SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE BOCA DEL RÍO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

VEHÍCULO ACUÁTICO DE OPERACIÓN INALÁMBRICA CON SISTEMA DE DETECCIÓN DE OXÍGENO DISUELTO EN AGUA.

TESIS

PRESENTA:

ING. MISSAEL DE JESÚS LÓPEZ JACOBO

DIRECTOR DE TESIS:

DRA. ITZEL GALAVIZ VILLA

CODIRECTOR:

MTRA. IRMA ANGÉLICA GARCÍA GONZÁLEZ

ASESORES:

DR. ARTURO GARCÍA SALDAÑA

DRA. MARÍA DEL REFUGIO CASTAÑEDA CHÁVEZ

BOCA DEL RÍO, VERACRUZ, MÉXICO.

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

Número Registro **A-605-120118**

En la ciudad de Boca del Río, Ver., siendo las 14:00 horas del día 15 del mes de agosto de 2019 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Consejo del Posgrado de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental del ITBOCA, para examinar la Tesis de Grado titulada:

"VEHÍCULO ACUÁTICO DE OPERACIÓN INALÁMBRICA CON SISTEMA DE DETECCIÓN DE OXÍGENO DISUELTO EN AGUA"

Que presenta el (la) alumno(a):

C. MISSAEL DE JESÚS LÓPEZ JACOBO
Aspirante al Grado de:

Maestro en Ciencias en Ingeniería Ambiental

Después de escuchar las opiniones sobre el documento escrito e intercambiar puntos de vista, los miembros de la Comisión manifestaron SU APROBACIÓN, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes para su defensa ante el jurado correspondiente.

LA COMISIÓN REVISORA:

Dra. Itzel Galaviz Villa
Director

M.C. Irma Angélica García González
Codirector

Dra. María del Refugio Castañeda Chávez
Asesor

Dr. Arturo García Saldaña
Asesor

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

Boca del Rio, Ver., 09/septiembre/ 2019

ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

C. MISSAEL DE JESÚS LÓPEZ JACOBO
PASANTE DE LA MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL
PRESENTE

De acuerdo con el fallo emitido por los integrantes del Comité Revisor de la TESIS PARA OBTENCIÓN DE GRADO, desarrollada por usted cuyo título es:

"VEHÍCULO ACUÁTICO DE OPERACIÓN INALÁMBRICA CON SISTEMA DE DETECCIÓN DE OXÍGENO DISUELTO EN AGUA"

Esta División de Estudios de Posgrado e Investigación le concede AUTORIZACIÓN para que proceda a su impresión.

A T E N T A M E N T E
Excelencia en Educación Tecnológica®
Por nuestros hijos responderemos

M. C. ANA LETICIA PLATAS PINOS
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

SEP SNEST
TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE BOCA DEL RÍO
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

c.c.p. Coordinación de la Maestría
c.c.p. Expediente

"Un barco no debería navegar con una sola ancla,
ni la vida con una sola esperanza"

Epícteto

Dedico este trabajo a mi madre, a mi padre
y a mi hermano, porque siempre han estado
a mi lado, siendo un pilar para cumplir mis
sueños a pesar de la distancia.
Siempre están en mi corazón los amo.

Agradecimientos

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo económico para la realización de mis estudios de maestría, haciéndome crecer profesionalmente.

Dra. Itzel Galaviz Villa, directora de este trabajo de investigación, gracias por su amable atención y apoyo empleado a lo largo de mi formación académica, orientándome siempre a dar buenos resultados. Sus consejos estarán presentes en mi vida profesional.

Mtra. Irma Angélica García Gonzales, Dra. María del Refugio Castañeda Chávez y Dr. Arturo García Saldaña, agradezco y aprecio su inmensa disposición para resolver mis dudas y por guiarme en el transcurso del desarrollo de esta tesis.

A mis abuelitos David y Guadalupe, siempre han estado al pendiente de mí, su cariño y sus palabras de aliento hacen que quiera seguir adelante y jamás rendirme. Mucho de lo que soy ahora se lo debo a ustedes.

A mi familia que siempre han puesto su fe y confianza en mí, su motivación ha sido pieza clave para alcanzar este logro.

A mis amigos por todos esos momentos y experiencias inolvidables, por ofrecerme su apoyo en cada momento, les deseo lo mejor y una vida llena de éxitos.

A Judith Mena por permanecer siempre a mi lado en esta etapa tan importante de mi vida, por tu amor y apoyo incondicional, alegrando cada uno de mis días, llenando mi mente de positivismo con tu sonrisa.

Resumen

La vida acuática depende de la disponibilidad de oxígeno disuelto (OD) en el agua. Mientras que los organismos terrestres viven en una atmosfera compuesta de un 20% de oxígeno, aproximadamente, los organismos acuáticos sobreviven con una cantidad de oxígeno considerablemente menor. El oxígeno disuelto es un gas en constante cambio, bien sea por una alteración antropogénica o por alteraciones en el ambiente. Con el objetivo de monitorear de manera continua y en tiempo real los niveles de oxigenación en el agua, se implementó un sistema de detección de oxígeno disuelto con un sensor electroquímico compatible con placas de microcontroladores. Se diseñó y construyó un vehículo acuático tipo catamarán de operación remota encargada de transportar el sensor por la superficie del cuerpo de agua, asegurando el envío de datos de manera inalámbrica a un computador con protocolos de comunicación ZigBee. Se observó la estabilidad del prototipo para una navegación suave en aguas someras; el sistema de detección de oxígeno disuelto reveló que el protocolo de comunicación ZigBee, cumplió con él envió de datos de manera inalámbrica sin presentar ningún tipo de interferencia. La implementación del software para la interpretación de las variables e integración de una base de datos, no presentó problemas de compatibilidad con los módulos XBee. La determinación de OD fue realizado en dos estanques de tilapia de 10 m por 5 m con 7 puntos de muestreo en cada uno. Se evaluó la estabilidad del sensor, así como, la precisión y exactitud con ayuda de estadística básica. Como resultado en el estanque 1 se registró una concentración de OD promedio de 4.9 mg/L y en el estanque 2 de 3.69 mg/L. Las pruebas estadísticas para evaluar la confiabilidad del sensor electroquímico en la determinación de oxígeno disuelto, mostraron resultados positivos dentro de los parámetros aceptables. Demostrando así, estabilidad, precisión y exactitud, principios básicos de instrumentación para mediciones.

Abstract

Aquatic life depends on the availability of dissolved oxygen (DO) in water. While terrestrial organisms live in an atmosphere composed of about 20% oxygen, aquatic organisms survive with considerably less oxygen. Dissolved oxygen is a gas in constant change, either by anthropogenic alteration or alterations in the environment. A dissolved oxygen detection system with an electrochemical sensor compatible with microcontroller plates was implemented whit the objective of monitor continuously and in real time the levels of oxygenation in the water. A remote-operated catamaran-type aquatic vehicle was designed and built to transport the sensor across the water's surface, ensuring that data is sent wirelessly to a computer with ZigBee communication protocols. The stability of the prototype was observed for smooth navigation in shallow waters; the dissolved oxygen detection system revealed that the ZigBee communication protocol complied with it by sending data wirelessly without any interference. The implementation of the software for the interpretation of the variables and integration of a database did not present compatibility problems with the XBee modules. The determination of OD was performed in two 10 m by 5 m tilapia pools with 7 sampling points in each. Sensor stability, precision and accuracy were evaluated with basic statistics. As a result, an average OD concentration of 4.9 mg/L was recorded in pool 1 and an average OD concentration of 3.69 mg/L in pool 2. Statistical tests to evaluate the reliability of the electrochemical sensor in the determination of dissolved oxygen showed positive results and acceptable parameters. Demonstrating stability, precision and accuracy, basic principles of instrumentation for measurements.

Índice

Agradecimientos I
Resumen II
Abstract III
Índice de Figuras IV
Índice de Cuadros VI
Introducción 1
1. Marco teórico 3
1.1 Oxígeno disuelto 3
1.1.1 Métodos de obtención 4
1.2 Sensores 6
1.2.1 Características Técnicas 7
1.2.2 Sensor Electroquímico 8
1.3 Sistema de control 9
1.3.1 Funcionamiento de un sistema de control 10
1.3.2 Tipos de sistema de control 10
1.3.3 Control de procesos 11
1.3.4 Plataformas para la visualización y automatización de sistemas 12
1.4 Plataforma LabVIEW 13
1.4.1 Entorno de LabVIEW 13
1.4.2 Menús de LabVIEW 14
1.5 Plataforma Arduino 16
1.5.1 Funcionamiento 16
1.5.2 Hardware 16
1.5.3 Microcontrolador 18
1.5.4 Software 18
1.6 Medios de transmisión 19
1.6.1 Protocolo de Comunicación ZigBee 21
1.7 Embarcación 21
1.7.1 Tipos de embarcación según el número de cascos 22
1.7.2 Flotabilidad 23
1.8 Modelado 3D 24
2. Justificación 25
3. Hipótesis 26
4. Objetivos 26
4.1 Objetivo general 26
4.2 Objetivos específicos 26
5. Materiales y métodos 27
5.1 Área de desarrollo 27
5.2 Elección del casco 28

5.3 Dimensionamiento 29
5.3.1 Base de datos 29
5.3.2 Relación entre dimensiones 29
5.4 Diseño del casco 33
5.4.1 Generación de formas 33
5.4.2 Modelo 3D 35
5.4.3 Plano de líneas 38
5.5 Proceso de construcción del casco 39
5.5.1 Cuadernas 39
5.5.2 Montaje de las cuadernas a la cubierta principal 39
5.5.3 Colocación del forro 40
5.5.4 Laminado por fibra de vidrio y resina 40
5.6 Sistema de propulsión 41
5.6.1 Componentes 41
5.6.2 Descripción del funcionamiento 43
5.6.3 Diseño y construcción de las palas del timón 44
5.6.4 Montaje del sistema de propulsión y detallado estético 44
5.7 Comunicación con módulos XBee 46
5.7.1 Nuestra red XBee 47
5.8 Sistema de detección de oxígeno disuelto en agua 50
5.8.1 Componentes 50
5.8.2 Descripción del sistema de detección 52
5.8.3 Programación de la placa Arduino UNO 54
5.9 Programación en LabVIEW 55
5.9.1 Indicadores del panel frontal 55
5.9.2 Programación del diagrama de bloques 56
5.9.3 Comunicación entre XBee y LabVIEW 58
6. Resultados 60
6.1 Dimensiones del vehículo acuático 60
6.2 Plano de líneas 61
6.3 Prueba de navegación del vehículo acuático 62
6.4 Diseño del sistema de control 62
6.5 Adquisición de datos 63
6.6 Mediciones aceptables 65
7. Discusión 69
7.1 Comparativa de métodos de detección de OD 69
7.2 Sensor electroquímico 70
8. Conclusiones 72
9. Recomendaciones 73

Acrónimos 74
Anexo A. Definiciones y descripciones 75
Anexo B. Estaciones 76
Anexo C. Plano de Líneas 77
Anexo D. Vista de planta del plano de arreglo general 78
Anexo E. Memoria fotográfica proceso de construcción del vehículo acuático 79
Anexo F.- Configuración de los módulos XBee 84
Anexo G. Presupuesto 87
Anexo H. Materiales 88
Literatura citada 90

Índice de Figuras

Figura 1. Sensor galvánico de oxígeno disuelto. 5
Figura 2. Sonda LDO con capsula de sensor. 6
Figura 3. Diagrama de bloques de un sistema de lazo abierto. 10
Figura 4. Diagrama de bloques de un sistema de lazo cerrado. 11
Figura 5. Diagrama de bloques de un control de procesos. 11
Figura 6. Ejemplo de un diagrama de bloques y su correspondiente panel frontal. 13
Figura 7. Menú de herramientas de LabVIEW. 14
Figura 8. Menú de controles de LabVIEW. 15
Figura 9. Menú de funciones de LabVIEW. 15
Figura 10. Placa de microcontrolador Arduino UNO. 17
Figura 11. Integrated Development Environment de Arduino. 19
Figura 12. Estándares de comunicaciones inalámbricas. 21
Figura 13. Embarcación de placer tipo monocasco. 22
Figura 14. Embarcación de placer tipo catamarán. 23
Figura 15. Prototipo de embarcación tipo trimarán. 23
Figura 16. Principio de Arquímedes. 24
Figura 17. Mapa de la ubicación del Instituto tecnológico de Boca del Río. 27
Figura 18. Mapa de la ubicación del Instituto superior de Xalapa. 28
Figura 19. Relación entre dimensiones manga – eslora. 31
Figura 20. Relación entre dimensiones eslora – manga. 31
Figura 21. Relación entre dimensiones eslora – puntal. 32
Figura 22. Relación entre dimensiones manga – calado. 33
Figura 23. Estación cero del modelo base. 35
Figura 24. Estación cero del modelo final. 35
Figura 25. Rotación de las estaciones. 36
Figura 26. Acomodación 3D de las estaciones. 36
Figura 27. Cuadernas apreciando solo la semimanga. 37
Figura 28. Forro del casco del vehículo acuático. 37
Figura 29. Semimanga del casco en 3D. 38
Figura 30. Plantilla de la cubierta principal. 40
Figura 31. Conexiones del sistema de propulsión del vehículo acuático. 43
Figura 32. Dimensiones en mm de las palas del timón. 44
Figura 33. Dimensiones en mm de la distribución del sistema de propulsión. 45
Figura 34. Modulo USB explore y XBee S2Z Wire Antenna. 48
Figura 35. Shield XBee compatible con Arduino. 48
Figura 36. Configuración del módulo XBee coordinador. 49
Figura 37. Configuración del módulo XBee transmisor. 49
Figura 38. Llenado de la solución de NaOH en la sonda. 51
Figura 39. Esquema del sistema de detección de oxígeno disuelto en agua. 53
Figura 40. Indicador numérico “medidor analógico” del panel frontal. 55
Figura 41. Grafica de observación de la variable. 56
Figura 42. Bloque editable para el tiempo de muestreo. 56
Figura 43. Sección del diagrama de bloques para la impresión de resultados. 57
Figura 44. Ultima sección de la programación en el diagrama de bloques. 57
Figura 45. Menú de funciones VISA. 58
Figura 46. VI de comunicación con la placa XBee. 59
Figura 47. Ventana VISA Serial para configurar el puerto serial. 59

Figura 48. Selección del puerto serial en el panel frontal. 59
Figura 49. Vista transversal del plano de líneas. 61
Figura 50. Vista de planta del plano de líneas. 61
Figura 51. Vista longitudinal del plano de líneas. 61
Figura 52. Panel frontal del sistema. 62
Figura 53. Diagrama de bloques del sistema. 63
Figura 54. Puntos de muestreo. 63
Figura 55. Estadística aplicada a los datos del estanque 1. 66
Figura 56. Estadística aplicada a los datos del estanque 2. 67

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Rango de concentraciones de oxígeno y consecuencias eco sistemáticas. 3
Cuadro 2. Ventajas y desventajas de una embarcación catamarán frente a una embarcación monocasco. 28
Cuadro 3. Base de datos de embarcaciones tipo catamarán. 30
Cuadro 4. Distancia entre estaciones. 34
Cuadro 5. Distancias de los cortes longitudinales. 38
Cuadro 6. Distancias de los cortes horizontales. 39
Cuadro 7. Significado de cada letra de la distribución del sistema de propulsión. 45
Cuadro 8. Comparativa de Tecnologías de la comunicación. 46
Cuadro 9. Dimensiones preliminares del vehículo acuático. 60
Cuadro 10. Escala aplicada a las dimensiones preliminares. 60
Cuadro 11. Dimensiones principales del vehículo acuático. 60
Cuadro 12. Datos obtenidos por punto de muestreo en el estanque de cultivo número 1. 64
Cuadro 13. Datos obtenidos por punto de muestreo en el estanque de cultivo número 2. 65
Cuadro 14. Promedio de las concentraciones de Oxígeno Disuelto de cada punto de muestreo. 68
Cuadro 15. Estadística de los estanques de cultivo. 68
Cuadro 16. Comparativa entre métodos de medición de OD. 70

Introducción

La vida acuática depende de la disponibilidad de oxígeno disuelto (OD) en el agua. Mientras que los organismos terrestres viven en una atmosfera compuesta de un 20% de oxígeno, aproximadamente, los organismos acuáticos sobreviven con una cantidad de oxígeno considerablemente menor (Sawyer & McCarty, 1978).

El nivel de oxígeno disuelto es un indicador de contaminación del agua, generalmente entre más elevado sea el nivel de oxígeno disuelto, mayor es la calidad de agua. Cuando los niveles de oxígeno disuelto son muy bajos, algunos peces y otros organismos disminuyen su índice de supervivencia (Apple et al., 2006).

Las fuentes antropogénicas, principalmente, generan desechos en ríos, lagos, lagunas y esteros; los cuales modifican de manera considerable la concentración de oxígeno disuelto y producen alteraciones en la flora y fauna, como son: enfermedades, crecimiento interrumpido de las especies y el aumento de la mortalidad de la flora y fauna (Revilla et al., 1994).

Considerando la importancia de este vital elemento, se debe monitorear de manera continua esta variable y así, garantizar niveles regulares u óptimos de oxígeno disuelto en los sistemas acuáticos. La acuacultura es el principal sector productivo interesado en la calidad del agua de los sistemas acuáticos. El monitoreo de oxígeno disuelto puede ser registrado a través de equipos de medición con el fin de mantener la calidad del agua y aumentar la producción, simulando las condiciones generales que dichos organismos tienen en su ambiente silvestre (Torres et al., 2016).

El avance y desarrollo tecnológico de pequeños dispositivos electrónicos como son los sensores, hacen posible mantener el control de esta variable, gracias a su practicidad, velocidad de registro de datos y costo, así como la optimización de producción en serie. Los sensores suelen clasificarse como físicos, biológicos y químicos, y entre estas categorías se ubican los sensores electroquímicos (Baez, 2017).

Los sensores son dispositivos que transforman la información física o química en una señal útil que puede ser procesada; estos instrumentos facilitan la obtención de información de una manera eficaz y sin necesidad de análisis complejos (Adam et al., 1991).

En algunos casos, en condiciones de trabajo de campo, es necesaria la medición de parámetros a distancia de forma inalámbrica y con libertad de movimiento; bajo estas condiciones se han desarrollado protocolos de comunicación inalámbrica como son, el Wifi, Bluetooth, sistemas de radiocomunicación o protocolos ZigBee, entre otros. Adicionalmente, el uso de vehículos operados remotamente para el transporte del sistema de medición ha sido una opción tecnológica eficaz para reducir el tiempo y registro de datos en cobertura de mayores áreas de medición (Diaz et al., 2011). Por lo anterior, el objetivo de este trabajo de investigación es diseñar e implementar un vehículo acuático de operación inalámbrica para la medición aceptable de la concentración de oxígeno disuelto en agua.

1. Marco teórico

1.1 Oxígeno disuelto

El oxígeno es un componente clave en la respiración celular tanto para la vida acuática como para la vida terrestre. La concentración de oxígeno disuelto (OD) en un ambiente acuático es un indicador importante de la calidad del agua ambiental (Apple et al., 2006).

La solubilidad del oxígeno en agua dulce varía entre 14.6 mg/L a 0°C hasta aproximadamente 7 mg/L a 35°C bajo una presión de 760 mmHg. La concentración de oxígeno disuelto en agua está determinada por la ley de Henry, que describe la relación de equilibrio entre la presión parcial de oxígeno atmosférico y la concentración de oxígeno en agua (Sawyer & McCarty, 1978).

El oxígeno gaseoso se disuelve en el agua por diversos procesos como la difusión entre la atmósfera y el agua, oxigenación por el flujo del agua sobre las rocas y otros detritos, la agitación del agua por las olas y el viento y la fotosíntesis de plantas acuáticas. Diversos factores afectan la concentración de oxígeno disuelto en un ambiente acuático. Estos factores incluyen: temperatura, flujo de la corriente, presión del aire, plantas acuáticas, materia orgánica en descomposición y actividad humana (Apple et al., 2006). Si es consumido más oxígeno del que se produce, la variable de OD caerá, alcanzando niveles por debajo de los necesarios para la vida de muchos organismos (Goyenola, 2007) (Cuadro 1).

Cuadro 1. Rango de concentraciones de oxígeno y consecuencias eco sistemáticas.

(OD) mg/L	Condición	Consecuencias
0	Anoxia	Muerte masiva de organismos aerobios.
0-5	Hipoxia	Desaparición de organismos y especies sensibles.
5-8	Aceptable	(OD) adecuadas para la vida de la mayoría de las especies
8-12	Buena	u organismos acuáticos.
>12	Sobresaturada	Sistema en plena producción fotosintética.

1.1.1 Métodos de obtención

Actualmente existen 3 métodos para determinar la concentración de OD en muestras de agua: método Winkler o yodométrico, el método por electrodos de membrana o electrométrico, y el más reciente; el método por LDO (Luminescent Disolved Oxygen) aplicando el uso de sensores ópticos.

1.1.1.1 Método Winkler

Es el método más exacto. Se basa en la adición de solución de manganeso divalente, seguido de álcali fuerte, a la muestra contenida con un tapón de vidrio de cierre hidráulico. El OD se oxida rápidamente una cantidad equivalente del precipitado disperso de hidróxido de manganeso divalente a hidróxidos con mayor estado de valencia (Standard methods for the Examination of Water and Wastewater, 1995).

En ausencia de OD:

$$Mn_{2+} + 2OH \rightarrow Mn(OH)_2 \text{ (precipitado blanco)} \qquad (1)$$

En presencia de OD:

$$Mn_{2+} + 2OH + O_2 \rightarrow MnO_2 + H_2\text{O (precipitado marrón)} \qquad (2)$$

En presencia de iones de yoduro, en solución ácida, el manganeso oxidado revierte el estado divalente, con liberación de yodo en cantidad equivalente al contenido original de OD.

$$MnO_2 + 2I + 4H^+ \rightarrow Mn_{2+} + I_2 + 2H_2\text{O} \qquad (3)$$

Se valora con una solución patrón de tiosulfato de sodio 0.025M. El punto final se puede detectar visualmente con un indicador de almidón o con técnicas potenciométricas.

1.1.1.2 Método electrométrico

El método del electrodo de oxígeno ofrece varias ventajas sobre el método Winkler, porque es un método rápido, elimina o minimiza interferencias, permite el monitoreo continuo y la realización de mediciones *in situ*. Sin embargo, este método no es tan

exacto como el método Winkler. Los electrodos actuales dependen de una membrana que es selectivamente permeable, dejando entrar oxígeno disuelto en la celda de medición, lo que permite eliminar la mayoría de las interferencias. La calibración y la medición son procesos relativamente simples y normalmente se obtiene una lectura directa de la concentración de oxígeno (Sawyer & McCarty, 1978).

Los electrodos de membrana sensibles al oxígeno, de tipo galvánico o polarográfico, están formados por dos electrodos sólidos, de metal, en contacto con un electrolito de soporte con una membrana selectiva que lo separa de la solución de prueba. La diferencia básica entre los sistemas galvánico y polarográfico, es que en el primero la reacción del electrodo es espontánea; mientras que el segundo, es necesario una fuente externa de voltaje para polarizar el electrodo indicador. Las membranas regularmente están hechas de polietileno o fluorocarbono, debido a la permeabilidad del oxígeno molecular y a su relativa resistencia (GUEMISA, 2018). Es importante mencionar que esta investigación tuvo como bases este método para la determinación de oxígeno disuelto en agua.

Figura 1. Sensor galvánico de oxígeno disuelto.

1.1.1.3 Método óptico

El método óptico para la medida de oxígeno disuelto elimina las desventajas relativas a los métodos electroquímicos tradicionales. El principio LDO (Luminescent Disolved Oxygen) está basado en el fenómeno físico de la luminiscencia, que se define como la propiedad de algunos materiales (luminóforos) de emitir luz cuando son excitados por un estímulo diferente del calor. En este caso, el estímulo del principio LDO es la luz. Al seleccionarse la combinación adecuada

de luminóforo y de longitud de onda de la luz de excitación, la intensidad de la luminiscencia y el tiempo que ésta tarda en desvanecerse dependerán de la concentración de oxígeno que rodea el material (Hack, 2017).

