



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

**Diseño de un sistema de transmisión-recepción óptico sumergible para
identificar contaminantes en agua de experimentación en el rango de
200nm a 400nm (UV)**

**Trabajo de Titulación para optar al título de Ingeniero en
Telecomunicaciones**

Autor:

Carlos Daniel López Lucio

Tutor:

Ing. Pedro Fernando Escudero Villa PhD.

Riobamba, Ecuador. 2024

DERECHOS DE AUTORÍA

Yo, **López Lucio Carlos Daniel**, con cédula de ciudadanía **2100851092**, autor del trabajo de investigación titulado, **“DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRANSMISIÓN-RECEPCIÓN ÓPTICO SUMERGIBLE PARA IDENTIFICAR CONTAMINANTES EN AGUA DE EXPERIMENTACIÓN EN EL RANGO DE 200NM A 400NM (UV)”**, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mí exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedo a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autor (a) de la obra referida, será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba 29 de noviembre, 2024

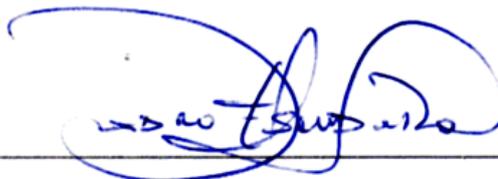


López Lucio Carlos Daniel
C.I: 2100851092

DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

Quien suscribe, **Ing. Pedro Fernando Escudero Villa PhD** catedrático adscrito a la Facultad de **Ingeniería**, por medio del presente documento certifico haber asesorado y revisado el desarrollo del trabajo de investigación "**DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRANSMISIÓN-RECEPCIÓN ÓPTICO SUMERGIBLE PARA IDENTIFICAR CONTAMINANTES EN AGUA DE EXPERIMENTACIÓN EN EL RANGO DE 200NM A 400NM (UV)**", bajo la autoría de **Carlos Daniel López Lucio**; por lo que se autoriza ejecutar los trámites legales para su sustentación.

Es todo cuanto informar en honor a la verdad; en Riobamba, 29 de noviembre de 2024



Ing. Pedro Fernando Escudero Villa PhD

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación **“DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRANSMISIÓN-RECEPCIÓN ÓPTICO SUMERGIBLE PARA IDENTIFICAR CONTAMINANTES EN AGUA DE EXPERIMENTACIÓN EN EL RANGO DE 200NM A 400NM (UV)”**, presentado por **López Lucio Carlos Daniel**, con cédula de identidad número **2100851092**, bajo la tutoría de **Pedro Fernando Escudero Villa, PhD**; certificamos que recomendamos la **APROBACIÓN** de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 29 de noviembre de 2024.

Presidente del Tribunal de Grado
Mgs. Deysi Vilma Inca Balseca

Miembro del Tribunal de Grado
Marlon Danilo Basantes Valverde PhD.

Miembro del Tribunal de Grado
Leonardo Fabián Rentería Bustamante
PhD.

CERTIFICADO ANTIPLAGIO

CERTIFICACIÓN

Que, **LÓPEZ LUCIO CARLOS DANIEL** con CC: **2100851092**, estudiante de la Carrera **TELECOMUNICACIONES**, Facultad de **INGENIERÍA**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado "**DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRANSMISIÓN-RECEPCIÓN ÓPTICO SUMERGIBLE PARA IDENTIFICAR CONTAMINANTES EN AGUA DE EXPERIMENTACIÓN EN EL RANGO DE 200NM A 400NM (UV)**", cumple con el 4 %, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **TURNITIN**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 29 de noviembre del 2024.



Ing. Pedro Fernando Escudero Villa PhD
TUTOR TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

DEDICATORIA

Dedicado a la vida

AGRADECIMIENTO

A toda mi familia....

Carlos López

ÍNDICE GENERAL

DERECHOS DE AUTORÍA

DICTAMEN FAVORABLE DEL TUTOR Y MIEMBROS DE TRIBUNAL;

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

CERTIFICADO ANTIPLAGIO

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

RESUMEN

ABSTRACT

CAPÍTULO I.....	17
1. INTRODUCCION.....	17
1.2 Planteamiento del Problema	18
1.3 Objetivos.....	20
1.3.1 General.....	20
1.3.2 Específicos.....	20
CAPÍTULO II.....	21
2. MARCO TEÓRICO	21
2.1 Fundamentación teórica.....	21
2.1.1 Introducción al análisis de la turbidez del agua y sus métodos de medición. 21	
2.1.2 Principios de la óptica en el análisis de la detección de contaminantes en el agua.....	23
2.1.3 Espectroscopía y Radiación Ultravioleta	24
2.1.4 Uso y disposición de los rayos UV en el monitoreo y tratamiento de aguas ..	24
2.1.5 Fotocatálisis como proceso reactivo en la detección de contaminantes	25
2.1.6 Espectroscopía.....	26
2.1.7 Ley de Beer-Lambert y su aplicación en espectroscopía.....	27

2.1.8 Sensores UV	28
2.1.9 Tecnologías ópticas para la detección sumergible	29
2.1.10 Desafíos de la medición subacuática	30
CAPÍTULO III.	32
3. METODOLOGÍA.	32
3.1 Tipo de Investigación.....	32
3.2 Población y Muestra	32
3.2.1 Población	32
3.2.2 Muestra	33
3.3 Operacionalización de las Variables.....	34
3.3.1 Variables independientes	34
3.3.2 Variables independientes	34
3.4 Procedimiento y análisis	35
3.4.1 Etapa1: Diseño del Sistema Óptico Sumergible	35
3.4.1.1 Requisitos del sistema.....	36
3.4.1.2 Herramientas para el diseño y selección de Componentes Ópticos.....	36
3.4.1.3 Software de Diseño Óptico y Simulaciones.....	37
3.4.2 Etapa 2: Simulación del sistema espectrómetro en el rango ultravioleta	37
3.4.2.1 Herramientas para la Simulación Espectral y Cálculo de Resolución	38
3.4.2.2 Herramientas de Análisis y Validación de Desempeño	38
3.4.3 Etapa 3: Formulación del diseño prototipo sumergible y con capacidad de monitoreo remoto.	38
3.4.3.1 Herramientas de Prototipado y Fabricación.....	38
3.4.3.2 Herramientas para la calibración y mediciones experimentales	39
CAPÍTULO IV.	40
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	40
4.1 Diseño del sistema óptico	40
4.1.1 Transmisión óptica	41

4.1.2 Propagación en el Medio (Fibra Óptica en Agua Contaminada)	42
4.1.3 Recepción de la señal	42
4.1.4 Analisis de las señales en los visualizadores del sistema	43
4.1.4.1 Analizador de espectro #1	43
4.1.4.2 Analizador de espectro #2 y #3	44
4.1.4.3 Analizadores de espectro #3 y #4	45
4.1.4.4 Osciloscopio #1 y #2	45
4.1.4.5 Diagrama de ojo y analisis de BER	46
4.1.4.6 Interpretación de la calidad de la señal	48
4.2 Simulación del sistema óptico	49
4.2.1 Simulación Espectral y Cálculo de Resolución	49
4.2.1.1 Contaminantes y sus Niveles de Absorción UV	49
4.2.2 Relación de los contaminantes con el Río Chibunga y la Laguna de Colta ...	50
4.3 Diseño del sistema de adquisición de datos	51
4.3.1 Descripción del Sistema	51
4.3.1.1 Etapa de transmisión	52
4.3.1.2 Etapa de recepción	53
4.3.2 Funcionamiento General	54
4.4 Simulación del sistema electrónico	54
4.4.1 Simulación de la Etapa de Transmisión del sistema	55
4.4.2 Simulación de la Etapa de recepción del sistema	56
4.4.3 Simulación de la Etapa de Procesamiento de datos del sistema	56
4.5 Diseño del sistema prototipo	57
4.4.4 Descripción General del Diseño y proceso de fabricación	58
4.4.5 Resultados del Diseño	58
4.6 Resultados y análisis estadístico	59
4.4.6 Prueba de normalidad turbidez	59

4.4.7 Prueba de normalidad conductividad	61
CAPÍTULO V	64
5. CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES	64
5.1 Conclusiones.....	64
5.2 Recomendaciones	65
BIBLIOGRAFÍA	66
ANEXOS	68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Variables independientes	34
Tabla 2: Variables independientes	34
Tabla 3: Ubicaciones para la toma de muestras	59
Tabla 4: Analisis del p-valor turbidez	60
Tabla 5: Analisis del p-valor conductividad	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1:Niveles de turbidez del agua	21
Figura 2: Nefelometría.....	22
Figura 3: Turbidimetría.....	23
Figura 4: Rango de luz UV para desinfección	23
Figura 5: Espectroscopia.....	24
Figura 6: Desinfección de agua con luz UV	25
Figura 7: Fotocatálisis	26
Figura 8:Espectroscopía de fotoelectrones	26
Figura 9:Rango de captación de la luz en un sensor UV	28
Figura 10:Tipos de sensores.....	29
Figura 11:Led infrarrojos en drones	30
Figura 12:Comunicación Subacuática	31
Figura 13:Esquema del desarrollo del proyecto	35
Figura 14:Sistema óptico diseñado en OptiSystem	40
Figura 15:Etapa de transmisión Optica	41
Figura 16:Medio de propagación (Agua contaminada)	42
Figura 17:Etapa de recepción óptica	42
Figura 18:Espectro de la señal óptica modulada a 300nm	44
Figura 19:Señal amplificada y filtrada a 300nm	45
Figura 20:Espectro de las componentes en frecuencia de la señal.....	45
Figura 21: Pulsos digitales modulados	46
Figura 22:Diagrama de Ojo y BER	47
Figura 23:Sistema óptico diseñado en OptiSystem.....	49
Figura 24:Esquema del sistema de adquisición de datos.....	51
Figura 25:Etapa de transmisión del prototipo	52
Figura 26:Etapa de recepción del prototipo	53
Figura 27:Sistema electrónico diseñado en proteus	55
Figura 28:Diagrama de bloques de funcionamiento del sistema electrónico	57
Figura 29:Modelo del prototipo en 3D	59
Figura 30: Diagrama de cajas. Distribución de turbidez por ubicación	60
Figura 31: Turbidez respecto al número de muestras en tres ubicaciones	61
Figura 32: Diagrama de cajas. Distribución de conductividad por ubicación	62
Figura 33: Conductividad respecto al número de muestras en tres ubicaciones.....	62
Figura 34: Diagrama de dispersión. Relación entre conductividad y turbidez por ubicación	63
Figura 35: Prototipo Comercial vs Prototipo No Comercial.....	63

<i>Figura 36: Código en arduino para la obtención de datos</i>	69
<i>Figura 37: Impresión del modelo diseñado en 3D</i>	70

RESUMEN

En el presente trabajo desarrolla el diseño de un sistema óptico sumergible para la transmisión y recepción de señales en el rango ultravioleta (200 nm a 400 nm) con el objetivo de identificar contaminantes en agua de experimentación. Este sistema busca ofrecer una herramienta eficiente y precisa para detectar sustancias nocivas mediante el análisis espectral de las interacciones ópticas de la luz UV con los contaminantes presentes en el agua. El diseño del sistema contempla dos módulos principales: un transmisor óptico, que emite señales de luz UV en un rango controlado, y un receptor óptico, encargado de captar y analizar la respuesta espectral del medio acuático. El transmisor se basa en fuentes de luz ultravioleta calibradas para operar en el rango especificado, mientras que el receptor emplea sensores ópticos de alta sensibilidad y selectividad, capaces de registrar los cambios en la intensidad y longitud de onda de la luz tras su interacción con los contaminantes. Además, se diseñó una estructura sumergible resistente a condiciones adversas, asegurando la operación en entornos acuáticos con distintos niveles de turbidez y temperatura. La señal recibida es procesada mediante algoritmos de análisis espectral para identificar los comportamientos espectrales que caracterizan a los contaminantes más comunes, como metales pesados y compuestos orgánicos volátiles. Los resultados demuestran que el sistema es una alternativa viable para monitorear la calidad del agua en tiempo real, con aplicaciones potenciales en industrias, laboratorios de investigación y monitoreo ambiental. Este trabajo contribuye al desarrollo de herramientas tecnológicas sostenibles para la gestión de recursos hídricos y la preservación ambiental, ofreciendo un enfoque innovador basado en óptica y espectroscopia UV para la detección de contaminantes.

Palabras claves: Espectrometría, Contaminantes de agua, Instrumentación portátil, transmisor-receptor.

ABSTRACT

This work presents the design of a submersible optical system for transmitting and reception signals in the ultraviolet range (200 nm to 400 nm), aimed at identifying contaminants in experimental water samples. The system seeks to provide an efficient and accurate tool for detecting harmful substances by analyzing the spectral interactions of UV light with contaminants present in water. The system design includes two main modules: an optical transmitter, which emits UV light signals within a controlled range, and an optical receiver, responsible for capturing and analyzing the spectral response of the aquatic medium. The transmitter is based on ultraviolet light sources calibrated to operate within the specified range. At the same time, the receiver employs highly sensitive and selective optical sensors capable of recording changes in the intensity and wavelength of light after interacting with contaminants. Additionally, a robust submersible structure was designed to withstand adverse conditions, ensuring reliable operation in aquatic environments with varying levels of turbidity and temperature. The received signal is processed using spectral analysis algorithms to identify specific spectral behaviors associated with common contaminants, such as heavy metals and volatile organic compounds. The results demonstrate that the system is a viable real-time water quality monitoring alternative, with potential applications in industries, research laboratories, and environmental monitoring. This work contributes to developing sustainable technological tools for water resource management and ecological preservation, offering an innovative approach based on UV optics and spectroscopy for contaminant detection.

Keywords: Spectrometry, Water Contaminants, Portable Instrumentation, Transmitter-Receiver System.



Reviewed by:

Mgs. Sofía Freire Carrillo

ENGLISH PROFESSOR

C.C. 0604257881

CAPÍTULO I.

1. INTRODUCCION

Las tecnologías ópticas pueden ser utilizadas para abordar problemas actuales, como la identificación de sustancias contaminantes en el agua. La exploración y aplicación de estas tecnologías en entornos experimentales conlleva precisión y resolución. La óptica se presenta como un recurso eficaz y rápido para el monitoreo y análisis de laboratorio a gran escala, permitiendo detectar parámetros relevantes sobre los contaminantes de manera igual de efectiva que los métodos físico-químicos tradicionales, con la ventaja de que no se requiere llevar el material contaminado al laboratorio para su análisis [1].

La identificación precisa de contaminantes dentro del espectro de longitud de onda mencionado es crucial para la supervisión y gestión efectiva de la calidad del agua en entornos experimentales y de laboratorio. La vigilancia continua de contaminantes en la gama ultravioleta puede ser fundamental para asegurar el funcionamiento adecuado y adaptado a las condiciones específicas de experimentación. Es importante tener en cuenta que la radiación solar que llega a la Tierra abarca un amplio espectro de longitudes de onda, desde los rayos gama hasta las ondas de radio de frecuencia muy baja (rayos infrarrojos). La capa de ozono absorbe gran parte de la radiación perjudicial para los organismos vivos, incluyendo desde los rayos gama hasta una parte de la radiación ultravioleta. La radiación ultravioleta, con longitudes de onda más cortas que la luz visible y que van desde los 100 nm hasta los 400 nm, es invisible para el ojo humano y puede causar daños a los seres humanos [2].

El monitoreo de la calidad del agua es una parte esencial de la gestión de la calidad del agua para distintos tipos de instituciones. La espectrofotometría UV se está convirtiendo en una de las opciones más populares para el monitoreo de la calidad del agua y el control de procesos, ya que no requieren reactivos, no necesitan tratamientos previos de las muestras y pueden proporcionar mediciones continuas. Las ventajas de los sensores UV es que pueden capturar eventos y permitir respuestas efectivas a los cambios en la calidad del agua en tiempo real [3].

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo principal desarrollar un sistema de transmisión-recepción óptico sumergible que permita identificar con precisión y en tiempo real contaminantes presentes en el agua de experimentación en el rango de 200 nm a 400 nm (UV). Se pretende lograr un sistema eficaz que facilite la monitorización continua de la calidad del agua en entornos experimentales y de laboratorio, contribuyendo así a una gestión efectiva y adaptada a las condiciones específicas de estudio. Con esta propuesta, se busca aprovechar las ventajas de la óptica para mejorar los procesos de identificación y control de contaminantes, sin necesidad de trasladar las muestras contaminadas al laboratorio, aportando agilidad y precisión a las tareas de monitoreo ambiental.

1.2 Planteamiento del Problema

Según datos recopilados por la Organización Mundial de la Salud (OMS), se estima que aproximadamente 2 mil millones de personas en todo el mundo beben agua contaminada, con una variedad de sustancias nocivas, incluidos microorganismos acuáticos como bacterias y algas [4]. Además, un informe de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) señala que el crecimiento descontrolado de algas en cuerpos de agua debido a la eutrofización es un problema cada vez más común, afectando la calidad del agua experimental en laboratorios y entornos de investigación [5].

Estas cifras reflejan la magnitud de la contaminación presente en el agua y subrayan la necesidad urgente de desarrollar sistemas precisos y eficientes para su detección y monitoreo en tiempo real, con el fin de garantizar la integridad y la fiabilidad de los experimentos científicos sensibles a la radiación UV en entornos de laboratorio.

Los contaminantes que se encuentran en el agua experimental dentro del rango de 200 nm a 400 nm pueden originarse de diversas fuentes y factores. Entre las posibles fuentes de contaminación en esta longitud de onda se incluyen tanto fuentes naturales, como minerales y compuestos orgánicos presentes en el agua, como también factores humanos como la contaminación microbiológica provocada por microorganismos acuáticos como algas y bacterias. La eutrofización del agua, causada por el enriquecimiento de nutrientes, puede favorecer el crecimiento de algas y otros organismos, lo cual afecta negativamente la calidad del agua experimental.

En el estudio de Kim et al, se estableció una estrecha correlación entre la absorbancia de UV y el contenido de carbono orgánico total en el agua, con un coeficiente de determinación ajustado alto de 0.997. La comparación de las concentraciones de TOC calculadas a partir de los espectros de absorción de UV con las medidas por un analizador de TOC convencional mostró un buen acuerdo, destacando una mayor concordancia a medida que aumentaba el valor de TOC. El método de absorbancia de UV propuesto en el estudio se presenta como una herramienta eficaz para el monitoreo en tiempo real de la contaminación del agua, con potencial aplicación en entornos industriales [6].

