alta atenuación y la interferencia causada por el medio acuático. En este contexto, de acuerdo al artículo del académico Bing Dong de China se establece que la luz azul ha surgido como una alternativa viable, aprovechando sus propiedades de penetración en el agua y su capacidad para proporcionar velocidades de transmisión más rápidas (Dong et al., 2022). Estudios previos han demostrado el potencial de la luz azul para las comunicaciones submarinas, pero aún existen limitaciones técnicas y operativas que requieren una investigación más profunda y un análisis detallado para su implementación efectiva en aplicaciones prácticas (Wu et al., 2017).

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Analizar las comunicaciones ópticas inalámbricas basadas en luz azul mediante entornos de simulación, para evaluar la viabilidad y eficacia teórica de esta tecnología en entornos subacuáticos.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Investigar literatura sobre las comunicaciones inalámbricas subacuáticas, con enfoque específico al uso de luz azul como medio de transmisión.
- Establecer los parámetros o condiciones para el modelado de un entorno de simulación basado en comunicaciones óptica inalámbricas con luz azul.
- Definir métricas para evaluar la calidad y estabilidad de las comunicaciones ópticas inalámbricas en entornos subacuáticos.
- Comparar el rendimiento de las comunicaciones ópticas con luz azul frente a tecnología tradicional basada en comunicaciones acústicas en entornos subacuáticos.

1.4. Alcance

El presente Trabajo de Integración Curricular se enfoca en el análisis exhaustivo de las comunicaciones inalámbricas subacuáticas mediante el uso de luz azul. Este estudio tiene como objetivo principal evaluar la viabilidad y eficacia teórica de esta tecnología en entornos subacuáticos. El alcance del trabajo se delimita dentro de un marco que abarca desde la investigación y revisión de literatura especializada hasta la implementación de simulaciones y comparaciones con tecnología tradicional en comunicaciones subacuáticas como lo son las comunicaciones acústicas.

En tal contexto, se utilizará la metodología de “Desarrollo Incremental” que cuenta con varias etapas de desarrollo de las cuales se va a aplicar las denominadas (Comunicación, Planeación, Modelado y Construcción, Despliegue) (Ortiz, 2017). En adición, se pretende aplicar una metodología enfocada al apartado de simulación que se denomina Simulación Basada en Agentes (SBA) (Vélez Torres & Vélez Torres, 2019), la cual permitirá modelar, variar parámetros y analizar el comportamiento de las comunicaciones en diferentes condiciones y escenarios subacuáticos. Esta metodología facilitará la identificación de factores críticos y la optimización de parámetros clave, proporcionando una comprensión detallada y precisa del rendimiento de las comunicaciones ópticas inalámbricas bajo el agua.

En primer lugar, se llevará a cabo una revisión y análisis detallado de la literatura existente relacionada con las comunicaciones ópticas inalámbricas para entornos subacuáticos. Esta investigación se enfocará específicamente en el uso de luz azul como medio de transmisión y en las tecnologías asociadas con este tipo de comunicaciones. Se buscará comprender el estado del arte en este campo, identificar avances recientes, desafíos técnicos y áreas de oportunidad para el desarrollo de nuevas soluciones.

Posteriormente, se iniciará con la fase de “Comunicación” de la metodología incremental que consiste en establecer requerimientos enfocados a los parámetros y condiciones necesarios para el modelado de un entorno de simulación que represente de manera precisa las características de las comunicaciones subacuáticas con luz azul. Esto incluirá la definición de los elementos clave del entorno submarino, como la profundidad, la turbidez del agua, la distancia de transmisión y otros factores relevantes que afectan la propagación de la luz azul bajo el agua.

Una vez comprendido los fundamentos para el modelado de la simulación, teniendo en cuenta parámetros que pueden influir en las comunicaciones ópticas subacuáticas mediante luz azul como medio de transmisión. Se procederá al con la fase dos de “Planeación” de la

simulación, donde el software Matlab será la herramienta seleccionada, aprovechando su capacidad para modelar sistemas complejos y realizar análisis detallados de datos. De este modo, ejecutando posteriormente las etapas de “Modelado y Construcción” de la simulación. Donde se pretende generar un entorno donde se establezca comunicaciones basadas en topologías indispensables en las comunicaciones como lo son las denominadas “Punto a Punto” o “Punto a Multipunto”.

De forma que, mediante la simulación establecida, se genere una apertura para generar variaciones en la simulación para evaluar la calidad y estabilidad de la comunicación óptica inalámbrica con determinadas variaciones en el entorno referente al medio subacuático, proceso que estará ligado a la metodología de “Simulación basada en agentes”, para lo cual, se definirá tres agentes principales a modificar que son la profundidad, la turbidez del agua y distancia de transmisión.

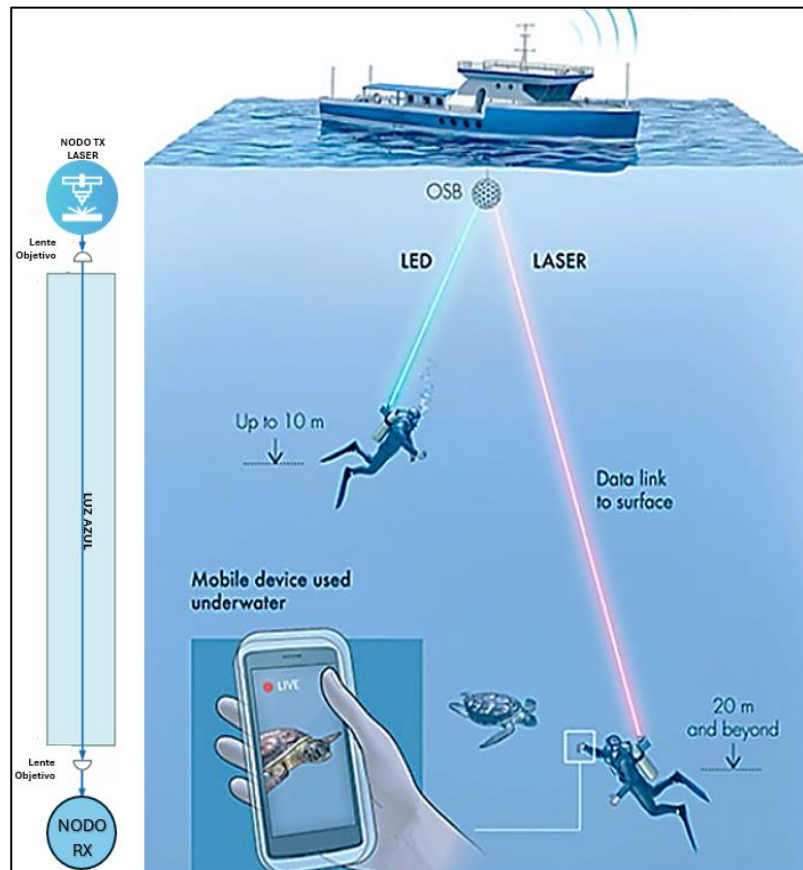
Por lo tanto, al tener establecido el entorno de simulación, se procederá a realizar pruebas y experimentos para registrar métricas relevantes, tales como la eficiencia espectral, la tasa de transmisión de datos y la latencia de la comunicación. Estas métricas serán clave para evaluar la calidad y estabilidad de las comunicaciones óptica subacuáticas mediante luz azul en diferentes condiciones y escenarios simulados. Así también, cumpliendo con la última fase de la metodología incremental denominada “Despliegue”, que dentro de este modelo de trabajo establece la entrega de resultados.

Finalmente, se llevará a cabo una comparación exhaustiva del rendimiento de las comunicaciones ópticas utilizando luz azul como medio de transmisión con el de tecnologías tradicionales en entornos subacuáticos como lo son las denominadas ondas acústicas, presentes en la mayoría de dispositivos modernos basados en sonares submarinos. Esto permitirá identificar y analizar las ventajas y desventajas de cada enfoque, así como determinar el grado de eficacia relativa en términos de alcance, velocidad de transmisión, resistencia a

interferencias y otros parámetros relevantes. A continuación, en la fig. 2, se define una arquitectura referente a un modelo de comunicación básico basado en un enlace punto a punto usando luz azul como medio de transmisión.

Figura 2

Modelo básico de comunicación óptica inalámbrica “Punto a Punto”, aplicando luz



Nota. Figura tomada de la revista “Magazine Subaquática” (Subaquatica, 2020).

1.5. Justificación

La investigación propuesta sobre las comunicaciones inalámbricas subacuáticas utilizando luz azul tiene fundamentos sólidos tanto en justificaciones tecnológicas como en justificaciones teóricas y metodológicas. Estas razones se sustentan en la necesidad de abordar desafíos significativos en el campo de las comunicaciones submarinas y en la búsqueda de

soluciones innovadoras y eficientes para mejorar la conectividad y la transmisión de datos en entornos acuáticos.

En primer lugar, desde una perspectiva tecnológica en función del noveno “Objetivo de Desarrollo Sostenible, referente a Industria, Innovación e Infraestructura” (ONU, 2024), la investigación busca resolver problemas prácticos y reales en el ámbito de las comunicaciones submarinas. Actualmente, existen limitaciones significativas en la transmisión de datos bajo el agua debido a la atenuación y dispersión de las señales electromagnéticas tradicionales. Estas limitaciones afectan la eficiencia y confiabilidad de las comunicaciones subacuáticas, especialmente en aplicaciones como la exploración marina, la monitorización ambiental y la comunicación submarina en general (Zhang et al., 2024).

El uso de luz azul como medio de transmisión ofrece nuevas oportunidades y ventajas, como una mayor velocidad de transmisión, una menor atenuación en medios acuáticos y la posibilidad de utilizar frecuencias específicas que minimizan la interferencia ambiental. Estas características tecnológicas son clave para mejorar la conectividad y la calidad de las comunicaciones subacuáticas, lo que tiene un impacto directo en diversos sectores, incluyendo la investigación científica, la industria marítima y la seguridad submarina (Ghasvarianjahromi et al., 2019).

Desde el punto de vista económico basado en el octavo ODS denominado “Trabajo Decente y Crecimiento Económico” (ONU, 2024), la implementación exitosa de comunicaciones subacuáticas más eficientes y confiables puede reducir costos operativos y aumentar la productividad en actividades como la exploración de recursos marinos, la vigilancia submarina y la gestión de infraestructuras acuáticas. Además, abre oportunidades para el desarrollo de nuevos productos y servicios tecnológicos orientados al mercado submarino.

En cuanto al impacto social definido por el ODS número 14 que hace referencia a la “Vida Submarina” (ONU, 2024), el presente trabajo permite tener indicios de posibles mejoras de conectividad subacuática que pueden ser de beneficio a comunidades costeras y a instituciones dedicadas a la investigación marina y la conservación del medio ambiente acuático. La capacidad de transmitir datos de manera más rápida y confiable en entornos submarinos contribuye a la toma de decisiones informadas y a la generación de conocimiento científico para la protección y gestión sostenible de los ecosistemas marinos.

Finalmente, el siguiente “TIC” pretende desempeñar el papel de una sólida base teórica que busca generar reflexión y debate académico en el campo de las comunicaciones subacuáticas. La exploración de nuevas tecnologías y enfoques de transmisión de datos bajo el agua es fundamental para ampliar el conocimiento existente y confrontar las limitaciones actuales en este ámbito.

Capítulo II: Fundamentación Teórica

El presente capítulo, se enfocará en realizar una revisión exhaustiva de la literatura existente sobre comunicaciones inalámbricas subacuáticas, enfocándose en investigaciones y desarrollos relacionados con el uso de luz azul como medio de transmisión. Se analizarán distintos enfoques, tecnologías y aplicaciones en este campo, con el objetivo de comprender el estado del arte y las tendencias actuales en comunicaciones submarinas con luz azul.

2.1. Comunicaciones Inalámbricas Subacuáticas (UWC)

De acuerdo a Kshitji (2022) UWC (Underwater Wireless Communication, por sus siglas en inglés o Comunicaciones inalámbricas Subacuáticas) han avanzado considerablemente en las últimas décadas, convirtiéndose en un área de creciente interés de investigación debido a la variedad de áreas de aplicación, entre las cuales se tiene aplicaciones enfocadas a la exploración de recursos naturales, monitoreo ambiental, investigaciones científicas, operaciones militares y finalmente la prometedora tecnología denominada Internet de las Cosas Subacuáticas (IoUT) (Kshitij et al., 2022).

2.1.1. Características de una UWC

Las UWC son una tecnología fundamental para la transmisión de datos en entornos subacuáticos. Estas comunicaciones presentan diversas características técnicas y operativas que son esenciales para su implementación efectiva. La Tabla 1 a continuación detalla estas características, abarcando aspectos como la frecuencia de operación, alcance, velocidad de transmisión de datos, atenuación, interferencia y ruido, modos de comunicación, retardo de propagación, costo y seguridad, así como las aplicaciones principales de las UWC.

Tabla 1*Características de las Comunicaciones Inalámbricas Subacuáticas.*

Característica	Descripción.
Frecuencia de Operación	Las comunicaciones subacuáticas suelen utilizar frecuencias en el rango de VLF, LF, MF y HF.
Alcance	El alcance de la transmisión puede variar de unos pocos metros hasta varios kilómetros, dependiendo del medio y la tecnología utilizada.
Velocidad de Transmisión de Datos	La velocidad de transmisión de datos en entornos subacuáticos es típicamente baja, oscilando entre unos pocos bps a varios kbps.
Atenuación	La atenuación de la señal en el agua es alta, especialmente para frecuencias más altas, lo que limita la efectividad de la comunicación a largas distancias.
Interferencia y Ruido	La comunicación subacuática está sujeta a interferencias y ruidos de fuentes naturales y artificiales, como el movimiento del agua, actividad biológica y maquinaria submarina.
Modos de Comunicación Acústica	Los principales modos de comunicación incluyen acústica, electromagnética (EM) y óptica. Utiliza ondas sonoras para transmitir datos; tiene un mayor alcance, pero menor velocidad de datos y es susceptible a la interferencia ambiental.
Electromagnética (EM)	Utiliza ondas EM para la comunicación; tiene un alcance limitado y es menos eficiente en medios subacuáticos debido a la alta absorción del agua.
Óptica	Utiliza luz visible para transmitir datos; ofrece alta velocidad de transmisión, pero con un alcance limitado y es sensible a la turbidez del agua.
Retardo de Propagación	El retardo de propagación en las comunicaciones subacuáticas es significativamente mayor que en otros medios debido a la baja velocidad del sonido en el agua.
Costo	El costo de implementación de sistemas de comunicación subacuática puede ser elevado, debido a la necesidad de equipos especializados y mantenimiento.
Seguridad	La seguridad de las comunicaciones subacuáticas es generalmente alta, ya que las señales son difíciles de interceptar y manipular sin equipos especializados.
Aplicaciones	Las UWC son utilizadas en diversas aplicaciones, incluyendo monitoreo ambiental, exploración submarina, comunicaciones militares y sistemas de alerta temprana.

2.1.2. Ventajas y limitaciones de una UWC

Las UWC presentan tanto ventajas como desventajas que deben ser cuidadosamente evaluadas para su implementación efectiva. Entre las ventajas se encuentran la conectividad en tiempo real y la flexibilidad de despliegue, mientras que entre las limitaciones se destacan el alcance limitado y la baja velocidad de datos (Zhang et al., 2024). La Tabla 2 a continuación detalla estas bondades y limitaciones, ofreciendo una perspectiva comprensiva de los factores que afectan la eficacia de las UWC en diversos entornos subacuáticos.

Tabla 2

Ventajas y limitaciones de las Comunicaciones Inalámbricas Subacuáticas.

Aspecto	Descripción
Ventajas	
Conectividad en tiempo real	Las UWC permiten la transmisión de datos en tiempo real, facilitando el monitoreo y control inmediato de dispositivos subacuáticos.
Flexibilidad de despliegue	La ausencia de cables permite un despliegue más flexible y rápido de los sistemas de comunicación en el entorno submarino.
Reducción de costos operativos	Al eliminar la necesidad de cables, las UWC pueden reducir los costos de instalación y mantenimiento en comparación con las redes cableadas.
Aplicaciones diversas	Estas comunicaciones son adecuadas para una amplia variedad de aplicaciones, incluyendo monitoreo ambiental, exploración submarina y operaciones militares.
Adaptabilidad a entornos variables	Las UWC pueden adaptarse a diferentes condiciones del entorno submarino, ofreciendo soluciones de comunicación robustas y versátiles.
Limitaciones	
Alcance limitado	Las UWC suelen tener un alcance limitado, especialmente en entornos con alta atenuación o interferencia.
Baja velocidad de datos	La velocidad de transmisión de datos es generalmente baja en comparación con las comunicaciones terrestres, debido a las propiedades del medio acuático.
Sensibilidad a las condiciones del agua	Las características del agua, como la salinidad, la temperatura y la turbidez, pueden afectar significativamente la calidad y el alcance de la comunicación.

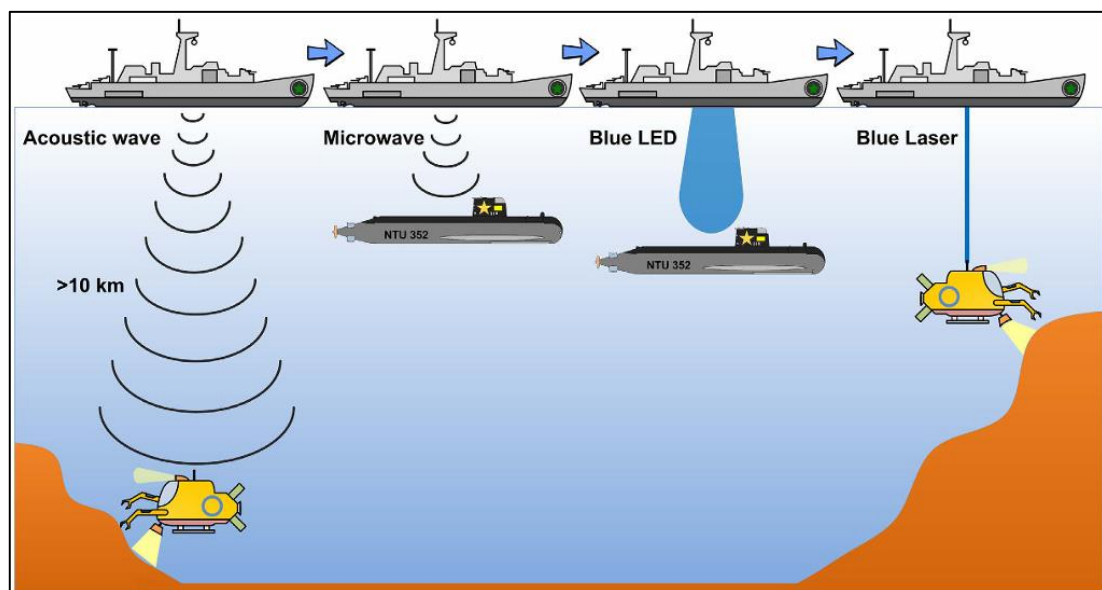
Retardo de propagación	El retardo en la propagación de las señales puede ser considerable, lo que puede afectar la sincronización y la eficiencia de la comunicación.
Interferencia y ruido	Las UWC están sujetas a interferencias de ruido ambiental, actividad biológica y maquinaria submarina, lo que puede degradar la calidad de la señal.
Costo de implementación inicial	La implementación de sistemas de comunicación subacuática puede ser costosa debido a la necesidad de equipos especializados y duraderos.

2.2. Tipos de Comunicaciones Inalámbricas Subacuáticas (UWC)

Dentro de los métodos de comunicaciones subacuáticas tenemos a los tres tipos establecidos en la Figura 3, destacando las comunicaciones acústicas, ópticas y electromagnéticas. Cada una de estas tecnologías tiene sus propias características, ventajas y limitaciones, y su elección depende de la aplicación específica y del entorno subacuático (Peng & Ma, 2023).

Figura 3

Tipos de UWC.



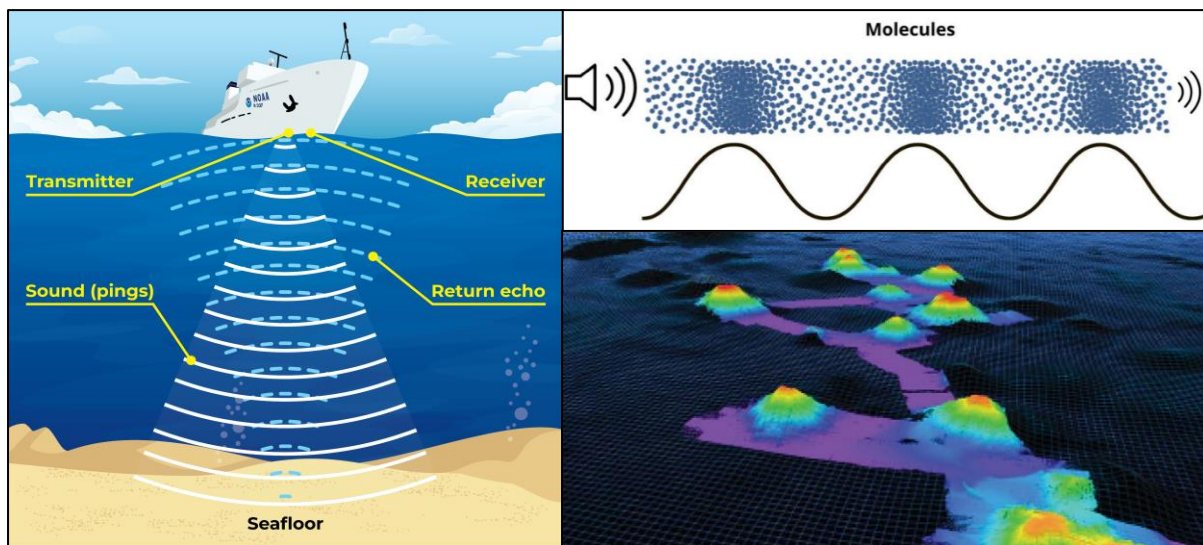
Nota. Figura tomada del artículo “Blue Laser Diode Enables Underwater Communication at 12.4 Gbps” (Wu et al., 2017).

2.2.1. Comunicaciones acústicas

Las comunicaciones acústicas subacuáticas son las más desarrolladas y utilizadas debido a la capacidad de las ondas sonoras para propagarse a largas distancias bajo el agua. Este método utiliza transductores para convertir señales eléctricas en ondas sonoras y viceversa (Stojanovic, 1996). En base a la investigación de Sendra (2011) las ondas sonoras se propagan a través del agua a diferentes velocidades que van de los 1400 a 1600 m/s dependiendo de factores como la salinidad, temperatura y presión del agua (Sandra et al., 2011). Los sistemas de comunicación acústica operan en un rango de frecuencias que va desde unos pocos hercios hasta varios cientos de kilohertzios. Las frecuencias más bajas se utilizan para comunicaciones a largas distancias, mientras que las frecuencias más altas se emplean para distancias más cortas y mayores tasas de transmisión de datos (Shanthy et al., 2023). Estos sistemas pueden ser de sonar pasivo o activo.

Figura 4

Ejemplo de tecnología UWC basada en ondas acústicas, comunmente denominada "Sonar".



Nota. Recopilado de ilustraciones de (Ocean, 2021) .

En concordancia a Vallejo (2017), se establece que las comunicaciones subacuáticas inalámbricas tienden a optar por el denominado “Sonar”, siendo un dispositivo enfocado a la

navegación, comunicación o detección de objetos tanto en entornos terrestres como subacuáticos, dentro de la Figura 4 se observa las aplicaciones mencionadas. Este dispositivo se clasifica en dispositivos “pasivos” que simplemente están a la escucha las ondas sonoras presentes en el entorno, y sonares de tipo “activo” que emiten ondas sonoras y mide las reflexiones para detectar objetos y obtener información sobre el entorno (F. Vallejo, B. Rodríguez, 2017).

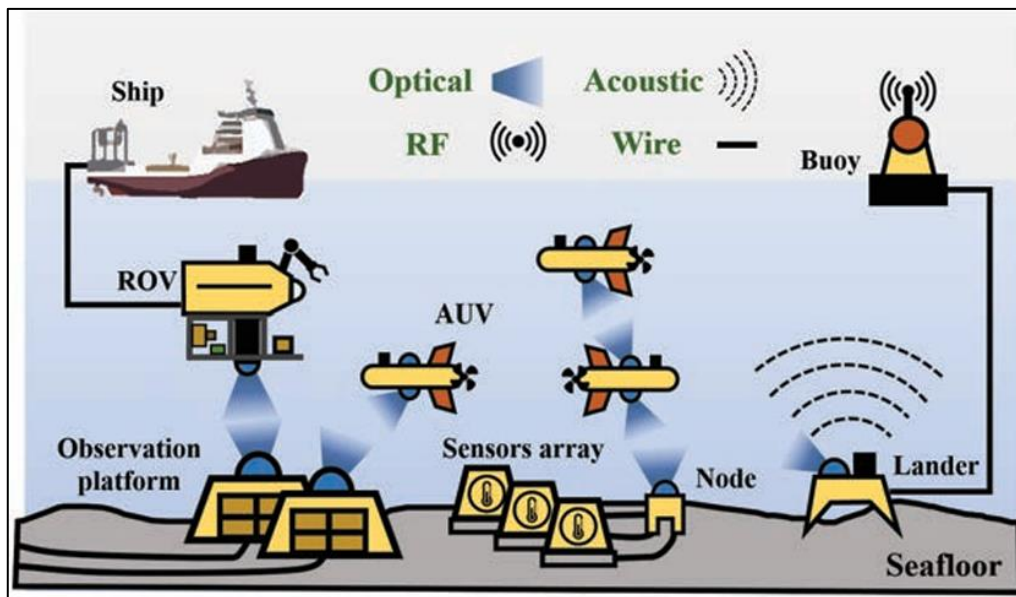
Rodríguez (2017) menciona que, las principales ventajas de las comunicaciones acústicas incluyen su capacidad para cubrir largas distancias y su fiabilidad en condiciones adversas, como aguas turbias y profundas. Sin embargo, estas comunicaciones presentan limitaciones significativas debido a factores intrínsecos al medio subacuáticos como lo son los fenómenos multirayecto, susceptibilidad a la interferencia, distorsiones y el ruido ambiental, entre otros, que puede afectar la calidad de la señal creando un incremento en la latencia también debido a la baja velocidad de propagación del sonido en comparación a otros métodos de UWC con las basadas en señales ópticas (Rodríguez, 2017).

2.2.2. Comunicaciones ópticas

Las comunicaciones ópticas subacuáticas utilizan la luz visible o infrarroja para transmitir datos a través del agua. Este método ofrece altas velocidades de transmisión de datos, pero está limitado a distancias relativamente cortas debido a la rápida absorción y dispersión de la luz en el agua (Lu et al., 2022). Los sistemas de comunicación óptica subacuática emplean fuentes de luz como LEDs o láseres para emitir señales luminosas moduladas que contienen la información a transmitir. Los fotodetectores reciben estas señales y las convierten de nuevo en señales eléctricas. La modulación de la luz puede realizarse de varias maneras, como modulación de amplitud, frecuencia o fase, dependiendo de las necesidades específicas de la aplicación (Lu et al., 2022).

Figura 5

Ejemplo de UWC basada en una topología híbrida entre comunicaciones ópticas y acústicas.



Nota. Figura tomada de (Zhang et al., 2024) .

Las comunicaciones ópticas subacuáticas ofrecen varias ventajas, como altas velocidades de transmisión de datos que pueden alcanzar varios gigabits por segundo y baja latencia debido a la alta velocidad de propagación de la luz. Sin embargo, estas comunicaciones están limitadas a distancias cortas, generalmente de decenas a cientos de metros, debido a la rápida absorción de la luz por el agua (Khan et al., 2021). La claridad del agua y la presencia de partículas suspendidas también afectan negativamente a la calidad de la señal, lo que puede limitar aún más el alcance efectivo de estas comunicaciones. Las aplicaciones de las comunicaciones ópticas subacuáticas son ideales para entornos donde se requiere la transmisión rápida de grandes cantidades de datos en distancias cortas. Esto incluye la comunicación entre vehículos submarinos autónomos (AUVs) y robots subacuáticos, la inspección y mantenimiento de estructuras submarinas, como plataformas petrolíferas y cables submarinos, y diversos experimentos científicos que requieren la transmisión rápida de datos (Wu et al., 2017).

2.2.3. Comunicaciones por ondas electromagnéticas (EM)

Las comunicaciones electromagnéticas subacuáticas utilizan ondas de radio y microondas para transmitir datos a través del agua. Estos sistemas operan en frecuencias bajas para minimizar la absorción del agua y maximizar el alcance de la señal. Las comunicaciones electromagnéticas subacuáticas emplean antenas y transceptores para la transmisión y recepción de señales electromagnéticas (Wu et al., 2017). Las comunicaciones electromagnéticas pueden ofrecer velocidades de transmisión de datos razonables y son menos afectadas por el ruido ambiental en comparación con las comunicaciones acústicas. Sin embargo, están limitadas a distancias cortas y medianas debido a la alta absorción de las ondas electromagnéticas en el agua. El diseño de antenas y transceptores adecuados para el entorno subacuático es complejo y costoso (Stojanovic, 1996).

Las aplicaciones de las comunicaciones electromagnéticas subacuáticas incluyen la transmisión de datos de corto alcance entre dispositivos cercanos en entornos de agua dulce, la comunicación de sensores y dispositivos en instalaciones industriales submarinas, y la comunicación entre vehículos militares y dispositivos de monitoreo en distancias cortas. Además, las tecnologías electromagnéticas pueden ser útiles en aplicaciones específicas donde las comunicaciones acústicas y ópticas no son prácticas (Sandra et al., 2011).

2.3. Luz azul como medio de transmisión en UWC

La luz azul se está posicionando como un medio eficaz para la transmisión de datos en el ámbito de las comunicaciones ópticas inalámbricas subacuáticas. Su capacidad distintiva para penetrar el agua más profundamente que otras longitudes de onda del espectro visible la convierte en una opción ideal para estas aplicaciones.

Una característica sobresaliente de la luz azul es su baja absorción y dispersión en el agua en comparación con otras longitudes de onda. A diferencia de la luz roja o infrarroja, que

se atenúan rápidamente, la luz azul puede recorrer mayores distancias, lo que la hace altamente eficiente para la transmisión de señales en entornos acuáticos (Dong et al., 2022).

Las aplicaciones de las comunicaciones ópticas subacuáticas basadas en luz azul son diversas y abarcan áreas como el monitoreo ambiental, la exploración submarina y la comunicación entre vehículos autónomos subacuáticos (AUVs). Estos sistemas pueden aprovechar las ventajas de la luz azul para la transmisión de datos a alta velocidad y con baja latencia, esenciales para la transmisión en tiempo real de video y otros datos críticos (Zhang et al., 2024).

Además, la luz azul ofrece una mejora en términos de seguridad y confidencialidad de los datos. A diferencia de las ondas de radio, que pueden ser interceptadas con facilidad, las señales ópticas basadas en luz azul requieren una línea de vista directa, lo que las hace mucho más difíciles de detectar y hackear. Esta característica es crucial para mantener la seguridad de las comunicaciones en entornos subacuáticos (Dong et al., 2022).

No obstante, la utilización de la luz azul en comunicaciones subacuáticas presenta ciertos desafíos. La alineación precisa entre transmisores y receptores es fundamental, ya que cualquier desviación puede resultar en una pérdida significativa de la señal. Además, las condiciones del agua, como la turbidez y la presencia de partículas, pueden afectar la calidad de la transmisión (Wu et al., 2017).