Para llevar a cabo una medición, el LED de excitación transmite luz azul pulsada. La luz azul de alta energía permite realizar medidas de gran precisión. El pulso luminoso (50 mili segundos) incide, a través del material portador transparente, en el luminóforo, al que transfiere parte de su energía radiante. Esto hace que algunos de los electrones del luminóforo salten de su nivel energético básico a un nivel superior. En un intervalo de microsegundos esos electrones retroceden a su nivel original pasando por varios niveles intermedios, y la diferencia de energía se emite en forma de luz roja. Cuando las moléculas de oxígeno están en contacto con el luminóforo, se producen dos efectos: Por una parte, las moléculas de oxígeno son capaces de absorber la energía de los electrones del nivel superior y facilitar su regreso al nivel energético básico sin emitir luz. Cuanto mayor sea la concentración de oxígeno, mayor será la reducción de la intensidad de la luz roja emitida (EPA, 2006).

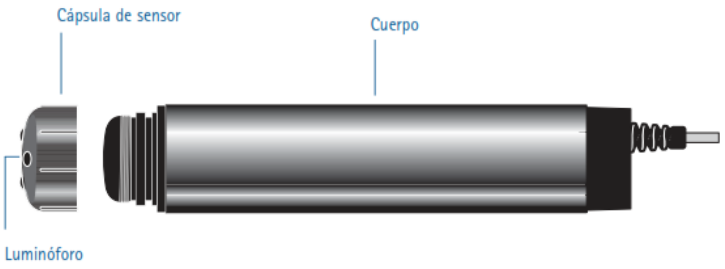


Figura 2. Sonda LDO con capsula de sensor.

1.2 Sensores

Un sensor es todo aquello que tiene una propiedad sensible a una magnitud del medio; transforman la información física o química en una señal útil que pueda ser procesada, por tanto, facilita información de interés de una manera rápida (Cano, 2008).

Un sensor en la industria, es un objeto capaz de variar una propiedad ante magnitudes físicas o químicas, llamadas variables de instrumentación, y transformarlas con un transductor en variables eléctricas. Las variables de instrumentación pueden ser por ejemplo: intensidad lumínica, temperatura, distancia, aceleración, inclinación, presión, desplazamiento, fuerza, torsión, humedad, movimiento, pH, entre otras. Una magnitud eléctrica puede ser una resistencia eléctrica (como un RTD, Resistance temperatura detector), una capacidad eléctrica (como en un sensor de humedad), una tensión eléctrica (como en un termopar), una corriente eléctrica , entre otras (SISCODE, 2015).

1.2.1 Características Técnicas

- Rango de medida: dominio en la magnitud medida en el que puede aplicarse el sensor.
- Precisión: es el error de medida máximo esperado.
- *Offset* o desviación de cero: valor de la variable de salida cuando la variable de entrada es nula. Si el rango de medida no llega a valores nulos de la variable de entrada, habitualmente se establece otro punto de referencia para definir el *offset* (down).
- Linealidad o correlación lineal.
- Sensibilidad de un sensor: suponiendo que es de entrada a salida y la variación de la magnitud de entrada.
- Resolución: mínima variación de la magnitud de entrada que puede detectarse a la salida.
- Rapidez de respuesta: puede ser un tiempo fijo o depender de cuánto varíe la magnitud a medir. Depende de la capacidad del sistema para seguir las variaciones de la magnitud de entrada.
- Derivas: son otras magnitudes, además de la medida como magnitud de entrada, que influyen en la variable de salida. Por ejemplo, pueden ser condiciones ambientales, como la humedad, temperatura u otras como el envejecimiento (oxidación, desgaste, entre otras) del sensor.

- Repetitividad: error esperado al repetir varias veces la misma medida.

1.2.2 Sensor Electroquímico

Desde hace varios años la tecnología de los sensores ha tomado gran importancia en la química analítica y en algunos otros campos de la investigación y desarrollo. Los sistemas sensores suelen clasificarse como físicos, biológicos y químicos, y entre estas categorías pueden estar los sensores electroquímicos. Una definición clásica de sensor químico es la de "pequeño dispositivo que como resultado de una interacción química entre el analito gaseoso y el sensor, transforma información química o bioquímica de tipo cualitativo o cuantitativo en una señal medible y útil analíticamente" (Stetter et al., 2003).

Cuando la determinación se hace a través de un electrolito líquido se denomina al dispositivo sensor electroquímico. Cuando se trata de la determinación de una propiedad física, y no de un analito, generalmente se le llama sensor físico. La fabricación de los sensores electroquímicos es más simple y económica que el resto de los transductores y, además, poseen un amplio intervalo de linealidad y corto tiempo de respuesta. Así mismo, los equipos necesarios para recoger y procesar la señal, tales como potenciostatos y conductímetros, son económicos, de fácil mantenimiento, manejo y miniaturización; y son de uso común en la mayoría de laboratorios de análisis (Cano, 2008).

Los sensores electroquímicos han sido clasificados como potenciométricos (monitoreo del voltaje), amperométricos (monitoreo de la corriente) y conductimétricos (monitoreo de la conductividad o resistencia).

1.2.2.1 Características comunes

Bajo Consumo de Energía, lo que permite que el sensor sea usado en unidades portátiles, alimentadas con baterías.

Buena Sensibilidad. Por ello se trata de un tipo de sensor muy conveniente para aplicaciones de límite permisible en el área de trabajo.

Selectividad. En comparación con otros sensores, algunos sensores electroquímicos son bastante selectivos al elemento químico objetivo para el cual fueron diseñados.

Expectativa de Vida. La expectativa de vida de un sensor electroquímico depende de diversos factores, incluyendo el elemento a ser detectado y las condiciones medioambientales en las que el sensor se utilizará. Generalmente, la vida útil de este tipo de sensores es de uno a tres años. Sin embargo, algunos sensores son especificados de acuerdo a la dosificación de exposición al elemento, como por ejemplo un sensor de amoníaco, típicamente catalogado para 5000 ppm/hora. En otras palabras, si el sensor es expuesto a 50 ppm de amoníaco constantemente, el supuesto es que el sensor funciona 100 horas.

En general, un sensor electroquímico es un tipo de sensor comúnmente usado en instrumentos portátiles para aplicaciones de bajas concentraciones. Para aplicaciones estacionarias, el uso es más limitado.

1.3 Sistema de control

La instrumentación es parte de la electrónica y tiene como objetivo observar y medir el mundo físico empleando herramientas electrónicas, como por ejemplo; los sensores (Menéndez, 2015).

Un sistema, es un conjunto de elementos o componentes simples que se relacionan e interactúan entre sí para realizar una acción. Un sistema no está necesariamente limitado a los sistemas físicos. El concepto sistema se puede aplicar a fenómenos abstractos y dinámicos (Ogata, 2010).

Un sistema de control es aquel que obtiene información de un proceso físico mediante la asignación de un número a una propiedad de un objeto o suceso, esto con el objetivo de controlar un proceso y proporcionar información para la verificación de un sistema. La información obtenida por un sistema de control es presentada a un observador para su análisis (Menéndez, 2015).

1.3.1 Funcionamiento de un sistema de control

Entrada: Valor verdadero

Sistema:

- **Adquisición de datos:** Se adquiere la información de las variables a medir y convierte a una señal eléctrica.
- **Procesamiento de datos:** Se procesan, seleccionan y manipulan los datos mediante un microcontrolador.
- **Distribución de datos:** Se presenta el valor medido, se almacena o se retransmite a otro sistema.

Salida: Valor medido

1.3.2 Tipos de sistema de control

El lazo abierto es aquel sistema en el cual la acción de control es, en cierto modo, independiente de la salida. Este tipo de sistemas por lo general utilizan un regulador o actuador con la finalidad de obtener una respuesta (Hernández, 2010).

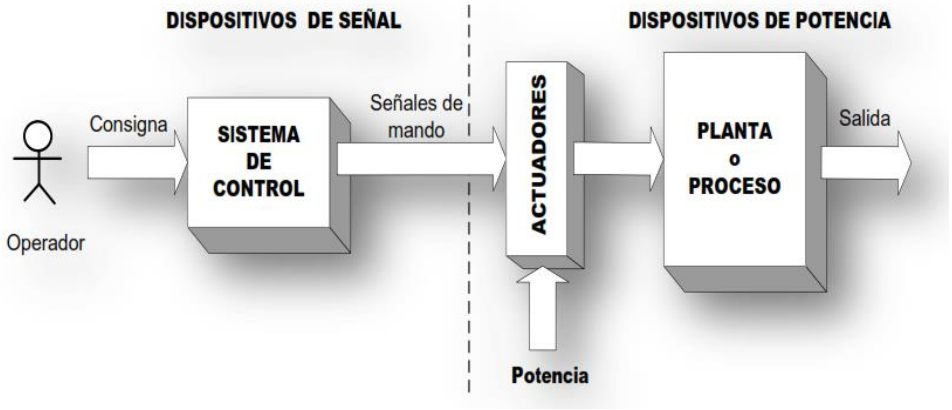


Figura 3. Diagrama de bloques de un sistema de lazo abierto.

En lazo cerrado o realimentado, es aquel sistema en el cual la acción de control depende de la salida. Dicho sistema utiliza un sensor que detecta la respuesta real para compararla con una referencia a manera de entrada. Por esta razón, los sistemas de lazo cerrado se denominan sistemas retroalimentados (Hernández, 2010).

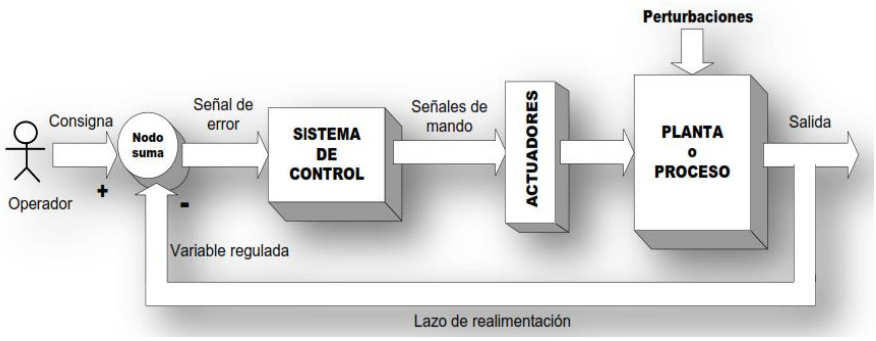


Figura 4. Diagrama de bloques de un sistema de lazo cerrado.

1.3.3 Control de procesos

El control del proceso consiste en la recepción de entradas, variables del proceso, procesamiento y comparación con valores predeterminados por el usuario, y posterior corrección. Esto, en caso de que se haya producido alguna desviación respecto al valor preestablecido del parámetro de proceso. En la siguiente figura se muestra una representación más simple de lo que es un control de procesos.

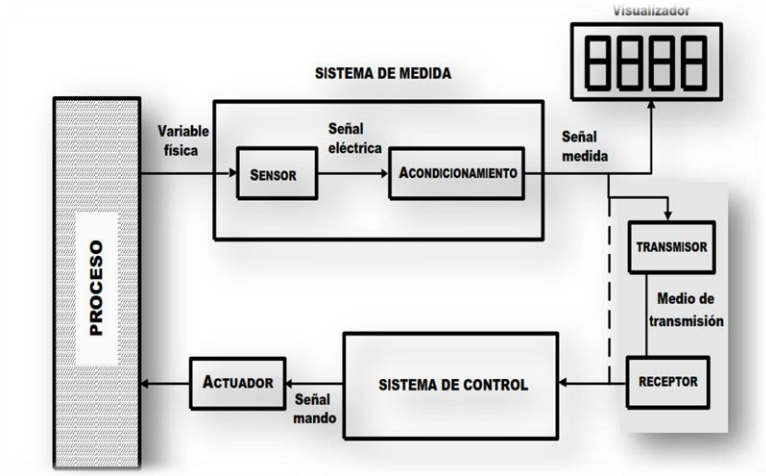


Figura 5. Diagrama de bloques de un control de procesos.

A continuación, se explica cada uno de estos bloques:

Sensor: Dispositivo que lleva a cabo la transducción, es decir, la transformación de la variable física en una variable eléctrica.

Acondicionamiento: Se trata del circuito que permite ofrecer al sistema de control una señal tratable (corriente, tensión, frecuencia) actuando sobre la salida del sensor. Lo más típico del acondicionamiento es la amplificación y el filtrado de señal.

Visualizador: Es la interfaz entre el sistema de medida y las facultades de percepción humanas. En ella, las unidades de representación visual analógica o digital, monitores, registradores, entre otros; son ejemplos de esta función.

Transmisor: Se encarga del envío de la señal de medida hasta el receptor.

Receptor: Toma la señal enviada por el transmisor y se la pasa al sistema de control para su análisis.

Sistema de control: Se encarga del procesamiento de datos de la señal de control y genera las señales de mando que accionan los actuadores.

Actuador: Es el dispositivo o dispositivos que modifican el proceso.

Proceso: Bloque con una o varias variables de salida que son controladas con las variables de entrada provenientes del actuador.

1.3.4 Plataformas para la visualización y automatización de sistemas

En la última década, el desarrollo de la tecnología en sistemas de cómputo ha traído innovaciones en el diseño, automatización y visualización de datos en los sistemas de control. En la actualidad, los analistas poseen gran variedad de softwares o plataformas a disposición, permitiéndoles ampliar el área de investigación en diversos temas. Las plataformas de apoyo para los sistemas engloban soluciones prácticas para el desarrollo de varias actividades (García et al., 2006).

Las plataformas de interés en la presente investigación, se relacionan con la programación, automatización y visualización de las variables adquiridas a partir de un sistema de detección. En los siguientes capítulos, se mencionan las principales plataformas utilizadas.

1.4 Plataforma LabVIEW

LabVIEW es el acrónimo de Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench; el cual es un entorno de desarrollo gráfico para crear aplicaciones de adquisición de datos, control de instrumentos, análisis de medidas y presentaciones de datos. LabVIEW es un lenguaje potente en un ambiente de programación, pero más sencillo que los entornos tradicionales. National Instruments es la empresa desarrolladora y propietaria de LabVIEW, comenzó en 1976 en Austin, Texas; lanzando su producto al mercado en octubre de 1986 (Lajara & Pelegrí, 2007).

1.4.1 Entorno de LabVIEW

Un programa desarrollado en LabVIEW es llamado un instrumento virtual. Un instrumento virtual lo podemos definir como un módulo de software que simula un instrumento físico. Este software debe poseer un hardware controlado por el ordenador, permitiendo acceder a los datos externos al instrumento (Sánchez et al, 1998). El instrumento virtual está compuesto por un panel frontal y un diagrama de bloques. El primero es la interface humano máquina donde se encuentran controles e indicadores del instrumento virtual. Los controles e indicadores simulan la apariencia de un instrumento real. En el diagrama de bloques se encuentra el código de programación en el cual está basado en iconos que se conectan para establecer un flujo de datos; cada control e indicador del panel frontal tiene un terminal que lo representa en el diagrama de bloques y en esta terminal viajan datos a través de alambres de conexión (Quiñones & Bernal , 2011).

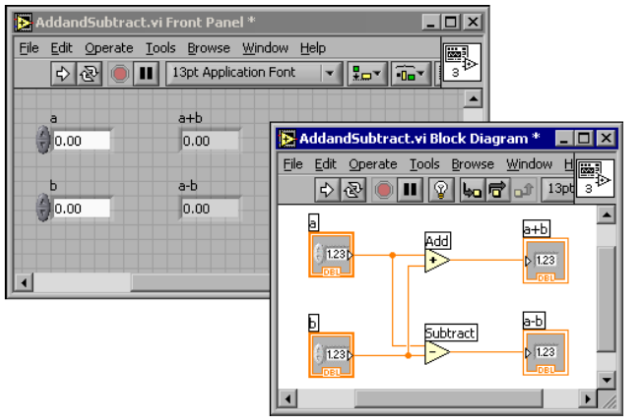


Figura 6. Ejemplo de un diagrama de bloques y su correspondiente panel frontal.

1.4.2 Menús de LabVIEW

1.4.2.1 Menú de Herramientas

Mediante el menú de herramientas se puede seleccionar el instrumento que se dese usar. Cada instrumento tiene su función, ya sea para cambiar valores en los controles del panel frontal, indicar posiciones de los objetos, escribir texto, cablear, mover contenido de las ventanas y editar colores dentro de la interfaz.

Figura 7. Menú de herramientas de LabVIEW.

1.4.2.2 Menú de Controles

El menú que aparece en el panel frontal es el menú de controles, en él se pueden seleccionar los terminales que servirán para interactuar con el usuario. Los terminales se dividen en controles e indicadores. Están clasificados en varios submenús y dentro de cada uno se encuentran otros que clasifican los controles por el tipo de datos. Para usar los controles hay que seleccionar el terminal deseado y arrastrarlo dentro del panel frontal (Lajara & Pelegrí, 2007).

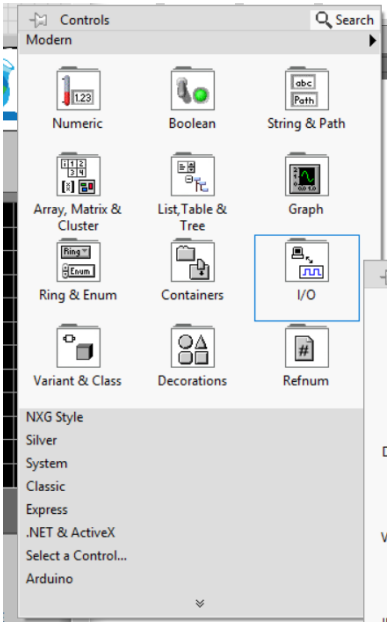


Figura 8. Menú de controles de LabVIEW.

1.4.2.3 Menú de funciones

Este menú es el que se muestra al trabajar en el diagrama de bloques. En este menú se encuentran las herramientas necesarias para la programación, como: adquisición de datos, insertar variables, crear operaciones, comparar datos, leer puertos seriales, tiempos de muestreo, estructuras o ciclos; por mencionar algunos.

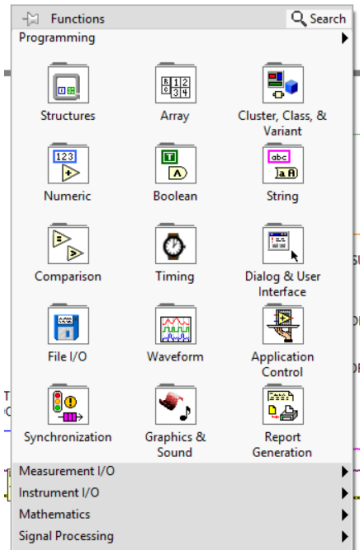


Figura 9. Menú de funciones de LabVIEW.

1.5 Plataforma Arduino

Arduino es una plataforma electrónica de prototipado de código abierto fundamentada en software y hardware flexibles y de uso sencillo. Está diseñada para desarrollar objetos interactivos autónomos, recibiendo entradas desde sus entradas analógicas y digitales para intervenir en su entorno a través del control de luces, motores, sensores y otros dispositivos (Menéndez, 2015).

El microcontrolador de la placa se programa con *"Arduino Programming Language"* (basado en *Wiring*) y *"Arduino Development Environment"* (basado en *Processing*), de descarga gratuita.

1.5.1 Funcionamiento

Las funciones de Arduino, como ocurre con la mayoría de las placas de microcontroladores, se pueden resumir en 3 factores:

- Cuenta con una interfaz de entrada. Esta puede estar directamente unida a los periféricos, o conectarse a ellos a través de puertos.
- La interfaz de entrada tiene como objetivo trasladar la información al microcontrolador. El microcontrolador es la pieza que se encarga de procesar esos datos. Además, varía dependiendo de las necesidades del proyecto en el que se desee usar la placa; y existe una gran variedad de fabricantes y versiones disponibles.
- También cuenta con interfaz de salida. Este se encarga de llevar la información procesada a los periféricos autorizados para hacer el uso final de datos. En algunos casos puede emplearse otra placa en la que se centraliza y procesa la información de forma totalmente renovada; o ser una pantalla o altavoz encargado de mostrar la versión final de los datos.

1.5.2 Hardware

En el aspecto *hardware,* Arduino consiste en una placa con un microcontrolador y puertos de entrada/salida. Ofrece gran variedad de placas electrónicas de distintas

características, permitiendo al usuario elegir aquella que mejor se adapte a sus necesidades. En el presente trabajo se utilizó una placa de Arduino UNO.

1.5.2.1 Arduino UNO

Es la última revisión de la placa básica Arduino USB. La placa tiene un tamaño de 75x53mm. Su unidad de procesamiento consiste en un microcontrolador ATmega328. Puede ser alimentada por un cable USB estándar o alimentación externa y contiene todo lo que se puede necesitar para programar y usar la placa (Lledó, 2010).

Características:

- Microcontrolador ATmega328.
- Voltaje de entrada 7-12V.
- 14 pines digitales de I/O (6 salidas PWM).
- 6 entradas análogas.
- 32k de memoria Flash.
- Reloj de 16MHz de velocidad.

Figura 10. Placa de microcontrolador Arduino UNO.

1.5.3 Microcontrolador

Un microcontrolador es un circuito integrado de muy alta escala de integración que puede ser usado para diversos propósitos debido a que es programable. Está compuesto por una unidad central de proceso (CPU), memorias (ROM y RAM) y líneas de entrada y salida (periféricos). Es decir, el microcontrolador es un computador integrado en un solo chip (Cucho et al., 2007).

Un microcontrolador tiene los mismos bloques de funcionamiento básicos de una computadora, lo que permite tratarlo como un pequeño dispositivo de cómputo.

El cerebro principal de la placa Arduino UNO es un microcontrolador ATmega328. Este es un circuito integrado de 8 bits de alto rendimiento. Contiene una unidad central de procesamiento (CPU), memoria, arreglos, relojes, entradas y salidas en un mismo chip. El microcontrolador ATmega328 es derivado del procesador original ATmega8. La principal ventaja del ATmega328 sobre su predecesor, es una mayor memoria y capacidad periférica, con menor requerimiento de energía. Debido a la capacidad de ejecutar gran cantidad de instrucciones en un ciclo de reloj, es como alcanza un buen balance entre velocidad de proceso y consumo de energía (Wheat, 2012).

1.5.4 Software

Para funcionar, las placas Arduino requieren que se carguen los *sketches* en sus microcontroladores, y para ello es necesario el uso del software de Arduino, que se encuentra disponible de forma gratuita en su página web oficial. Si la placa necesita una conexión USB con el ordenador, se deberán instalar los drivers USB para el chip de la placa, que también pueden encontrarse en la página de Arduino.

1.5.4.1 Arduino IDE (Integrated Development Environment)

El entorno de desarrollo Arduino está escrito en Java y basado en Processing, avr-gcc y otro *software* de código abierto. Está formado por una serie de menús, una barra de herramientas con botones para las funciones comunes, un editor de texto donde escribiremos el código, un área de mensajes y una consola de texto (Lledó, 2010). Facilita la conexión con el *hardware* de Arduino para cargar los programas y

establecer comunicación con ellos. Cada uno de los programas de Arduino se denomina *sketch*, y se escriben en el editor de texto, donde es posible cortar/pegar y buscar/reemplazar texto. En el área de mensajes aparece información simultanea durante la carga de programas, y despliega los errores en caso de presentarse.

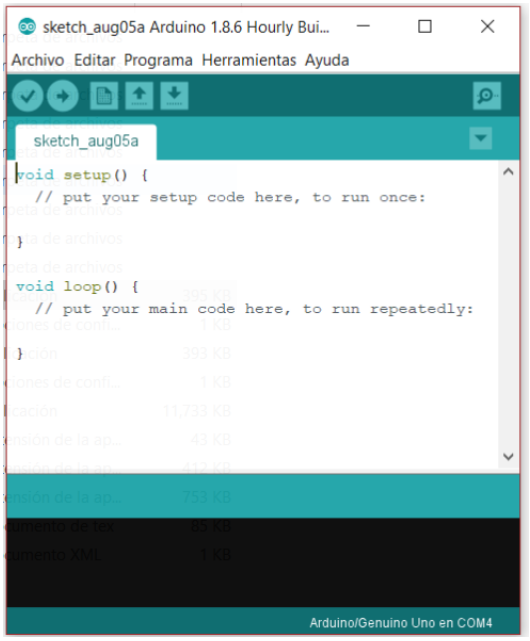


Figura 11. Integrated Development Environment de Arduino.

1.6 Medios de transmisión

Es el soporte físico a través del cual se produce un intercambio de información entre diferentes elementos de una red. Se pueden clasificar en: Cableados e Inalámbricos (Rodríguez, 2014). Destacando los medios de transmisión vía inalámbrica para este trabajo de investigación.