En un estudio posterior, de Shi et. Al, se destaca que el método propuesto resalta la capacidad del método de absorbancia de UV para monitorear en tiempo real la contaminación del agua y su aplicabilidad en entornos industriales [3].

Mientras que el estudio de Kim et al se centró en la determinación de la concentración de compuestos orgánicos mediante la absorción de UV, este estudio se enfoca en la aplicación de espectrofotómetros UV-Vis en línea para la gestión de la calidad del agua potable. Ambos trabajos resaltan la importancia de la monitorización en tiempo real de la calidad del agua, pero se diferencian en los métodos y las herramientas utilizadas, destacando la versatilidad y la capacidad de respuesta más rápida de los espectrofotómetros UV-Vis en línea en comparación con los métodos convencionales.

Se sugiere que futuras investigaciones podrían combinar las fortalezas de ambos enfoques para lograr un sistema integral de monitorización y control de calidad del agua en tiempo real en entornos industriales.

La contaminación presente en el agua de experimentación de laboratorio puede ocasionar diversos problemas y desafíos en la ejecución de experimentos científicos, como la inexactitud de los resultados, la dificultad para interpretar señales y la falta de reproducibilidad. La selección del método apropiado para detectar los contaminantes en el agua dependerá de factores como el tipo de contaminante a analizar, la sensibilidad requerida y el presupuesto disponible.

La presencia de contaminantes en el agua de experimentación en el rango de 200 nm a 400 nm es especialmente preocupante debido a la importancia de este espectro ultravioleta en experimentos sensibles a la radiación UV. La absorción y dispersión de la luz en este rango de longitud de onda puede interferir con mediciones espectrofotométricas y procesos fotoquímicos, lo que compromete la validez y la fiabilidad de los resultados experimentales. Por tanto, la identificación y cuantificación precisa de estos contaminantes son fundamentales para garantizar la integridad y la reproducibilidad de los experimentos en entornos de laboratorio.

1.3 Objetivos

1.3.1 General

- Diseñar un sistema de transmisión-recepción óptico sumergible para identificar contaminantes en agua de experimentación en el rango de 200nm – 400nm (UV).

1.3.2 Específicos

- Diseñar el sistema óptico (transmisor - receptor) y el subsistema electrónico de control y procesado de datos.
- Simular el sistema espectrómetro en el rango ultravioleta (200nm - 400nm).
- Formular un diseño prototipo del sistema para que sea sumergible y permita el monitoreo remoto.

La medición de la turbidez del agua implica evaluar la intensidad de la desviación en la dirección de un haz de luz al encontrarse con un obstáculo o un cambio en la densidad de una sustancia. Los NTU (Unidades Nefelométricas de Turbidez, por sus siglas en inglés) representan la variable de turbidez, que varía en función del tamaño y forma de las partículas, el color de la solución, y es la unidad de medida estándar utilizada para esta evaluación [9].

La nefelometría es un enfoque de análisis óptico empleado para determinar la turbidez o la cantidad de partículas suspendidas en un líquido, aprovechando la dispersión de la luz. En esta técnica, se emite un haz de luz a través de la muestra y las partículas suspendidas dispersan dicha luz en distintas direcciones, lo que posibilita la evaluación precisa de la turbidez. Este método se fundamenta en la identificación y medición de la intensidad de la luz dispersada por las partículas presentes en la muestra, y su aplicación abarca diversos campos como la química, la biología, la medicina y la ingeniería ambiental [10].

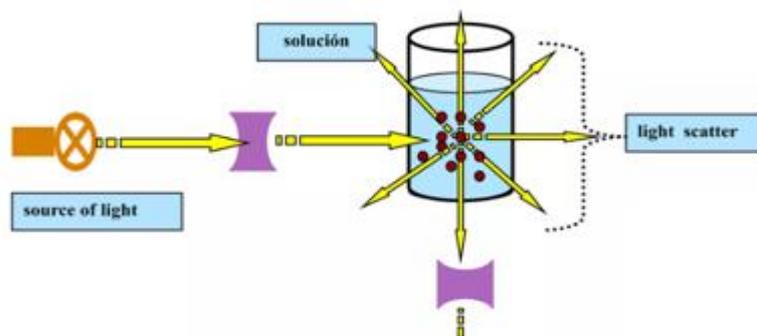


Figura 2: Nefelometría
(Los métodos turbidimétricos) [11]

La turbidimetría es una técnica analítica que se emplea para cuantificar la turbidez de una muestra líquida, determinando la cantidad de partículas suspendidas en ella mediante la medición de la absorción de la luz que atraviesa la muestra. En este método, se emite un haz de luz a través de la muestra y un detector mide la intensidad de la luz transmitida, la cual disminuye debido a la presencia de partículas en suspensión. A partir de esta disminución en la intensidad luminosa, es posible inferir la concentración de partículas y, por ende, la turbidez de la muestra. La turbidimetría se utiliza en campos como la microbiología, la industria alimentaria y el control de calidad ambiental [11].

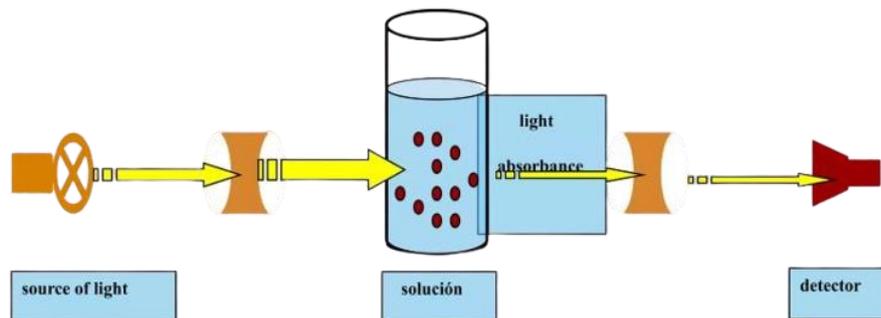


Figura 3: Turbidimetría
(Los métodos turbidométricos) [11]

2.1.2 Principios de la óptica en el análisis de la detección de contaminantes en el agua

La óptica es una disciplina que se encarga del estudio y manipulación de la luz para su aplicación en distintos campos, incluyendo la purificación y tratamiento de aguas. La óptica ha demostrado ser una herramienta efectiva en el tratamiento de aguas contaminadas, ya que permite la desinfección de microorganismos patógenos y la eliminación de contaminantes químicos de forma eficiente y sostenible. Uno de los principales métodos de tratamiento de aguas basados en la óptica es la desinfección con luz ultravioleta (UV). La radiación UV tiene la capacidad de destruir la estructura molecular de microorganismos como bacterias, virus y protozoos, impidiendo su reproducción y causando su muerte. Este proceso es especialmente útil en el tratamiento de aguas residuales y potabilización de agua para consumo humano, ya que reduce el riesgo de enfermedades transmitidas por el agua. Además

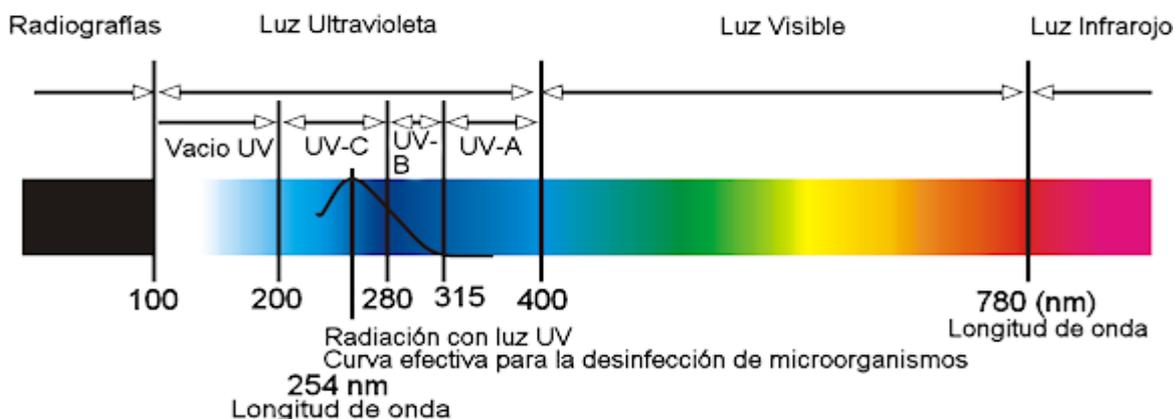


Figura 4: Rango de luz UV para desinfección
(Application of Online UV) [3]

de la desinfección con UV, la óptica también se utiliza en la detección y eliminación de contaminantes químicos en el agua, como pesticidas, metales pesados y compuestos

orgánicos. La espectroscopia de fluorescencia y la técnica de fotocatalisis son ejemplos de tecnologías ópticas que permiten la identificación y degradación de estos contaminantes, contribuyendo a la protección del medio ambiente y la salud pública [12].

2.1.3 Espectroscopía y Radiación Ultravioleta

La radiación ultravioleta (UV) es un tipo de radiación electromagnética en el rango de longitudes de onda de 10 a 400 nanómetros, que se encuentra entre la luz visible y los rayos X en el espectro electromagnético. Esta radiación se origina principalmente a partir del sol y puede tener efectos tanto beneficiosos como perjudiciales en los seres vivos y el medio ambiente. La radiación ultravioleta se divide en tres subcategorías basadas en su longitud de onda: UV-A (400-315 nm), UV-B (315-280 nm) y UV-C (280-100 nm). La capa de ozono en la atmósfera absorbe la mayor parte de la radiación UV-B y UV-C, protegiendo así a los seres vivos de la exposición directa a estas longitudes de onda más dañinas [13]. ya que reduce el riesgo de enfermedades transmitidas por el agua.

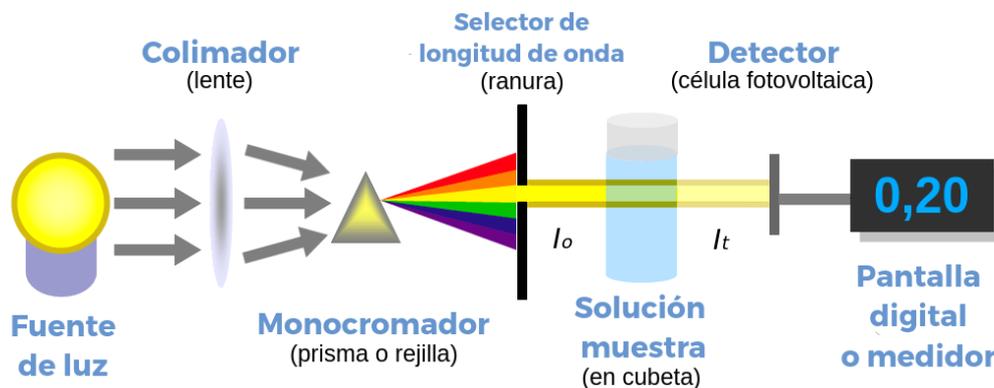


Figura 5: Espectroscopia
(Diseño de un espectrofotómetro) [1]

2.1.4 Uso y disposición de los rayos UV en el monitoreo y tratamiento de aguas

Los rayos ultravioletas (UV) se utilizan de manera efectiva en el tratamiento y monitoreo de aguas debido a su capacidad para desinfectar y descomponer compuestos orgánicos presentes en el agua. En el tratamiento de aguas, la radiación UV se aplica para eliminar microorganismos patógenos, como bacterias, virus y parásitos, sin la necesidad de productos químicos adicionales, ofreciendo una alternativa respetuosa con el medio ambiente. Además, en el monitoreo de aguas, se utilizan técnicas de espectrofotometría UV para detectar y

cuantificar la presencia de contaminantes orgánicos, metales pesados y otros compuestos que pueden afectar la calidad del agua. La radiación UV actúa dañando el material genético de los microorganismos presentes en el agua, impidiendo su capacidad de reproducción y causando su inactivación. En el caso de los contaminantes orgánicos, la radiación UV puede descomponer y degradar estos compuestos, facilitando su eliminación del agua [14].

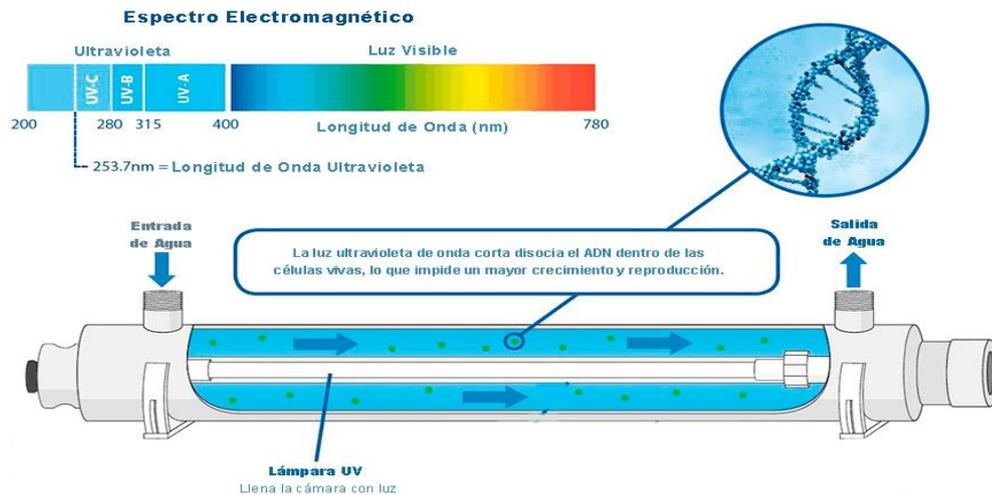


Figura 6: Desinfección de agua con luz UV (Aplicación of Online UV) [3]

2.1.5 Fotocatálisis como proceso reactivo en la detección de contaminantes

La fotocatálisis es un proceso químico que implica la aceleración de una reacción mediante la interacción de la luz solar UV con un catalizador, denominado fotocatalizador. En este proceso, los fotocatalizadores absorben la radiación electromagnética, generalmente luz ultravioleta, lo que les permite generar pares de electrones y huecos que reaccionan con otras especies químicas presentes en el entorno. Estas reacciones fotoinducidas pueden descomponer compuestos orgánicos, degradar contaminantes o catalizar reacciones de oxidación-reducción, mejorando la eficiencia y velocidad de los procesos químicos.

La fotocatálisis tiene aplicaciones en diversos campos, como la descontaminación de aguas residuales, la purificación del aire, la síntesis de productos químicos y la remoción de compuestos tóxicos. Los fotocatalizadores más comunes utilizados son basados en óxidos metálicos como el dióxido de titanio (TiO_2) y óxidos de zinc (ZnO), que presentan propiedades de absorción de luz y generación de pares electrón-hueco ideales para la fotocatálisis [15].

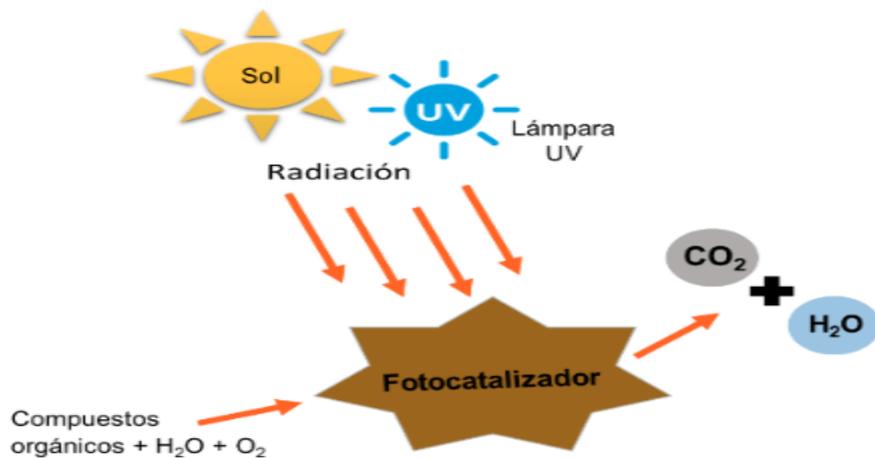


Figura 7: Fotocatálisis
(Fotocatalizador solar) [15]

2.1.6 Espectroscopía

La espectroscopía de fotoelectrones de líquidos es una técnica prometedora que ofrece un gran potencial para una comprensión más profunda de la estructura electrónica de los líquidos y las soluciones. El agua es posiblemente el líquido más importante, debido a su relevancia para todos los organismos vivos. Por lo tanto, se han estudiado en detalle los espectros de fotoelectrones del agua líquida [16].

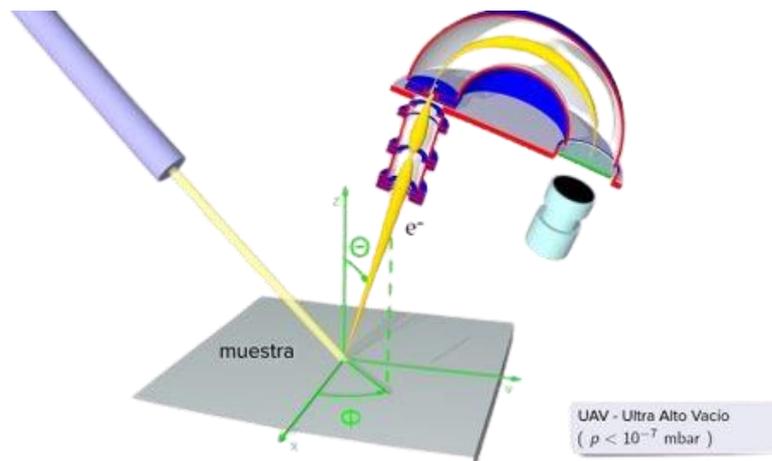


Figura 8: Espectroscopía de fotoelectrones
(Fotocatalizador solar) [15]

La espectroscopía de fotoelectrones en tiempo real de soluciones acuosas en escalas de tiempo de picosegundos a femtosegundos es un área de investigación muy activa que está proporcionando nuevas perspectivas sobre la dinámica de especies solvatadas. Con el

desarrollo de la espectroscopía de fotoelectrones en tiempo real, ha surgido la posibilidad de realizar mediciones de tipo electrónica en agua líquida y soluciones acuosas. Se ha demostrado que la longitud efectiva de atenuación del electrón emitido desde un depósito de agua es bastante constante para energías cinéticas en el rango de 5 a 40 eV, lo que significa que se investiga una profundidad similar del depósito de líquido alrededor de 2 nm. Tales mediciones, que han sido reportadas recientemente por primera vez, ofrecen acceso experimental a la dinámica electrónica en solución, es decir, en las condiciones reales en las que tienen lugar la mayoría de las reacciones químicas y transformaciones biológicas [17].

