

Caracterización de un sistema de comunicación punto a punto subacuático desarrollado con el transductor ultrasónico JSN-SR04T con una frecuencia de 40 kHz.

Diana Giselle Armero Molina
Javier Andrés Rosas Villamarín

Universidad CESMAG
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Electrónica
San Juan de Pasto
2024

Caracterización de un sistema de comunicación punto a punto subacuático desarrollado con el transductor ultrasónico JSN-SR04T con una frecuencia de 40 kHz.

Diana Giselle Armero Molina
Javier Andrés Rosas Villamarín

Asesor:
Mag. Mario Fernando Henao Rosero

Universidad CESMAG
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Electrónica
San Juan de Pasto
2024

Nota de aceptación

Aprobado por el Comité de Investigación y
Proyección Social en Cumplimiento de los
Requisitos exigidos por la Universidad CESMAG
Para optar al título de Ingeniería Electrónica.

Mag. Mario Fernando Henao Rosero

Asesor

Jurado

Jurado

San Juan de Pasto, agosto 2024

Página de Nota de Exclusión de Responsabilidad Intelectual

“El pensamiento que se expresa en esta obra es exclusivamente responsabilidad de sus autores y no compromete la ideología de la Universidad CESMAG”

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a todas las personas que nos han apoyado en la realización de este proyecto de grado.

En primer lugar, agradecemos a nuestras familias, quienes han sido nuestra mayor fuente de fortaleza y motivación. Su amor incondicional, paciencia y apoyo constante nos han permitido alcanzar este logro. Este proyecto es tanto un reflejo de nuestro esfuerzo como del sacrificio y dedicación que han demostrado hacia nosotros a lo largo de este camino.

A nuestros profesores de formación académica, en especial al Mag. Mario Fernando Henao, queremos expresar nuestro agradecimiento por su invaluable guía y orientación, por su infinita paciencia, dedicación y compromiso que han sido fundamentales para la culminación de este proyecto. Su experiencia y conocimiento nos han sido de gran ayuda para enfrentar los desafíos que surgieron durante el desarrollo de este trabajo.

A nuestros amigos y compañeros de estudio, gracias por el apoyo mutuo, por las horas compartidas de trabajo y estudio, y por ser una fuente constante de aliento. Su compañía hizo este proceso mucho más llevadero y enriquecedor.

Finalmente, agradecemos a todas aquellas personas que, de una manera u otra, contribuyeron al éxito de este proyecto. Cada palabra de aliento, cada gesto de apoyo y cada consejo han sido de gran valor para nosotros.

Este logro es el resultado del esfuerzo conjunto, y lo compartimos con todos ustedes.

Dedicatoria

Dedico este proyecto de grado, en primer lugar a Padre y Madre celestiales, a mis amados padres, quienes han sido mi pilar inquebrantable a lo largo de este arduo camino. Desde el primer día, su amor incondicional, su fe en mí y su inagotable paciencia me han brindado la fuerza necesaria para superar cada desafío y alcanzar este sueño. Han sacrificado tanto, renunciando a sus propias comodidades y sueños, para asegurar que yo tuviera todas las oportunidades para prosperar. Papá, mamá, cada logro que obtengo es un reflejo de su dedicación y sacrificio. Ustedes han sido mi mayor fuente de inspiración, enseñándome con su ejemplo que, con trabajo duro, determinación y amor, todo es posible.

A mi hermano que siempre estuvo presente y de una u otra manera me daba fuerzas para continuar, gracias por estar siempre a mi lado, por tus consejos y por creer en mí incluso en los momentos más difíciles.

A mis abuelos, mis tíos, por todo su apoyo que me han brindado, no solo me ha motivado, sino que también me ha dado la confianza para seguir adelante, incluso en los momentos más difíciles.

A mi compañero Javier, por apoyarme cuando más lo necesitaba, porque a pesar de las situaciones y problemas no me dejó sola, por aguantar mis cambios de humor, estrés y enojos. Sé que el camino fue largo y difícil, pero juntos comenzamos y juntos terminamos, somos un gran equipo.

Finalmente, a todas aquellas personas que, de alguna manera, han sido fuente de inspiración y motivación en mi vida. Este camino me enseña a no dejar que los obstáculos me detengan. Si encuentras un muro, no te rindas; busca una manera de superarlo, de rodearlo o de romperlo. El camino hacia el éxito se construye con perseverancia y valentía.

Diana Giselle Armero Molina

Dedicatoria

Dedico este proyecto, en primer lugar, a mi madre, quien, con su amor incondicional, gran sacrificio, apoyo inquebrantable y sabios consejos, ha sido mi mayor inspiración y fuerza en cada paso de este camino. Sin su presencia constante y su fe en mí, este logro no habría sido posible.

A mis abuelos, que en paz descansen, quienes siempre desearon verme como un profesional. Este logro es en honor a su memoria y al amor y orgullo que siempre me demostraron.

A mi padre, agradezco su apoyo económico, que me permitió continuar mis estudios y cumplir este objetivo.

A mis profesores, por ser guías en mi formación y por motivarme a siempre buscar la excelencia. Su enseñanza ha sido clave en mi crecimiento personal y profesional.

A mi compañera de proyecto, ya que sin ella este logro hubiese sido mucho más complejo, y de igual manera le agradezco por ser mi compañera de vida y la persona más valiosa que he conocido, este es un logro más a nuestro repertorio juntos.

Finalmente, me lo dedico a mí mismo, por la determinación, el esfuerzo y la perseverancia que puse en cada momento de este proceso. Este logro es un recordatorio de que, con trabajo duro y determinación, los sueños pueden hacerse realidad.

Javier Andrés Rosas Villamarín.

Contenido

1	El Problema de Investigación	16
1.1	Objeto o Tema de Investigación.....	16
1.2	Línea de Investigación	16
1.3	Sub-línea de Investigación	16
1.4	Descripción o Planteamiento del Problema	16
1.5	Formulación del Problema	18
1.6	Objetivos	18
1.6.1	Objetivo General	18
1.6.2	Objetivos Específicos	18
1.7	Justificación.....	19
1.8	Viabilidad.....	20
1.9	Delimitación.....	20
2	Tópicos del Marco Teórico.....	22
2.1	Antecedentes	22
2.1.1	Módem Acústico Submarino Ultrasónico con Modulación por Desplazamiento de Frecuencia (FSK)	22
2.1.2	Evaluación Del Desempeño De Un Módulo De Comunicación Acústico Subacuático	22
2.1.3	Canales De Comunicación Acústica Submarina: Modelos De Propagación Y Caracterización Estadística	23
2.1.4	Ruido Subacuático: Fundamentos, Fuentes, Cálculo y Umbrales de Contaminación Ambiental	24
2.1.5	Redes de Sensores Submarinos: Aplicaciones, Avances y Desafíos	24

2.1.6	Desarrollo de un Módem Acústico de Baja Potencia de 1 Mbps para Comunicaciones Submarinas	25
2.1.7	Propagación de Ondas Acústicas en Espacios Subacuáticos	25
2.1.8	Codificador y Decodificador Digital REED-SOLOMON Programados para Hardware Reconfigurable	26
2.1.9	Diseño e Implementación de Módem Acústico para Red de Aguas Poco Profundas	26
2.2	Enunciados de los Supuestos Teóricos	27
2.2.1	Atenuación y Ruido.....	27
2.2.2	Geometría del Canal, Propiedades de Reflexión y Refracción	28
2.2.3	El Efecto Doppler.....	29
2.2.4	Señales Acústicas	29
2.2.5	Velocidad del Sonido	30
2.2.6	Factores que Afectan la Propagación del Sonido.....	31
2.2.7	Sonar Pasivo.....	32
2.2.8	Propagación del Sonido.....	32
2.2.9	Suma de Niveles (eco).....	33
2.3	Definición de Conceptos	34
2.3.1	Definición Nominal de Variables.....	34
2.3.2	Definición Operativa de Variables	35
2.4	Hipótesis.....	36
2.4.1	Hipótesis de la Investigación.....	36
2.4.2	Hipótesis Nula.....	36
2.4.3	Hipótesis Alternativa.....	37
3	Metodología.....	38
3.1	Enfoque	38

	10
3.2 Paradigma.....	38
3.3 Método	38
3.4 Tipo de Diseño	38
3.5 Diseño de Investigación	38
3.6 Universo	39
3.7 Muestra.....	39
3.8 Técnicas de Recolección de Información.....	39
3.8.1 Validez de la Técnica	40
3.8.1.1 Instrumentos de Recolección de la Información	40
4 Resultados de la Investigación	41
4.1 Diseños de los Circuitos Transmisor y Receptor a una Frecuencia de 40kHz con Modulación ASK	41
4.1.1 Diseño del Circuito Transmisor	41
4.1.2 Diseño del Circuito Receptor	46
4.2 Esquema de Codificación por Bloques Reed-Solomon	58
4.2.1 Diseño de Software de la Codificación de los Datos	60
4.3 Prototipo del Enlace Punto a Punto: Pruebas en Agua y Evaluación de Desempeño	60
4.3.1 Prueba con Tasa de Transferencia de 100bps	64
4.3.2 Pruebas con Tasa de Transferencia de 600bps.....	65
4.3.3 Pruebas con Tasa de Transferencia de 1000bps.....	66
5. Análisis de Resultados	67
5.1 Evaluación del Sistema de Comunicación Punto a Punto.....	67
5.1.1 Evaluación del Enlace a 100bps.....	68
5.1.2 Evaluación del Enlace a 600bps.....	68
5.1.3 Evaluación del Enlace a 1000bps.....	70

5.2	Caracterización Final del Enlace.....	71
6.	Conclusiones.....	73
7.	Recomendaciones	75

Lista de figuras

<i>Figura 1 Resultados de las pruebas realizadas (Vargas, 2018).</i>	23
<i>Figura 2 Especificaciones del transductor JSN-SR04T (Jahankit, 2021).</i>	42
<i>Figura 3 Diagrama de bloques circuito transmisor final.</i>	42
<i>Figura 4 Diagrama pulso de 40KHz.</i>	43
<i>Figura 5 Diagrama periodo de cada bit.</i>	43
<i>Figura 6 Diagrama de flujo Código generación de pulsos a 40khz.</i>	44
<i>Figura 7 Diagrama de flujo transmisión de bits a 40kHz.</i>	45
<i>Figura 8 Diagrama de bloques diseño inicial de circuito receptor.</i>	46
<i>Figura 9 Circuito amplificador módulo AD620.</i>	46
<i>Figura 10 Señal obtenida del osciloscopio con los módulos.</i>	47
<i>Figura 11 Prueba con los transductores solos.</i>	48
<i>Figura 12 Señal de recepción implementando los traductores solos.</i>	48
<i>Figura 13 Tentativa de prototipo final con amplificadores LM741 y LM358.</i>	49
<i>Figura 14 Diagrama esquemático circuito de recepción.</i>	50
<i>Figura 15 Señales de salida de cada etapa del prototipo receptor.</i>	50
<i>Figura 16 Implementación en PCB del circuito de prueba.</i>	51
<i>Figura 17 Señales de transmisión y recepción a diferentes tasas de transferencia.</i>	52
<i>Figura 18 Señales de transmisión y recepción con un comparador adicional.</i>	52
<i>Figura 19 Diseño esquemático del circuito de recepción.</i>	53
<i>Figura 20 Diseño de pistas y circuito 3D.</i>	53
<i>Figura 21 Implementación en PCB del circuito receptor final</i>	54
<i>Figura 22 Diagrama de bloques circuito de recepción final.</i>	55
<i>Figura 23 Diagrama de Bloques etapa de adquisición de datos en la recepción.</i>	55
<i>Figura 24 Diagrama de flujo etapa de procesamiento de muestreo.</i>	56
<i>Figura 25 Diagrama de flujo etapa de procesamiento de bits.</i>	56
<i>Figura 26 Diagrama de flujo etapa de Decodificación.</i>	57
<i>Figura 27 Diagrama de flujo codificación de los datos a transmitir.</i>	60
<i>Figura 28 Esquema de experimentación.</i>	61
<i>Figura 29 Secuencia de 1s y 0s agrupados.</i>	62

Lista de tablas

<i>Tabla 1 Hipótesis de la investigación.....</i>	<i>36</i>
<i>Tabla 2 Hipótesis nula de la investigación.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 3 Hipótesis alternativa de la investigación</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 4 Ejemplo de la recolección de datos.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 5 Cálculos del número de oscilaciones.</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 6 Configuración tiempo de muestreo por tasa de transferencia.</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 7 Datos de las pruebas con una tasa de transferencia de 100bps.</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 8 Datos de las pruebas a una tasa de transferencia de 600bps.</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 9 Datos de las pruebas a una tasa de transferencia de 1000bps.</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 10 Evaluación de los datos para una tasa de transferencia de 100bps.</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 11 Evaluación de los datos para una tasa de transferencia de 600bps.</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 12 Evaluación de los datos con una tasa de transferencia de 1000bps.</i>	<i>70</i>

Introducción

Las comunicaciones terrestres se lograron gracias al transporte de información mediante ondas de radiofrecuencia que viajan por el aire. Sin embargo, es importante destacar que este no es el único medio, ya que la mayoría de las comunicaciones residenciales son cableadas o guiadas. A pesar de las pérdidas inherentes a estos sistemas, siguen siendo eficientes para transmitir información de un lugar a otro. Con los avances tecnológicos, las comunicaciones se han perfeccionado, logrando en algunos casos enlaces con mínimas pérdidas y mayor velocidad.

Dado que la comunicación terrestre es ya una realidad, surge la necesidad de establecer enlaces punto a punto en el medio subacuático. Esto responde a las demandas actuales de la sociedad, que requieren soluciones para la comunicación y el estudio de los ecosistemas acuáticos, así como de la flora y fauna marina, entre otros aspectos importantes. Históricamente, el medio subacuático se ha considerado tanto para el transporte de materiales como en el ámbito bélico. Sin embargo, con la creación de los primeros submarinos militares, se evidenció la necesidad de contar con un enlace de comunicación. Inicialmente se intentó utilizar ondas de radiofrecuencia, pero estas resultaron ineficaces bajo el agua. Como resultado, los submarinos debían salir a la superficie para poder transmitir señales (Uribe & Velez, 2017).

Para esta investigación, se propuso y desarrolló un sistema de comunicación subacuático basado en ondas ultrasónicas utilizando el transductor de bajo costo JSN-SR04T. Este sistema fue caracterizado por su tasa de error de bit, tasa de transferencia y alcance. Se implementó la modulación digital por desplazamiento de amplitud (ASK) junto con la codificación de bloques Reed-Solomon, que se basa en la multiplicación de matrices y proporciona una gran capacidad de detección y corrección de errores.

El principal reto enfrentado fue establecer un enlace de comunicación estable. Para solucionarlo, se añadió un circuito compuesto por un filtro, amplificadores variables y comparadores variables. A pesar de estas mejoras, se presentaron otros desafíos, como la sincronización, el diseño del software del transmisor y la recolección de datos del receptor. Para solucionarlos, el software del emisor se desarrolló en Arduino, la sincronización se logró estableciendo una secuencia de bits predefinida, y la recolección de datos se realizó en MATLAB junto con la tarjeta NI-MyDAQ en el apartado de analogInputRecorder.

Las pruebas se realizaron en varios estanques, con el transmisor fijo y el receptor alejándose progresivamente para medir las variables. Para el caso de la tasa de error, se estableció un punto ideal donde la tasa de error de bit fuese baja, considerada óptima entre 10^{-4} y 10^{-6} , y en base a esta tasa de error se logró establecer el enlace de comunicación a 100, 600 y 1000 bps a distancias de 30 cm, 1 m y 3.12 m, respectivamente. Es importante destacar que en cada distancia se realizaron tres pruebas para cada una de las tasas de transferencia, con el objetivo de analizar el comportamiento del circuito en distintas condiciones. Estas pruebas permitieron evaluar cómo se comportaba la transmisión de información a diferentes velocidades y si la integridad de los datos se mantenía a lo largo del proceso.

El propósito principal de este enfoque fue observar si la información sufría alteraciones o pérdidas durante la transmisión, considerando factores como la distancia y la tasa de transferencia. Al realizar múltiples pruebas, se buscaba asegurar la fiabilidad de los resultados y obtener un análisis más completo sobre el rendimiento del circuito bajo diversas circunstancias. Además, este método permitió identificar posibles patrones de comportamiento anómalo, como errores de transmisión o degradación de la señal, lo que resulta crucial para optimizar el diseño del sistema.

En conclusión, los ajustes realizados en el circuito, la sincronización, y la implementación del codificador Reed-Solomon permitieron que el proyecto superara las expectativas iniciales, demostrando la eficacia de este enfoque para reducir errores en un entorno subacuático. La capacidad del sistema para mantener un enlace estable bajo diversas condiciones y distancias no solo valida la solidez del diseño, sino que también refuerza la viabilidad de su implementación en entornos reales. Esto confirma las hipótesis planteadas inicialmente, evidenciando no solo la robustez técnica del proyecto, sino también su potencial para ser escalado y aplicado en situaciones más complejas. Además, el éxito alcanzado destaca el compromiso del equipo en la optimización de cada componente, asegurando un rendimiento fiable y eficiente a largo plazo.

1 El Problema de Investigación

1.1 Objeto o Tema de Investigación

Sistema de comunicación subacuático punto a punto desarrollado con el transductor ultrasónico JSN-SR04T con una frecuencia de 40 kHz implementado en agua dulce.

1.2 Línea de Investigación

Comunicaciones electrónicas: El área de Comunicaciones Electrónicas de la Universidad CESMAG centra su trabajo investigativo en el estudio de las tecnologías, métodos, técnicas, algoritmos y desarrollos utilizados en los procesos de transmisión, recepción y procesamiento de la información de manera local y remota mediante el uso de circuitos electrónicos. Los trabajos desarrollados en esta área incluyen el diseño, modelado, simulación, análisis de sistemas análogos y digitales para telecomunicaciones, telemetría y redes de datos (Programa de ingeniería Electrónica, 2015).

1.3 Sub-línea de Investigación

Las telecomunicaciones comprenden el estudio de las tecnologías que permiten la comunicación de información a partir de señales generadas, retransmitidas e interpretadas por dispositivos electrónicos, bajo diversos medios de transmisión (Programa de ingeniería Electrónica, 2015).

1.4 Descripción o Planteamiento del Problema

Las comunicaciones bajo el agua han sido objeto de estudio para múltiples propósitos la acuicultura, el control de polución, adquisición de datos climáticos, predicción de alteraciones naturales, misiones de búsqueda y reconocimiento o estudio de la vida submarina (Vargas, 2018). Se ha probado que, para la transmisión de datos bajo el agua, las ondas electromagnéticas son descartadas para su uso (a pesar de que ofrecen grandes anchos de banda) debido principalmente a las altas atenuaciones que sufren con la distancia, extinguiéndose las señales en

pocos metros y requiriendo por ello elevadas potencias o antenas de gran tamaño (Valencia, 2011).

Actualmente, se están aplicando sistemas con instrumentos acústicos ya que este tipo de ondas se adaptan mejor en el medio acuático. Sin embargo, las propagaciones de dichas ondas en el canal acústico presentan algunas restricciones a causa del ancho de banda limitado, que a su vez limita la velocidad a la cual se puede transmitir datos (Valencia, 2011).