1. **Cableados**

Corriente Portadora (PL). Utiliza como soporte físico las líneas eléctricas de las viviendas.

Par Metálico. Utiliza como soporte físico cables formados por uno o varios conductores de cobre capaces de cubrir un amplio rango de aplicaciones. Este medio permite transportar voz, datos y la propia alimentación de los dispositivos.

Fibra Óptica (FO). Utiliza como soporte físico un material dieléctrico transparente, por el que se envían pulsos de luz que constituyen los datos a transmitir.

Coaxial. Estos cables están formados por un par de conductores concéntricos separados por un aislante dieléctrico. El conductor central transporta los datos, mientras que la malla exterior actúa como retorno de la corriente y referencia de tierra.

2. **Inalámbricos**

Infrarrojos. La comunicación entre dos dispositivos se realiza a partir de un diodo emisor que emite una onda en la banda de infrarrojo con la información. Es necesaria la presencia de un fotodiodo receptor el cual extrae la información de la señal recibida.

Radiofrecuencia. La comunicación se realiza mediante el empleo de la banda del espectro electromagnético situada entre los 3 Hz y los 300 GHz. Es uno de los medios más utilizados por su flexibilidad, capacidad de transmisión y ausencia de cableado.

Wi-Fi (Wireless Fidelity). Es una de las tecnologías inalámbricas más usadas en la actualidad y está presente en multitud de hogares. Las redes Wi-Fi son redes WLAN (Wireless Local Area Network) que se basan en el estándar internacional IEEE 802.11. El empleo de esta tecnología permite conexiones rápidas y muy seguras ya que dispone de diferentes mecanismos de seguridad. Es usada principalmente para comunicar ordenadores, tablets o smartphones a un router y permitir así la conexión a internet de estos dispositivos.

Bluetooth. Es un estándar de comunicaciones típico de las redes WPAN (Wireless Personal Area Network) y permite enlaces de corto alcance y bajo consumo. Es una tecnología que opera en la banda de frecuencia ISM (alrededor de los 2.4 GHz) y asegura la trasmisión de datos, voz o video.

ZigBee. Permite una comunicación inalámbrica de baja velocidad y es típica de las redes LR-WPAN, opera en la banda ISM y está basada en el estándar internacional IEEE 802.15.4.

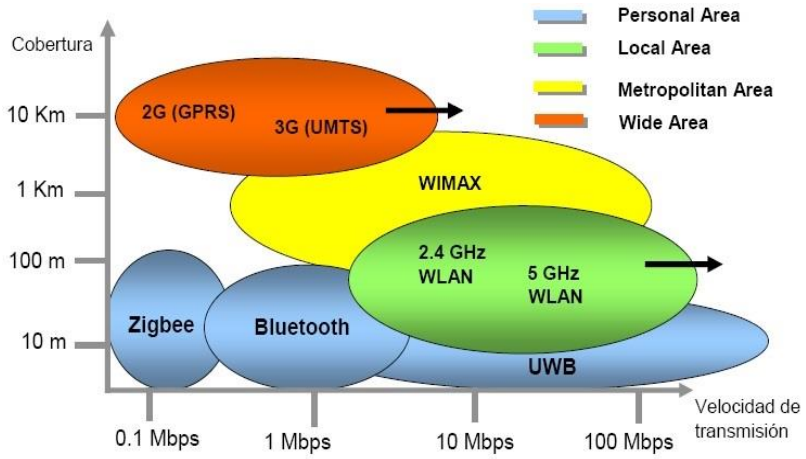


Figura 12. Estándares de comunicaciones inalámbricas.

1.6.1 Protocolo de Comunicación ZigBee

ZigBee es una tecnología ideal para redes sencillas que no necesitan de grandes velocidades, lo que permite un bajo consumo y un coste reducido (Durango et al., 2012). ZigBee, es recomendada para redes con dispositivos que requieren una duración prolongada de las baterías. Todo esto ha hecho que sea una de las tecnologías más empleadas en el ámbito de la comunicación y que más posibilidades ofrece para el control de temperatura, accesos, encendido o apagado de luces, entre otras (Bonsawat et al., 2010). Esta tecnología ha sido seleccionada por ser inalámbrica, de bajo costo y consumo, y por ser abierta. Esto permite desarrollar el hardware y software que se desee.

1.7 Embarcación

Como definición es todo tipo de artilugio capaz de navegar sobre o bajo el agua. La mayor parte de las embarcaciones pueden ser descritas como barcos, buques o botes, canoas, piraguas, kayaks, balsas y hasta tablas de surf. Un buque o barco es un vehículo flotante que ha de reunir una serie de cualidades para navegar, derivadas del ámbito en que se desenvuelve y de su condición móvil (Duarte, 1993).

1.7.1 Tipos de embarcación según el número de cascos

Monocasco es el diseño más común y abundante, tanto en embarcaciones motoras como en veleros; como su nombre lo indica, el casco consta de un único cuerpo. Del cual depende la flotabilidad y en mayor o menor medida la navegabilidad y la gobernabilidad. Dentro de los monocascos, existen una gran variedad de diseños. Según el cometido de la embarcación sus formas variarán de una u otra forma con el objetivo de acentuar las características que más interesen.

Figura 13. Embarcación de placer tipo monocasco.

El catamarán es una embarcación que se caracteriza por poseer dos cascos separados y unidos por una plataforma que generalmente es la cubierta. Es una embarcación que se caracteriza por ser de las más ligeras, por generar una fricción menor con la superficie marina, por lo que alcanza mayores velocidades. Así mismo, tienen una mayor estabilidad en aguas tranquilas, aunque ésta es menor con oleaje que en una embarcación monocasco convencional (Busto, 2008). La palabra catamarán es una evolución de “kattoo maram”, término que utilizaba la tribu Maorí de Nueva Zelanda que significa “troncos unidos”.

Figura 14. Embarcación de placer tipo catamarán.

El trimarán es una embarcación que consta de tres cuerpos flotantes, unidos por una estructura transversal, que generalmente es la cubierta, como en el caso del catamarán. El casco central es el cuerpo principal donde recae el mayor porcentaje de la flotabilidad y habitabilidad. Mientras que el resto queda repartido entre los cascos laterales denominados flotadores, que dotan al trimarán de la estabilidad de la cual se caracteriza (Chiew, 2016).

Figura 15. Prototipo de embarcación tipo trimarán.

1.7.2 Flotabilidad

Este se debe al principio de Arquímedes, “todo cuerpo total o parcialmente sumergido en un fluido en reposo, experimenta un empuje vertical hacia arriba igual al peso del volumen del fluido desalojado”. La capacidad de flotación se debe a la presión hidrostática ejercida sobre el casco que, con una velocidad igual a cero, el balance de fuerzas hidrostáticas es igual al peso del volumen del agua desalojada (Mott, 2006).

Simplificando, se considera que el casco del buque de una placa plana, una vez que inicia el movimiento ejerce una fuerza hidrodinámica que provoca la aceleración de las partículas de agua contiguas a ella. Estas ejercerán una fuerza de igual dirección y sentido que la producida por la misma placa. La fuerza resultante es la responsable del levantamiento de la placa y del ángulo de trimado de la embarcación (Larsson & Eliasson, 2000).

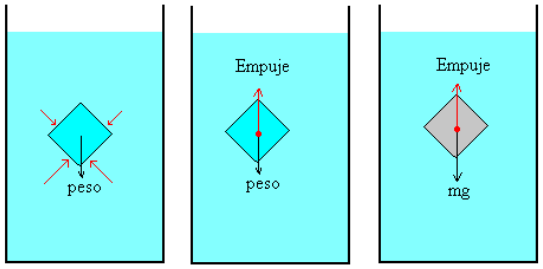


Figura 16. Principio de Arquímedes.

1.8 Modelado 3D

Las dimensiones definen el espacio en que un objeto puede existir. Imaginemos una línea que tiene solo una dimensión, longitud. Al agregar una segunda línea, ancho, se obtiene un espacio 2D o bidimensional. Las formas 2D tienen longitud y ancho. Son planas como un circulo o un cuadrado. Al agregar una tercera dimensión, profundidad, se obtiene un espacio 3D o de tres dimensiones por ejemplo las pirámides, cubos, esferas, entre otros.

La finalidad del modelo 3D es observar de manera previa los detalles del prototipo final para realizar la construcción del mismo.

Para realizar el modelo 3D de una embarcación, es necesario contar con su respectivo plano de líneas, esta es la representación en dos dimensiones de un casco de una embarcación, dando cuenta su tridimensionalidad, a través de la vista horizontal (planta) la vista longitudinal (costado) y la vista transversal (frontal). Todas las vistas deben dar cuenta la profundidad del casco, por ello se procede a dibujar en los tres planos de la coordenada. En la representación debe existir una congruencia entre las distintas vistas para que las curvas coincidan (PNA, 1988).

2. Justificación

El aumento poblacional, el incremento de las industrias, la demanda turística en zonas costeras, ribereñas o zonas lagunares, y sistemas productivos, alteran de manera critica los ecosistemas. Uno de los componentes más afectados y de vital importancia para la vida acuática es el oxígeno disuelto (Apple et al., 2006); el cual al descender sus niveles pone en peligro la flora y fauna de los ecosistemas y hábitats (Goyenola, 2007).

La acuacultura es una técnica de cultivar especies vivas, animales y plantas, ya sea en agua dulce o agua salada. Su finalidad socioeconómica de producción, autoconsumo, conservación y repoblación, hacen esta actividad relevante para la sociedad (CEDRSSA, 2015). El oxígeno disuelto es fundamental para el desarrollo de la industria acuícola, mismo que determina el estado general de la producción ya que tiene una influencia directa en la ingesta de alimento, resistencia a enfermedades y el metabolismo; en consecuencia, es primordial mantener las concentraciones adecuadas de este gas disuelto en el agua (Torres et al., 2016).

Esto genera la necesidad de tomar medidas de control y monitoreo continuo del oxígeno disuelto en el agua. Los avances tecnológicos han puesto en el mercado dispositivos electrónicos que permiten detectar el oxígeno disuelto de forma continua y en tiempo real (SIAPA, 2014). Sin embargo, están limitados a su medición en un solo sitio, por vez, en el cuerpo de agua. Para eliminar esta limitante se implementó el uso de un transporte, que permita la movilidad del sistema de detección por el medio acuático, sin perder la estabilidad necesaria para realizar mediciones aceptables. La facilidad de operación del prototipo garantiza al usuario una experiencia amigable, pero cumpliendo con el propósito de monitorear la variable de este gas disuelto en agua de forma remota con múltiples repeticiones. Por lo anterior, la presente investigación tiene el objetivo de diseñar e implementar un vehículo acuático de operación inalámbrica para la medición aceptable de la concentración de oxígeno disuelto en el agua.

3. Hipótesis

La implementación de un vehículo acuático de operación inalámbrica mantiene la precisión, estabilidad y exactitud en la medición de la concentración de oxígeno disuelto en agua.

4. Objetivos

4.1 Objetivo general

Diseñar e implementar un vehículo acuático de operación inalámbrica para la medición aceptable de la concentración de oxígeno disuelto en agua.

4.2 Objetivos específicos

- Diseñar y evaluar el funcionamiento del vehículo acuático de operación inalámbrica en condiciones controladas.
- Determinar la concentración de oxígeno disuelto en agua en condiciones controladas.
- Evaluar la estabilidad, precisión y exactitud del sistema de detección de oxígeno disuelto.

5. Materiales y métodos

5.1 Área de desarrollo

El diseño, construcción del vehículo acuático y sistema de propulsión, configuración de los módulos XBee, montaje del sistema de detección de oxígeno disuelto y pruebas de funcionamiento; se realizaron dentro de las instalaciones del Instituto Tecnológico de Boca del Río. El cual esta ubicado en la carretera Veracruz-Córdoba Kilómetro 12, 94290 Boca del Río, Veracruz.

Figura 17. Mapa de la ubicación del Instituto tecnológico de Boca del Río.

El desarrollo de la programación del circuito Arduino UNO, para el funcionamiento adecuado del sensor de oxígeno disuelto se desarrolló en las Instalaciones del Instituto Tecnológico Superior de Xalapa; ubicado en Sección 5A Reserva Territorial S/N, Santa Bárbara, 91096 Xalapa Enríquez, Veracruz.

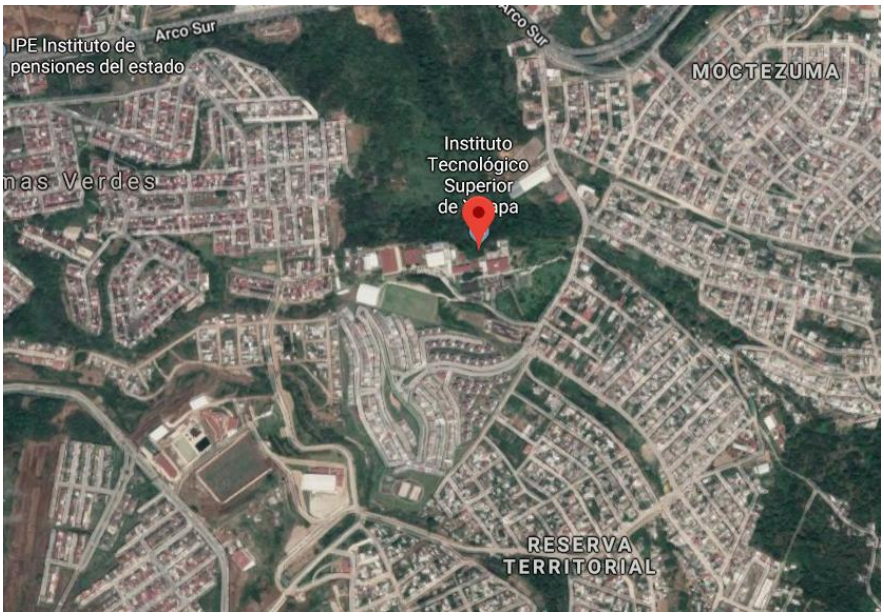


Figura 18. Mapa de la ubicación del Instituto superior de Xalapa.

5.2 Elección del casco

Para esta investigación se tomó en consideración el tipo de casco que mejor se adaptara a las necesidades del proyecto. Se realizó una comparativa entre una embarcación tipo monocasco y un tipo catamarán, obteniendo ventajas y desventajas entre ambos (Cuadro 2). Se omitió el casco tipo trimarán debido a la complejidad de diseño, tiempo de construcción, disponibilidad de materiales y de costo.

Cuadro 2. Ventajas y desventajas de una embarcación catamarán frente a una embarcación monocasco.

Ventajas	Desventajas
Mayor estabilidad	Mayor costo
Menor escora	
Mayor protección de salpicaduras	Elevado costo en atraco
Menor posibilidad de volcar	
Mayor seguridad	Menor posibilidad de espacio para atracar en muelles
Menor consumo del motor	

Las desventajas identificadas son los costos y disponibilidad de espacio, las cuales no aplican en este proyecto debido a que se construirá un modelo a escala. El casco a elegir fue el tipo catamarán ya que su estabilidad beneficia al sistema de detección de oxígeno disuelto. Una vez elegido el tipo de casco, en el siguiente apartado se detallan los componentes básicos para el diseño del vehículo acuático.

5.3 Dimensionamiento

Para realizar este proyecto se recurrió a bases de datos integradas con información de embarcaciones similares disponibles en el mercado. Se recopilaron características de diseño para establecer las dimensiones principales iniciales.

5.3.1 Base de datos

Se realizó una base de datos con información de embarcaciones similares para la estimación inicial de las dimensiones, ya que pueden variar de acuerdo al diseño de formas. Esto para satisfacer los requerimientos necesarios para la instalación del sistema de detección de oxígeno disuelto.

Los criterios empleados son: la eslora, manga, calado y el puntal, principalmente. En caso del diseño de una embarcación real, es importante considerar el desplazamiento, potencia, capacidad de combustible, velocidad, capacidad de tanques de agua, por mencionar algunas (Eyres & Bruce, 2012).

Se analizaron 10 embarcaciones, con esloras comprendidas entre 20 a 24 metros (Cuadro 3) debido a que estas dimensiones son las que se encuentran en el mercado.

5.3.2 Relación entre dimensiones

Concluida la base de datos, se procede a la obtención de las dimensiones principales del vehículo acuático, se realiza mediante el uso de regresiones lineales y las ecuaciones pertinentes a cada una de las relaciones entre los diferentes parámetros. Cada relación presenta una ecuación que hace referencia a la línea de tendencia generada en cada gráfica. Además, se representa un índice de

correlación R^2, cuyo valor indica el grado de relación entre las dos variables. Generalmente se busca un valor próximo a 1, aunque un valor de 0.5 o mayor, se considera aceptable para el uso de la ecuación a la cual corresponde (Sánchez J. , 2010).

Cuadro 3. Base de datos de embarcaciones tipo catamarán.

Catamarán				
No.	Manga (m)	Eslora (m)	Puntal (m)	Calado(m)
1	8.58	20.98	2.63	1.6
2	9.7	21.5	2.8	1.6
3	9.49	20.86	2.9	1.56
4	12	24	2.9	1.8
5	10	23	2.8	1.43
6	9.3	22.6	2.8	1.4
7	7	20.2	2.5	1.3
8	10	24	2.8	1.6
9	10.7	22	2.7	1.5
10	10	22	2.7	1.5

- Relación Manga-Eslora

Siendo el valor de correlación un valor aceptado dentro del margen establecido, se calcula el valor de “y”, correspondiente a la eslora. Siendo “x” el valor de la manga más cercana a la línea de tendencia (7metros), resolviendo la ecuación se obtuvo un valor de 20.1 metros de eslora.

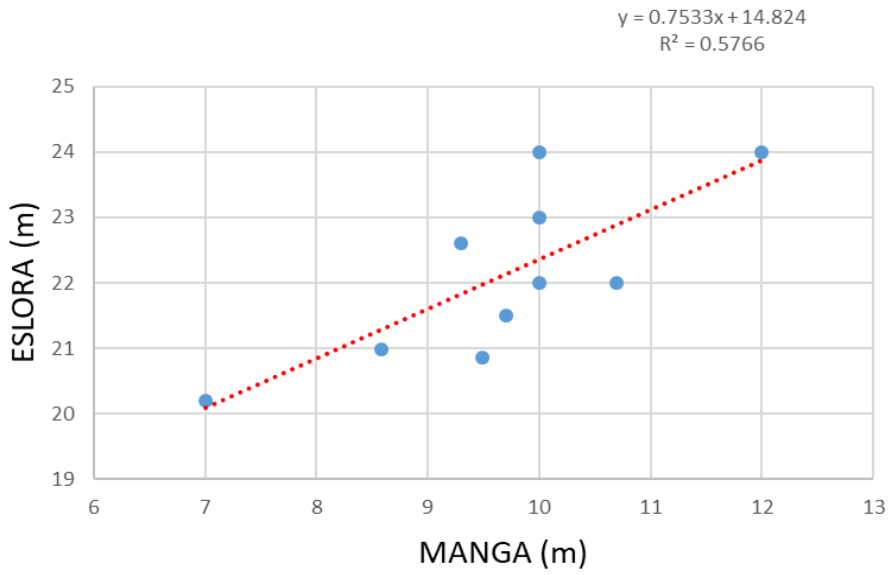


Figura 19. Relación entre dimensiones manga – eslora.

- Relación Eslora-Manga

Se procedió de la misma manera que la relación anterior. Por lo que, la variable “x” corresponde al valor de la eslora más cercano a la línea de tendencia (21metros); y “y” el valor correspondiente a la manga. Se obtuvo un valor de 8.8 metros de manga.

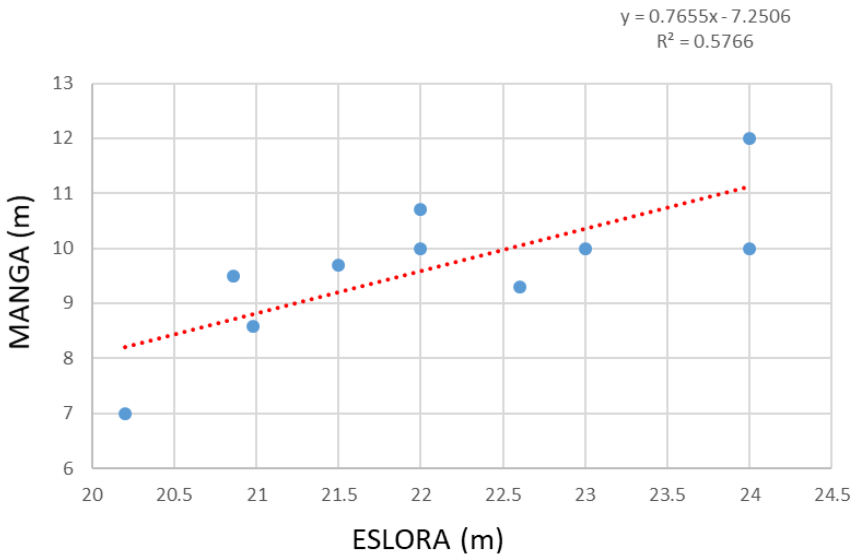


Figura 20. Relación entre dimensiones eslora – manga.

- Relación Eslora-Puntal

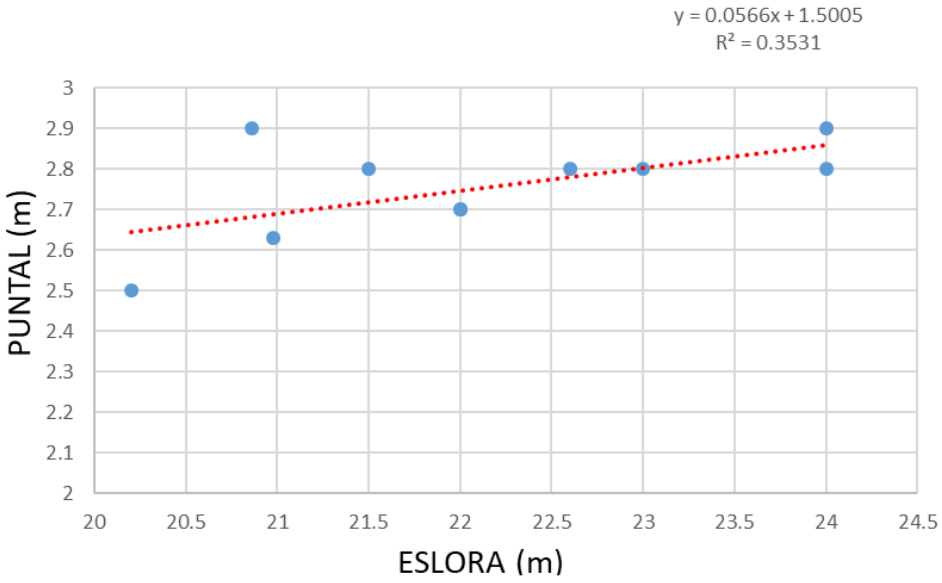


Figura 21. Relación entre dimensiones eslora – puntal.

En este caso el índice de correlación presenta un valor por debajo de 0.5; al tratarse de una comparativa entre embarcaciones de recreo, alguna de las características principales de cada uno de los modelos puede distar entre sí. Esto se debe a la diversidad de criterios entre los diferentes diseñadores. Por tanto, se consideró solo como valor orientativo.

Siendo “x” el valor correspondiente a la eslora más cercana a la línea de tendencia (23 metros); y “y” el valor del puntal, resolviendo la ecuación se obtuvo un valor de 3 metros de puntal.

- Relación Manga-Calado

En referencia a las relaciones anteriores. El valor de “x” es el valor de la manga más cercana a la línea de tendencia (7 metros), y “y” el valor del calado, resolviendo la ecuación se obtuvo un valor de 1.9 metros de calado (Figura 22). El ultimo valor obtenido es representativo, donde teóricamente se establecerá la línea de flotación de la embarcación. En este proyecto podrá variar esta dimensión debido a que es un modelo a escala.