2.1.7 Ley de Beer-Lambert y su aplicación en espectroscopía

La Ley de Beer-Lambert es un principio fundamental en espectroscopia que establece una relación lineal entre la absorbancia de una solución y la concentración del analito presente en ella. En el caso de la espectroscopia UV, la Ley de Beer-Lambert se utiliza para cuantificar concentraciones de contaminantes en muestras de agua u otros líquidos, mediante la medición de la absorbancia de la luz ultravioleta a través de la muestra.

Esta ley matemática se expresa como:

$$A = \epsilon cl \quad (1)$$

donde:

- A es la absorbancia de la muestra.
- ϵ es el coeficiente de extinción molar del analito.
- c es la concentración del analito en la muestra.
- l es la longitud del camino óptico a través de la muestra.

La aplicación de la Ley de Beer-Lambert en espectroscopia UV para la cuantificación de contaminantes en agua ha demostrado ser una herramienta efectiva y ampliamente utilizada en estudios ambientales y de calidad del agua [18].

2.1.8 Sensores UV

Dentro del contexto de los sensores ultravioleta, los cuales están compuestos principalmente por un fotodiodo o fototransistor sensible a la radiación ultravioleta, se busca maximizar la sensibilidad de respuesta, a través de, por ejemplo, películas de dióxido de carbono (CO₂), en su exitosa integración en un dispositivo funcional. El enfoque se centra en el desarrollo y optimización de las propiedades eléctricas y ópticas de estas películas para lograr este objetivo. El propósito final es contribuir al avance de sensores eficaces con aplicaciones significativas en áreas como la monitorización ambiental y la industria. Estos dispositivos están diseñados para ser sensibles a la radiación de cierta longitud de onda en el espectro UV, lo que les permite detectar y cuantificar la intensidad de los rayos UV incidentes [19].

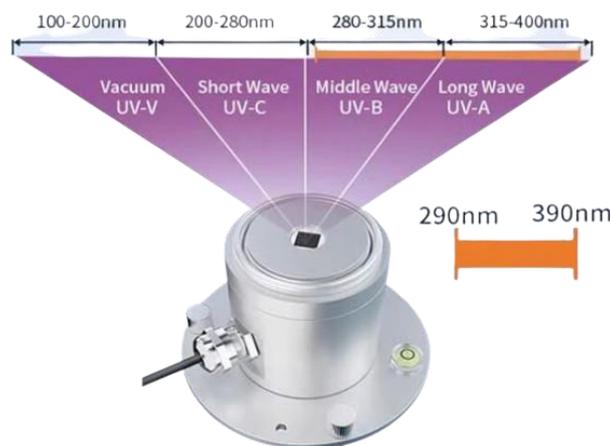


Figura 9: Rango de captación de la luz en un sensor UV (Desarrollo de sensores) [19]

El filtro óptico es una parte clave del sensor, ya que permite seleccionar la longitud de onda específica de los rayos UV que se desea detectar, rechazando la radiación no deseada que pueda interferir con la medición. Los filtros ópticos pueden ser de diferentes tipos, como filtros de interferencia o filtros de absorción, dependiendo de las necesidades específicas de detección. Los circuitos electrónicos del sensor se encargan de amplificar la señal generada por el fotodiodo o fototransistor, así como de procesarla y convertirla en una salida digital o analógica que puede ser utilizada por otros dispositivos o sistemas de control. Estos circuitos pueden incluir amplificadores, conversores analógico-digitales, microcontroladores y otros componentes electrónicos necesarios para el funcionamiento del sensor [20].

2.1.9 Tecnologías ópticas para la detección sumergible

En los últimos años, la comunicación óptica submarina se ha convertido en un candidato potencial para la transmisión de señales en medios acuáticos. A diferencia de las comunicaciones tradicionales, la detección óptica que es limpia y segura, admite una alta tasa de transferencia de datos y ancho de banda con un retraso mínimo. Sin embargo, su implementación representa un desafío en comparación con las comunicaciones terrestres a larga distancia. Además, los sistemas ópticos sufren de atenuación de señal severa y condiciones de canal con fuerte turbulencia. A medida que se acelera el proceso de desarrollo acuático, los medios técnicos de exploración se están actualizando. Equipados en sumergibles, estos sensores pueden detectar con precisión y en un amplio rango bajo el agua. Además, el desarrollo de la tecnología de sensores se modificará y optimizará según las necesidades de la explotación acuática y marítima. Los sistemas ópticos sumergibles han experimentado un desarrollo significativo a lo largo de los años, con avances en materiales impermeables, tecnología de sellado y diseño de componentes ópticos para resistir las condiciones adversas bajo el agua [21].

Tipos de sensores ópticos utilizados en entornos acuáticos

- Sensores de fluorescencia: utilizados para detectar y cuantificar la presencia de compuestos orgánicos y agentes contaminantes en el agua mediante la emisión de luz fluorescente.
- Sensores de absorción: miden la concentración de sustancias absorbentes en el agua, como contaminantes o pigmentos, a través de la atenuación de la luz incidente.
- Sensores de dispersión de luz: proporcionan información sobre la turbidez del agua al medir la dispersión de la luz incidente por partículas en suspensión [22].



Figura 10: Tipos de sensores (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons) [36]

2.1.10 Desafíos de la medición subacuática

Existen limitaciones para la medición de variables físicas subacuáticas, entre ellas, la baja tasa de transmisión de datos.

La comunicación electromagnética se basa en ondas que pueden propagarse sin necesidad de un medio material. La atenuación de estas ondas en el agua aumenta con la conductividad y la frecuencia utilizada, por lo que es preferible trabajar con frecuencias bajas como ELF y VLF, aunque requieren antenas grandes. Debido a la fuerte atenuación del agua, las técnicas tradicionales de comunicación inalámbrica se ven limitadas en velocidad al no poder trabajar en altas frecuencias. Por eso, se busca innovar con tecnologías de comunicación óptica subacuática, que utiliza la luz como transmisor entre dos puntos. Algunos estudios han logrado velocidades de transmisión de hasta 42.8 Gbps utilizando leds infrarrojos en el aire. Aunque la luz también experimenta atenuación, la velocidad de transmisión de esta tecnología se ve influenciada por la frecuencia de modulación de la fuente luminosa [23].

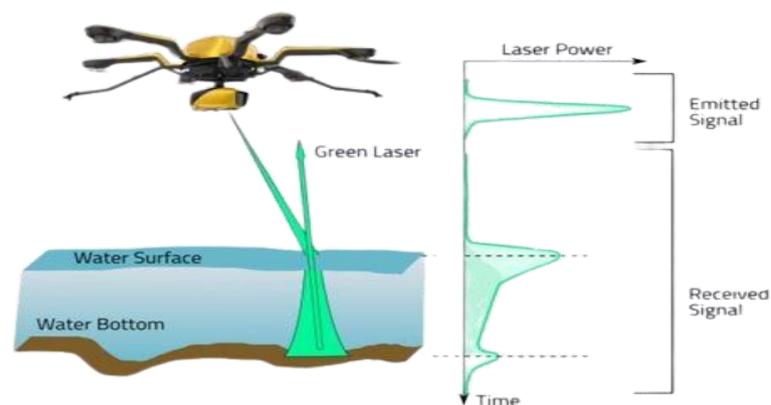
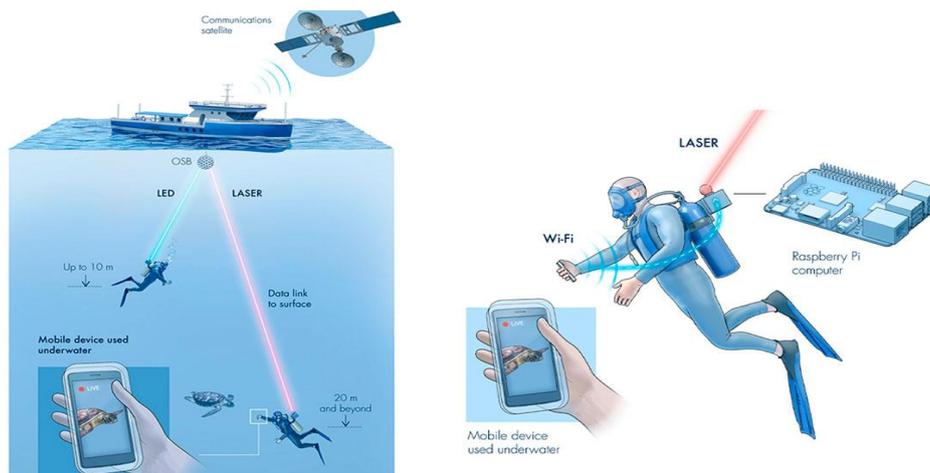


Figura 11: Led infrarrojos en drones
(Diseño de un sistema optico) [23]

Por otro lado, la comunicación acústica se basa en ondas sonoras que necesitan un medio material para propagarse, como el agua. Aunque la velocidad de propagación es rápida en el agua, estas ondas sufren mayor atenuación con frecuencias altas y están influenciadas por la temperatura, la presión y la salinidad del medio. El sonar es una técnica común que utiliza ondas acústicas para comunicación, detección y navegación submarina, pero puede afectar a la vida marina, como el caso de los delfines que se desorientan por el ruido del sonar [24].



*Figura 12: Comunicación Subacuática
(A Review of Underwater Communication Systems) [25]*

La comunicación submarina suele implicar comunicación a grandes distancias. En tiempos recientes, se ha mejorado la tecnología referida a la comunicación submarina inalámbrica u óptica. Es crucial en actividades marinas como la exploración submarina, monitoreo de actividades ambientales submarinas, recolección de datos científicos, control de la contaminación submarina, vigilancia de desastres naturales y operaciones tácticas navales para la seguridad costera. Debido al creciente interés en explorar entornos submarinos para diversas aplicaciones, el uso de la comunicación submarina se ha convertido en un campo crítico y desafiante para apoyar numerosas aplicaciones comerciales, empresariales y militares. Los portadores de ondas acústicas, ópticas y electromagnéticas son útiles para la transmisión de datos en el entorno submarino. En otro contexto, la comunicación de variables subacuáticas a través de cables submarinos es fundamental para la transmisión de datos en entornos marinos. Estos cables permiten la transferencia de información como temperatura, presión, salinidad y otros parámetros relevantes, así como la presencia de contaminantes de diversa índole. La comunicación por cables submarinos es crucial para la monitorización y control de sistemas submarinos, investigación oceanográfica, operaciones marítimas y más. Esta tecnología garantiza una transmisión segura y confiable de datos en entornos subacuáticos. Sin embargo, existen limitaciones de orden físico y constructivo para este tipo de cables de transmisión de datos, que pudieran, incluso, incrementar los costos operativos [25].

CAPÍTULO III.

3. METODOLOGÍA.

3.1 Tipo de Investigación

Para el desarrollo de este proyecto de investigación, se propone la adopción de una metodología mixta que combine tanto enfoques cuantitativos como cualitativos. Esta metodología mixta permitirá abordar de manera integral los diferentes aspectos del diseño, desarrollo y evaluación del sistema óptico sumergible.

Se plantea un enfoque mixto ya que se plantea la necesidad de estudiar la naturaleza de origen mayéutico del fenómeno desde un punto de vista cualitativo con la observación de campo como exegesis de las distintas fuentes de datos. Por otro lado, también posee un enfoque cuantitativo, como método estructurado de recopilación y análisis de información que se lleva a cabo con el uso de herramientas estadísticas y matemáticas con el propósito de cuantificar el problema de investigación, basado en una corriente dialéctica material.

3.2 Población y Muestra

3.2.1 Población

En este proyecto, la población está constituida por los datos obtenidos durante el diseño, simulación y evaluación del sistema óptico sumergible, con especial énfasis en los parámetros relacionados con la calidad del agua y las características espectrales de los contaminantes. Se incluyen variables como **turbidez**, **conductividad eléctrica**, **absorbancia espectral**, y otros indicadores físico-químicos asociados al agua de ríos contaminados. Asimismo, se consideran los datos relacionados con el desempeño del prototipo frente a dispositivos comerciales, como tiempos de respuesta y precisión en la identificación de contaminantes. Dado que no se puede determinar de antemano un número exacto de experimentos, pruebas o simulaciones necesarias para optimizar el diseño y validar su desempeño, la población se considera **infinita**.

3.2.2 Muestra

Para calcular el tamaño de la muestra en una población infinita, se aplica la siguiente fórmula estadística:

$$n = \frac{Z_{\alpha}^2 * p * q}{\alpha^2} \quad (2)$$

Donde:

- n = Tamaño de la muestra
- $\alpha = 0,10$; Nivel de significancia (10%)
- $Z_{\alpha}^2 = 1,96$; Parámetro estadístico que depende del nivel de confianza.
- p = Probabilidad de que ocurra el evento estudiado.
- $q = 1 - p$; Probabilidad de que no ocurra el evento estudiado.

El parámetro de nivel de confianza en su mayoría suele ser del 95%, ($\alpha = 0,05$), en términos de desviaciones típicas, lo que define ambos extremos del intervalo es la semi distancia estandarizada.

Cálculo del Tamaño de la muestra

Datos:

- $\alpha = 0,05$;
- $Z_{\alpha}^2 = 1,96$;
- $p = 0,90$ (95%)
- $q = 1 - 0,90 = 0,10$

$$n = \frac{1,96^2 * 0,90 * 0,10}{0,05^2} \quad (3)$$

$$n = 138,27 \approx 139 \quad (4)$$

Por lo tanto, se requiere una muestra de **139 mediciones** que incluyan pruebas espectrales, análisis físico-químicos y evaluaciones de desempeño, para validar la funcionalidad del

prototipo en comparación con dispositivos comerciales, sin embargo, en este proyecto se realizaron 200 mediciones.

3.3 Operacionalización de las Variables

3.3.1 Variables independientes

Las variables independientes están relacionadas con las condiciones experimentales y de diseño del sistema, las cuales son manipuladas para evaluar su influencia en los resultados.

Tabla 1: Variables independientes

Variables	Concepto	Indicadores	Instrumentos
Propiedades del agua (condiciones físicas y químicas)	Características del agua evaluada, que puede ser natural o contaminada.	Turbidez, conductividad eléctrica	Turbidímetro, conductivímetro (Prototipo diseñado)
Diseño del sistema óptico	Configuración y características del transmisor-receptor UV para la identificación de contaminantes.	Longitud de onda	Software OptiSystem

3.3.2 Variables independientes

Tabla 2: Variables independientes

Variables	Concepto	Indicadores	Instrumentos
Precisión en la identificación de contaminantes	Capacidad del sistema para detectar y discriminar contaminantes.	Absorbancia UV, longitud de onda específica	Espectrómetro UV (Prototipo diseñado)
Desempeño del prototipo	Comparación del sistema sumergible con dispositivos comerciales	Tiempos de respuesta, datos identificados	Cronómetro, software de análisis

3.4 Procedimiento y análisis

El proyecto de este trabajo de investigación se ha diseñado metodológicamente en tres etapas, basado en los objetivos, a saber:

1. Diseño del sistema óptico y electrónico de control
2. Simulación del sistema espectrómetro en el rango ultravioleta
3. Formulación del diseño prototipo sumergible y con capacidad de monitoreo remoto

Cada uno de estos objetivos será abordado de manera secuencial y coordinada, con el objetivo de alcanzar un desarrollo integral y exitoso del sistema propuesto.

El proyecto de investigación se plantea como un proyecto factible con consideraciones económicas y de mercado para su implementación práctica.

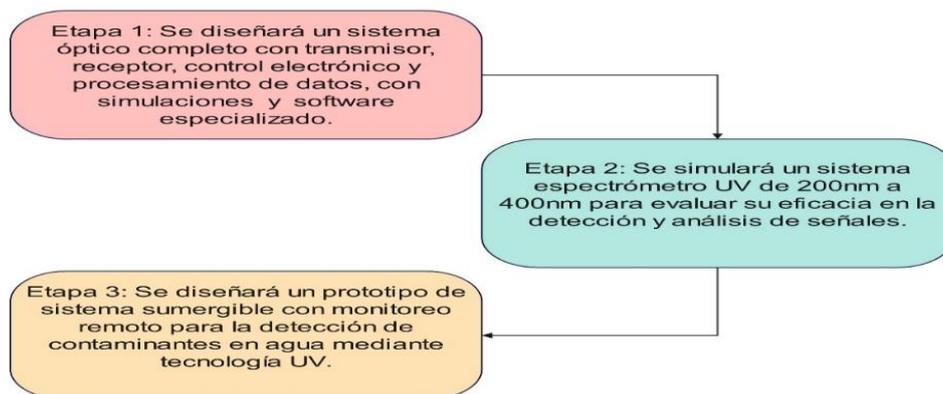


Figura 13: Esquema del desarrollo del proyecto
(Autor)

3.4.1 Etapa 1: Diseño del Sistema Óptico Sumergible

En esta primera etapa, se aborda la tarea de diseñar el sistema óptico que comprende tanto el transmisor como el receptor, así como el subsistema electrónico encargado del control y procesamiento de datos. En esta fase de diseño se considera la definición de los requisitos del sistema, las herramientas y softwares para diseño óptico.

3.4.1.1 Requisitos del sistema

- **Rango espectral:** El sistema debe operar en la banda de 200 a 400 nm, lo que corresponde al ultravioleta (UV). Este rango es crucial en diversas aplicaciones, como la medición de la absorción de materiales en el UV o el análisis de compuestos químicos sensibles a la radiación ultravioleta.
- **Resolución espectral:** La resolución espectral se refiere a la capacidad del sistema para distinguir entre dos longitudes de onda cercanas. Es esencial definir la resolución requerida para la aplicación específica, que podría variar dependiendo del objetivo del experimento, por ejemplo, si se necesita una resolución en el rango de nanómetros o menos.
- **Intensidad y sensibilidad:** El diseño del sistema óptico debe tener en cuenta las condiciones de iluminación y la sensibilidad del detector a las longitudes de onda deseadas. Esto también involucra la optimización de la captación de luz para asegurar una medición precisa y confiable.
- **Tamaño y forma del espectro:** Dependiendo de las características del equipo, el diseño debe contemplar la forma y el tamaño del espectro que se desea medir (espectro completo frente a selección de longitudes de onda).