Para que las señales ultrasónicas subacuáticas presenten un alto desempeño, su fabricación debe ser especializada. Debido a ello, la fabricación de dichos sistemas son desarrollados y fabricados de una forma avanzada y especializada, por lo que sus circuitos no pueden ser modificados o de alguna forma ser intervenidos, haciendo así que los costos de estos sean elevados, superando algunos los mil dólares (Uribe & Velez, 2017), reduciendo el mercado a labores militares, de pesca e investigación, es decir en proyectos con altos presupuestos; por lo cual se reduce la aplicación en proyectos de bajo costo, y la experimentación con estos sistemas.

Se han realizado experimentos de comunicación entre medios acuáticos y terrestres, pero presentan ciertas limitaciones. Esto se debe a que los avances en las redes terrestres están principalmente basados en la radiofrecuencia, una tecnología que no se adapta bien a las condiciones del entorno acuático. Un ejemplo de esto son los submarinos, que, aunque cuentan con sistemas de comunicación mediante radiofrecuencia, y a su vez una amplia suma de antenas para dicho sistema, no presentan un sistema que genere una comunicación estable en un medio subacuático, por lo cual, tienen que emerger parte del casco para transmitir información en bandas de frecuencia mayores (Alonso & Ramon, 2019).

A pesar de que existen antecedentes de diseño e implementación de sistemas de comunicación que usan el transductor propuesto, no se ha aplicado una codificación de bloques Reed-Solomon, el cual permita al receptor distinguir cuando el mensaje llegue con errores y así disminuir la tasa de errores de bits. Dicho transductor hace parte de los sensores ultrasónicos de bajo costo; su principal funcionamiento es el de medir distancias en un medio subacuático. Para el desarrollo del sistema de comunicación, como se mencionó anteriormente, solo se van a utilizar los transductores de los sensores, los cuales serán modificados, para poder cumplir con la función requerida. Para el traductor JSN-SR04T algunos autores han estudiado su uso en comunicaciones, pero con muchos errores en la transmisión como se observa en el trabajo de la escuela de Ingeniería Eléctrica e Informática, en este proyecto se evalúan 3 distancias diferentes

(130cm 150cm y 170cm) con una tasa de transferencia de 1200bps, se observan unos valores de BER altos, por ejemplo, para una distancia de 130cm el BER fue de 0%, a una distancia de 150cm el BER fue del 6,2% y para una distancia de 170cm se evidencio un BER más alto del 35% (Indriyanto & Edward, 2018).

Dado que el proyecto anterior constituye el antecedente más significativo para esta investigación, sus resultados motivan la caracterización del enlace utilizando los mismos transductores. En este nuevo enfoque, se implementó una modulación diferente, se variaron las distancias y la tasa de transferencia, y se analizó la tasa de error de bits. Además, se llevó a cabo otro experimento en el que se aplicó la codificación por bloques Reed-Solomon para evaluar si la tasa de error de bits disminuye o se mantiene.

1.5 Formulación del Problema

¿Cuál es la tasa de error de bit, el alcance y tasa de transferencia de un enlace de comunicación subacuático punto a punto implementado con el transductor ultrasónico JSN-SR04T con una frecuencia de 40 kHz en agua dulce?

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo General

Caracterizar un sistema de comunicación punto a punto subacuático desarrollado con el transductor ultrasónico JSN-SR04T con una frecuencia de 40 kHz en agua dulce.

1.6.2 Objetivos Específicos

1. Diseñar los circuitos transmisor y receptor para un enlace de comunicaciones punto a punto subacuático para una frecuencia de 40 kHz, implementando la modulación ASK.
2. Realizar el esquema de codificación por bloques Reed-Solomon.
3. Implementar un prototipo de enlace punto a punto en un entorno de pruebas en agua dulce.
4. Evaluar el desempeño del enlace punto a punto subacuático con el transductor JSN-SR04T.

1.7 Justificación

Los sistemas de comunicaciones en la actualidad usan transductores sofisticados que presentan un costo elevado. Hasta ahora han sido pocos los sistemas de comunicación que usan el transductor propuesto JSN-SR04T, por lo tanto, no se encuentra mucha información sobre ellos en dichos sistemas, ya que sus características iniciales corresponden a las de un sensor de distancia. Por otro lado, la codificación de bloques Reed-Solomon ha sido utilizada exitosamente para detectar y corregir errores en distintos sistemas, pero se desconoce su desempeño en un enlace de comunicación que acopla este tipo de transductores.

Se eligió esta codificación debido a dos características fundamentales que sirven para esta investigación: En primera instancia, la capacidad de los códigos Reed-Solomon para la detección y corrección de errores en la comunicación; y la segunda es que, al ser una codificación en bloques, basa su funcionamiento en matemáticas matriciales, haciéndola idónea para la implementación en tarjetas de desarrollo tales como Arduino o programas como Matlab.

Aprovechando la constante evolución de la tecnología, es posible utilizar herramientas más efectivas que se pueden implementar de manera más eficiente, con el objetivo de rediseñar transductores para la medición de distancias. Esto permitirá su integración en un sistema de comunicación acústica subacuática.

En este trabajo, se implementó el prototipo en agua dulce para evaluar la efectividad de la comunicación subacuática mediante transductores ultrasónicos y codificación Reed-Solomon. El objetivo es determinar si el sistema puede transmitir información de un lugar a otro de manera eficaz en un entorno acuático.

De igual manera puede contribuir en el aspecto económico a los usuarios que implementen el sistema de comunicación, así como los ingenieros acuicultores y para los piscicultores dado que como el sistema es implementado con transductores de bajo costo, tienen mayor facilidad de acceso a él. También se puede desarrollar para recolectar datos sobre ecosistemas acuáticos de una manera más fácil y en el caso de los piscicultores mantener un control de los animales y verificar cómo está su ambiente, para evitar posibles muertes, por ejemplo, en el departamento de Nariño, se encuentran estanques de cría de truchas, donde el uso excesivo de alimentos e insumos puede ser perjudicial para el ecosistema. A través de un sistema de comunicación, es posible monitorear y controlar estos factores, ya que los datos relevantes sobre el uso de insumos se recolectarían y enviarían al dueño. Esto permitiría tomar decisiones

informadas para minimizar el impacto ambiental y optimizar el manejo de los recursos en los estanques.

Con este sistema de comunicación subacuático se puede enviar información de un punto a otro, se observa variables importantes, como la cantidad de contaminación de la región (lago, río, mar) y con los datos obtenidos buscar una solución rápida al problema mencionado, protegiendo el ecosistema.

El departamento de Nariño cuenta con lagos y lagunas que podrían beneficiarse de la implementación de este sistema. Como propuesta para el futuro, se plantea aplicar esta tecnología en la laguna de La Cocha, para abordar la contaminación. Este proyecto no solo ayudaría a preservar el entorno natural, sino que también protegería a las comunidades que viven en sus alrededores. La implementación de esta iniciativa podría convertirse en un modelo para otros proyectos en la región, contribuyendo al bienestar ecológico y social.

1.8 Viabilidad

El proyecto es viable debido a la fácil adquisición de los recursos necesarios para el desarrollo como el sensor ultrasónico JSN-SR04T, amplificadores y varios elementos electrónicos, además de los contenidos bibliográficos sobre las comunicaciones ultrasónicas, de igual manera los lugares de pruebas para evidenciar su funcionamiento, que fueron un tanque de plástico, un tanque construido en madera y la piscina del medio educativo San Damián de la Universidad CESMAG sede Catambuco, cada lugar de prueba fue dependiendo de qué tanta distancia va tomando el sistema de comunicación para los cuales se cuenta con los recursos necesarios para su adquisición e implementación.

1.9 Delimitación

En el presente proyecto se desarrolló un sistema de comunicación subacuático con el transductor ultrasónico JSN-SR04T con una frecuencia de 40 kHz, el cual es de bajo costo; se realizó el diseño de los circuitos del transmisor y el receptor que maneja esta frecuencia, se implementaron diferentes elementos como resistencias, circuitos integrados, potenciómetros, microcontroladores, etc. También el diseño del software en los programas de Arduino y Matlab, para la transmisión, recepción y procesamiento de datos. Se llevó a cabo la implementación de la modulación ASK cuando un bit "1" se quiere transmitir, la portadora mantiene su amplitud

normal, pero cuando un bit "0" se quiere transmitir, la amplitud de la portadora se reduce o se apaga por completo. También se realizó la codificación en bloques Reed-Solomon, el cual consiste en un código que sea capaz de reconocer cuando al receptor le llega un error de la información original enviada del transmisor, así mismo el proyecto va enfocado a la implementación en aguas dulces.

Se implementó el sistema de comunicación en tanques con diferentes distancias colocando el transmisor y el receptor en cada extremo a la misma altura para observar cómo afectan las variables mencionadas. Para realizar las pruebas a 0,3m se implementó en un recipiente reutilizado de plástico; para la segunda distancia de 1m se construyó un estanque de madera de 1m de largo por 0,5m de alto, se reforzó con plástico dando la posibilidad de ampliar el estanque; para la tercera distancia de 3,12m se llevó a cabo en las piscinas del medio educativo San Damián de la Universidad CESMAG sede Catambuco.

2 Tópicos del Marco Teórico

2.1 Antecedentes

2.1.1 *Módem Acústico Submarino Ultrasónico con Modulación por Desplazamiento de Frecuencia (FSK)*

En este artículo realizado por Indriyanto & Edward (2018), se realiza el diseño e implementación de un módem acústico submarino, implementando la modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK); para el diseño se utiliza un microcontrolador (Arduino), amplificadores (XR-2206, XR-2211A) y transductores, los cuales fueron tomados del sensor JSN-SR04T. Además, en los resultados se aprecia que el modem FSK puede enviar datos de texto por el medio acuático con unos resultados de 1200 bps, también se realizan pruebas con respecto a la distancia y la prueba de BER (Tasa de error de bits), donde se tiene lo siguiente:

Con una distancia de 100 cm y 130 cm se obtiene un BER del 0%; Con una distancia de 150 cm se obtiene un BER del 6,2% y a 170 cm de distancia se obtiene un BER significativamente elevado, con un porcentaje del 35%.

En este artículo se puede evidenciar la implementación del transductor del sensor JSN-SR04T, con el que se desea trabajar; de igual manera se observan unos resultados con distancias y la tasa de error de bit, las cuales en este caso son las variables que se desean observar en los transductores.

2.1.2 *Evaluación Del Desempeño De Un Módulo De Comunicación Acústico Subacuático*

En la siguiente investigación se realizó el diseño e implementación de un prototipo inalámbrico que permita establecer un enlace para transmisión de datos a través de un canal acústico subacuático entre dos módulos iguales utilizando modulación en frecuencia BFSK (Vargas, 2018).

Para este caso en el documento se da a conocer el desarrollo de los transductores que fueron realizados con materiales piezoeléctricos donde la cerámica utilizada fue manufacturada con electrones de plata. Los resultados obtenidos se observan en la Figura 1:

ESPACIO	$V_{\text{TRANSMISOR}}$ [V _{RMS}]	V_{RECEPTOR} [V _{RMS}]	Perdidas Transmisión [dB]	Distancia [m]	BER (%)
TANQUE	2,7402	0,0945	-29,2470	0,23	0
RECIPIENTE	2,7313	0,0906	-29,5848	0,38	0
TANQUE	2,7441	0,0871	-29,9676	0,46	0
TANQUE	2,7416	0,0713	-31,6982	0,68	0
TANQUE	2,7434	0,0529	-34,2966	0,91	0
TANQUE	2,7423	0,0501	-34,7655	1,14	0
TANQUE	2,7389	0,0447	-35,7453	1,37	0
TANQUE	2,7374	0,0313	-38,8358	1,60	0
TANQUE	2,7437	0,0383	-37,1025	1,82	0
TANQUE	2,7425	0,0363	-37,5648	2,05	0

Figura 1 Resultados de las pruebas realizadas (Vargas, 2018).

Se puede observar que, con las pruebas realizadas en el tanque, se tienen las pérdidas por transmisión en función de la distancia con base en la señal de voltaje de excitación y la señal recibida. Por ello, se observa una relación decreciente entre el voltaje recibido y la distancia (Vargas, 2018).

Con base a esos resultados se puede tener una base de que la distancia va a influir directamente con las variables a trabajar, por lo tanto, la tasa de error de bit y la tasa de transferencia dependerá del alcance.

2.1.3 Canales De Comunicación Acústica Submarina: Modelos De Propagación Y Caracterización Estadística

En el presente artículo se realiza un estudio detallado de la comunicación acústica submarina, donde se pueden observar los modelos de propagación presentes y sus características, entonces se tiene que la propagación acústica se caracteriza por tres factores importantes: la atenuación la cual aumenta con la frecuencia de la señal, la propagación multitrayecto la cual varía con el tiempo y la baja velocidad que tiene el sonido (1500 m/s). También se encuentra un ruido de fondo que no es blanco, sino que tiene una densidad espectral de potencia decreciente (Stojanovic & Preisig, 2009).

Aquí se tiene un dato importante el cual dice que la capacidad del canal de comunicación acústica submarina depende de la distancia y está puede ser muy limitada ya que la propagación acústica se soporta mejor a bajas frecuencias, aunque el ancho de banda total disponible puede

ser bajo (Stojanovic & Preisig, 2009). El documento presenta conceptos con fórmulas que se toman como verdaderas y están presentes en la sección 2.2.1, 2.2.2 y 2.2.3.

2.1.4 Ruido Subacuático: Fundamentos, Fuentes, Cálculo y Umbrales de Contaminación Ambiental

En el presente artículo aborda temas como la propagación del ruido en el mar y su efecto a los animales marinos, de los cuales se ven 4 aspectos importantes que son: Fundamentos de la acústica submarina, fuentes del ruido, modelo de propagación y umbrales. De todo el documento el enfoque se hará en la propagación del sonido, las fórmulas se observan en la sección 2.2.6 y los modelos de propagación, en este caso se ve la implementación de un software llamado ACTUP el cual contiene el modelo de propagación parabólico (RAMGeo) y el modelo gaussiano de trazado de rayos (BELLHOP).

Según este artículo realizado por L. Redondo & A. Ruiz-Mateo (2017) los rayos acústicos van perdiendo potencia poco a poco a lo largo de su camino debido a un conjunto de factores que globalmente se denominan absorción. El nivel de absorción de energía acústica depende de la longitud de onda de la señal. Ondas de alta frecuencia, con muy pequeña longitud de onda, chocan con las moléculas de agua, las hacen vibrar y pierden energía que es absorbida por las moléculas en esta vibración. Cuanto menor sea la frecuencia, y por tanto más largas las ondas, tienden a no chocar sino “mecer” las moléculas de agua y, por tanto, reducen la pérdida de energía por absorción.

2.1.5 Redes de Sensores Submarinos: Aplicaciones, Avances y Desafíos

En el siguiente artículo Heidemann et al (2012) dan a conocer cuáles son los enfoques y desafíos en el diseño e implementación de redes de sensores submarinos, cuáles son las aplicaciones fundamentales y los principales fenómenos relacionados con la propagación acústica, discutiendo cómo afectan a los diseños y operaciones de los sistemas de comunicación; los autores ilustran el efecto que une la atenuación con el ruido en la comunicación acústica, describiendo la relación Señal-Ruido, teniendo como resultado que las frecuencias altas, se atenúan rápidamente a largas distancias, infiriendo así, que la mayoría de sistemas que trabajan a un alto rango de distancia, funcionen a frecuencias menores al rango de los kHz, Además, muestra que el ancho de banda disponible y la tasa de datos utilizable se reduce a medida que

aumenta la distancia; también se da a conocer que la modulación de frecuencia (FSK) es la más comúnmente utilizada, debido a que permite una comunicación robusta a tasas de bits bajas (100 bps típicamente).

2.1.6 Desarrollo de un Módem Acústico de Baja Potencia de 1 Mbps para Comunicaciones Submarinas

En este documento Martins et al (2015) se presenta un sistema acústico de baja potencia de 1 Mbps para comunicaciones submarinas, el cual, tiene como objetivo transmitir a decenas de metros, logrando así, la tasa de transferencia de 1Mbps. Este sistema se basa en un controlador FPGA (Spartan 3), en un transductor emisor ultrasónico de poli fluoruro de vinilideno, el cual, es capaz de enviar señales de alta calidad, lo que será útil para las modulaciones aplicadas, convertidores, y un receptor, el cual va a ser un hidrófono (C304XR). Siguiendo con el documento, se da a conocer que las modulaciones usadas fueron las BPSK, BFSK, ASK (la cual fue definida como OOK).

En el desarrollo, definen una frecuencia portadora de 1MHz para todas las modulaciones, y los convertidores se controlaron a 25MHz, dando así, 25 muestras por periodo. Todo esto, fue probado en una piscina de 12 m de largo, 4 m de ancho y 3 m de profundidad. Y Las mediciones se realizaron a 12 metros de distancia, 50 cm de profundidad, utilizando los diferentes tipos de modulación, dando como resultado, un BER de $3 * 10^{-3}$, con 1 Mbps, $2.3 * 10^{-5}$ con 512 Kbps y $1 * 10^{-8}$ con 256 Kbps; La medición del BER, se realizó en los puertos RS232, permitiendo así, enviar y recibir la señal en un mismo computador; y llegando a la conclusión de que el mejor método de modulación es el OOK, debido a su buen rendimiento a una velocidad de 1Mbps.

2.1.7 Propagación de Ondas Acústicas en Espacios Subacuáticos

En este documento se presentan varias características que se deben tener en cuenta con respecto a las ondas acústicas en espacios subacuáticos. Se toman en cuenta los siguientes aspectos, se complementa el efecto de Doppler observando dos ecuaciones para los casos de desplazamiento de frecuencia las cuales salen en la sección 2.2.3, explica que el efecto Doppler es cuando un emisor s_0 que se mueve a una velocidad v_0 transmitiendo ondas de una frecuencia f_0 y a un receptor r_0 que se encuentra en reposo. Debido al movimiento relativo que existe entre ambos puntos se origina un desplazamiento en frecuencia. De esta manera, el receptor r_0 ya no

recibe f_0 si no que se produce un desplazamiento en frecuencia en función de la velocidad relativa del emisor v_0 , en relación a la velocidad de propagación del medio c (Rodríguez & Marichal, 2017); también en la sección la sección 2.2.4 sobre la velocidad de propagación, las pérdidas de propagación en la sección 2.2.5.

También del documento se resalta que se pueden clasificar los sistemas de comunicaciones acústicas subacuáticas en base a la distancia como: sistemas de largo, medio, y corto alcance. Para sistemas de largo alcance se opera sobre 10-100 km y el ancho de banda está limitado a unos pocos kHz. En los sistemas de medio alcance opera sobre 1-10 km y presentan un ancho de banda del orden de 10 kHz. En los sistemas de corto alcance por debajo de 100 m, se pueden conseguir más de 100 kHz (Rodríguez & Marichal, 2017).

2.1.8 Codificador y Decodificador Digital REED-SOLOMON Programados para Hardware Reconfigurable

En el siguiente artículo desarrollado por Sandoval Ruiz & Fedón (2007) se presentan las bases teóricas para desarrollar bloques de codificación/decodificación Reed Solomon (RS), con el diseño orientado en tecnología FPGA, en primera instancia presentaron el diseño del algoritmo del codificador, haciendo su diseño y obtención de hardware mediante VHDL, el cual les serviría para subdividir el codificador y simulando el comportamiento del codificador en el software ModelSim 5.7.