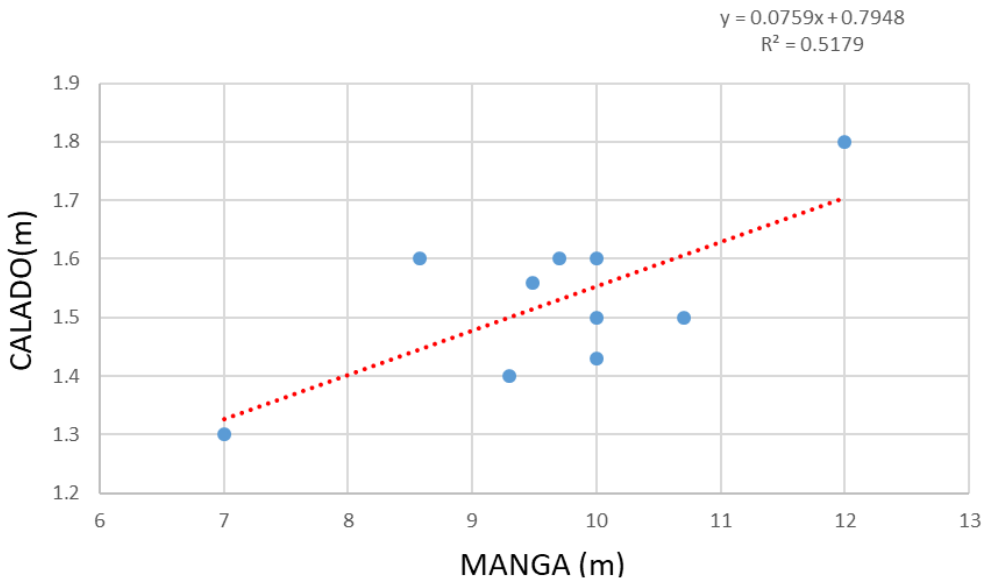


Figura 22. Relación entre dimensiones manga – calado.

5.4 Diseño del casco

Como se mencionó anteriormente, el objetivo de montar un sistema de detección implica seleccionar un diseño adecuado para su correcto funcionamiento. El vehículo acuático tipo catamarán nos proporciona estabilidad con una amplia área en su cubierta.

5.4.1 Generación de formas

La forma de casco seleccionada es del tipo “V” por los siguientes criterios:

- Es la forma de casco más común en diseño.
- Ofrece navegación suave.
- Mejora la estabilidad de la embarcación.
- Presenta un buen comportamiento al movimiento del agua.

Con lo anterior, se procede a diseñar las formas de la embarcación mediante el uso de software de diseño CAD.

5.4.1.1 Proceso

Primeramente, se seleccionó un modelo base con características similares a las que se pretende, consiguiendo agilizar el diseño de formas del modelo. Se realizaron 16 cortes transversales a lo largo del modelo a diferentes distancias (Cuadro 7). Considerando el punto de origen en la sección media de la embarcación, los valores negativos representan las distancias de la sección media hacia la popa, y los valores positivos representan las distancias de la sección media hacia la proa.

Cuadro 4. Distancia entre estaciones.

Estaciones	Distancia (cm)
ST0 – Ppr (Perpendicular de proa)	-24.6
ST1	-20
ST2	-16
ST3	-12
ST4	-8
ST5	-4
ST6 - SM (Sección Media)	0
ST7	4
ST8	8
ST9	12
ST10	16
ST11	20
ST11.25	21.25
ST11.5	22.5
ST11.75	23.75
ST12 – Ppp (Perpendicular de popa)	24.6

Cada estación proporciona una sección con la forma de la embarcación, que varía dependiendo a la distancia de donde es observada. En la figura 23 se observa la estación 0 (ST0) del modelo base. A pesar de ser un casco tipo “V”, se observan cortes debajo de la línea de flotación (línea amarilla) que complican la construcción del casco. Por lo anterior, se realizó la afinación de las líneas de forma de las 16 estaciones que conforman el casco (Anexo B). Se muestra en la figura 24 la misma estación 0 del modelo base, después del proceso de afinación.

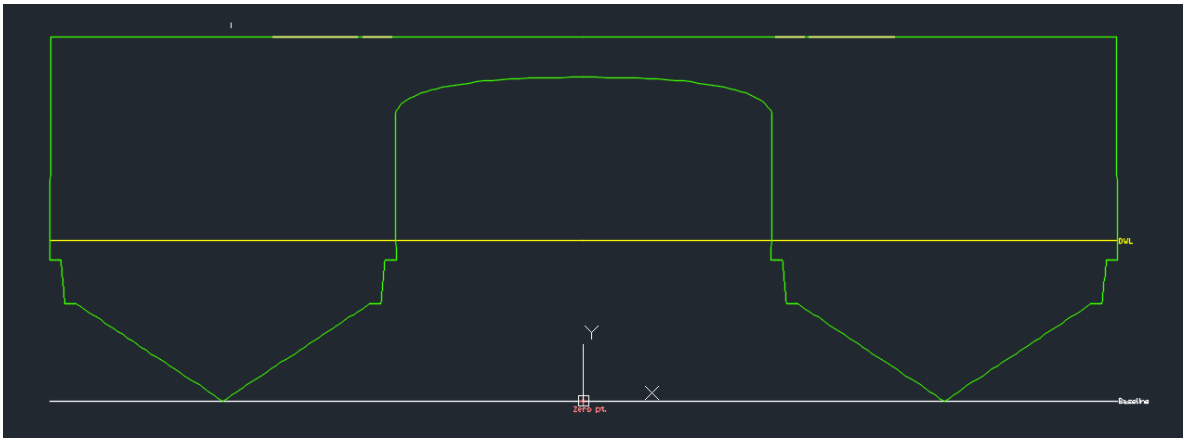


Figura 23. Estación cero del modelo base.

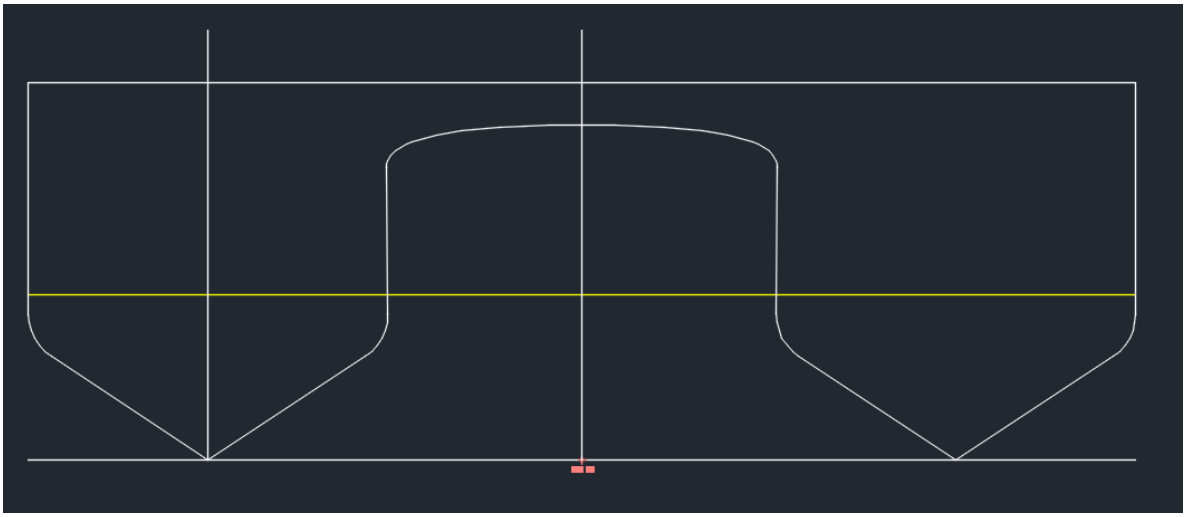


Figura 24. Estación cero del modelo final.

5.4.2 Modelo 3D

Al realizar el modelado 3D del casco, las 16 estaciones se encuentran en un plano 2D sobre los ejes ‘X’ ‘Y’, para tener fluidez en el diseño cada una de las estaciones fue rotada a los ejes ‘X’ ‘Z’ como se observa en la figura 25.

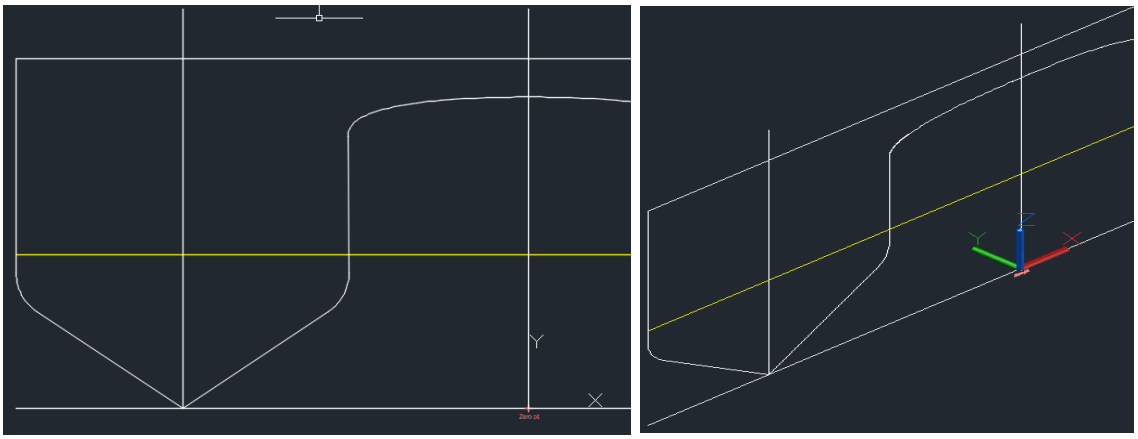


Figura 25. Rotación de las estaciones.

Posteriormente se dibujó una línea guía sobre el eje 'Y' (línea roja) de longitud igual a la eslora del casco, se colocó sobre ella cada una de las estaciones con su respectiva distancia de separación, la cual fue mencionada en el apartado 5.4.1.1(Figura 26).

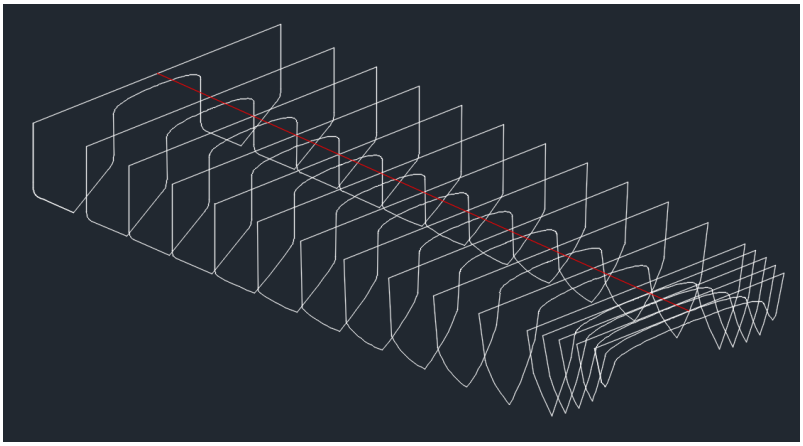


Figura 26. Acomodación 3D de las estaciones.

Para continuar con el modelo 3D se aplicó un espesor a cada una de las estaciones, al darles esta característica las estaciones pasan a nombrarse cuadernas que son pieza clave para la estructuración del casco. El espesor asignado a cada una de las cuadernas es de 5 milímetros. En la figura 27 se observa la semimanga del casco ya con el espesor aplicado. Al ser este un modelo no exige refuerzos estructurales de una embarcación real como son vagras, varengas, baos, cartelas, entre otros y las cuadernas son huecas dando espacio a la acomodación de camarotes y la instalación de la cámara de máquinas (Eyres & Bruce, 2012).

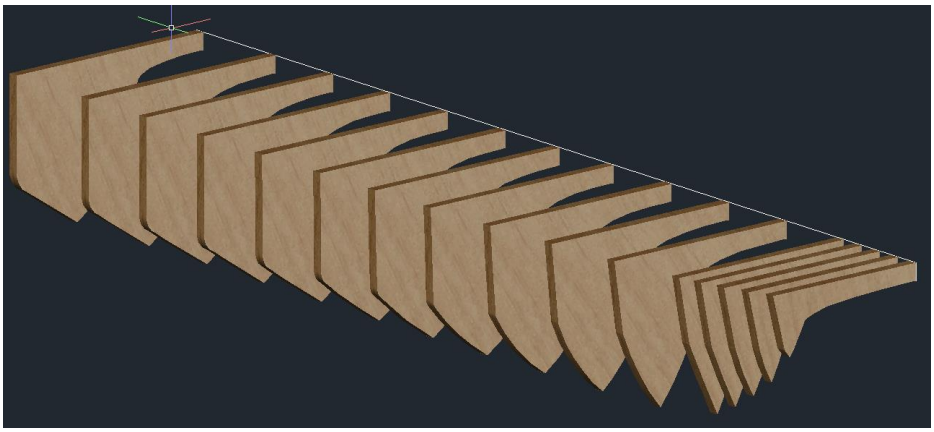


Figura 27. Cuadernas apreciando solo la semimanga.

Finalmente, se procedió al modelado del recubrimiento o el forro del casco, utilizando como guía las líneas de forma de las estaciones (Figura 28).

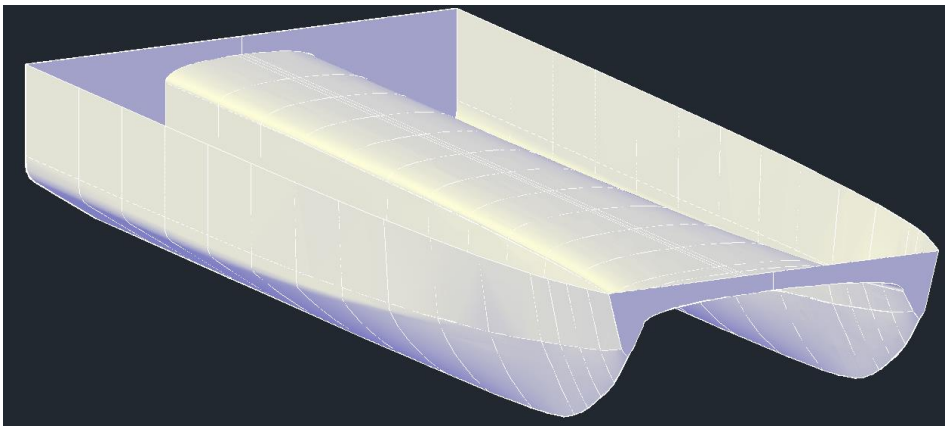


Figura 28. Forro del casco del vehículo acuático.

Es necesario extraer las líneas faltantes, es decir, las líneas longitudinales llamadas “Buttocks”, y las líneas de la vista de planta llamadas “Water Lines” o “Planos de agua”. Ya que durante el proyecto de diseño debe realizarse un plano de líneas para la correcta evaluación y construcción del mismo.

5.4.3 Plano de líneas

Las líneas de forma de la vista transversal fueron la base para el diseño del casco. Se obtuvieron el resto de las líneas de forma del casco, al exportar el modelo final al software de apoyo de diseño CAD, como se muestra en la figura 29.

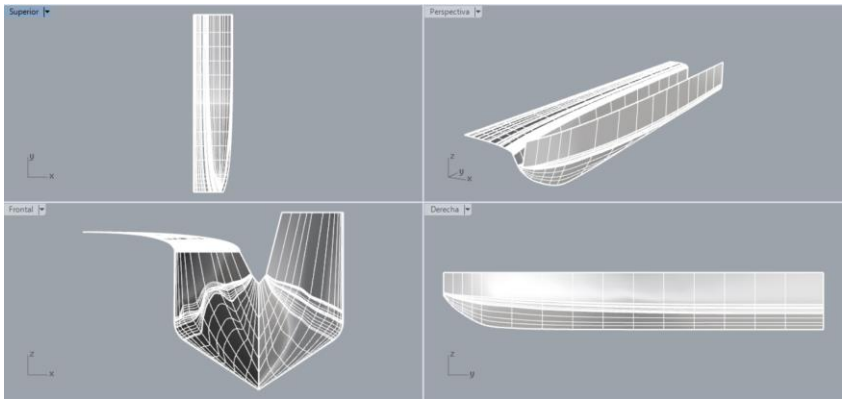


Figura 29. Semimanga del casco en 3D.

Solo es necesario trabajar con la semimanga del casco por el hecho de que el casco es simétrico, si mantenemos la manga completa obtendríamos líneas de forma duplicadas.

Para las líneas longitudinales se seccionó a diferentes distancias, tomando como base la vista transversal a lo largo de la eslora del casco (Cuadro 8).

Cuadro 5. Distancias de los cortes longitudinales.

No. Buttocks	Distancia (cm)
BT0	4
BT1	5
BT2	6
BT3	7
BT4	7.4
BT5	8
BT6	9
BT7	10
BT8	10.9

Para los planos de agua se hicieron cortes a ciertas distancias (Cuadro 9), solo que en lugar de realizar un corte de manera vertical se realizó de forma horizontal.

Cuadro 6. Distancias de los cortes horizontales.

Planos de agua	
WL1(cm)	0.5
WL2(cm)	1.5
WL3(cm)	2.5
WL4(cm)	3.5
WL5(cm)	4.5
WL6(cm)	5
WL7(cm)	6
WL8(cm) MAIN DECK	7.5

5.5 Proceso de construcción del casco

5.5.1 Cuadernas

Partiendo de los planos de las estaciones en el modelo 3D y a través del software de diseño CAD, se envía la información de cada una de las estaciones a la impresora 3D. Esta utiliza como material “cartuchos de tinta” o rollos de filamento de termoplástico (PLA). Este plástico sale derretido del extrusor y se endurece al enfriarse, formando las capas de la figura.

La impresión de cada una de las cuadernas se realizó en un tiempo aproximado de 2 horas. Debido a las limitaciones de la impresora, en cuanto a dimensiones de impresión, solo fue posible imprimir las cuadernas, sin embargo; con una impresora de mayor capacidad se puede imprimir el modelo del vehículo acuático completo, ahorrando tiempo en la construcción del prototipo.

5.5.2 Montaje de las cuadernas a la cubierta principal

Para iniciar el montaje de las cuadernas, es necesario imprimir previamente el plano 2D de la cubierta principal, esto con la finalidad de utilizarlo como plantilla al momento de cortar la madera.

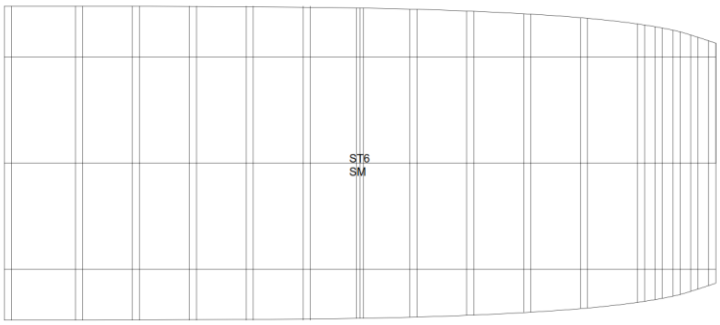


Figura 30. Plantilla de la cubierta principal.

La plantilla fue recortada y pegada en la madera contrachapada de 6 mm de espesor, posteriormente se procede a cortar la plantilla utilizando una sierra caladora y afinando los bordes con una lija para madera.

Partiendo como base de la construcción la cubierta principal, se procedió a la colocación y fijación de las cuadernas usando como guía el interlineado de la plantilla. Para la correcta colocación se necesitó marcar correctamente el centro de estas utilizando instrumentos de medición, posteriormente se fija cada una de las cuadernas con pegamento epóxico.

Se añadieron elementos estructurales de refuerzo llamadas cartelas, con el fin de darle mayor firmeza al modelo. Se dejó secar el pegamento aproximadamente 24hrs. antes de pasar al proceso de forrado.

5.5.3 Colocación del forro

El forro del modelo se obtuvo con la ayuda de cartón delgado ya que este es moldeable y es más resistente que el papel o cartulina. Se forró con este material con el objetivo de darle la mayor precisión posible antes de aplicarle la fibra de vidrio, de igual forma se fijó con pegamento epóxico y se dejó secar durante 24hrs.

5.5.4 Laminado por fibra de vidrio y resina

Para la mezcla de la resina con el catalizador es recomendable leer los datos del fabricante el cual nos indica que, por cada 100 ml de resina se agregan de 6 a 12 gotas dependiendo las condiciones del estado del tiempo. Para este caso en

particular se trabajó en condiciones aproximadamente de 22°C, y se agregaron una cantidad de 8 gotas de catalizador a la resina.

Debido a que la resina endurece rápidamente, debe usarse sola la cantidad necesaria, ya que un exceso de la misma genera una reacción exotérmica que acelera el proceso.

Se mezcló la solución durante 2 a 3 minutos de manera suave para evitar generar burbujas que llegan a estropear el acabado.

Obtenida la mezcla se aplica resina en la superficie donde se colocará la fibra de vidrio, esta debe estar cortada previamente al tamaño deseado. Una vez puesta y adherida ligeramente al modelo, se recubre nuevamente de resina dando pequeños golpes sobre la fibra hasta observar que esta adquiere un color blanco a transparente. Terminado el proceso se deja secar durante 1 a 2 días, dependiendo de las condiciones del clima. Finalmente se lija la superficie para dar un mejor acabado, este proceso se repite 2 veces.

El proceso anterior puede ser visualizado en la memoria fotográfica en el Anexo E.

5.6 Sistema de propulsión

5.6.1 Componentes

5.6.1.1 Turnigy-IA6

Es un transmisor de telemetría que trabaja a 2.4GHz con 6 canales de entrada que utilizan el Sistema Digital Hopping, tecnología de espectro ancho, frecuencia automática sólida y confiable. El Turnigy-IA6 es de fácil programación e incluye su receptor de 6 canales.

Características y especificaciones

- Frecuencia del transmisor y receptor: 2.4 GHz
- Voltaje de funcionamiento del transmisor: 1.5 V x 4 baterías AA
- Voltaje de funcionamiento del receptor: 4.5 V a 6.6 V / < 30mA

- Resolución: 1024 bits
- Corriente de trabajo: <= 100 mA
- Memoria para 20 modos de programación.
- 8 caracteres para el nombre del modelo.
- Pantalla LCD retroiluminada muestra el voltaje del receptor y transmisor en tiempo real.

5.6.1.2 Motor Brushless

Para esta investigación de utilizo el modelo de motor brushless A2212/13T acompañado de una hélice sentido horario de 10x4.5".

- Velocidad de giro: 1000 RPM/V
- Máxima eficiencia: 80%
- Resistencia: 0.090 ohm
- Corriente de eficiencia máxima: 4 – 10 A (>75%)
- Controlador recomendado: ESC 30 A

5.6.1.3 Controlador de Velocidad Electrónico 30 A (ECS)

Se empleó el controlador de velocidad electrónico 30 A (ECS), capaz de definir la velocidad de giro del motor brushless mediante la generación de pulsos compatibles con este tipo de motores.

Especificaciones

- Corriente continua: 30 A
- Corriente máxima: 40 A
- Salida reguladora de voltaje: 2 A / 5 V
- Alimentación: Batería LI-PO 2 o 3 celdas.

5.6.1.4 Servomotor micro Sg90

El servomotor tiene la capacidad de ser controlado en posición y ubicarse en cualquier posición dentro de un rango de operación generalmente de 180º.

Especificaciones

- Velocidad de operación sin carga: 0.12seg / 60 grados (4.8 V)
- Voltaje de operación: 3.0 V – 7.2 V
- Rango de temperatura: 0°C – 55°C
- Torque máximo: 1.6Kg/cm (4.8 V)

5.6.2 Descripción del funcionamiento

El sistema propulsivo se encarga del movimiento del vehículo acuático, con ayuda del transmisor enviamos de manera remota la acción a realizar, podemos aumentar o disminuir la velocidad del motor brushless. Es posible accionar el giro de los servomotores y estos a su vez mueven las palas del timón para darle maniobrabilidad al vehículo acuático. En la figura 31 se observan las conexiones adecuadas a cada componente del sistema.