3.4.1.2 Herramientas para el diseño y selección de Componentes Ópticos

- **Catálogos de Proveedores de Componentes Ópticos:** Las fuentes de luz, lentes, rejillas de difracción, y detectores se seleccionan a partir de catálogos especializados de proveedores como Thorlabs [26], Edmund Optics [27], o Newport [28]. Estas plataformas permiten identificar las especificaciones y características de los componentes ópticos disponibles, como el rango espectral, la eficiencia de transmisión, la sensibilidad y la geometría de los elementos.
- **Simuladores de Fuentes de Luz:** Para modelar la fuente de luz UV, herramientas como LightTools [29] o OSLO (Optical Software for Layout and Optimization) [30], que permiten simular la emisión y distribución de luz de diferentes tipos de fuentes. Estas herramientas son útiles para evaluar la uniformidad y estabilidad de la fuente en el rango espectral de 200 a 400 nm.

3.4.1.3 Software de Diseño Óptico y Simulaciones

- **Zemax:** Es una herramienta líder en diseño óptico que permite la simulación y optimización de sistemas ópticos [31]. Zemax facilita la simulación de la propagación de la luz a través de los diferentes componentes ópticos, como lentes, prismas y rejillas de difracción. Permite modelar la dispersión de la luz y optimizar parámetros como la distancia focal, las curvaturas de las lentes y las posiciones relativas de los componentes.
- **Code V:** Otra herramienta avanzada en el diseño y análisis óptico [32], similar a Zemax, que ofrece una potente capacidad para el modelado de sistemas ópticos, especialmente en sistemas de alta resolución y complejidad. Es útil para realizar análisis detallados de aberraciones ópticas y simulaciones de dispersión espectral.
- **TracePro:** Esta es una herramienta de diseño óptico para la simulación del comportamiento de la luz en sistemas ópticos, especialmente útil para analizar sistemas de iluminación y dispersiones complejas. Permite realizar simulaciones de trazado de rayos y evaluar el rendimiento del sistema en diferentes configuraciones geométricas.
- **OpticStudio (Zemax):** Además de la simulación general de sistemas ópticos, OpticStudio permite modelar revestimientos antirreflejantes y la optimización de la transmisión de luz en el rango UV, algo fundamental para minimizar las pérdidas de señal [31].

3.4.2 Etapa 2: Simulación del sistema espectrómetro en el rango ultravioleta

Esta etapa tiene como principal propósito modelar el comportamiento óptico y espectral del sistema de espectroscopia, especialmente en el rango de 200 a 400 nm, utilizando simulaciones computacionales. Esta fase comprende la optimización del rendimiento del espectrómetro antes de la construcción física del dispositivo, enfocado a garantizar que el diseño inicial cumpla con los requisitos de precisión y eficiencia deseados. Para este propósito se plantea el uso de herramientas para la simulación específicas.

3.4.2.1 Herramientas para la Simulación Espectral y Cálculo de Resolución

- **Matlab o Python (con SciPy y NumPy):** Para realizar cálculos específicos relacionados con la resolución espectral y las características de la señal. En particular, se usa para simular la respuesta espectral de diferentes componentes (rejillas de difracción, filtros ópticos) y calcular la resolución en función de la dispersión de las rejillas y las características de los detectores.
- **COMSOL Multiphysics:** Esta herramienta que permite realizar simulaciones físicas y de óptica, incluyendo simulaciones de interacción de la luz con diferentes materiales (como lentes o superficies de dispersión), permite diseñar sistemas ópticos en el rango UV.

3.4.2.2 Herramientas de Análisis y Validación de Desempeño

- **SpectraSuite (de Ocean Optics):** Software utilizado en espectrómetros para realizar análisis espectral. Es útil para capturar y procesar las señales espectrales del sistema óptico, validar la calibración espectral y asegurarse de que el sistema esté midiendo correctamente en el rango deseado de 200 a 400 nm.

3.4.3 Etapa 3: Formulación del diseño prototipo sumergible y con capacidad de monitoreo remoto.

Esta fase tiene como objetivo el desarrollo de un prototipo funcional de un sistema que no solo permita realizar mediciones en ambientes sumergibles, sino también transmitir datos de mediciones de contaminantes que puedan estar en el rango del ultravioleta, facilitando la operación sin necesidad de intervención directa en el entorno de medición. Para este propósito se plantea el uso de herramientas que permitan construir el prototipo mediante técnicas sencillas y de fácil acceso.

3.4.3.1 Herramientas de Prototipado y Fabricación

- **SolidWorks:** Para el diseño 3D y la creación de prototipos de las partes mecánicas del sistema óptico, como soportes para lentes, cajas para los componentes ópticos y otros dispositivos de montaje. SolidWorks permite simular la mecánica de

ensamblaje de los componentes ópticos y garantizar que todo se alinee adecuadamente [33].

- **3D Printing (Impresión 3D):** Herramientas de impresión 3D como Ultimaker [34] o Prusa [35] pueden ser usadas para prototipar componentes no ópticos, como carcasas, soportes o estructuras de alineación. Aunque los componentes ópticos no pueden ser impresos, estas herramientas permiten crear prototipos de componentes mecánicos de forma rápida y eficiente.

3.4.3.2 Herramientas para la calibración y mediciones experimentales

- **Monitores de Luz UV:** Utilizados para verificar la intensidad de la luz en el rango espectral de 200 a 400 nm y validar el desempeño de la fuente de luz. Algunos sistemas de monitoreo incluyen calibración para medir de manera precisa las longitudes de onda en el rango UV.
- **Espectrómetros de Referencia:** Para realizar pruebas de calibración espectral y asegurarse de que el sistema óptico mide correctamente las longitudes de onda en el rango de 200 a 400 nm. Estos espectrómetros de referencia tienen fuentes de calibración integradas y pueden verificar la precisión del sistema.

CAPÍTULO IV.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Diseño del sistema óptico

El diseño del sistema óptico presentado tiene como objetivo principal la implementación de una transmisión-recepción de señales ópticas en un rango ultravioleta (UV), específicamente entre 200 nm y 400 nm, para identificar contaminantes en agua experimental. Este sistema busca simular las condiciones de propagación de luz en un medio contaminado, analizando el impacto de las impurezas en la calidad de la señal óptica y evaluando el desempeño de las etapas de transmisión, propagación y recepción.

El diseño se estructura en tres bloques principales Fig 14: transmisión óptica, propagación por el medio contaminado y recepción de la señal óptica. Cada bloque cuenta con componentes cuidadosamente seleccionados y configurados para garantizar un análisis exhaustivo de la señal en todas las etapas.

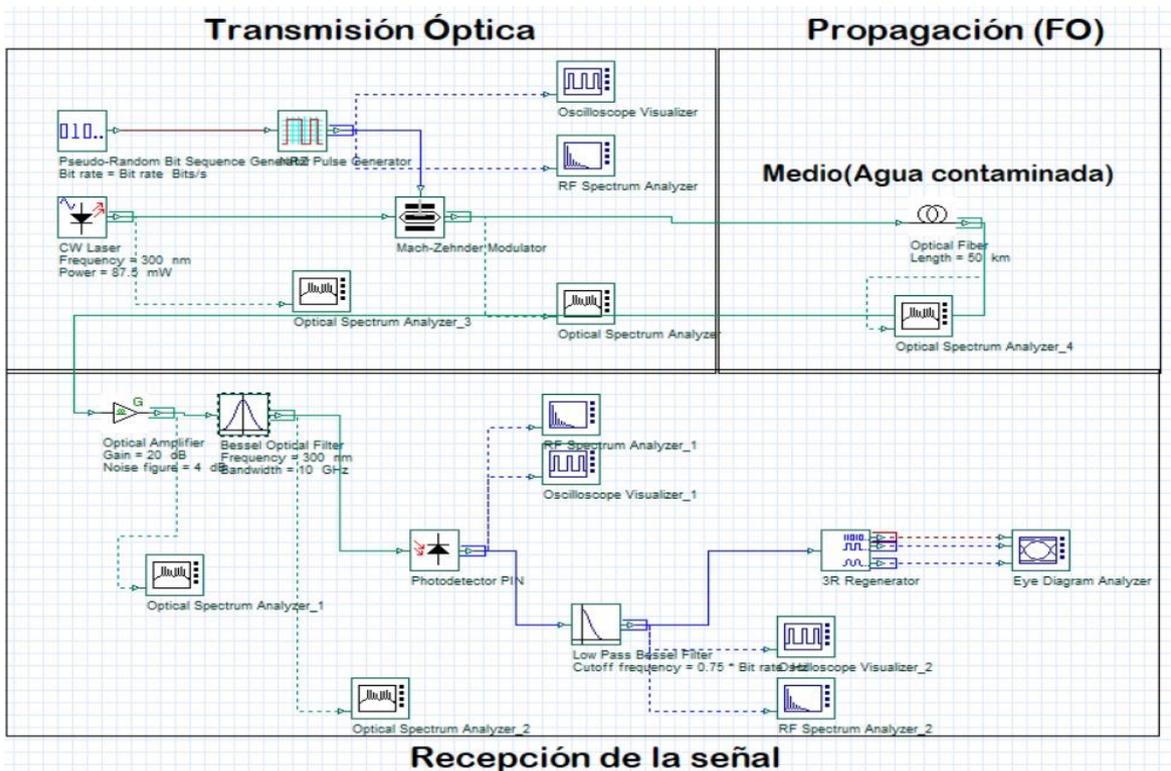


Figura 14: Sistema óptico diseñado en OptiSystem (Autor-OptiSystem)

4.1.1 Transmisión óptica

El primer bloque del sistema corresponde a la **transmisión óptica**, que es donde se genera la señal inicial para su posterior propagación a través del medio contaminado Fig 15.

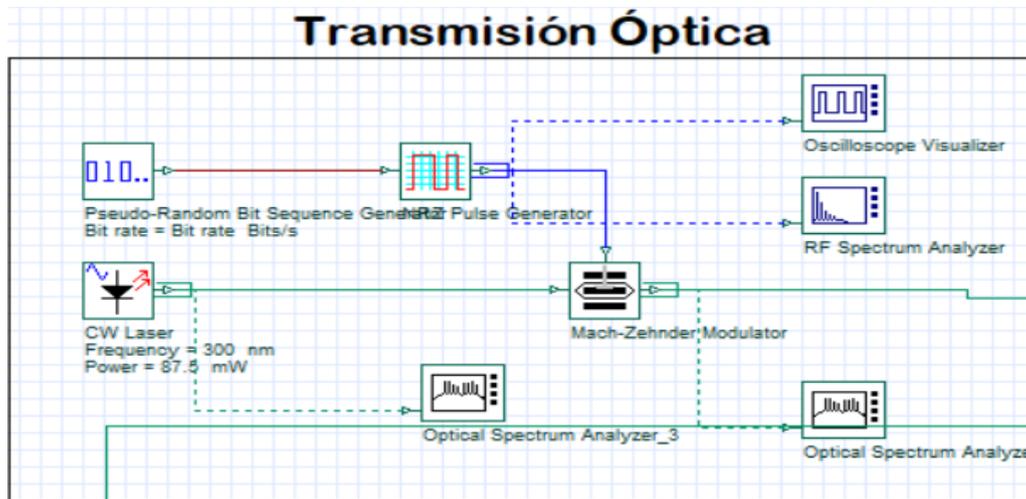


Figura 15: Etapa de transmisión Óptica
(Autor-OptiSystem)

- **Generación de Señal:**

Un generador de secuencia pseudoaleatoria se utiliza para producir una señal digital binaria. La frecuencia o tasa de bits seleccionada es crítica para determinar la calidad de la señal transmitida, esta señal alimenta un modulador de pulsos RZ que ajusta la forma de onda antes de la modulación óptica.

- **Láser y Modulación:**

Un láser de onda continua (CW Laser) genera una señal portadora con una longitud de onda en el rango de 300 nm (UV) y una potencia de salida de 87.5 mW. La señal portadora se modula mediante un modulador Mach-Zehnder, que combina la señal digital con la señal óptica. Este proceso introduce la información digital en la señal óptica para su transmisión.

- **Visualización y Análisis:**

Se integran analizadores de espectro óptico y visualizadores de osciloscopio en esta etapa para verificar la forma de la señal generada y la correcta modulación.

4.1.2 Propagación en el Medio (Fibra Óptica en Agua Contaminada)

La señal modulada se transmite a través de un medio contaminado simulado mediante un segmento de fibra óptica de 50 km de longitud. La fibra óptica representa las condiciones del agua contaminada, lo que introduce pérdidas de señal y dispersión Fig 16. Este medio simula cómo los contaminantes pueden afectar la calidad de la señal. Un analizador de espectro óptico evalúa la señal tras la propagación para medir el deterioro introducido por el medio.

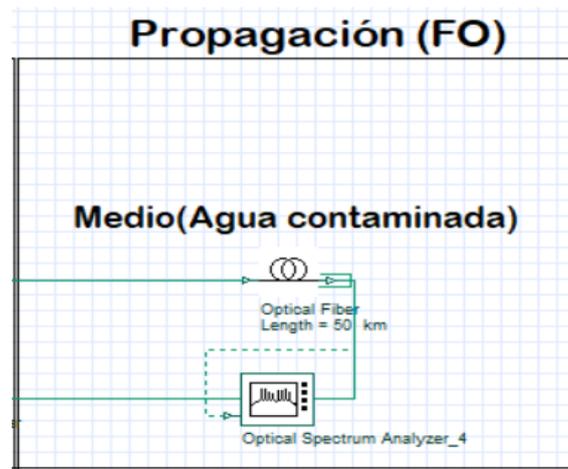
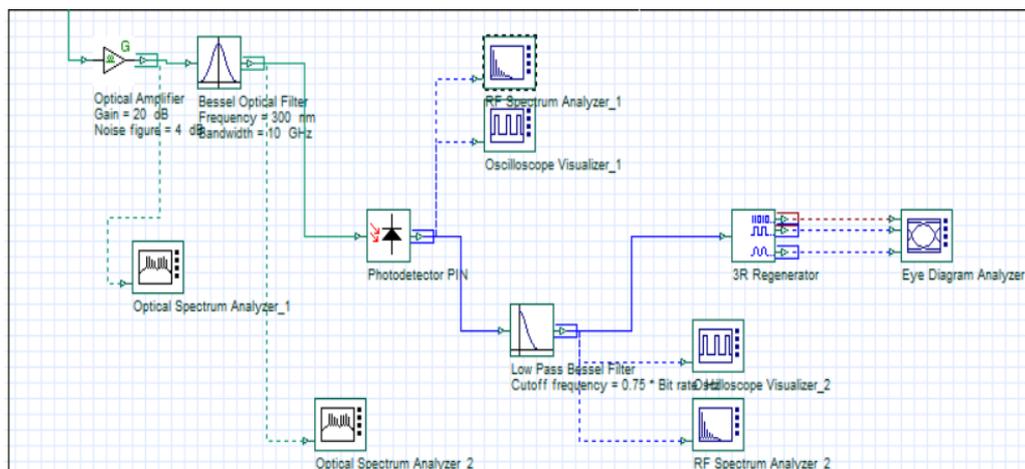


Figura 16: Medio de propagación (Agua contaminada)
(Autor-OptiSystem)

4.1.3 Recepción de la señal

En esta etapa, la señal degradada se amplifica, filtra y convierte nuevamente en una señal eléctrica para su análisis Fig 17.



Recepción de la señal

Figura 17: Etapa de recepción óptica
(Autor-OptiSystem)

- **Amplificación:**

Un amplificador óptico incrementa la potencia de la señal. Tiene una ganancia de 20 dB y un factor de ruido de 4 dB, lo que mejora la intensidad de la señal, aunque introduce algo de ruido.

- **Filtrado Óptico:**

Se utiliza un filtro óptico de tipo Bessel para limitar la banda de la señal a 10 GHz, eliminando componentes no deseados del espectro antes de la detección.

- **Detección:**

Un fotodetector PIN convierte la señal óptica en eléctrica. Este componente es clave para extraer la información digital transmitida. La señal eléctrica se procesa mediante un filtro Bessel de paso bajo para eliminar frecuencias superiores a 0.75 veces la tasa de bits, mejorando la calidad de la señal recuperada.

- **Regeneración de Señal:**

Una unidad regeneradora 3R (retemporización, remodelación y regeneración) se emplea para restaurar la forma de la señal digital. Este paso asegura que los datos sean lo más fieles posible a la información original.

- **Análisis Final:**

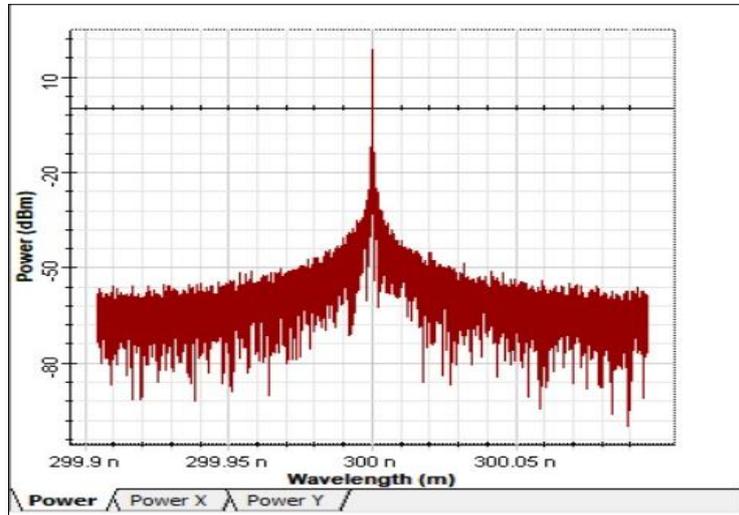
Un analizador de diagramas de ojo permite evaluar la integridad de la señal recuperada. Un diagrama de ojo bien definido indica una transmisión exitosa, mientras que un diagrama cerrado refleja interferencias o pérdida de información.

4.1.4 Análisis de las señales en los visualizadores del sistema

4.1.4.1 Analizador de espectro #1

El analizador de espectro #1 Fig 18, está ubicado después del modulador Mach-Zehnder en la sección de transmisión óptica y muestra el espectro de la señal óptica modulada. Dado que la portadora se encuentra en el rango UV (300 nm), el espectro debe centrarse alrededor

de esta longitud de onda, con las componentes laterales determinadas por la modulación RZ. Permite verificar si la modulación fue correctamente aplicada al mezclar la señal eléctrica con la óptica. Además, ayuda a detectar posibles distorsiones introducidas por el modulador.