2.1.9 Diseño e Implementación de Módem Acústico para Red de Aguas Poco Profundas

El siguiente documento desarrollado por Yanbo Wu (2014) Se realiza el diseño e implementación de un modem de baja potencia para una red submarina la cual está pensada para en un futuro realizar una red con +10 nodos con el objetivo de recopilar datos de observación oceánica en tiempo real; para el desarrollo de este proyecto, se tienen en cuenta dos modulaciones, una coherente y una no coherente.

En la modulación no coherente se utiliza un código de concatenación de códigos no binarios de peso constante y códigos convolucionales. Y para la modulación coherente, se utilizan códigos turbo y modulación PSK para cada frame, y el código de Reed-Solomon para que se haga una codificación entre los frames, anidada en un paquete para corregir los errores de los frames. todo esto probado en el mar del sur de China, con los transductores ubicados en una

profundidad de 30M. dando como resultados, que la comunicación en modulación no coherente era fiable a una distancia de 1Km a 5Km, y la comunicación con modulación coherente, la distancia máxima fiable se limitaba hasta los 3.5Km

Con respecto a los anteriores antecedentes se observa la implementación del transductor propuesto, y esto es dado a que hace parte de un sensor que es económico y sumergible para esta investigación es fundamental esas dos características, dado que lo que se busca es realizar un sistema de comunicación punto a punto subacuático que sea económico y por lo tanto de fácil adquisición, y efectiva la transmisión de información con respecto al medio que es agua dulce; también se observa la implementación de la modulación ASK, donde estos antecedentes se tomaran de base, dado que algunos se implementaron en transductores piezoeléctricos, entonces se tendrá en cuenta los resultados y así observar si la comunicación mejoro o al contrario. Por último, se implementará una codificación por bloques Reed-Solomon, la cual ayude a disminuir la tasa de error de bits, donde el receptor sea capaz de distinguir cuando la información contiene errores comparando el mensaje original.

2.2 Enunciados de los Supuestos Teóricos

2.2.1 Atenuación y Ruido

Una propiedad distintiva de los canales acústicos según Stojanovic & Preisig (2009) y Uribe & Vélez (2017) es el hecho de que la pérdida de trayectoria depende de la frecuencia de la señal. Esta dependencia es una consecuencia de la absorción (es decir, la transferencia de energía acústica en calor). Además de la pérdida por absorción, la señal experimenta una pérdida por propagación, que aumenta con la distancia. La pérdida global del trayecto viene dada por la ecuación 1:

$$A(l, f) = (l/lr)^k a(f)^{l-lr} \quad (1)$$

Donde:

f : es la frecuencia de la señal.

l : es la distancia de transmisión, tomada en referencia a algún lr .

k : el exponente de pérdida de trayectoria, modela la pérdida de propagación, y sus valores habituales están entre 1 y 2 (para la propagación cilíndrica y esférica, respectivamente).

$a(f)$: el coeficiente de absorción.

También según Stojanovic & Preisig (2009) y Vargas (2018) el ruido en un canal acústico se divide en dos: el ruido ambiental que está siempre presente en el fondo de las profundidades marinas tranquilas; y el ruido específico del lugar que, por el contrario, sólo existe en determinados lugares. La atenuación, que crece con la frecuencia, y el ruido, cuyo espectro decae con la frecuencia, dan como resultado una relación señal/ruido (SNR) que varía a lo largo del ancho de banda de la señal. Si se define una banda estrecha de frecuencias de anchura Δf alrededor de alguna frecuencia f , la SNR en esta banda puede expresarse por la ecuación 2:

$$SNR(l, f) = Sl(f)/A(l, f)N(f) \quad (2)$$

Donde:

$N(f)$: densidad espectral del ruido.

$Sl(f)$: es la densidad espectral de potencia de la señal transmitida.

Igualmente habla del ancho de banda y la potencia necesarios para alcanzar una SNR preestablecida a cierta distancia pueden aproximarse por la ecuación 3:

$$B(l) = b \cdot l - \beta, P(l) = p \cdot l \quad (3)$$

Donde:

Los coeficientes b , p y los exponentes $\beta \in (0, 1)$, $\psi \geq 1$ dependen de la SNR objetivo, de los parámetros de la pérdida del trayecto acústico y del ruido ambiental.

2.2.2 Geometría del Canal, Propiedades de Reflexión y Refracción

Según Stojanovic & Preisig (2009) menciona que la geometría del canal y las propiedades de refracción y reflexión influyen en la respuesta al impulso de un canal acústico, las cuales determinan el número de trayectorias de propagación significativas, así como sus intensidades y retrasos relativos.

Para las siguientes suposiciones se toma:

l_p : la longitud de la pésima trayectoria de propagación, con $p = 0$ correspondiente a la primera llegada.

También Stojanovic & Preisig (2009) afirma que, en aguas poco profundas, donde la velocidad del sonido puede tomarse como una constante c , las longitudes de los trayectos pueden calcularse utilizando la geometría plana, y los retrasos de los trayectos pueden obtenerse por la ecuación 4:

$$\tau_p = \frac{l_p}{c} \quad (4)$$

De igual manera Stojanovic & Preisig (2009) afirma que el coeficiente de reflexión de la superficie es igual a -1 en condiciones ideales, mientras que los coeficientes de reflexión del fondo dependen del tipo de fondo (duro, blando) y del ángulo de rozamiento, se denota:

Γ_p : el coeficiente de reflexión acumulado a lo largo de la trayectoria de propagación p .

$A(l_p, f)$: la pérdida de propagación asociada a la trayectoria, por lo tanto, representa la respuesta en frecuencia de la pésima trayectoria. Entonces, cada trayectoria de un canal acústico actúa como un filtro de paso bajo, que contribuye a la respuesta de impulso global, así como se observa en las ecuaciones 5 y 6:

$$H_p(f) = \frac{\Gamma_p}{\sqrt{A(l_p, f)}} \quad (5)$$

$$h(t) = \sum_{p \in \mathcal{P}} h_p(t - \tau) \quad (6)$$

Dónde: $h_p(t)$ es la transformada de Fourier inversa de $H_p(f)$.

2.2.3 El Efecto Doppler

En el documento Stojanovic & Preisig (2009) dan a conocer que el movimiento del emisor o del receptor contribuye adicionalmente a los cambios en la respuesta del canal. Esto ocurre a través del efecto Doppler, que provoca un desplazamiento de la frecuencia, así como una dispersión adicional de la frecuencia. El efecto Doppler es proporcional a la relación $a = v/c$ entre la velocidad relativa del emisor y el receptor y la velocidad del sonido.

En el documento realizado por Rodríguez & Marichal (2017), presenta dos ecuaciones con los siguientes casos; cuando la fuente se acerque al receptor se tiene que el desplazamiento de frecuencia como se indica en la ecuación 7:

$$f = f_o \left(1 + \frac{v_o}{c}\right) \quad (7)$$

Y para el caso en el que la fuente se aleje del receptor se tiene la ecuación 8:

$$f = f_o \left(1 - \frac{v_o}{c}\right) \quad (8)$$

2.2.4 Señales Acústicas

Según Uribe & Vélez (2017), las ondas acústicas son ondas mecánicas que su propagación se da por la vibración de partículas en el medio subacuático en forma de

moléculas de aire, tales ondas se conocen como ondas longitudinales ya que se propagan de forma paralela a la vibración de esas partículas.

Este tipo de ondas, están divididas en tres categorías con un intervalo de frecuencias diferentes:

1. Las ondas audibles por el oído humano, estas se encuentran aproximadamente entre 20 Hz y 20kHz.
2. Las ondas infrasónicas que se encuentran debajo del espectro audible del oído humano.
3. Las ultrasónicas que están sobre la capacidad de audición del oído humano.

El parámetro que determina una onda, es la longitud de onda, denotada con el símbolo λ , la cual es la distancia real entre dos máximos consecutivos.

Existe una relación entre la frecuencia y la longitud de una onda, donde su producto es igual a la velocidad con que se propaga la onda c y se expresa de la siguiente manera en la ecuación 9:

$$c = f\lambda \quad (9)$$

Donde:

c : velocidad con la que se propaga la onda.

f : es la frecuencia.

λ : es la longitud de onda.

2.2.5 *Velocidad del Sonido*

Según Uribe & Vélez (2017), se tiene que a partir de la ecuación 10, con la onda es posible hallar la velocidad del sonido, así:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (10)$$

Donde:

c = velocidad del sonido.

E = módulo de elasticidad.

ρ = densidad el medio, ya que es agua, la $\rho = 1030 \text{ kg/m}^3$.

En el agua, la velocidad de propagación del sonido, se puede considerar $c=1500$ m/s como valor medio, pero este valor experimentará grandes variaciones que dependen de la presión, temperatura y salinidad (Rodríguez & Marichal, 2017).

2.2.6 Factores que Afectan la Propagación del Sonido

2.2.6.1 Absorción

Es directamente proporcional a la frecuencia, se conoce como la energía incidente que se disipa al contacto con un material. En general, se puede aproximar el coeficiente de absorción del agua utilizando la ecuación 11 empírica de Thorp (Rodríguez & Marichal, 2017; Uribe & Vélez, 2017).

$$10 * \log(a(f)) = \frac{0.11f^2}{(1+f^2)} + \frac{44f^2}{(4100+f^2)} + 0.000275f^2 + 0.0003 \quad (11)$$

Donde:

f: es la frecuencia de la señal acústica (kHz).

a: es la atenuación.

También según Vargas (2018) un modelo matemático que expresa la atenuación con respecto a la absorción se da por la ecuación 12:

$$\text{pérdidas (dB)} = \alpha * x \quad (12)$$

Donde:

α : coeficiente de atenuación.

X: es la distancia que recorre la onda en metros.

2.2.6.2 Dispersión

Las pérdidas por dispersión son en su mayoría atribuidas a partículas y organismos marinos presentes en el agua, los cuales son interpretados como obstáculos cuando están en la dirección de propagación de las ondas acústicas, haciendo que se reflejan o se dispersen en el medio (Uribe & Vélez, 2017).

2.2.6.3 Atenuación

La atenuación tiende al crecimiento con respecto a la distancia y a la frecuencia, es decir, que a medida que aumenta la distancia y la frecuencia, la atenuación va a aumentar (Rodríguez & Marichal, 2017; Uribe & Vélez, 2017).

Se puede calcular el coeficiente de atenuación mediante la ecuación 13:

$$\alpha \text{ a } 20^{\circ}\text{C} \text{ la } \alpha \left(\frac{\text{dB}}{\text{m}} \right) = (2.754 * 10^{-13}) * f^2 \quad (13)$$

Donde:

f: es la frecuencia de la señal acústica (kHz).

2.2.7 *Sonar Pasivo*

Una vez dadas la intensidad de la fuente (SL), el nivel de ruido ambiental (NL) y conociendo las ecuaciones de pérdidas por absorción y difusión, se puede hacer uso de la ecuación del sonar pasivo para determinar la distancia máxima de transmisión que se puede lograr según la relación señal-ruido (SNR) deseada en el receptor (Vargas, 2018). La ecuación 14 del sonar pasivo está dada por:

$$SNR(\text{dB}) = SL - TL - NL \quad (14)$$

2.2.8 *Propagación del Sonido*

En el documento de L. Redondo & A. Ruiz-Mateo (2017) expresa que la fuente de sonido irradia una señal con un nivel de fuente (SL). La intensidad del sonido se reduce por pérdida de transmisión (TL) cuando el sonido se desplaza desde la fuente al receptor, la intensidad del sonido en el receptor (RL) es dada por la ecuación 12:

$$RL = SL - TL \quad (15)$$

La ecuación 13 proporciona las pérdidas por divergencia y absorción:

$$TL = N * \log(R) - \alpha * R \quad (16)$$

Donde:

N: es el coeficiente de atenuación toma el valor de 20 para pérdidas por transmisión esférica y 10 para cilíndrica.

α : coeficiente de absorción del ruido en el agua, superficie y fondo; una aproximación es de $0.036 * f$, f es la frecuencia en kHz.

2.2.8.1 *Propagación Divergente Esférica.*

En un medio homogéneo (mismas propiedades físicas en todos los puntos) e isotrópico (mismas propiedades de propagación en todas las direcciones) (L. Redondo & A. Ruiz-Mateo, 2017). La ecuación 14 de pérdidas queda:

$$TL_{esférica} = 20 * \log\left(\frac{R}{R_0}\right) \quad R < R_i \quad (17)$$

Donde:

R: la distancia desde la fuente al receptor.

R_i: la profundidad.

R₀: la referencia, normalmente 1m.

NOTA: La intensidad disminuye 6 dB cada vez que se dobla la distancia desde la fuente emisora (L. Redondo & A. Ruiz-Mateo, 2017).

2.2.8.2 Propagación Divergente Cilíndrica.

Según L. Redondo & A. Ruiz-Mateo (2017) en un medio no homogéneo como en las aguas someras se tiene la siguiente ecuación de pérdidas:

$$TL_{cilíndrica} = 20 * \log(R_i) + 10 * \log\left(\frac{R}{R_0}\right) \quad R > R_i \quad (18)$$

NOTA: La intensidad disminuye 3 dB cada vez que se dobla la distancia desde la fuente emisora (L. Redondo & A. Ruiz-Mateo, 2017).

2.2.9 Suma de Niveles (eco).

Según L. Redondo & A. Ruiz-Mateo (2017) cuando a un mismo punto llegan dos ondas procedentes de fuentes diferentes o de la misma, pero a través de caminos diferentes, se superponen sus efectos. Se suman las presiones y las velocidades instantáneas, pero manteniéndose para cada onda la relación existente entre su presión y su velocidad. Cuando las magnitudes X_i que hay que sumar vienen expresadas por sus niveles X_{Li} en dB, el nivel en dB de la suma se calcula mediante la ecuación 16:

$$XL(dB) = 10 * \log\left(\sum_i 10^{X_{Li}/10}\right) \quad (19)$$

Cuando se tratan de presiones se tiene la ecuación 17:

$$XL(dB) = 20 * \log\left(\sum_i 10^{X_{Li}/20}\right) \quad (20)$$

2.3 Definición de Conceptos

2.3.1 Definición Nominal de Variables

2.3.1.1 Tasa de Error de Bit

La información transmitida en las telecomunicaciones es digital, cada una de ellas es enviada en paquetes de bits, la información enviada no siempre llega perfecta a su destino debido a interferencias, ruido, o problemas en el canal de comunicación, por lo tanto, una tasa de error de bit o BER baja indica que la transmisión de datos es confiable, con pocos errores, mientras que una BER alta sugiere que hay problemas en la transmisión.

La tasa de error de bits es fundamental para evaluar y mejorar la eficiencia de los sistemas de comunicación, especialmente en aplicaciones críticas donde la precisión de los datos es vital. Entonces, el BER consiste en el número de bit recibidos que poseen errores con respecto al total de enviados en un intervalo de tiempo; la manera en que se mide el BER se encuentra en la sección 2.3.2.1.

2.3.1.2 Alcance

Para garantizar una transmisión de información efectiva, es importante considerar el alcance mínimo y máximo del enlace de comunicación. Esto significa que la distancia entre el transmisor y el receptor juega un papel fundamental en las telecomunicaciones. Con respecto a lo anterior se considera el alcance del enlace punto a punto, como la distancia en metros desde el transmisor hasta el receptor, donde según el antecedente guía se obtiene una BER de umbral $< 6 \times 10^{-2}$ (Indriyanto & Edward, 2018); en este caso se desea establecer la distancia correcta para que el enlace de comunicación funcione correctamente. El instrumento de cómo se mide el alcance se encuentra en la sección 2.3.2.2.

2.3.1.3 Tasa de Transferencia

La tasa de transferencia corresponde a la velocidad con la que se envíe la información y que esta llegue con la menor cantidad de BER. También permite evaluar dispositivos si refleja mejoras con respecto a otros, donde la tasa de transferencia es más alta. La forma de calcular la tasa de transferencia está en la sección 2.3.2.3.

2.3.2 Definición Operativa de Variables

2.3.2.1 Fórmula para Determinar la Tasa de Error de Bit

El cálculo para el BER está dado por la ecuación 21:

$$BER = \frac{N^{\circ} \text{ bits errados}}{N^{\circ} \text{ bits transmitidos}} \quad (21)$$

Si el valor de BER es de 10^{-6} significa que, por un paquete de 1 millón de bits enviados o transmitidos, solo 1 no se detectó correctamente, por lo tanto, se considera que el enlace es bueno.

Utilizando el software MATLAB, se procedió a la recepción y almacenamiento de los datos con el objetivo de calcular el número de bits erróneos. Para ello, se realizó una comparación entre el mensaje transmitido y el mensaje recibido, ambos concatenados en bytes. Por ejemplo, si el mensaje transmitido es `10110101` y el mensaje recibido es `00111100`, se determinó el número de bits erróneos mediante la aplicación de la fórmula del BER (Bit Error Rate), obteniéndose un resultado de 3 bits errados.

2.3.2.2 Cinta Métrica

El instrumento con el que se medirá el alcance de la transmisión es una cinta métrica, la cual sirve para medir distancias de un punto a otro, consiste en una regla o cinta graduada tiene marcados las divisiones en decímetros, centímetros y milímetros. Está formada por una lámina delgada de acero al cromo enrollada en un caparazón de plástico. Para usar correctamente este elemento, a medida que se aleja el receptor del emisor, se van tomando datos de la distancia y se observa si en ese punto el BER es bueno o malo y dependiendo de eso se puede alejar más el receptor o toca acercarlo; este procedimiento se realiza las veces necesarias hasta establecer el alcance adecuado para el sistema de comunicación.

2.3.2.3 Muestreo

La tasa de transferencia adecuada para el sistema de comunicación se va a medir tomando varias muestras hasta determinar con los resultados obtenidos cuál es mejor. Por ejemplo, se realiza un cuadro a diferentes tasas de transferencias, las cuales se van asignando manualmente (100 bps, 200 bps, 300 bps, etc.) con respecto a la cantidad de BER que se genera, si se observa

que la cantidad de BER es muy alta se debe disminuir la velocidad con la que se transmiten los datos.

La unidad en que se mide son los bits por segundos (bps).

2.4 Hipótesis

Dado que los transductores a utilizar para el sistema de comunicación son de bajo costo, el alcance deseado es bajo, debido a que el transductor funciona en un rango, el cual es de 0,25m a 6m (Jahankit, 2021); Esto se da por los materiales de construcción y componentes internos del transductor. Aparte de eso, el medio donde se implementa es constantemente susceptible al ruido e interferencias, lo cual perjudica la comunicación. A continuación, se presentan las hipótesis de investigación con base a los antecedentes (Indriyanto & Edward, 2018), los cuales indican unos valores de alcance relativamente bajos, y una tasa de error de bit considerable, por lo cual, se observa que cambios realiza el sistema aplicando la codificación por bloques Reed-Solomon.

2.4.1 Hipótesis de la Investigación

La tasa de error de bit, el alcance entre transductores y tasa de transferencia del sistema de comunicación subacuático con el transductor ultrasónico con frecuencia de 40 kHz JSN-SR04T en agua dulce van a estar dentro de los siguientes rangos:

Tabla 1 Hipótesis de la investigación.

Tasa de error de bits	Alcance (m)	Tasa de transferencia (bps)
$6 * 10^{-1}$	1	900
$6 * 10^{-3}$	1.50	1200

2.4.2 Hipótesis Nula

La tasa de error de bit, el alcance entre transductores y tasa de transferencia del sistema de comunicación subacuático con el transductor ultrasónico con frecuencia de 40 kHz JSN-SR04T en agua dulce no van a estar dentro de los siguientes rangos:

Tabla 2 Hipótesis nula de la investigación.