2.3.1. Características de la luz azul en UWC

La luz azul se emplea en las comunicaciones inalámbricas subacuáticas (UWC) debido a sus propiedades favorables para la transmisión en el agua. La Tabla 3 a continuación presenta las características técnicas de la luz azul como medio de transmisión, incluyendo su longitud de onda, coeficiente de absorción y atenuación, ancho de banda, rendimiento en condiciones turbias, alcance de transmisión, tecnologías de modulación, interferencia y ruido, y consumo de energía.

Tabla 3*Características técnicas de la luz azul como medio de Tx en UWC.*

Características	Descripción
Longitud de onda	450-495 nm
Coefficiente de absorción	Menor coeficiente de absorción en agua de mar en comparación con otras longitudes de onda, lo que permite mayor penetración.
Coefficiente de atenuación	Baja atenuación en el agua, típica en el rango de 0.15 a 0.2 dB/m para agua clara.
Ancho de banda	Amplio ancho de banda disponible, permitiendo altas tasas de transmisión de datos, típicamente en el orden de Gbps.
Rendimiento en condiciones turbias	Desempeño relativamente bueno en aguas con baja a moderada turbidez; la dispersión se incrementa con la turbidez.
Alcance de transmisión	Alcance de transmisión efectivo de hasta 100 metros en condiciones óptimas de agua clara.
Tecnologías de modulación	Utiliza técnicas avanzadas como OOK (On-Off Keying), PPM (Pulse Position Modulation), y OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) para mejorar la eficiencia.
Interferencia y ruido	Menor interferencia y ruido en comparación con las comunicaciones acústicas subacuáticas, aunque susceptible a la dispersión por partículas suspendidas.
Consumo de energía	Generalmente, consumo de energía más alto en comparación con las comunicaciones acústicas debido a la necesidad de fuentes de luz intensas y sistemas de detección sensibles.

2.3.2. Ventajas y limitaciones de la luz azul en aplicaciones de UWC

Las ventajas y limitaciones de la luz azul en aplicaciones de comunicaciones inalámbricas subacuáticas (UWC) son factores críticos a considerar en el diseño y operación de estos sistemas. La luz azul ofrece ventajas significativas como alta velocidad de datos y baja atenuación en el agua, pero también enfrenta desafíos como el alcance limitado y la sensibilidad a la turbidez. La Tabla 4 a continuación resume estas bondades y limitaciones, proporcionando una visión clara de las capacidades y restricciones de la luz azul en UWC.

Tabla 4

Ventajas y limitaciones del uso de Luz azul en Comunicaciones Inalámbricas Subacuáticas (UWC).

Aspecto	Descripción
Ventajas	
Alta velocidad de datos	La luz azul permite la transmisión de datos a alta velocidad debido a su alta frecuencia y capacidad de ancho de banda.
Baja atenuación en el agua	Comparada con otras longitudes de onda, la luz azul sufre menos atenuación, permitiendo una mayor eficiencia en la transmisión.
Bajo consumo de energía	Los sistemas de comunicación basados en luz azul pueden ser más eficientes energéticamente, prolongando la vida útil de los dispositivos.
Menor interferencia	La luz azul es menos propensa a interferencias de otras fuentes de luz en el entorno submarino, lo que mejora la calidad de la señal.
Aplicaciones específicas	Es particularmente útil en aplicaciones donde se requiere transmisión de datos a corto alcance y alta velocidad, como en sensores y robótica submarina.
Limitaciones	
Alcance limitado	La transmisión de luz azul en el agua tiene un alcance limitado, generalmente restringido a distancias cortas debido a la absorción y dispersión del agua.
Sensibilidad a la turbidez	La efectividad de la luz azul puede verse afectada por la turbidez del agua, que puede dispersar y absorber la luz, reduciendo su eficiencia.
Line-of-sight requerido	La comunicación basada en luz azul requiere una línea de visión clara entre el emisor y el receptor, lo cual puede ser un desafío en entornos subacuáticos complejos.
Costo de implementación	Los sistemas ópticos para UWC pueden ser costosos de desarrollar e implementar, debido a la necesidad de componentes especializados y robustos.
Mantenimiento y durabilidad	Los equipos ópticos subacuáticos pueden requerir un mantenimiento regular para asegurar su correcto funcionamiento y durabilidad en ambientes marinos hostiles.

2.3.3. Comparación de la luz azul en UWC frente a la luz roja y verde

En las comunicaciones inalámbricas subacuáticas (UWC), la elección de la longitud de onda de la luz es crucial para optimizar la eficiencia de la transmisión de datos. La luz azul, verde y roja presentan diferentes características que afectan su desempeño en entornos

acuáticos. Cada una de estas longitudes de onda tiene ventajas y desventajas específicas que deben ser consideradas al diseñar sistemas de comunicación subacuática.

De acuerdo con Wu (2017), la luz azul que cuenta con una longitud de onda de 450-495 nm, es conocida por su menor coeficiente de absorción en agua de mar en comparación con otras longitudes de onda. Esto permite una mayor penetración y baja atenuación, típicamente en el rango de 0.15 a 0.2 dB/m en agua clara. Además, la luz azul ofrece un amplio ancho de banda, permitiendo altas tasas de transmisión de datos, generalmente en el orden de Gbps. Su desempeño en aguas con baja a moderada turbidez es relativamente bueno, aunque su alcance efectivo de transmisión suele ser de hasta 100 metros en condiciones óptimas. Las tecnologías de modulación avanzadas, como OOK, PPM y OFDM, son comúnmente utilizadas para mejorar la eficiencia de la luz azul en UWC (Wu et al., 2017).

Por otro lado, la luz verde, que tiene una longitud de onda de 495-570 nm, también presenta un buen coeficiente de absorción y atenuación en agua, aunque ligeramente inferior a la luz azul. Su atenuación es generalmente mayor, lo que limita su alcance de transmisión. Sin embargo, la luz verde puede ser más efectiva en condiciones de turbidez moderada a alta debido a su menor dispersión en comparación con la luz azul. El ancho de banda disponible para la luz verde permite tasas de transmisión de datos altas, aunque no tan elevadas como las de la luz azul (Shen et al., 2021).

La luz roja, con una longitud de onda de 620-750 nm, presenta el mayor coeficiente de absorción y atenuación en agua de las tres. Esto limita significativamente su alcance de transmisión y su efectividad en UWC. La atenuación para la luz roja puede ser considerablemente alta, lo que reduce su eficiencia en la transmisión de datos a largas distancias. Sin embargo, en aplicaciones donde el alcance corto es aceptable, la luz roja puede ser utilizada con tecnologías de modulación específicas para optimizar su desempeño (Wu et al., 2017).

Tabla 5

Comparativa entre la luz azul, verde y roja para aplicaciones (UWC).

Parámetro	Luz Azul (450-495 nm)	Luz Verde (495-570 nm)	Luz Roja (620-750 nm)
Coefficiente de absorción	Menor coeficiente de absorción en agua de mar	Coefficiente de absorción moderado	Mayor coeficiente de absorción en agua de mar
Coefficiente de atenuación	Baja atenuación (0.15 a 0.2 dB/m en agua clara)	Atenuación moderada	Alta atenuación
Ancho de banda	Amplio ancho de banda (Gbps)	Ancho de banda moderado	Ancho de banda limitado
Rendimiento en condiciones turbias	Buen desempeño en baja a moderada turbidez	Mejor desempeño en turbidez moderada a alta	Desempeño limitado en condiciones turbias
Alcance de transmisión Tecnologías de modulación	Hasta 100 metros en condiciones óptimas OOK, PPM, OFDM	Alcance limitado a moderado OOK, PPM, OFDM	Alcance muy limitado OOK, PPM
Interferencia y ruido	Menor interferencia y ruido en comparación con comunicaciones acústicas	Moderada interferencia y ruido	Alta susceptibilidad a la interferencia y ruido
Consumo de energía	Generalmente más alto debido a la necesidad de fuentes de luz intensas	Consumo de energía moderado	Consumo de energía elevado debido a la necesidad de mayor potencia

2.4. Modulaciones utilizadas en las UWC basadas en luz azul.

Las comunicaciones ópticas inalámbricas basadas en luz azul han surgido como una solución innovadora para la transmisión de datos en entornos subacuáticos. Estas tecnologías aprovechan la excelente propagación de la luz azul en el agua, lo que permite una mayor eficiencia y alcance en la transmisión de datos. A continuación, se detallan las principales modulaciones utilizadas en este tipo de comunicaciones, junto con sus fórmulas generales.

2.4.1. Modulación por Desplazamiento de Frecuencia (FSK)

FSK implica la variación de la frecuencia de la portadora en función de los datos transmitidos. Esta técnica es robusta frente al ruido y las interferencias en el entorno subacuático.

Fórmula General

La señal modulada en FSK se puede expresar como:

$$s(t) = A \cos(2\pi f_c t + 2\pi \Delta f \int_{-\infty}^t m(\tau) d\tau)$$

Donde:

- $s(t)$ es la señal modulada.
- A es la amplitud de la señal.
- f_c es la frecuencia de la portadora.
- Δf es el desplazamiento de frecuencia.
- $m(\tau)$ es la señal de mensaje.

2.4.2. Modulación por Desplazamiento de Fase (PSK)

PSK consiste en la variación de la fase de la portadora en función de los datos transmitidos. Esta técnica es eficiente en términos de ancho de banda y ofrece una buena resistencia a las distorsiones.

Fórmula General

La señal modulada en PSK se puede describir como:

$$s(t) = A \cos(2\pi f_c t + \theta(t))$$

Donde:

- $s(t)$ es la señal modulada.
- A es la amplitud de la señal.
- f_c es la frecuencia de la portadora.
- $\theta(t)$ es la fase de la señal, la cual varía según los datos.

2.4.3. Modulación de Amplitud en Cuadratura (QAM)

QAM combina la modulación de amplitud y la modulación de fase, permitiendo una alta eficiencia espectral. Esta técnica es particularmente útil para transmitir grandes cantidades de datos en canales ópticos subacuáticos.

Fórmula General

La señal modulada en QAM se puede representar como:

$$s(t) = I(t)\cos(2\pi f_c t) - Q(t)\sin(2\pi f_c t)$$

Donde:

- $s(t)$ es la señal modulada.
- $I(t)$ es la componente en fase (In-phase).
- $Q(t)$ es la componente en cuadratura (Quadrature).
- f_c es la frecuencia de la portadora.

2.4.4. Modulación por Posición de Pulso (PPM)

PPM permite que la posición temporal de los pulsos de luz se varía en función de los datos transmitidos. Esta técnica es útil para aplicaciones donde la sincronización es crítica.

Fórmula General

La señal modulada en PPM se puede representar como:

$$s(t) = \sum_n p(t - nT - a_n \Delta T)$$

Donde:

- $s(t)$ es la señal modulada.
- $p(t)$ es la forma del pulso.
- T es el período de la señal.
- a_n son los datos modulados que determinan la posición del pulso.
- ΔT es el desplazamiento temporal del pulso.

2.4.5. Modulación por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM)

OFDM es una técnica avanzada que divide la señal en múltiples subportadoras ortogonales, permitiendo una alta eficiencia espectral y robustez frente a las interferencias y el desvanecimiento.

Fórmula General

La señal modulada en OFDM se puede expresar como:

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j2\pi k \Delta f t}$$

Donde:

- $s(t)$ es la señal modulada.
- X_k son los símbolos modulados en cada subportadora.
- N es el número de subportadoras.
- Δf es el espaciamiento en frecuencia entre las subportadoras.
- t es el tiempo.

2.5. Comunicaciones Punto a Punto (P2P).

Sen (2012) menciona que las comunicaciones (P2P) se refieren a una forma directa de intercambio de datos entre dos dispositivos conectados en una red. En este modelo, cada dispositivo puede actuar tanto como cliente como servidor, permitiendo una transferencia bidireccional de información sin la necesidad de intermediarios centralizados. Este tipo de comunicación es altamente eficiente para aplicaciones que requieren baja latencia y alta seguridad, ya que los datos viajan directamente entre los puntos finales. Además, las redes P2P son escalables y resilientes, ya que la ausencia de un servidor central reduce los puntos únicos de fallo y la congestión de tráfico (Sen, 2012).

2.5.1. Características de las comunicaciones punto a punto

Las comunicaciones Punto a Punto (P2P) presentan diversas características distintivas que las hacen ideales para ciertas aplicaciones tecnológicas. Entre las cuales se puede destacar las siguientes que se encuentran dispuestas en la tabla 6.

Tabla 6

Principales características de las comunicaciones P2P.

Características	Descripción
Descentralización	Una de las principales características es la descentralización, ya que no dependen de un servidor central, permitiendo que cada dispositivo en la red funcione de manera autónoma tanto como cliente como servidor. Esta descentralización aumenta la resiliencia de la red, ya que no existe un único punto de fallo.
Eficiencia	Dado que la comunicación se realiza directamente entre dos puntos, se reduce la latencia y se optimiza el uso del ancho de banda. Esto es especialmente útil en aplicaciones que requieren una rápida transferencia de datos.
Escalabilidad	La escalabilidad es una ventaja significativa de las redes P2P. Al no depender de una infraestructura centralizada, la red puede expandirse fácilmente a medida que se añaden más nodos, sin necesidad de realizar cambios significativos en la estructura existente.
Seguridad	Al eliminar intermediarios, se reduce el riesgo de interceptación de datos por parte de entidades no autorizadas. Los datos viajan directamente entre los nodos, lo cual disminuye las oportunidades de ataques cibernéticos.
Redundancia	En una red P2P, los datos pueden estar replicados en múltiples nodos, lo que asegura su disponibilidad incluso si algunos nodos fallan. Esto mejora la confiabilidad de la red y garantiza que la información esté siempre accesible.

Nota. Adaptado del contenido del libro “*Computer Networks (5th ed.)*” (Tanenbaum, A. S., & Wetherall, 2011).

2.5.2. Arquitectura de las comunicaciones punto a punto

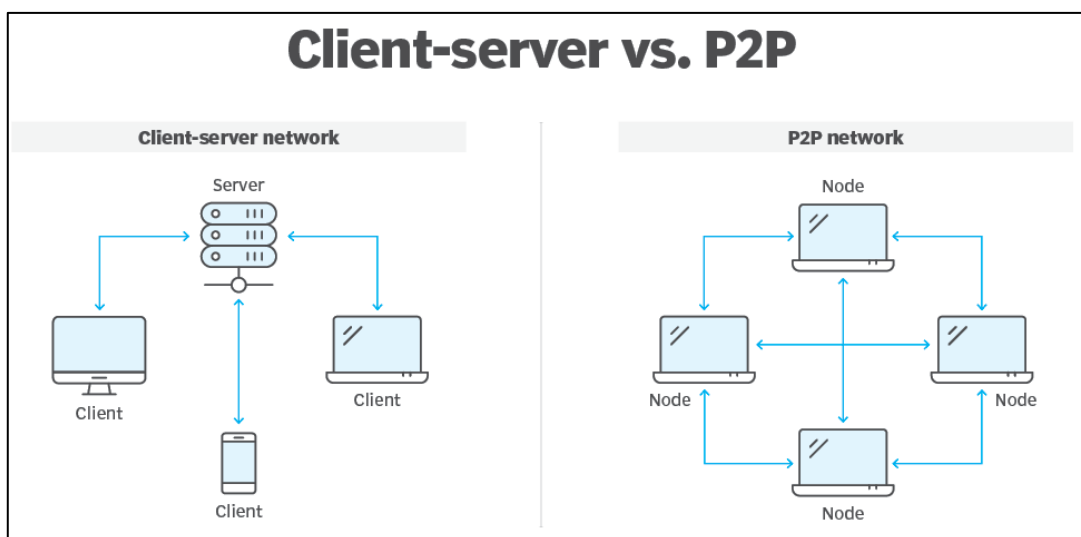
En concordancia al primer parámetro de la **Tabla 6**, la arquitectura (P2P) es un modelo descentralizado de red en el que cada nodo participante puede actuar simultáneamente como cliente y servidor. En lugar de depender de un servidor central para coordinar la comunicación

y el intercambio de datos, cada nodo en una red P2P tiene capacidades equivalentes y puede iniciar o completar transacciones de forma independiente (Sen, 2012).

En tal contexto al contrario de lo ya mencionado sobre la arquitectura P2P, la Figura 6 presenta la diferencia más notable entre la arquitectura P2P de la reconocida arquitectura cliente-servidor.

Figura 6

Estructura básica de las arquitecturas Cliente-Servidor y P2P



Nota. Tomado de la web TechTarget Networking (Rosencrance, 2024) .

2.6. Factores que intervienen en la propagación de la luz azul en medios subacuáticos

La propagación de la luz azul en medios subacuáticos es un fenómeno de gran relevancia en el campo de las comunicaciones ópticas inalámbricas. Este tipo de luz, debido a su longitud de onda más corta en comparación con otros colores del espectro visible, ofrece una penetración superior en el agua, lo que permite una transmisión de datos más eficiente y de mayor alcance. Sin embargo, este tipo de comunicaciones se ven limitadas por distintos factores propios del entorno como lo son: la absorción, dispersión, turbidez del agua, ruido óptico, distancia, entre otros. A continuación, se detalla cada uno de estos factores intrínsecos en el medio subacuático:

2.6.1. Absorción

La absorción de la luz en el agua es un factor crucial a considerar, la cantidad de absorción varía con la longitud de onda. En este contexto, la luz azul, que se encuentra en el rango de 450 a 495 nm, es menos absorbida en comparación con otras longitudes de onda. Esto la convierte en una opción preferida para la comunicación subacuática, permitiendo que la señal viaje distancias más largas antes de ser significativamente atenuada (Sandra et al., 2011).

2.6.2. Dispersión

La dispersión de la luz en el agua, causada por partículas y moléculas, afecta la intensidad de la señal. Aunque la luz azul se dispersa menos, sigue representando un desafío para la calidad de la comunicación. (Sandra et al., 2011).

2.6.3. Turbidez del agua

La turbidez del agua, relacionada con su claridad, afecta la propagación de la luz. En aguas claras, la luz azul se propaga más lejos, pero en aguas turbias, la dispersión y absorción limitan su alcance. Las partículas y materia orgánica en suspensión aumentan la turbidez, reduciendo la efectividad de la comunicación óptica (Sandra et al., 2011).

2.6.4. Ruido óptico ambiental

Las fuentes de luz ambiental, como la solar, introducen ruido en el sistema de comunicación, afectando la relación señal-ruido y la calidad de la transmisión. Además, la luz azul puede ser absorbida o dispersada por organismos marinos y materiales en el agua, aumentando el ruido óptico (Peng & Ma, 2023).

2.6.5. Distancia

La distancia entre transmisor y receptor es crucial en las comunicaciones ópticas subacuáticas. A mayor distancia, la señal de luz se atenúa más por absorción y dispersión, lo que reduce la capacidad de comunicación y limita su alcance efectivo (Peng & Ma, 2023).

2.6.6. Alineación del transmisor y receptor

La alineación precisa entre el transmisor y el receptor es esencial para la comunicación óptica subacuática. Desviaciones en la alineación pueden llevar a una pérdida significativa de la señal. La precisión en la alineación asegura que la mayor parte de la luz emitida sea captada por el receptor, mejorando así la eficiencia del sistema de comunicación (Lu et al., 2022).

2.6.7. Interferencia de organismos marinos

Los organismos marinos, como el plancton y otros microorganismos, pueden afectar la propagación de la luz al dispersarla y absorberla. La presencia de estos organismos en el agua introduce variabilidad en la calidad de la señal y puede resultar en fluctuaciones en la intensidad de la luz recibida (Sandra et al., 2011).

2.7. Matlab

Matlab, abreviatura de "Matrix Laboratory", es un entorno de desarrollo y un lenguaje de programación diseñado para el cálculo numérico, la simulación y la visualización de datos. Desarrollado por MathWorks, Matlab es ampliamente utilizado en ingeniería, ciencias físicas, economía y otras disciplinas técnicas donde se requieren análisis y procesamiento de datos complejos. Este entorno proporciona herramientas poderosas para la manipulación de matrices, la implementación de algoritmos y la creación de interfaces gráficas de usuario, facilitando tanto la investigación académica en diferentes ámbitos de desarrollo (MathWorks, 2024b).

2.7.1. Matlab en la Ingeniería

Matlab, reconocido por su versatilidad y potencia computacional, juega un papel fundamental en la ingeniería moderna al ofrecer un entorno integrado para el análisis y desarrollo de sistemas complejos. Este software es ampliamente utilizado en diversas áreas ingenieriles, proporcionando herramientas especializadas que permiten a los profesionales realizar desde simulaciones numéricas avanzadas hasta el diseño y optimización de algoritmos,

facilitando así el avance y la innovación en diferentes campos de la ingeniería (MathWorks, 2024b).

2.7.2. *App Designer*

App Designer es una herramienta gráfica de Matlab que permite a los usuarios diseñar y crear aplicaciones interactivas de manera intuitiva. Diseñado para facilitar el desarrollo de interfaces de usuario (UI) complejas, App Designer combina la facilidad de arrastrar y soltar componentes gráficos con la potencia del lenguaje de programación Matlab. Los ingenieros y desarrolladores utilizan App Designer para crear aplicaciones personalizadas que pueden incluir visualización de datos, control de hardware, procesamiento de señales y más, todo dentro de un entorno integrado que simplifica el ciclo de desarrollo de software (MathWorks, 2024a).

2.8. Fórmulas fundamentales para el análisis de comunicaciones subacuáticas

En la simulación de sistemas de comunicación subacuática, ya sea mediante ondas acústicas u ópticas, es esencial contar con herramientas matemáticas que permitan estimar distancias entre nodos, pérdidas de señal y atenuación del medio. A continuación, se resumen fórmulas clave empleadas en este tipo de análisis. Dos de ellas se aplican directamente al sistema de comunicación óptica en desarrollo, mientras que la fórmula de Thorp es referenciada para fines comparativos con sistemas acústicos tradicionales.

Tabla 7

Fórmulas para análisis de comunicaciones subacuáticas.

Fórmula	Aplicación	Descripción
$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}$ <p>Donde:</p>	Cálculo de distancia en 3D	Determina la distancia euclidiana entre dos puntos en un espacio

<ul style="list-style-type: none"> • d es la distancia entre los dos puntos. • (x_1, y_1, z_1) son las coordenadas del nodo transmisor. • (x_2, y_2, z_2) son las coordenadas del nodo receptor. 		tridimensional. Útil para calcular la separación física entre transmisor y receptor en entornos simulados.
$\alpha(f) = \frac{0.11f^2}{1+f^2} + \frac{44f^2}{4100+f^2} + 2.75 \times 10^{-4}f^2 + 0.003$ <p>Donde:</p> <ul style="list-style-type: none"> • $\alpha(f)$ es la atenuación en dB/km. • f es la frecuencia de la señal acústica en kHz. 	Atenuación acústica (Thorp)	Describe la atenuación del sonido en agua salada en dB/km, en función de la frecuencia f (en kHz). Usada solo como referencia para comparativas con tecnologías ópticas.
$I(d) = I_0 \cdot e^{-cd}$ <p>Donde:</p> <ul style="list-style-type: none"> • $I(d)$ es la intensidad de luz a una distancia d • I_0 es la intensidad inicial, • $c = a + b$ es el coeficiente de atenuación del agua, <ul style="list-style-type: none"> – a: coeficiente de absorción, – b: coeficiente de dispersión, • d: distancia recorrida por la señal. 	Atenuación óptica (Beer–Lambert)	Estima la reducción de intensidad de la luz debido a la absorción (a) y dispersión (b) en el agua a lo largo de una distancia d . Es aplicable directamente al diseño del sistema óptico.
$\eta = \frac{P_r}{P_t} \times 100\%$ <p>Donde:</p> <ul style="list-style-type: none"> • η: eficiencia de transmisión <ul style="list-style-type: none"> – P_r: potencia recibida – P_t: potencia transmitida 	Eficiencia de transmisión óptica (%).	Determina la eficiencia de la transmisión en porcentaje. Fundamental para evaluar pérdidas del sistema.
$SNR_{dB} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_{señal}}{P_{ruido}} \right)$ <p>Donde:</p> <ul style="list-style-type: none"> • $P_{señal}$: Potencia de la señal en w • P_{ruido}: Potencia del ruido en w 	Relación señal a ruido (SNR)	Mide la calidad de la señal comparando su potencia con la del ruido. Se aplica a ambos sistemas: ópticos y acústicos.
$v = \frac{c}{n}$ <p>Donde:</p> <ul style="list-style-type: none"> • v: Velocidad de la luz en el medio • c: Velocidad de la luz en el vacío <ul style="list-style-type: none"> – 3×10^8 m/s • n: Índice de refracción del agua <ul style="list-style-type: none"> – 1.33 	Velocidad de propagación óptica en agua	Calcula la velocidad de la luz en un medio acuático. Útil para estimar latencia y tiempo de propagación.

$C = 1448.96 + 4.591T - 5.304 \times 10^{-2}T^2 + 2.374 \times 10^{-4}T^3 + 1.340(S - 35) + 1.630 \times 10^{-2}D + 1.675 \times 10^{-7}D^2 - 1.025 \times 10^{-2}T(S - 35) - 7.139 \times 10^{-13}TD^3$ <p>Donde:</p> <ul style="list-style-type: none"> • T: Temperatura del agua (°C) • S: Salinidad del agua (ppt) • D: Profundidad (m) 	<p>Velocidad del sonido en el agua (Mackenzie)</p>	<p>Permite calcular con precisión la velocidad del sonido en el agua teniendo en cuenta múltiples factores. Aplicable en comparación con sistemas acústicos.</p>
---	--	--

Capítulo III: Simulación

En el tercer capítulo se detallará el proceso de establecimiento de parámetros y condiciones para el modelado de un entorno de simulación que represente comunicaciones inalámbricas con luz azul en entornos subacuáticos. Se describirá la metodología incremental enfocada al desarrollo general de este trabajo, además de la metodología basada en agentes utilizada para la simulación. Además, se discutirán las variables y factores considerados en el modelado del entorno submarino, como la profundidad, la turbidez del agua, la distancia de transmisión y otros aspectos relevantes para la transmisión de luz azul bajo el agua.

3.1. Análisis de situación actual

En los últimos años, las comunicaciones subacuáticas han ganado interés debido a la creciente necesidad de recopilar datos, monitorear ecosistemas y facilitar operaciones en ambientes marinos. Los métodos tradicionales, como las comunicaciones acústicas y de radiofrecuencia (RF), han dominado este campo, pero presentan limitaciones significativas. Las comunicaciones acústicas, aunque efectivas en largas distancias, tienen velocidades de transmisión limitadas, generalmente en el rango de los kilobits por segundo, y son susceptibles al ruido ambiental (Zeng et al., 2017). Por otro lado, las ondas de radio, a pesar de su uso exitoso en medios terrestres, enfrentan una severa atenuación en agua salada, restringiendo tanto su alcance como su capacidad de transmisión de datos (Kaushal & Kaddoum, 2016). Estas limitaciones han motivado la exploración de tecnologías alternativas como las comunicaciones ópticas inalámbricas (OWC), que prometen un desempeño superior en términos de velocidad y eficiencia.

Dentro de las OWC, la luz azul, con longitudes de onda de 450 a 495 nanómetros, se perfila como una de las opciones más adecuadas para entornos acuáticos. Esto se debe a su capacidad para propagarse con menor atenuación en comparación con otras regiones del espectro visible, particularmente en aguas claras. En experimentos controlados, se han

alcanzado velocidades de transmisión superiores a 1 Gbps, lo que posiciona a esta tecnología como una solución viable para aplicaciones subacuáticas de alta velocidad (Zhang et al., 2024). Sin embargo, existen desafíos técnicos importantes, como la dispersión y absorción de la luz en aguas turbias, que limitan el alcance efectivo del enlace, así como la influencia de factores ambientales como la turbulencia y el movimiento del agua, que afectan la estabilidad y la calidad de la señal (Peng & Ma, 2023). Estas condiciones incrementan la tasa de error de bits (BER) y dificultan la implementación de sistemas confiables en escenarios reales.

A nivel global, países como Estados Unidos y China lideran la investigación y desarrollo de tecnologías de comunicación óptica subacuática. En estos países, se han implementado proyectos que combinan la luz azul con técnicas avanzadas de modulación y procesamiento de señal, optimizando la eficiencia espectral y la robustez de la comunicación (Kaushal & Kaddoum, 2016). Estas innovaciones han permitido explorar aplicaciones como la transmisión de datos entre vehículos submarinos autónomos (AUVs) y el monitoreo en tiempo real de ecosistemas marinos. Por su parte, en Ecuador, los avances tecnológicos en el monitoreo de ecosistemas marinos se centran principalmente en la protección de áreas críticas como las Islas Galápagos, un territorio de gran biodiversidad marina y relevancia ecológica mundial (Fundación Charles Darwin, 2023). La implementación de tecnologías OWC en estos proyectos podría optimizar la recopilación de datos y contribuir significativamente a las investigaciones relacionadas con la conservación marina y el cambio climático.

En términos de aplicaciones, las comunicaciones ópticas basadas en luz azul tienen el potencial de transformar sectores clave como la exploración marina, la vigilancia ambiental y las operaciones de rescate submarino. Estas tecnologías pueden proporcionar una transmisión de datos más rápida y eficiente en comparación con las soluciones actuales, especialmente en rangos cortos y medianos. Sin embargo, es necesario avanzar en el diseño de sistemas híbridos que combinen tecnologías ópticas, acústicas y de RF para superar las limitaciones individuales

de cada método y garantizar comunicaciones confiables en diversos escenarios subacuáticos (Kaushal & Kaddoum, 2016).

En el futuro, el desarrollo de materiales más avanzados, como recubrimientos que minimicen la absorción y la dispersión de la luz, será crucial para mejorar la eficiencia de los enlaces ópticos. Además, la creación de estándares internacionales para regular y optimizar el uso de estas tecnologías garantizará su adopción segura y sostenible. En este contexto, la investigación sobre comunicaciones ópticas inalámbricas basadas en luz azul no solo es relevante, sino necesaria para abordar los desafíos tecnológicos actuales y aprovechar las oportunidades que ofrece este campo emergente.

3.2. Metodología Incremental

La metodología incremental es un enfoque de desarrollo que se caracteriza por la construcción del producto de forma gradual a través de etapas o "incrementos", donde cada parte del producto se desarrolla, se prueba y se implementa de manera sucesiva. Este enfoque se utiliza en muchos contextos, incluidos el desarrollo de software, la gestión de proyectos y la investigación científica. En lugar de construir un sistema completo de una vez, el trabajo se divide en pequeñas partes que se entregan en intervalos regulares, permitiendo adaptaciones a medida que se avanza.

Uno de los principales beneficios de la metodología incremental es su flexibilidad. Cada incremento puede ser evaluado y ajustado según el feedback obtenido de los stakeholders, lo que facilita la adaptación a cambios en los requisitos a medida que el proyecto progresa (Pressman, 2014). Además, permite identificar y resolver problemas a medida que surgen, lo que reduce el riesgo de fallos en el proyecto, ya que el progreso es monitoreado constantemente.