*Figura 18: Espectro de la señal óptica modulada a 300nm
(Autor-OptiSystem)*

4.1.4.2 Analizador de espectro #2 y #3

Los analizadores de espectro #2 y #3 Fig 19, están ubicados a la salida del tramo de fibra óptica que simula el medio contaminado y posterior al primer filtro. El espectro presenta las mismas características que el observado a la salida del modulador, pero modificado debido a los efectos del medio de transmisión. La potencia de la portadora y las componentes laterales disminuyen debido a la atenuación y dispersión, y pueden aparecer fluctuaciones espectrales adicionales debido a los contaminantes simulados. Posterior la señal se encuentra amplificada y filtrada. El espectro debe mostrar un incremento en la potencia de la portadora y de las componentes laterales gracias al amplificador óptico. El filtro óptico tipo Bessel, con un ancho de banda de 10 GHz, elimina las componentes fuera del rango deseado, limitando el espectro a las frecuencias útiles.

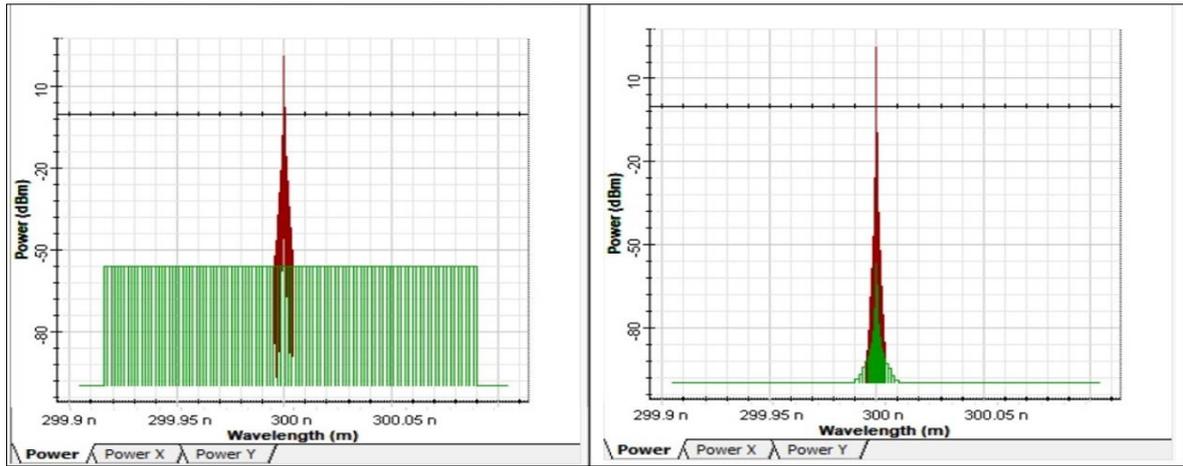


Figura 19: Señal amplificada y filtrada a 300nm
(Autor-OptiSystem)

4.1.4.3 Analizadores de espectro #3 y #4

Los analizadores de espectro #3 y #4 Fig 20, están ubicados a la salida del filtro Bessel de paso bajo, en la sección de procesamiento eléctrico. El espectro muestra las componentes en frecuencia de la señal eléctrica resultante de la conversión óptica. El filtro Bessel de paso bajo limita las frecuencias superiores al 75% de la tasa de bits, eliminando el ruido de alta frecuencia y asegurando la recuperación de los datos digitales, presenta componentes de potencia significativas en el rango de frecuencias bajas (<50 Hz), con una atenuación progresiva en frecuencias superiores.

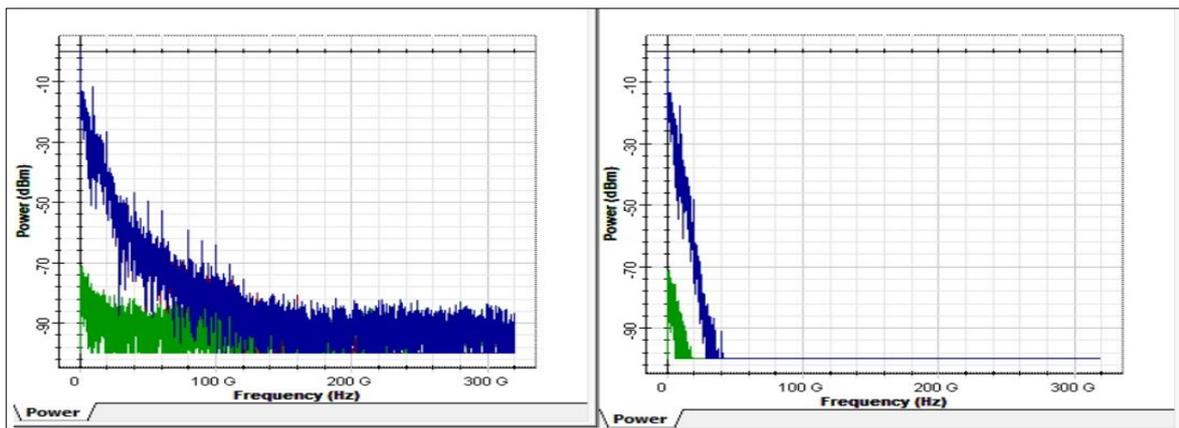
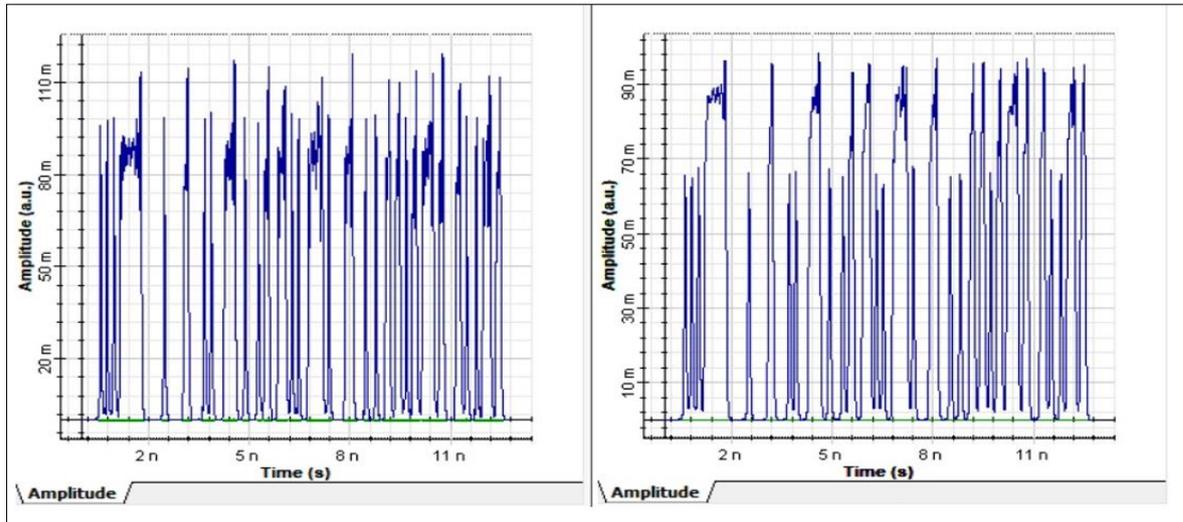


Figura 20: Espectro de las componentes en frecuencia de la señal
(Autor-OptiSystem)

4.1.4.4 Osciloscopio #1 y #2

Los analizadores de espectro #1 y #2 Fig 21, están ubicados situados a la salida del fotodetector PIN, previo al filtro eléctrico de paso bajo y posterior al él. En este punto, la señal ha sido convertida del dominio óptico al eléctrico por el fotodetector. La señal muestra

pulsos digitales modulados en retorno a cero (RZ) que representan la información transmitida. Sin embargo, debido a las pérdidas y distorsiones acumuladas durante la propagación y la conversión fotoeléctrica mientras que una vez pasa el filtro se elimina las componentes de alta frecuencia no deseadas, mejorando la relación señal-ruido (SNR).



*Figura 21: Pulsos digitales modulados
(Autor-OptiSystem)*

4.1.4.5 Diagrama de ojo y analisis de BER

El diagrama de ojo es una herramienta visual crucial para evaluar la calidad de la señal en un sistema de transmisión digital, especialmente en sistemas de comunicación óptica, donde la integridad de los datos transmitidos se ve afectada por diversos factores como la distorsión, la dispersión y el ruido. El diagrama que se presenta muestra las características de una señal transmitida a través de un sistema óptico, representando el comportamiento de los bits de la señal a lo largo del tiempo.

En el diagrama de ojo mostrado, se observa una señal modulada que atraviesa varias trayectorias dentro de un período de bit, con múltiples trazos superpuestos que representan las transiciones entre los diferentes niveles de la señal. Las curvas de la señal, de color amarillo, indican el paso de los bits a lo largo del tiempo. Estas curvas superpuestas se deben a los múltiplos de la señal que se obtienen cuando se muestrea la forma de onda a diferentes intervalos Fig 22. Este fenómeno crea un "ojo" en el centro de la visualización, lo cual indica la sincronización adecuada entre la señal transmitida y la señal de referencia en el receptor.

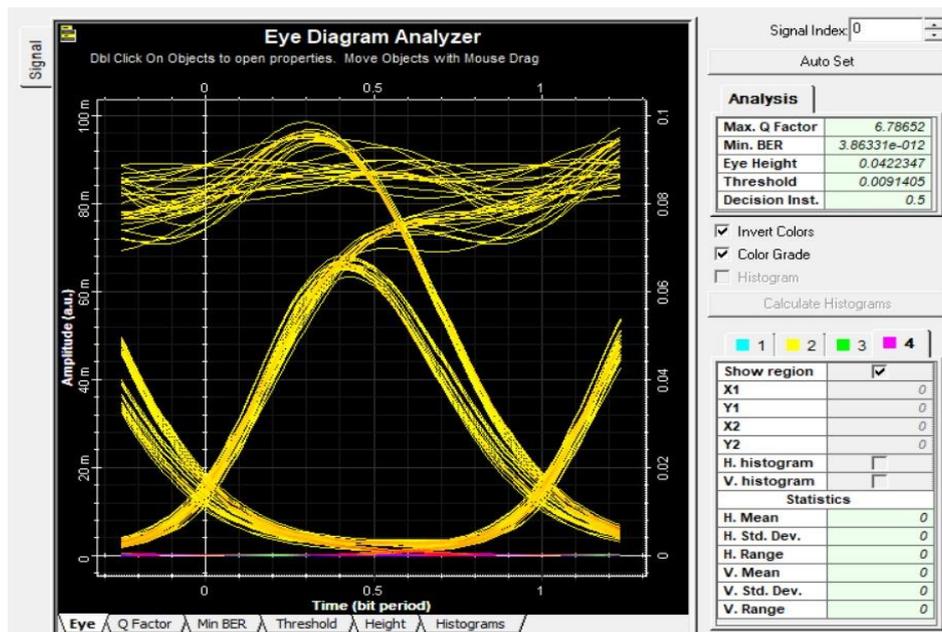


Figura 22: Diagrama de Ojo y BER
(Autor-OptiSystem)

Los valores de los parámetros fundamentales en el análisis del diagrama de ojo están listados en la ventana de análisis:

- **Q Factor (Factor Q):**

El parámetro **Q Factor**, que mide la calidad de la señal, arrojó un valor de **6.78652**. Este resultado indica que la señal posee una calidad significativamente alta, lo cual garantiza una detección confiable de bits sin errores. Generalmente, un valor de Q superior a 6 es considerado un indicador de excelente rendimiento en sistemas de transmisión digital, lo que valida la eficacia del diseño en condiciones simuladas.

- **Bit Error Rate (BER):**

La tasa de error de bits (BER), un indicador clave de la fiabilidad del sistema de transmisión, fue calculada en **3.86331e-012**. Este valor extremadamente bajo sugiere que el sistema tiene una probabilidad mínima de errores en la recepción de bits. La baja BER confirma la capacidad del sistema para operar con alta precisión incluso en condiciones adversas simuladas, como la propagación en un medio contaminado.

- **Eye Height:**

El valor de la altura del ojo (Eye Height) obtenido fue de **0.0422347**, lo cual refleja la amplitud de la señal en el diagrama de ojo. Una mayor altura del ojo se traduce en una mejor calidad de la señal, ya que facilita la distinción entre los niveles lógicos 0 y 1. Este resultado destaca la estabilidad y claridad de los niveles de señal tras la recuperación.

- **Threshold (Umbral):**

El umbral de decisión fue calculado como **0.0091405**, valor que define el límite de referencia para distinguir entre los niveles lógicos 0 (bajo) y 1 (alto). Este parámetro es crucial para la operación del receptor, ya que establece una barrera clara entre los niveles de señal, minimizando errores de decisión durante la decodificación.

- **Decision Inst:**

El instante de decisión, representado por el valor **0.5**, define el momento preciso en el cual el receptor determina si el bit recibido corresponde a un nivel lógico 0 o 1. Este parámetro asegura una sincronización adecuada en el receptor, garantizando una correcta detección y recuperación de los datos transmitidos.

4.1.4.6 Interpretación de la calidad de la señal

El diagrama de ojo es una representación clave para evaluar el desempeño de sistemas de comunicación digital. En este caso, la señal tiene una excelente calidad, como lo demuestra el valor del Q Factor, que es mayor que el umbral aceptable de 6, y la tasa de error de bits extremadamente baja, que está en el rango de los valores de alto rendimiento. La amplitud y claridad del "ojo" reflejan que el sistema es capaz de transmitir información de manera efectiva sin interferencias significativas o distorsiones que puedan afectar la integridad de los datos.

El diagrama también revela que la señal mantiene un buen margen de seguridad en cuanto a la distinción entre los niveles de voltaje para los diferentes bits, lo que permite una mayor confiabilidad en la recepción y recuperación de los datos que involucran la transmisión de datos en sistemas de monitoreo de contaminación en el agua.

4.2 Simulación del sistema óptico

4.2.1 Simulación Espectral y Cálculo de Resolución

El análisis de contaminantes en cuerpos de agua es fundamental para evaluar su calidad y el impacto de las actividades humanas en el medio ambiente. En el presente trabajo se realiza una correlación teórica entre los niveles de absorción espectral en el rango ultravioleta (UV) de 200 a 400 nm y contaminantes que potencialmente podrían estar presentes en el río Chibunga y la laguna de Colta, ubicados en Ecuador. Estos cuerpos de agua han sido objeto de estudio debido a la influencia de actividades agrícolas, industriales y domésticas que afectan su ecosistema Fig 23.

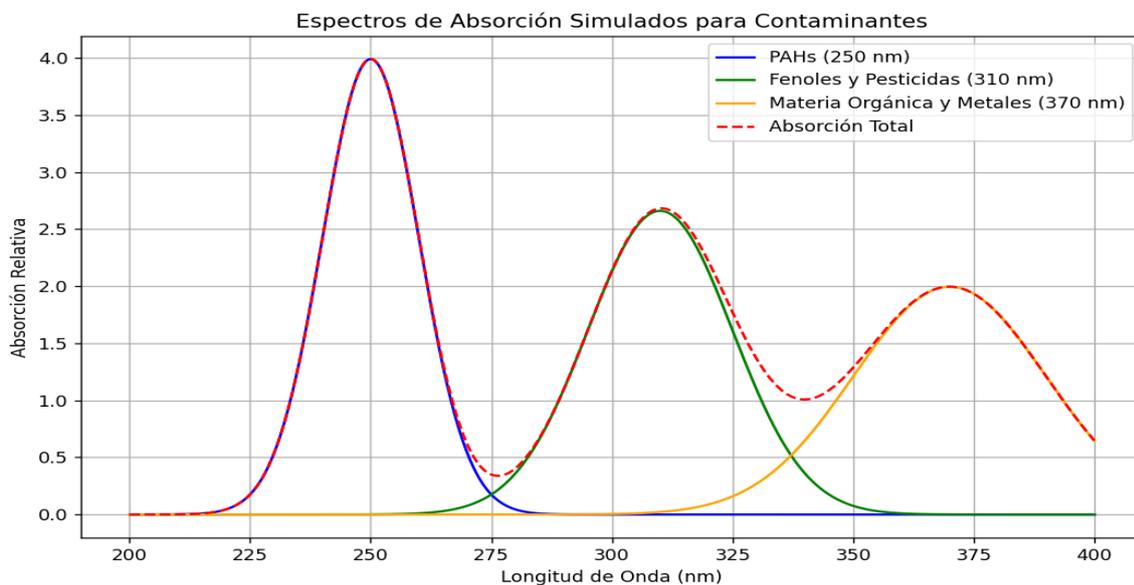


Figura 23: Sistema óptico diseñado en OptiSystem (Autor-OptiSystem)

4.2.1.1 Contaminantes y sus Niveles de Absorción UV

Los contaminantes estudiados presentan niveles característicos de absorción dentro del rango UV y se relacionan con las características físico-químicas del agua en estos cuerpos hídricos.

- **Contaminante con Pico en 250 nm** - Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (PAHs):

Estos se derivan de derrames de combustibles, aceites industriales y desechos agrícolas como el naftaleno y antraceno, cuyos picos de absorción se encuentran entre 220 y 260 nm y son compuestos tóxicos, persistentes y potencialmente cancerígenos, se producen debido a

escurrimientos de caminos, aceites industriales y materiales de desecho agrícola, típicos de zonas rurales y urbanas.

- **Contaminante con Pico en 310 nm** - Compuestos Fenólicos y Pesticidas Orgánicos:

Proviene del uso de pesticidas en cultivos y descargas de aguas residuales, pueden ser fenoles y herbicidas como la atrazina, estos compuestos son altamente tóxicos para la fauna acuática y representan riesgos significativos para el consumo humano y se encuentran en fertilizantes y pesticidas aplicados en actividades agrícolas cercanas al río y la laguna.

- **Contaminante con Pico en 370 nm** - Materia Orgánica Disuelta (DOM) y Metales Pesados Complejados:

La materia orgánica cuyo origen se da por la degradación de restos vegetales, animales y aguas residuales domésticas producen ácidos húmicos y fúlvicos los cuales causan reducción en la oxigenación del agua y aumento de la turbidez, además se tiene la presencia de metales pesados complejados que se dan por procesos industriales y procesos naturales como la erosión, estos materiales pueden ser complejos de cobre, hierro y manganeso los cuales son tóxicos, persistentes y afectan a los organismos acuáticos y la potabilidad del agua.