Tasa de error de bits	Alcance (m)	Tasa de transferencia (bps)
$6 * 10^{-1}$	1	900
$6 * 10^{-3}$	1.50	1200

2.4.3 Hipótesis Alternativa

La tasa de error de bit, el alcance entre transductores y tasa de transferencia del sistema de comunicación subacuático con el transductor ultrasónico con frecuencia de 40kHz JSN-SR04T en agua dulce van a estar dentro de los siguientes rangos:

Tabla 3 Hipótesis alternativa de la investigación

Tasa de error de bits	Alcance (m)	Tasa de transferencia (bps)
$10 * 10^{-1}$	1.30	500
$10 * 10^{-3}$	1.80	900

3 Metodología

3.1 Enfoque

El enfoque de esta investigación es cuantitativo, dado que las variables asociadas al objeto de investigación se miden numéricamente, entonces los resultados obtenidos permitieron determinar la caracterización del sistema de comunicación subacuático con el transductor ultrasónico JSN-SR04T.

3.2 Paradigma

Esta investigación se encuentra dentro del paradigma neopositivista debido a que se busca aplicar conocimiento científico y procura que este exista, sea útil, preciso y relativo.

3.3 Método

Ya que esta investigación es cuantitativa, el método que se utilizó es científico, o llamado método empírico-analítico (Quijano, 2009), se comprobó las hipótesis planteadas con experimentos controlados, que permitieron medir las variables asociadas con dichas hipótesis.

3.4 Tipo de Diseño

La investigación es de tipo descriptiva, debido a que se caracterizó el fenómeno de propagación de señales ultrasónicas bajo el agua con el transductor JSN-SR04T.

3.5 Diseño de Investigación

El diseño de esta investigación (**RG X O**), se define como experimento puro, ya que se tienen dos experimentos donde los dos se componen de un sistema de comunicación subacuática ultrasónica con el transductor JSN-SR04T y se le implementó la modulación ASK, uno de ellos tuvo la codificación por bloques Reed-Solomon y el otro no, en los dos experimentos se evaluarán las mismas variables. Por lo tanto, se tienen los siguientes grupos de experimentos:

$$RG1 \quad X1 \quad O1$$

$$RG1 \quad - \quad O2$$

Donde:

RG1: Sistema de comunicación subacuática en agua dulce con el transductor ultrasónico JSN-SR04T con modulación ASK.

X1: Codificación por bloques Reed-Solomon.

-: Experimento sin codificación

O1=O2: Medida de BER, el alcance y tasa de transferencia.

3.6 Universo

El universo corresponde al enlace punto-a-punto subacuático con el transductor JSN-SR04T que se implementa con modulación ASK y codificación en bloques.

3.7 Muestra

La muestra corresponde al mismo enlace punto-a-punto, pero se implementó con una modulación ASK y una codificación en bloques por el método Reed-Solomon, se llevó a prueba en un estanque de agua dulce; las pruebas se llevaron a cabo en horas de la mañana donde el ruido exterior era mínimo, para así lograr una mejor obtención de datos.

3.8 Técnicas de Recolección de Información

La información necesaria, se obtuvo mediante el método de observación directa, ya que se requirió equipos de medición y software para la obtención de los datos, en este caso, la tasa de error de bit (BER), la tasa de transferencia, y el alcance de la comunicación.

Las mediciones de las variables planteadas se midieron:

Para el alcance: Se transmitirá 10^7 bits y se tomará como alcance máximo la distancia a la cual se obtenga una tasa de error de bit igual a 6^{-2} .

Para la tasa de error de bit: Se transmitirá 10^7 bits variando la distancia y se calculará de acuerdo con la ecuación 21 descrita en la sección 2.3.2.1.

Para la tasa de transferencia: Se transmitirá 10^7 bits al máximo alcance y se variará la tasa de bits hasta alcanzar una tasa de error de bit igual a 6^{-2} .

Los datos de las variables anteriores se tuvieron en cuenta desde los antecedentes encontrados que implementan el transductor JSN-SR04T, dado que estos resultados son un material de apoyo para tener en cuenta en esta investigación.

3.8.1 Validez de la Técnica

La técnica es válida, ya que se pueden hacer varias pruebas en caso de error humano, por lo que se pueden promediar los resultados y, según los antecedentes, la información se recolectó con esta técnica.

3.8.1.1 Instrumentos de Recolección de la Información

Los instrumentos utilizados para la recolección de los datos registrados incluyeron un computador portátil conectado a la tarjeta NI myDAQ. A través de esta configuración, los datos fueron visualizados, recolectados y almacenados en el software MATLAB para su procesamiento directo.

Se llevaron a cabo dos experimentos. En el primero, se recopilaban datos codificados a tres distancias diferentes y utilizando tres tasas de transferencia distintas. Es importante señalar que el procedimiento se repetía varias veces hasta asegurar que la señal de salida del receptor estuviera libre de ruidos; solo en ese caso, los datos eran almacenados. Posteriormente, se extrajo la información relevante y se calculó la tasa de errores de bit (BER), tanto sin la corrección de errores Reed-Solomon como con la decodificación empleando Reed-Solomon. Para distinguir entre ambos experimentos, la tasa de errores de bit sin decodificación se resaltó en color azul.

En la siguiente tabla se observa la manera como se recolectarán los datos:

Tabla 4 Ejemplo de la recolección de datos.

	0,3 m	1m	3,12m
N° Muestras Recolectadas			
N° Muestras Promedio			
N° Muestras filtradas			
Total Bits Transmitidos			
Numero de errores			
BER sin decodificación			
BER aplicando decodificación			

4 Resultados de la Investigación

4.1 Diseños de los Circuitos Transmisor y Receptor a una Frecuencia de 40kHz con Modulación ASK

Durante el proyecto, se evaluaron diversos diseños del hardware para los circuitos transmisor y receptor, y se realizó el diseño del software según las funciones y características que deben tener para la correcta transmisión y recepción de datos. A continuación, se presentan los resultados de estas actividades:

4.1.1 Diseño del Circuito Transmisor

4.1.1.1 Diseño del Hardware

Inicialmente, se propuso integrar un amplificador de voltaje en la entrada del transductor para mejorar el alcance y la calidad de la señal transmitida. Sin embargo, esta solución no solo no cumplió con las expectativas, sino que también dañó el transductor, complicando el sistema. A pesar de probar varias configuraciones de amplificación, el transductor terminó quemándose. Finalmente, se concluyó que la mejor opción era descartar la etapa de amplificación de voltaje en la entrada del transmisor. Con el transductor conectado al pin de 5v del Arduino, ya no era posible realizar mejoras adicionales, conforme a las especificaciones técnicas indicadas en la hoja de datos como se observa en la Figura 2, se tiene una limitación en la parte del transmisor.

Specifications:

	Pulse width output / Serial Output
Operating Voltage	DC 3.0-5.5V
Working current	Less than 8mA
Probe frequency	40KHz
Farthest range	600cm
Recent range	20cm
Distance accuracy	+ - 1cm
Resolution	1mm
Measuring angle	75 degree
Enter the trigger signal	1, 10uS above the TTL pulse 2, the serial port to send instructions 0X55
Output the echo signal	Output pulse width level signal, or TTL
Wiring	3-5.5V (power positive) Trig (RX) RX Echo (output) TX GND (power supply negative)
Product Size	L42 * W29 * H12 mm
Operating temperature	-20 ° C to + 70 ° C
Product color	PCB board is blue

Figura 2 Especificaciones del transductor JSN-SR04T (Jahankit, 2021).

Se comprobó que el sistema de transmisión funcionaba de manera adecuada únicamente con el transductor conectado al Arduino, ya que ofrece una señal más clara y confiable, evitando riesgos y posibles daños al transductor, por lo tanto, el diseño del transmisor es el siguiente como se observa en la Figura 3:



Figura 3 Diagrama de bloques circuito transmisor final.

Se optó por utilizar un Arduino Mega debido a sus características técnicas avanzadas que ofrecen ventajas en comparación con el Arduino Uno con el que inicialmente se planteó el desarrollo del sistema, especialmente en la velocidad de comunicación en el puerto serie. Este está diseñado para manejar tasas de baudios más altas con mayor estabilidad y fiabilidad, ya que puede operar de manera eficiente a 115,200 baudios, la cual, en este caso al ser una transmisión de datos continua, resulta útil para obtener una comunicación rápida y precisa (Manual, 1972).

4.1.1.2 Diseño del Software

Para el diseño del software del transmisor se realizó el código en Arduino IDE, donde se tuvieron en cuenta factores como la frecuencia con la que se desea enviar los datos, el tiempo de retardo límite del Arduino y cálculos relacionados a este, para la generación de cada pulso, un contador el cual va a facilitar al usuario ver cuántas veces se envió la información y decidir si se desea retransmitir el mensaje, entre otros factores presentes en el diagrama.

Primero se presentan los cálculos que se tuvieron en cuenta, teniendo en cuenta la Figura 4 para observar que datos son necesarios calcular para tener la señal a dicha frecuencia:

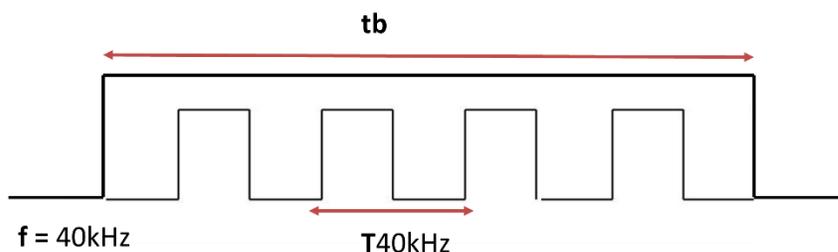


Figura 4 Diagrama pulso de 40KHz.

El periodo de un ciclo a una frecuencia de 40kHz.

$$T_{40} = \frac{1}{40kHz} = 0,025mseg = 25\mu seg \quad (22)$$

El periodo de 25μ segundos divide el pulso en 2 partes iguales, los cuales corresponderían a 12,5μs del 1 lógico y 12,5μs del 0 lógico, esto se observa en la Figura 5:

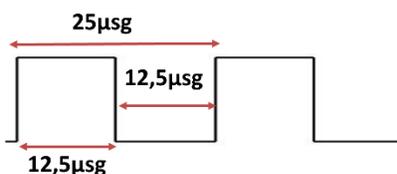


Figura 5 Diagrama periodo de cada bit.

También es necesario calcular el tiempo que dura el bit, este cálculo depende de la tasa de transferencia que se esté trabajando, primero se realiza para 100bps:

$$t_b = \frac{1}{100bps} = 10mseg \quad (23)$$

Teniendo el tiempo de bit y el periodo de cada ciclo, es necesario calcular cuantas oscilaciones de 25μ segundos hay en 10m segundos:

$$\text{oscilaciones} = \frac{10\text{msg}}{25\text{msg}} = 400 \quad (24)$$

Por lo tanto, teniendo en cuenta los cálculos anteriores se obtiene la siguiente tabla:

Tabla 5 Cálculos del número de oscilaciones.

BPS	Duración del bit (msg)	#Oscilaciones Teórico
100	10	400
600	1,66	66,6
1000	1	40

Se observa un cálculo del número de oscilaciones teórico, cabe aclarar que esos resultados son la base para obtener la señal de 40kHz, pero por factores externos siempre es necesario realizar ajustes dado que no se encontró ningún documento o forma de observar el tiempo de retraso que tiene el Arduino Mega, por lo tanto, algunos resultados fueron modificados hasta obtener el valor deseado.

A continuación, se observa en las Figuras 6 y 7 los diagramas de flujo del código de transmisión:

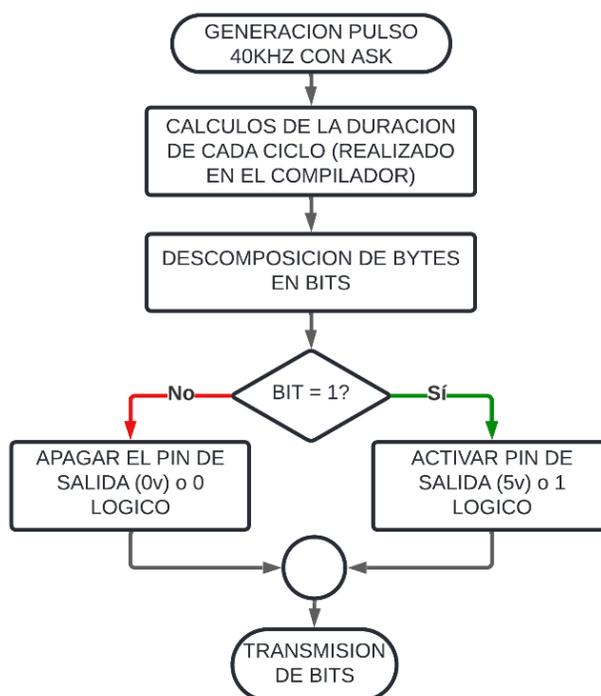


Figura 6 Diagrama de flujo Código generación de pulsos a 40khz.

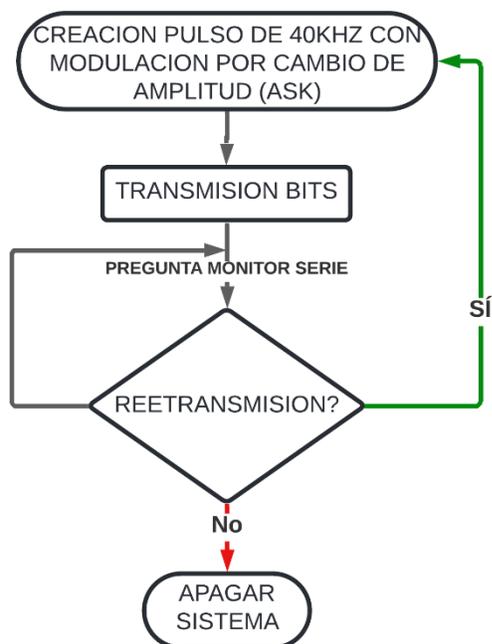


Figura 7 Diagrama de flujo transmisión de bits a 40kHz.

Para la generación del pulso a 40kHz, como se expone en la Figura 6, se tuvo en cuenta que al ser modulación ASK, es realizada por cambios de amplitud en la señal, en este caso, se hicieron cambios de voltaje de 0v a 5v y viceversa. Para obtener una transmisión correcta a 40kHz, se realizaron los cálculos anteriores en los cuales se tiene en cuenta la tasa de bit, el límite de tiempo de retraso máximo del Arduino, y la frecuencia. Esto con la finalidad de que se elija automáticamente el tiempo de retraso entre cada ciclo dependiendo de la tasa de transferencia seleccionada. Por último, con esta información, la descomposición de bytes en bits se realizó pasando el valor del mensaje a binarios, en este caso 64 (01000000), 65 (01000001), 66 (01000010). Si el valor de bit es de 1, el pin de salida se activará, espera delay previamente calculado, y prosigue la lectura, y si es 0, el pin se apaga y espera el delay, repitiendo el ciclo hasta que termine de enviar las muestras y le pregunte al usuario si se desea retransmitir tal como se expone en la Figura 7.

4.1.2 Diseño del Circuito Receptor

4.1.2.1 Diseño del Hardware

Para el diseño del receptor, a la salida del transductor se colocó un amplificador operacional para incrementar el voltaje de la señal recibida. Este paso es crucial para asegurar que la señal amplificada pueda ser interpretada correctamente durante la decodificación. A lo largo del desarrollo del diseño, se realizaron múltiples pruebas y se añadieron etapas adicionales, como la implementación de un filtro pasa bajos de primer orden antes del amplificador para limpiar la señal de 40kHz a la entrada del amplificador y así el ruido que sobrepase esta frecuencia sea descartado o reducido.

Se usó el osciloscopio para visualizar la señal amplificada y así evaluar sus características y verificar que cumple con los criterios de calidad requeridos. Una vez validada la señal, se integró una tarjeta de adquisición de datos (NI MyDAQ) en el sistema, con la finalidad de capturar los voltajes asociados a los niveles lógicos de 0 (0v o similares) y 1 (5v o similares) a través de un puerto analógico. Los datos adquiridos por la tarjeta se utilizaron en la etapa de decodificación, donde se interpretan los voltajes para reconstruir el mensaje original transmitido.

Se presenta en la Figura 8 el esquema inicial propuesto para el circuito receptor:



Figura 8 Diagrama de bloques diseño inicial de circuito receptor.

En el diseño del receptor se probaron varios circuitos, los cuales se describe a continuación en la Figura 9:

- **Caso 1: Circuito amplificador con el módulo AD620.**

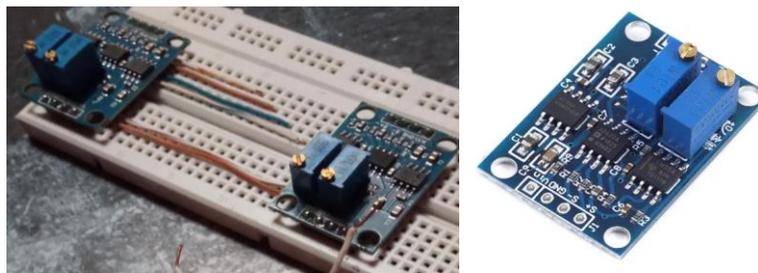


Figura 9 Circuito amplificador módulo AD620.

En este primer caso, utilizando un par de amplificadores de precisión como se observa en la Figura 9, la señal obtenida presenta distorsión y a medida que se regula la resistencia variable, el sistema llega a un estado de saturación.

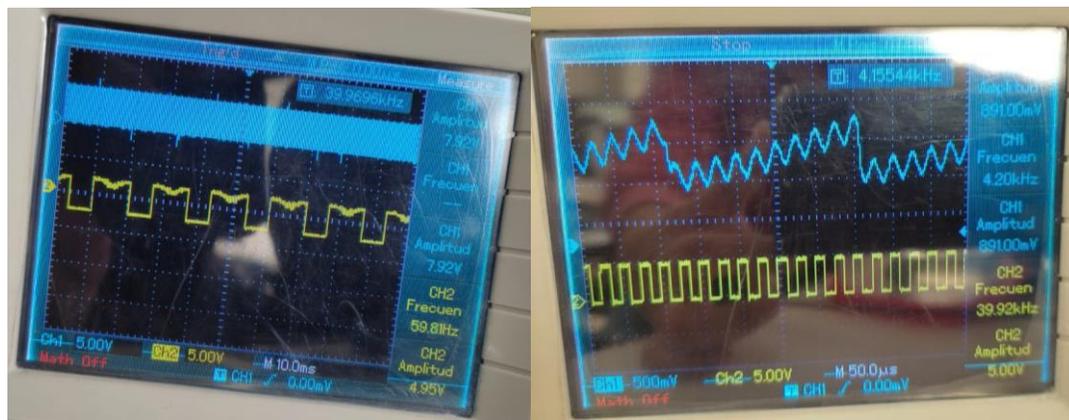


Figura 10 Señal obtenida del osciloscopio con los módulos.

En las gráficas del osciloscopio de la Figura 10, se presentan dos tipos de señales correspondientes a diferentes tiempos de muestreo. En la primera gráfica, se muestra una señal amplificada que ha alcanzado el estado de saturación, con un voltaje de 4,95v. En contraste, la segunda gráfica presenta una señal amplificada sin saturación, con un voltaje de 5v, y muestra una forma de onda rectangular que intenta replicar la onda original transmitida.