Este enfoque también mejora la satisfacción del cliente, ya que las entregas frecuentes permiten que los usuarios finales o clientes vean y prueben versiones funcionales del producto

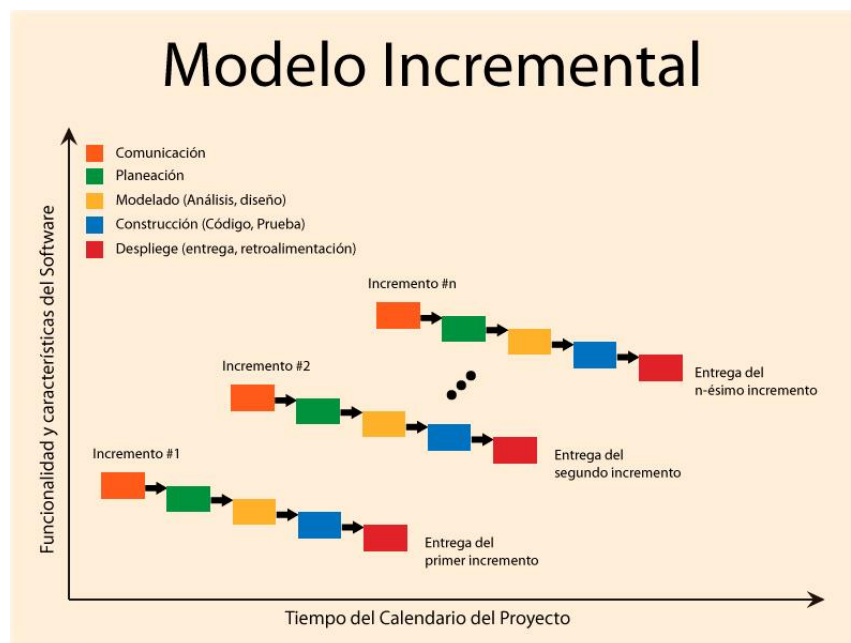
a lo largo del proceso. En el caso de proyectos de desarrollo de software, por ejemplo, se pueden lanzar versiones incrementales que incorporen nuevas características o mejoras, permitiendo que el cliente tenga una visión más clara del producto final incluso antes de su conclusión (Schwaber & Beedle, 2002).

3.2.1. Fases de la metodología incremental

La metodología incremental, como se muestra en la **Figura 7**, divide el proceso de desarrollo en diversas fases clave, cada una enfocada en aspectos específicos del proyecto. Estas fases permiten la entrega gradual de funcionalidades, asegurando flexibilidad y retroalimentación continua. A continuación, se describen las fases detalladamente:

Figura 7

Fases de la Metodología Incremental.



a) Comunicación:

Esta etapa inicial se centra en establecer un entendimiento claro entre los stakeholders y el equipo de desarrollo. Aquí se recogen los requisitos básicos del proyecto y se identifican las prioridades para los incrementos iniciales. La comunicación efectiva garantiza que las expectativas estén alineadas con el plan del proyecto (Pressman, 2014).

b) Planeación:

En esta fase, se definen los objetivos específicos de cada incremento. Se realiza la asignación de tareas, los cronogramas y la distribución de recursos necesarios. La planeación asegura que los incrementos sean factibles y que los entregables cumplan con las expectativas en los plazos establecidos (Schwaber & Beedle, 2002).

c) Modelado (Análisis y Diseño):

Esta fase implica el diseño y análisis de los componentes que serán desarrollados en cada incremento. Se construyen modelos que describen cómo se implementarán las funcionalidades, asegurando que sean coherentes con los requisitos y permitan escalabilidad en incrementos futuros (Sommerville, 2011).

d) Construcción (Código y Prueba):

Aquí se desarrolla el código correspondiente al incremento actual y se realizan pruebas para verificar su funcionalidad. La construcción se enfoca en entregar módulos que estén operativos y que puedan integrarse gradualmente al sistema completo (Pressman, 2014).

e) Despliegue (Entrega y Retroalimentación):

En esta etapa, el incremento desarrollado se entrega al cliente o usuario final para ser evaluado. Se recoge retroalimentación que puede influir en los próximos incrementos. Esto garantiza que el producto evolucione alineado con las necesidades reales de los usuarios (Schwaber & Beedle, 2002).

3.2.2. Fases de la metodología incremental – Enfoque del TIC

La Metodología Incremental es un enfoque de desarrollo iterativo que permite la construcción progresiva de sistemas complejos a través de incrementos funcionales entregados de manera secuencial. En el contexto del Trabajo de Integración Curricular (TIC), esta metodología resulta especialmente adecuada, ya que facilita la implementación de un modelo de simulación de comunicaciones ópticas inalámbricas subacuáticas (UWC) de forma modular

y controlada. Cada incremento representa una versión parcial y mejorada del sistema, permitiendo validar las funcionalidades desarrolladas, como el análisis de la atenuación, la turbidez, el scattering y las métricas de calidad del enlace (BER, SNR, latencia). De esta manera, se asegura una construcción estructurada que optimiza el tiempo, la detección de errores y la integración de componentes críticos, consolidando al final un modelo eficiente y documentado.

a) Comunicación

Descripción general:

Esta fase se centra en la recopilación de información y en la definición de los requerimientos del proyecto. El objetivo es entender a fondo el problema, los usuarios involucrados y los resultados esperados.

Aplicado al TIC:

- Se definen los objetivos de la simulación: analizar la calidad de las comunicaciones ópticas inalámbricas subacuáticas.
- Se identifican las métricas clave a evaluar: velocidad de transmisión, BER, SNR, atenuación, turbidez, latencia, etc.
- Se especifica la topología punto a punto como estructura base del modelo.
- Se determinan las herramientas y software a utilizar, como MATLAB para la simulación.
- Se recopila información sobre las condiciones ambientales del entorno subacuático: turbidez, profundidad, ruido ambiental, temperatura, entre otros.

b) Planeación

Descripción general:

En esta fase se realiza una planificación detallada del proyecto, estableciendo las etapas de desarrollo, los tiempos de entrega y los recursos necesarios.

Aplicado al TIC:

- Se divide el proyecto en incrementos que se entregarán de forma secuencial. Por ejemplo:
 - Incremento 1: Implementación de un canal subacuático ideal (sin pérdidas).
 - Incremento 2: Inclusión de atenuación y otros efectos de absorción.
 - Incremento 3: Adición de scattering y ruido ambiental.
 - Incremento 4: Cálculo de métricas finales (BER, SNR, latencia).
- Se establecen plazos de entrega para cada incremento y se asigna un tiempo específico para pruebas.
- Se organiza un cronograma con hitos y tareas que permitan un avance controlado del proyecto.

c) Modelado (Análisis y Diseño)

Descripción general:

En esta fase se realiza el diseño y análisis del sistema, desarrollando modelos conceptuales y matemáticos para resolver el problema. Se sientan las bases para la implementación del sistema.

Aplicado al TIC:

- Se construye el modelo matemático del canal óptico subacuático, incluyendo:
 - Fórmulas de atenuación y absorción de la luz en agua.
 - Efectos de scattering en diferentes profundidades y niveles de turbidez.
- Se diseña un sistema modular donde cada componente del enlace (transmisor, canal, receptor) se desarrolla por separado.
- Se preparan algoritmos para calcular métricas de calidad, como BER, SNR y latencia.
- Se asegura que el modelo sea escalable, permitiendo agregar nuevas funcionalidades en incrementos posteriores.

d) Construcción (Código y Prueba)

Descripción general:

En esta fase se lleva a cabo la implementación y pruebas del sistema, desarrollando el código de manera incremental y validando cada funcionalidad a medida que se completa.

Aplicado al TIC:

- Se realiza la implementación progresiva del modelo de simulación en MATLAB:
 - Incremento 1: Implementación del canal ideal sin pérdidas (transmisor-receptor directo).
 - Incremento 2: Adición de atenuación y absorción en el canal óptico subacuático.
 - Incremento 3: Introducción de efectos ambientales como scattering y ruido ambiental.
 - Incremento 4: Integración de métricas de calidad para evaluar el enlace (BER, SNR, latencia).
- Se realizan pruebas parciales en cada incremento para validar los resultados obtenidos.
- Se documentan los errores o ajustes necesarios para mejorar el rendimiento de la simulación.

e) Despliegue (Entrega y Retroalimentación)

Descripción general:

En esta fase se entregan las versiones parciales del sistema y se recopila retroalimentación para mejorar las iteraciones futuras. La entrega final consolida todos los incrementos anteriores.

Aplicado al TIC:

- Al final de cada incremento, se analizan y documentan los resultados obtenidos para identificar posibles mejoras.

- Se evalúa el comportamiento del modelo bajo diferentes condiciones ambientales (profundidad, turbidez, temperatura).
- Se entregan los resultados finales de la simulación, incluyendo:
 - Comparación de métricas: velocidad de transmisión, BER, SNR, etc.
 - Gráficos y análisis que muestran el desempeño del enlace en distintos escenarios.
- Se prepara la documentación completa que respalda los resultados, conclusiones y recomendaciones del sistema simulado.

3.3. Metodología de Simulación Basada en Agentes

La simulación basada en agentes (ABMS, por sus siglas en inglés) es una técnica avanzada utilizada para modelar sistemas complejos, donde múltiples entidades autónomas, denominadas agentes, interactúan entre sí y con su entorno. Los agentes, que pueden representar individuos, grupos, u organizaciones, son diseñados con atributos específicos y reglas de comportamiento que les permiten tomar decisiones de manera autónoma. Este enfoque es particularmente útil para estudiar fenómenos en los que las interacciones locales generan patrones emergentes, los cuales no son evidentes a partir de los comportamientos individuales (Macal & North, 2019).

El modelo ABMS se desarrolla en un entorno simulado que replica características clave del sistema real. Este entorno proporciona el contexto en el que los agentes actúan, influyen en otros agentes y son influenciados por factores externos. Un elemento distintivo de esta metodología es su capacidad para integrar adaptabilidad y aprendizaje, permitiendo a los agentes modificar sus decisiones o estrategias en respuesta a cambios en el sistema o al comportamiento de otros agentes. Este dinamismo hace de la simulación basada en agentes una herramienta poderosa para explorar sistemas económicos, sociales, ecológicos y tecnológicos (Bonabeau, 2022).

La implementación de ABMS sigue varias etapas: primero, se define el sistema y los agentes que lo componen, incluyendo sus atributos y reglas de interacción. Posteriormente, el modelo se implementa en plataformas computacionales como NetLogo, AnyLogic o lenguajes como Python. Una vez configurado, el modelo se somete a simulaciones iterativas para observar los resultados a nivel macro que emergen de las interacciones a nivel micro. Estas simulaciones son analizadas para identificar patrones, validar hipótesis y realizar predicciones que pueden informar la toma de decisiones en el mundo real (Railsback & Grimm, 2021).

3.4. Métricas del Entorno de Simulación

Las comunicaciones ópticas subacuáticas presentan diferentes métricas o parámetros únicos que influyen en el comportamiento de la transmisión de información a través de una comunicación óptica. Estas métricas cuentan con una variabilidad predefinida entre mínimo y máximo, debido a esto tenemos que factores como la atenuación de la señal, la turbidez y el ruido ambiental, que afectan la propagación de las señales ópticas a través del agua. La atenuación depende de las características ópticas del agua, como su claridad y composición, variando entre 0.1 dB/m en aguas claras y hasta 3.5 dB/m en aguas turbias de acuerdo (Kaushal & Kaddoum, 2016). Además, la velocidad de transmisión en estos sistemas puede oscilar entre 0.1 y 1.5 Gbps, con un BER que varía entre 10^{-6} y 10^{-3} , dependiendo de las condiciones de operación. La profundidad y las distancias horizontales también son factores limitantes, afectando el rendimiento del enlace óptico (Zhang et al., 2024).

Para una comunicación eficiente, se deben considerar otros parámetros como la temperatura del agua, que influye en la refracción de la luz, y el índice de refracción del agua, que generalmente se encuentra entre 1.33 y 1.36 (Hanson & Radic, 2020). El ruido ambiental, causado por fuentes bioluminiscentes y la luz solar, también puede afectar la calidad de la señal, lo que hace necesario ajustar la potencia de los transmisores y la dirección de los haces

ópticos. La latencia y la tasa de absorción óptica son otros factores críticos para garantizar una comunicación estable, especialmente a mayores distancias.

3.4.1. Métricas para el modelado de una UWC

El modelado de un sistema de comunicaciones ópticas subacuáticas requiere el uso de métricas físicas y ambientales que permitan caracterizar el entorno y las condiciones en las que se propaga la señal óptica. Factores como la **turbidez**, la **atenuación**, la **profundidad del agua** y la **temperatura** influyen directamente en la propagación, absorción y dispersión de la luz. Estas métricas permiten construir modelos precisos que simulen la transmisión óptica en diferentes escenarios acuáticos, ayudando a prever el comportamiento del canal y optimizar el rendimiento del sistema. A continuación, en la

Tabla 8, se especifica a detalle métricas utilizadas para desarrollar trabajos similares:

Tabla 8

Métricas para el modelado de una UWC

Métrica	Descripción	Valores Típicos	Referencia
Velocidad de Transmisión (Mbps)	Representa la cantidad de información transmitida por segundo en el canal.	1 Mbps - 1 Gbps, dependiendo del tipo de modulación y turbidez.	Zhang, et al. (2016), <i>Optical Underwater Communications</i> .
Atenuación (dB/m)	Pérdida de potencia de la señal óptica debido a absorción y dispersión en el agua.	0.05 - 0.5 dB/m para agua clara, 2 - 10 dB/m para agua turbia.	Jaruwatanadilok, S. (2008), <i>Underwater Wireless Optical Communication</i> .
Turbidez (NTU)	Medida de la claridad del agua, que afecta la dispersión y absorción de la señal óptica.	0.1 - 1 NTU (agua clara); >10 NTU (agua muy turbia).	Kaushal, H., & Kaddoum, G. (2016), <i>Underwater Optical Wireless Communication</i> .
Profundidad (m)	Distancia vertical que debe recorrer la señal óptica bajo el agua.	0.5 - 100 m, dependiendo del sistema.	Ahmed, M., et al. (2020), <i>Modeling of UOWC Systems</i> .
Ruido Ambiental (dBm)	Ruido generado por fuentes naturales (luz	-50 dBm a -80 dBm.	Wang, et al. (2019), <i>Performance Analysis</i>

	solar) o artificiales (luces de barcos).		<i>of UOWC in Turbulent Channels.</i>
Temperatura del Agua (°C)	Influye en las propiedades ópticas del agua y el índice de refracción.	0°C - 30°C.	Mobley, C. D. (1994), <i>Light and Water: Radiative Transfer in Natural Waters.</i>
Tasa de Absorción (m⁻¹)	Describe cuánta luz es absorbida por el agua en una longitud específica.	0.01 - 0.2 m ⁻¹ para agua clara, >0.5 m ⁻¹ en agua turbia.	Chowdhury, M., et al. (2021), <i>UOWC Absorption Models.</i>
Distancia Horizontal (m)	Separación horizontal entre transmisor y receptor bajo el agua.	1 m - 200 m, según el nivel de atenuación.	Jaruwatanadilok, S. (2008), <i>Underwater Wireless Optical Communication.</i>
Índice de Refracción	Describe cómo la luz se curva al pasar por el agua; varía con la salinidad y temperatura.	1.33 (agua dulce) - 1.35 (agua salada).	Mobley, C. D. (1994), <i>Light and Water.</i>

Nota. Las métricas definidas en la tabla establecen parámetros utilizados en trabajos de investigación realizados previamente sobre UWCs.

3.4.2. Métricas para Evaluar la Calidad de una UWC

La calidad de un sistema de comunicaciones ópticas subacuáticas se determina a través de indicadores clave que miden su desempeño en términos de fiabilidad y eficiencia. Entre estas métricas destacan la **tasa de error de bits (BER)**, la **relación señal a ruido (SNR)**, la **velocidad de transmisión** y la **latencia**, que permiten evaluar la integridad de los datos transmitidos y la capacidad del canal. Estas mediciones son fundamentales para determinar la viabilidad del sistema en aplicaciones prácticas, ya que reflejan cómo el entorno subacuático impacta la transmisión de información y su eficiencia. A continuación, en la Tabla 9, se especifica a detalle métricas utilizadas para desarrollar trabajos similares:

Tabla 9

Métricas para evaluar la calidad de un UWC

Métrica	Descripción	Valores Típicos	Referencia
BER (Bit Error Rate)	Proporción de bits recibidos con error respecto al total transmitido.	10 ⁻³ a 10 ⁻⁶ según la calidad del canal.	Zhang, et al. (2016), <i>Optical Underwater Communications.</i>

Velocidad de Transmisión	Cantidad de datos transmitidos por unidad de tiempo en el sistema óptico.	1 Mbps - 1 Gbps.	Kaushal, H., & Kaddoum, G. (2016), <i>Underwater Optical Wireless Communication</i> .
Latencia (ms)	Tiempo que tarda la señal en transmitirse desde el emisor hasta el receptor.	1 ms - 100 ms, según la distancia y el medio.	Wang, et al. (2019), <i>Performance Analysis of UOWC in Turbulent Channels</i> .
SNR (Signal-to-Noise Ratio)	Relación entre la potencia de la señal recibida y la potencia del ruido.	20 dB - 40 dB.	Jaruwatanadilok, S. (2008), <i>Underwater Wireless Optical Communication</i> .
Pérdida de Paquetes (%)	Porcentaje de paquetes de datos perdidos durante la transmisión.	0.01% - 5% en condiciones moderadas.	Ahmed, M., et al. (2020), <i>Modeling of UOWC Systems</i> .
Relación Potencia/Distancia	Medida de cómo disminuye la potencia de la señal conforme aumenta la distancia.	Depende del nivel de atenuación del agua.	Chowdhury, M., et al. (2021), <i>UOWC Absorption Models</i> .
Jitter (ms)	Variación del tiempo de llegada de los paquetes transmitidos.	1 ms - 10 ms.	Kaushal, H., & Kaddoum, G. (2016), <i>Underwater Optical Wireless Communication</i> .

Nota. Las métricas definidas en la tabla establecen parámetros utilizados en trabajos de investigación realizados previamente sobre UWCs.

3.5. Entorno de Simulación

El entorno de simulación se desarrolla en MATLAB, utilizando una **topología punto a punto** que representa la transmisión de datos entre un transmisor óptico y un receptor, conectados directamente a través de un canal subacuático. Los parámetros principales del entorno se definen considerando las características de la propagación de la luz azul en medios subacuáticos, así como los factores que afectan la calidad de la comunicación.

3.5.1. Componentes del Sistema

1. Transmisor Óptico:

- Fuente de luz azul (longitud de onda: ~470 nm) modelada como un emisor LED o láser.
- Modulación digital (por ejemplo, OOK, QAM o PSK) para la señalización de datos.
- Potencia de transmisión configurable para evaluar el impacto en la calidad de la comunicación.

2. Canal Subacuático:

- Modelo del canal que incluye los efectos de:
 - **Atenuación:** Pérdida de potencia de la señal debido a la absorción y dispersión en el agua.
 - **Scattering:** Difusión de luz causada por partículas en suspensión.
 - **Ruido ambiental:** Incluye ruido óptico y lumínico subacuático.
 - **Distancia:** Varía entre 1 y 50 metros, dependiendo del rango de interés.

3. Receptor Óptico:

- Fotodiodo o sensor óptico modelado para convertir la señal luminosa en eléctrica.
- Filtro pasa banda para mitigar ruido no deseado.
- Decodificación de la señal utilizando algoritmos de detección de errores.

3.5.2. Métricas de Evaluación

1. Velocidad de Transmisión (Data Rate):

- Se evalúan velocidades en el rango de Kbps a Mbps, dependiendo de las condiciones del canal.

2. Tasa de Error de Bits (BER):

- Se calcula para diferentes niveles de potencia, distancia y ruido.

- Se espera un BER menor a 10^{-3} para comunicación confiable.

3. Latencia:

- Tiempo que tarda en propagarse la señal entre el transmisor y el receptor.
- Afectada principalmente por la distancia y el procesamiento en el receptor.

3.5.3. Configuración de Parámetros

- **Características del agua:** Se simulan condiciones de aguas claras, costeras y turbias mediante la variación del coeficiente de atenuación.
- **Distancia entre nodos:** Se evalúan rangos de 1 a 50 metros para determinar la viabilidad de la comunicación.
- **Potencia de la fuente de luz:** Se varía para observar el impacto en la cobertura y calidad del enlace.

4. Escenarios de Simulación

- El escenario de simulación representa una comunicación punto a punto en un entorno subacuático, donde un nodo transmisor óptico envía información mediante luz azul hacia un nodo receptor ubicado a una distancia definida. El medio acuático simulado incorpora condiciones variables como turbidez, ruido ambiental y temperatura, que afectan la propagación óptica. El objetivo es evaluar métricas clave como la tasa de transmisión, el BER y la latencia bajo diferentes condiciones del entorno, utilizando agentes virtuales para modelar tanto los nodos como las características físicas del canal subacuático.

3.5.4. Funcionalidad

Tomando en cuenta las necesidades identificadas para la simulación de comunicaciones ópticas inalámbricas basadas en luz azul en entornos subacuáticos, el sistema a desarrollar contará con soporte para las siguientes funciones principales:

- **Definición de nodos en un entorno tridimensional.** El sistema permitirá la configuración de un nodo transmisor y un nodo receptor utilizando coordenadas x , y , z . Los usuarios podrán definir la posición de ambos nodos dentro de un área que represente el entorno subacuático, asegurando una comunicación directa entre ambos.
- **Simulación de la propagación de luz azul entre nodos.** La aplicación calculará la trayectoria óptica desde el nodo transmisor hacia el nodo receptor, considerando fenómenos como dispersión, absorción, atenuación y refracción de la luz azul. Se simulará el impacto de estas variables en el desempeño de la comunicación.
- **Exportación de datos y resultados.** Los resultados de la simulación, como la tasa de error de bits (BER), la velocidad de transmisión y la latencia, se podrán exportar. Esto permitirá a los investigadores analizar y documentar el desempeño de la comunicación punto a punto bajo diferentes condiciones.
- **Visualización de métricas clave.** La interfaz del sistema proporcionará gráficos que mostrarán la evolución de las métricas principales durante la simulación, ofreciendo una comprensión visual del impacto de las condiciones subacuáticas en la comunicación.

3.5.5. Características de los Usuarios

El presente TIC, pretende dotar de un software o herramienta de investigación que permita a estudiantes, docentes e interesados en la comprensión de redes de comunicaciones inalámbricas subacuáticas basadas en luz azul.

3.5.6. Selección de Software de Simulación

En el proceso de desarrollo de la tesis fue necesario realizar una evaluación comparativa de distintas herramientas de simulación con el fin de identificar aquella que mejor se ajuste a los objetivos planteados.

De acuerdo con la Tabla 10, se ha identificado diferentes softwares que presentan características particulares en cuanto a su capacidad para modelar el medio físico, el soporte para comunicación óptica, la facilidad de uso mediante interfaces gráficas y el tipo de licencia disponible. Esta revisión permitió valorar fortalezas y limitaciones de cada alternativa, enfocándose en la necesidad de contar con un entorno flexible que combine precisión en los cálculos físicos con la posibilidad de implementar de manera personalizada técnicas de modulación y visualización.

Bajo este análisis, MATLAB en conjunto con App Designer se presenta como la opción más adecuada, ya que integra capacidades numéricas y de visualización en una plataforma que facilita la interacción y la adaptación del modelo a las condiciones específicas del medio subacuático.

Tabla 10

Comparativa de softwares de simulación.

Software	Tipo de simulación	Capacidad para modelar medio físico	Soporte para comunicación óptica	Interfaz gráfica	Licencia	Adecuación al proyecto
MATLAB + App Designer	Numérica y visual (modelado físico y lógico)	Alta (cálculo manual de coeficientes físicos, propagación, dispersión)	Soporte personalizado (implementación manual de modulación óptica, como PPM)	Alta (App Designer permite crear controles, visualizaciones y simulaciones interactivas)	Comercial	Alta: permite simulación óptica personalizada con visualización e interfaz integrada
OMNeT++ + INET Framework	Discreta orientada a eventos (redes)	Limitada (no modela directamente medios físicos ópticos, requiere extensión o código adicional)	No nativo (principalmente RF y redes digitales, no ópticas)	Media (visualización basada en módulos de red, no en variables físicas)	Libre	Media: excelente para modelado de redes, pero inadecuado para simular propagación

							óptica o medio acuático
NS-3	Discreta, eventos en redes de comunicación	Muy limitada (no orientado a medios físicos, enfoque en protocolos)	No implementado (orientado a radiofrecuencia, WiFi, LTE)	Baja (no incluye diseño visual interactivo)	Libre		Baja: orientado a redes a nivel de protocolo, no simula canal óptico ni medio subacuático
COMSOL Multiphysics	Física continua (FEM, propagación de ondas, óptica)	Muy alta (modelado tridimensional de propiedades ópticas del agua, dispersión, absorción)	Alta (módulo óptico dedicado, simulación detallada de propagación lumínica)	Media (visualización técnica, no interactiva)	Comercial (muy costoso)		Media-Alta: excelente para simulación física, pero complejo para implementar lógica de red o modulación personalizada
OptiSystem	Comunicación óptica punto a punto	Media (condiciones estándar de canal óptico, no específicas del medio acuático)	Alta (orientado a fibras y enlaces ópticos visibles)	Baja (entorno cerrado, limitado a parámetros preestablecidos)	Comercial		Media: potente en comunicaciones ópticas, pero limitado para personalización del canal subacuático y parámetros ambientales

3.5.7. Validación de Software

La evaluación de calidad de un software resulta fundamental cuando se seleccionan herramientas para simulaciones críticas en entornos académicos y científicos. En este contexto, **MATLAB** ha sido elegido entorno de desarrollo y simulación del sistema de comunicaciones ópticas subacuáticas. Para validar el uso de este software, se ha optado por la normativa **ISO/IEC 25010**, el cual evalúa el software mediante nueve características definidas, además de subcaracterísticas que abarcan aspectos funcionales, de rendimiento, seguridad, compatibilidad, mantenibilidad, entre otros (ISO, 2023).

A continuación, en la **Tabla 11** se muestra la evaluación de **MATLAB** conforme a dicho modelo:

Tabla 11

Validación del Software Matlab a través de la normativa ISO/IEC 25010.

Característica	Subcaracterística	Evaluación	Justificación
----------------	-------------------	------------	---------------

Adecuación funcional	Complejidad funcional	✓	Amplias funciones para simulación, modelado y análisis.	
	Corrección funcional	✓	Resultados precisos y verificados científicamente.	
	Pertinencia funcional	✓	Altamente pertinente en ingeniería y ciencias aplicadas.	
Eficiencia de desempeño	Comportamiento temporal	✓	Procesamiento rápido, especialmente en hardware moderno.	
	Utilización de recursos	✓	Uso eficiente de CPU/RAM con scripts optimizados.	
	Capacidad	✓	Maneja grandes volúmenes de datos y operaciones.	
Compatibilidad	Coexistencia	✓	Se integra con otros entornos sin conflicto.	
	Interoperabilidad	✓	Comunicación con otros lenguajes y dispositivos.	
Capacidad de Interacción	Reconocibilidad de adecuación	✓	Interfaz clara en App Designer y entorno principal.	
	Aprendizabilidad	✓	Buena documentación y ejemplos prácticos.	
	Operabilidad	✓	Interfaz gráfica personalizable.	
	Protección frente a errores	✓	Mensajes de error explicativos.	
	Involucración del usuario	✓	Diseño centrado en el usuario técnico.	
	Inclusividad	✓	Compatible con configuraciones de accesibilidad.	
	Asistencia al usuario	✓	Comunidad y soporte técnico activo.	
	Autodescriptividad	✓	Funciones con documentación integrada.	
	Fiabilidad	Ausencia de fallos	✓	Alta estabilidad operativa.
		Disponibilidad	✓	Funcionamiento continuo sin interrupciones.
Tolerancia a fallos		✓	Capacidad de manejar errores sin colapso.	
Recuperabilidad		✓	Soporte para guardar y restaurar proyectos.	
Seguridad	Confidencialidad	✓	Control de acceso a archivos y funciones.	

	Integridad	✓	Procesamiento sin alterar los datos.
	No-repudio	✗	No incorpora trazabilidad ni verificación de usuarios de forma nativa.
	Responsabilidad	✓	Capacidad de trazabilidad en los procesos.
	Autenticidad	✗	No incluye autenticación de usuarios en su interfaz por defecto.
	Resistencia	✓	Soporta errores sin comprometer la integridad del sistema.
Mantenibilidad	Modularidad	✓	Estructura por módulos (scripts, funciones).
	Reusabilidad	✓	Código fácilmente reutilizable.
	Analizabilidad	✓	Depurador paso a paso y analizador de rendimiento.
	Modificabilidad	✓	Flexible y editable por el usuario.
	Capacidad de ser probado	✓	Incluye framework de pruebas automatizadas.
Flexibilidad	Adaptabilidad	✓	Funciona en Windows, Linux y macOS.
	Escalabilidad	✓	Adaptable a distintos tamaños de proyecto.
	Instalabilidad	✓	Instalación sencilla con asistentes GUI.
	Reemplazabilidad	✓	Puede integrarse o cambiarse por otros entornos si es necesario.
Protección	Restricción operativa	✗	Requiere configuraciones externas para definir restricciones de usuario.
	Identificación de riesgos	✗	No posee un sistema nativo de gestión de riesgos.
	Protección ante fallos	✓	Guarda registros y permite depuración.
	Advertencia de peligro	✗	Las advertencias dependen del diseño del script.
	Integración segura	✗	No está diseñado para contextos de alta seguridad.

3.5.8. Interfaces Externas

El sistema de simulación para analizar comunicaciones ópticas inalámbricas basadas en luz azul en entornos subacuáticos contará con una GUI (Graphical User Interface, Interfaz Gráfica de Usuario) diseñada en App Designer de MATLAB. Esta interfaz será la principal herramienta para que los usuarios operen y manipulen las funciones del software, permitiendo una experiencia intuitiva y eficiente.

La GUI incluirá una **Ventana Principal**, que será el punto de inicio del simulador. En esta ventana se integrarán los siguientes elementos clave:

a) Botones y elementos de interacción

La Ventana Principal contará con botones que permitirán al usuario realizar acciones fundamentales, como:

- Definir y posicionar nodos (transmisor y receptor) en un plano bidimensional.
- Configurar parámetros de los nodos, como potencia de transmisión y sensibilidad.
- Ingresar valores para los parámetros del entorno, como dispersión, absorción y atenuación.
- Ejecutar la simulación de transmisión de datos punto a punto.
- Exportar resultados de la simulación.

b) Campos para configuración de parámetros

La interfaz incluirá campos interactivos donde el usuario podrá especificar las características del nodo transmisor, el receptor y las condiciones del medio subacuático. Estos parámetros se usarán para personalizar la simulación según los escenarios deseados.

c) Área de visualización de resultados

La mayor parte del espacio estará dedicada a un área gráfica donde se mostrarán los nodos en un entorno bidimensional. Esta área incluirá:

- Representación visual de los nodos como puntos en el plano.
- La ruta de comunicación óptica resaltada con un color distintivo para facilitar su identificación.
- Gráficos adicionales que presenten las métricas clave (BER, latencia, velocidad de transmisión) en tiempo real o al finalizar la simulación.

d) **Panel de comparación de resultados**

La GUI permitirá comparar resultados de simulaciones previas directamente en el área de visualización, usando diferentes colores y etiquetas para las rutas simuladas. Esto facilitará el análisis y la evaluación de diferentes configuraciones o condiciones del entorno.