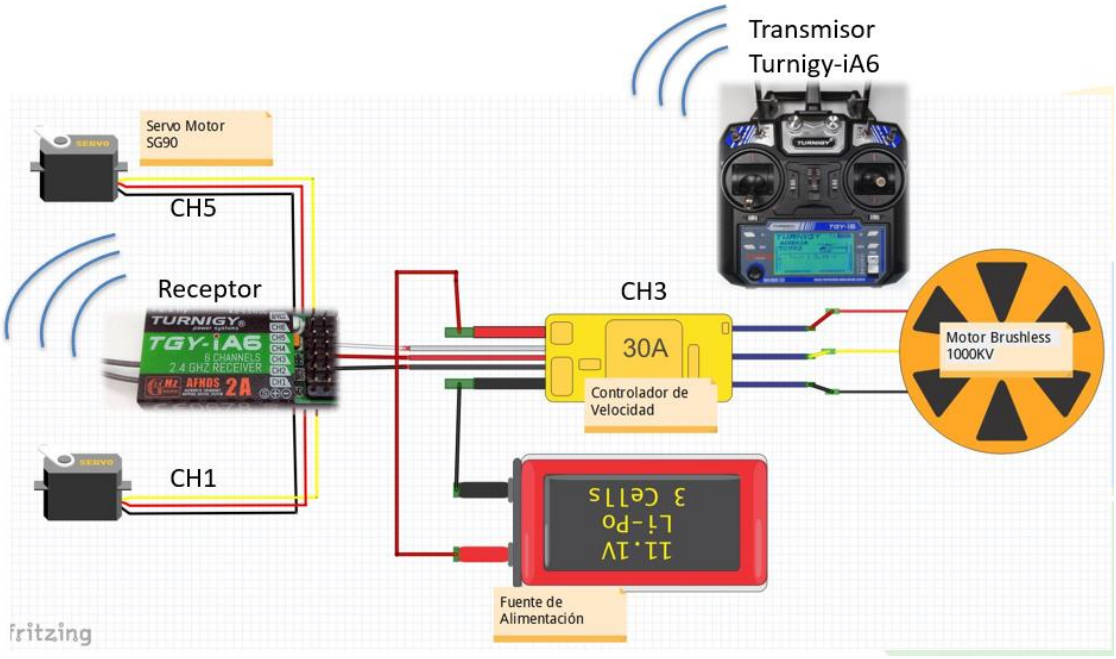


Figura 31. Conexiones del sistema de propulsión del vehículo acuático.

5.6.3 Diseño y construcción de las palas del timón

Primeramente, se creó el diseño básico de las palas del timón con el software de dibujo. La función de las palas es darle maniobrabilidad al vehículo acuático, solo para este caso, ya que es un modelo no se requiere de un cálculo previo para su diseño, pero se buscó similitud con las empleadas en embarcaciones reales como se observa en la figura 32.

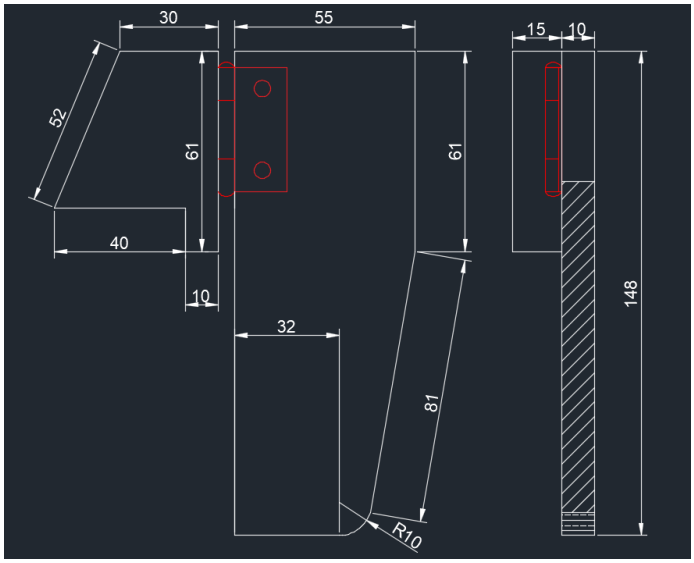


Figura 32. Dimensiones en mm de las palas del timón.

En la construcción de las palas se requirió aplicar el mismo procedimiento de construcción de la cubierta principal, partiendo del plano 2D. Se obtuvieron las plantillas y estas se fijaron sobre la madera de 15 y 10 mm de espesor. Se procedió a cortar los trozos de madera, utilizando una sierra caladora, para mejorar el acabado se procedió a la eliminación de impurezas y rebabas.

Basándonos en el plano de la figura 32, observamos un elemento más pequeño que otro, dicho elemento fue cortado a 15mm de espesor y quedó fijo a la cubierta principal del vehículo acuático.

5.6.4 Montaje del sistema de propulsión y detallado estético

Se realizó un plano de distribución o de arreglo general en 2D, con todos los elementos del sistema. Aclarando que los componentes electrónicos fueron representados en bloques con sus dimensiones reales y con letras (Cuadro 7). En

la figura 33 se observa de la sección media hacia la popa del plano de arreglo general (Anexo D).

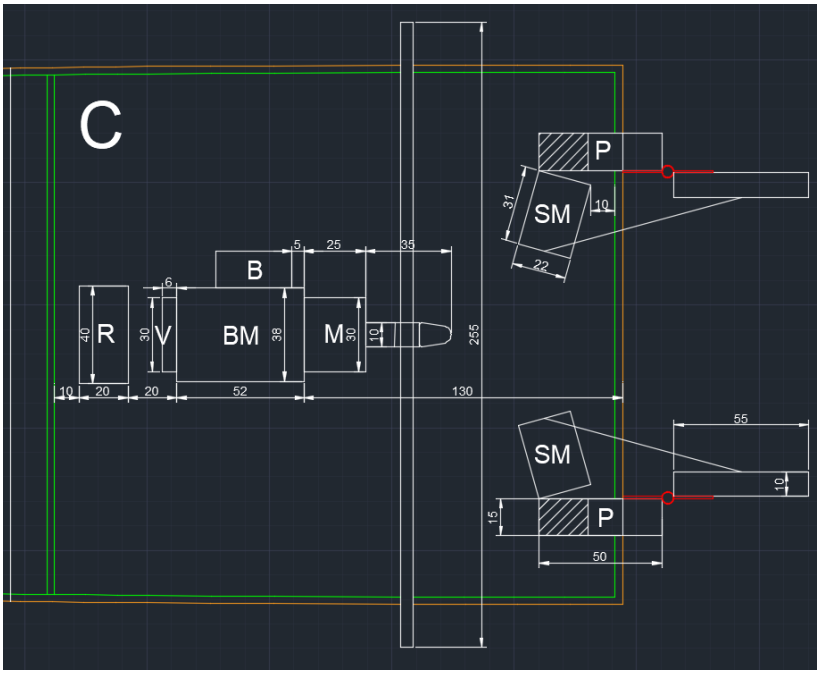


Figura 33. Dimensiones en mm de la distribución del sistema de propulsión.

Cuadro 7. Significado de cada letra de la distribución del sistema de propulsión.

Letra	Significado
C	Cubierta principal
R	Receptor Turnigy-IA6
V	Controlador de velocidad (ESC)
BM	Bloque de madera
M	Motor brushless
SM	Servomotor
B	Batería
P	Palas de timón

Previo a montar el sistema se aplicó una capa de pintura blanca para automóviles a todo el casco y también a las palas del timón, dándole un acabado impermeable ya que están en contacto continuo con el agua. Posteriormente, se instalaron las palas del timón al casco tomando como guía el plano de arreglo general, como se

mencionó con anterioridad en el apartado 5.6.4. Las partes de menor dimensión fueron sujetas a la cubierta, y se fijaron a las secciones de mayor dimensión con unas bisagras, con la finalidad de obtener movilidad y guiar el sentido del vehículo acuático.

Posteriormente, se aplicó una “barandilla” de cartón a toda la cubierta, forrada con papel periódico y engrudo, con el objetivo de darle mayor altura y proteger de salpicaduras o entrada de agua a los componentes electrónicos. Finalmente, se detalló con pintura acrílica el resto del vehículo acuático y se instalaron los componentes del sistema de propulsión con sus respectivas conexiones.

En el Anexo E se observan de manera ilustrativa el montaje del sistema de propulsión y detallado estético y finalmente el vehículo acuático.

5.7 Comunicación con módulos XBee

Para este proyecto, fueron seleccionados los módulos XBee del fabricante Digi para establecer la comunicación inalámbrica entre el sistema de detección y la estación de control. Estos módulos trabajan en la banda de 2.4GHz y usan el protocolo de comunicación IEEE 802.15.4.

Los módulos XBee son dispositivos que integran un transmisor-receptor de ZigBee y un procesador en el mismo modulo, permitiendo al usuario el desarrollo de aplicaciones de una forma rápida y sencilla.

Cuadro 8. Comparativa de Tecnologías de la comunicación.

	ZigBee	GSM/GPRS	802.11	Bluetooth
Aplicación Principal	Motorización y control	Voz y datos de redes de área ancha	Internet de alta velocidad	Conectividad de dispositivos
Duración de la batería	Años	1 semana	1 semana	1 semana
Ancho de banda	250 kbps	Más de 2Mbps	Más de 54 Mbps	720 kbps
Rango Típico	100 + m	Varios Km	50 - 10 m	10 - 100
Ventajas	Bajo consumo y costo	Infraestructura existente	Velocidad, ubicuidad	Conveniencia

Los criterios de selección de los módulos XBee son: reducción del costo, menor consumo de energía frente al Wifi o Bluetooth, el uso de bandas de frecuencia libres, la facilidad de instalación, y la posibilidad de crear con él redes flexibles y extensibles. Además, ofrece un buen alcance en las comunicaciones (DIGI, 2017).

5.7.1 Nuestra red XBee

5.7.1.1 Elección del modelo

Para la elección del modelo XBee se consideraron los siguientes factores.

Consumo. Como el sistema de detección estará una distancia considerable del operador y al utilizar como fuente de alimentación baterías recargables, se debe escoger un módulo que cumpla con un bajo consumo de energía para alargar la vida útil de las baterías.

Alcance. Se debe considerar la separación máxima entre el dispositivo transmisor, y receptor. Esto para escoger un módulo que pueda cubrir la distancia eficientemente. En este proyecto las distancias no fueron muy largas debido a que se probará en condiciones controladas y aguas someras.

Topología de red. Nuestro sistema se adecua a topologías de red tipo punto a punto.

Considerando los factores mencionados, los modelos elegidos para nuestro sistema remoto de comunicación serán los siguientes.

- **Módulo coordinador (Estación de control) XBee Series 2 ZigBee Wire Antenna.** Este módulo estará conectado al computador y es el encargado de recibir los datos del sistema remoto.
- **Módulo transmisor o router (Sistema Remoto) XBee Series 2 ZigBee Wire Antenna.** Este módulo se colocará en el sistema de detección y no recibirá ningún paquete de información, sino que únicamente enviará los valores que vaya analizando el sistema.

- **Software para módulos XBee**. Para llevar a cabo la configuración de los módulos XBee se ha utilizado el Software X-CTU de Digi, que es gratuito y está disponible para sistemas operativos Windows.
- **Adaptador XBee USB Explorer**. Donde se montarán los módulos XBee para su configuración, se conectará mediante un cable USB - mini USB a un ordenador que tenga el software X-CTU instalado.

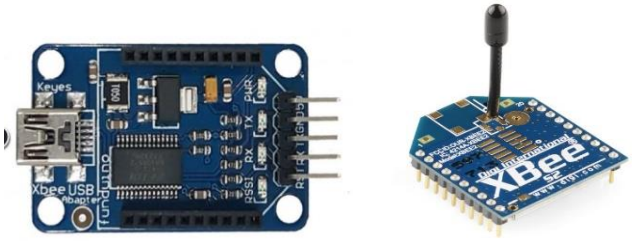


Figura 34. Modulo USB explore y XBee S2Z Wire Antenna.

- **Shield XBee.** Simplifica la tarea de conectar un módulo XBee a la placa Arduino.

Figura 35. Shield XBee compatible con Arduino.

5.7.1.2 Configuración Módulos XBee

Para llevar a cabo la configuración de los módulos XBee se utilizó el software X-CTU de Digi, el cual es gratuito. La configuración de los módulos que intervienen en la comunicación de esta investigación se va a realizar mediante un adaptador XBee

USB – Explorer, se conectó mediante un cable USB a mini-USB al ordenador con el programa instalado.

Para este proyecto los módulos XBee fueron configurados en modo de transmisión serial transparente (AT), en el cual la comunicación se asemeja a una transmisión a través de un puerto serial ya que el dispositivo se encarga de crear la trama, y el dato que llegue al pin transmisor sea enviado de forma inalámbrica al receptor. Su principal desventaja es enviar información a distintos nodos, pero en este caso solo nos comunicaremos con un solo nodo, una topología punto a punto.

Modulo coordinador

Para el módulo coordinador la configuración aplicada se muestra en la figura 36.

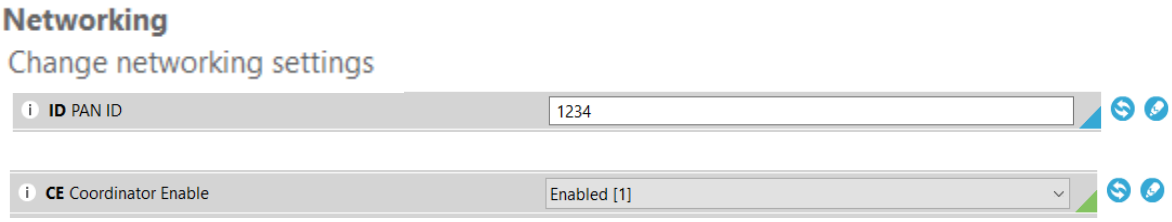


Figura 36. Configuración del módulo XBee coordinador.

La PAN ID es a elección propia, no necesariamente se debe utilizar la misma combinación de números, pero debe asegurarse que coincida el mismo patrón con la PAN ID del módulo transmisor o router.

Modulo transmisor

La configuración del módulo transmisor es la mostrada en la figura 37.

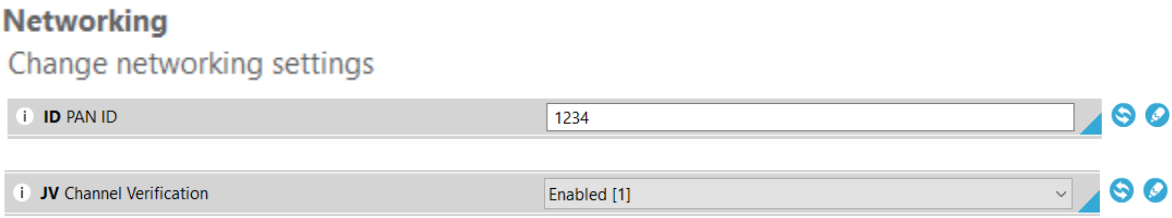


Figura 37. Configuración del módulo XBee transmisor.

Nótese que la PAN ID es la misma que el modulo coordinador. Los pasos a seguir en el software X-CTU para la configuración de los módulos se observan en el Anexo F.

5.8 Sistema de detección de oxígeno disuelto en agua

5.8.1 Componentes

5.8.1.1 Sensor análogo de oxígeno disuelto

Para esta investigación se utilizó el sensor análogo del fabricante DFROBOT compatible con Arduino. Este producto se utiliza para medir la concentración de oxígeno disuelto en agua en la acuicultura y monitoreo del medio ambiente, entre otros. La sonda es de tipo galvánica, no necesita polarización y está disponible en cualquier momento. La solución de llenado y la tapa de membrana son reemplazables, lo que conlleva a un bajo costo de mantenimiento.

Especificaciones

Sonda de oxígeno disuelto

- Tipo de sonda galvánica
- Rango de detección de 0 a 20 mg/L
- Rango de temperatura de 0 a 40 °C
- Tiempo de respuesta arriba del 98% después de 90 segundos
- Rango de presión de 0 a 50 PSI
- Vida útil un año (uso normal)
- Periodo de mantenimiento
    - Periodo de remplazo de la membrana
        - 1 a 2 meses (agua fangosa)
        - 4 a 5 meses (agua limpia)
    - Periodo de remplazo de la solución de llenado una vez al mes
- Solución de llenado 0.5 mol/L NaOH
    - 100 ml de agua destilada + 0.384 g NaOH.
    - 1 a 2 gotas de glicerina por cada 100 ml de solución.

Preparación de la sonda

Se agregó una solución de llenado en la tapa de la membrana, aproximadamente a 2/3 del volumen total de la tapa. Asegurando que la sonda este en posición vertical con respecto al plano horizontal. Con cuidado se enrosca la tapa de la sonda rectificando que siga en posición vertical para evitar crear burbujas en la solución (Figura 38).

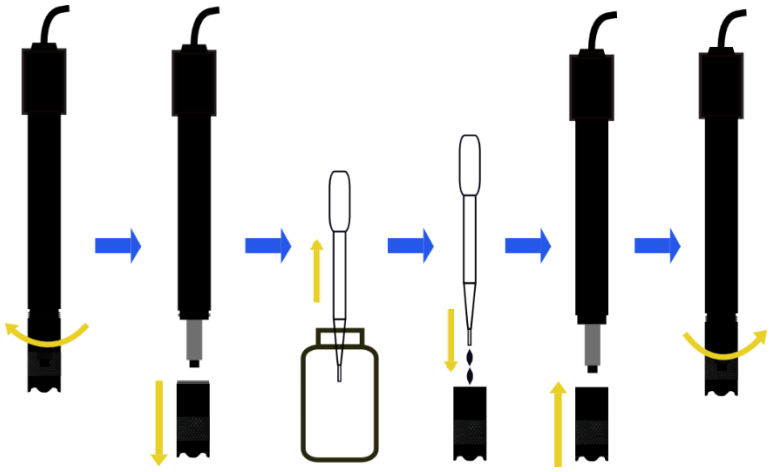


Figura 38. Llenado de la solución de NaOH en la sonda.

Calibración de la sonda

Si esta es la primera vez que utiliza la sonda o si la sonda no se ha utilizado durante algún tiempo, esta deberá calibrarse para asegurar precisión en las lecturas. Se empleó una calibración de punto único, la cual es lo suficientemente buena y conveniente. El procedimiento fue el siguiente:

1. Cargue la muestra. Codifique la placa Arduino y abra el monitor de serie. El programa actualiza e imprime el oxígeno disuelto en la pantalla cada segundo.
2. Sumerja la sonda en el agua saturada con oxígeno disuelto y agite suavemente el agua. Verifique las lecturas de oxígeno disuelto y espere a que las lecturas sean estables.
    - Normalmente, las lecturas tardan más de 1 minuto en estabilizarse, ya que la reacción electroquímica en la sonda requiere tiempo.

- Si no hay agua saturada con oxígeno disuelto disponible, el aire será un reemplazo. Sumerja la sonda en el agua y agítela varias veces para humedecer la membrana permeable de la tapa. Exponga la sonda al aire durante más de 1 minuto.

5.8.1.2 Placa convertidor de señal

La placa del convertidor de señal que incluye la sonda, actúa en enchufar y usar, con buena compatibilidad. Pudiéndose integrar fácilmente en cualquier sistema de control y detección. Su función es transformar la reacción química del sensor de oxígeno disuelto en una señal medible o una señal analógica.

Especificaciones

- Voltaje de alimentación 3.3 a 5 V
- Señal de salida 0 a 3.3 V
- Conector tipo BNC
- Conector de señal Gravity Analog Interface (PH2.0-3P)

5.8.1.3 Placa Arduino UNO

Se empleó una placa Arduino UNO para procesar la variable analógica recibida del sensor de oxígeno disuelto a través del microcontrolador, y convertirla en una señal de salida digital, esta salida es mostrada por medio de un ordenador.

5.8.2 Descripción del sistema de detección

Nuestro sistema de detección, tiene como objetivo el monitoreo continuo de la concentración de oxígeno disuelto en agua.

Inicialmente y para poder tener una detección fiable, el sistema requiere ser calibrado, una vez terminada la calibración da comienzo al monitoreo de la variable objetivo de esta investigación.

La reacción química generada por nuestra sonda será transformada a una señal medible mediante la placa convertidor de señal, la cual genera el dato de entrada o valor real. Este valor real pasará por el sistema donde se procesará la señal a través del microcontrolador de la placa Arduino UNO, otorgando el valor de salida en una

señal digital. Este último será retroalimentado vía inalámbrica a través de los módulos XBee al operador, visualizado los resultados a través de un ordenador para su análisis.

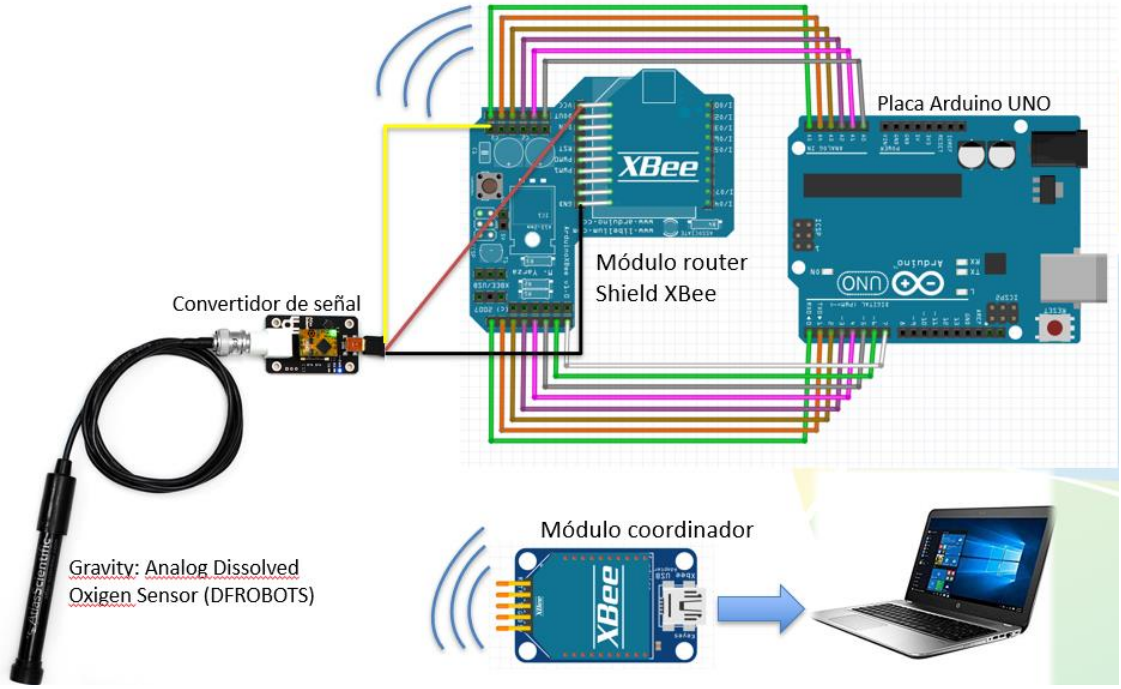


Figura 39. Esquema del sistema de detección de oxígeno disuelto en agua.

Observando el esquema de conexiones de la figura 39 se destaca un código de colores en el cableado, cada color representa una función como se detalla a continuación.

- Cable amarillo encargado de transmitir la señal medible del sensor de oxígeno disuelto en agua, este está conectado al pin analógico A0.
- Cable Rojo es la alimentación del sistema conectado a la salida de voltaje de 3.3 V.
- Cable negro representa la tierra y está conectado al pin GND de la placa.
- Los cables de diversos colores solo representan que, el Shield XBee está montado en nuestra placa Arduino UNO.

5.8.3 Programación de la placa Arduino UNO

A continuación, se muestra el código de programación que fue cargado a la placa de Arduino UNO para procesar el valor de entrada del sensor del oxígeno disuelto en agua.

```
#include <ResponsiveAnalogRead.h> // Se agrega la librería. Encargada de evitar picos en los valores.
#include <SoftwareSerial.h> // Se agrega la librería. Encargada de conectar el módulo XBee.

SoftwareSerial xbee (0,1); //Se encarga de activar los pines 0 y 1 receptor y transmisor respectivamente.
ResponsiveAnalogRead Oxígeno (A0, true); //Se declaran las variables. El sensor de oxígeno disuelto.

void setup() {
   Serial.begin(9600); //Monitor Serial para observar los valores.
   xbee.begin(9600);   //Inicia el protocolo XBee
}
void loop() {
   Oxigeno.update(); //Se obtiene el valor del sensor.
   float voltaje= Oxigeno.getValue() *5.2; //Formula para obtener el voltaje.
   float vol= voltaje/1023;
   float mgl= vol*20; // Formula para obtener el OD
   float MGL= mgl/4.8; // El valor final se divide entre el voltaje de alimentación
   Serial.println(MGL); // Se imprime el valor del OD
   delay(1000); // Se repite el proceso cada segundo
}
```

5.9 Programación en LabVIEW

El software LabVIEW, se encarga de interpretar los resultados obtenidos del sensor de manera gráfica, en tiempo real y con la posibilidad de interactuar con el sistema, aunado a esto creara una base de datos en una hoja de cálculo en Excel para futuros análisis.

5.9.1 Indicadores del panel frontal

Para representar los valores del sistema, se usó un objeto que simula un “medidor analógico” ubicado en el apartado numérico del menú de controles del panel frontal. Simplemente es un indicador, el cual nos permite observar la variable de salida del sistema.