4.2.2 Relación de los contaminantes con el Río Chibunga y la Laguna de Colta

- **Río Chibunga:**

El río es afectado por actividades agrícolas intensivas y descargas domésticas e industriales. Como fenoles y pesticidas organoclorados (pico en 310 nm), hidrocarburos aromáticos policíclicos (pico en 250 nm).

- **Laguna de Colta:**

La laguna recibe aguas provenientes de escurrimientos agrícolas, desechos orgánicos de comunidades cercanas y materia orgánica natural como materia orgánica disuelta (pico en 370 nm), metales pesados complejados (pico en 370 nm).

El análisis teórico muestra que los contaminantes asociados con los rangos UV-Vis de 250 nm, 310 nm y 370 nm tienen correlación con los patrones de uso del suelo y actividades humanas que impactan el río Chibunga y la laguna de Colta. Este trabajo representa un paso

inicial hacia la implementación de tecnologías de monitoreo óptico sumergible en el rango UV para la detección y control de contaminantes en cuerpos de agua dulce, tal y como se muestra en el anexo

4.3 Diseño del sistema de adquisición de datos

El sistema ha sido diseñado para analizar y detectar contaminantes presentes en cuerpos de agua mediante técnicas ópticas y sensores especializados. Este prototipo combina tecnologías de sensado, amplificación, transmisión óptica, y procesamiento de datos para determinar la calidad del agua en función de variables como conductividad eléctrica, turbidez y absorción de luz en el espectro ultravioleta (UV). La integración de estos elementos proporciona una solución innovadora y precisa para monitorear contaminantes de manera no invasiva Fig 24.

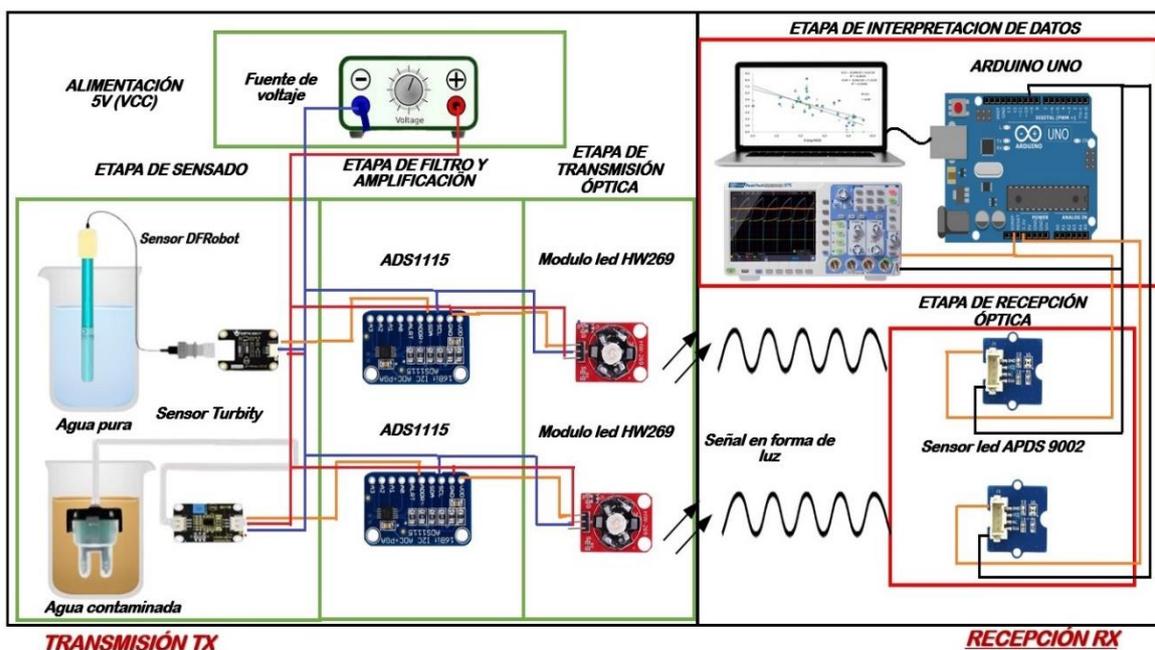


Figura 24: Esquema del sistema de adquisición de datos (Autor)

4.3.1 Descripción del Sistema

El sistema propuesto consta de las siguientes etapas principales: **Transmisión y recepción de datos**, en los cuales se destaca que cada una de las etapas tiene sub-etapas que brindan un equilibrio al sistema y se encuentran seccionadas con cada uno de los elementos que las conforman.

4.3.1.1 Etapa de transmisión

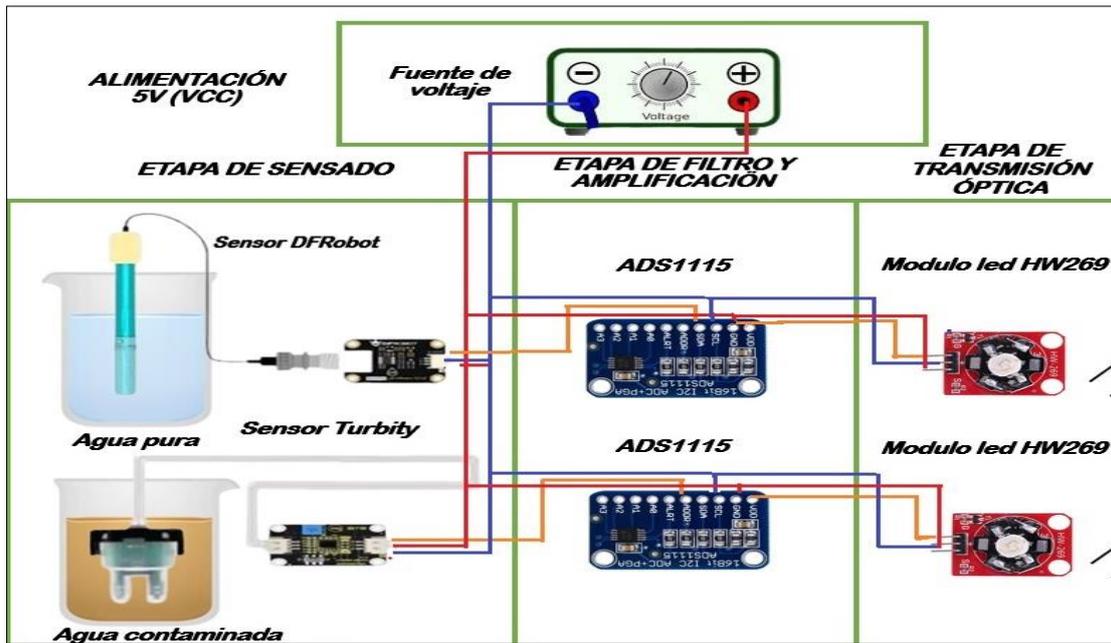


Figura 25: Etapa de transmisión del prototipo (Autor-OptiSystem)

- **Sensor de Conductividad Eléctrica (EC):**

Este sensor mide la conductividad eléctrica del agua, que está directamente relacionada con la cantidad de solutos disueltos, como sales y metales pesados. La conductividad se mide en microSiemens por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$). El sensor DFRobot Gravity EC es ideal para esta tarea por su capacidad de trabajar en rangos de 0 a 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

- **Sensor de Turbidez:**

Este sensor determina la concentración de partículas suspendidas en el agua, expresada en Unidades Nefelométricas de Turbidez (NTU). Los valores altos de turbidez indican contaminación debido a sólidos en suspensión. El modelo sugerido, Turbidity Sensor de DFRobot, opera eficazmente en el rango de 0 a 50 NTU.

- **Filtrado y amplificación**

Las señales obtenidas de los sensores son de bajo nivel y requieren amplificación para su procesamiento. Aquí, los amplificadores ADS1115 desempeñan un papel crucial, ya que cuentan con una resolución de 16 bits, lo que garantiza una alta precisión al convertir las

señales analógicas de los sensores en datos digitales. Este filtrado y amplificación elimina el ruido y asegura que las señales sean interpretadas correctamente por las etapas posteriores.

- **Transmisión Óptica**

En esta etapa, los datos de los sensores son convertidos en señales ópticas mediante módulos LED (como el HW269). Los LEDs, especialmente configurados para emitir luz en rangos específicos, transmiten la señal óptica a través del agua, dependiendo del nivel de contaminación del agua, las propiedades de la luz transmitida (como intensidad y longitud de onda) varían, proporcionando una representación indirecta de los parámetros medidos.

4.3.1.2 Etapa de recepción

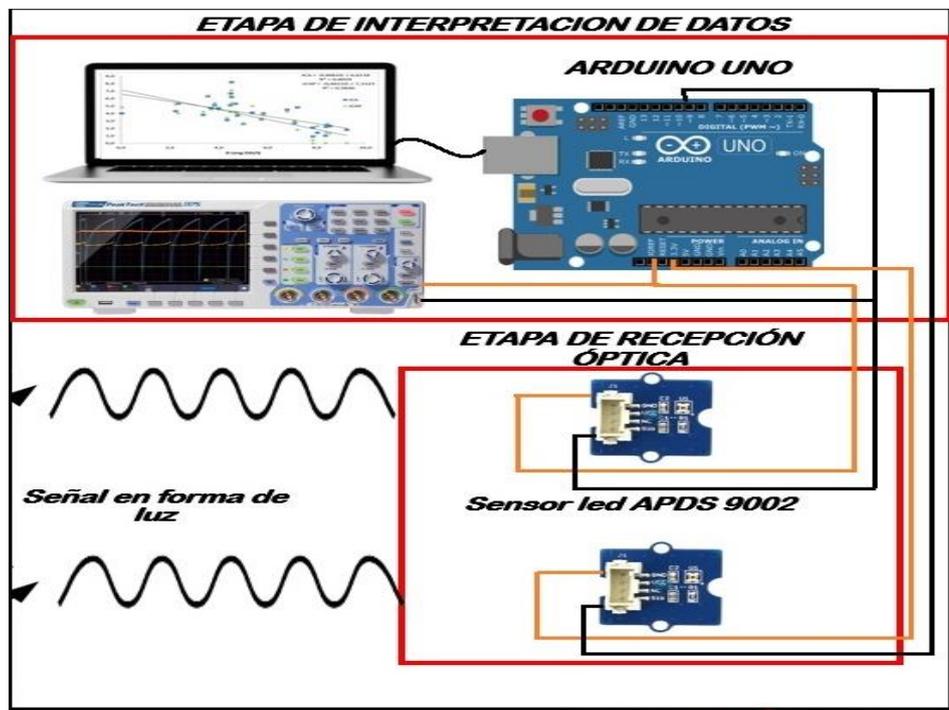


Figura 26: Etapa de recepción del prototipo (Autor-OptiSystem)

- **Recepción Óptica**

Un sensor de luz ambiental (APDS-9002) capta las señales ópticas transmitidas a través del agua. Este sensor mide la intensidad y variabilidad de la luz recibida, correlacionando estos valores con los niveles de contaminación presentes en el agua. La señal recibida se convierte nuevamente en datos eléctricos para ser procesados.

- **Interpretación de Datos**

Un microcontrolador (Arduino Uno) se encarga de interpretar las señales digitales provenientes de los sensores, este procesador aplica algoritmos para correlacionar los valores medidos con la calidad del agua. Los resultados son visualizados en una interfaz gráfica, facilitando el análisis en tiempo real, además, los datos pueden ser almacenados para estudios posteriores o integrados en sistemas de monitoreo remoto.

4.3.2 Funcionamiento General

El sistema inicia con la alimentación de los sensores y circuitos en este caso 5V proporcionados por una fuente regulada. En la etapa de sensado, el sensor de conductividad mide la presencia de solutos en el agua, mientras que el sensor de turbidez evalúa las partículas en suspensión. Las señales analógicas generadas por estos sensores se amplifican en la etapa de filtrado y amplificación mediante los módulos ADS1115.

La etapa de transmisión óptica convierte las señales amplificadas en pulsos luminosos mediante LEDs específicos, que emiten en el espectro visible o UV dependiendo del tipo de contaminación. La señal óptica viaja a través del agua y es captada por el sensor APDS-9002, que mide la intensidad de la luz recibida. Este valor se correlaciona con la atenuación causada por contaminantes en el medio.

Finalmente, los datos son procesados por un Arduino Uno, que analiza y presenta los resultados en una interfaz gráfica. La integración de todas estas etapas permite detectar contaminantes con alta precisión, facilitando el monitoreo ambiental.

4.4 Simulación del sistema electrónico

La simulación del sistema electrónico se realizó utilizando el software Proteus, una herramienta ampliamente reconocida en el ámbito académico y profesional para el diseño y análisis de circuitos electrónicos Fig 27. Este proceso fue fundamental para validar la funcionalidad del sistema de transmisión-recepción óptico sumergible antes de su implementación física. El sistema está diseñado para detectar contaminantes en muestras de agua mediante radiación UV en el rango de 200 nm a 400 nm, garantizando precisión y fiabilidad en su operación.

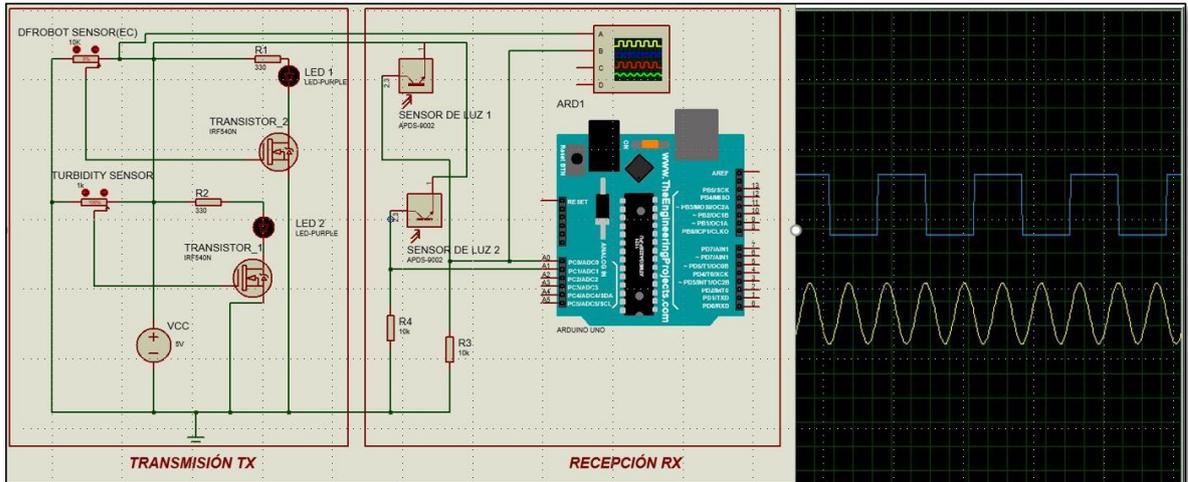


Figura 27: Sistema electrónico diseñado en proteus (Autor-Proteus)

El sistema electrónico simulado consta de tres etapas clave:

1. **Etapas de transmisión:** Generación y emisión de radiación UV mediante un LED UV controlado por un circuito basado en un transistor MOSFET.
2. **Etapas de recepción:** Captura de la radiación reflejada o dispersada por los contaminantes utilizando un fotodetector y amplificación de la señal eléctrica generada.
3. **Etapas de procesamiento:** Análisis y procesamiento de la señal mediante un microcontrolador Arduino Uno, que determina la presencia y concentración de contaminantes.

4.4.1 Simulación de la Etapa de Transmisión del sistema

En la etapa de transmisión, el LED UV emite radiación hacia el agua, cuya intensidad es regulada mediante un transistor MOSFET para garantizar un funcionamiento estable bajo diferentes condiciones.

- **Diseño del Circuito:**

En Proteus, se diseñó un circuito en el que el LED UV es controlado por un transistor MOSFET. Este último regula la corriente que fluye a través del LED, permitiendo

ajustar dinámicamente la potencia de emisión en función de los niveles de contaminación detectados. La simulación mostró cómo el MOSFET responde a señales de control, ajustando la intensidad de la radiación UV de manera eficiente. Este diseño asegura un consumo energético óptimo y un rendimiento adecuado del sistema.

4.4.2 Simulación de la Etapa de recepción del sistema

La radiación reflejada por los contaminantes es captada por un fotodetector, que convierte la señal óptica en una señal eléctrica. Esta señal es amplificada para garantizar su correcto procesamiento en etapas posteriores.

- **Diseño del Circuito:**

Se implementó un fotodetector en Proteus, representado por un modelo como el APDS-9002, conectado a un amplificador operacional que ajusta la ganancia de la señal. Este diseño permite un control preciso de las señales generadas por la radiación reflejada. La salida del fotodetector mostró variaciones en la intensidad de la señal en función de la cantidad de radiación reflejada por el agua contaminada. El amplificador operacional potenció estas señales, haciéndolas aptas para su análisis por el microcontrolador.

4.4.3 Simulación de la Etapa de Procesamiento de datos del sistema

El microcontrolador Arduino Uno realiza el análisis de la señal captada, convirtiéndola de analógica a digital mediante su ADC. La señal digital es comparada con umbrales predefinidos para determinar los niveles de contaminación en el agua.

- **Diseño del Circuito:**

En Proteus, se programó el Arduino Uno para procesar la señal amplificada del fotodetector. El código cargado en el microcontrolador permite la detección precisa de contaminantes, activando indicadores visuales o sonoros según los resultados obtenidos. La simulación verificó que el Arduino Uno procesa correctamente las

señales digitales y genera alertas cuando los niveles de contaminación exceden los límites establecidos. Esto asegura una alta precisión en la detección de contaminantes.

La simulación en Proteus del sistema de transmisión-recepción óptico sumergible permitió una validación integral del diseño antes de la construcción física. Desde la emisión de radiación UV hasta el procesamiento de las señales reflejadas, cada etapa fue analizada y optimizada Fig 28. Este enfoque asegura la fiabilidad del sistema para identificar contaminantes en agua, garantizando su eficacia y eficiencia en aplicaciones prácticas.