En ambas gráficas, la señal amarilla representa la señal recibida, mientras que la señal azul corresponde a la señal transmitida.

Este primer caso fue descartado debido a que los módulos de amplificación no lograron proporcionar la ganancia necesaria. Como consecuencia, la señal no pudo ser amplificada de manera efectiva sin alcanzar la saturación, lo que afectó negativamente la calidad y la integridad de la transmisión. Para evitar problemas de distorsión y pérdida de información, se decidió explorar alternativas más adecuadas.

- **Caso 2: Transductores solos.**



Figura 11 Prueba con los transductores solos.

En el segundo caso, como se observa en la Figura 11 el circuito está compuesto exclusivamente por el transductor. Este diseño ha proporcionado los mejores resultados comparando con la señal transmitida. Esto se debe a que el transmisor emite un tren de pulsos que el receptor detecta de manera simultánea y con una alta congruencia, incluso a distancias mayores en comparación con las configuraciones previas. A continuación, en la Figura 12 se presentan los resultados obtenidos:

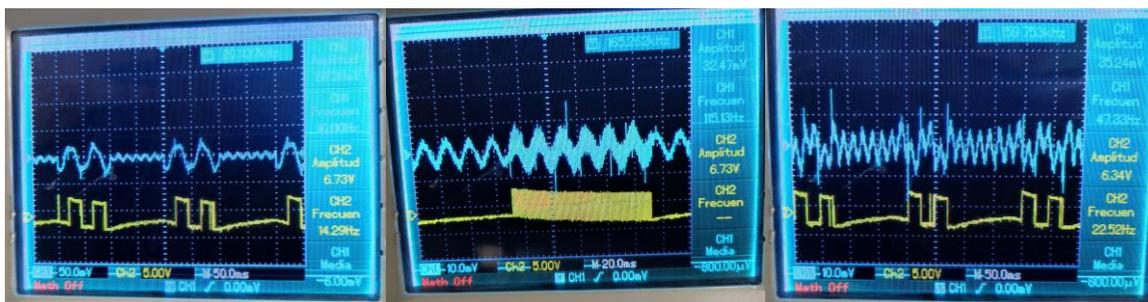


Figura 12 Señal de recepción implementando los traductores solos.

El funcionamiento de los transductores es correcto en el aire, tal como se observa en la Figura 12; pero el proyecto plantea sumergir los transductores en agua, y para obtener una distancia aceptable entre transductores con menos errores de bits, el diseño e integración de una etapa de amplificación a la salida del transductor es vital, por lo que se descarta dejar el transductor de recepción aislado, ya que al realizar pruebas dentro del agua el comportamiento cambia y sin una etapa de amplificación la señal se pierde en el medio.

Comparando los resultados de los casos anteriores, se observó la necesidad de implementar un filtro tras el transductor para purificar la señal recibida, después se añadió un

amplificador con ganancia variable para modificarla cuando sea necesario. De este modo, se presenta a continuación en la Figura 13 el último caso y el diseño final del circuito de recepción:

- **Caso 3: Tentativa “Prototipo final”**

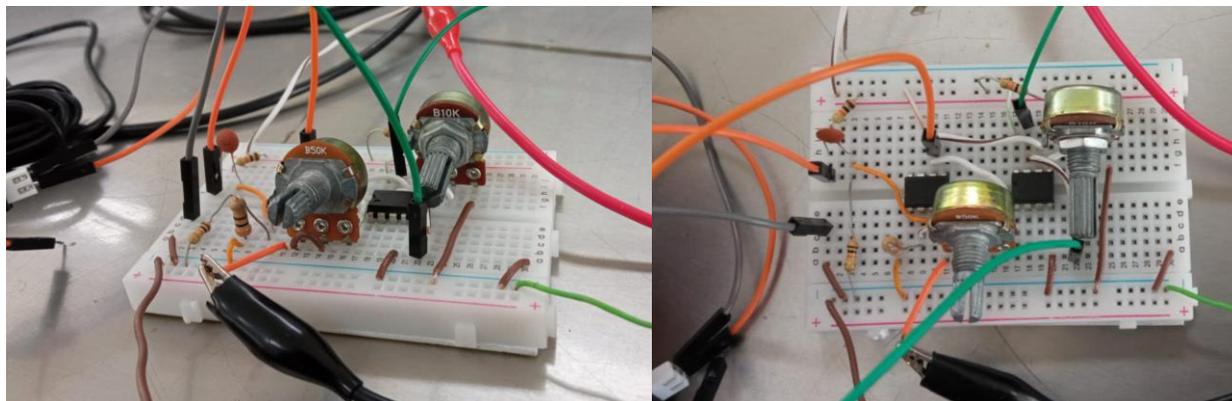


Figura 13 Tentativa de prototipo final con amplificadores LM741 y LM358.

En este último caso, el circuito consta de tres etapas diseñadas para procesar la señal que ingresa al transductor receptor. Primero, se emplea un divisor de voltaje acompañado de un condensador, que actúa como filtro preliminar para atenuar el ruido en la señal recibida.

La frecuencia de corte del filtro se calculó con la siguiente fórmula:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (25)$$

Donde:

R= 10kΩ.

C= 100nF.

Por lo tanto, la frecuencia de corte es de 15kHz, ya que el capacitor está en serie con la fuente que es la entrada del transductor, este se abre para bajas frecuencias, por debajo de 15kHz dejándolo sin alimentación y para frecuencias mayores como la de 40kHz el capacitor conduce y alimenta el transductor permitiendo el funcionamiento del circuito.

En seguida, la señal se pasa a una etapa de amplificación, realizada mediante un amplificador operacional no inversor, utilizando el circuito integrado LM741. Este amplificador ofrece una ganancia variable, que se ajusta mediante un potenciómetro según el alcance requerido.

La etapa final consiste en un comparador realizado con el circuito integrado LM358; que establece un voltaje de umbral que depende de la configuración de la etapa de amplificación previa.

Por lo tanto, el comparador también es ajustable mediante un potenciómetro. Por lo que, en consecuencia, si se modifica la etapa de amplificación, es necesario recalibrar el comparador, a continuación, en la Figura 14, se observa el diagrama esquemático de lo mencionado anteriormente:

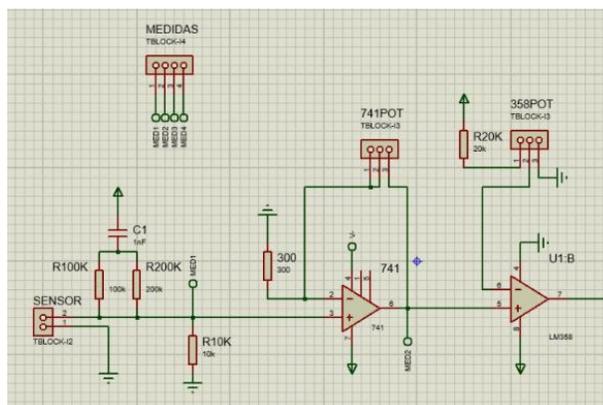


Figura 14 Diagrama esquemático circuito de recepción.

Con la implementación del esquema en protoboard se realizaron pruebas obteniendo las siguientes señales de cada etapa:

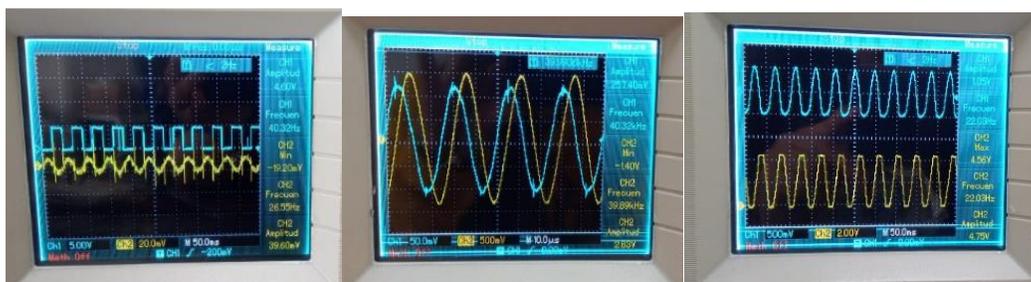


Figura 15 Señales de salida de cada etapa del prototipo receptor.

Como se observa en la Figura 15, la señal de entrada al transductor posee una amplitud pequeña (257mV aproximadamente). Se establece que el objetivo del prototipo, compuesto por tres etapas, es amplificar y filtrar la señal de entrada, y así obtener, como se ve en las anteriores figuras, una señal final de 5 V, que corresponde y presenta gran similitud con la transmitida. Las pruebas se realizan en condiciones aéreas, fuera del agua; pero, durante la implementación en un entorno acuático, las condiciones operativas de cada etapa comenzaron a experimentar variaciones, por ejemplo al momento de realizar pruebas en medio aéreo se ajustaron las ganancias del amplificador y del comparador, pero al momento de ingresar los transductores al

agua, estos valores de ganancias eran ineficientes, por lo tanto, se debió configurar nuevamente, también se experimentó cambios cuando la distancia se hacía más grande.

Con la señal observada en la Figura 15, se procede a la decodificación. Previamente, se realizan pruebas para determinar la cantidad de bits por segundo que el circuito receptor puede detectar, obteniendo los siguientes resultados:

Primero se realizaron las pruebas con una tasa de transferencia de 100bps, durante las cuales se observó que el receptor detectaba la señal sin problema, sin embargo, presentaba un nivel notable de ruido. Posteriormente, se realizaron más pruebas aumentando la tasa de transferencia en pasos de 500bps. En estas pruebas, al igual que en la anterior tasa de transferencia, la señal que se obtuvo en el receptor seguía siendo similar a la transmitida, pero se incrementaba aún más ruido en la señal.

Se llevaron a cabo pruebas hasta alcanzar una tasa de transferencia de 3000bps sin detectar problemas en el circuito de recepción. La señal recibida se mantenía comparable a la transmitida y no se observó recalentamiento ni cortocircuitos en el hardware. No obstante, el problema identificado fue el ruido añadido a la señal recibida, la cual causó inconvenientes e indujo errores adicionales a los posiblemente generados por el medio de transmisión. Durante la recolección de datos, se observó que a medida que la tasa de transferencia era mayor a 1000bps, el ruido se incrementaba considerablemente afectando al mensaje que se deseaba enviar, también se observó que, a mayor tasa de transmisión en la recepción, la información era incorrecta, por lo tanto, el procesamiento de los datos resulta más complejo y la tasa de errores aumenta.

A continuación, se presenta el diseño del prototipo impreso en PCB.

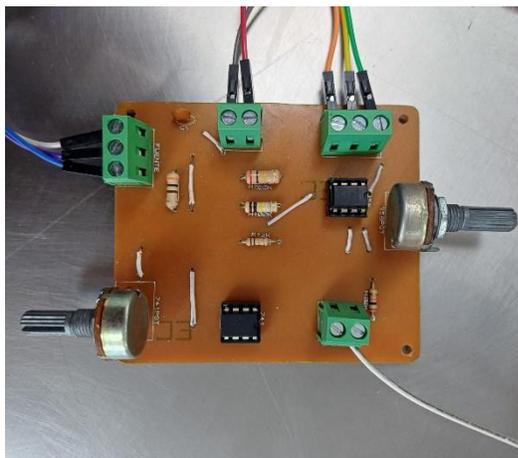


Figura 16 Implementación en PCB del circuito de prueba

CIRCUITO FINAL

Se consideró necesario ajustar y/o modificar los amplificadores del circuito en respuesta al incremento de la tasa de transferencia, con el objetivo de obtener una señal más clara. En estas pruebas, se destaca que, dentro del agua, se estaba transmitiendo una señal cuadrada continua alternada (0s y 1s), a una distancia de 30cm.

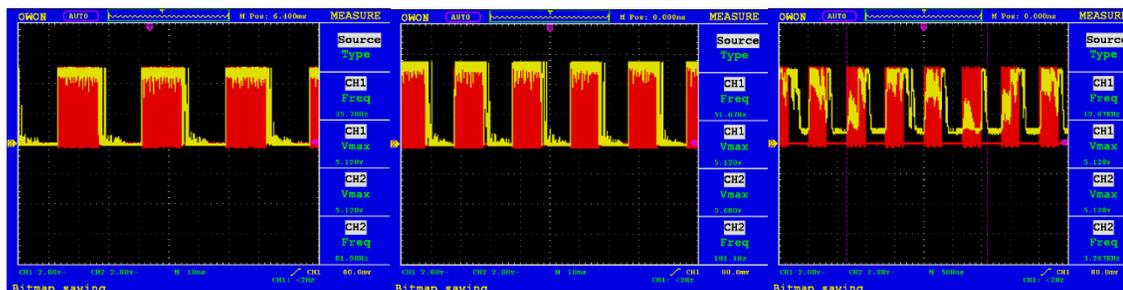


Figura 17 Señales de transmisión y recepción a diferentes tasas de transferencia.

Como se observa en la Figura 17, se tienen medidas a 100bps, 500bps y 3000bps respectivamente, y a medida que se aumentaba la tasa de transferencia, se observaba mayor ruido. Al verse afectada la recolección de datos en etapas posteriores, un comparador fue añadido a la salida, con el objetivo de disminuir o mitigar el ruido en la señal.

En conclusión, la inclusión del comparador en la salida, mejoró significativamente la señal obtenida, tal como se puede ver en la Figura 18:

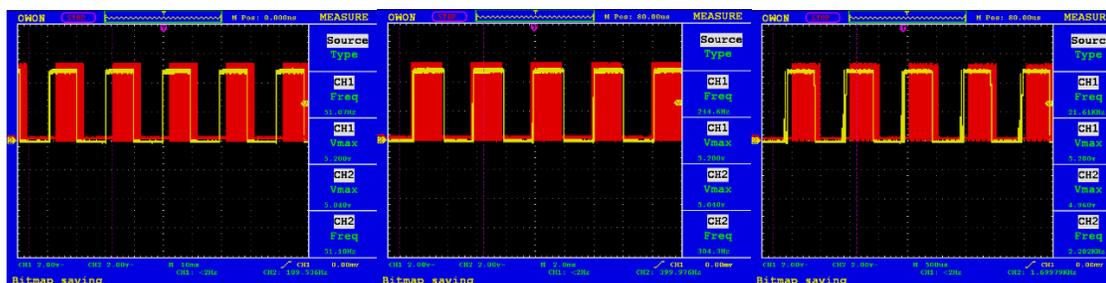


Figura 18 Señales de transmisión y recepción con un comparador adicional.

Una vez verificado que el circuito del prototipo receptor es capaz de detectar tasas superiores a 1800 bps, se procede con el diseño en Proteus. Este proceso incluyó el diseño de las pistas y el modelado en 3D para la impresión del circuito. La implementación en PCB resultó más viable y confiable en comparación con el circuito en protoboard, ya que minimizó las corrientes y resistencias parásitas, entre otros problemas. A continuación, en la Figura 19, 20 y

21 se presenta el diseño esquemático, diseño 3D y su implementación física correspondientemente:

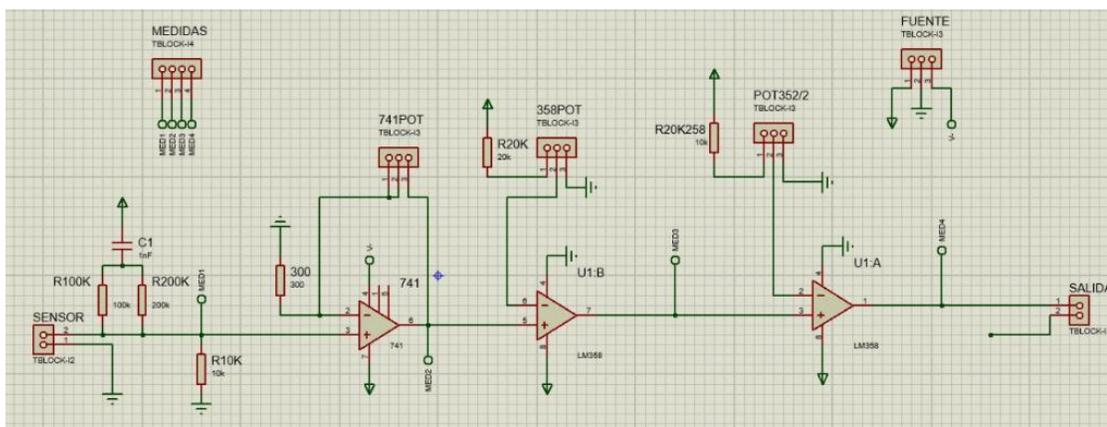


Figura 19 Diseño esquemático del circuito de recepción.

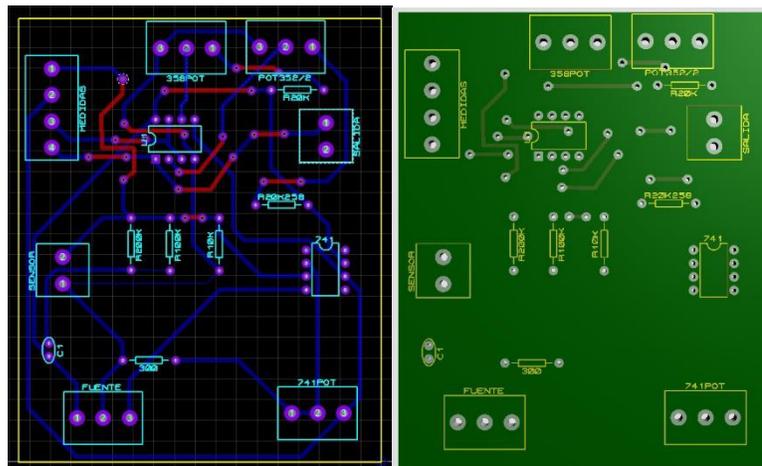


Figura 20 Diseño de pistas y circuito 3D.

El anterior circuito está constituido de igual forma que el prototipo anterior, con la diferencia de que este, presenta un comparador adicional. El circuito final está dividido en 4 etapas.

1. Etapa de Filtrado:

En esta etapa, la señal proveniente del transductor, pasa por un filtro pasa bajos, el cual, mediante los cálculos mencionados en la [Sección 4.1.2.1](#), se lo pudo adaptar al circuito.

El objetivo de este filtro es purificar la señal y permitir el paso de frecuencias superiores a 15KHz, de este modo, la manipulación de la señal en las siguientes etapas, resultaría menos compleja.

2. *Etapa de Alimentación:*

Aquí se realizan las conexiones para la alimentación de los componentes de la placa, en este caso, al estar presente un amplificador LM741, se utilizó una fuente bipolar simétrica, para la alimentación con voltaje negativo (-6v), y el resto de componentes con voltaje positivo (6v) y tierra.

3. *Etapa de Amplificación:*

La etapa de amplificación está constituida por un LM741, en una configuración no inversor, debido a que, de otro modo, la señal se sobresaturaba en voltajes tanto positivos como negativos, también cabe resaltar que la variación de ganancia de este amplificador, está regulada por un potenciómetro de 50K Ω , dando como resultado una ganancia de 10.

4. *Etapa de Comparación:*

Para la etapa de comparación, se utilizó el IC LM358N, el propósito para el cual se lo utilizó, fue para establecer un umbral de voltaje, obteniendo de este modo una señal cuadrada más pura, esto con el objetivo de minimizar el ruido presente en la etapa de amplificación, ya que, en la anterior etapa, así como amplifica la señal recibida, también amplifica el ruido ambiental.