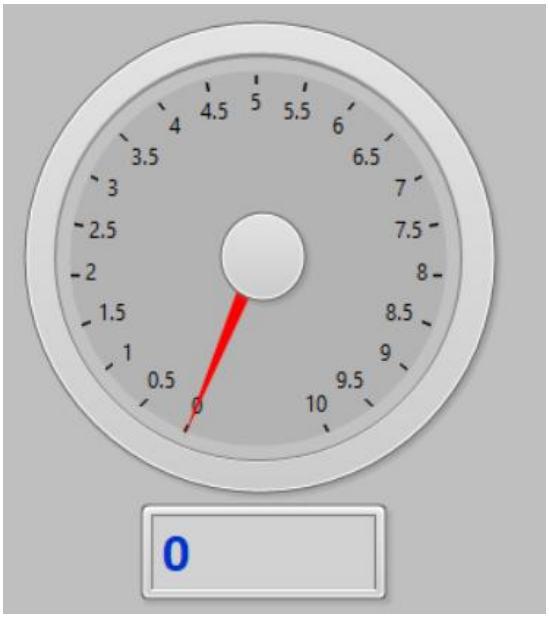


Figura 40. Indicador numérico “medidor analógico” del panel frontal.

Para observar los picos de la variable por cada monitoreo, se utilizó un objeto de tipo gráfica ubicado en el menú de controles del panel frontal. El eje “Y” muestra la cantidad de oxígeno disuelto total en una escala de 0 a 10, mientras que el eje “X” indica la cantidad de muestreos que se han llevado a cabo durante un tiempo determinado.

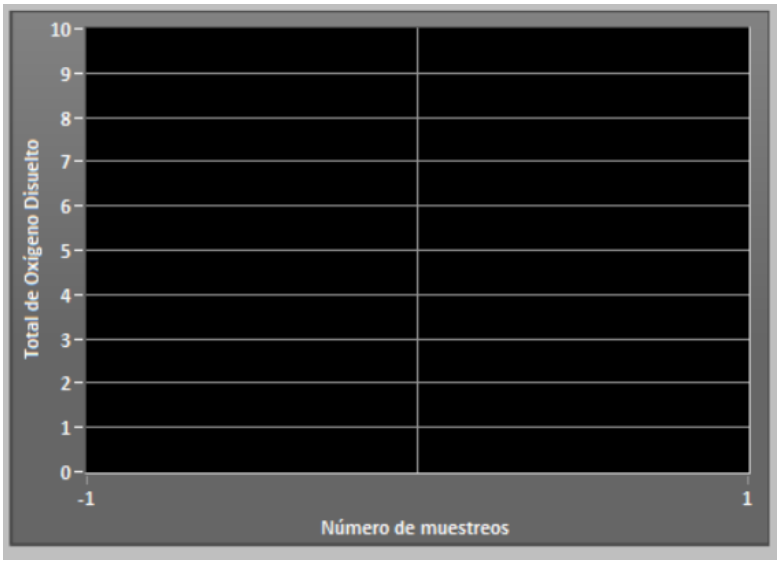


Figura 41. Grafica de observación de la variable.

En el panel frontal, se genera automáticamente un botón de paro, propio de la estructura While Loop, ubicado en el diagrama de bloques. Se agregó un indicador tipo numérico que imprime el valor del oxígeno disuelto. Así mismo, de manera automática se agrega un botón para seleccionar el puerto serial donde está conectado nuestro receptor y un botón para habilitar o deshabilitar el guardado de datos en Excel.

5.9.2 Programación del diagrama de bloques

En el diagrama de bloques se realizan todas las conexiones del instrumento virtual (VI). Cada uno de los objetos indicadores que se encuentran en el panel frontal, cuentan con una representación en el diagrama de bloques; donde se realizaron todas las interconexiones entre objetos. En la figura 42, se muestra el bloque que representa el tiempo durante el cual se registrarán los valores de OD. El tiempo es programable a consideración del operador. La escala de tiempo con el que trabaja LabVIEW es en milisegundos.

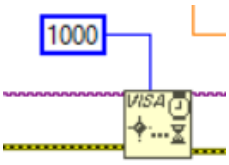


Figura 42. Bloque editable para el tiempo de muestreo.

En la siguiente sección del diagrama de bloques (Figura 43), se observa el bloque llamado “VISA read”, aquí se declara el número máximo de datos de lectura. El sensor trabaja en un rango de 0 a 20 mg/L, no es necesario incrementar el valor ya que la concentración no sobrepasa los 10mg/L. Establecido el valor máximo, el siguiente bloque se encarga de leer la variable, transformarla en un valor decimal y finalmente imprimir el valor. A partir de este bloque es posible ir directo a los indicadores, pero este solo determina valores enteros, afectando la exactitud de la variable. Por lo anterior, se ingresó el bloque “scan value” el cual nos permite imprimir el valor con dos dígitos después del punto decimal, lo que precisa la lectura de la variable.

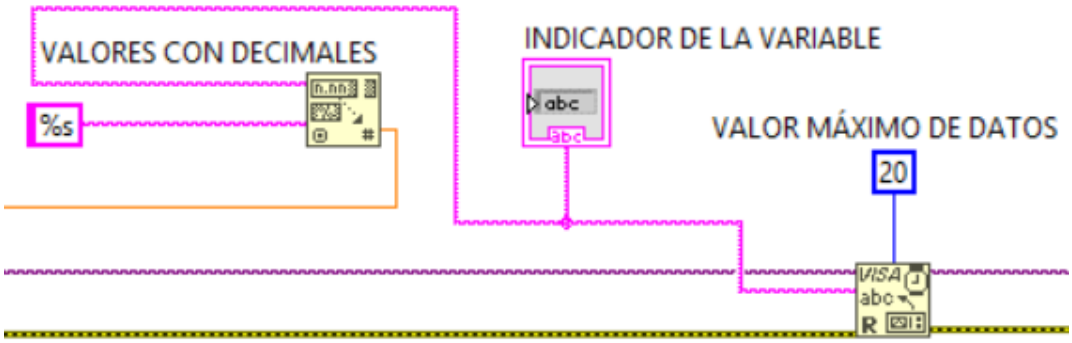


Figura 43. Sección del diagrama de bloques para la impresión de resultados.

Como última sección de la programación del diagrama de bloques, el resultado de la variable final es enviada a los indicadores para ser visualizados en el panel frontal y a la base de datos en Excel para su posterior análisis estadístico

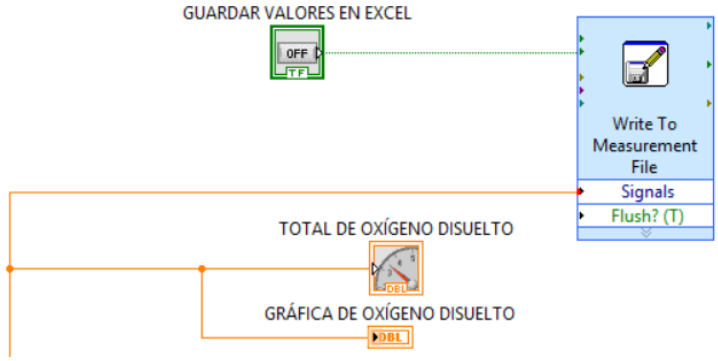


Figura 44. Ultima sección de la programación en el diagrama de bloques.

5.9.3 Comunicación entre XBee y LabVIEW

Para establecer la comunicación entre la placa XBee coordinador y el software LabVIEW, se requirió hacer uso del VISA Toolkit. Este paquete de herramientas permite leer los valores de la placa XBee a través del puerto serial en el que se encuentra conectado. Una vez instalado el VISA Toolkit correctamente, aparece en el menú de funciones del diagrama de bloques, un apartado con las herramientas para llevar a cabo el procesamiento de la variable.

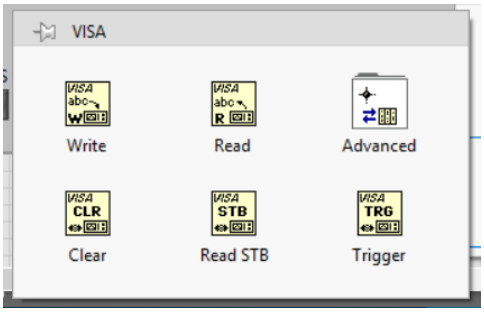


Figura 45. Menú de funciones VISA.

El siguiente paso es conectar el módulo XBee coordinador mediante el USB Explorer a la PC. Una vez conectado, desde el software LabVIEW se debe configurar la comunicación con la placa XBee. Para realizar esta acción se requirió de los siguientes elementos de programación. VISA Configure Serial Port, este se encarga de leer el puerto serial al que está conectado nuestra placa XBee. En Visa Enable Event, fue seleccionado el tipo de entrada serial debido a que la comunicación es a través de un puerto USB. Se utilizó el bloque VISA Discard Events para eliminar cualquier tipo de dato que no sea tipo serial antes de entrar al ciclo While Loop. Por último, después del ciclo While Loop se utilizó el bloque Visa Close seguido por el bloque Simple Error, para cerrar el programa y notificar al usuario si llegase a presentarse un error y donde fue generado (Figura 46).

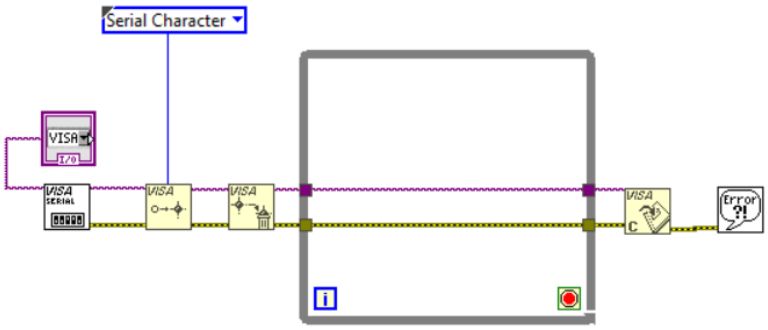


Figura 46. VI de comunicación con la placa XBee.

Una vez creado el diagrama, se procede a hacer doble clic sobre el icono VISA Serial, el programa desplegara una ventana (Figura 50). Para configurar el puerto serial en VISA resource name fue seleccionado el puerto donde es conectado el módulo XBee (COM 5), se ejecuta el programa y finalmente se cierra la ventana.

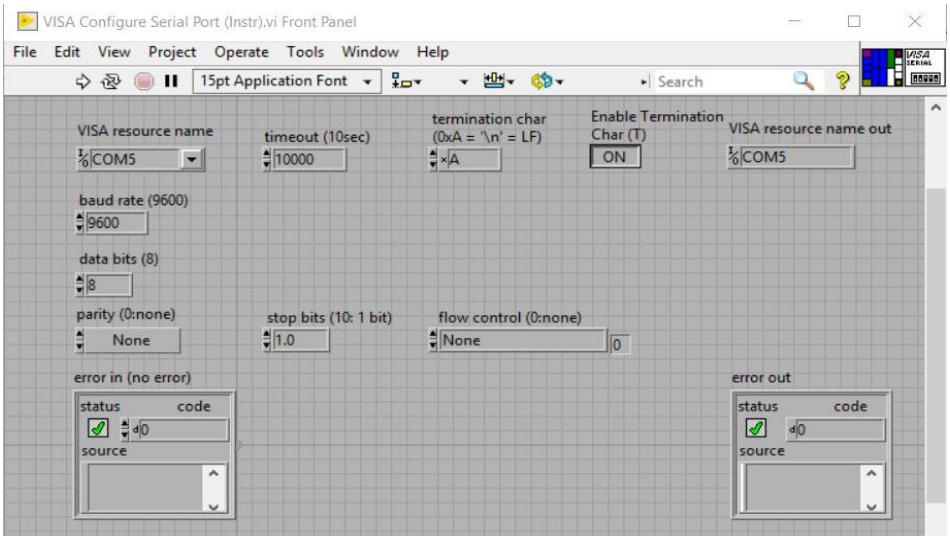


Figura 47. Ventana VISA Serial para configurar el puerto serial.

Una vez configurada la comunicación entre el XBee y la PC, y previo a ejecutar el programa, se procede a habilitar el puerto en el panel frontal.

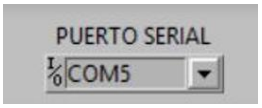


Figura 48. Selección del puerto serial en el panel frontal.

6. Resultados

6.1 Dimensiones del vehículo acuático

Los resultados obtenidos (Cuadro 9) a partir de las relaciones establecidas en el aparatado de materiales y métodos, permiten determinar las dimensiones principales preliminares del diseño.

Cuadro 9. Dimensiones preliminares del vehículo acuático.

Dimensiones preliminares (m)	
Eslora (m)	20.1
Manga máxima (m)	8.8
Puntal (m)	3.0
Calado (m)	1.9

Estas dimensiones aplican para una embarcación real y en este proyecto se requiere de dimensiones reducidas; es decir, se requiere de un ajuste sencillo para escalar las dimensiones de la embarcación. Los valores preliminares se ajustarán a las necesidades requeridas del sistema aplicando una escala y convirtiendo los valores a centímetros, obteniendo así, las dimensiones principales del vehículo acuático (Cuadro 10 y 11).

Cuadro 10. Escala aplicada a las dimensiones preliminares.

Escala 40:1	(0.025)
Eslora (m)	0.50
Manga máxima (m)	0.22
Puntal (m)	0.075
Calado (m)	0.05

Cuadro 11. Dimensiones principales del vehículo acuático.

Dimensiones principales (cm)	
Eslora (cm)	50
Manga máxima (cm)	22
Puntal (cm)	7.5
Calado (cm)	4.7

6.2 Plano de líneas

El resultado de cada uno de los cortes, longitudinales, de planta y transversales se representan cada uno en un plano como se muestra a continuación. En el plano de líneas final se observa con más detalle cada una de las vistas (Anexo C).

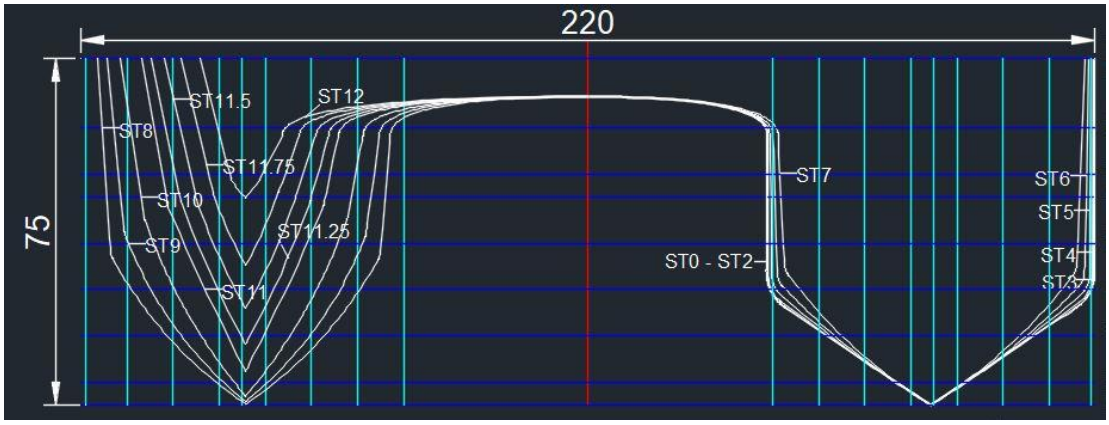


Figura 49. Vista transversal del plano de líneas.

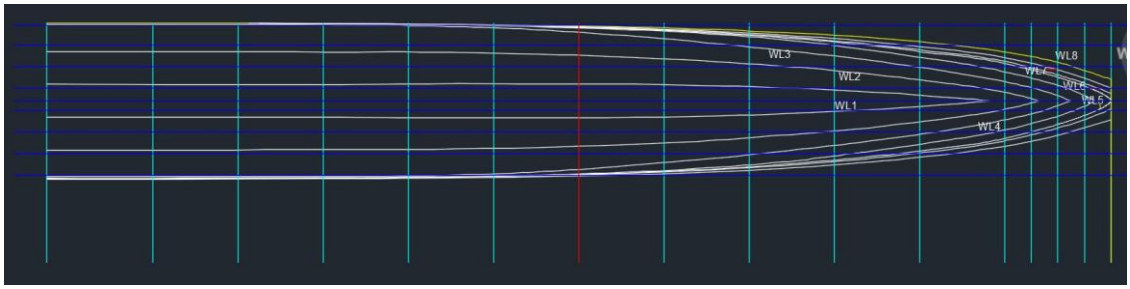


Figura 50. Vista de planta del plano de líneas.

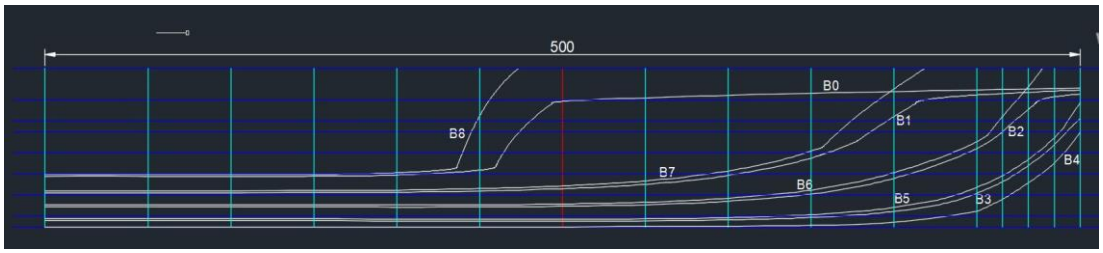


Figura 51. Vista longitudinal del plano de líneas.

6.3 Prueba de navegación del vehículo acuático

En las pruebas de navegación preliminares el vehículo acuático se comportó de manera óptima en el cuerpo de agua, con una excelente maniobrabilidad y estabilidad. La escora de la embarcación es casi nula, la probabilidad de una volcadura se reduce aun en maniobras a altas velocidades. Se observó que la embarcación navegaba encabuzada, es decir, con la proa más hundida que la popa. Por tanto se levantó la “barandilla de la proa” para evitar filtraciones de agua a la cubierta y proteger el equipo electrónico.

6.4 Diseño del sistema de control

Al realizar la programación en LabVIEW, se obtuvo un VI (Virtual Instrument) que visualiza en tiempo real las variables obtenidas por nuestro sistema de detección de oxígeno disuelto en agua. Esta visualización se lleva a cabo de forma gráfica y genera una base de datos en una hoja de cálculo. Como resultado, se diseñó un panel frontal (Figura 52).

Figura 52. Panel frontal del sistema.

Aunado a este se obtuvo un diagrama de bloques, donde se observa la programación necesaria para el funcionamiento del sistema, aquí se procesa la variable y se interpretan los resultados de concentración de oxígeno disuelto.

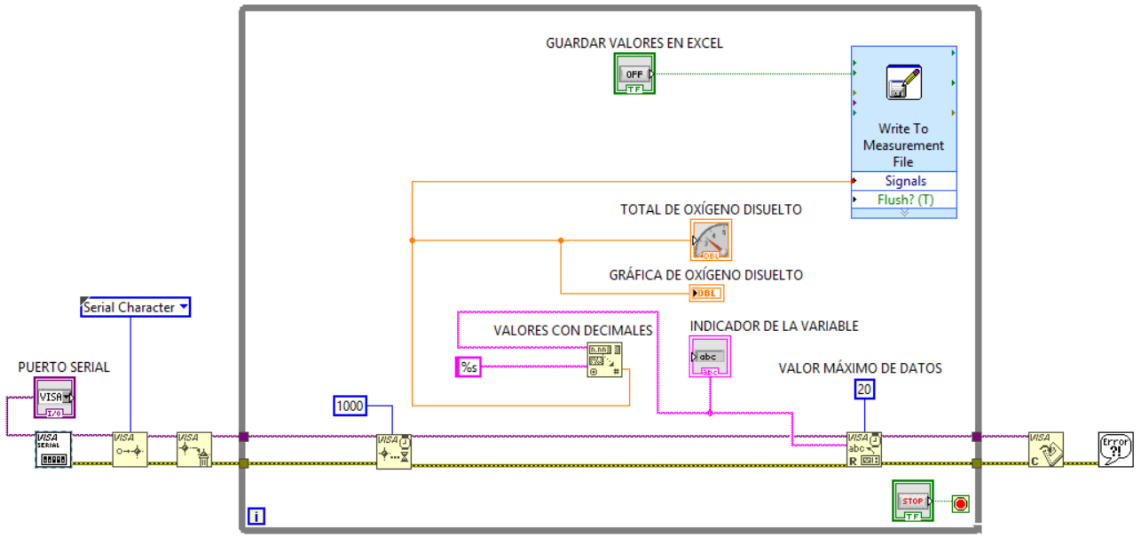


Figura 53. Diagrama de bloques del sistema.

6.5 Adquisición de datos

Las pruebas de funcionamiento del prototipo se llevaron a cabo dentro del Instituto Tecnológico de Boca del Río en el área de acuacultura. Las mediciones de oxígeno disuelto fueron realizadas en dos estanques de cultivo de tilapia de 10 x 5 m, en 7 puntos de muestreo por estanque (Figura 54).

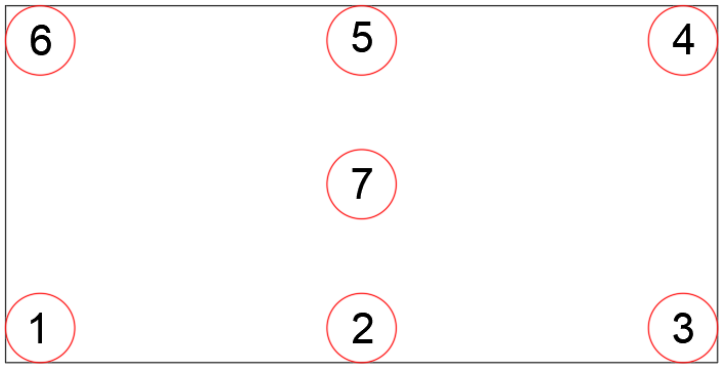


Figura 54. Puntos de muestreo.

El electrodo fue ubicado a una profundidad de 45cm por debajo de la superficie del agua. Esto, para reducir la variación de los datos originada por el movimiento del agua en la superficie, generada por el aireador o por el viento. Una vez estabilizado el electrodo (60-90 segundos), se obtuvieron 30 datos de la concentración de oxígeno disuelto (1 lectura/segundo), por punto de muestreo. La información generada fue vaciada en un archivo de Excel.

Cuadro 12. Datos obtenidos por punto de muestreo en el estanque de cultivo número 1.

Total de oxígeno disuelto (mg/L) estanque de cultivo número 1						
Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6	Punto 7
5.34	3.94	5.46	4.72	4.3	4.13	5.93
5.34	3.94	5.42	4.72	4.24	4.21	5.99
5.36	3.94	5.4	4.72	4.19	4.28	6.06
5.4	3.94	5.4	4.72	4.15	4.36	6.12
5.42	3.94	5.4	4.72	4.13	4.41	6.18
5.46	3.94	5.4	4.72	4.13	4.43	6.33
5.53	3.94	5.4	4.72	4.13	4.47	6.48
5.63	3.94	5.42	4.72	4.13	4.49	6.63
5.74	3.94	5.42	4.72	4.13	4.51	6.76
5.8	3.94	5.42	4.72	4.19	4.55	6.84
5.85	3.94	5.42	4.72	4.26	4.55	6.9
5.87	3.94	5.44	4.72	4.3	4.57	6.93
5.89	3.92	5.44	4.72	4.32	4.57	6.97
5.89	3.9	5.46	4.72	4.34	4.6	7.01
5.89	3.88	5.46	4.72	4.34	4.6	7.03
5.89	3.85	5.46	4.7	4.34	4.6	7.03
5.89	3.85	5.49	4.7	4.34	4.6	6.9
5.85	3.83	5.49	4.68	4.34	4.6	6.65
5.82	3.81	5.49	4.64	4.34	4.55	6.4
5.8	3.81	5.49	4.62	4.34	4.53	6.21
5.8	3.79	5.49	4.6	4.34	4.51	6.04
5.8	3.77	5.49	4.55	4.34	4.51	5.91
5.8	3.77	5.44	4.51	4.34	4.51	5.8
5.8	3.75	5.4	4.49	4.34	4.51	5.68
5.8	3.75	5.34	4.47	4.34	4.51	5.61
5.8	3.75	5.32	4.43	4.34	4.51	5.61
5.82	3.75	5.29	4.41	4.32	4.51	5.61
5.82	3.75	5.27	4.38	4.3	4.51	5.61
5.82	3.75	5.25	4.36	4.3	4.49	5.8
5.82	3.75	5.25	4.36	4.3	4.49	6.18

Cuadro 13. Datos obtenidos por punto de muestreo en el estanque de cultivo número 2.