3.6 Establecimiento de Requerimientos

En este apartado, se detallarán los requerimientos necesarios para la implementación de una simulación basada en agentes que evalúe una UWC basada en luz azul. Mediante la **Metodología de Simulación Basada en Agentes**, desarrollada inicialmente por Thomas Schelling en la década de 1970, de modo que, se centra en el uso de agentes autónomos que interactúan dentro de un entorno definido. Cada agente sigue reglas específicas y simula comportamientos individuales que, en conjunto, permiten comprender fenómenos complejos (García & Medina, 2011).

Esta metodología se adapta perfectamente al análisis de comunicaciones subacuáticas, ya que los agentes pueden representar nodos ópticos, partículas del medio (como dispersores o atenuadores), y factores ambientales que afectan la propagación de la luz azul. De modo que, se puede definir de forma específica diferentes tipos de agentes como lo son: experimentos virtuales, agentes virtuales y el entorno (García & Medina, 2011).

3.6.1. Descripción General

García (2011), menciona que la simulación Basada en Agentes se basa en un método informático que comprende el proceso de construcción y modelado de agentes que interactúan entre si dentro de un entorno, a este proceso se le denomina experimento virtual. Lo cual, implica que en cada experimento virtual se requiere definir: quiénes son los agentes y cuál es su entorno (García & Medina, 2011).

3.6.2. Suposiciones y Dependencias

Existe una gran variedad de nodos ópticos subacuáticos con características diversas, cada uno optimizado para distintas aplicaciones y condiciones ambientales. Algunos nodos pueden ofrecer beneficios específicos, como mayor alcance, menor atenuación o eficiencia energética, pero también requieren configuraciones avanzadas que incrementan la complejidad de su simulación.

En el contexto de esta investigación, dado que el enfoque principal es evaluar una UWC basa en luz azul, se optará por representar los nodos como **dispositivos genéricos punto a punto**. Estos nodos tendrán configuraciones básicas y homogéneas, sin atributos especiales que puedan sobrecargar los recursos de procesamiento de la simulación.

Bajo este criterio:

- **El nodo transmisor** se representará como un emisor genérico de luz azul, capaz de transmitir datos ópticos hacia un receptor bajo condiciones controladas de propagación subacuática.
- **El nodo receptor** será un dispositivo genérico que capte y procese la señal óptica recibida, evaluando métricas como la tasa de error de bits (BER) y la calidad de la señal.

El software desarrollado con la ayuda de AppDesigner de Matlab, estará pensado para ser una herramienta ejecutable, es decir, que cuente con una extensión **.exe**.

3.6.3. *Requerimientos según el enfoque de Agentes*

En este apartado, se definirán detalladamente los requerimientos que permitirán diseñar un sistema de simulación basado en agentes para analizar las comunicaciones ópticas inalámbricas basadas en luz azul. Es esencial que estos requerimientos sean claros, precisos y adaptados a las características de esta metodología de “Simulación Basada en Agentes (ABM)”, permitiendo su correcta implementación y evaluación.

García (2011), menciona que las ABM del tipo “Lenguajes y Entornos de Programación”, se orientan a diferentes lenguajes de programación con sus correspondientes librerías o del mismo modo empleando diferentes entornos que permitan crear, ejecutar y visualizar resultados.

A continuación, se definen los requerimientos del sistema de simulación basado en agentes, organizado en tres categorías: experimentos virtuales definidos en la Tabla 12, agentes virtuales pertinentes a la Tabla 13 y entorno correspondiente a la Tabla 14. Esta estructura permite modelar de forma precisa el comportamiento de las comunicaciones ópticas con luz azul en ambientes subacuáticos.

a) Experimentos Virtuales (Agente Controlador)

Tabla 12

Listado de requerimientos basado en Experimentos Virtuales.

ID	Requerimiento	Descripción	Criterio de Aceptación
EV-RQ01	Configuración de escenarios	El sistema debe permitir configurar diferentes condiciones experimentales como temperatura, turbidez, potencia de emisión, sensibilidad del receptor, entre otras.	El usuario puede ajustar todos los parámetros a través de la interfaz gráfica de la aplicación.
EV-RQ02	Registro de resultados	Cada experimento debe generar datos de salida con métricas como tasa de bits	Se debe presentar un resumen numérico y

		erróneos (BER), distancia máxima alcanzada y velocidad de transmisión.	gráfico al finalizar cada simulación.
EV-RQ03	Comparación de escenarios	El sistema debe permitir comparar el rendimiento de distintas configuraciones experimentales.	Se debe visualizar una tabla o gráfico comparativo entre al menos dos escenarios distintos.
EV-RQ04	Repetición de experimentos	El usuario debe poder repetir cualquier experimento manteniendo los mismos parámetros configurados previamente.	El sistema debe reproducir exactamente el mismo comportamiento al repetir el experimento.

b) Agentes Virtuales (Nodos ópticos: Emisor y Receptor)

Tabla 13

Listado de requerimientos para Agentes Virtuales.

ID	Requerimiento	Descripción	Criterio de Aceptación
AV-RQ01	Emisión de señal óptica	El nodo emisor debe generar una señal modulada de luz azul que se propague a través del entorno.	El sistema debe mostrar el inicio y trayectoria de la señal en la interfaz.
AV-RQ02	Recepción de señal óptica	El nodo receptor debe captar la señal tras atravesar el entorno y calcular su calidad (por ejemplo, mediante el BER).	El sistema debe indicar si la comunicación fue exitosa y mostrar los resultados de la recepción.
AV-RQ03	Configuración de parámetros del nodo	Los nodos deben tener atributos modificables como potencia de emisión, ángulo de apertura, sensibilidad y posición.	Los ajustes deben afectar directamente los resultados del experimento.
AV-RQ04	Visualización de trayectoria óptica	El sistema debe mostrar visualmente la trayectoria de la señal desde el emisor hasta el receptor.	La trayectoria debe reflejar gráficamente cómo la señal atraviesa el entorno según las condiciones configuradas.

c) Entorno (Medio Subacuático)

Tabla 14

Listado de requerimientos enfocados al Entorno.

ID	Requerimiento	Descripción	Criterio de Aceptación
EN-RQ01	Simulación de turbidez	El entorno debe simular el efecto de la turbidez en la dispersión y absorción de la luz azul.	Un aumento en la turbidez debe reducir la distancia efectiva y aumentar el BER.
EN-RQ02	Influencia de la temperatura	El entorno debe incluir un modelo en el que la temperatura afecte las propiedades ópticas del agua y la atenuación de la señal.	La variación de temperatura debe modificar los resultados obtenidos en los experimentos.
EN-RQ03	Ruido ambiental	Debe considerarse un nivel de ruido óptico ambiental que interfiera con la señal.	A mayor ruido, debe observarse un incremento en la tasa de errores de bit.
EN-RQ04	Visualización del entorno	El entorno debe ser representado gráficamente mostrando elementos como turbidez, profundidad y ruido.	El usuario debe ver una representación visual clara del medio simulado, con indicadores de las condiciones actuales.

3.6.7. Requerimientos Futuros

Para el desarrollo de futuras versiones, se proponen las siguientes mejoras que optimizarán la funcionalidad del software y ampliarán sus capacidades:

- Soporte para múltiples nodos y topologías complejas.
- Personalización avanzada de nodos.
- Simulación de fallos en nodos o enlaces.
- Comparación con múltiples tecnologías enfocadas a UWC.
- Integración con bibliotecas de inteligencia artificial.
- Compatibilidad con estándares internacionales de simulación.
- Soporte para análisis estadístico avanzado.
- Integración de hardware real.

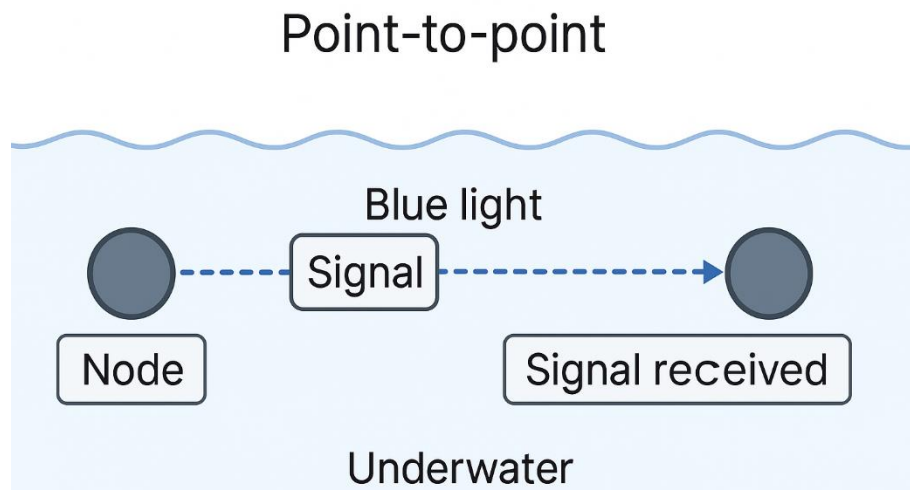
3.7 Diseño del Escenario de Simulación

El escenario de simulación representa un sistema de **comunicación óptica subacuática** modelado en un entorno a una arquitectura P2P como se define en la Figura 8. De modo que,

se ha diseñado para analizar la propagación de señales de luz azul entre un **nodo transmisor** y un **nodo receptor**, considerando las condiciones físicas del medio acuático.

Figura 8

Escenario de simulación P2P.



La simulación se desarrolla en **MATLAB**, utilizando herramientas de modelado matemático y procesamiento de señales para evaluar el desempeño del sistema en diferentes condiciones ambientales.

El espacio de simulación se define en un entorno 3D, donde los nodos están ubicados en coordenadas (x,y,z) y la distancia entre ellos se calcula mediante la fórmula euclidiana tridimensional. El medio acuático se modela con variables como turbidez, absorción y dispersión, las cuales afectan la atenuación de la señal según la Ley de Beer-Lambert. Adicionalmente, se incluye un módulo para comparar el rendimiento de la comunicación óptica con sistemas acústicos, aplicando la fórmula de Thorp para estimar la atenuación del sonido en el agua.

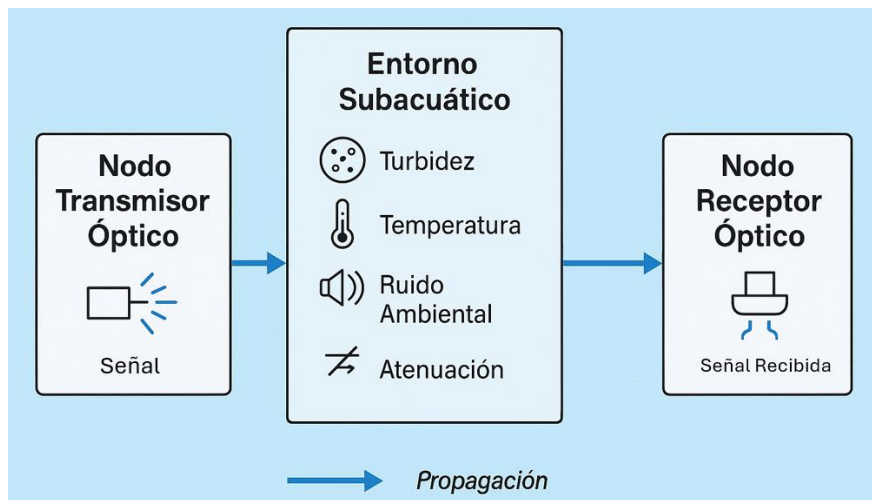
Los parámetros configurables en la simulación incluyen:

- **Potencia del transmisor óptico** (en mW).
- **Longitud de onda de la señal luminosa** (ajustada en el espectro azul).

- **Distancia entre emisor y receptor** (calculada en 3D).
- **Condiciones ambientales** (coeficientes de absorción y dispersión del agua).
- **Ruido óptico ambiental** (para simular interferencias en el canal).

Figura 9

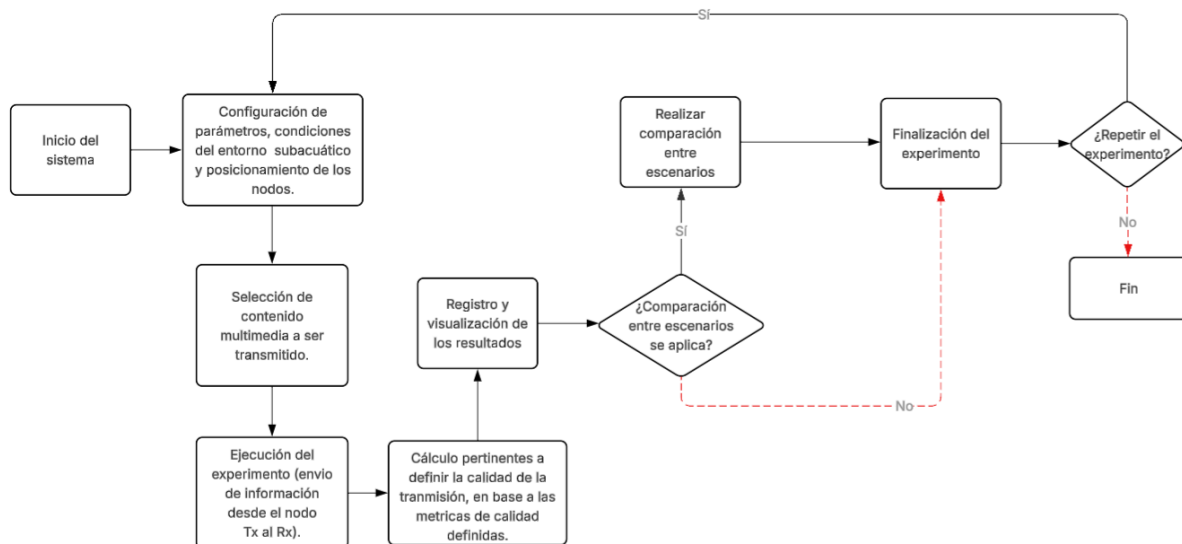
Diagrama de bloques y parámetros que intervienen en la arquitectura de simulación.



A continuación, en la Figura 10 se representa un diagrama de flujo que constituye una representación estructurada del proceso a seguir para el desarrollo de los experimentos planteados en este trabajo. A través de él, se visualizan de manera clara las etapas que conforman la simulación, desde la configuración inicial de los parámetros del entorno y de los nodos, hasta la ejecución, registro y análisis de los resultados. Este esquema permite comprender la secuencia lógica de operaciones, incluyendo aspectos como el cálculo de atenuación, dispersión y BER, así como la posibilidad de realizar comparaciones entre escenarios y la repetición de los experimentos cuando sea necesario.

Figura 10

Diagrama de flujo de la simulación en el software Matlab.



3.8 Métricas de Comparación entre UWC bajo el enfoque Óptico y Acústico

La obtención de métricas específicas para evaluar sistemas de comunicación óptica subacuática no solo permite analizar su rendimiento intrínseco, sino también posibilita la comparación directa frente a tecnologías tradicionales como la comunicación acústica. Esta comparativa es esencial para determinar los escenarios de aplicación más adecuados para cada tipo de tecnología y comprender las ventajas o limitaciones de la transmisión óptica bajo el agua.

Según diversos estudios, los principales parámetros de comparación entre sistemas ópticos y acústicos incluyen:

- **Tasa de transmisión de datos (Data Rate):**

Mientras los sistemas acústicos suelen alcanzar tasas del orden de kilobits por segundo (kbps), las comunicaciones ópticas pueden ofrecer velocidades superiores a gigabits por segundo (Gbps) en distancias cortas (Kaushal & Kaddoum, 2016).

- **Alcance máximo de transmisión:**

La comunicación acústica permite alcanzar distancias de decenas de kilómetros, mientras que la comunicación óptica, aunque limitada típicamente a decenas o cientos de metros, presenta mejor desempeño en escenarios de corto alcance (Hanson & Radic, 2008).

- **Tasa de error de bit (BER):**

En ambientes controlados, las comunicaciones ópticas presentan tasas de error más bajas comparadas con los sistemas acústicos, los cuales son más susceptibles a interferencias, multitrayectoria y fluctuaciones en el canal (Doniec et al., 2013).

- **Latencia:**

Las comunicaciones ópticas ofrecen tiempos de propagación casi instantáneos debido a la alta velocidad de la luz en el agua, en comparación con la velocidad mucho más baja de las ondas acústicas, lo cual genera menor latencia en las transmisiones (Jaruwatanadilok, 2008).

- **Consumo de energía:**

Aunque la energía consumida por los emisores ópticos puede ser considerable, los dispositivos ópticos modernos tienden a ser más eficientes en ambientes donde las distancias no son muy extensas, a diferencia de los sistemas acústicos que requieren mayor potencia para largas distancias (Zeng, Fu, & Zhang, 2017).

Dentro de la Tabla 15, se especifica métricas comparativas entre UWC el enfoque óptico o acústico.

Tabla 15

Parámetros comparativos entre comunicaciones ópticas y acústicas.

Parámetro	Comunicación Óptica Subacuática (UWOC)	Comunicación Acústica Subacuática (UWAC)
Tasa de transmisión	- Hasta 1 Gbps a 250 m con BER de 3.4×10^{-3} (Dong et al., 2024) - 80 Mbps a 50 m con BER < 8.6×10^{-5} (Guo et al., 2024) - 125 Mbps a 30 m en aguas profundas (Zhang et al., 2023)	- 6.4 Mbps utilizando modulación OFDM-SPM (Alraie et al., 2024) - 5.7 kbps en redes de sensores con eficiencia energética mejorada (Ali et al., 2024)
Alcance	- Hasta 250 m con tasas de 1 Gbps (Dong et al., 2024) - 117.7 m estimados para enlaces de luz verde (Zhang et al., 2023)	- Hasta varios kilómetros , dependiendo de la frecuencia y condiciones del canal (Ali et al., 2024)

Tasa de error de bit (BER)	- 3.4×10^{-3} a 250 m con 1 Gbps (Dong et al., 2024) - $< 8.6 \times 10^{-5}$ a 50 m con 80 Mbps (Guo et al., 2024) - $< 10^{-5}$ en enlaces de 30 m en aguas profundas (Zhang et al., 2023)	- 5×10^{-3} con OFDM y asignación de pilotos (Alraie et al., 2024) - Varía según condiciones del canal y técnicas de modulación utilizadas
Latencia	- Muy baja , transmisión casi instantánea debido a la alta velocidad de propagación de la luz en el agua	- Alta , debido a la baja velocidad de propagación del sonido en el agua (~1500 m/s)
Consumo de energía	- Moderado a alto , dependiendo de la potencia del láser y la distancia de transmisión	- Alto , especialmente en largas distancias; se han propuesto marcos como ILAF para mejorar la eficiencia energética en redes acústicas (Ali et al., 2024)

Fuente: Adaptado de Guo (2024); Zhang (2024).

Los estudios recientes no solo se han enfocado en establecer comparaciones conceptuales, sino también en demostrar mediante resultados experimentales y simulaciones el comportamiento de ambos tipos de comunicación bajo diferentes condiciones subacuáticas. La Tabla 16 resume los principales hallazgos reportados en investigaciones relevantes.

Tabla 16

Resultados experimentales de la comparativa óptica y acústica.

Estudio	Principales hallazgos
Dong et al. (2024)	Demostaron una transmisión robusta de 1 Gbps a 250 m con un BER de 3.4×10^{-3} , utilizando un igualador ANN de baja complejidad en un sistema UWOC.
Guo et al. (2024)	Lograron tasas de 80 Mbps a 50 m con un BER inferior a 8.6×10^{-5} , empleando modulación PPM en un sistema UWOC.
Zhang et al. (2023)	Implementaron enlaces UWOC bidireccionales de 125 Mbps a 30 m en aguas profundas (1650 m de profundidad), con una tasa de error de bit inferior a 10^{-5} , demostrando la viabilidad de comunicaciones ópticas de alta velocidad en entornos marinos profundos.
Alraie et al. (2024)	Propusieron una técnica de modulación OFDM-SPM que duplicó la tasa de datos en comunicaciones acústicas subacuáticas, alcanzando 6.4 Mbps con un BER de 5×10^{-3} , mejorando la eficiencia espectral y reduciendo el consumo de energía.
Ali et al. (2024)	Introdujeron el marco ILAF para redes de sensores acústicos subacuáticos, logrando una eficiencia energética mejorada y una tasa de transferencia de datos

3.9 Simulación

La metodología incremental utilizada en este proyecto permite abordar el desarrollo de la simulación de manera iterativa, garantizando una construcción sólida y progresiva de los componentes necesarios para analizar las comunicaciones ópticas inalámbricas basadas en luz azul en entornos subacuáticos. En este contexto, la fase de Modelado y Construcción se posiciona como un eje central, ya que se enfoca en transformar los principios teóricos y las especificaciones iniciales en un modelo funcional que represente las dinámicas del entorno de comunicación estudiado.

En esta fase, se desarrollan las representaciones del entorno, mediante algoritmos de programación que describen las propiedades físicas del medio subacuático, así como las características ópticas de la luz azul en términos de transmisión de datos. Adicionalmente, se implementan estas representaciones en un entorno de simulación, en este caso utilizando MATLAB y su herramienta App Designer, con el propósito de evaluar métricas clave como la velocidad de transmisión, la tasa de error de bits (BER) y la latencia.

El proceso de instalación del software en forma de aplicación se encuentra detallado en el Anexo C. 1. En el mismo contexto, el proceso correspondiente a su desinstalación se detalla dentro del Anexo C. 3.

3.9.1 Codificación

En este segmento se ofrece una explicación minuciosa de las funciones clave que constituyen el código creado para la simulación del sistema de comunicaciones ópticas inalámbricas en ambientes submarinos. El objetivo es detallar cómo se establece la estructura del programa y cómo cada bloque aporta al estudio del comportamiento del canal óptico basado en luz azul. Se tratan tanto las estimaciones requeridas para calcular parámetros como la

distancia de transmisión, el error de bits y la rapidez de transmisión de datos, como también la relación entre las variables físicas y ambientales incorporadas en la interfaz del simulador. El código establecido en archivos de Matlab en formato (.mlapp) se encuentra disponible en el repositorio de GitHub definido en el Anexo A.

- ***Propiedades de acceso público.***

A continuación, se describen las propiedades de acceso público definidas para el entorno de simulación. Estas propiedades permiten la interacción directa entre la interfaz gráfica y los parámetros esenciales del sistema, facilitando tanto la visualización de resultados como la gestión de elementos clave del proceso de simulación. Entre estas propiedades se encuentran los nodos transmisor y receptor, etiquetas destinadas a mostrar métricas como la distancia, la tasa de error de bits (BER), la velocidad de transmisión, la latencia, la pérdida de paquetes y la fluctuación (jitter), así como variables que almacenan la ruta y el tipo de archivo seleccionado por el usuario, ya sea una imagen o un video. Estas propiedades constituyen la base del funcionamiento dinámico de la aplicación desarrollada en Matlab App Designer.

```
1      properties (Access = public)
2      nodeTransmitter % Nodo transmisor
3      nodeReceiver % Nodo receptor
4      DistanceLabel
5      % Etiquetas [Metricas de calidad]
6      BERLabel
7      DataRateLabel
8      LatencyLabel
9      PacketLossLabel
10     JitterLabel
11     BERALabel
12     DataRateALabel
13     LatencyALabel
14     PacketLossALabel
15     JitterALabel
16     SelectedFile % Ruta del archivo seleccionado
17     FileType % Tipo de archivo (imagen o video)
18     end
```

- ***Inicialización de los nodos***

En esta sección se define el posicionamiento tridimensional de los nodos transmisor y receptor dentro del entorno simulado. La ubicación en coordenadas espaciales (X, Y, Z) permite representar con mayor realismo las condiciones de propagación de la señal óptica en un medio subacuático. Este enfoque facilita el cálculo preciso de la distancia entre los nodos y permite analizar cómo influye la geometría del enlace en el desempeño del sistema de comunicaciones ópticas basado en luz azul.

```

1  %*****
2  %      INICIALIZACIÓN DE LOS NODOS EN 3D CON CONTROL DE DISTANCIA      *
3  %*****
4  xlabel(app.SimulationAxes, 'Profundidad (m)');
5  title(app.SimulationAxes, 'Posicionamiento Tridimensional de los Nodos');
6  view(app.SimulationAxes, 3); % Vista 3D
7  grid(app.SimulationAxes, 'on');
8  hold(app.SimulationAxes, 'on');
9  %-----
10 % Control de límites según el estado del switch o spinner
11 %-----
12 distanciaManual = app.distancianodos.Value; % valor del spinner
13 if distanciaManual > 0
14     % --- USO DEL SPINNER ---
15     distancia = distanciaManual;
16     % Generar dirección aleatoria para colocar el receptor a esa distancia
17     % ángulo horizontal aleatorio
18     anguloXY = rand() * 2 * pi;
19     % ángulo vertical controlado (entre 15° y 45°)
20     anguloZ = rand() * (pi/6) + pi/12;
21     % Coordenadas del receptor
22     xReceiver = distancia * cos(anguloXY) * cos(anguloZ);
23     yReceiver = distancia * sin(anguloXY) * cos(anguloZ);
24     zReceiver = -distancia * sin(anguloZ);
25     % Ajustar automáticamente los límites de visualización
26     lim = max(100, distancia);
27     xlim(app.SimulationAxes, [-lim lim]);
28     ylim(app.SimulationAxes, [-lim lim]);
29     zlim(app.SimulationAxes, [-lim 0]);
30 else
31     % --- USO NORMAL DEL SWITCH ---
32     if strcmp(app.Switch1.Value, 'On')
33         % Limitación activada (entorno cercano)
34         maxDist = 1000; % límite máximo de distancia entre nodos
35         xlim(app.SimulationAxes, [-100, 100]);
36         ylim(app.SimulationAxes, [-100, 100]);
37         zlim(app.SimulationAxes, [-100, 0]); % Profundidad de 0 (superficie) a -100 m
38     else
39         % Limitación desactivada (entorno extendido)
40         maxDist = 10000; % distancia máxima ampliada
41         xlim(app.SimulationAxes, [-maxDist/2, maxDist/2]);
42         ylim(app.SimulationAxes, [-maxDist/2, maxDist/2]);
43         zlim(app.SimulationAxes, [-5000, 0]); % más profundidad para grandes distancias

```

```

44     end
45     % Nodo receptor: posición aleatoria dentro del rango permitido
46     xReceiver = rand()*maxDist - maxDist/2;
47     yReceiver = rand()*maxDist - maxDist/2;
48     zReceiver = -abs(rand()*100 + 10); % profundidad aleatoria entre -10 y -110 m
49     distancia = sqrt(xReceiver^2 + yReceiver^2 + zReceiver^2);
50 end

```

- ***Cálculo de parámetros de simulación (Comunicación Óptica)***

En esta sección se realizan los cálculos necesarios para estimar el rendimiento del sistema de comunicación óptica subacuática. Se determina la potencia recibida, la relación señal/ruido (SNR) y la tasa de error de bits (BER) utilizando modulación 4-PPM. A partir de estos valores se calculan parámetros clave como la velocidad de transmisión, la latencia, la pérdida de paquetes y el jitter, permitiendo evaluar el comportamiento del canal en condiciones simuladas.

```

1  % Potencia en mW
2  power_mW = 10^((power_dBm - 30) / 10);
3  % Atenuación total
4  total_attenuation_dB = attenuation_dB_per_m * distance;
5  % Potencia recibida
6  received_power_dBm = power_dBm - total_attenuation_dB;
7  % SNR (dB)
8  snr = received_power_dBm - noise_dBm;
9  snr_linear = 10^(snr / 10);
10 % MODULACIÓN PPM
11 M = 4; % Modulación 4-PPM
12 ber = ((M - 1) / (M * log2(M))) * 0.5 * erfc(sqrt(snr_linear / (2 * (M - 1))));
13 % Velocidad de transmisión
14 % Ancho de banda típico en comunicaciones ópticas subacuáticas (ajustable)
15 B = 10e6; % 10 MHz
16 % Capacidad teórica del canal óptico
17 data_rate_ideal = B * log2(1 + snr_linear);
18 % Data rate efectivo considerando errores
19 data_rate = data_rate_ideal * (1 - ber);
20 % Latencia
21 speed_of_light = 3e8;
22 latency = distance / speed_of_light;
23 % Pérdida de paquetes
24 % packet_loss = max(0, 1 - snr / 10);
25 packet_loss = min(1, ber * 10); % escala proporcional al nivel de error
26 % Jitter
27 latency_variation = randn(1, 10) * 0.05;
28 jitter = std(latency_variation);

```

- ***Cálculo de parámetros de simulación (Comunicación Acústica)***

Para esta sección, se implementa los cálculos requeridos para obtener el rendimiento de la simulación a partir de la tecnología de comunicación acústica. De modo que se aplica los principios definidos por las fórmulas de Mackenzie y Thorp, para la obtención de la velocidad del sonido y la atenuación de la señal acústica respectivamente. De modo que, al igual que en el previo apartado, se obtenga las métricas de evaluación correspondientes al VER, SNR, pérdida de paquetes, jitter, etc.

```

1  % Potencia total transmitida
2  potencia_tx_total = presion_nivel;
3  % Velocidad del sonido (Mackenzie)
4  T = temperatura_C; S = salinidad; D = profundidad;
5  velocidad_sonido = 1448.96 + 4.591*T - 5.304e-2*T^2 + 2.374e-4*T^3 ...
6      + 1.340*(S - 35) + 1.630e-2*D + 1.675e-7*D^2 ...
7      - 1.025e-2*T*(S - 35) - 7.139e-13*T*D^3;
8  % Atenuación con fórmula de Thorp
9  f_kHz = frequency_Hz / 1e3;
10 alpha_dB_per_km = 0.11 * (f_kHz^2) / (1 + f_kHz^2) + ...
11     44 * (f_kHz^2) / (4100 + f_kHz^2) + ...
12     2.75e-4 * f_kHz^2 + 0.003;
13 attenuation_acoustic_dB_per_m = alpha_dB_per_km / 1000;
14 attenuation_acoustic_total = attenuation_acoustic_dB_per_m * distance;
15 % Potencia recibida
16 rx_acoustic_power = potencia_tx_total - attenuation_acoustic_total;
17 % SNR
18 snr_acoustic = rx_acoustic_power - ruido_amb;
19 snr_linear_acoustic = 10^(snr_acoustic / 10);
20 % BER (canal PSK AWGN aproximado)
21 ber_acoustic = 0.5 * exp(-snr_linear_acoustic / 2);
22
23 % Data rate
24 % data_rate_acoustic = 1000 / (1 + ber_acoustic); % bps
25 % Ancho de banda típico para canal acústico (ajustable)
26 B = 2000; % Hz
27 % Capacidad teórica del canal (Shannon)
28 data_rate_ideal = B * log2(1 + snr_linear_acoustic);
29 % Data rate efectivo considerando errores de bits
30 data_rate_acoustic = data_rate_ideal * (1 - ber_acoustic);
31 % Latencia
32 latency_acoustic = distance / velocidad_sonido;
33 % Pérdida de paquetes
34 % packet_loss_acoustic = max(0, 1 - snr_acoustic / 10);
35 packet_loss_acoustic = min(1, ber_acoustic*2); % escala proporcional al nivel de error
36 % Jitter
37 latency_var_acoustic = randn(1, 10) * 0.1;
38 jitter_acoustic = std(latency_var_acoustic);

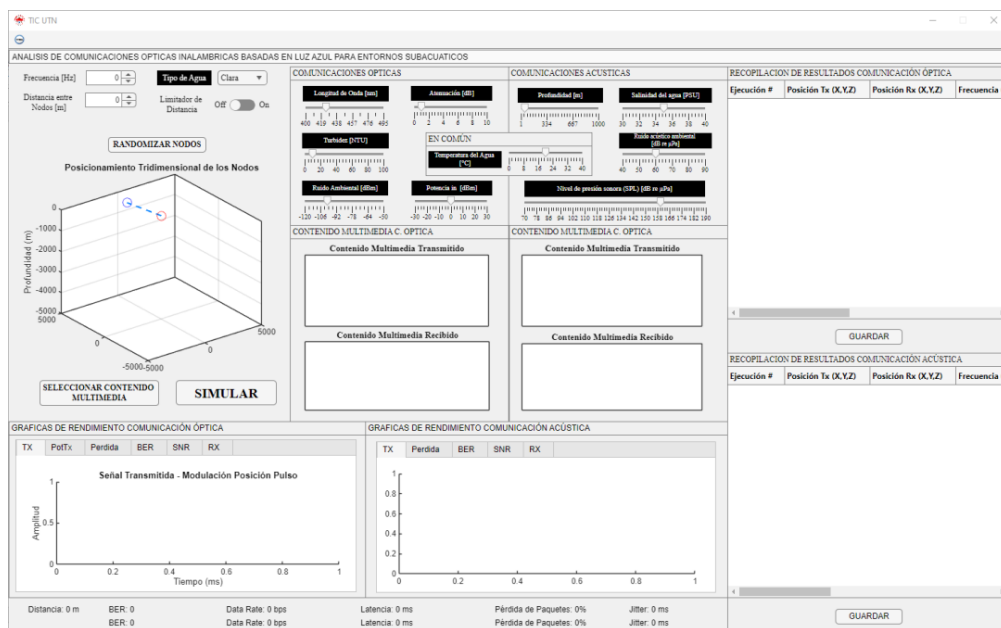
```

3.9.2 Diseño de la Simulación en App Designer

La interfaz gráfica desarrollada en App Designer permite simular y visualizar el comportamiento de un sistema de comunicación óptica en un entorno subacuático y compararlo con la tecnología acústica que es una de las comunicaciones subacuáticas más tradicionales. Esta interfaz integra controles interactivos para ajustar parámetros físicos y ambientales como la atenuación, potencia, longitud de onda, temperatura, turbidez y ruido ambiental. Además, incluye un espacio tridimensional para el posicionamiento de los nodos transmisor y receptor. También incorpora áreas para la visualización de contenido multimedia transmitido y recibido, así como gráficas de rendimiento que muestran métricas clave del sistema, tales como la BER, SNR, pérdida de paquetes. Todo esto facilita una comprensión integral del desempeño del enlace óptico y el enlace acústico bajo distintas condiciones simuladas. Cada uno de los paneles, parámetros configurables y resultados se encuentran detallados en las indicaciones de uso del Anexo C. 2.