- Implementación en placa

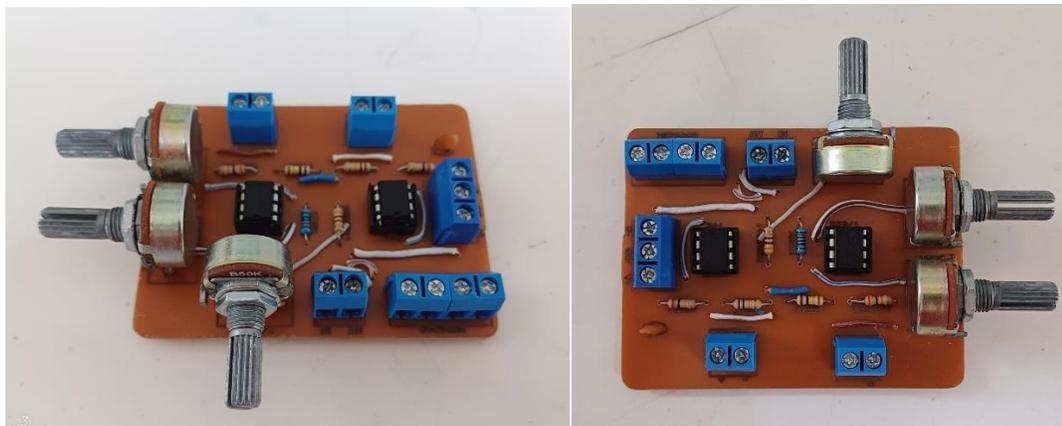


Figura 21 Implementación en PCB del circuito receptor final



Figura 22 Diagrama de bloques circuito de recepción final.

En la Figura 22 se establece el diagrama de bloques del circuito final de recepción, cada etapa que compone desde el transductor receptor hasta el computador que almacena los datos.

4.1.2.2 Diseño del Software para la Recolección y Almacenamiento de Datos

Para el diseño y desarrollo del código para la recolección de datos en el receptor, se llevó a cabo la implementación del dispositivo de recolección de datos NI myDAQ, por lo tanto, el código se desarrolló usando Matlab. A continuación, en la Figura 23 se observa el diagrama de flujo general y en las Figuras 24, 25 y 26 los diagramas de flujo de cada etapa de la recolección y almacenamiento de los datos:



Figura 23 Diagrama de Bloques etapa de adquisición de datos en la recepción.

Para el filtrado de datos se realizó una inspección de los datos adquiridos por la NI-MyDAQ, de los cuales se obtuvo una tabla con 2 columnas presentes, la primera del tiempo transcurrido en la toma de datos y la segunda de los datos de voltaje que llegan al pin analógico. En esta etapa de filtrado, se suprimió la primera columna de tiempo y con

la segunda columna, se realizó el cálculo de cuántas muestras de voltaje se toma por bit. A continuación, en la Figura 24 y 25 en forma de diagrama de flujo se explican los siguientes pasos de la adquisición de datos:

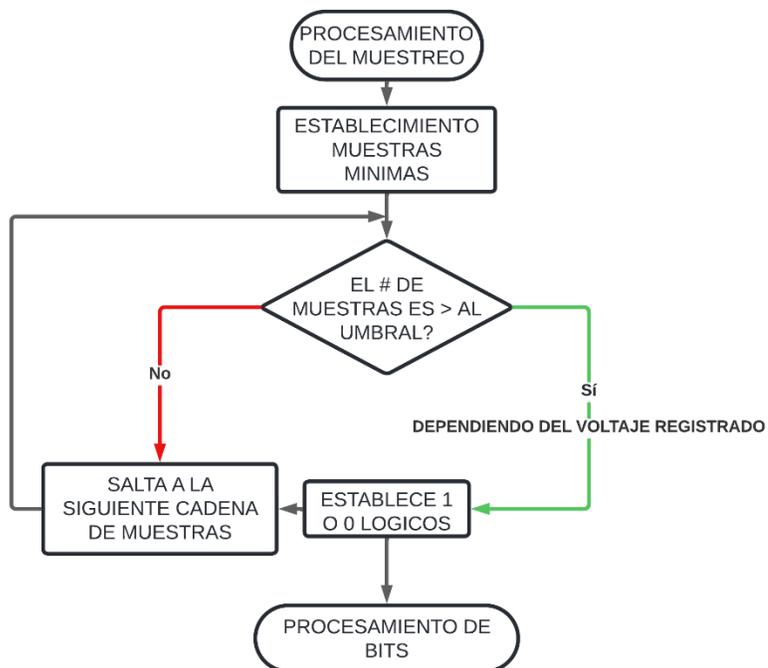


Figura 24 Diagrama de flujo etapa de procesamiento de muestreo.

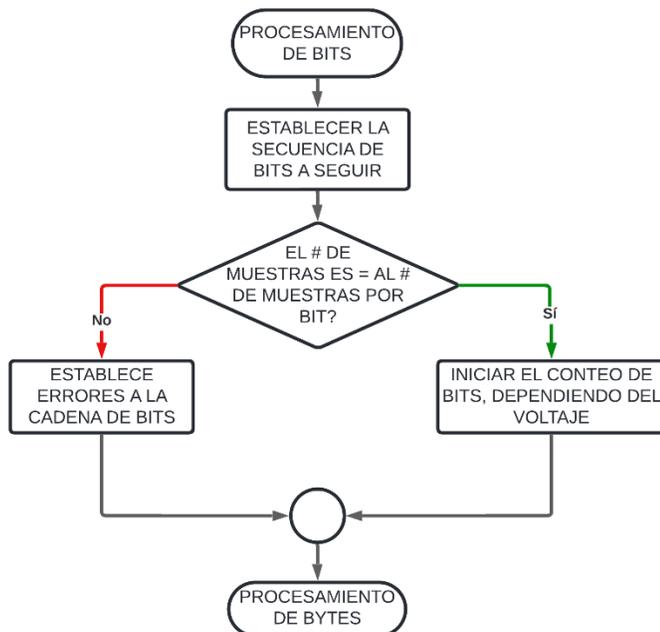


Figura 25 Diagrama de flujo etapa de procesamiento de bits.

En la Figura 24 se observa el diagrama de flujo del procesamiento de bits, donde en primera instancia, se estableció una secuencia con la que se van a comparar los datos adquiridos y previamente filtrados, dicha secuencia estará compuesta por los valores de cuantos bits seguidos se encuentran presentes. Esta secuencia se la obtuvo al realizar el conteo de los bits entre 0s y 1s, resultado de cambiar el mensaje transmitido (N° decimales) a la secuencia binaria correspondiente para cada número. En la [Sección 4.3](#) se encuentra información detallada de dicha secuencia.

Siguiente a ello, se estableció un umbral de muestras por bit aproximado, donde el número de muestras filtrado puede ser igual, si este es el caso, el conteo de bits aumenta y se van añadiendo adicionalmente al conteo de cuantos bits seguidos hay. Esto con el fin de obtener una cadena de bits la cual, se convierte en una nueva secuencia de 0s y 1s, para la cual su utilidad se la describe en la Figura 25

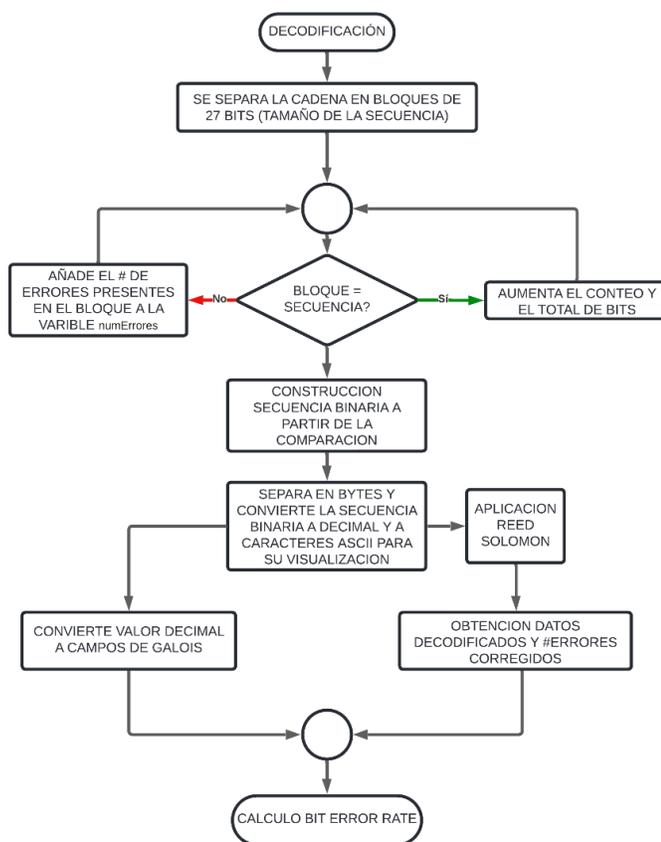


Figura 26 Diagrama de flujo etapa de Decodificación

En la Figura 26 se observa la continuación del procesamiento de bytes, como se mencionó anteriormente, una vez obtenidos los bits en cadena, se separa dicha cadena en bloques de 26 bits e inicialmente, se los comparó con la secuencia previamente establecida, la cual más adelante se menciona el por qué la cadena de bits tiene que seguirla. Siguiendo a ello, se separa los bloques de bits en cadenas de 8, para así formar bytes los cuales se utilizaron para realizar los cálculos en campos de Galois, los cuales su finalidad es la compatibilidad de datos para la aplicación de la decodificación REED-SOLOMON, y, por último, realizar cálculos de BER con codificación y sin codificación.

4.2 Esquema de Codificación por Bloques Reed-Solomon

La codificación por bloques consiste en que el mensaje original es enviado sin realizar modificaciones, simplemente se le agregan bits adicionales al final creando un diccionario que diferencie cada palabra de otra; esto se realiza para que cuando el mensaje llegue al receptor, este sea capaz de identificar cual es el mensaje que se ha enviado y en dado caso que no coincida, detecte el error y lo corrija en caso de que sea posible (Fabricio R. Marcillo, 2021).

El transmisor y receptor deben manejar la misma codificación para que así puedan entenderse; también se debe tener en cuenta los valores del número de bits por símbolo, de los símbolos disponibles, de estos se puede usar una parte para transportar los datos y otra como información redundante que permite detectar y corregir errores, teniendo así la siguiente notación:

$$RS(n, k)$$

Donde:

n: es el número total de símbolos.

k: es el número de símbolos que transportan información.

Para el proyecto se implementó el esquema de 7,3 de Reed-Solomon, un tipo específico de codificación que utiliza bloques de 7 símbolos, de los que 3 son de datos originales y 4 son de paridad. En este esquema, cada bloque de datos original de 3 símbolos se amplía a un bloque de 7, donde los 4 símbolos adicionales se usan para corregir errores. Se seleccionó este esquema porque al tener 4 símbolos de paridad adicionales, es posible corregir hasta 2 errores. Esto se

logra mediante operaciones algebraicas sobre los símbolos de datos y paridad (Fabricio R. Marcillo, 2021).

El esquema funciona de la siguiente manera:

- **Selección de símbolos de datos:** Se seleccionan 3 símbolos de datos originales que se desean codificar.
- **Generación de símbolos de paridad:** Se utilizan algoritmos matemáticos para calcular los 4 símbolos de paridad adicionales basados en los símbolos de datos originales. Estos símbolos de paridad se calculan de tal manera que, al recibir el bloque codificado, se pueda determinar y corregir cualquier error en los símbolos de datos.
- **Transmisión o almacenamiento:** El bloque de 7 símbolos se transmite o almacena en el medio de comunicación o dispositivo de almacenamiento correspondiente.
- **Decodificación:** Cuando se recibe el bloque de 7 símbolos, se utiliza el algoritmo de decodificación de Reed-Solomon para detectar y corregir cualquier error presente en los símbolos de datos originales.

Por ejemplo, para aplicar la codificación se envía el abecedario, como datos originales (A, B, C), para codificar estos datos utilizando el esquema 7,3 de Reed-Solomon, se generan los símbolos de paridad adicionales basados en los datos originales. Después del cálculo, se obtiene los siguientes símbolos de paridad (P1, P2, P3, P4).

Entonces, el bloque codificado completo sería:

Bloque codificado: (A, B, C, P1, P2, P3, P4)

Durante la transmisión o almacenamiento de datos, pueden ocurrir errores en un bloque codificado con algunos símbolos incorrectos. Para corregir estos errores, se utilizan los símbolos de paridad, que permiten tanto la detección como la corrección de los errores en los datos.

Si al recibir el bloque codificado, se detecta que los símbolos B y P3 están incorrectos, se puede utilizar los símbolos de paridad restantes para corregir los errores mediante operaciones de decodificación de Reed-Solomon, se puede recuperar los datos originales (A, B, C) con precisión, incluso si dos símbolos están corruptos.

Dado que el mensaje codificado que se desea transmitir es fijo y conocido, simplifica la verificación en el receptor, permitiendo evaluar precisamente la integridad de la transmisión al

comprobar si la información recibida coincide con el mensaje original y detectar posibles errores o pérdidas en la transmisión.

4.2.1 Diseño de Software de la Codificación de los Datos

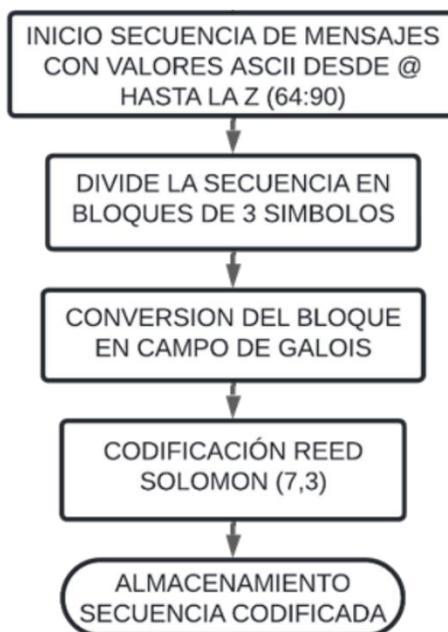


Figura 27 Diagrama de flujo codificación de los datos a transmitir.

En la Figura 27 se hace referencia a los campos de Galois, ya que estos proporcionan la estructura matemática esencial para llevar a cabo las operaciones necesarias en la corrección de errores mediante códigos Reed-Solomon. Para codificar el mensaje, se utilizaron los campos de Galois; los datos originales se representan como polinomios en $GF(2^m)$ y luego se añaden términos de paridad calculados utilizando el polinomio generador. Este mismo proceso es crucial para la decodificación del mensaje (Sandoval-Ruiz, 2017).

4.3 Prototipo del Enlace Punto a Punto: Pruebas en Agua y Evaluación de Desempeño.

El objetivo es caracterizar el enlace de comunicación punto a punto mediante la comparación de dos experimentos en la recepción de datos.

En el primer experimento, para el enlace en el receptor, no se implementó el código de detección y corrección de errores Reed-Solomon, por lo cual, se recibieron los datos directamente y se analizaron sin realizar alguna modificación que altere la integridad de los mismos.

Para el segundo experimento se incorporó la decodificación por bloques Reed-Solomon que permite corregir errores en la recepción, asegurando que los datos originales lleguen correctamente. Se implementa con el objetivo de minimizar la tasa de error de bit para cada distancia evaluada.

Para cada una de las pruebas se adecuaron elementos aptos para lograr la comunicación, tales como recipientes o piscinas, siempre teniendo en cuenta las distancias propuestas, y en cada caso, se fija los transductores paralelamente en las paredes de dichos elementos.

A continuación, en la Figura 28 se indica el esquema de los experimentos realizados en las 3 diferentes distancias:

ESQUEMA DE EXPERIMENTACIÓN		
0.3 MTS	1MT	3.12MT
		
		
las anteriores imágenes se observa el recipiente de 30cm, los transductores, el circuito en protoboard y los equipos necesarios	En este caso, se observa el estanque de 1mt de largo con los transductores ubicados frente a frente, el circuito y los equipos	Por ultimo, se observa una parte de la piscina, con una longitud de 3,12mts con los transductores ubicados "mirándose", el circuito y los equipos

Figura 28 Esquema de experimentación.

Para aclarar el contenido de la Figura 28. Los dos experimentos se hicieron bajo las mismas condiciones, en relación con la distancia entre transductores, se realizaron tres pruebas a 0,3m, 1m y 3,12m, y para cada una de las distancias, se evaluó la tasa de transferencia a 100bps, 600bps y 1000bps.

Para los dos experimentos se enviaron los mismos datos con la siguiente cadena de texto: (@, A, B) los cuales representan en formato ASCII a los números decimales 64, 65 y 66; Y

La secuencia previa es fundamental para la detección y cálculo de errores en la recepción de la señal. Los datos obtenidos se dividieron en tramas de 26 elementos los cuales fueron comparados con la secuencia original y en caso de encontrar diferencias, estas fueron contabilizadas como errores. Por ejemplo, si el dato original de la serie es un 7, en binario se representa como siete veces 1 (1111111), pero se recibe un 5, que en binario se representa como cinco veces 1 (11111), se identifican dos errores. En este caso, se registran cinco unos binarios y se añaden dos ceros (00) para completar la cadena de bits que conforman el byte esperado, indicando de este modo la presencia de errores en la transmisión.

En la tarjeta MyDAQ, se estableció un tiempo máximo de 10 minutos para la ejecución del proceso de muestreo y almacenamiento de datos.

Para cada tasa de bit, se configuró el tiempo de muestreo de la siguiente forma como se observa en la tabla 6:

Tabla 6 Configuración tiempo de muestreo por tasa de transferencia.

TASA DE TRANSFERENCIA	TIEMPO DE MUESTREO
100 BPS	1/1000
600 BPS	1/6000
1000 BPS	1/10000

Esta configuración se implementó con el fin de garantizar una cantidad uniforme o similar de muestras para cada tasa de transferencia utilizada.

Como última configuración, en el filtrado, se establecieron las muestras finales en la cantidad de 18564, el cual corresponde al número de muestras que se obtuvo para 100BPS en los 10 minutos de ejecución del programa.

De este modo, para cada tasa de transferencia, tanto las muestras como los bits transmitidos hasta ese número exacto de muestras, no van a variar. Cabe mencionar que, al estandarizar el número de muestras, se simplifica el filtrado y análisis de los datos adquiridos, permitiendo una comparación precisa entre diferentes configuraciones de tasa de transferencia.

A continuación, se presentan las pruebas realizadas para cada caso y todo el proceso realizado para evaluar el desempeño en cada uno.

Como se mencionó anteriormente, en la ejecución de estas pruebas se establecieron las 3 distancias distintas entre transductores, la configuración del tiempo de muestreo, y se realizaron 3 pruebas con las diferentes tasas de transmisión. Para finalizar, teniendo en cuenta la [Ecuación 21](#) presente en la [Sección 2.3.2.1](#), se realizó el cálculo de tasa de error de bit (BER).

4.3.1 Pruebas con Tasa de Transferencia de 100bps

En la tabla 7 se obtiene la recolección de datos, de las pruebas con una tasa de transferencia de 100bps en las diferentes distancias, resaltando las tasas de error de bit con y sin decodificación:

Tabla 7 Datos de las pruebas con una tasa de transferencia de 100bps.