Total de oxígeno disuelto (mg/L) estanque de cultivo número 2						
Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6	Punto 7
4.51	4.85	2.5	3.69	3.47	3.75	3.09
4.51	4.85	2.5	3.66	3.45	3.75	3.07
4.51	4.85	2.5	3.64	3.41	3.75	3.07
4.51	4.85	2.5	3.62	3.41	3.75	3.05
4.51	4.85	2.5	3.62	3.39	3.75	3.05
4.51	4.85	2.5	3.62	3.39	3.75	3.05
4.51	4.85	2.5	3.62	3.37	3.75	3.03
4.51	4.85	2.5	3.62	3.37	3.75	3.03
4.51	4.85	2.5	3.69	3.37	3.73	3.01
4.47	4.85	2.5	3.75	3.54	3.71	3.01
4.38	4.85	2.5	3.81	3.75	3.69	2.97
4.3	4.85	2.5	3.85	3.85	3.64	2.94
4.19	4.85	2.5	3.88	3.9	3.62	2.9
4.11	4.85	2.5	3.88	3.92	3.6	2.86
4.05	4.85	2.5	3.88	3.92	3.58	2.86
4	4.85	2.5	3.9	3.92	3.56	2.86
3.98	4.85	2.5	3.9	3.94	3.54	2.86
3.98	4.87	2.5	3.9	3.96	3.54	2.9
3.96	4.87	2.54	3.9	3.96	3.54	2.94
3.96	4.89	2.58	3.9	3.98	3.54	2.97
3.94	4.91	2.65	3.9	4	3.54	2.97
3.9	4.91	2.69	3.9	4	3.54	2.99
3.85	4.93	2.71	3.9	4	3.56	2.99
3.79	4.93	2.73	3.88	4	3.66	2.99
3.75	4.93	2.75	3.85	4	3.83	3.03
3.73	4.93	2.75	3.83	4	3.96	3.11
3.71	4.93	2.75	3.83	4	4.05	3.13
3.71	4.93	2.77	3.81	4	4.13	3.13
3.71	4.91	2.84	3.79	4	4.13	3.13
3.69	4.87	2.92	3.75	3.98	4.13	3.05

6.6 Mediciones aceptables

De acuerdo a lo establecido en los objetivos, se determinó el grado de estabilidad, precisión y exactitud, del sistema de detección de oxígeno disuelto en agua.

El dato del fabricante del sensor de oxígeno disuelto en agua menciona que, el tiempo de estabilización para la adquisición de la variable con una exactitud del 98% es de 90 segundos. Puesto a prueba en el vehículo acuático, el tiempo de estabilización del sistema de detección por cada punto de muestreo vario entre 60

a 90 segundos aproximadamente, dependiendo de la velocidad al cual navegaba el prototipo.

El resultado del análisis estadístico de los datos en el punto 6.5 de este documento muestran que el sistema de detección de oxígeno disuelto cumple con el grado de precisión y exactitud.

En la figura 55 se observa la estadística aplicada de forma individual a cada punto de muestreo del estanque 1.

Estanque 1 punto de muestreo 1		*Estanque 1 punto de muestreo 2*		*Estanque 1 punto de muestreo 3*	
Media	5.725	Media	3.857	Media	5.411
Error típico	0.034	Error típico	0.015	Error típico	0.013
Mediana	5.800	Mediana	3.865	Mediana	5.420
Moda	5.800	Moda	3.940	Moda	5.400
Desviación estándar	0.188	Desviación estándar	0.082	Desviación estándar	0.072
Varianza de la muestra	0.035	Varianza de la muestra	0.007	Varianza de la muestra	0.005
Estanque 1 punto de muestreo 4		*Estanque 1 punto de muestreo 5*		*Estanque 1 punto de muestreo 6*	
Media	4.623	Media	4.275	Media	4.489
Error típico	0.024	Error típico	0.015	Error típico	0.021
Mediana	4.710	Mediana	4.310	Mediana	4.510
Moda	4.720	Moda	4.340	Moda	4.510
Desviación estándar	0.131	Desviación estándar	0.083	Desviación estándar	0.113
Varianza de la muestra	0.017	Varianza de la muestra	0.007	Varianza de la muestra	0.013

Estanque 1 punto de muestreo 7	
Media	6.307
Error típico	0.091
Mediana	6.195
Moda	5.610
Desviación estándar	0.501
Varianza de la muestra	0.251

Figura 55. Estadística aplicada a los datos del estanque 1.

La desviación estándar representa la distribución de cada muestra respecto a la media, entre más pequeño el valor mayor precisión (Morales, 2012). Los valores alcanzados son relativamente pequeños, el de mayor valor es el registrado en el punto 7; debido a que es el punto más cercano al aireador en el estanque. El movimiento del agua genera una variación continua significativa en la concentración de oxígeno disuelto en este punto que lo hace destacar del resto de las lecturas obtenidas.

Para el estanque 2 se aplicó el mismo concepto de estadística, como se observa en la figura 56.

Estanque 2 punto de muestreo 1		*Estanque 2 punto de muestreo 2*		*Estanque 2 punto de muestreo 3*	
Media	4.125	Media	4.875	Media	2.589
Error típico	0.058	Error típico	0.006	Error típico	0.023
Mediana	4.025	Mediana	4.850	Mediana	2.500
Moda	4.510	Moda	4.850	Moda	2.500
Desviación estándar	0.319	Desviación estándar	0.034	Desviación estándar	0.128
Varianza de la muestra	0.102	Varianza de la muestra	0.001	Varianza de la muestra	0.016
Estanque 2 punto de muestreo 4		*Estanque 2 punto de muestreo 5*		*Estanque 2 punto de muestreo 6*	
Media	3.792	Media	3.775	Media	3.727
Error típico	0.020	Error típico	0.048	Error típico	0.034
Mediana	3.830	Mediana	3.920	Mediana	3.720
Moda	3.900	Moda	4.000	Moda	3.750
Desviación estándar	0.109	Desviación estándar	0.265	Desviación estándar	0.185
Varianza de la muestra	0.012	Varianza de la muestra	0.070	Varianza de la muestra	0.034
		Estanque 2 punto de muestreo 7			
		Media	3.001		
		Error típico	0.015		
		Mediana	3.010		
		Moda	3.050		
		Desviación estándar	0.083		
		Varianza de la muestra	0.007		

Figura 56. Estadística aplicada a los datos del estanque 2.

Observamos que los valores de la desviación estándar al igual que el estanque 1 no es significativa, lo que confirma que el sistema de detección de oxígeno disuelto es preciso en la toma de datos.

Para conocer la exactitud del sistema de detección se deben conocer las concentraciones de oxígeno del estanque. En este caso, los estanques son empleados para el cultivo de tilapia, la cual tolera bajos niveles de oxígeno en el agua. Sin embargo, el crecimiento, conversión alimentaria y sobrevivencia se ven afectados cuando son sometidos frecuentemente a disminuciones en la concentración del mismo (Kubitza, 2009). Los niveles aceptables de saturación de oxígeno disuelto para la producción de tilapia deben ser mayores a 3 mg/L y menores a 5 mg/L (INAPESCA, 2018).

Con base en lo anterior, se realizó un análisis estadístico de los datos obtenidos en cada estanque (Cuadro 14).

Cuadro 14. Promedio de las concentraciones de Oxígeno Disuelto de cada punto de muestreo.

OD mg/L		
	Estanque 1	Estanque 2
punto 1	5.725	4.125
punto 2	3.857	4.875
punto 3	5.411	2.589
punto 4	4.623	3.792
punto 5	4.275	3.775
punto 6	4.489	3.727
punto 7	6.307	3.001

Posteriormente, se aplicó estadística básica por estanque para obtener las concentraciones finales de OD (Cuadro 15). Los cuales fueron comparados con los valores recomendados de oxígeno disuelto para el cultivo de tilapia.

Cuadro 15. Estadística de los estanques de cultivo.

Valores aceptables	*Estadística estanque 1*	
< 3 mg/L > 5 mg/L	Media	4.955
	Desviación estándar	0.878
	Estadística estanque 2	
	Media	3.698
	Desviación estándar	0.742

En este caso, el promedio de las lecturas obtenidas en cada uno de los estanques se encuentra dentro del rango recomendado para el cultivo de tilapia.

7. Discusión

7.1 Comparativa de métodos de detección de OD

Como se mencionó en el capítulo 1.1.1 existen tres métodos para medir la concentración de oxígeno disuelto en agua, el método Winkler o yodométrico, el método óptico LDO y el método electrométrico.

El método Winkler es el método más empleado y exacto, sin embargo, tiene algunas limitaciones; requiere de personal capacitado para lograr buenos resultados en la determinación del punto final de la valoración, ya que está sujeto a errores debido a interferencias (Mayarí et al., 2005). Aunado a esto requiere de materiales de laboratorio y equipo sofisticado para poder determinar esta variable.

El método electrométrico por su parte, se basa en la tasa de difusión del oxígeno molecular a través de una membrana plástica permeable al oxígeno que actúa a la vez como barrera contra impurezas que llegasen a interferir (Standard methods for the Examination of Water and Wastewater, 1995). Además, se puede monitorear de manera continua y en tiempo real los niveles de oxigenación, con la capacidad de tener fácil implementación a nivel local, practicidad y costo accesible. En cuanto a limitaciones, el uso prolongado del sensor en cuerpos de agua con altos niveles de sulfuro de hidrogeno alteran el valor el del sensor por el cual debe estar en constante calibración, de igual forma el sensor solo puede trabajar en agua dulce o con baja salinidad. En caso de requerir el nivel de oxígeno en un cuerpo de agua salada se deben calcular factores desarrollados experimentalmente.

El uso de sensores ópticos, permite corregir los errores del electrodo de membrana, debido a que trabaja por medio de luminiscencia y elimina las interferencias por reacciones química; además, no requiere mantenimiento ni calibración continua (Hack, 2017). Su limitante es a nivel económico, ya que su precio supera entre 8 y 10 veces el costo de un electrodo de membrana.

Cuadro 16. Comparativa entre métodos de medición de OD.

	Comparativa		
	Método Winkler	Método electrométrico	Método óptico
Exactitud	Alta	Alta	Alta
Complejidad	Alta	Baja	Baja
Errores e Interferencias	Alta	Baja	Nula
Personal capacitado	Si	No	No
Tiempo implementado	Alta	Baja	Baja
Cantidad de materiales	Alta	Baja	Baja
Costo	Alta	Baja	Alta

Por lo anterior (Cuadro 16) se infiere que, el método electrométrico, utilizado en este trabajo de investigación, efectivamente se adecua a las características necesarias para el sistema de detección.

7.2 Sensor electroquímico

Existe una amplia variedad de sensores de OD en el mercado actualmente, incluso, por el mismo precio los fabricantes ofrecen un sistema con display listo para ser utilizado sin necesidad de programación y un ordenador. Este tipo de sensores están diseñados para conectarse y usarse, sin embargo; tienen una limitante, no pueden ser mejorados a futuro, impidiendo que se adecuen a las necesidades del usuario. Si se desea obtener una base de datos este requerirá hacerlo de forma manual. En caso contrario, los sensores compatibles con placas de microcontroladores, adquieren la información de la variable y generan una base de datos en un ordenador, de forma simultánea, para futuros análisis. Otra limitante de los sensores con display es que el usuario debe manipular el equipo en todo momento.

A diferencia de los sensores anteriores, el sensor de membrana empleado en esta investigación puede ser mejorado con protocolos de comunicación inalámbrica, recibiendo información de la variable desde el punto de muestreo al dispositivo móvil u ordenador, incluso a una distancia de 60m en lugares cerrados y hasta 1200m en campo abierto.

Los sistemas de detección tienen una limitante, mantenerse en un solo sitio del cuerpo de agua. Considerando la posibilidad de transmitir vía inalámbrica, es posible implementar un vehículo acuático operado remotamente funcionando como transporte del sistema de detección. De esta forma se puede monitorear una amplia superficie del cuerpo de agua, desde estanques de cultivo hasta lagunas y ríos; sin que el usuario deba desplazarse por la superficie de interés y retroalimentando la información a través de la pantalla de un ordenador.

8. Conclusiones

La presente investigación, permitió el desarrollo de un prototipo de vehículo acuático operado remotamente con un sistema de detección de oxígeno disuelto en agua en su cubierta, permitiendo así determinar en tiempo real la concentración de dicho gas disuelto.

Con relación al vehículo acuático, se demostró la capacidad de estabilidad para una navegación suave en aguas someras, anulando el hecho de posibles salpicaduras que averíen los componentes electrónicos y evitando volcaduras aun maniobrando el prototipo a altas velocidades.

El sistema de detección de oxígeno disuelto reveló primeramente que, el protocolo de comunicación ZigBee, cumplió con el envío de datos de manera inalámbrica sin presentar ningún tipo de interferencia; incluso alejando el dispositivo a distancias mayores a 15 metros del ordenador.

La implementación de un software para la interpretación de las variables e integración de una base de datos, no presentó problemas de compatibilidad con los módulos XBee. Las pruebas estadísticas para la fiabilidad del sensor electroquímico en la determinación de oxígeno disuelto, mostraron resultados positivos dentro de los parámetros aceptables. Demostrando así, estabilidad, precisión y exactitud, principios básicos de instrumentación para mediciones.

El costo de los drones anfibios es similar o mayor al costo de construcción del prototipo propuesto. Sin embargo, el tiempo de navegación del vehículo acuático varía entre 4 a 5 hrs con un alcance máximo de navegación de 800m, mientras que un drone tiene un tiempo de uso de 8 a 10 minutos con un alcance máximo de 100m.

El prototipo diseñado resulta de gran utilidad para el sector productivo acuícola, ya que permite el monitoreo continuo de las concentraciones de oxígeno disuelto en menor tiempo, reduciendo las horas-hombre y facilitando información técnica vital en la toma de decisiones. Además de ser un sistema accesible económicamente y de fácil operación.

9. Recomendaciones

Como propuesta de mejora del prototipo, es ideal instalar un sistema de anclaje para aumentar la estabilidad del vehículo acuático en reposo y ser llevado a cuerpos de agua con mayor turbulencia. Se propone instalar una cámara compatible con teléfonos móviles para observar la navegación y el entorno haciendo más seguro el uso de la embarcación a distancias lejanas a la vista del operador. Por último, instalar un sistema de winches para bajar y subir el electrodo de esta manera se podrá determinar la concentración de oxígeno disuelto a varias profundidades, esto acompañado de sensores de distancia o de proximidad que indique a que profundidad exactamente se encuentra el sensor.

Acrónimos

OD	Oxígeno disuelto
mg/L	Miligramos sobre litro
mmHg	Miligramo de mercurio unidad de presión
Mn	Magnesio
H	Hidrógeno
I	Yodo
O	Oxígeno
EPA	Enviromental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental)
LDO	Luminescent Dissolved Oxygen (Oxígeno disuelto por luminiscencia)
LED	Light emitting diode (Diodo Emisor de Luz)
ppm	Puntos por millón
IDE	Integrated Development Enviroment (Entorno de Desarrollo Integrado)
mm	Milímetros
m	Metros
Ppr	Perpendicular de proa
SM	Sección media
Ppp	Perpendicular de popa
ST	Estación
kbps	Kilobytes por segundo
Mbps	Megabytes por segundo
PSI	Libra por pulgada cuadrada
NaOH	Hidróxido de sodio
V	Volts
VI	Instrumento virtual

Anexo A. Definiciones y descripciones

Casco: Es el cuerpo de un buque sin contar su arboladura, su superestructura, sus máquinas, los pertrechos, etc.

Eslora: Es la medida en sentido longitudinal de un buque.

Manga: Es la distancia medida horizontalmente en sentido transversal del buque tomada en la cuaderna maestra.

Puntal: Es la medida en sentido vertical del buque en inglés Depth.

Quilla: Pieza alargada de madera o de hierro, que va de proa a popa por la parte inferior de una embarcación, y en la que se apoya toda su armazón.

Proa: Es la parte delantera del buque en el sentido del movimiento del mismo. Suele tener forma de cuña a fin de presentar menos resistencia al medio en el que se desplaza; en este caso el agua del mar.

Popa: Es la parte trasera o posterior del barco. Es el final de la estructura donde va instalado el timón y las hélices.

Cubierta: Cada una de los pisos de un barco.

Perpendicular de proa: Es la línea vertical trazada por la intersección de la máxima flotación con el canto de proa de la roda de un barco.

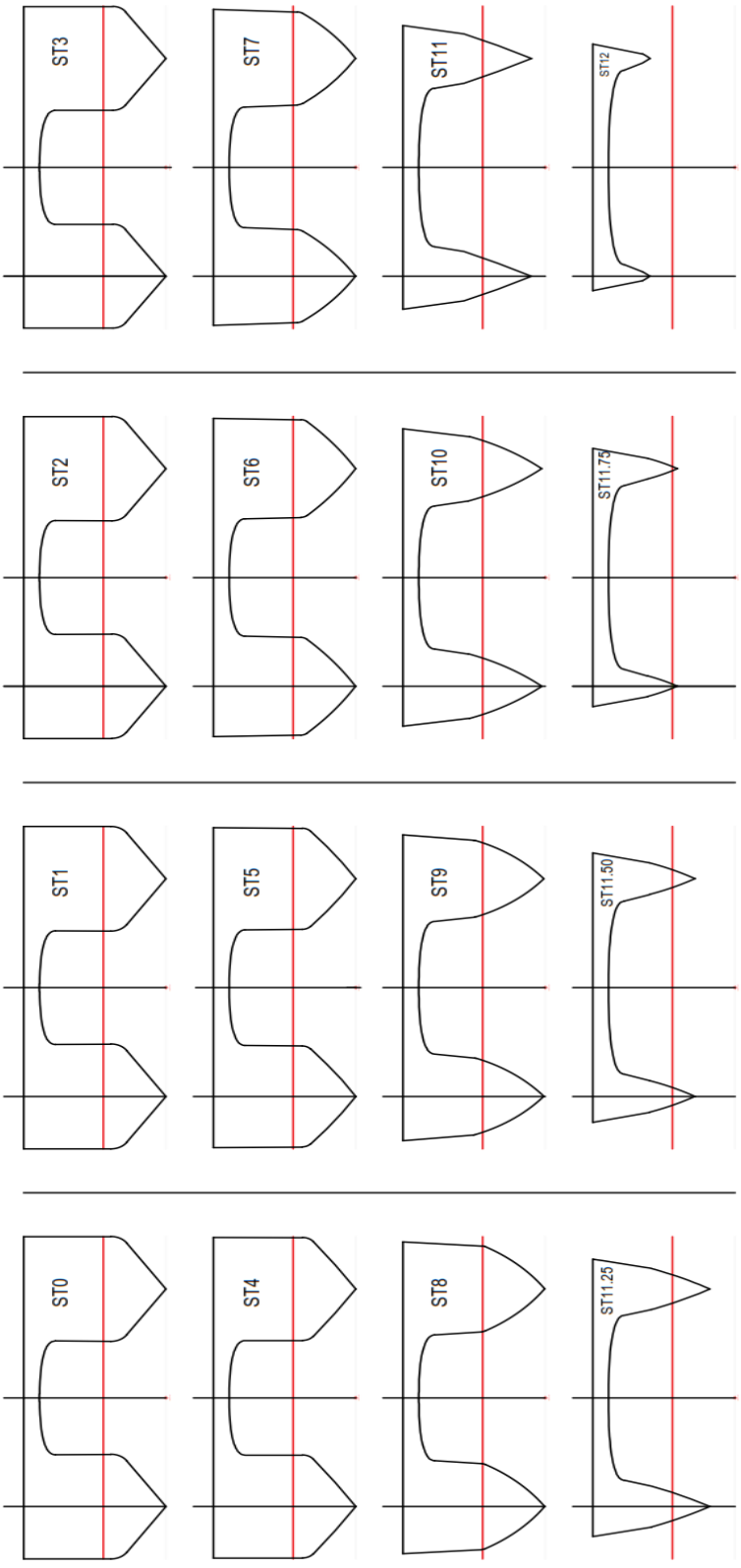
Perpendicular de popa: Es la línea vertical cuya posición queda definida en función de la forma de la popa del buque.

Sección media: Medida transversal de un buque, efectuada por el punto medio de la eslora entre perpendiculares

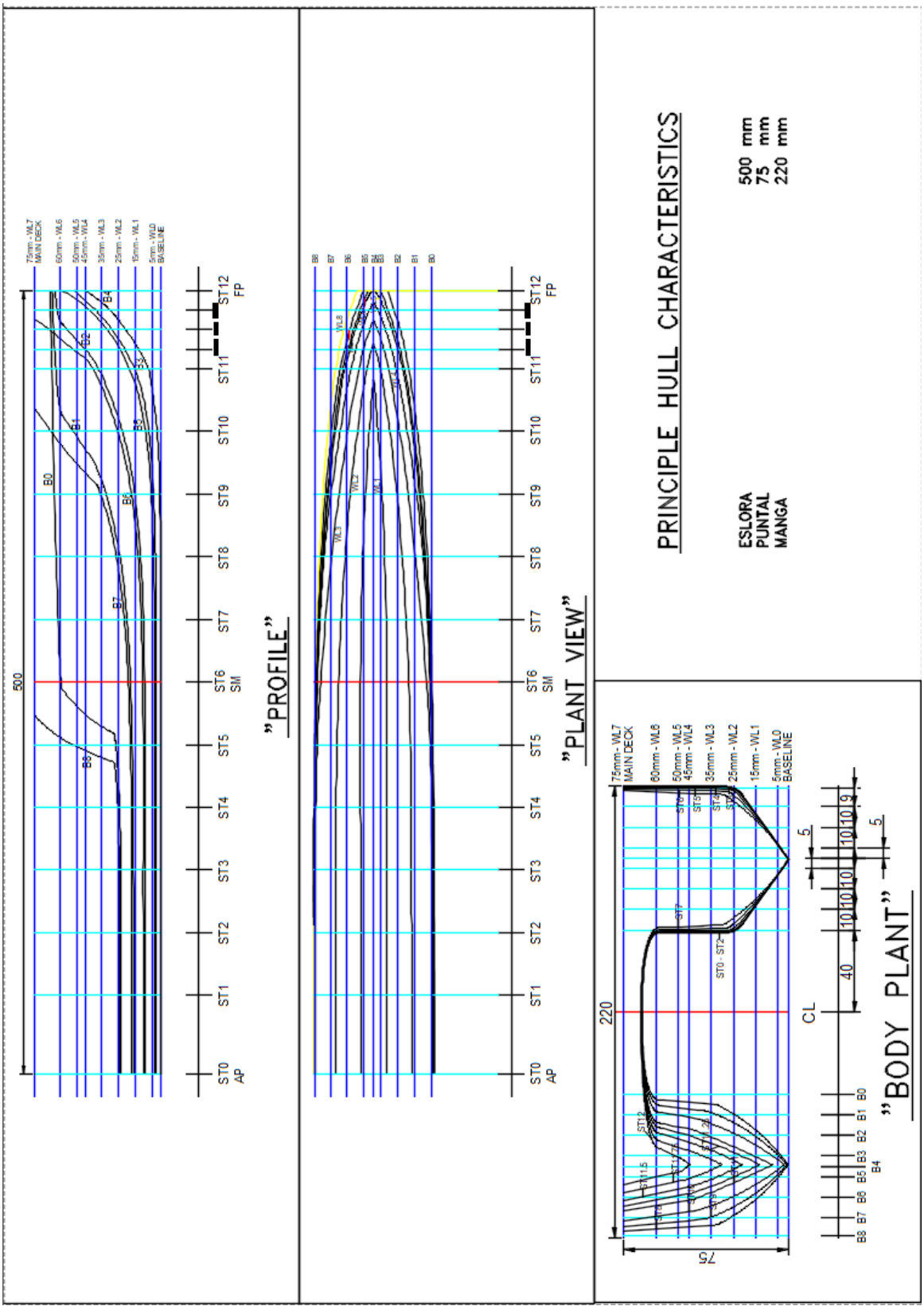
Main Deck: Cubierta principal la que cierra el casco dándole estanqueidad y resistencia. También se llama cubierta de intemperie.