Figura 11

Interfaz gráfica desarrollada en App Designer



Capítulo IV: Resultados

El cuarto capítulo presentará los resultados obtenidos de la simulación y la evaluación de la calidad de la comunicación utilizando métricas como eficiencia espectral, tasa de transmisión de datos y latencia. Se discutirán los hallazgos y se analizarán los datos para evaluar la calidad y estabilidad de las comunicaciones ópticas subacuáticas basadas en luz azul en diferentes escenarios simulados. Además, se comparará el rendimiento de las comunicaciones con luz azul frente a tecnologías de comunicación acústica para entornos subacuáticos, identificando ventajas y desventajas de cada enfoque.

4.1 Rendimiento de simulación en App Designer.

Dentro del entorno de simulación desarrollado, el objetivo es analizar y comparar el comportamiento de un sistema de comunicación óptico inalámbrico basado en luz azul, así como su desempeño frente a la tecnología de comunicación acústica.

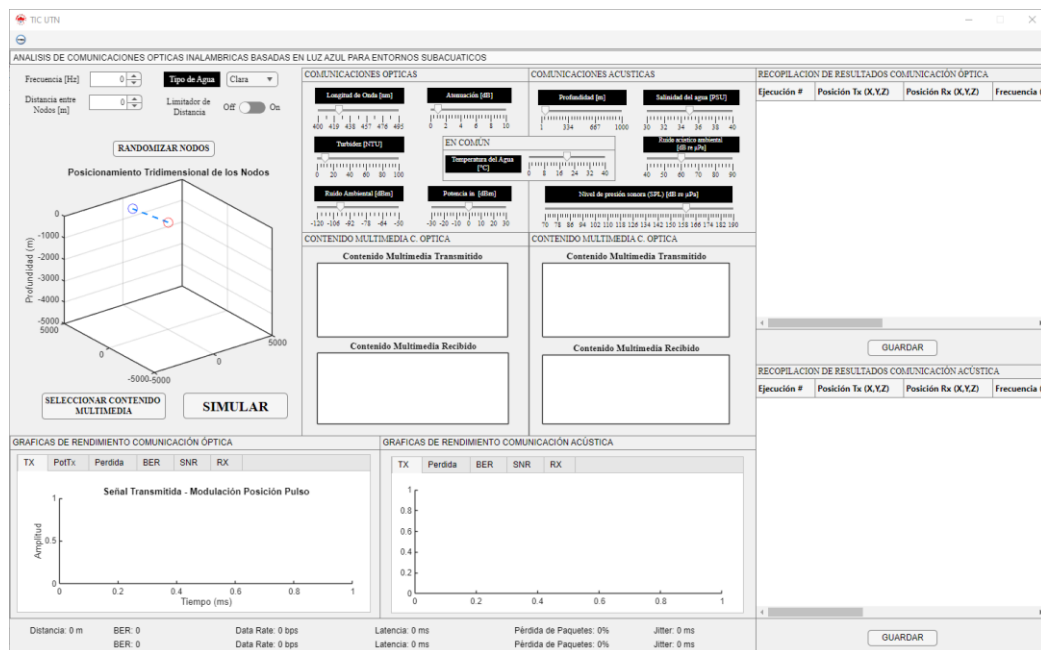
La interfaz desarrollada incluye sliders para modificar parámetros como la potencia óptica, longitud de onda, atenuación, temperatura del entorno, ruido ambiental, turbidez del agua, entre otros factores intrínsecos al medio subacuático y al tipo de comunicación. También incorpora etiquetas para mostrar resultados calculados, así como gráficos que permiten observar el comportamiento de los distintos parámetros.

4.1.1. Vista general de la interfaz App Designer

La interfaz desarrollada contiene diferentes apartados que permiten definir el entorno de simulación, sea bajo la tecnología de comunicación óptica o en su defecto comunicaciones acústicas. Por lo cual, el plano tridimensional representa los nodos que van a llevar a cabo una comunicación P2P usando una frecuencia de operación dada por el usuario, así mismo se asigna valores típicos de cada parámetro en sliders para evaluar el efecto en la transmisión de contenido multimedia.

Figura 12

GUI de la simulación de una comunicación P2P basada en tecnología óptica y acústica con parámetros configurables.



4.1.2. Parámetros de simulación.

Los parámetros establecidos en la interfaz de simulación se encuentran distribuidas en dos secciones. La primera sección como se muestra en la Figura 13, se implementa el ingreso manual de parámetros como la “Frecuencia” que acepta el ingreso en hercios (Hz), teniendo en cuenta su rango de operación hasta 1 (MHz). Por otro lado, se encuentra un selector que permite definir el tipo de escenario subacuático, sea en condiciones de agua clara, costera o turbia. Finalmente, dos ingresos asignados a la delimitación de la distancia del enlace tanto para la tecnología óptica como la acústica. De modo que, al ingresar de forma manual una distancia se otorga preferencia al establecimiento de este valor, o en caso contrario si no se ingresa ningún valor se aplica el limitador de distancia que en su estado “Off” tiene un rango de distancia definido entre 1km a 10km, mientras que en su estado “On” el rango se limita a distancias hasta los 50m que representa la distancia óptima para un enlace óptico.

Figura 13

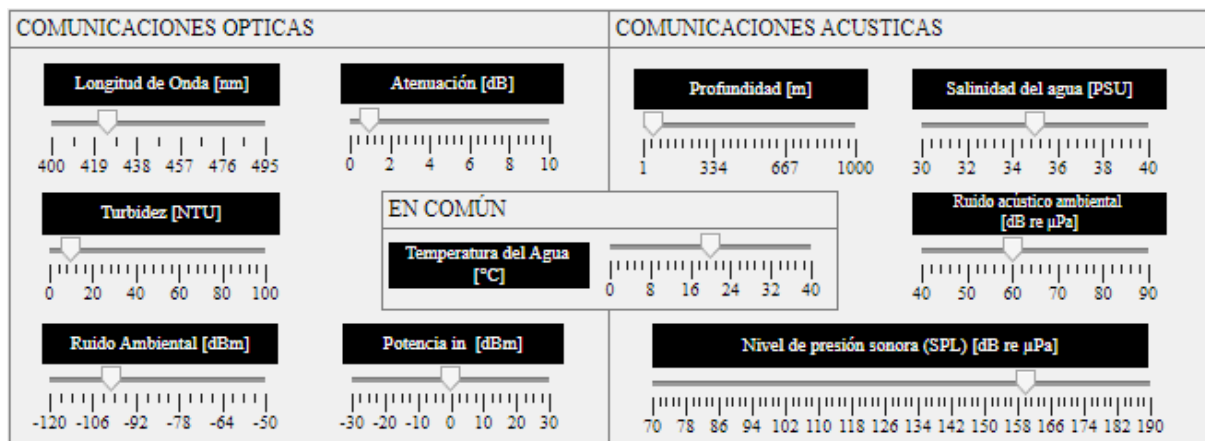
Parámetros de configuración del entorno físico.



Para la segunda sección definida en la Figura 14, se establecen la configuración de parámetros ambientales del entorno subacuático respectivamente a cada tipo de comunicación, teniendo como parámetro en común la temperatura del agua. La configuración de los parámetros ambientales, están directamente relacionados con los cálculos respectivos que permitirán obtener métricas de calidad de la comunicación.

Figura 14

Sliders de configuración de parámetros ambientales de simulación, influyentes directamente en la calidad de la comunicación.



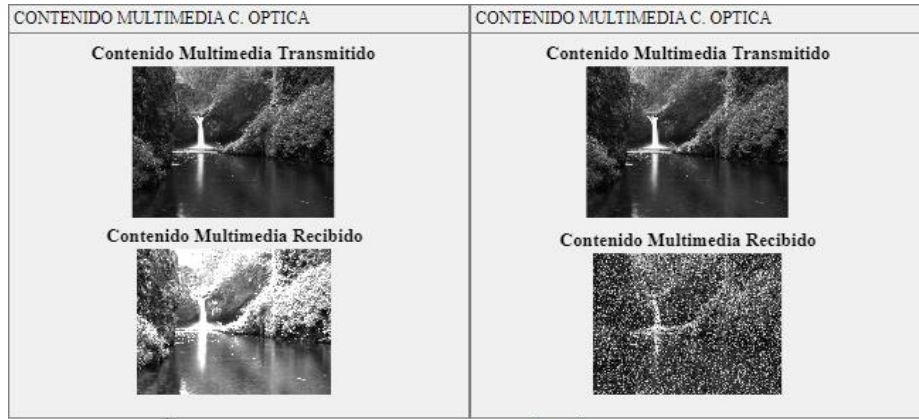
4.1.3. Gráficos generados

La generación de gráficos representa una de las principales funciones de la aplicación desarrollada. Ya que, en estos se pretende obtener una visualización aproximada a la realidad de la calidad de una comunicación tanto basada en comunicación óptica como acústica, por lo cual, en la sección de visualización del contenido multimedia transmitido y recibido

identificado en la Figura 15 se puede identificar claramente las condiciones en las que es mas apropiado el uso de cada tipo de comunicación.

Figura 15

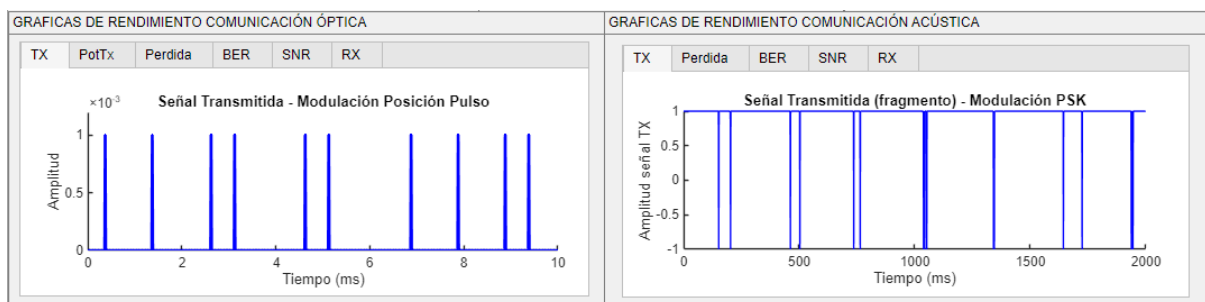
Área de visualización del contenido multimedia transmitido y recibido.



Del mismo modo, en la Figura 16 se obtiene las gráficas de rendimiento pertinentes a las métricas de calidad que posteriormente permitirán evaluar, comprender y analizar el rendimiento de la comunicación en cada caso, teniendo en cuenta la aplicación de diferentes tipos de modulación para cada tipo de comunicación en el caso óptico teniendo PPM y en el caso acústico PSK.

Figura 16

Sección de visualización de métricas de rendimiento de la transmisión P2P tanto para la tecnología óptica como acústica.



4.2 Exportación y visualización de resultados

La Figura 17 muestra los resultados almacenados de cada simulación llevada a cabo dentro de tablas de la aplicación, de forma que, posteriormente cuenten con la opción de ser exportados a un archivo Excel en formato (.xlsx), donde se almacenará los valores de distancia, potencia recibida, BER, SNR, tasa de datos, entre otros.

Figura 17

Obtención de resultados numéricos en base al número de ejecuciones realizadas en la simulación, representadas a través de un archivo de Excel.

RECOPIACION DE RESULTADOS COMUNICACIÓN ÓPTICA					RECOPIACION DE RESULTADOS COMUNICACIÓN ACÚSTICA				
SNR (dB)	Data Rate (bps)	BER	Paquet Loss (%)	Jitter	Atenuación (F. Thorp) (dB/km)	Data Rate (bps)	BER	Paquet Loss (%)	Jitter
35.0000	116.2720	5.8857e-232	5.8857e-229		17.4671	0.0657	0		
35.0000	116.2720	5.8857e-232	5.8857e-229		17.4671	0.0657	0		
10.7265	36.4789	0.0088	8.8392		17.4671	0.0657	0		
10.7265	36.4789	0.0088	8.8392		17.4671	0.0322	0		
10.7265	36.4789	0.0088	8.8392		17.4671	0.0180	4.6665e-112		
10.7265	36.4789	0.0088	8.8392		17.4671	7.3021e-04	0.3872		
-80.7550	9.8515e-08	0.1875	100		17.4671	7.3021e-04	0.3872		
-2.5142	5.6189	0.1248	100		17.4671	7.3021e-04	0.3872		
1.6914	11.8964	0.0906	90.5646		17.4671	7.3021e-04	0.3872		
18.4435	61.4730	2.6080e-07	2.6080e-04		17.4671	7.3021e-04	0.3872		
18.4435	61.4730	2.6080e-07	2.6080e-04		17.4671	7.3021e-04	0.3872		
18.4435	61.4730	2.6080e-07	2.6080e-04		17.4671	7.3021e-04	0.3872		
39.3837	130.8314	0	0		17.4671	7.3021e-04	0.3872		
					17.4671	7.3021e-04	0.3872		

Adicionalmente, los valores exportados y almacenados de forma automática dentro del archivo de Excel, generando además un proceso estadístico con valores de media, mediana, moda y varianza. Esta opción se encuentra automatizada dentro del código fuente de la aplicación desarrollada en App Designer y representa una gran opción de generación de grandes volúmenes de datos que pueden ser objeto de estudio en áreas como ingeniería de tráfico.

4.2.1. Pruebas de validación de contenido exportable

Finalmente, para validar el contenido exportado en los archivos (.xlsx), donde se incluyen: (datos, cálculos estadísticos e histogramas de tendencia), que permitirán identificar el efecto de la variación de los agentes de simulación. Se establecen tres escenarios de prueba de simulación, donde para cada caso se define veinte ejecuciones bajo parámetros de frecuencia y distancia específicos.

A continuación, se establecen los parámetros para cada prueba de simulación:

1. Frecuencia: 15 [KHz] - Distancia entre nodos: 50 [m]
2. Frecuencia: 150 [KHz] - Distancia entre nodos: 100 [m]
3. Frecuencia: 150 [KHz] - Distancia entre nodos: 2000 [m]

Escenario 1. Para esta sección de pruebas, los resultados generados a través de histogramas se ven identificados en la Figura 18 y Figura 19, donde al trabajar con una frecuencia de operación baja al igual de una distancia corta pretende demostrar un desempeño favorable para ambos tipos de comunicación. Sin embargo, se destacan diferencias claras en sus fortalezas. La comunicación óptica presenta una alta tasa de transmisión de datos en cientos de Mbps, mientras que la comunicación acústica se ve limitada a una tasa de transmisión en Kbps. Por lo cual, permite interpretar que una comunicación óptica en entornos subacuáticos puede ofrecer enlaces de alta velocidad y baja latencia en distancias cortas.

Por su parte, la comunicación acústica a pesar de la limitación en cuanto a tasa de transmisión se evidencia como una opción factible a trabajar en distancias cortas. Sin embargo, su principal ventaja se vera reflejada al trabajar a grandes distancias, donde la comunicación óptica se ve enormemente limitada al trabajar de forma inalámbrica.

Figura 18

Graficas de tendencias generadas en el archivo xlsx del primer escenario, con parámetros de frecuencia: 15 [KHz] y distancia entre nodos: 50 [m] para la comunicación óptica.

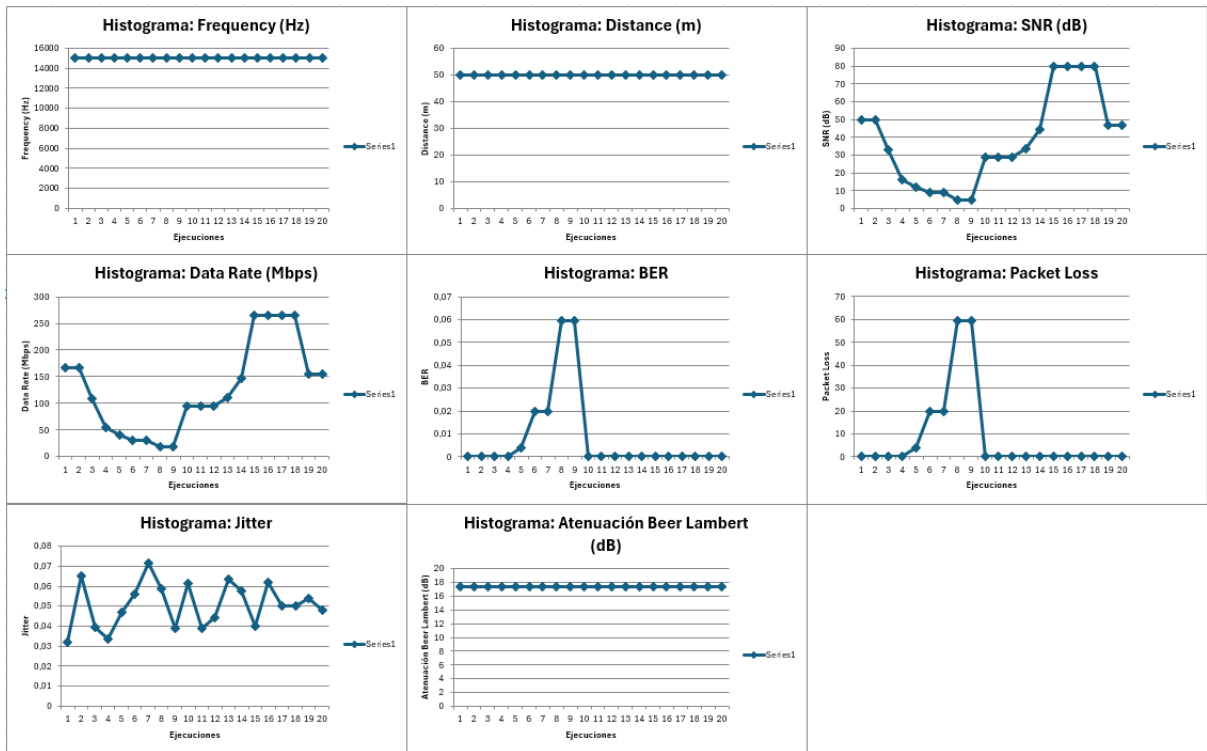
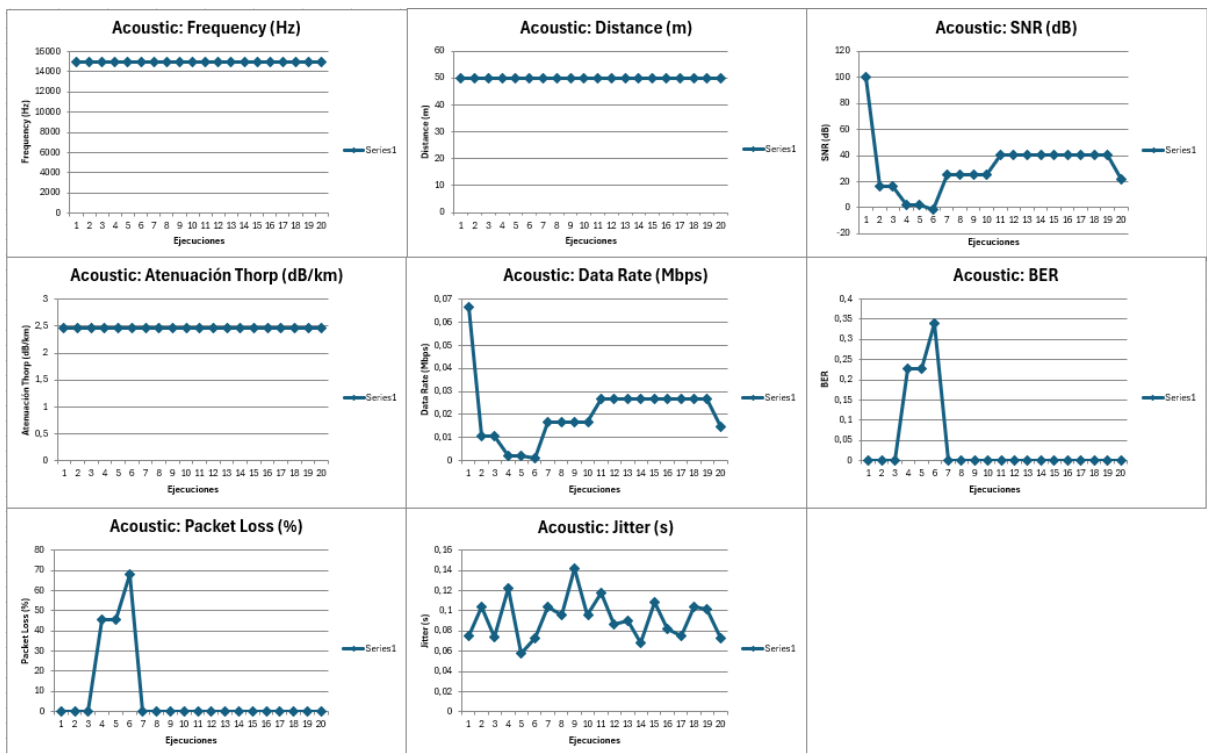


Figura 19

Graficas de tendencias generadas en el archivo xlsx del primer escenario, con parámetros de frecuencia: 15 [KHz] y distancia entre nodos: 50 [m] para la comunicación acústica.



Escenario 2. Para este caso, los resultados presentados en la Figura 20 pertinente a la comunicación óptica muestran un aumento moderado en la pérdida de paquetes, al contrario de una reducción en la tasa de transmisión. Sin embargo, la tecnología óptica continúa destacándose por ofrecer mayores velocidades de transmisión en comparación con la comunicación acústica, manteniendo un desempeño aceptable dentro de este rango de distancia.

En contraste, en la Figura 21 los resultados de la comunicación acústica presentan una mayor estabilidad. Esto resalta una de las principales bondades de la comunicación acústica, como lo es su capacidad para operar de manera eficiente a distancias intermedias, donde la comunicación óptica comienza a verse limitada por los efectos de absorción y dispersión del medio subacuático.

Figura 20

Graficas de tendencias generadas en el archivo xlsx del segundo escenario, con parámetros de frecuencia: 150 [KHz] y distancia entre nodos: 100 [m] para la comunicación óptica.

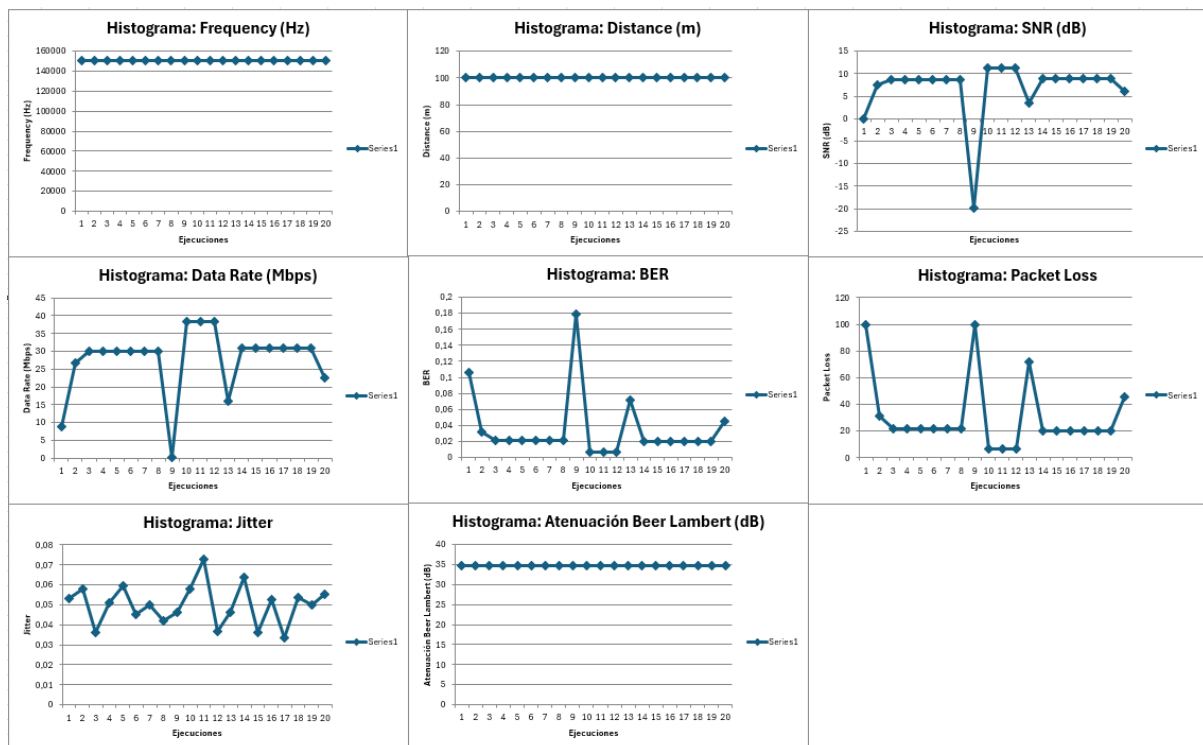
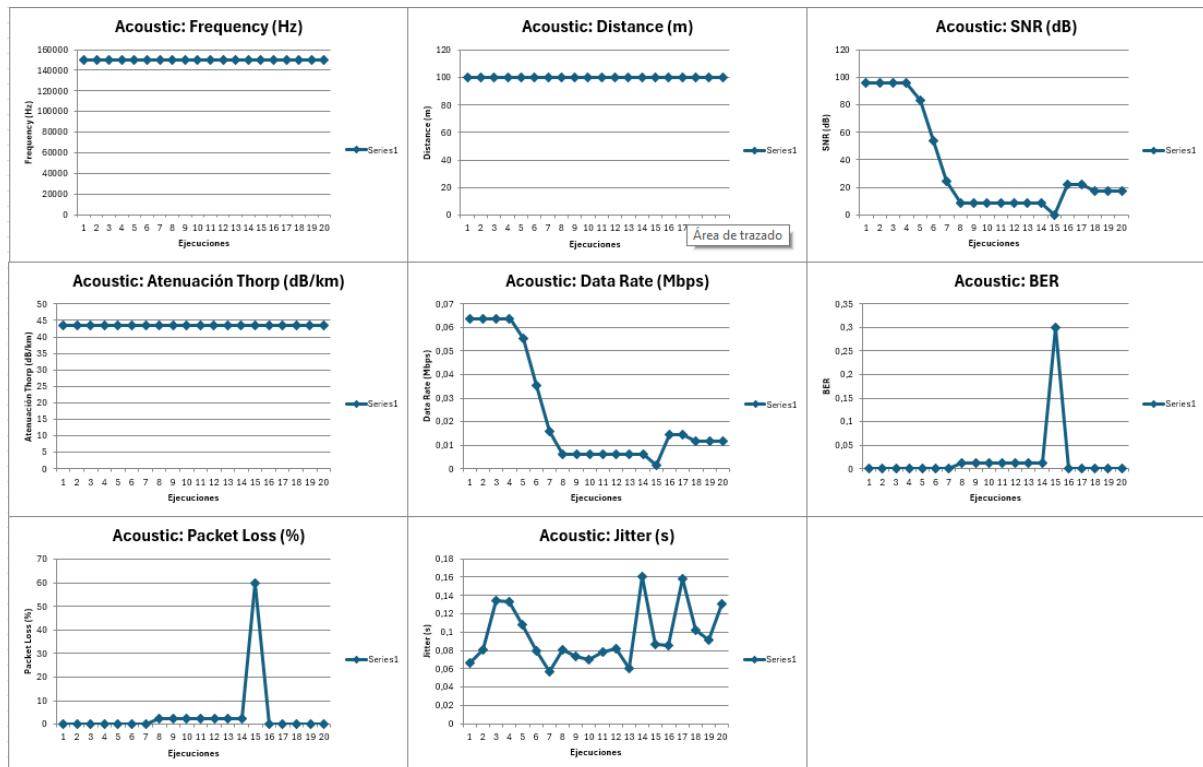


Figura 21

Graficas de tendencias generadas en el archivo xlsx del segundo escenario, con parámetros de frecuencia: 150 [KHz] y distancia entre nodos: 100 [m] para la comunicación acústica.



Escenario 3. El tercer escenario representa una condición extrema de operación para el caso de la comunicación óptica esto se evidencia en los resultados de la Figura 22, debido a la considerable distancia. En este contexto, los resultados ponen en evidencia las limitaciones de la comunicación óptica subacuática, la cual experimenta una atenuación crítica de la señal, haciendo imposible la transmisión de datos en tales condiciones. Estos resultados confirman que la comunicación óptica es más adecuada para enlaces de corto y mediano alcance.

Por el contrario, la Figura 23 demuestra que la comunicación acústica mantiene niveles de comunicación funcionales incluso a grandes distancias. Lo que resalta la principal bondad de la comunicación acústica, que es su capacidad de propagación eficiente en el medio subacuático a largas distancias.