	0,3m	1m	3,12m
N° Muestras Recolectadas	590.500	607.000	606.000
N° Muestras Promedio	20.415	22.345	21.674
N° Muestras filtradas	18.564	18.564	18.564
Total Bits Transmitidos	39.984	39.984	39.984
Numero de errores	0	4	0
BER sin decodificación	0	1×10^{-4}	0
BER aplicando decodificación	0	0	0

4.3.2 Pruebas con Tasa de Transferencia de 600bps

En la tabla 8 se obtiene la recolección de datos, con una tasa de transferencia de 600bps, con las mismas características que la tabla anterior:

Tabla 8 Datos de las pruebas a una tasa de transferencia de 600bps.

	0,3m	1m	3,12m
N° Muestras Recolectadas	3.664.221	3.610.203	3.637.212
N° Muestras Promedio	115.820	165.615	164.896
N° Muestras filtradas	18.564	18.564	18.564
Total Bits Transmitidos	39.984	39.984	39.984
Numero de errores	0	207	11
BER sin decodificación	0	0,0052	$2,75 \times 10^{-4}$
BER aplicando decodificación	0	0	0

4.3.3 Pruebas con Tasa de Transferencia de 1000bps

En la tabla 9 se obtiene la recolección de datos, con una tasa de transferencia de 1000bps, con las mismas características que las tablas anteriores:

Tabla 9 Datos de las pruebas a una tasa de transferencia de 1000bps.

	0,3m	1m	3,12m
N° Muestras Recolectadas	6'672.713	6'025.000	6'060.000
N° Muestras Promedio	268.935	274.619	261.160
N° Muestras filtradas	18.564	18.564	18.564
Total Bits Transmitidos	39.984	39.984	39.984
Numero de errores	73	368	61
BER sin decodificación	0.0018	0,0092	0,0015
BER aplicando decodificación	0	$2,25 \times 10^{-4}$	0

5. Análisis de Resultados

En la caracterización del sistema de comunicación punto a punto utilizando transductores ultrasónicos a 40 kHz, se llevaron a cabo dos experimentos. El primer experimento se enfocó en analizar los datos recibidos sin aplicar la corrección de errores mediante el algoritmo Reed-Solomon, mientras que el segundo experimento incorporó este método de detección y corrección de errores con el objetivo de reducir los errores en la recepción.

Para ambos experimentos, se realizaron mediciones a tres distancias distintas (30 cm, 1 metro, 3.12 metros) utilizando tres tasas de transferencia (100 bps, 600 bps, 1000 bps). Este enfoque permitió evaluar el rendimiento del enlace en función de tres variables importantes: el alcance, la tasa de transferencia, y la tasa de error de bits (BER).

En cada prueba del primer experimento, se obtuvo un valor distinto de BER, el cual fue comparado posteriormente con los valores obtenidos al aplicar la corrección de errores Reed-Solomon. Esta comparación fue fundamental para evaluar el rendimiento del enlace y caracterizarlo con respecto a las tres variables anteriormente mencionadas.

5.1 Evaluación del Sistema de Comunicación Punto a Punto

Para evaluar el rendimiento del sistema de comunicación, se compararon los resultados basados en las tres variables a caracterizar: el alcance máximo que presentó el enlace, la tasa de transferencia, y la tasa de error de bits (BER).

La BER se evaluó en dos escenarios: sin aplicar la decodificación Reed-Solomon y con la implementación de este algoritmo. Esta comparación permitió determinar la efectividad de la corrección de errores y su impacto en la calidad de la transmisión.

Al considerar tanto el alcance como la tasa de transferencia junto con las diferencias en BER, se pudo evaluar la viabilidad de la corrección de errores en mejorar la estabilidad y precisión del enlace, identificando los escenarios en los que la decodificación Reed-Solomon proporciona ventajas significativas. Este análisis integral es crucial para caracterizar y optimizar el sistema, garantizando su rendimiento bajo diversas condiciones operativas.

5.1.1 Evaluación del Enlace a 100bps

Primero se tiene en cuenta la tasa de transferencia de 100bps, variando la distancia y limitando la cantidad de bits enviados en cada experimento:

Tabla 10 Evaluación de los datos para una tasa de transferencia de 100bps.

Tasa de transferencia (bps)	Distancia (mts)	Número de bits transmitidos	Número de bits errados (con y sin decodificación)	Tasa de error de bits (sin decodificación)	Tasa de error de bits (con decodificación)
100	0,3	39.984	0	0	0
100	1	39.984	4	1×10^{-4}	0
100	3,12	39.984	0	0	0

Como se observa en la tabla 10 manteniendo la tasa de transferencia constante de 100bps en las tres distancias, se puede observar que el número de errores que existe sin la implementación de la decodificación Reed-Solomon es mínima, para esta primera tasa de transferencia se obtiene un buen resultado ya que solo se observa errores en la distancia de 1m, fueron 4 de 4 errores que se mitigaron con la implementación de la decodificación por bloques.

Realizando una comparación de las 3 variables para este caso, se obtiene que, dejando la tasa de transferencia constante, la distancia variada, el BER es cero, lo que significa que el enlace en estas condiciones es adecuado.

5.1.2 Evaluación del Enlace a 600bps

Segundo se tiene en cuenta la tasa de transferencia de 600bps, con las mismas características que el anterior:

Tabla 11 Evaluación de los datos para una tasa de transferencia de 600bps.

Tasa de transferencia (bps)	Distancia (mts)	Número de bits transmitidos	Número de bits errados (con y sin decodificación)	Tasa de error de bits (sin decodificación)	Tasa de error de bits (con decodificación)
600	0,3	39.984	0	0	0
600	1	39.984	207	0,0052	0
600	3,12	39.984	11	$2,75 \times 10^{-4}$	0

En esta prueba cuando la tasa de transferencia aumenta se ve como la cantidad errores se incrementa, así como se indica en la tabla 11, a excepción de la distancia de 0,3m que la cantidad de errores fue cero y no fue necesario la implementación de Reed-Solomon, para la distancia de 1m se observó la mayor cantidad de errores, pero todos fueron mitigados con la implementación de la decodificación, y para la última prueba de 3,12m se obtuvieron errores, pero también se lograron mitigar. Por lo tanto, para una tasa de transferencia de 600bps el enlace de comunicación tuvo un comportamiento adecuado con respecto al alcance ya que a pesar de la cantidad de errores la tasa de error de bit sin la decodificación es mínima y con la decodificación es cero, por lo tanto, se logra corregir todos los errores detectados recuperando la información del mensaje original.

5.1.3 Evaluación del Enlace a 1000bps

Por último, se tiene en cuenta la tasa de transferencia de 1000bps, con las mismas condiciones que los anteriores:

Tabla 12 Evaluación de los datos con una tasa de transferencia de 1000bps.

Tasa de transferencia (bps)	Distancia (mts)	Número de bits transmitidos	Número de bits errados (con y sin decodificación)	Tasa de error de bits (sin decodificación)	Tasa de error de bits (con decodificación)
1000	0,3	39.984	73	0,0018	0
1000	1	39.984	368	0,0092	$2,25 \times 10^{-4}$
1000	3,12	39.984	61	0,0015	0

Para este último caso cuando la tasa de transferencia varía a 1000bps, se puede observar que a medida que la velocidad aumenta, en la recepción se obtiene un incremento en los errores, así como se observa en la tabla 12, en las 3 distancias se tiene una cantidad de errores alta en comparación a los anteriores casos. Para un alcance de 0,3m se tiene una tasa de bit sin decodificación baja, pero los errores son mitigados en su totalidad con la implementación de la decodificación, de igual forma para el alcance de 3,12m esta prueba tuvo la menor cantidad de errores y también son mitigados en su totalidad, pero para el alcance de 1m no se obtiene el mismo resultado ya que se tiene la mayor cantidad de errores y a pesar de implementar la decodificación de Reed-Solomon no se logró mitigar en totalidad los errores por lo cual se observa solo en este caso un valor en la tasa de error de bit.

El enlace de comunicación con una tasa de transferencia de 1000bps fue adecuada, a pesar de que se observó mayor cantidad de errores en cada alcance, pero en el alcance mínimo y máximo se logró mitigar los errores, caso contrario del alcance de 1m que a pesar de implementar Reed-Solomon no se logró corregir todos los errores detectados.

5.2 Caracterización Final del Enlace

Con respecto a los resultados anteriores se observó que el enlace de comunicación punto a punto con los transductores de bajo costo, obtuvo un desempeño adecuado en las diferentes variables de prueba, para responder a la pregunta de la investigación:

¿Cuál es la tasa de error de bit, el alcance y tasa de transferencia de un enlace de comunicación subacuático punto a punto implementado con el transductor ultrasónico JSN-SR04T con una frecuencia de 40 kHz en agua dulce?

Con respecto al alcance se tomó una distancia mínima de 0,3m, media de 1m y máxima de 3,12m, en cada distancia se realizó 3 pruebas a diferentes tasas de transferencia, para el caso de la distancia mínima se obtuvo resultados óptimos con respecto al BER para 100bps y 600bps no se vio la necesidad de implementar la decodificación de Reed-Solomon ya que no había ningún error para corregir, toda la información llegó sin imperfecciones. Pero para 1000bps sí se generaron errores que en comparación de la cantidad de bits transmitidos el BER es menor al 1%, en este caso si se implementó la decodificación Reed-Solomon y se obtuvo una mejora del 100% todos los errores fueron corregidos obteniendo un BER de 0.

Para la distancia media de 1m en cada tasa de transferencia se obtuvo errores de transmisión, sin la implementación de la decodificación el BER no llegó a superar el 1%, pero si se necesitó la decodificación Reed-Solomon para mitigar y corregir los errores, para las tasas de transferencia de 100bps y 600bps se observó una mejora del 100% obteniendo un BER de 0, pero para 1000bps no se logró corregir todos los errores, aunque el BER disminuyó considerablemente.

En la última distancia máxima de 3,12m, solo en la tasa de transferencia de 100bps se obtuvo un BER de 0, no se encontraron errores, por lo tanto, no se necesitó la decodificación Reed-Solomon; pero para 600bps y 1000bps si se encontró errores, a pesar que el BER es bajo menor del 1% se aplicó la decodificación para corregir y recuperar el mensaje original, obteniendo un BER de 0.

Analizando los resultados anteriores en las pruebas donde se observaron errores de transmisión el BER sin la decodificación en ningún caso superó el 1%, pero con la implementación de la decodificación de Reed-Solomon se observó una mejora significativa. En algunas pruebas el BER bajó a 0, por lo tanto, para un sistema de comunicación en un medio que es susceptible al ruido y distorsionar la información, es útil en gran manera para no perder datos.

Si comparamos los resultados obtenidos con respecto al antecedente base tenemos lo siguiente:

Las pruebas del antecedente se realizaron enviando paquetes de datos compuestos por 7, 14, 35 y 70 bits, con una tasa de transferencia de 1200bps, se probó a 3 distancias, obteniendo los siguientes resultados; a una distancia de 100cm y 130cm se obtuvo un valor de BER de 0%, a una distancia de 150cm se obtuvo un valor de BER de 6,2% y para una distancia de 170cm se obtuvo el mayor error que fue del 35% (Indriyanto & Edward, 2018), cabe resaltar que no implementaron ningún tipo de codificación por bloques para la detección y corrección de errores.

A comparación de los anteriores resultados con los del antecedente, el BER en ninguna prueba supero el 1% y con la implementación de la codificación Reed-Solomon se mitigo los errores encontrados, obteniendo un BER del 0%, también cabe resaltar que se supera la distancia de enlace evaluado en 3 tasas de transferencia diferentes. Por lo tanto, el enlace de comunicación implementado en este proyecto obtuvo un desempeño adecuado evaluado con respecto al alcance, la tasa de transferencia y la tasa de error de bit.

6. Conclusiones

Según los resultados obtenidos se puede observar que se cumple la hipótesis nula de la sección 2.4.2 tabla 2, ya que se supera los valores propuestos de las variables, están fuera de los rangos propuestos, por ejemplo, el alcance máximo que se probó fue de 3,12m obteniendo una tasa de error de bit bajo. Por lo tanto, se logró correctamente la transmisión de información a mayor tasa de bits y a mayor distancia.

El enlace de comunicación subacuático con los transductores ultrasónicos JSN-SRT04, bajo prueba en diferentes entornos, obtuvo un desempeño que superó las expectativas ya que se observó su rendimiento en las 3 variables a caracterizar, con respecto a la tasa de transferencia se limitó a 1000bps porque se observó que a mayores tasas era necesario realizar otras modificaciones en el circuito receptor.

Comparando los resultados con respecto al antecedente base, se logró superar la distancia de transmisión y lo más importante con una tasa de error de bit mínimo, por ejemplo, el antecedente tenía un alcance máximo de 170cm, pero con el 35% de BER, se superó el alcance a 3,12m con un BER menor al 1% en todas las tasas de transferencia.

Se obtuvo un mejor rendimiento a 100bps, en las 3 distancias probadas, presentando errores mínimos; por lo tanto, a una tasa de transferencia de 100bps dando como resultado una distancia máxima de 3,12m sin problemas en la transmisión y recepción del mensaje, concluyendo que, a menor velocidad de transmisión, el mensaje llegará sin errores previos a la codificación por bloques Reed-Solomon.

Para 600bps el enlace de comunicación tuvo más error a 1m y 3,12m en comparación a 100bps, pero esta cantidad de errores calculando el BER es bajo con respecto a la cantidad de bits que se transmiten, por lo tanto, el comportamiento fue adecuado y con la implementación de la decodificación Reed-Solomon el BER es cero, se logra corregir todos los errores detectados recuperando la información del mensaje original.

Sin embargo, para una tasa de transferencia de 1000bps se obtuvo un incremento significativo de errores en cada distancia, pero esto se debe que a mayor tasa de transferencia en la recepción el procesador se confunde por la cantidad de información que llega en un tiempo corto, por lo tanto, cuando se realizó la recuperación del mensaje muchas tramas de bits no coincidían.

Para realizar un enlace de comunicación punto a punto en el agua se deben tener en cuenta varios aspectos, ya que este medio es muy susceptible al ruido y distorsiona fácilmente la señal, por lo tanto, la implementación de una codificación de bloques como Reed-Solomon que permita la detección y corrección de errores es de gran utilidad, para disminuir la cantidad de errores en el mensaje y lograr recuperar la mayor cantidad de datos.

La implementación de la codificación Reed-Solomon en el proyecto tuvo gran impacto en los datos que contenían errores, ya que en la mayoría de los casos se logró corregir los errores en un 100% y recuperar la información de transmisión. A pesar de que la codificación por bloques Reed-Solomon en su esquema (7,3) solo corrige 2 errores cuando la tasa de transferencia aumenta no logra corregir todos los errores presentes en la decodificación, por lo tanto, para tasas de transferencia más altas se debe implementar otro esquema que permita la corrección de más errores.

El hardware desarrollado, al tener amplificadores y comparadores variables, fueron de vital importancia, debido a que se pudo ajustar las ganancias de estos para tener menor cantidad de ruido y lograr la purificación de la señal recibida y de este modo obtener datos con menor cantidad de errores.

7. Recomendaciones

La caracterización del sistema de comunicación punto a punto permitió entender como los transductores ultrasónicos JSN04 se comportan en el agua evaluando las tres variables trabajadas en el transcurso del proyecto. Si se desea hacer más experimentos a distancias más largas, en dado caso de que el amplificador alcance su estado de saturación, se recomienda mantener una ganancia fija o ajustable y añadir un segundo amplificador en cascada para incrementar la señal, repitiendo el proceso si es necesario.

También para trabajos futuros, se recomienda realizar la sincronización del transmisor y receptor a la hora de capturar los datos, para evitar que se introduzcan o se pierdan bits en el transcurso de la transmisión.

Se puede realizar un experimento para controlar la potencia de la cantidad de bits enviados y la potencia del ruido en el medio, para realizar graficas de señal vs ruido y realizar el análisis de como el ruido en el medio afecta la transmisión y recepción de datos.

Referencias

- Alonso, M., & Ramon, T. (2019). *Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de Universidad de Valladolid Sistema de comunicación y ultrasonidos con geolocalización*.
- Fabricio R. Marcillo, R. H. (2021). Análisis del rendimiento de la paralelización del algoritmo Reed-Solomon. *Ingenio*, 27-37.
- Heidemann, J., Stojanovic, M., & Zorzi, M. (2012). Underwater sensor networks: Applications, advances and challenges. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 370(1958), 158–175.
<https://doi.org/10.1098/rsta.2011.0214>
- Indriyanto, S., & Edward, I. Y. M. (2018). Ultrasonic Underwater Acoustic Modem Using Frequency Shift Keying (FSK) Modulation. *Proceeding of 2018 4th International Conference on Wireless and Telematics, ICWT 2018*, 1–4.
<https://doi.org/10.1109/ICWT.2018.8527809>
- Jahankit. (2021). Datasheet JSN-SR04T-2.0, Ultrasonic Waterproof Range Finder. *Jahankitshop*, 1–4. <https://www.jahankitshop.com/getattach.aspx?id=4635&Type=Product>
- L. Redondo, & A. Ruiz-Mateo. (2017). Ruido subacuático: fundamentos, fuentes, cálculo y umbrales de contaminación ambiental. *Ingeniería Civil*, 186, 73–94.
- Martins, M. S., Cabral, J., Lanceros-Mendez, S., & Rocha, G. (2015). Effect of the acoustic impedance in ultrasonic emitter transducers using digital modulations. *Ocean Engineering*, 100, 107–116. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.04.001>
- Programa de ingeniería Electrónica. (2015). *Proyecto Educativo del Programa*.
- Quijano, A. J. (2009). *GUIA DE INVESTIGACION CUANTITATIVA*.

- Rodríguez, J., & Marichal, N. (2017). “Propagación de ondas acústicas en espacios subacuáticos.” *Universidad de La Laguna*, 76.
- Sandoval Ruiz, C., & Fedón, A. (2007). Codificador y decodificador digital Reed-Solomon programados para hardware reconfigurable. *Ingeniería y Universidad*, 11(1), 17–32.
- Stojanovic, M., & Preisig, J. (2009). Underwater Acoustic Communication Channels: Propagation Models and Statistical Characterization. *IEEE Communications Magazine*, 47(1), 84–89. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2009.4752682>
- Uribe, A., & Velez, J. (2017). *Diseño e implementación de un sistema de comunicación subacuática basado en la emisión y recepción de señales en el rango de frecuencias de ultrasonido. Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniero Electrónico Asesor: Gustavo Meneses Be.* 1–96.
- Valencia, U. P. D. E. (2011). “Comunicaciones inalámbricas subacuáticas a 2, 4 GHz para la transmisión de datos con altas tasas de transferencia.” 45.
- Vargas, laura. (2018). EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UN MÓDULO DE COMUNICACIÓN ACÚSTICO SUBACUÁTICO. *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952., 10–27.
- Yanbo Wu, M. Z. (2014). *DESIGN AND IMPLEMENTATION OF ACOUSTIC MODEM FOR SHALLOW WATER NETWORK* Institute of Acoustics Chinese Academy of Sciences Beijing , China Email : { wuyanbo , zhumin } @ mail . ioa . ac . cn. 900–904.