Cuaderna: Cada una de las piezas estructurales curvas y transversales que nacen en la quilla desde la que se extienden a los costados, simétricamente, dando rigidez y forma al casco. Son las llamadas "costillas" del buque.

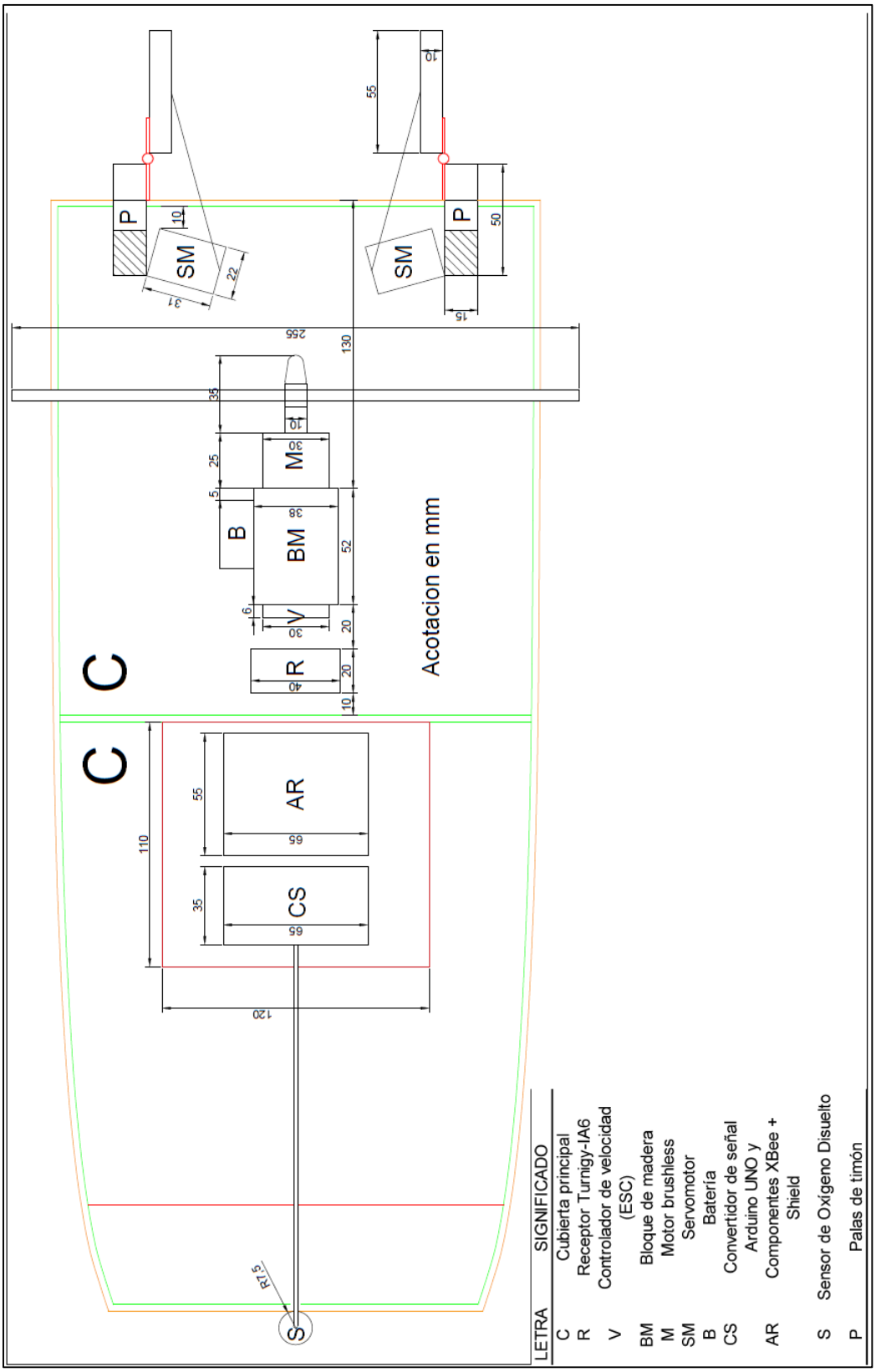
Anexo B. Estaciones



Anexo C. Plano de Líneas

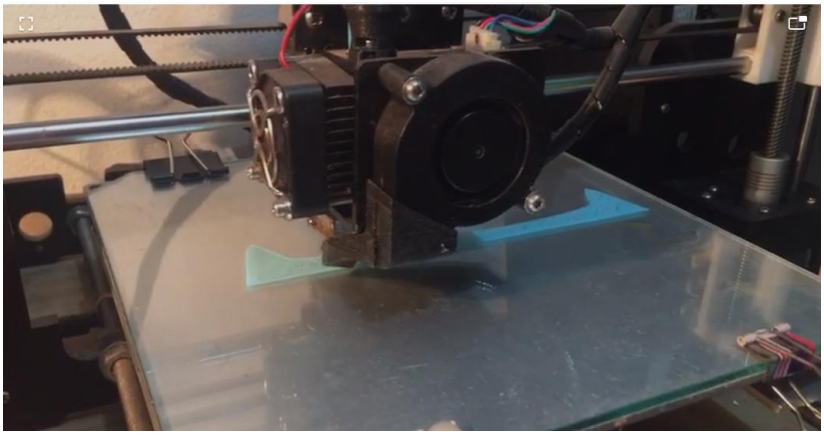


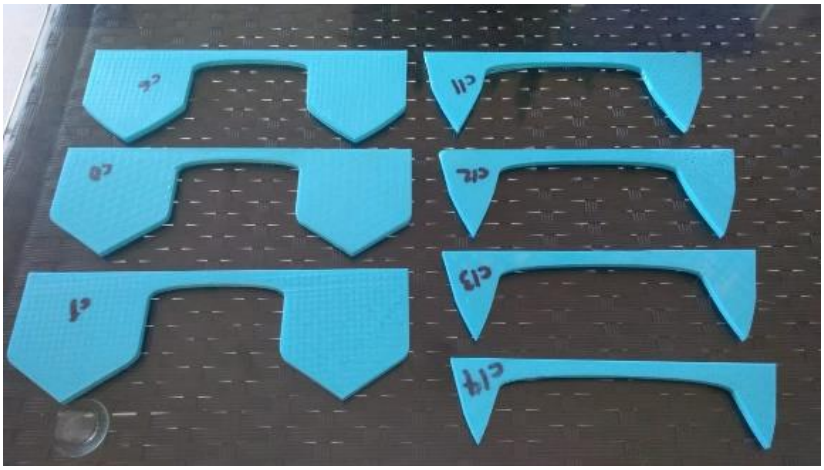
Anexo D. Vista de planta del plano de arreglo general



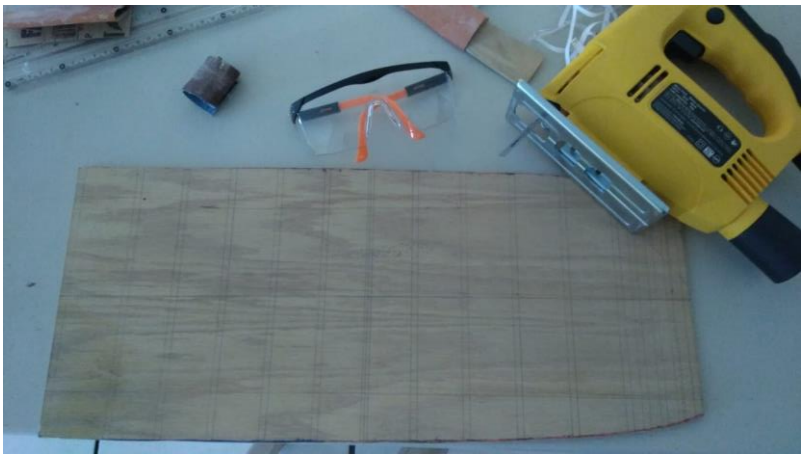
Anexo E. Memoria fotográfica proceso de construcción del vehículo acuático

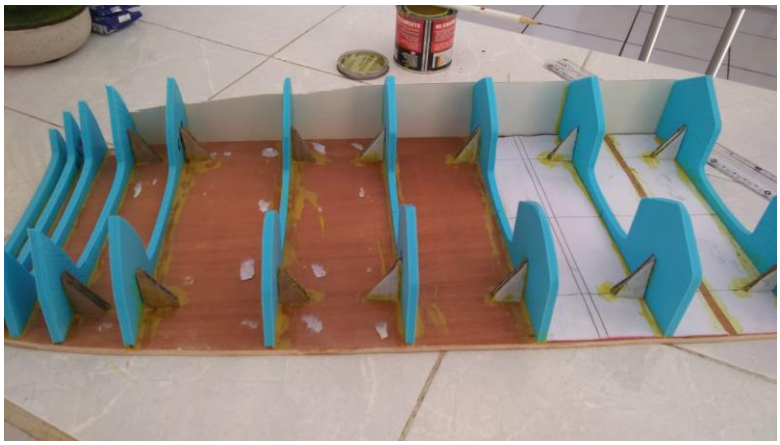
Impresión en 3D de las cuadernas.





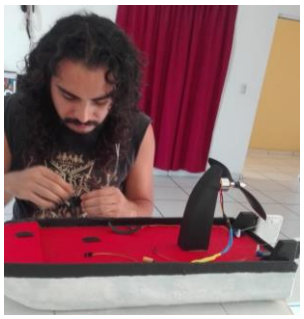
Montaje de las cuadernas y forro del vehículo acuático.





Proceso de laminado del vehículo acuático.

Sistema de propulsión y detallado estético.



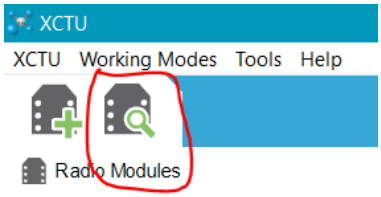
Resultado final del vehículo acuático.

Prototipo en operación

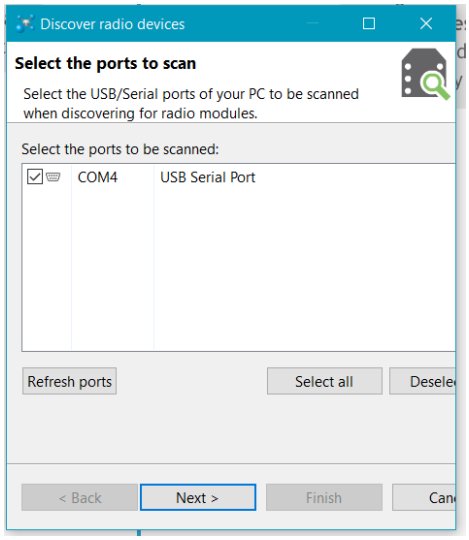
Anexo F.- Configuración de los módulos XBee

A continuación, se describen los pasos a seguir en X-CTU para configurar las características del módulo coordinador de la red inalámbrica.

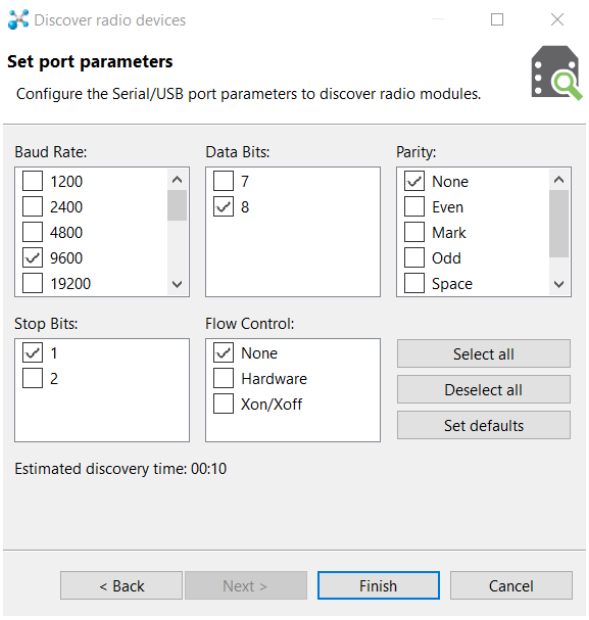
1. Acoplar el módulo XBee elegido como coordinador al adaptador Xbee USB-Explorer y conectarlo a la PC.
2. Abrir X-CTU, posteriormente seleccionamos el icono buscar dispositivo ubicado en el extremo superior izquierdo.



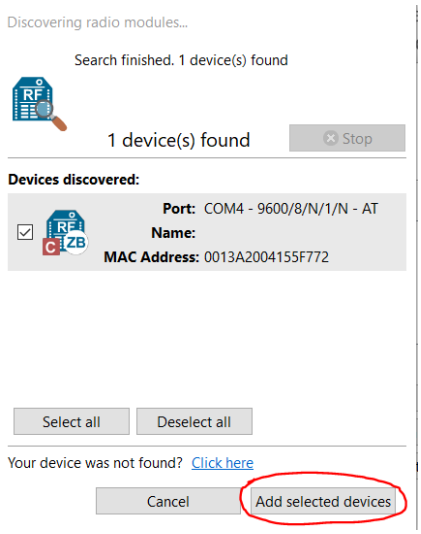
3. Se abrirá la siguiente pantalla, seleccionamos el puerto COM al que se encuentra nuestro modulo y hacemos clic en siguiente.



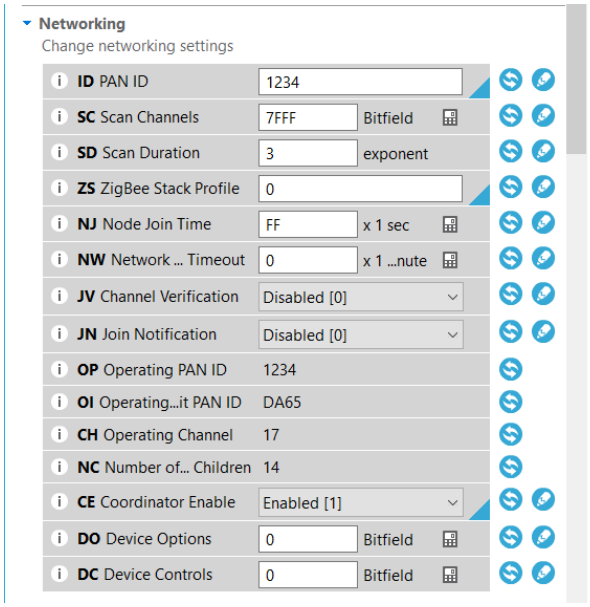
4. En la siguiente ventana se observan elementos marcados de manera predeterminada, dejamos los valores tal cual y damos clic en finalizar.



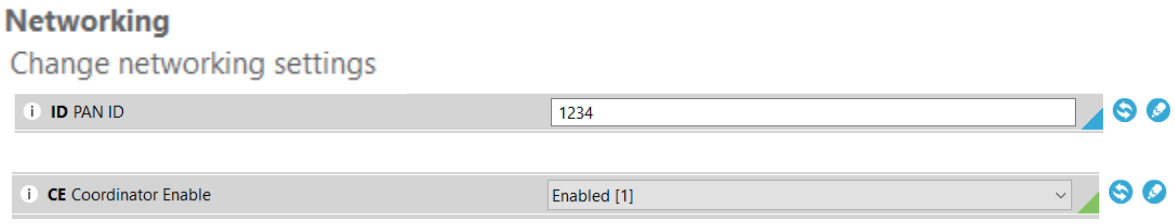
5. Comenzará a buscar el módulo XBee una vez encontrado seleccionamos el dispositivo y hacemos clic en añadir dispositivos seleccionados.



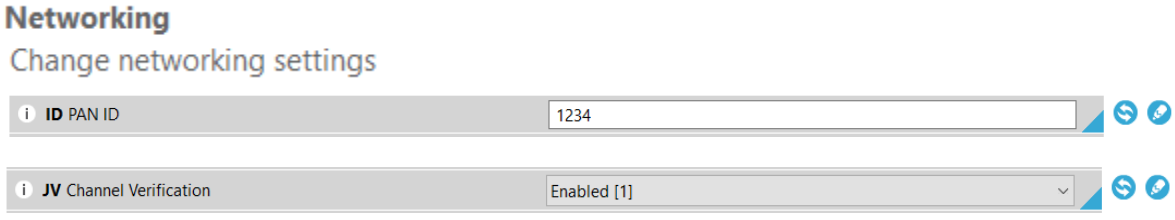
6. Hacemos clic sobre el modulo permitiendo así, visualizar el panel de configuración, para esta investigación solo trabajaremos en el panel Networking debido a que es una conexión tipo transparente.



7. Finalmente modificamos la PAN ID y habilitamos la pestaña coordinador como se muestra a continuación.



Para el módulo router o transmisor, los pasos a seguir son los mismos que el modulo coordinador la única diferencia radica en el paso 7 mencionado con anterioridad, la PAN ID se mantiene igual, pero la pestaña coordinador se mantiene inhabilitado a cambio se habilita la pestaña verificación de canal como se muestra a continuación.



Anexo G. Presupuesto

El precio de los productos mostrados en el siguiente cuadro, están en pesos mexicanos al mes de agosto del año 2019.

Producto	Precio (pesos)
Servomotor SG90 (x2)	$ 64.00
Transmisor y Receptor Turnigy TGYI6	$ 2,400.00
KIT (Controlador de Velocidad 30 amperes, Motor Brushless 1000KV, Hélices)	$ 359.00
Batería Li-Po Turnigy 1.6 amperes 11.1V	$ 710.00
Cargador batería Li-Po	$ 265.00
Módulo Xbee S2 ZigBee WIRE ANTENNA (x2)	$ 1,780.00
Shield Xbee compatible con Arduino UNO	$ 385.00
Xbee USB-Explorer	$ 290.00
Placa Arduino UNO	$ 270.00
Rollo de filamento de impresora 3D	$ 400.00
Sensor de oxígeno disuelto DF Robots	$ 3,319.00
Materiales de acabado (Precio aproximado)	$ 150.00
Materiales de laminado (Precio aproximado)	$ 350.00
Total	$ 10,742.00

Anexo H. Materiales

Materiales del proceso de construcción del casco

- Impresora 3D
- Un rollo de filamento para impresora 3D
- Lija para madera
- Sierra caladora
- Madera contrachapada de 6mm
- Pegamento epóxico
- Pegamento blanco
- Cartón

Materiales para el laminado del casco

- Fibra de vidrio
- Resina y catalizador
- Recipientes plásticos
- Solvente
- Tijeras
- Palo de madera
- Brocha
- Lija
- Bata o delantal
- Gafas protectoras
- Guates de trabajo
- Mascara o paño para proteger nariz y boca al momento de lijar
- Periódicos para poner de base.

Materiales del sistema de propulsión y acabado estético

- Sierra caladora
- Pegamento epóxico
- Destornillador y pijas

- Retazos de madera
- Madera de 15 mm y 10 mm de espesor
- Cartón y periódico
- Par de bisagras
- Pistola y barras de silicón
- Pintura para automóvil
- Pintura acrílica
- Brochas y pinceles

Literatura citada

Adam, H., Stanislaw, G., & Folk, I. (1991). Chemical Sensors: Definitions and Classification.

Apple, K., Bakken, C., & Gastineau, J. (2006). *Science with the Best from Vernier.* Beaverton: Vernier International.

Baez, M. (2017). *Integración de sensores electriquímicos basados en nanomateriales funcionales para le detección de contaminantes en aguas.* Barcelona.

Bonsawat, V., Ekchamanonta, J., Bumrungkhet, K., & Kittipiyakul, S. (2010). Xbee wireless sensor networks for temperature monitoring. *The Second Conference on Application Research and Development*.

Busto, M. (2008). *Diseño del Proceso de Fabricación de un Catamaran de Fibra de Vidrio en Astillero.* Universidad de Cádiz.

Cano, M. (2008). *Diseño y aplicación de sensores electroquímicos basados en moléculas orgánicas condutoras .* Servicio de publicaciones de la Universidad de Córdoba.

CEDRSSA. (2015). *La acuacultura .* México : Camara de diputados .

Chiew, D. (2016). *Diseño y cálculo de una embarcación sin licencia de 5m de eslora.* Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.

Cucho, Z., Orihuela, F., Sánchez, R., & Rodríguez, L. (2007). *Microcontroladores ATmega8.* Pontificia Universidad Católica de Perú.

Diaz, C., Segovia, J., Garduño, M., & Tejeda, V. (2011). Medición de caudales mediante la implementación de un vehículo acuático teleoperado.

DIGI. (2017). *XBee/XBee-PRO S2C Zigbee user guide.*

Duarte, B. (1993). *Conocimientos marineros .* Heroica Escuela Naval.

Durango, M., Ospina , N., Carvajal, J., & Fonseca , A. (2012). Analysis and design of a low cost home automation prototype system. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 117-128.

EPA. (2006). *Letter Recommendation of LDO.*

Eyres, D., & Bruce, G. (2012). *Ship construction.* Butterworth-Heinemann.

García , E., García , H., & Cárdenaz , L. (2006). *Simulación y análisis de sistemas con ProModel.* Pearson Education.

Goyenola, G. (2007). *Guía para la utilización de la Valijas Viajera - Oxígeno Disuelto.* RED MAPSA.

GUEMISA. (2018). *Oxígeno Disuelto (Electrodo de Membrana).* Madrid.

Hack, M. (2017). *Sistema de control de proceso LDO.*

Hernández, R. (2010). *Introducción a los Sistemas de Control.* México: PEARSON.

INAPESCA. (2018). *Acuacultura comercial .* Ciudad de México.

Kubitza, F. (2009). Producción de tilapias en estanques excavados en tierra: estrategias avanzadas en manejo. *Panorama de Aquicultura*.

Lajara, J., & Pelegrí, J. (2007). *Entorno Gráfico de Programación (LabVIEW 8.2).* Barcelona: MARCOMBO.

Larsson , L., & Eliasson, R. (2000). *Principles of Yacht Design.* Londres: Adlard Coles Nautical.

Lledó, E. (2010). *Diseño de un sistema de control domótico basado en la plataforma Arduino.* Universidad Politéctica de Valéncia.

Mayarí, R., Espinosa, M., & Gutiérrez , J. (2005). Validación de la determinación de oxígeno disuelto y demanda bioquímica de oxígeno en aguas y aguas residuales. *CENIC*.

Menéndez, A. (2015). *Desarrollo de un Sistema de Sensores para la Detección de Sustancias Peligrosas.* Madrid: ATVS.

Morales, A. (2012). *Probabilidad y estadisticas.* Chile: Instituto Profesional Virginio Gómez.

Mott, R. (2006). *Mecánica de fluidos .* Pearson Education .

Ogata, K. (2010). *Ingeniería de Control moderna.* Madrid: PEARSON.

PNA. (1988). *Principles of naval architecture.*

Quiñones, C., & Bernal , M. (2011). LabVIEW y la instrumentación virtual aplicados a la docencia y la investigación de ciencias básicas.

Revilla, J., Koev, K., Roldan, A., Alvarez, C., & Díaz, R. (1994). Metodos de estudio del deficit de oxígeno originado por vertidos de aguas residuales en zonas costeras. *Ingeniería del Agua*, 83-96 .

Rodríguez, M. (2014). *Sistema de Control Remoto Para Aplicaciones Domóticas a Través de Internet.* Universidad Autonoma de Madrid.

Sánchez, J. (2010). *Proceso de diseño, cálculo y construcción de una embarcación menor .* Barcelona: Facultad de Náutica de Barcelona.

Sánchez, L., Sanchis, M., & Sanz, E. (1998). *Introducción y aplicación en LabVIEW para el control de un proceso contínuo mediante PID.* ESAII.

Sawyer, C., & McCarty. (1978). *Chemistry for Environmental Engineering.* Nueva York: McGraw- Hill Book Company.

SIAPA. (2014). *Criterios y lineamientos técnicos para factibilidades. Sistemas de control y monitoreo.*

SISCODE. (2015). *Sistemas de Codificacion S.A.* Obtenido de http://www.siscode.com

Standard methods for the Examination of Water and Wastewater. (1995). Nueva York: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation.

Stetter, J., Penrose, W., & Yao, S. (2003). Sensors, Chemical Sensors, Electrochemical Sensors, and ECS. *Journal of The Electrochemical Society*, S11-S16.

Torres, C., Landassuri, V., Carbajal , J., & Flores, J. (2016). Predicción de oxígeno disuelto en acuacultura.

Wheat, D. (2012). *Arduino Internals.* Apress.