A pesar de estos resultados, que obviamente no son favorables y comprometen la factibilidad de las comunicaciones ópticas inalámbricas en entornos subacuáticos. Se puede interpretar que en diferentes escenarios una u otra tecnología presentan sus ventajas y desventajas. Por lo cual, pueden servir de opción para generar un modelo de comunicación híbrido que permita sacar beneficio tanto de la velocidad de transmisión de información por parte de la comunicación óptica, así como también la capacidad de transmitir a grandes distancias como en el caso de las comunicaciones acústicas.

Figura 22

Graficas de tendencias generadas en el archivo xlsx del tercer escenario, con parámetros de frecuencia: 150 [KHz] y distancia entre nodos: 2000 [m] para la comunicación óptica.

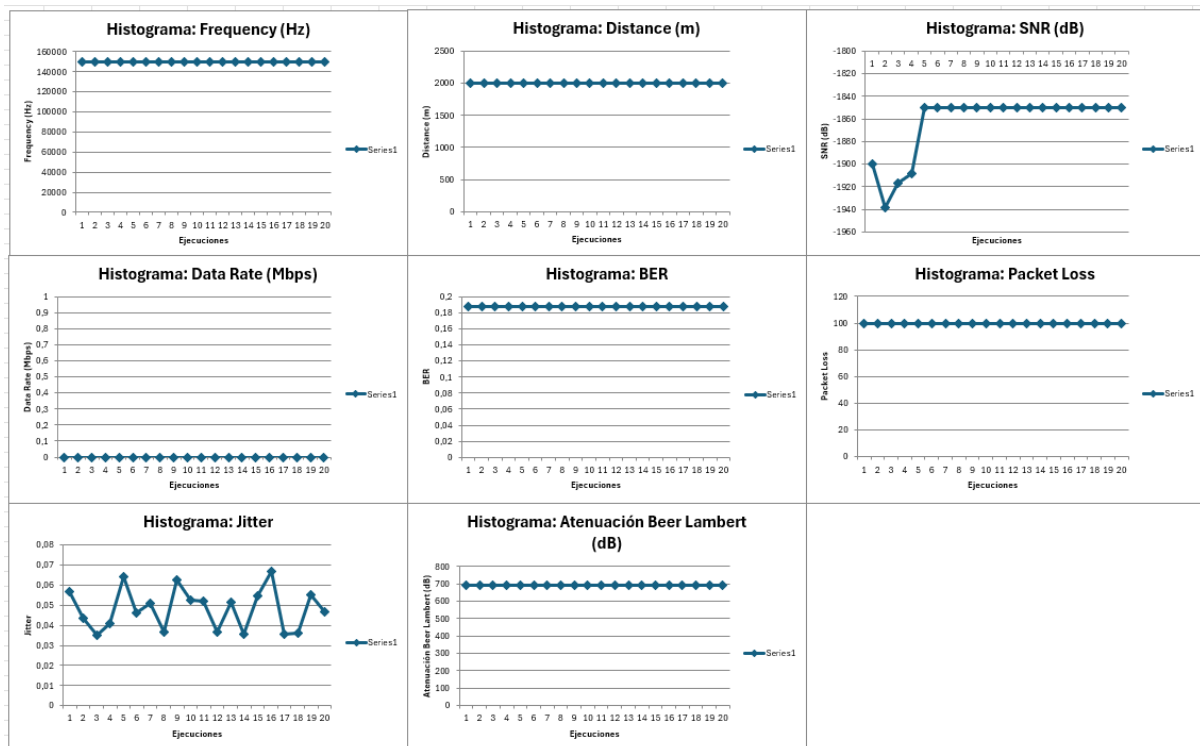
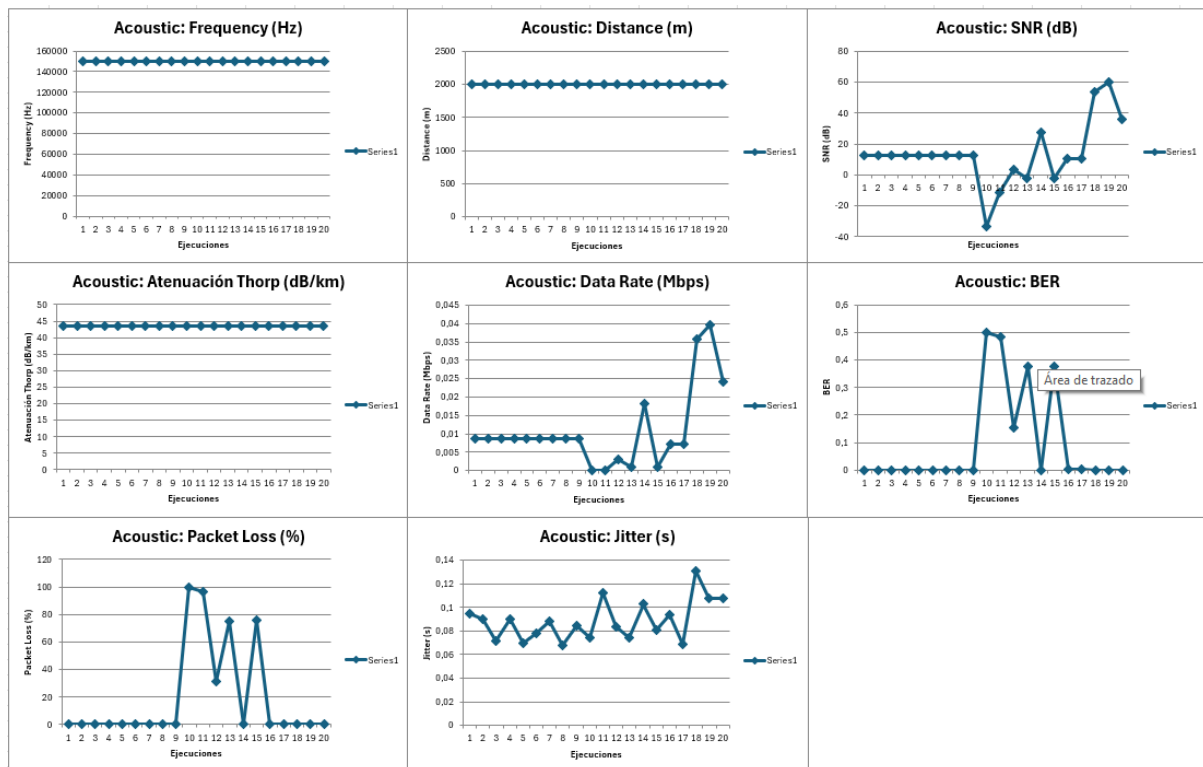


Figura 23

Graficas de tendencias generadas en el archivo xlsx del tercer escenario, con parámetros de frecuencia: 150 [KHz] y distancia entre nodos: 2000 [m] para la comunicación acústica.



4.3 Análisis de estabilidad de la simulación.

Uno de los aspectos fundamentales en el proceso de validación de la simulación desarrollada fue el análisis de su estabilidad, entendida esta como la capacidad del entorno simulado para mantener un comportamiento coherente y predecible frente a variaciones en los parámetros y agentes de simulación establecidos. A lo largo del diseño e implementación, se buscó que los resultados representaran de manera precisa las condiciones propias de un entorno subacuático, en el cual diversos factores físicos y ambientales afectan directamente la calidad de la comunicación óptica. En este contexto, la estabilidad no solo implicó mantener el correcto funcionamiento de los cálculos y visualizaciones, sino también asegurar que los cambios introducidos por el usuario a través de la interfaz, mediante *sliders*, se vieran reflejados de

forma coherente tanto en las métricas calculadas como en la calidad visual del contenido multimedia transmitido.

Sin embargo, este objetivo presentó varios retos técnicos. Uno de los principales fue la implementación de filtros que simularan la degradación visual del contenido multimedia, especialmente en situaciones donde la comunicación se veía afectada por parámetros adversos como el aumento de la turbidez, la mayor atenuación óptica o el incremento del ruido ambiental. En múltiples ocasiones, a pesar de que los valores modificados en la simulación influían correctamente en los parámetros de transmisión y en el cálculo de métricas como la tasa de bits o la razón de error de bits (BER), no se observaban alteraciones significativas en la visualización del contenido. Esta falta de correlación aparente dificultaba la interpretación visual de los efectos y cuestionaba temporalmente la estabilidad y fidelidad de la simulación.

Para superar estas dificultades, fue necesario aplicar un enfoque iterativo en el desarrollo, ajustando no solo los filtros utilizados, sino también el umbral de sensibilidad ante los cambios en los parámetros. Se analizaron diferentes técnicas de procesamiento visual que permitieran representar de forma gradual y proporcional el deterioro de la señal recibida, logrando finalmente una integración más precisa entre los valores numéricos calculados y la representación gráfica del contenido afectado. Este proceso no solo fortaleció la estabilidad del sistema, sino que también contribuyó a mejorar la experiencia del usuario al hacer más intuitiva la relación causa-efecto dentro del entorno simulado.

4.4 Discusión comparativa

Para validar y contextualizar los resultados obtenidos en este trabajo, se ha tomado como referencia el artículo *“Application for the study of Underwater Wireless Sensor Networks: case study”* de (Cuzme-Rodríguez et al., 2023), el cual presenta una aplicación de simulación para redes inalámbricas de sensores subacuáticos (UWSN) enfocada en el ámbito educativo. Este estudio será utilizado como base para realizar una discusión comparativa con

la simulación óptica desarrollada, permitiendo contrastar enfoques, identificar similitudes y destacar los aportes del presente trabajo en el análisis de la comunicación subacuática.

La simulación desarrollada para este trabajo y la aplicación presentada en el artículo de referencia comparten un propósito común: facilitar el estudio de las comunicaciones subacuáticas mediante entornos virtuales interactivos, diseñados con fines educativos y de investigación. Ambas propuestas se orientan a la comprensión de las particularidades de la transmisión de datos en medios subacuáticos, enfrentando desafíos como la atenuación de la señal, la latencia elevada, la degradación del contenido transmitido y la limitada propagación de ciertas frecuencias.

En la competencia del caso, se ha optado por una simulación centrada en la comunicación óptica, con un enfoque visual e intuitivo que permite observar directamente los efectos de parámetros como la potencia, la turbidez, el ruido ambiental y la distancia sobre la calidad de la transmisión multimedia. Esta aproximación contrasta con la del artículo, donde se prioriza la comunicación acústica y se utilizan métricas derivadas de modelos matemáticos como el *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) y la *Bit Error Rate* (BER) para estimar la eficiencia de la red, considerando una arquitectura P2P en un entorno de simulación 3D.

Un aspecto particularmente relevante en este trabajo fue la dificultad de generar efectos visuales coherentes con los parámetros físicos simulados. Mientras que en la herramienta descrita en el artículo los resultados se presentan como métricas cuantitativas y gráficas numéricas, en la simulación desarrollada se buscó representar de manera visual y perceptible la degradación de contenido, lo cual supuso un reto técnico importante. La implementación de filtros visuales que simularan la pérdida de calidad del contenido multimedia exigió una serie de ajustes y pruebas iterativas hasta lograr una representación coherente con los datos simulados. Esta diferencia metodológica marca un contraste entre ambas propuestas: una centrada en la métrica técnica, y otra en la percepción visual como herramienta educativa.

No obstante, ambas simulaciones comparten principios comunes en cuanto al desarrollo estructurado. Tanto este trabajo como el artículo utilizaron herramientas de desarrollo como MATLAB, así como modelos metodológicos similares (en el caso del artículo, el ciclo en cascada), y definieron parámetros clave para la simulación que permiten ajustar el entorno de prueba a diferentes condiciones del medio. Esto resalta la validez de las dos propuestas como herramientas complementarias: una más enfocada en la modelación física y protocolar de las redes UWSN, y otra centrada en el impacto directo sobre la calidad percibida de la información transmitida bajo condiciones adversas.

Finalmente, la validación de la simulación desarrollada en esta tesis se fortalece al observar que muchos de los retos identificados en el artículo como la pérdida de señal, el alto BER, los problemas de propagación y los efectos del entorno en la calidad de la comunicación coinciden plenamente con los factores considerados en el diseño del simulador óptico propuesto. Esta correspondencia evidencia que, a pesar de las diferencias en los medios de transmisión (óptico vs acústico), las simulaciones comparten fundamentos teóricos similares y enfrentan limitaciones físicas comunes, lo que permite validar de manera comparativa los resultados obtenidos en este trabajo

4.5 Socialización y Encuestas

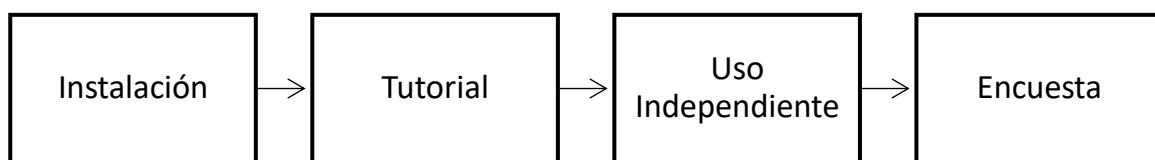
Para validar el funcionamiento de la herramienta como método de introducción al tema de comunicaciones inalámbricas subacuáticas en el entorno educativo, se optó por establecer una socialización con estudiantes de la carrera de Telecomunicaciones y en específico con estudiantes de la asignatura de Ingeniería de Tráfico. De modo que, se contó con la participación de 40 estudiantes que experimentaron y aportaron con retroalimentación de sugerencias de mejora de la aplicación tanto en el apartado de funcionalidad y diseño de la herramienta a través de la encuesta basada en la normativa ISO/IEC 25010. El formato de la encuesta se encuentra detallado en el Anexo B.

4.5.1. Esquema de socialización

La socialización se estructuró en cuatro simples pasos definidos en la Figura 24, en los cuales el estudiante pudo establecer si la herramienta cuenta con la estabilidad necesaria para el funcionamiento en diferentes dispositivos.

Figura 24

Diagrama de bloques del proceso de socialización de la App.



A continuación, se detalla los tres pasos llevados a cabo:

1. *Instalación guiada de la aplicación.*

Para el desarrollo de este apartado, se compartió con cada uno de los estudiantes el empaquetado del instalador destinado a la distribución, el cual cuenta con el complemento *Matlab Runtime* necesario para la compilar la aplicación. Con el fin, de validar que la App es capaz de instalarse en diferentes dispositivos sin la necesidad de contar con el software Matlab instalado previamente.

2. *Tutorial de uso guiado.*

Una vez validada la instalación del software en los equipos, se procedió a la realización de ejemplos guiados identificando que parámetros es necesario que introduzcan previo a la ejecución, cuáles son los resultados que se puede obtener y del mismo modo cual es la importancia del estudio de este tipo de comunicaciones para futuras propuestas tecnológicas.

3. *Uso independiente.*

El ejercicio de uso independiente se enfocó en la ejecución de la aplicación variando sus agentes de simulación, para obtener una generación de datos aproximada de 50 a 100 resultados que permitan al estudiante llevar a cabo un análisis de que efectos se obtuvo al comparar las comunicaciones ópticas y las acústicas.

Adicionalmente se solicitó establecer si el funcionamiento de la App cuenta con algún error crítico provocado por introducir valores incoherentes dentro de la aplicación.

4. Encuesta.

Para finalizar, se compartió con los estudiantes una encuesta desarrollada en función de la normativa ISO/IEC 25010. Para establecer su apreciación sobre el funcionamiento de la aplicación.

4.5.2. Encuesta

Una vez desarrolladas las actividades destinadas a que los usuarios se familiaricen con la aplicación, se realizó la encuesta evaluada a través de una escala Likert definida el Anexo B que tiene como objetivo obtener su perspectiva a cerca del funcionamiento de la aplicación y de igual forma identificar el conocimiento con el que cuentan sobre las UWOCs.

Las preguntas se encuentran enfocadas a la obtención de la apreciación de los estudiantes en los siguientes aspectos, que se detallan en el Anexo B:

- Nivel de conocimiento previo a cerca de las UWOCs e interés en aprender sobre este tipo de tecnologías emergentes.
- Interpretar si el software de simulación puede contribuir al estudio de las UWOCs en el ámbito estudiantil.
- Establecer el desempeño y portabilidad de la aplicación en diferentes dispositivos.

- Obtener la perspectiva del usuario en términos de funcionalidad, usabilidad, confiabilidad y eficiencia de la aplicación.
- Identificar la satisfacción del usuario al usar la aplicación.
- Obtener retroalimentación de parte de los usuarios para mejorar la aplicación, con el fin de mejorar en los aspectos que les parezca necesarios.

4.5.3 Resumen de la Encuesta

Para concluir esta sección, se resume los resultados de la recopilación de respuestas de la encuesta, para identificar cuantitativamente los porcentajes de selección de cada opción por parte de los 40 estudiantes de *Ingeniería de Trafico* de la carrera de *Telecomunicaciones*.

A continuación, se establece los resultados obtenidos por cada una de las preguntas:

1. ¿Cuál es su nivel de conocimiento previo acerca de las UWOCs?



2. ¿Se encuentra interesado en conocer acerca de las UWOC?



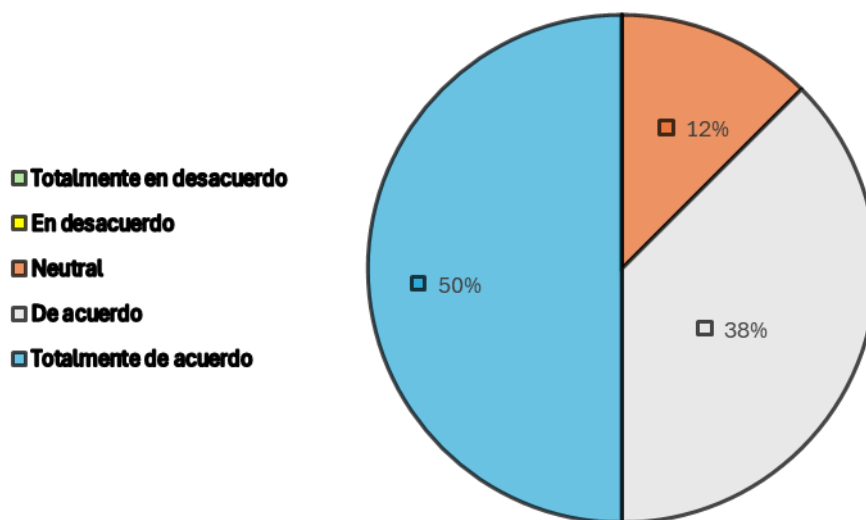
3. ¿Cree usted que un software de simulación puede contribuir al estudio de UWOCs?



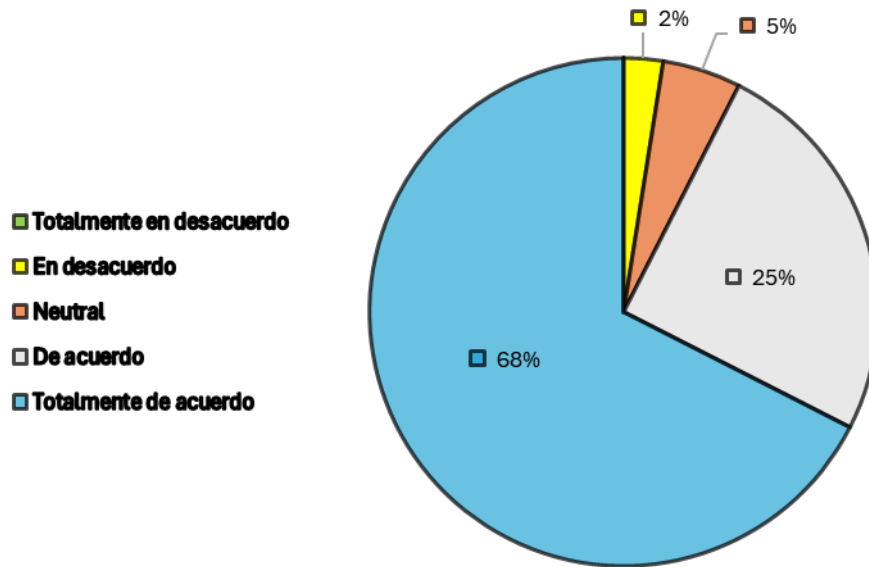
4. **FUNCIONALIDAD (Adecuación y Exactitud)**

Evalúa si el sistema cumple con las funciones esperadas y produce resultados correctos.

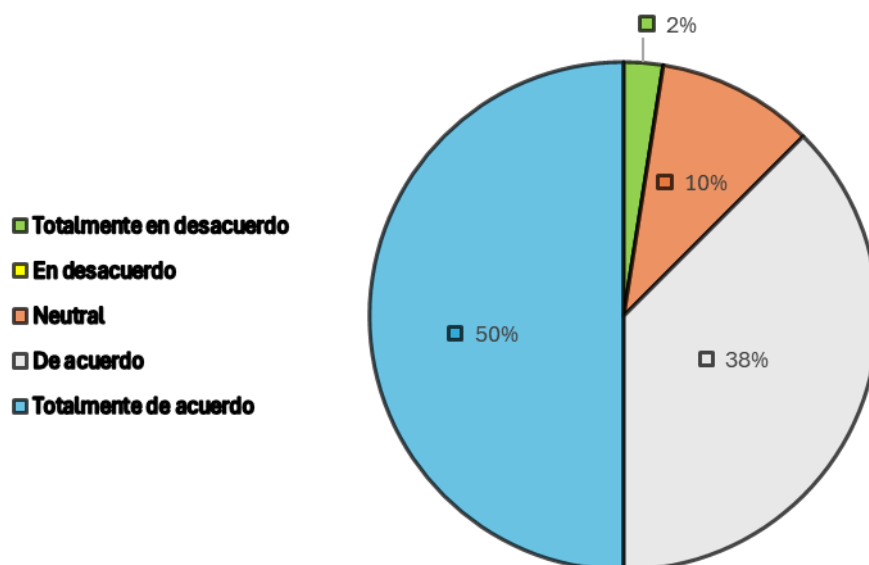
- El sistema cumple con los objetivos planteados para el análisis de la comunicación óptica subacuática.



- Los resultados obtenidos (BER, velocidad de transmisión, latencia, etc.) son coherentes con los parámetros configurados.



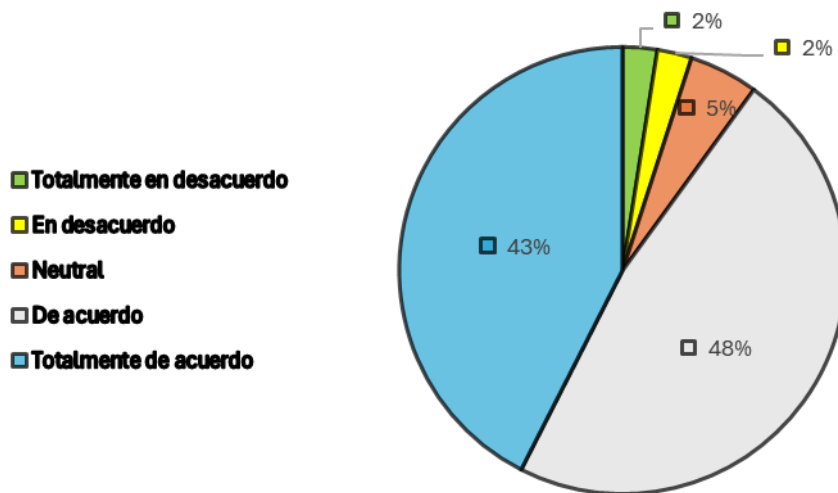
- Las funciones implementadas permiten realizar correctamente las simulaciones y visualizaciones esperadas.



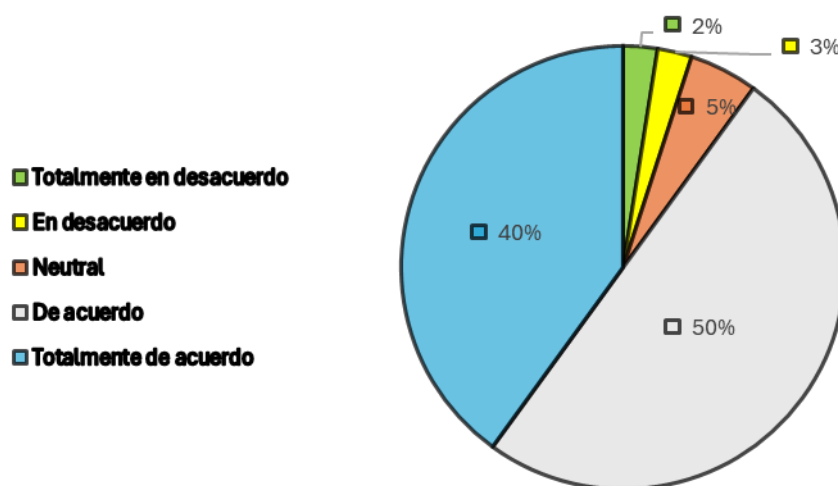
5. USABILIDAD (Interacción y Comprensibilidad)

Evalúa la facilidad de uso, comprensión y aprendizaje del sistema.

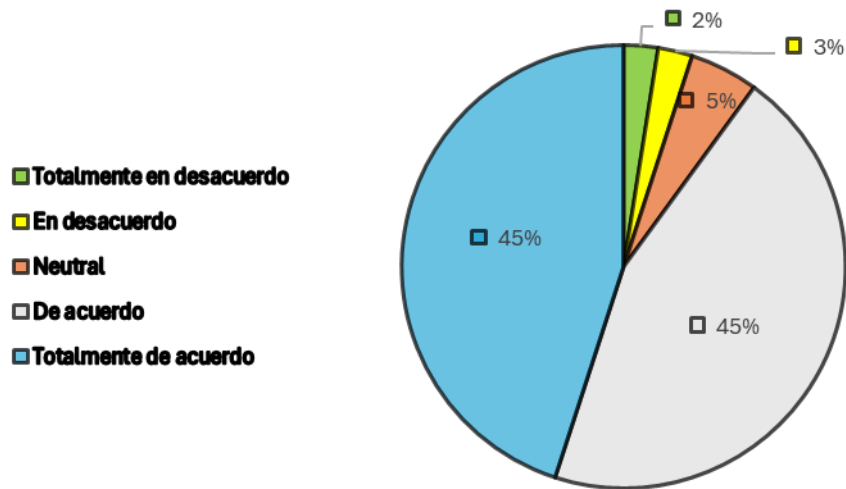
- La interfaz gráfica del sistema resulta intuitiva y fácil de utilizar.



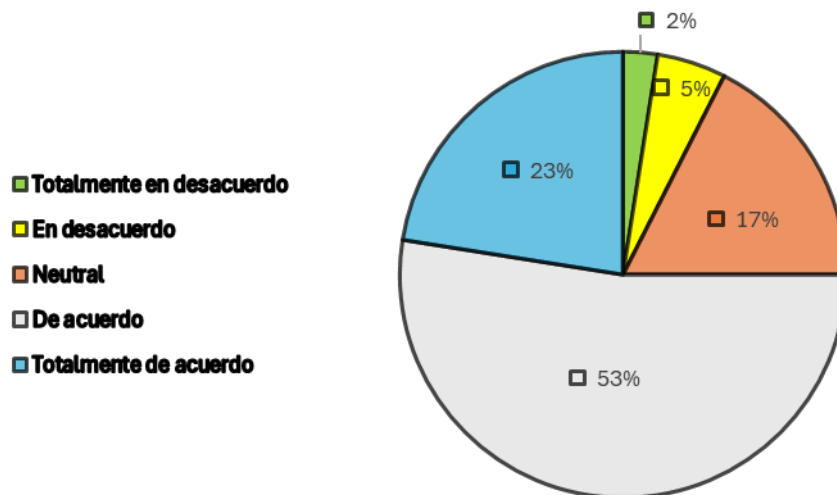
- Los controles y menús están bien organizados y son fácilmente identificables.



- El sistema facilita la comprensión de los resultados obtenidos en la simulación.



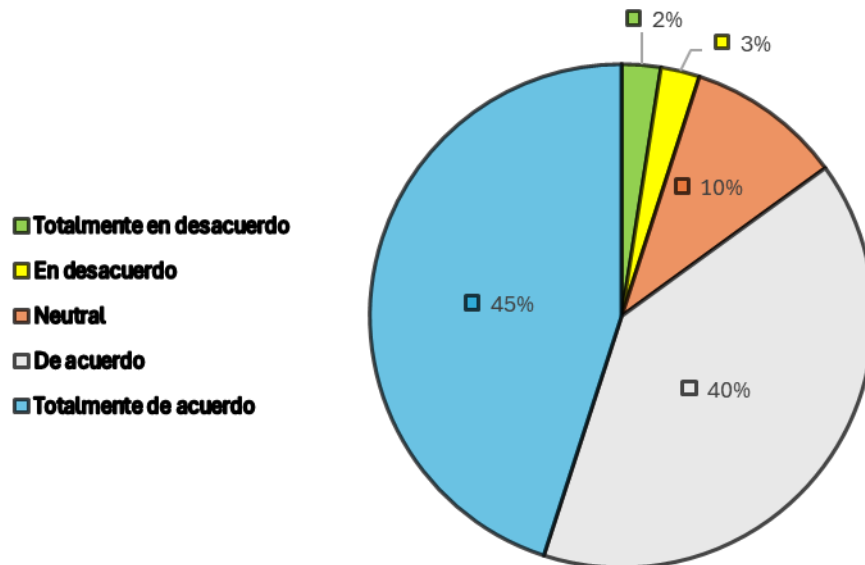
- Es sencillo aprender a usar el sistema sin requerir asistencia adicional.



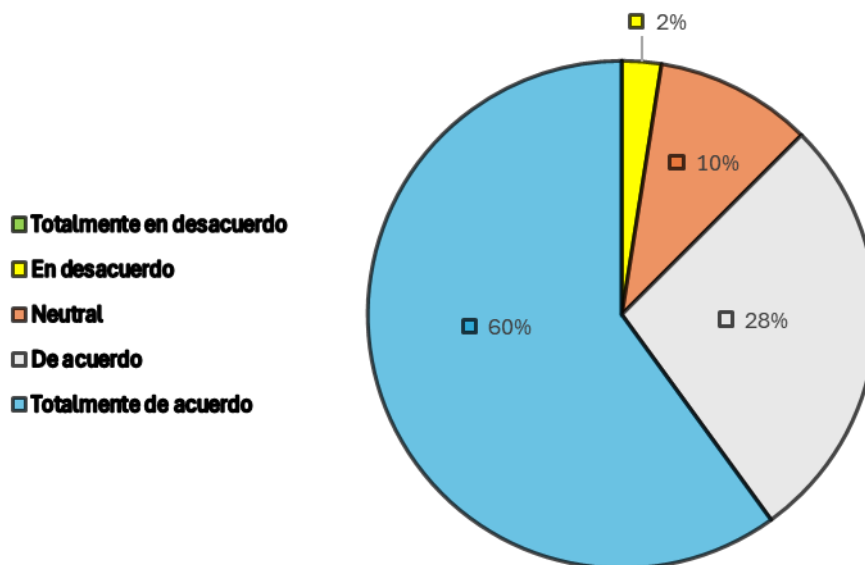
6. CONFIABILIDAD (Disponibilidad)

Evalúa la estabilidad y consistencia del sistema durante su funcionamiento.