Anexos

Código de codificación para el transmisor

```

REED SOLOMON
code = []
msg = 64:90
for i=0:8
    parcial = gf(msg(3*i+1:3*i+3),8)
    parcial = rsenc(parcial,7,3)
    code = [code; parcial]
end

rsdec(code,7,3)

```

Código de Transmisión

```

//PARAMETROS
//40kHz -> TONEFREQ = 60.000
//100 & 200 bps -> BITFACTOR = 0.3
//300 - 3000 bps ->BITFACTOR = 0.33
//INICIO
//VARIABLES
volatile byte index;
long contador = 0;
int COUNT=0;

#define TXPIN    8
#define RATEBPS  100
#define TONEFREQ 60000
#define BITFACTOR 0.3
#define NSYMS    125000
#define INITSYM  64
#define DELAYLIM 16383

```

```

#define SENDREEDSOLOMON
// #define BTEST
//CALCULOS
#define BITDURATIONMICROSG (1000000/RATEBPS)
#define HALFCYCLEMICROSG (500000/TONEFREQ)

#if (HALFCYCLEMICROSG >= DELAYLIM) // si la duracion del medio ciclo es superior o
igual al limite, se utiliza el comando delay
#warning "La duración de medio ciclo del tono supera el límite de microsegundos de
delayMicroseconds, utilizando delay()"
#define DelayHalfCycle(X) delay(X)
unsigned long durationHalfTone = (unsigned long)(HALFCYCLEMICROSG/1000); //la
duracion del medio tono va a ser igual a la duracion del medio ciclo/1000

#else //de lo contrario, la duracion del medio tono va a ser la misma que la del medio ciclo y
se utiliza comando delaymicroseconds
#warning "La duración de medio ciclo del tono se encuentra en el rango de
delayMicroseconds"
#define DelayHalfCycle(X) delayMicroseconds(X)
unsigned int durationHalfTone = (unsigned int)HALFCYCLEMICROSG;
#endif

#if (BITDURATIONMICROSG >= DELAYLIM) //si la duracion de los bits es superior al
limite de la tarjeta, se utiliza delay
#warning "La duración de bit supera el límite de microsegundos de delayMicroseconds,
utilizando delay()"
#define DelayBit(X) delay(X)
unsigned long durationBit = (unsigned long)(BITDURATIONMICROSG/1000); //la duracion
del bir va a ser igual a la duracion del bit/1000

#else //de lo contrario, la duracion del bit va a aser igual a la calculada

```

```

#warning "La duración de bit se encuentra en el rango de delayMicroseconds"
#define DelayBit(X) delayMicroseconds(X)
unsigned int durationBit = (unsigned int)BITDURATIONMICROSG;
#endif

// Secuencia Reed Solomon
int codigo[] = {64, 65, 66, 73, 125, 212, 127}; //, 67, 68, 69, 143, 111, 198, 125, 70, 71, 72, 34,
72, 148, 169, 73, 74, 75, 177, 3, 110, 247, 76, 77, 78, 146, 152, 233, 90, 79, 80, 81, 64,
169, 229, 242, 82, 83, 84, 162, 244, 184, 65, 85, 86, 87, 83, 124, 244, 85, 88, 89, 90, 226, 170,
174,53};

// Numero de oscilaciones por cada bit
unsigned long numOscillations = (unsigned
long)(BITFACTOR*BITDURATIONMICROSG/HALFCYCLEMICROSG); // calculo de las
oscilaciones es igual al factor de bit*el tiempo de retardo del bit y dividido entre el medio ciclo
//CONFIGURACION
void setup()
{
  pinMode(TXPIN, OUTPUT);
  Serial.begin(115200);
}
//BUCLE
void loop()
{
  // #ifdef BTEST
  // ExecuteTestMode();
  // #else

  while(contador < 50000)
  {
    #ifdef SENDREEDSOLOMON
    SendCharacterReedSolomon();

```

```

    index++;
    index = index % 7;

    //delay(500);

    #else
        SendCharacter();
        index++;
        index = index % 27;

        //delay(500);

    #endif
    contador++;
    COUNT++;
    //Serial.print(COUNT);
    //Serial.println(";");
    digitalWrite(TXPIN,0);
}
    if(COUNT == contador)
{
    Serial.println("Ciclo Completo. ¿Reetrasmitir? (y/n) ");
    while(!Serial.available() { }
    char respuesta = Serial.read();
    digitalWrite(TXPIN, LOW);

    if(respuesta== 'y' || respuesta == 'Y'){
        COUNT = 0;
        contador=0;
        index=0;

```

```

    }
else{
    digitalWrite(TXPIN, LOW);
}
}
}
}

```

//FUNCIONES

```

void OscillateBlocking()
{
    for(unsigned long i=0; i<numOscillations; i++)
    {
        digitalWrite(TXPIN, 0);
        DelayHalfCycle(durationHalfTone);
        digitalWrite(TXPIN,1);
        DelayHalfCycle(durationHalfTone);
    }
    digitalWrite(TXPIN,0);
}

void SendCharacter()
{
    Serial.println(INITSYM+index);
    byte bRandom= byte(INITSYM + index);
    if(bRandom < 128) bRandom = bRandom & 127;
    //Serial.println(bRandom);
    //DebugSerialLn(char(bRandom));

    for(int i=0; i<8; i++)
    {
        byte bTest =(bRandom<<i) & 128;
        Serial.print(i);
    }
}

```

```

Serial.print("->");
Serial.println(bTest);
if(bTest == 128)
    OscillateBlocking();
else{
    DelayBit(durationBit);
}
}
}

void SendCharacterReedSolomon()
{
    Serial.println(codigo[index]);
    byte bRandom= byte(codigo[index]);
    if(bRandom < 128) bRandom = bRandom & 127;
    //Serial.println(bRandom);
    //DebugSerialLn(char(bRandom));

    for(int i=0; i<8; i++)
    {
        //byte bTest =(bRandom>>i) & 1;
        byte bTest =(bRandom<<i) & 128;
        Serial.print(i);
        Serial.print("->");
        Serial.println(bTest);
        if(bTest ==128)
            OscillateBlocking();
        else{
            DelayBit(durationBit);
        }
    }
}

```

```

}

void ExecuteTestMode()
{
    while(true)
    {
        OscillateBlocking();
        DelayBit(durationBit);
    }
}

```

Códigos del Recepción:

En los siguientes códigos de Matlab se tiene la forma de la adquisición de datos del circuito del receptor, recolectados por la NI MyDAQ, para posteriormente ser almacenados y procesados en el software de Matlab:

Estadísticas de datos

Limpieza y carga de datos

```

clear all; clc;
load('DatosRS100bps30cm.mat');
samples = timetable2table(myDAQ1_2);
samples = table2array(samples(:,2));
samples = samples > 0.5;
clear myDAQ1_2;

```

Obtención de estadísticas

```

stats = [];
counter = 1;
prev_sample = samples(1);
for i = 2:size(samples,1)

```

```

current_sample = samples(i);
if current_sample == prev_sample
    counter = counter + 1;
else
    stats = [stats; prev_sample counter];
    counter = 1;
end
prev_sample = current_sample;
end
% final measurement
stats = [stats; prev_sample counter];

```

Estadísticas para unos

```

figure;
histogram(stats(stats(:,1) == 1, 2));
title("Conteo para unos");

```

Estadísticas para ceros

```

figure;
histogram(stats(stats(:,1) == 0, 2));
title("Conteo para ceros");

```

Obtención de secuencia de bits

```

% filter sample count under a threshold
threshold = 5;
stats = stats(stats(:,2)>threshold, :);
% For
prev = stats(1,1);
Fstats = [];
Suma = stats(1,2);
for i = 2:size(stats,1)

```

```

if prev == stats(i,1)
    Suma = Suma+stats(i,2);
else
    Fstats = [Fstats; prev Suma];
    prev = stats(i,1);
    Suma = stats(i,2);
end
end
% Obtain the number of bits per sample count
samples_per_bit = 14;
Fstats(:,2) = Fstats(:,2)/samples_per_bit;
Fstats(:,2) = round(Fstats(:,2));

```

Estimación de BER

```

startAt = 33;
check_sequence = [1;7;1;5;1;1;1;4;1;2;1;2;1;1;5;1;3;1;1;1;3;7;1];
out_sequence = [];
for j = 0:26: size(Fstats,1)-100
    initial = j+startAt;
    final = j+startAt+25;
    current_sequence = Fstats(initial:final, 2);
    out_sequence = [out_sequence; sum(check_sequence~=current_sequence)];
end

found_errors = sum(out_sequence);
transmitted_bits = size(out_sequence, 1)*size(check_sequence,1);
ber = found_errors / transmitted_bits;

```

Código de Decodificación usando Reed-Solomon

```

% configuración

```

```

load("Fstats_600bps_1MT_18k.mat");
startAt = 1;
check_sequence = [1;1;7;1;5;1;1;1;4;1;2;1;2;1;2;1;1;5;1;3;1;1;1;1;3;7];
check_size = size(check_sequence,1);
fstats_size = size(Fstats);
% Data
numErrores = 0;
totalBits = 0;
SER = 0;
NumErrorSym = 0;
TotalSym = 0;
numErroresCod=0;
checkSequenceNumBits = sum(check_sequence);

for i=0:check_size:fstats_size
    % tomamos un conjunto de datos del tamaño de la secuencia
    initial = startAt + i;
    final = initial + check_size - 1;

    % condición para detenerse
    if final>fstats_size
        break;
    end
    block = Fstats(initial:final, :);
    totalBits = totalBits + checkSequenceNumBits;

SEQ 2 BIN %Paso de la secuencia obtenida a #Binarios
    bin = [];
    for j = 1:length(block(:,2))
        test_sequence = check_sequence(j,1);
        test_block = block(j,2);

```

```

numErrores = numErrores + abs(check_sequence(j,1)-block(j,2));
if block(j,1) == 0
    if check_sequence(j,1) > block(j,2)
        bin = [bin zeros(1,block(j,2))];
        bin = [bin ones(1,check_sequence(j,1)-block(j,2))];
    else
        if check_sequence(j,1) < block(j,2)
            errores_temp = block(j,2)-check_sequence(j,1);
            if errores_temp >= check_sequence(j,1)
                bin = [bin ones(1, check_sequence(j,1))];
            else
                bin = [bin zeros(1,check_sequence(j,1)-errores_temp)];
                bin = [bin ones(1,errores_temp)];
            end
        else
            bin = [bin zeros(1,check_sequence(j,1))];
        end
    end
end
else
    if check_sequence(j,1) > block(j,2)
        bin = [bin ones(1,block(j,2))];
        bin = [bin zeros(1,check_sequence(j,1)-block(j,2))];
    else
        if check_sequence(j,1) < block(j,2)
            errores_temp = block(j,2)-check_sequence(j,1);
            if errores_temp >= check_sequence(j,1)
                bin = [bin zeros(1, check_sequence(j,1))];
            else
                bin = [bin ones(1,check_sequence(j,1)-errores_temp)];
                bin = [bin zeros(1,errores_temp)];
            end
        end
    end
end

```

```

        else
            bin = [bin ones(1,check_sequence(j,1))];
        end
    end
end
end
end
end

```

BIN 2 DEC 2 ASCII %Paso de #Binarios a Decimal y a ASCII

```

dec = [];
for k = 1:8:length(bin)
    if k+7 > length(bin)
        break
    end
    oct = bin(k:k+7);
    num_dec = bin2dec(num2str(oct));
    dec = [dec,num_dec];
end

```

GALOIS FIELD / REED SOLOMON DECODER %Creación campos de Galois para que el decoder RS pueda realizar los cálculos

```

CGF= gf(dec,8);
[decoded,cnumerr] = rsdec(CGF,7,3);
ascii = char(dec);
%if i>118000
% disp(bin);
% disp(dec);
disp(ascii)
%end

```

```

NumErrorSym = NumErrorSym + sum(decoded.x ~= [64:66]);
TotalSym = TotalSym + 3;

```

```
numErroresCod = numErroresCod+sum(sum(dec2bin(decoded.x,8) ~=
dec2bin([64:66],8)));
end
DISPLAY BER (COD/UNCOD) %Muestra resultados del ver con y sin codificación
BERnRS = numErrores/totalBits;
BERwRS = numErroresCod/totalBits;
disp("BER sin codificación");
disp(BERnRS);
disp("BER con codificación");
disp(BERwRS);
disp("SER con codificación");
disp(NumErrorSym/TotalSym);
```

 <p>UNIVERSIDAD CESMAG NIT: 800.109.387-7 VIGILADA MINEDUCACIÓN</p>	CARTA DE ENTREGA TRABAJO DE GRADO O TRABAJO DE APLICACIÓN – ASESOR(A)	CÓDIGO: AAC-BL-FR-032
		VERSIÓN: 1
		FECHA: 09/JUN/2022

San Juan de Pasto, 11 de Septiembre de 2024

Biblioteca
REMIGIO FIORE FORTEZZA OFM. CAP.
Universidad CESMAG
Pasto

Saludo de paz y bien.

Por medio de la presente se hace entrega del Trabajo de Grado / Trabajo de Aplicación denominado **Caracterización de un sistema de comunicación punto a punto subacuático desarrollado con el transductor ultrasónico JSN-SR04T con una frecuencia de 40 kHz**, presentado por el (los) autor(es) **Diana Giselle Armero Molina** y **Javier Andres Rosas Villamarín** del Programa Académico de **Ingeniería Electrónica** al correo electrónico biblioteca.trabajosdegrado@unicesmag.edu.co. Manifiesto como asesor(a), que su contenido, resumen, anexos y formato PDF cumple con las especificaciones de calidad, guía de presentación de Trabajos de Grado o de Aplicación, establecidos por la Universidad CESMAG, por lo tanto, se solicita el paz y salvo respectivo.

Atentamente,

(Firma) 

Mario Fernando Henao Rosero
CC 4.612.719 Popayán
Ingeniería Electrónica
Tel: 3163455039
Mail: mfhenao@unicesmag.edu.co

 UNIVERSIDAD CESMAG <small>NIT: 800.109.387-7 VIGILADA M/EDUCACIÓN</small>	AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN DE TRABAJOS DE GRADO O TRABAJOS DE APLICACIÓN EN REPOSITORIO INSTITUCIONAL	CÓDIGO: AAC-BL-FR-031
		VERSIÓN: 1
		FECHA: 09/JUN/2022

INFORMACIÓN DEL (LOS) AUTOR(ES)	
Nombres y apellidos del autor: Diana Giselle Armero Molina	Documento de identidad: 1010034639
Correo electrónico: dianaarmero2000@gmail.com	Número de contacto: 3203831609
Nombres y apellidos del autor: Javier Andres Rosas Villamarin	Documento de identidad: 1004192042
Correo electrónico: javierrv79@gmail.com	Número de contacto: 3106291441
Nombres y apellidos del asesor: Mario Fernando Henao Rosero	Documento de identidad: 4612719
Correo electrónico: mfhenao@unicesmag.edu.co	Número de contacto: 3163455039
Título del trabajo de grado: Caracterización de un sistema de comunicación punto a punto subacuático desarrollado con el transductor ultrasónico JSN-SR04T con una frecuencia de 40 kHz.	
Facultad y Programa Académico: Ingeniería Electrónica	

En mi (nuestra) calidad de autor(es) y/o titular (es) del derecho de autor del Trabajo de Grado o de Aplicación señalado en el encabezado, confiero (conferimos) a la Universidad CESMAG una licencia no exclusiva, limitada y gratuita, para la inclusión del trabajo de grado en el repositorio institucional. Por consiguiente, el alcance de la licencia que se otorga a través del presente documento, abarca las siguientes características:

- a) La autorización se otorga desde la fecha de suscripción del presente documento y durante todo el término en el que el (los) firmante(s) del presente documento conserve(mos) la titularidad de los derechos patrimoniales de autor. En el evento en el que deje(mos) de tener la titularidad de los derechos patrimoniales sobre el Trabajo de Grado o de Aplicación, me (nos) comprometo (comprometemos) a informar de manera inmediata sobre dicha situación a la Universidad CESMAG. Por consiguiente, hasta que no exista comunicación escrita de mi(nuestra) parte informando sobre dicha situación, la Universidad CESMAG se encontrará debidamente habilitada para continuar con la publicación del Trabajo de Grado o de Aplicación dentro del repositorio institucional. Conozco(conocemos) que esta autorización podrá revocarse en cualquier momento, siempre y cuando se eleve la solicitud por escrito para dicho fin ante la Universidad CESMAG. En estos eventos, la Universidad CESMAG cuenta con el plazo de un mes después de recibida la petición, para desmarcar la visualización del Trabajo de Grado o de Aplicación del repositorio institucional.
- b) Se autoriza a la Universidad CESMAG para publicar el Trabajo de Grado o de Aplicación en formato digital y teniendo en cuenta que uno de los medios de publicación del repositorio institucional es el internet, acepto(amos) que el Trabajo de Grado o de Aplicación circulará con un alcance mundial.
- c) Acepto (aceptamos) que la autorización que se otorga a través del presente documento se realiza a título gratuito, por lo tanto, renuncio(amos) a recibir emolumento alguno por la publicación, distribución, comunicación pública y/o cualquier otro uso que se haga en los términos de la presente autorización y de la licencia o programa a través del cual sea publicado el Trabajo de grado o de Aplicación.
- d) Manifiesto (manifestamos) que el Trabajo de Grado o de Aplicación es original realizado sin violar o usurpar derechos de autor de terceros y que ostento(amos) los derechos patrimoniales de autor sobre la misma. Por consiguiente, asumo(asumimos) toda la responsabilidad sobre su contenido

 <p>UNIVERSIDAD CESMAG NIT: 800.109.387-7 VIGILADA Mineducación</p>	AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN DE TRABAJOS DE GRADO O TRABAJOS DE APLICACIÓN EN REPOSITORIO INSTITUCIONAL	CÓDIGO: AAC-BL-FR-031
		VERSIÓN: 1
		FECHA: 09/JUN/2022

ante la Universidad CESMAG y frente a terceros, manteniéndola indemne de cualquier reclamación que surja en virtud de la misma. En todo caso, la Universidad CESMAG se compromete a indicar siempre la autoría del escrito incluyendo nombre de(los) autor(es) y la fecha de publicación.

- e) Autorizo(autorizamos) a la Universidad CESMAG para incluir el Trabajo de Grado o de Aplicación en los índices y buscadores que se estimen necesarios para promover su difusión. Así mismo autorizo (autorizamos) a la Universidad CESMAG para que pueda convertir el documento a cualquier medio o formato para propósitos de preservación digital.

NOTA: En los eventos en los que el trabajo de grado o de aplicación haya sido trabajado con el apoyo o patrocinio de una agencia, organización o cualquier otra entidad diferente a la Universidad CESMAG. Como autor(es) garantizo(amos) que he(hemos) cumplido con los derechos y obligaciones asumidos con dicha entidad y como consecuencia de ello dejo(dejamos) constancia que la autorización que se concede a través del presente escrito no interfiere ni transgrede derechos de terceros.

Como consecuencia de lo anterior, autorizo(autorizamos) la publicación, difusión, consulta y uso del Trabajo de Grado o de Aplicación por parte de la Universidad CESMAG y sus usuarios así:

- Permiso(permitimos) que mi(nuestro) Trabajo de Grado o de Aplicación haga parte del catálogo de colección del repositorio digital de la Universidad CESMAG, por lo tanto, su contenido será de acceso abierto donde podrá ser consultado, descargado y compartido con otras personas, siempre que se reconozca su autoría o reconocimiento con fines no comerciales.

En señal de conformidad, se suscribe este documento en San Juan de Pasto a los 11 días del mes de Septiembre del año 2024.

 Firma del autor	Diana G Armero Firma del autor
Nombre del autor: Javier Andres Rosas Villamarin	Nombre del autor: Diana Giselle Armero Molina
 Nombre del asesor: Mario Fernando Henao Rosero	