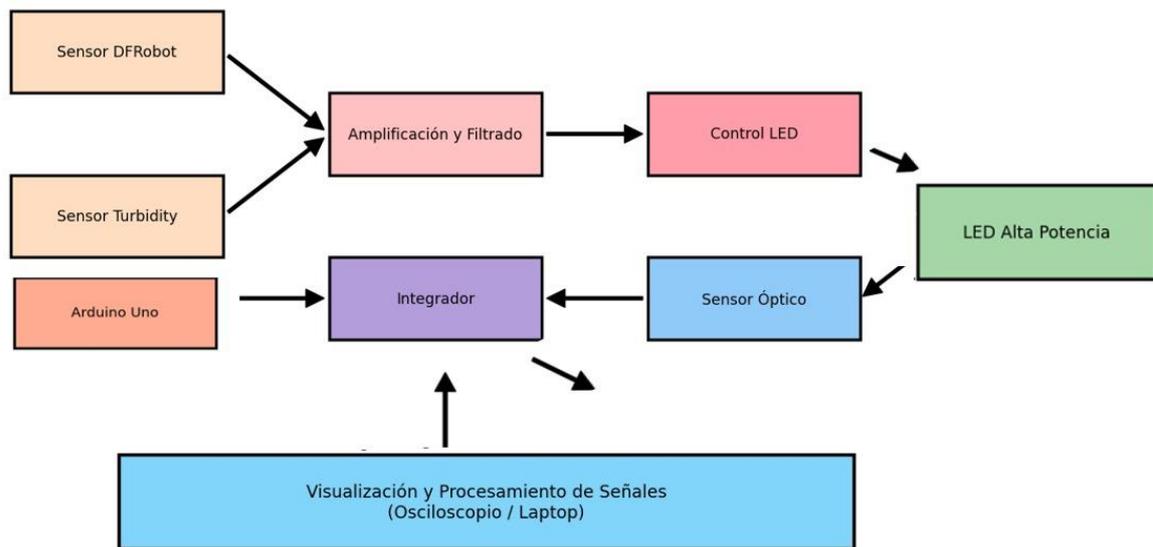


Figura 28: Diagrama de bloques de funcionamiento del sistema electrónico (Autor-Python)

4.5 Diseño del sistema prototipo

El diseño 3D del prototipo se llevó a cabo utilizando las plataformas **TinkerCAD** y **Easy Printer Lite Beta**, herramientas reconocidas por su accesibilidad y capacidad para diseñar estructuras tridimensionales de manera precisa. Este diseño incluye la carcasa del sistema electrónico y otros componentes esenciales, proporcionando un soporte mecánico robusto y personalizado para el dispositivo.

4.4.4 Descripción General del Diseño y proceso de fabricación

La carcasa fue diseñada para encapsular los componentes electrónicos, asegurando su protección y funcionalidad. Se priorizó un diseño estético y funcional, que integra elementos identificativos de la institución (UNACH) y ofrece acceso a los puertos, botones y sensores del sistema.

- **Creación del modelo en TinkerCAD**

Se construyó la base y las paredes de la carcasa, asegurando dimensiones adecuadas para alojar los componentes internos. Se añadieron soportes y ranuras para los sensores y conectores, además de incluir detalles estéticos como el logotipo.

- **Preparación del archivo de impresión**

El modelo fue exportado en formato STL desde TinkerCAD y ajustado en Easy Printer Lite Beta. Aquí se configuraron parámetros clave, como el grosor de las capas y el material de impresión (PLA).

- **Proceso de impresión**

La impresión 3D se llevó a cabo utilizando una impresora compatible con Easy Printer Lite Beta. Durante el proceso, se utilizó filamento de PLA por su resistencia, bajo costo y facilidad de manejo.

4.4.5 Resultados del Diseño

El resultado final fue una carcasa robusta, estética y funcional, que asegura la protección de los componentes electrónicos del sistema. El uso de herramientas como TinkerCAD permitió una personalización completa del diseño, mientras que Easy Printer Lite Beta optimizó los parámetros de impresión, asegurando un acabado de calidad, con un tiempo estimado de 22 horas.

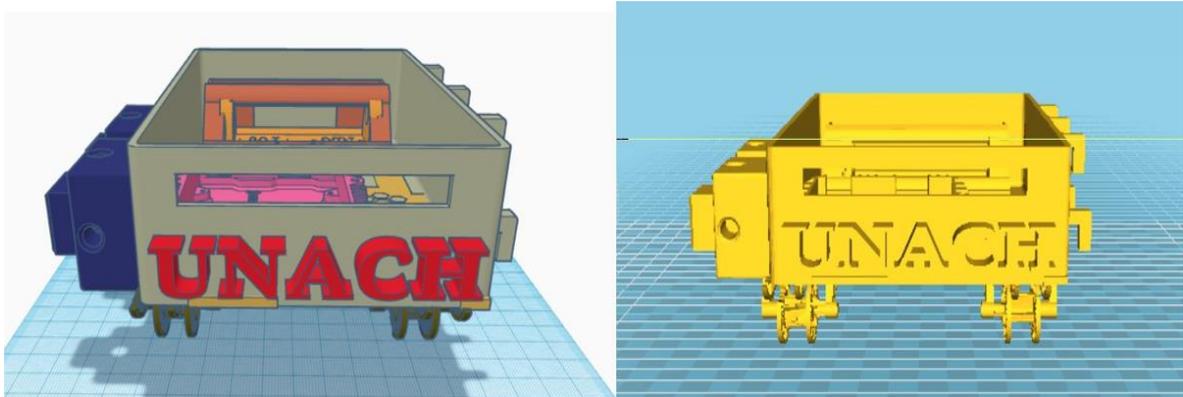


Figura 29: Modelo del prototipo en 3D
(Autor-TinkerCAD, Easy Printer)

4.6 Resultados y análisis estadístico

Para la obtención de los datos estadísticos, se obtuvieron de tres lugares tal como lo muestra la tabla [3], se realizó el análisis de la conductividad y la turbidez de cada uno.

Tabla 3: Ubicaciones para la toma de muestras

Ubicación
Laguna de Colta
Río Chibunga
Río limpio

El número de datos con los que se trabajó son mayores a 50 muestras, se aplica el método de Kolmogorov-Smirnov para realizar un test de normalidad.

4.4.6 Prueba de normalidad turbidez

Para los diferentes lugares los valores obtenidos son los siguientes: laguna de Colta **p-valor = 0.1698**, río Chibunga **p-valor = 0.5683** y para el río limpio **p-valor = 0.5696**, se observa que el p-valor para los tres lugares es mayor a 0.05, por lo tanto, es necesario aplicar una prueba paramétrica.

Con lo obtenido, se plantea la siguiente hipótesis:

- **Hipótesis nula (H_0):** Las medias de la turbidez son iguales en las tres ubicaciones.

- **Hipótesis alternativa (H_a):** Al menos una de las ubicaciones tiene una media de turbidez. significativamente diferente.

Para el análisis paramétrico, se realizó un **Anova de Welch**, ya que este método es adecuado cuando las varianzas entre los grupos son significativamente diferentes.

Tabla 4: Analisis del p-valor turbidez

F	num df	denom df	p-valor
1666.5	2.00	135.38	2.2e-16

En este caso, el p-valor = 2.2e-16 es menor al valor de significancia establecido (0.05). Por lo que, se rechaza H_0 , ya que indica que existen diferencias significativas en los valores promedio de turbidez entre al menos dos de las ubicaciones.

En la Fig.30, se visualiza un diagrama de cajas, en donde, la turbidez (mide la claridad del agua) de los diferentes lugares. El río Chibunga tiene la mayor turbidez (mayor contaminación), la laguna de Colta tiene una turbidez intermedia y el río limpio tiene la menor turbidez (menor contaminación).

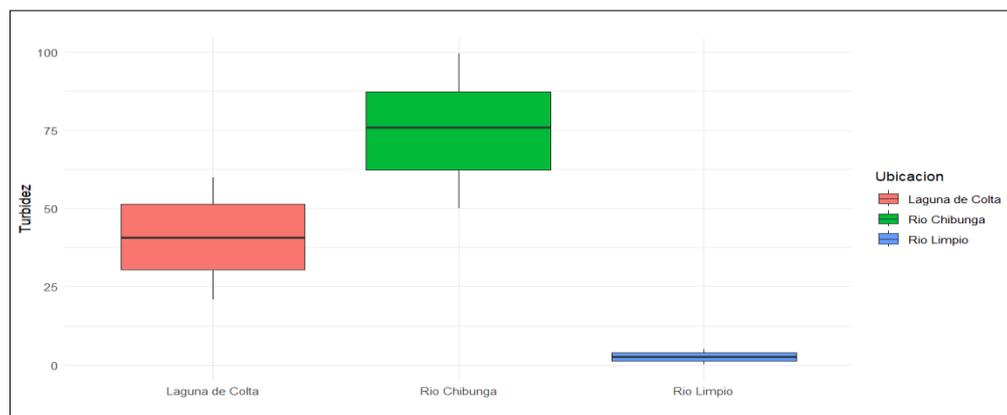


Figura 30: Diagrama de cajas. Distribución de turbidez por ubicación (Autor-RStudio)

La Fig.31, representa la diferencia entre las tres ubicaciones. El río limpio (azul) representa agua clara, la laguna de Colta (rojo) podría estar recibiendo aportes de sedimentos, como tierra o arcilla, a través de corrientes o lluvias y el río Chibunga (verde) exhiben condiciones menos favorables presentando una calidad de agua pobre en términos de claridad.

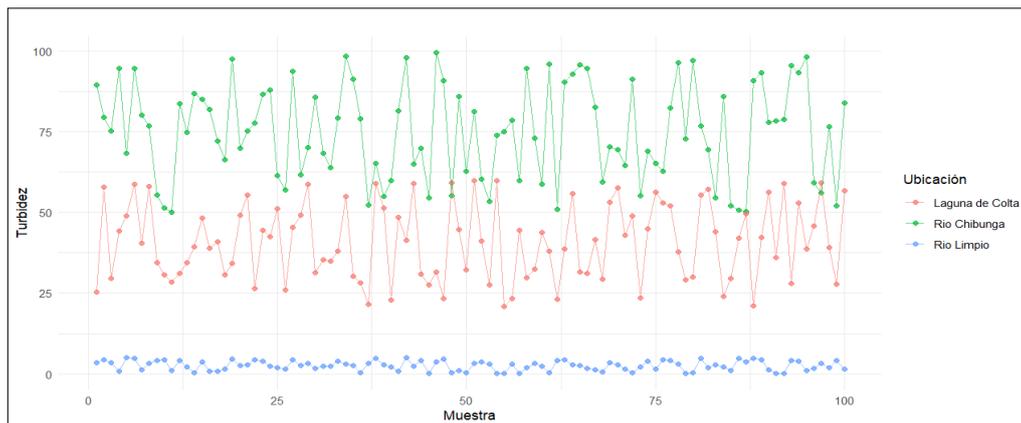


Figura 31: Turbidez respecto al número de muestras en tres ubicaciones
(Autor-RStudio)

4.4.7 Prueba de normalidad conductividad

Los valores obtenidos de p-valor de los tres lugares son los siguientes: laguna de Colta **p-valor = 0.3384**, río Chibunga **p-valor = 0.2518** y para el río limpio **p-valor = 0.4038**, para los tres valores se obtiene un p-valor mayor a 0.05, es decir que los datos se distribuyen normalmente, por lo tanto, es necesario aplicar una prueba paramétrica.

Se plantea la siguiente hipótesis:

- **Hipótesis nula (H_0):** Las medias de la conductividad son iguales en las tres ubicaciones (Laguna de Colta, Río Chibunga y Río Limpio).
- **Hipótesis alternativa (H_a):** Al menos una de las ubicaciones tiene una media de conductividad diferente.

En el análisis paramétrico, se realizó un Anova, ya que este método nos indica si existen diferencias significativas entre las medias.

Tabla 5: Analisis del p-valor conductividad

F value	p-valor
2310	2e-16

Se obtiene un p-valor = $2e-16$, lo que significa que es menor al valor de significancia (0.05). Por lo que, rechazamos la hipótesis nula (H_0). Esto indica que al menos una de las ubicaciones tiene una media de conductividad significativamente distinta.

En la Fig.32, se visualiza un diagrama de cajas, en donde hay una clara diferencia en los niveles de conductividad entre las tres ubicaciones. El río Chibunga tiene la mayor conductividad (mayor concentración de sales, minerales u otros), la laguna de Colta tiene una conductividad intermedia y el río limpio tiene una menor conductividad (menos sustancias disueltas).



Figura 32: Diagrama de cajas. Distribución de conductividad por ubicación (Autor-RStudio)

La Fig.33, representa la conductividad eléctrica de las muestras tomadas en tres ubicaciones. La laguna de Colta (rojo) tiene una variabilidad moderada, es decir, la composición iónica del agua en esta ubicación cambia de forma significativa. Rio Chibunga (verde) mantiene un rango elevado, indicando cambios moderados en las concentraciones de sales disueltas en el tiempo. Rio limpio (azul) no presenta iones disueltos.

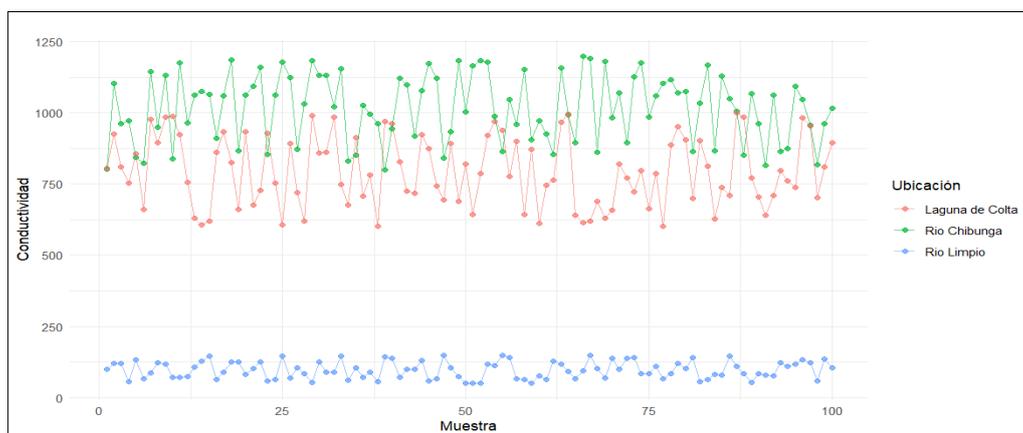


Figura 33: Conductividad respecto al número de muestras en tres ubicaciones (Autor-RStudio)

En la Fig.34, se observa la relación entre la conductividad y la turbidez para las diferentes ubicaciones. El río Chibunga muestra una correlación más fuerte, mientras que la laguna de Colta y el río limpio presentan relaciones más débiles. La conductividad y turbidez pueden estar influenciadas por factores ambientales específicos de cada zona.

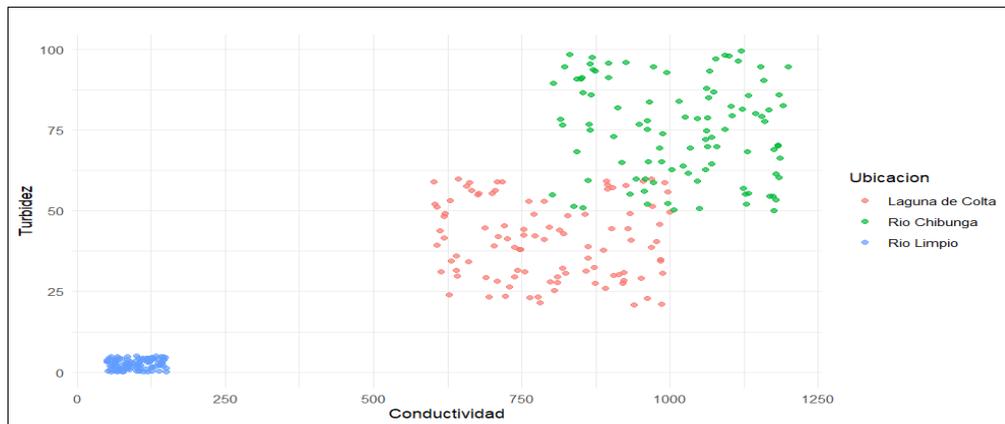


Figura 34: Diagrama de dispersión. Relación entre conductividad y turbidez por ubicación (Autor-RStudio)

4.6.3 Tiempo de respuesta

El Prototipo Comercial (rojo) tiene tiempos de respuesta bajos y consistentes, con valores generalmente menores a 40 ms, mostrando estabilidad y eficiencia. Por otro lado, el Prototipo No Comercial (azul) presenta una alta variabilidad en los tiempos de respuesta, fluctuando entre 80 ms y 120 ms, lo que indica menor estabilidad y eficiencia.

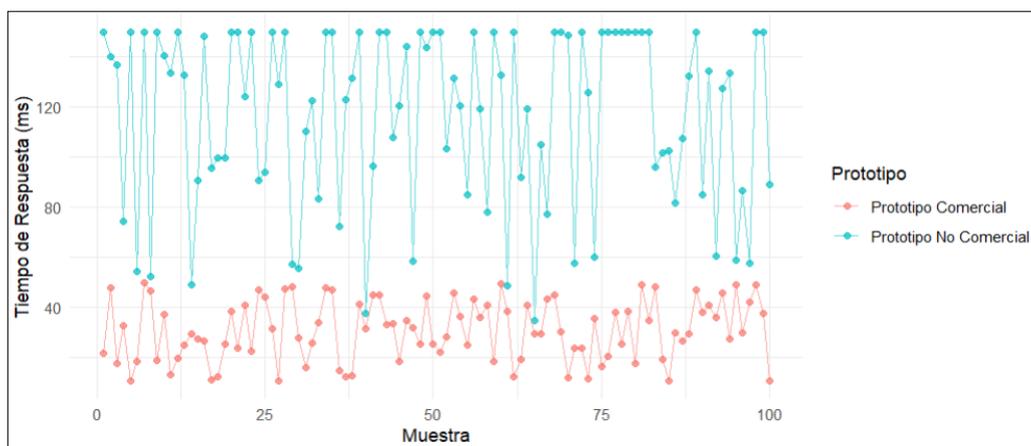


Figura 35: Prototipo Comercial vs Prototipo No Comercial (Autor-RStudio)

CAPÍTULO V.

5. CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

En el presente trabajo de tesis, se ha llevado a cabo el diseño de un sistema de transmisión-recepción óptico sumergible para identificar contaminantes en agua de experimentación en el rango de 200nm – 400nm que corresponde al rango ultravioleta. Con este propósito se ha diseñado el sistema óptico de transmisión y recepción y el subsistema electrónico de control y procesado de datos mediante un microcontrolador, se ha realizado simulaciones del sistema espectrómetro en el rango ultravioleta, y se ha formulado un diseño prototipo del sistema para que sea sumergible y permita el monitoreo remoto. Este sistema combina tecnología óptica avanzada con una estructura resistente al agua, lo que asegura su operación en diferentes condiciones ambientales. La integración del transmisor y receptor permite una detección precisa y rápida de contaminantes en tiempo real.