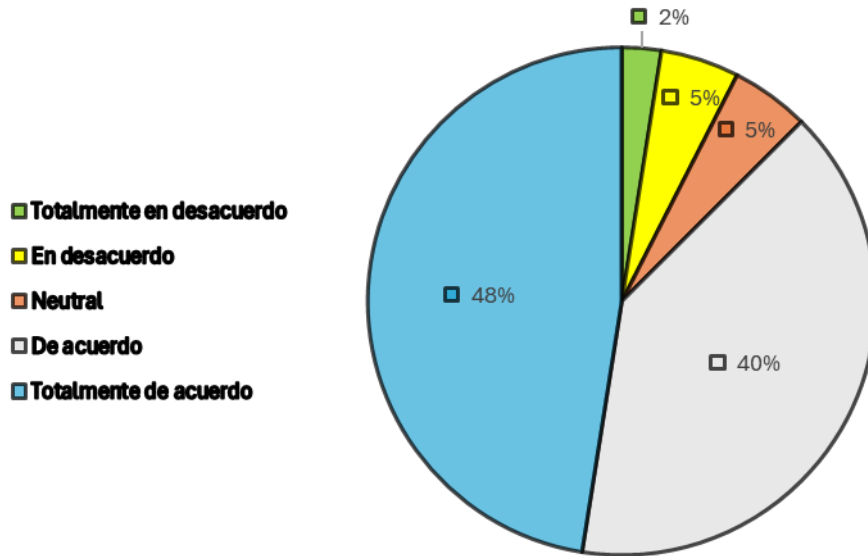
- El sistema opera de forma estable sin fallos durante las simulaciones.



- Los resultados se mantienen consistentes cuando se repiten las pruebas con los mismos parámetros.



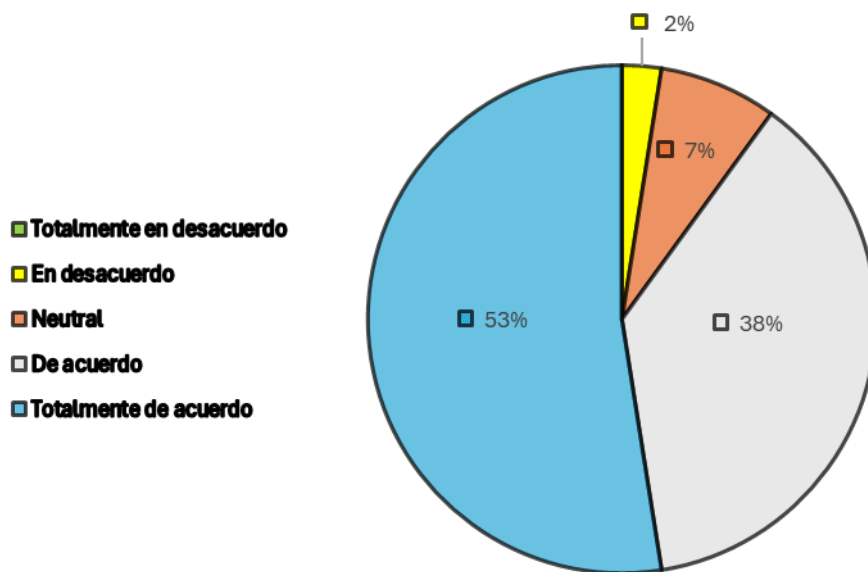
- No se presentaron errores críticos o cierres inesperados durante el uso.



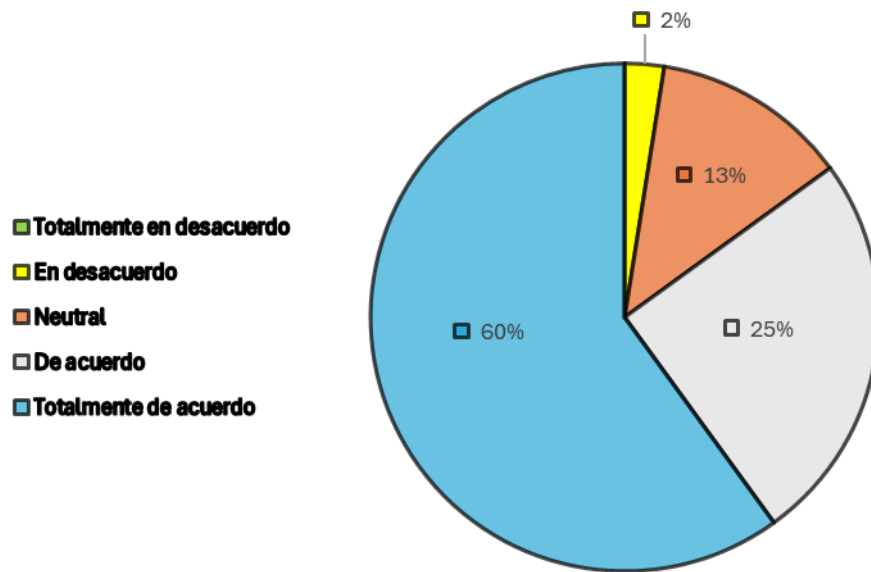
7. EFICIENCIA DE DESEMPEÑO (Tiempo de Respuesta y Recursos)

Evalúa la rapidez y optimización del sistema.

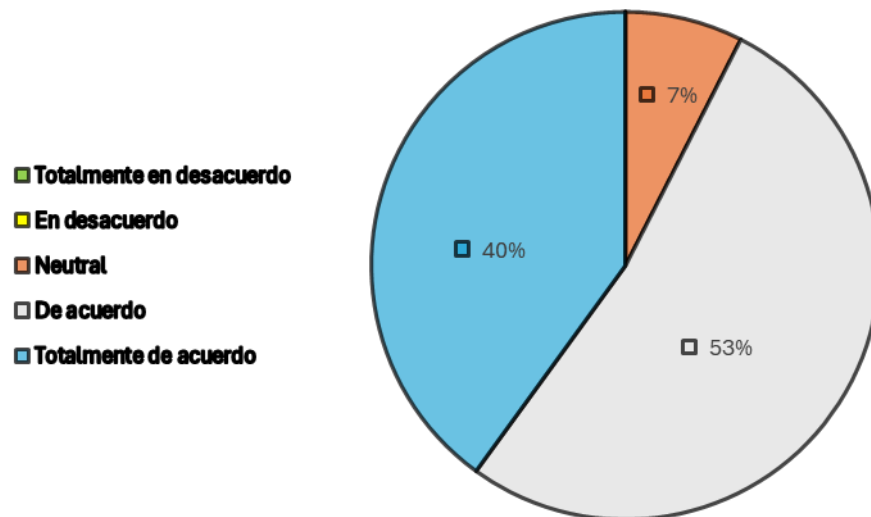
- El tiempo de procesamiento de las simulaciones es adecuado.



- El sistema utiliza de forma eficiente los recursos del equipo (CPU, memoria, etc.).



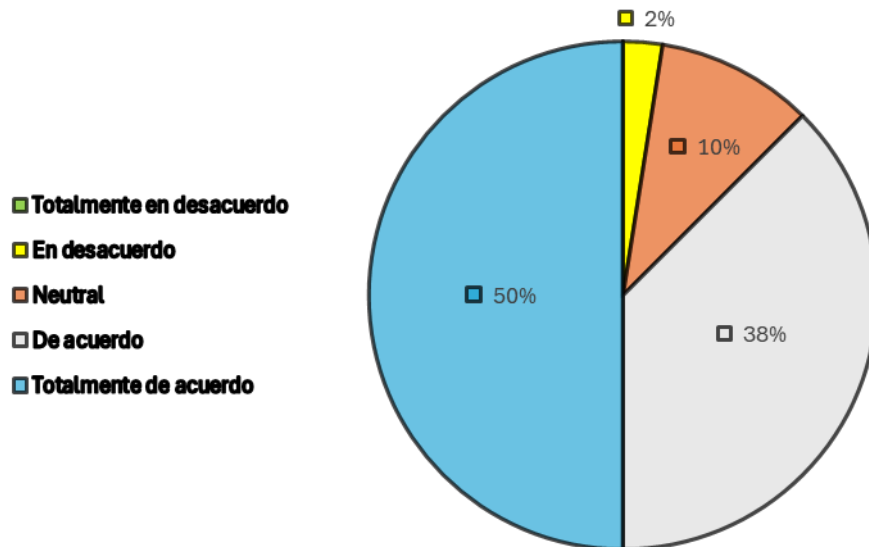
- Las gráficas y resultados se muestran sin retrasos notables.



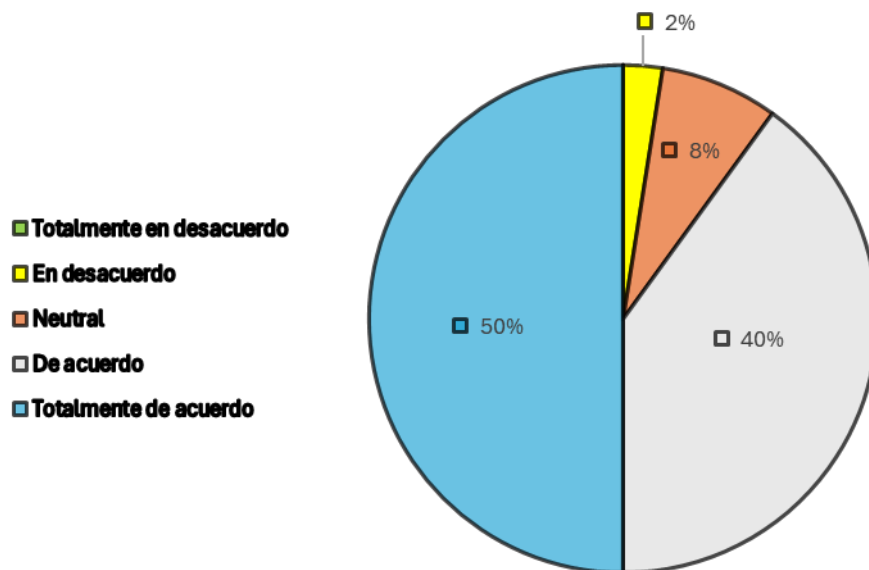
8. MANTENIBILIDAD (Modificabilidad y Reusabilidad)

Evalúa la facilidad para actualizar, mejorar o modificar el sistema.

- El código o estructura del sistema permite realizar ajustes o mejoras fácilmente.



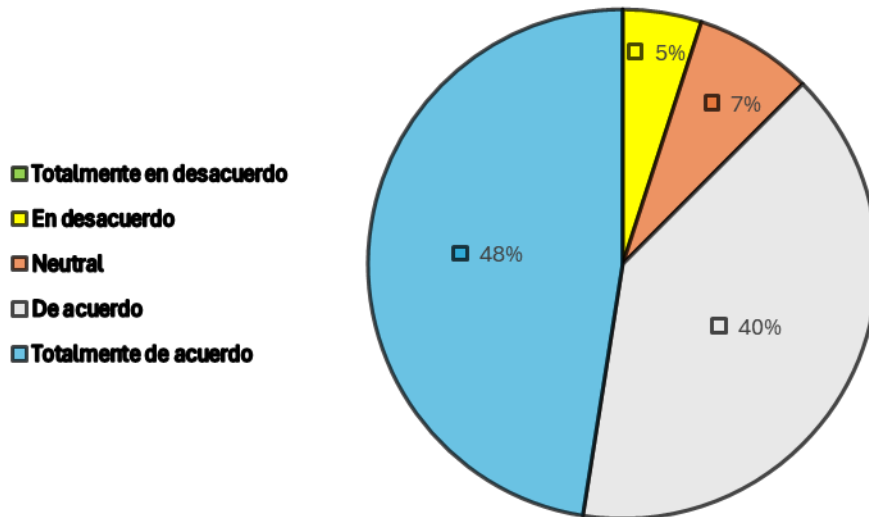
- Las funciones están organizadas de manera que facilitan la comprensión del sistema por otros desarrolladores.



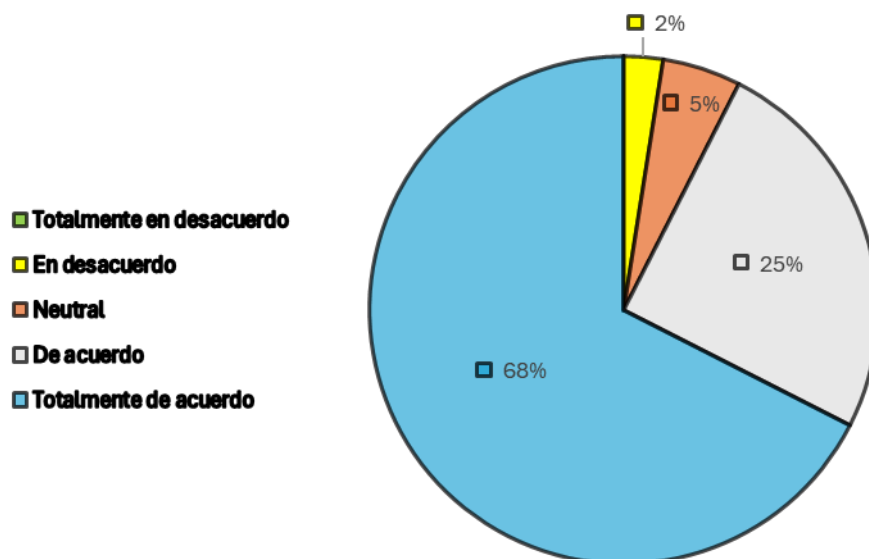
9. PORTABILIDAD (Adaptabilidad)

Evalúa la capacidad del sistema para funcionar en distintos entornos o equipos.

- El sistema puede ejecutarse correctamente en diferentes computadoras sin la necesidad de instalar el software Matlab.



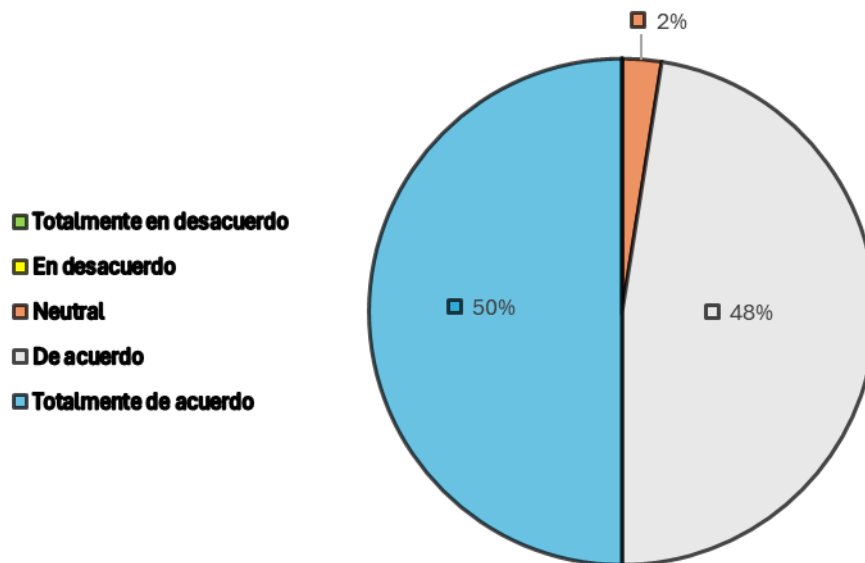
- No se requiere una configuración compleja para instalar y ejecutar el sistema.



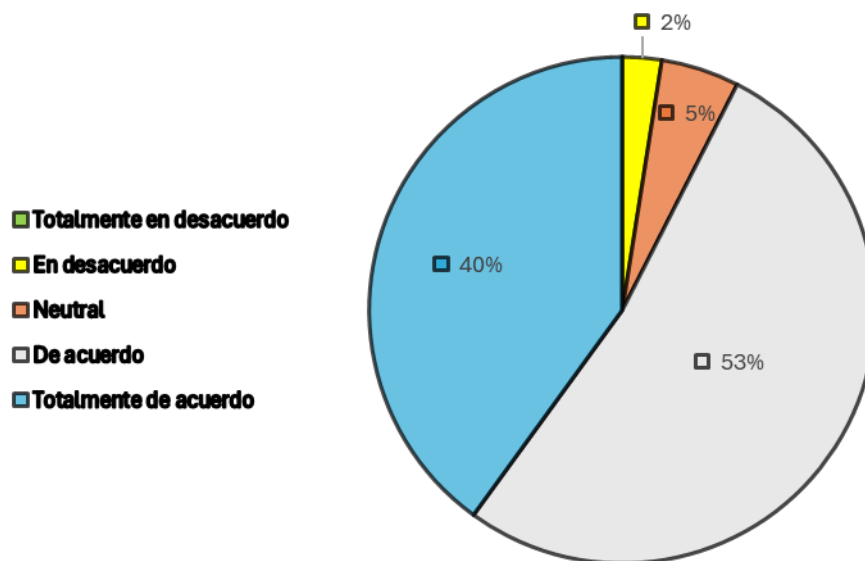
10. SATISFACCIÓN GLOBAL

Evalúa la percepción general del usuario.

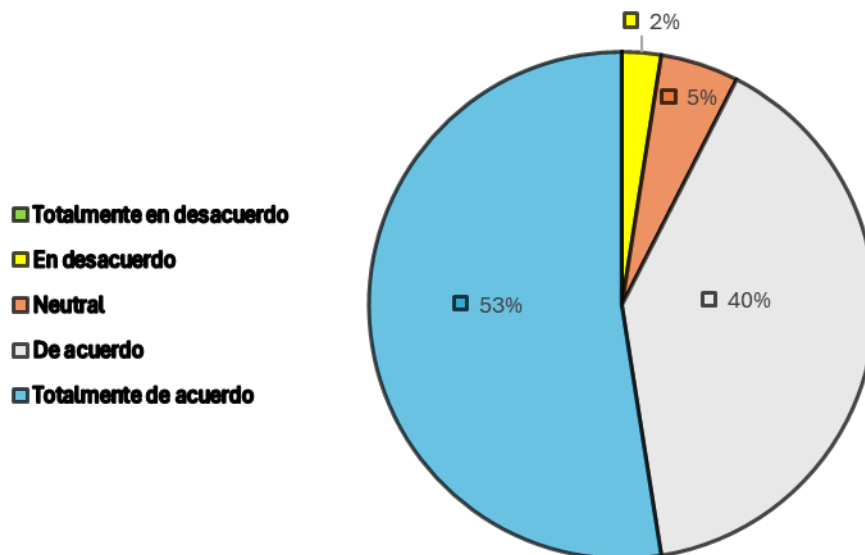
- Estoy satisfecho con el funcionamiento general del sistema.



- Considero que el sistema cumple con los estándares de calidad esperados.



- Recomendaría el uso de este sistema en futuros trabajos o investigaciones.



11. Sugerencias de mejora:

Dentro de esta sección se solicitó a los estudiantes dar de acuerdo con su perspectiva sugerencias para mejorar la aplicación. En tal contexto, las principales menciones de mejora estuvieron dirigidas hacia el diseño y la adaptación de la aplicación a la resolución de las pantallas de sus equipos, además de un pequeño inconveniente a solucionar referente a la minimización de la aplicación al momento de cargar el contenido multimedia y por último la necesidad de un pequeño tutorial de uso incluido en la aplicación.

Teniendo en cuenta, la mayoría de las sugerencias se optó por rediseñar la aplicación de forma que sea más intuitiva de usar, se encuentre mejor distribuidos los elementos y de igual forma se solucionó la minimización de la ventana de la aplicación al cargar cualquier contenido multimedia y por último se añadió un tutorial de uso dentro de una barra de herramientas para que el usuario sea capaz de comprender de forma breve el procedimiento de uso de la aplicación.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

El desarrollo de este trabajo permitió evidenciar la viabilidad de la implementación de métodos emergentes en comunicaciones subacuáticas, identificando a la comunicación óptica inalámbrica como un medio de transmisión eficaz y eficiente dentro de determinadas condiciones y variables físicas que influyen de manera directa en la calidad de la transmisión.

La aplicación desarrollada en MATLAB permitió integrar parámetros como la potencia de transmisión, longitud de onda, atenuación, turbidez, ruido ambiental y temperatura, logrando una herramienta interactiva que permite visualizar el impacto de estos factores sobre métricas clave como la tasa de bits, la razón de error de bits (BER), la distancia efectiva de transmisión y la degradación visual del contenido multimedia. Adicionalmente, al ser exportada de forma “Satandalone”, puede trabajar de forma independiente al software Matlab.

Uno de los principales aportes de este trabajo radica en la representación visual de los efectos negativos que tiene un entorno subacuático adverso sobre la calidad del contenido transmitido. A diferencia de otras simulaciones más centradas en el cálculo matemático y la representación numérica, esta propuesta buscó humanizar la experiencia del usuario al permitirle percibir de forma directa los efectos generados en la transmisión de contenido multimedia dependiendo de los distintos parámetros y agentes de simulación, haciendo que la interacción con la simulación tenga un componente intuitivo y didáctico. Esta característica convierte a la herramienta en un recurso valioso para la enseñanza y comprensión de las limitaciones físicas en las comunicaciones subacuáticas.

Durante el desarrollo, se enfrentaron retos técnicos importantes, como la dificultad de sincronizar la variación de los parámetros con efectos visuales coherentes que representaran fielmente la degradación de la señal. Estos desafíos llevaron a realizar múltiples pruebas, ajustes en la lógica de programación y validaciones cruzadas para garantizar una simulación

estable y confiable. Pese a estas dificultades, se alcanzó una implementación funcional y representativa que cumple con el objetivo planteado: ofrecer una aproximación realista del comportamiento de las comunicaciones ópticas subacuáticas, tanto desde el punto de vista técnico como visual.

Interpretando el comportamiento de las UWOCs, se logró identificar que su aplicación está limitada principalmente por la distancia de operación, ya que esta trabaja en condiciones óptimas a distancias de 50m y hasta distancias aproximadas a los 100m con diferentes porcentajes de atenuación de la señal transmitida. Del mismo modo, se interpretó que cuenta con la capacidad de trabajar en rangos de frecuencia de operación desde los kHz hasta GHz, con velocidades de transmisión en el rango de los cientos de Mbps.

En comparativa a la comunicación óptica inalámbrica, las comunicaciones acústicas trabajan en rangos de frecuencia inferiores en el rango de kHz y máximo 1MHz. Debido a que se especializan en operar a distancias de varios kilómetros, siendo su mayor ventaja frente a otras tecnologías. Sin embargo, se ve claramente limitada en cuanto a velocidades de transmisión que como máximo llega a unos pocos kbps o mucho menor en condiciones adversas.

Finalmente, al comparar los resultados obtenidos de la aplicación desarrollada a partir de simulaciones en condiciones similares, se confirma la solidez del enfoque utilizado. Aunque las tecnologías simuladas difieren (óptica vs acústica), las coincidencias en las problemáticas abordadas y en los parámetros considerados refuerzan la validez del modelo propuesto y su aplicabilidad académica. De modo que, las tecnologías mencionadas cuentan con diferentes ventajas y limitaciones dependiendo del escenario, por lo que pueden ser utilizadas para complementar un modelo de comunicación híbrido que explote las ventajas de cada una.

Recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos, se recomienda como futuros trabajos el ampliar la capacidad del simulador incorporando nuevos modelos de propagación óptica y técnicas avanzadas de modulación. Esto permitiría explorar con mayor profundidad los efectos de distintos esquemas de transmisión sobre la calidad de la comunicación en entornos subacuáticos, contribuyendo así a una representación más precisa y completa de los fenómenos que afectan la eficiencia del canal óptico en condiciones reales.

Asimismo, se sugiere mejorar el entorno visual de la simulación mediante la integración de elementos dinámicos, como partículas suspendidas, corrientes o efectos de dispersión variable, que reflejen el comportamiento cambiante del medio marino. Esta mejora aportaría un valor significativo tanto desde el punto de vista educativo como técnico, ya que permitiría comprender de manera más intuitiva cómo las condiciones del entorno impactan en la transmisión de datos a nivel visual y cuantitativo.

Otra recomendación es el llevar a cabo la comparación entre datos simulados y reales, lo cual permitiría validar el modelo de forma más rigurosa, identificar posibles márgenes de error y realizar ajustes en los algoritmos para garantizar mayor fidelidad en la predicción del comportamiento de la señal en condiciones específicas.

Finalmente, se considera valioso fomentar el uso de esta herramienta como recurso formativo en carreras vinculadas a las telecomunicaciones, ciencias del mar o ingeniería electrónica. Su enfoque didáctico, combinado con la capacidad de representar procesos complejos de manera accesible, la convierte en una opción adecuada para facilitar la comprensión de las comunicaciones subacuáticas en estudiantes, incentivando además la exploración de nuevas soluciones tecnológicas para entornos de difícil acceso como el medio marino.

BIBLIOGRAFIA

- Cuzme-Rodríguez, F., Velasco-Suárez, A., Domínguez-Limaico, M., Suárez-Zambrano, L., Farinango-Endara, H., & Mediavilla-Valverde, M. (2023). Application for the Study of Underwater Wireless Sensor Networks: Case Study. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 619 LNNS, 124-136. https://doi.org/10.1007/978-3-031-25942-5_11
- Dong, B., Tong, S., Zhang, P., Wang, D., & Ma, C. (2022). Analysis of Channel Characteristics of Underwater Wireless Blue LED Communication System and Outfield Experimental Research. *Proceedings - 2022 5th International Conference on Communication Engineering and Technology, ICCET 2022*, 11-14. <https://doi.org/10.1109/ICCET55794.2022.00010>
- F. Vallejo, B. Rodríguez, M. H. (2017). *Detección, estimación y problemas inversos con sistemas sonar*. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6333257.pdf>
- Fundacion Charles Darwin. (2023). *Inicio - Charles Darwin Foundation*. <https://www.darwinfoundation.org/es/>
- García, J., & Medina, G.-V. (2011). La simulación basada en agentes: una nueva forma de explorar los fenómenos sociales. *Revista Española de Investigaciones Sociológicas*, 136, 91-110. <https://doi.org/10.5477/CIS/REIS.136.91>
- Ghasvarianjahromi, S., Karbalayghareh, M., Diamantoulakis, P. D., Karagiannidis, G. K., & Uysal, M. (2019). Simultaneous Lightwave Information and Power Transfer in Underwater Visible Light Communications. *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC, 2019-September*. <https://doi.org/10.1109/PIMRC.2019.8904146>
- Gradiant. (2010). *Comunicaciones Submarinas - Gradiant*. <https://www.gradiant.org/noticia/comunicaciones-submarinas-2/>
- Higuera. (2018). *Tópico 3 - Acustica Submarina Parte B | PDF | Efecto Doppler | Sonido*.

- <https://es.scribd.com/document/406845169/Topico-3-Acustica-Submarina-Parte-B>
- Isaac, A., & Tacoronte, L. (2017). *Propagación de ondas acústicas en espacios subacuáticos*.
<https://riull.ull.es/xmlui/handle/915/5941>
- ISO. (2023). *ISO/IEC 25010:2023(en), Systems and software engineering — Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) — Product quality model*.
<https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso-iec:25010:ed-2:v1:en>
- Kaushal, H., & Kaddoum, G. (2016). Underwater Optical Wireless Communication. *IEEE Access*, 4, 1518-1547. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2552538>
- Khan, I. U., Iqbal, B., Songzou, L., Li, H., Qiao, G., & Khan, S. (2021). Full-duplex Underwater Optical Communication Systems: A Review. *Proceedings of 18th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technologies, IBCAST 2021*, 886-893. <https://doi.org/10.1109/IBCAST51254.2021.9393206>
- Kshitij, K., Tyagi, P., & Gupta, N. (2022). Underwater Wireless Communication System with the Internet of Underwater Things. *2022 8th International Conference on Signal Processing and Communication, ICSC 2022*, 211-214.
<https://doi.org/10.1109/ICSC56524.2022.10009060>
- Lu, Z., Niu, W., & Chi, N. (2022). A Novel Security Underwater Visible Light Communication System based on Phase Scrambling by Utilizing a Chaos Map. *2022 IEEE 14th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing, WCSP 2022*, 582-585. <https://doi.org/10.1109/WCSP55476.2022.10039184>
- MathWorks. (2024a). *MATLAB App Designer - MATLAB & Simulink*.
<https://la.mathworks.com/products/matlab/app-designer.html>
- MathWorks. (2024b). *MATLAB Documentation - MathWorks América Latina*.
https://la.mathworks.com/help/matlab/index.html?s_tid=hc_panel
- Ocean. (2021). *Sonar: Seeing with Sound Sound and Sonar How does sonar work? Sound in*

the Sea.

<https://celebrating200years.noaa.gov/transformations/hydrography/image11.html>

ONU. (2024). *Objetivos y metas de desarrollo sostenible - Desarrollo Sostenible.*

<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/#>

Ortiz, M. (2017). *Modelo Incremental ~ Ingeniería de Software.* <https://isw->

udistrital.blogspot.com/2012/09/ingenieria-de-software-i.html

Peng, D., & Ma, Z. (2023). Research on Small Visible Light Underwater Communication System. *Proceedings - 2023 3rd International Conference on Frontiers of Electronics, Information and Computation Technologies, ICFEICT 2023*, 76-80.

<https://doi.org/10.1109/ICFEICT59519.2023.00023>

Rodríguez, J. (2017). “*Propagación de ondas acústicas en espacios subacuáticos*” .

[https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/5941/Propagacion de ondas acusticas en espacios subacuaticos.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/5941/Propagacion%20de%20ondas%20acusticas%20en%20espacios%20subacuaticos.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Rosencrance. (2024). *What is Peer-to-Peer (P2P)? Definition from TechTarget.*

<https://www.techtarget.com/searchnetworking/definition/peer-to-peer>

Sandra, D., Compte, S., Lloret, D. J., Miguel, M. D., & Ramírez, A. (2011).

«*Comunicaciones inalámbricas subacuáticas a 2,4 GHz para la transmisión de datos con altas tasas de transferencia*» TRABAJO FINAL DE GRADO.

Sen, J. (2012). Peer-to-peer networks. *2012 3rd National Conference on Emerging Trends and Applications in Computer Science*, iv-v.

<https://doi.org/10.1109/NCETACS.2012.6203284>

Shanthi, T., Shalini, P., & Shahul Hameed, S. (2023). Communication Between Submarines Using Li-Fi Technology. *International Conference on Recent Advances in Science and Engineering Technology, ICRASET 2023.*

<https://doi.org/10.1109/ICRASET59632.2023.10420343>

- Shen, W., Chen, H., Li, Z., Hu, J., Xing, S., Shen, C., Li, Z., Zhang, J., & Chi, N. (2021). Adaptive Diversity Combining Technology with Deep Neural Network for High-Speed and Reliable Underwater Visible Light Communication System. *2021 Optoelectronics Global Conference, OGC 2021*, 52-55.
<https://doi.org/10.1109/OGC52961.2021.9654410>
- Stojanovic, M. (1996). Recent advances in high-speed underwater acoustic communications. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 21(2), 125-136.
<https://doi.org/10.1109/48.486787>
- SubaQuatica. (2020). *Aqua-Fi: el nuevo sistema de comunicación inalámbrica subacuática - SubaQuatica Magazine*. <https://www.subaquaticamagazine.es/aqua-fi-el-nuevo-sistema-de-comunicacion-inalambrica-subacuatica/>
- Tanenbaum, A. S., & Wetherall, D. J. (2011). *Computer Networks (5th ed.)* (5.^a ed.). Pearson.
- Vélez Torres, Á., & Vélez Torres, Á. (2019). Modelación y simulación basada en agentes en ciencias sociales: una aproximación al estado del arte. *Polis (Santiago)*, 18(53), 282-308. <https://doi.org/10.32735/S0718-6568/2019-N53-1392>
- Wu, T. C., Chi, Y. C., Wang, H. Y., Tsai, C. T., & Lin, G. R. (2017). Blue Laser Diode Enables Underwater Communication at 12.4 Gbps. *Scientific Reports 2017 7:1*, 7(1), 1-10. <https://doi.org/10.1038/srep40480>
- Zeng, Z., Fu, S., Zhang, H., Dong, Y., & Cheng, J. (2017). A Survey of Underwater Optical Wireless Communications. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 19(1), 204-238. <https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2618841>
- Zhang, J., Wang, S., Ma, Z., Gao, G., Guo, Y., Zhang, F., Huang, S., & Zhang, J. (2024). Long-Term and Real-Time High-Speed Underwater Wireless Optical Communications in Deep Sea. *IEEE Communications Magazine*, 62(3), 96-101.
<https://doi.org/10.1109/MCOM.001.2300461>

ANEXOS

Anexo A. Repositorio GitHub.