El sistema desarrollado demostró ser efectivo para identificar contaminantes como metales pesados y compuestos orgánicos volátiles mediante el análisis espectral. Las simulaciones realizadas confirmaron que el rango UV utilizado es adecuado para detectar las interacciones ópticas específicas entre la luz ultravioleta y los contaminantes presentes en el agua, incluso en bajas concentraciones.

El prototipo diseñado se considera una solución viable para el monitoreo de la calidad del agua. Su construcción sumergible permite aplicaciones en ambientes acuáticos diversos, como laboratorios de investigación, plantas industriales y cuerpos de agua naturales. Además, los sensores ópticos empleados aseguran alta sensibilidad y selectividad, mejorando la precisión en la medición.

Este trabajo aporta una herramienta tecnológica innovadora para la gestión de recursos hídricos. Su capacidad para identificar contaminantes de forma eficiente y en tiempo real lo posiciona como una solución sostenible que puede ser aplicada para prevenir problemas de contaminación y garantizar la preservación ambiental.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda continuar con la optimización del sistema para ampliar su rango de aplicaciones. Futuras mejoras podrían incluir la integración de algoritmos de inteligencia artificial para un análisis más robusto de los datos espectrales y la capacidad de operar en aguas con mayor nivel de turbidez.

Se recomienda mejorar el diseño del sistema de transmisión-recepción óptico para garantizar una mayor estabilidad y precisión en ambientes con alta turbidez o condiciones extremas. Esto podría incluir el uso de materiales más resistentes a la corrosión y ópticas adaptativas para compensar posibles distorsiones en la señal debido a las propiedades del agua.

Es recomendable incorporar algoritmos de inteligencia artificial o aprendizaje automático para procesar los datos espectrales obtenidos. Esto permitiría identificar patrones complejos, mejorar la detección de contaminantes en bajas concentraciones y diferenciar entre múltiples sustancias presentes en la muestra de agua.

Se sugiere explorar la ampliación del rango espectral del sistema para incluir longitudes de onda más allá del rango UV (200-400 nm), con el objetivo de identificar un espectro más amplio de contaminantes. Además, se podría adaptar el sistema para ser utilizado en monitoreos en tiempo real en cuerpos de agua grandes, como ríos o lagos, contribuyendo a su uso en gestión ambiental y alertas tempranas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] F. J. Avila-Camacho, L. M. Moreno-Villalba, G. I. Cerón-Montes, A. Garrido-Hernández, C. A. Cardoso-Chávez, and C. J. Pacheco-Piña, “Diseño de un espectrofotómetro UV-VIS de bajo costo para la industria bioquímica: Una Revisión,” *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, vol. 9, no. Especial2, pp. 19–28, Dec. 2021, doi: 10.29057/icbi.v9iespecial2.7788.
- [2] “Diseño e implementación de un medidor de irradiancia solar con registro de datos basado en arquitectura de código abierto.” Accessed: Oct. 25, 2024. [Online]. Available: <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/10427>
- [3] Z. Shi, C. W. K. Chow, R. Fabris, J. Liu, and B. Jin, “Applications of Online UV-Vis Spectrophotometer for Drinking Water Quality Monitoring and Process Control: A Review,” *Sensors (Basel)*, vol. 22, no. 8, p. 2987, Apr. 2022, doi: 10.3390/s22082987.
- [4] “Agua para consumo humano.” Accessed: Oct. 25, 2024. [Online]. Available: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
- [5] O. US EPA, “Proteja el agua potable: detección rápida del plomo.” Accessed: Oct. 25, 2024. [Online]. Available: <https://espanol.epa.gov/proteja-el-agua-potable>
- [6] C. Kim, J. B. Eom, S. Jung, and T. Ji, “Detection of Organic Compounds in Water by an Optical Absorbance Method,” *Sensors (Basel)*, vol. 16, no. 1, p. 61, Jan. 2016, doi: 10.3390/s16010061.
- [7] C.-H. Chu, Y.-X. Lin, C.-K. Liu, and M.-C. Lai, “Development of Innovative Online Modularized Device for Turbidity Monitoring,” *Sensors (Basel)*, vol. 23, no. 6, p. 3073, Mar. 2023, doi: 10.3390/s23063073.
- [8] S. Gerald G, “International Organization for Standardization (ISO),” in *Max Planck Encyclopedia of Public International Law*, Oxford University Press, 2016. doi: 10.1093/law:epil/9780199231690/e1887.
- [9] M. C. García Villa, “Desarrollo de una sonda de medición de turbidez de bajo costo aplicada al sector agropecuario,” 2022, Accessed: Oct. 25, 2024. [Online]. Available: <https://repositorio.itm.edu.co/handle/20.500.12622/5660>
- [10] T. Matos, M. S. Martins, R. Henriques, and L. M. Goncalves, “A review of methods and instruments to monitor turbidity and suspended sediment concentration,” *Journal of Water Process Engineering*, vol. 64, p. 105624, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.jwpe.2024.105624.
- [11] D. Acebo-González and A. T. Hernández-García, “Los métodos Turbidimétricos y sus aplicaciones en las ciencias de la vida,” *Revista CENIC. Ciencias Biológicas*, vol. 44, no. 1, 2013, Accessed: Oct. 25, 2024. [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181226886003>
- [12] A. M. Guzmán Hernández, “Óptica y fotónica: ciencia y tecnología de la luz,” *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, vol. 46, no. 181, pp. 920–938, Nov. 2022, doi: 10.18257/raccefy.1748.
- [13] Alex Ryer, *LIGHT MEASUREMENT HANDBOOK*. International light, 1998. Accessed: Oct. 25, 2024. [Online]. Available: https://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/CVonline/LOCAL_COPIES/RYER/index.html
- [14] M. A. Al-Nuaim, A. A. Alwasiti, and Z. Y. Shnain, “The photocatalytic process in the treatment of polluted water,” *Chem Zvesti*, vol. 77, no. 2, pp. 677–701, 2023, doi: 10.1007/s11696-022-02468-7.
- [15] H. Carbajal-Morán, *Fotocatálisis solar en la recuperación de aguas grises para la agricultura: innovación y eficiencia por control de procesos con PLC S7-1500*. Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú, 2023. doi: 10.35622/inudi.b.119.
- [16] C. F. Perry, I. Jordan, P. Zhang, A. von Conta, F. B. Nunes, and H. J. Wörner, “Photoelectron Spectroscopy of Liquid Water with Tunable Extreme-Ultraviolet Radiation: Effects of Electron Scattering,” *J Phys Chem Lett*, vol. 12, no. 11, pp. 2990–2996, Mar. 2021, doi: 10.1021/acs.jpcclett.0c03424.
- [17] M. S. Schuurman and V. Blanchet, “Time-resolved photoelectron spectroscopy: the continuing evolution of a mature technique,” *Physical Chemistry Chemical Physics*, vol. 24, no. 34, pp. 20012–20024, 2022, doi: 10.1039/d1cp05885a.
- [18] A. R. Maturino Barraza, “Detección mediante redes neuronales de macronutrientes del sustrato de invernadero,” May 2024, Accessed: Oct. 25, 2024. [Online]. Available: <https://rinacional.tecnm.mx/jspui/handle/TecNM/7914>
- [19] R. A. Martin, “Desarrollo de sensores de CO₂ y luz UV basados en películas delgadas de óxido de cinc.” Thesis, Universidad Nacional de Mar del Plata. Facultad de Ingeniería. Argentina, 2024. Accessed: Oct. 25, 2024. [Online]. Available: <http://rinfi.fi.mdp.edu.ar/xmlui/handle/123456789/790>
- [20] N. Munguía-Fernández *et al.*, “Flexible Ultraviolet Sensor Based on Zinc Oxide Nanoparticle Powder,” *Crystals*, vol. 13, no. 12, p. 1672, Dec. 2023, doi: 10.3390/cryst13121672.
- [21] M. F. Ali, D. N. K. Jayakody, and Y. Li, “Recent Trends in Underwater Visible Light Communication (UVLC) Systems,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 22169–22225, 2022, doi: 10.1109/access.2022.3150093.

- [22] Nur Afiqah Razman *et al.*, “A Review on Water Quality Monitoring Methods Based on Electronics and Optical Sensing,” *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, vol. 26, no. 2, pp. 1–7, Apr. 2022, doi: 10.37934/araset.26.2.17.
- [23] A. Hu, “Diseño de sistema óptico inalámbrico para medio acuático,” info:eu-repo/semantics/bachelorThesis, E.T.S.I y Sistemas de Telecomunicación (UPM), Madrid, 2018. Accessed: Oct. 25, 2024. [Online]. Available: <https://oa.upm.es/53825/>
- [24] M. F. Ali, D. N. K. Jayakody, Y. A. Chursin, S. Affes, and S. Dmitry, “Recent Advances and Future Directions on Underwater Wireless Communications,” *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 27, no. 5, pp. 1379–1412, Aug. 2019, doi: 10.1007/s11831-019-09354-8.
- [25] D. P. Singh and D. Batham, “A Review of Underwater Communication Systems,” *IJEDR*, vol. 10, no. 2, pp. 100–104, May 2022, doi: 10.1729/Journal.30274.
- [26] “Thorlabs - Photonics Products & Solutions.” Accessed: Nov. 18, 2024. [Online]. Available: <https://www.thorlabs.com>
- [27] “Optics Manufacturer & Supplier | Imaging Lens & Laser Optics Manufacturer | Edmund Optics.” Accessed: Nov. 18, 2024. [Online]. Available: <https://www.edmundoptics.com/>
- [28] “Newport - Photonics Solutions for Extending the Frontiers of Science.” Accessed: Nov. 18, 2024. [Online]. Available: https://www.newport.com/?srsltid=AfmBOorcTM8ZvO6zRfH9o-b4Yzk2MBKxXGNfN9kZWEhQX0IfiRRKtY_1
- [29] “LightTools | Synopsys Optical Solutions Group,” SOLIDWORKS. Accessed: Nov. 18, 2024. [Online]. Available: <https://www.solidworks.com/partner-product/lighttools>
- [30] “OSLO | Lambda Research Corporation.” Accessed: Nov. 18, 2024. [Online]. Available: <https://lambdaresearch.com/oslo>
- [31] “Ansys Zemax OpticStudio | Optical Design and Analysis Software.” Accessed: Nov. 18, 2024. [Online]. Available: <https://www.ansys.com/products/optics/ansys-zemax-opticstudio>
- [32] “Optical Design Software - CODE V | Synopsys.” Accessed: Nov. 18, 2024. [Online]. Available: <https://www.synopsys.com/optical-solutions/codev.html>
- [33] “The Proven Solution for 3D Design and Product Development | SOLIDWORKS.” Accessed: Nov. 18, 2024. [Online]. Available: <https://www.solidworks.com/proven-solution-3d-design-and-product-development>
- [34] “UltiMaker: Professional 3D Printers that Empower Innovation.” Accessed: Nov. 18, 2024. [Online]. Available: <https://ultimaker.com/>
- [35] “Original Prusa 3D printers directly from Josef Prusa.” Accessed: Nov. 18, 2024. [Online]. Available: <https://www.prusa3d.com/>
- [36] Amin, M., et al. (2022). Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in the Aquatic Environment: Sources, Fate, and Transport. *Environmental Pollution*, 279, 116872.
- [37] Gao, Y., et al. (2023). Contamination and Toxicity of PAHs in Aquatic Ecosystems: Recent Advances. *Science of the Total Environment*, 792, 148388.
- [38] Khan, R., et al. (2023). Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in River Systems: A Review of Environmental Behavior and Toxicity. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 42(6), 1765-1784.
- [39] Zhang, Y., et al. (2023). Levels and Distribution of PAHs in River Waters and Sediments from the Chibunga River Basin in Ecuador. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(1), 112.

ANEXOS

Anexo 1: Código de Arduino – obtención de datos

El anexo 1 muestra el código de implementación en la plataforma de Arduino donde se destaca el funcionamiento y operación de cada una de las variables.

```
1 |
2 | const int sensorConductividadPin = A0; // Pin de entrada del sensor de conductividad (TDS)
3 | const int sensorUVPin = A1; // Pin de entrada del sensor UV
4 | const int ledPinConductividad = 9; // Pin de salida para el LED de conductividad
5 | const int ledPinUV = 10; // Pin de salida para el LED UV
6 | const int apdsPin = A2; // Pin de entrada del sensor APDS-9002 (fotodetector)
7 |
8 | // Definir umbrales para los niveles de contaminación
9 | const int umbralConductividad = 500; // Umbral para el sensor de conductividad
10 | const int umbralUV = 400; // Umbral para el sensor UV
11 |
12 | // Variables para almacenar las lecturas
13 | int lecturaConductividad = 0;
14 | int lecturaUV = 0;
15 | int lecturaLuz = 0;
16 |
17 | void setup() {
18 |     // Iniciar comunicación serie para ver las lecturas
19 |     Serial.begin(9600);
20 |
21 |     // Configurar pines
22 |     pinMode(ledPinConductividad, OUTPUT);
23 |     pinMode(ledPinUV, OUTPUT);
24 |     pinMode(apdsPin, INPUT);
25 | }
26 |
27 | void loop() {
28 |     // Leer los valores de los sensores (valores analógicos)
29 |     lecturaConductividad = analogRead(sensorConductividadPin);
30 |     lecturaUV = analogRead(sensorUVPin);
31 |
32 |     // Controlar la intensidad de los LEDs según las lecturas de los sensores
33 |     // Para el sensor de conductividad
34 |     int intensidadLedConductividad = map(lecturaConductividad, 0, 1023, 0, 255);
35 |     analogWrite(ledPinConductividad, intensidadLedConductividad);
```

```

// Para el sensor UV
int intensidadLedUV = map(lecturaUV, 0, 1023, 0, 255);
analogWrite(ledPinUV, intensidadLedUV);

// Leer el valor de luz reflejada por el APDS-9002
lecturaLuz = analogRead(apdsPin);

// Imprimir las lecturas en el monitor serie
Serial.print("Lectura de conductividad: ");
Serial.print(lecturaConductividad);
Serial.print("\tIntensidad LED conductividad: ");
Serial.println(intensidadLedConductividad);

Serial.print("Lectura UV: ");
Serial.print(lecturaUV);
Serial.print("\tIntensidad LED UV: ");
Serial.println(intensidadLedUV);

Serial.print("Lectura de luz reflejada (APDS-9002): ");
Serial.println(lecturaLuz);

// Comprobar si los valores de los sensores exceden los umbrales de contaminación
if (lecturaConductividad > umbralConductividad) {
  Serial.println("Agua contaminada (alta conductividad)");
} else {
  Serial.println("Agua limpia (baja conductividad)");
}

if (lecturaUV > umbralUV) {
  Serial.println("Agua contaminada (alta radiación UV)");
} else {
  Serial.println("Agua limpia (baja radiación UV)");
}

delay(1000); // Esperar un segundo antes de leer nuevamente
}

```

*Figura 36: Código en arduino para la obtención de datos
(Autor-Arduino)*

Anexo 2: Impresión del modelo en 3D

El anexo 2 muestra la impresión de varias piezas del modelo estructurado para su posterior implementación.

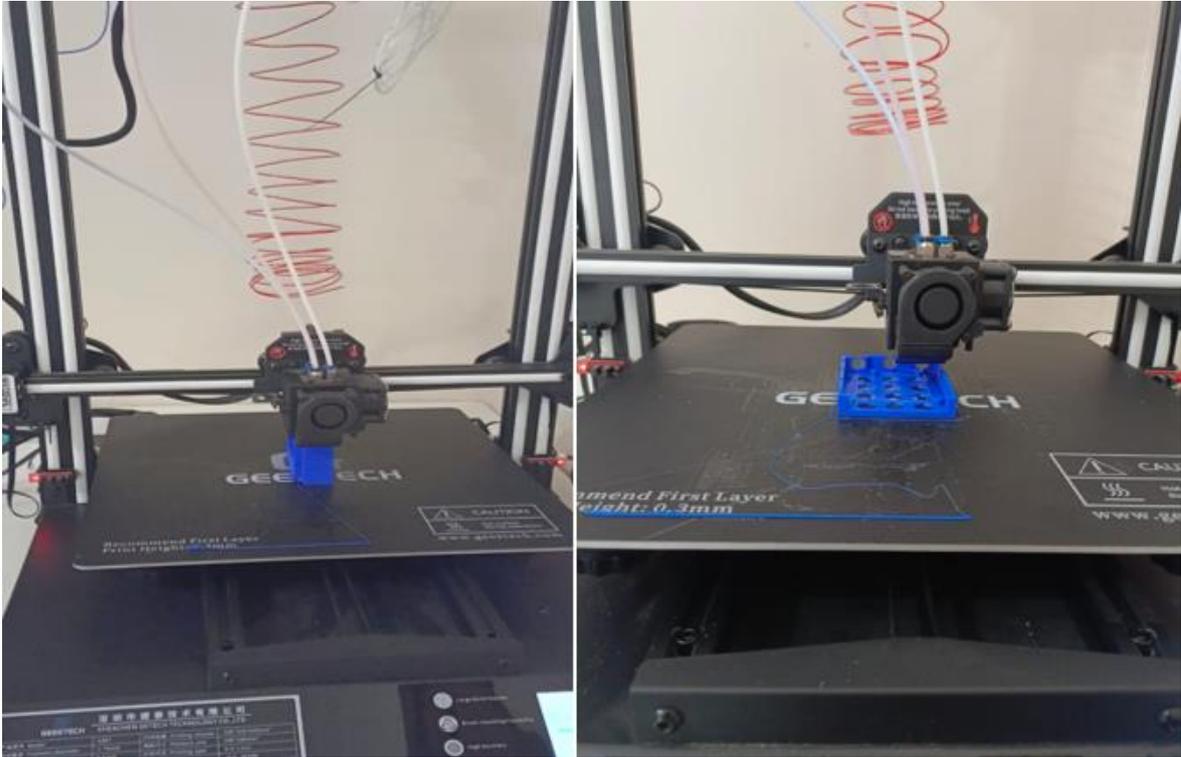


Figura 37: Impresión del modelo diseñado en 3D

(Autor)