- <https://github.com/fushinadm/TIC-Simulacion-UWOC.git>

Anexo B. Encuesta de validación del software de simulación.

Universidad Técnica del Norte
Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas
Carrera de Telecomunicaciones

Encuesta vinculada al TIC "*Análisis De Comunicaciones Ópticas Inalámbricas Basadas En Luz Azul Para Entornos Subacuáticos*", por *Fernando Paúl Ushiña Caluguillin*.

Objetivo: Recopilar información sobre la percepción de los usuarios respecto a la calidad del sistema o prototipo desarrollado, tomando como referencia las características de calidad definidas por la norma ISO/IEC 25010. Con el fin de evaluar la calidad del sistema de simulación de comunicaciones ópticas inalámbricas subacuáticas basadas en luz azul. desarrollado a partir del software Matlab (AppDesigner).

Instrucciones:

Lea cuidadosamente cada afirmación y seleccione el nivel que mejor refleje su experiencia.

Escala de valoración (Likert de 1 a 5):

- 1 Totalmente en desacuerdo
- 2 En desacuerdo
- 3 Neutral
- 4 De acuerdo
- 5 Totalmente de acuerdo

1. ¿Cuál es su nivel de conocimiento previo acerca de las UWOCs?

- Sin conocimiento
- Básico
- Intermedio
- Avanzado

2. ¿Se encuentra interesado en conocer acerca de las UWOC?

- Desinteresado
- Poco interesado
- Interesado

Muy Interesado

3. ¿Cree usted que un software de simulación puede contribuir al estudio de UWOCs?

En desacuerdo

Neutral

De acuerdo

4. FUNCIONALIDAD (Adecuación y Exactitud)

Evalúa si el sistema cumple con las funciones esperadas y produce resultados correctos.

	1	2	3	4	5
El sistema cumple con los objetivos planteados para el análisis de la comunicación óptica subacuática.					
Los resultados obtenidos (BER, velocidad de transmisión, latencia, etc.) son coherentes con los parámetros configurados.					
Las funciones implementadas permiten realizar correctamente las simulaciones y visualizaciones esperadas.					

5. USABILIDAD (Interacción y Comprensibilidad)

Evalúa la facilidad de uso, comprensión y aprendizaje del sistema.

	1	2	3	4	5
La interfaz gráfica del sistema resulta intuitiva y fácil de utilizar.					
Los controles y menús están bien organizados y son fácilmente identificables.					
El sistema facilita la comprensión de los resultados obtenidos en las simulaciones.					
Es sencillo aprender a usar el sistema sin requerir asistencia adicional.					

6. CONFIABILIDAD (Disponibilidad)

Evalúa la estabilidad y consistencia del sistema durante su funcionamiento.

	1	2	3	4	5
El sistema opera de forma estable sin fallos durante las simulaciones.					
Los resultados se mantienen consistentes cuando se repiten las pruebas con los mismos parámetros.					

No se presentaron errores críticos o cierres inesperados durante el uso.					
--	--	--	--	--	--

7. EFICIENCIA DE DESEMPEÑO (Tiempo de Respuesta y Recursos)

Evalúa la rapidez y optimización del sistema.

	1	2	3	4	5
El tiempo de procesamiento de las simulaciones es adecuado.					
El sistema utiliza de forma eficiente los recursos del equipo (CPU, memoria, etc.).					
Las gráficas y resultados se muestran sin retrasos notables.					

8. MANTENIBILIDAD (Modificabilidad y Reusabilidad)

Evalúa la facilidad para actualizar, mejorar o modificar el sistema.

	1	2	3	4	5
El código o estructura del sistema permite realizar ajustes o mejoras fácilmente.					
Las funciones están organizadas de manera que facilitan la comprensión del sistema por otros desarrolladores.					

9. PORTABILIDAD (Adaptabilidad)

Evalúa la capacidad del sistema para funcionar en distintos entornos o equipos.

	1	2	3	4	5
El sistema puede ejecutarse correctamente en diferentes computadoras sin la necesidad de instalar el software Matlab.					
No se requiere una configuración compleja para instalar y ejecutar el sistema.					

10. SATISFACCIÓN GLOBAL

Evalúa la percepción general del usuario.

	1	2	3	4	5
Estoy satisfecho con el funcionamiento general del sistema.					
Considero que el sistema cumple con los estándares de calidad esperados.					
Recomendaría el uso de este sistema en futuros trabajos o investigaciones.					

11. Sugerencias de mejora:

MSc. Fabián Geovanny
Cuzme Rodríguez
DIRECTOR

Fernando Paúl Ushiña
Caluguillin
TESISTA

- [CUESTIONARIO DE EVALUACIÓN DE CALIDAD BASADO EN ISO/IEC 25010: Resultados](#)

Anexo C. Manual de Usuario.

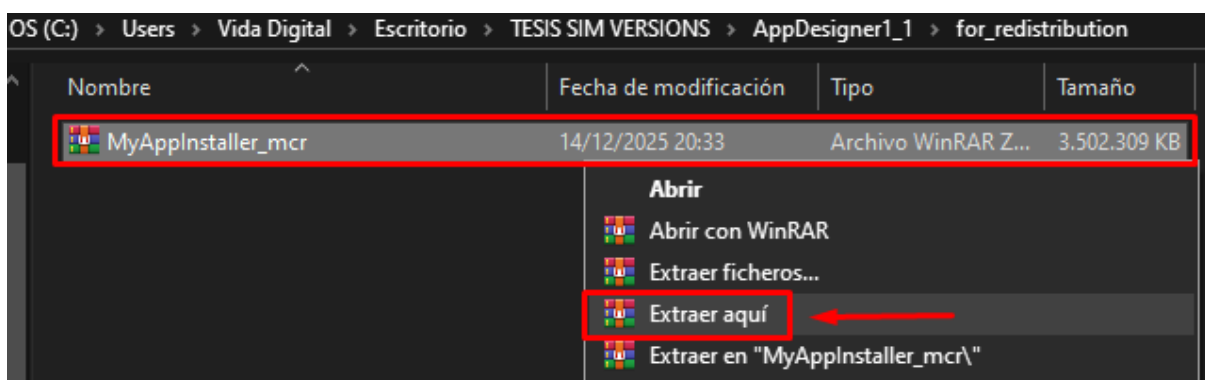
En este apartado, se establece el manual de usuario con el objetivo de proporcionar una explicación detallada del proceso de instalación, uso y desinstalación de la aplicación basada en comunicaciones ópticas inalámbricas para entornos subacuáticos. Además, de identificar las funciones de cada uno de sus paneles, parámetros configurables y resultados.

Anexo C. 1. Instalación

La instalación de la aplicación se destaca por ser fácil e intuitiva, además de no requerir la instalación previa del software Matlab. Únicamente, será necesaria la instalación del complemento Matlab Runtime que en caso de no tener Matlab previamente instalado, se instalara automáticamente del paquete de instalación generado para la distribución de la App, de otro modo si se cuenta con Matlab este se descargará por medio de la red para adaptarse a la versión de Matlab Runtime que se requiera.

A continuación, se detalla paso a paso el proceso de instalación:

Paso 1. El empaquetado del instalador por parte del método Standalone Desktop App de Matlab, no permite contar con un archivo comprimido dirigido a la distribución. Por lo cual el primer paso a seguir es descomprimir el archivo que tiene un tamaño aproximado de 3.5GB.

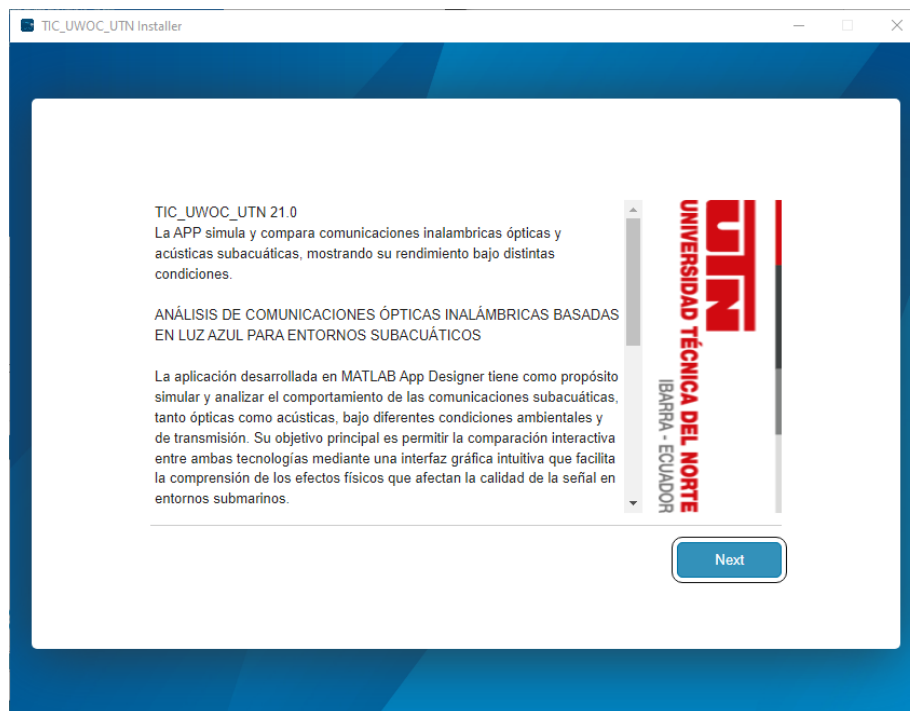


Paso 2. Una vez extraído el contenido comprimido, podremos identificar una carpeta denominada (data) la cual contiene el complemento Matlab Runtime que se instalara automáticamente, adicionalmente tendremos el ejecutable para la instalación, en el cual procederemos a la instalación.

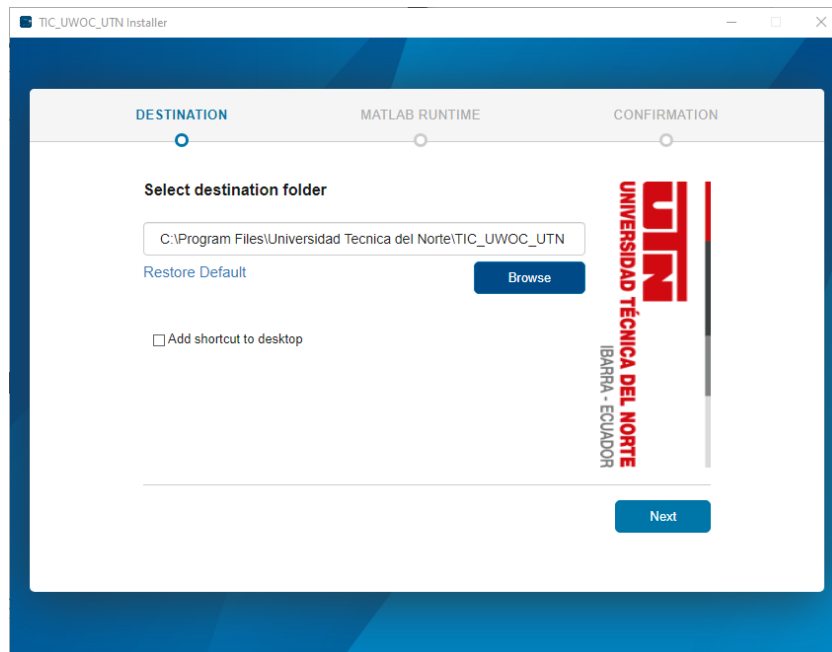
Nombre	Fecha de modificación	Tipo	Tamaño
data	14/12/2025 20:42	Carpeta de archivos	
MyApplInstaller_mcr	14/12/2025 20:31	Aplicación	1.954 KB
MyApplInstaller_mcr	14/12/2025 20:33	Archivo WinRAR Z...	3.502.309 KB
readme	14/12/2025 20:31	Documento de te...	1 KB

EJECUTABLE DE INSTALACION
COMPLEMENTO MATLAB RUNTIME

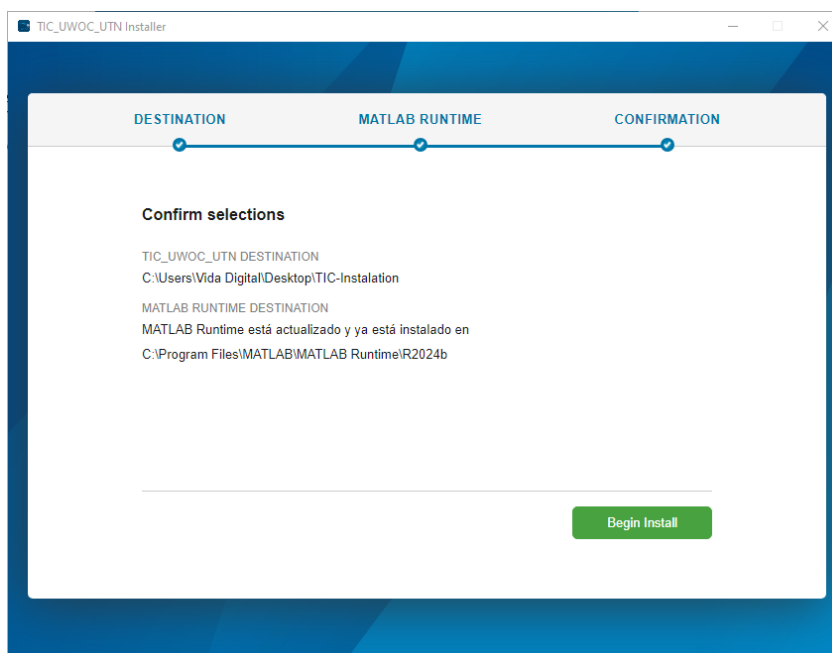
Paso 3. Al proceder con la instalación a través del ejecutable tendremos una ventana donde identificaremos información sobre la aplicación, para proseguir con la instalación damos a “Next”.



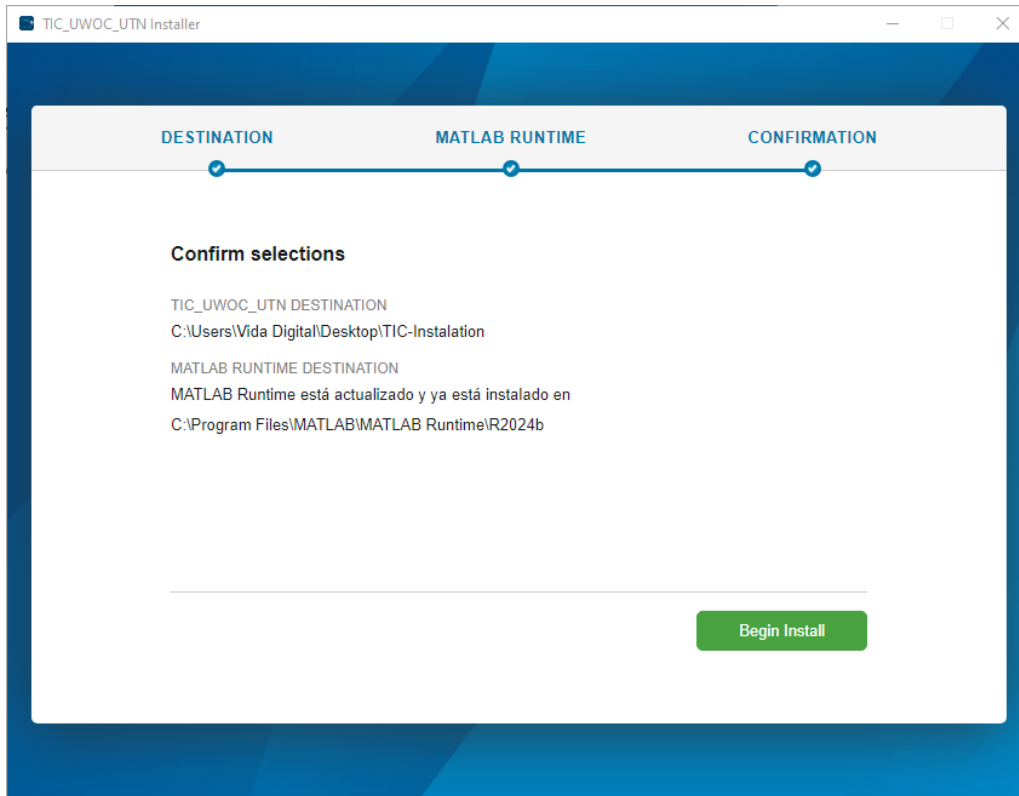
Paso 4. Posteriormente, nos permite seleccionar la ruta de destino para la instalación. Por lo cual, una vez definido la ruta de preferencia del usuario procedemos a nuevamente seleccionar “Next” para continuar.



Paso 5. La instalación habrá culminado al saltar automáticamente el proceso de instalación de Matlab Runtime en su versión R2024b debido a que este ya se encuentra incluido dentro del paquete instalador. Sin embargo, en caso de con Matlab previamente instalado en una versión diferente a la compartida por el instalador se procederá a instalar manualmente por medio de la red, para esto únicamente se requiere aceptar la licencia y seleccionar “Next”, finalmente seleccionamos “Begin Install”.



Paso 6. Verificamos que la instalación se haya realizado satisfactoriamente al identificar que en la ventana se muestre una confirmación de “Installation Complete”. Por lo que, finalizamos seleccionando “Close”.



Anexo C. 2. Indicaciones de Uso

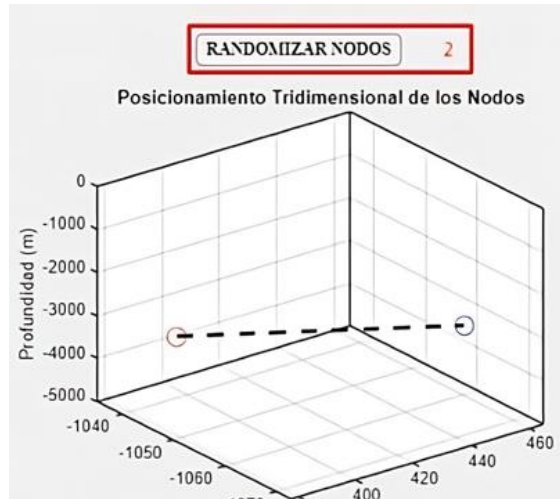
1. Definir condiciones físicas del entorno subacuático.



- Frecuencia [Hz], únicamente hasta 1MHz
- Definir tipo de agua:
 - Clara
 - Costera
 - Turbia
- Distancia entre nodos [m]
 - Se prioriza el valor ingresado de forma manual en metros.
 - De no ingresar una distancia en metros se utiliza el (Limitador de Distancia).

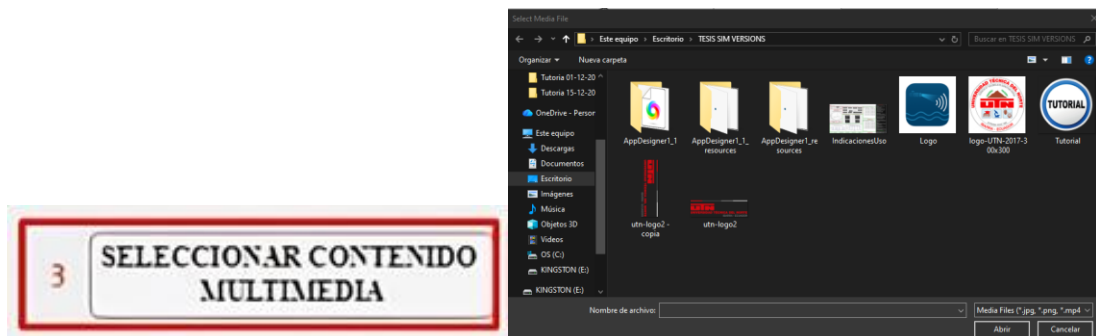
- Limitador de Distancia
 - Off.- Distancia de 1km a 10km
 - On.- Distancias de 0m a 50m

2. Randomizar Nodos.



- Permite que los nodos se coloquen en una posición aleatoria dentro de la distancia colocada de forma manual o por el limitador.

3. Seleccionador de Contenido Multimedia.



- Permite seleccionar una imagen o video a través del administrador de archivos.
- Dependiendo del contenido multimedia seleccionado la simulación puede requerir mayor o menor procesamiento.

4. Parámetros del entorno subacuático.

- Se definen a través de sliders las condiciones a simular tanto para la comunicación óptica como la acústica.

5. Simular.



- Cada vez que simulamos, generaremos una ejecución que se visualizará en los diferentes apartados de resultados.

6. Guardar.

RECOPIACION DE RESULTADOS COMUNICACION OPTICA		
Ejecución #	Posición Tx (X,Y,Z)	Posición Rx (X,Y,Z)
1	(387.35, -1045.19, -3081.50)	(455.29, -1062.93, -3107.84)
2	(387.35, -1045.19, -3081.50)	(455.29, -1062.93, -3107.84)
3	(387.35, -1045.19, -3081.50)	(455.29, -1062.93, -3107.84)
4	(387.35, -1045.19, -3081.50)	(455.29, -1062.93, -3107.84)
5	(387.35, -1045.19, -3081.50)	(455.29, -1062.93, -3107.84)
6	(387.35, -1045.19, -3081.50)	(455.29, -1062.93, -3107.84)
7	(387.35, -1045.19, -3081.50)	(455.29, -1062.93, -3107.84)
8	(387.35, -1045.19, -3081.50)	(455.29, -1062.93, -3107.84)
9	(387.35, -1045.19, -3081.50)	(455.29, -1062.93, -3107.84)
10	(387.35, -1045.19, -3081.50)	(455.29, -1062.93, -3107.84)

6

- Permite guardar la recopilación de resultados de la comunicación óptica.

7. Guardar.

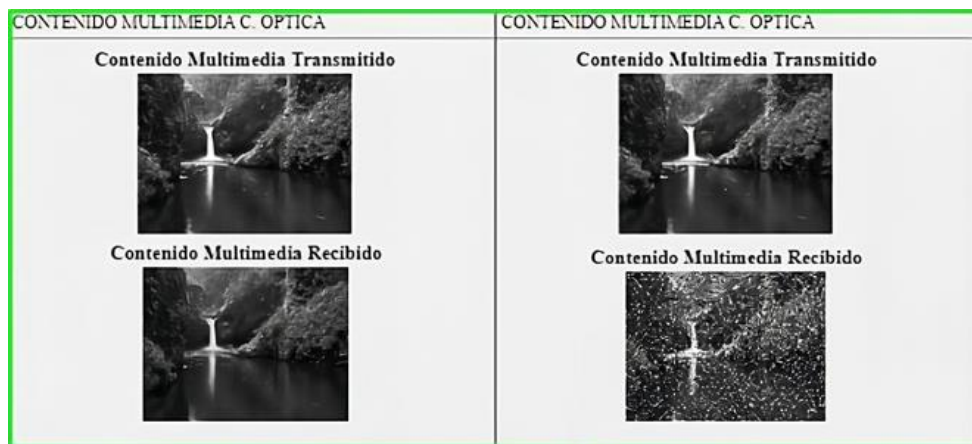
RECOPILACION DE RESULTADOS COMUNICACION ACUSTICA		
Ejecución #	Posición Tx (X,Y,Z)	Posición Rx (X,Y,Z)
1	(387.35, -1045.19, -3081.50)	(455.29, -1062.93, -3107.84)
2	(387.35, -1045.19, -3081.50)	(455.29, -1062.93, -3107.84)
3	(387.35, -1045.19, -3081.50)	(455.29, -1062.93, -3107.84)
4	(387.35, -1045.19, -3081.50)	(455.29, -1062.93, -3107.84)
5	(387.35, -1045.19, -3081.50)	(455.29, -1062.93, -3107.84)
6	(387.35, -1045.19, -3081.50)	(455.29, -1062.93, -3107.84)
7	(387.35, -1045.19, -3081.50)	(455.29, -1062.93, -3107.84)
8	(387.35, -1045.19, -3081.50)	(455.29, -1062.93, -3107.84)
9	(387.35, -1045.19, -3081.50)	(455.29, -1062.93, -3107.84)
10	(387.35, -1045.19, -3081.50)	(455.29, -1062.93, -3107.84)

7

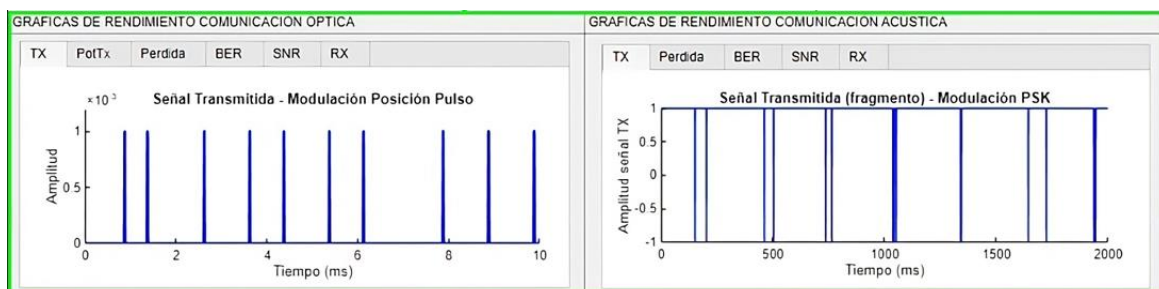
- Permite guardar la recopilación de resultados de la comunicación acústica.

8. Paneles de Resultados

- Visualización del contenido multimedia Tx y Rx.



- Gráficas de rendimiento.

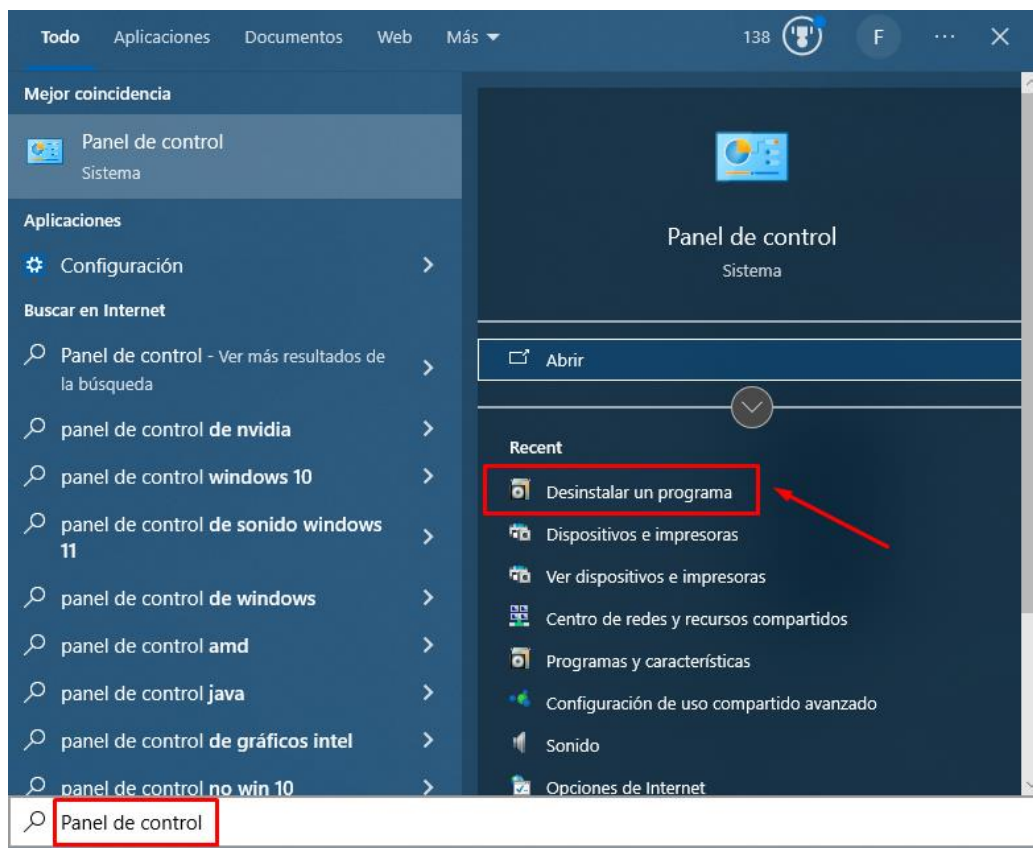


- Paneles de recopilación de resultados.

RECOPIACION DE RESULTADOS COMUNICACION OPTICA			RECOPIACION DE RESULTADOS COMUNICACION ACUSTICA		
Ejecución #	Posición Tx (X,Y,Z)	Posición Rx (X,Y,Z)	Ejecución #	Posición Tx (X,Y,Z)	Posición Rx (X,Y,Z)
1	(387.35, -1045.19, -3081.50)	(455.29, -1062.93, -3107.84)	1	(387.35, -1045.19, -3081.50)	(455.29, -1062.93, -3107.84)
2	(387.35, -1045.19, -3081.50)	(455.29, -1062.93, -3107.84)	2	(387.35, -1045.19, -3081.50)	(455.29, -1062.93, -3107.84)
3	(387.35, -1045.19, -3081.50)	(455.29, -1062.93, -3107.84)	3	(387.35, -1045.19, -3081.50)	(455.29, -1062.93, -3107.84)
4	(387.35, -1045.19, -3081.50)	(455.29, -1062.93, -3107.84)	4	(387.35, -1045.19, -3081.50)	(455.29, -1062.93, -3107.84)
5	(387.35, -1045.19, -3081.50)	(455.29, -1062.93, -3107.84)	5	(387.35, -1045.19, -3081.50)	(455.29, -1062.93, -3107.84)
6	(387.35, -1045.19, -3081.50)	(455.29, -1062.93, -3107.84)	6	(387.35, -1045.19, -3081.50)	(455.29, -1062.93, -3107.84)
7	(387.35, -1045.19, -3081.50)	(455.29, -1062.93, -3107.84)	7	(387.35, -1045.19, -3081.50)	(455.29, -1062.93, -3107.84)
8	(387.35, -1045.19, -3081.50)	(455.29, -1062.93, -3107.84)	8	(387.35, -1045.19, -3081.50)	(455.29, -1062.93, -3107.84)
9	(387.35, -1045.19, -3081.50)	(455.29, -1062.93, -3107.84)	9	(387.35, -1045.19, -3081.50)	(455.29, -1062.93, -3107.84)
10	(387.35, -1045.19, -3081.50)	(455.29, -1062.93, -3107.84)	10	(387.35, -1045.19, -3081.50)	(455.29, -1062.93, -3107.84)

Anexo C. 3. Desinstalación

El proceso para desinstalar la aplicación se lleva a cabo como el de cualquier otro software o aplicación. Po lo cual, únicamente es necesario acceder desde nuestro computador al Panel de control y seleccionar “Desinstalar un programa”.



Una vez seleccionada la opción mencionada previamente, buscamos dentro de nuestros programas instalados la aplicación con el nombre “TIC_UWOC_UTN” y seleccionamos en “desinstalar o cambiar” para llevar a cabo la desinstalación.

