

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño
Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería



**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO
ELECTRÓNICO SUBMARINO PARA APLICACIONES
OCEANOGRÁFICAS**

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de

MAESTRO EN INGENIERÍA

presenta:

OSCAR ADRIAN AGUIRRE CASTRO

Director de tesis

Dr. Everardo Inzuza González

Ensenada, Baja California, México. Junio del 2018.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño

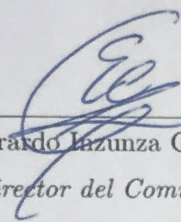
Diseño y construcción de un prototipo electrónico
submarino para aplicaciones oceanográficas

TESIS

que para obtener el grado de MAESTRO en INGENIERÍA presenta:

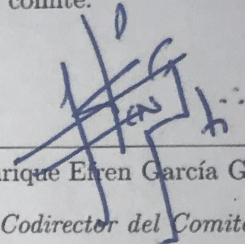
OSCAR ADRIAN AGUIRRE CASTRO

Y aprobada por el siguiente comité:



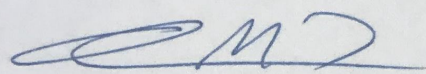
Dr. Everardo Lazunza González

Director del Comité



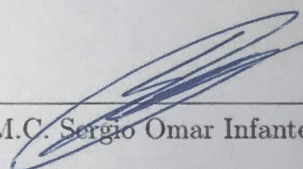
Dr. Enrique Eñen García Guerrero

Codirector del Comité



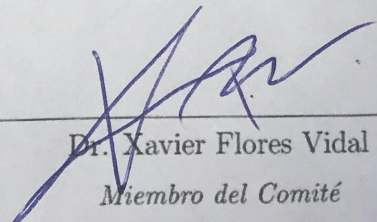
Dr. Oscar Roberto López Bonilla

Miembro del Comité



M.C. Sergio Omar Infante Prieto

Miembro de Comité



Dr. Xavier Flores Vidal

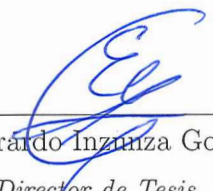
Miembro del Comité

Junio de 2018

RESUMEN de la tesis de **Oscar Adrian Aguirre Castro**, presentada como requisito parcial para obtener el grado de **MAESTRO EN INGENIERÍA**, del programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería de la UABC. Ensenada, B. C. México, Junio de 2018.

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO ELECTRÓNICO SUBMARINO PARA APLICACIONES OCEANOGRÁFICAS

Resumen aprobado por:



Dr. Everardo Inzunza González

Director de Tesis



Dr. Enrique Efren García Guerrero

Codirector de Tesis

En este trabajo de tesis, se presenta el desarrollo e implementación de un prototipo electrónico submarino para aplicaciones oceanográficas. Este dispositivo puede ser utilizado como una herramienta en la exploración de ambientes acuáticos, también es conocido como Vehículo Operado Remotamente (ROV por sus siglas en inglés). Para la construcción de este ROV, se propone utilizar materiales de bajo costo y fácil acceso, tales como PVC, ABS y PLA. Para la fabricación de algunas partes mecánicas se propone utilizar un software para dibujo en 3D asistido por computadora y emplear una impresora 3D con filamento PLA. La carga útil del ROV propuesto está basada en el sistema embebido Raspberry Pi 3 y el microcontrolador Atmel 328P. El control remoto del ROV es mediante un enlace alámbrico usando Ethernet directamente conectado al Raspberry Pi 3. La gestión de los sensores y control de los motores es mediante el microcontrolador Atmel 328P, el cual tiene comunicación directa vía USB con Raspberry Pi 3. La principal ventaja de este ROV, es que está desarrollado con materiales de bajo costo y software de código abierto. Sus principales aplicaciones pueden ser en exploración submarina, monitoreo submarino en zonas de cultivo acuícola, plataformas petroleras, supervisión de tuberías submarinas, mapeo de superficies submarinas y en general para cualquier estudio submarino (flora, fauna, etc.) donde las capacidades físicas del ser humano estarían en riesgo.

Palabras clave: Submarino, vehículo operado remotamente, exploración submarina, prototipo, ROV.

ABSTRACT of the thesis of **OSCAR ADRIAN AGUIRRE CASTRO**, presented as a partial requirement to obtain the degree of MASTER in ENGINEERING, of the program of MSc and PhD in Sciences and Engineering of UABC. Ensenada, B. C., Mexico, June 2018.

DESING AND MANUFACTURE OF UNDERWATER ELECTRONIC PROTOTYPE FOR OCEANOGRAPHIC APPLICATIONS

Abstract approved by:



Dr. Everardo Inzunza González

Thesis supervisor



Dr. Enrique Efrén García Guerrero

Thesis supervisor

In this thesis, the development and implementation of an underwater electronic prototype for oceanographic applications is presented. This device can be used as a tool in the exploration of aquatic environments, it is also known as Remote Operated Vehicle (ROV). For the manufacture of this ROV, it is proposed to use low cost and easy acquisition materials, such as PVC, ABS and PLA. To make some mechanical parts, it is proposed to use computer-aided 3D drawing software and 3D printer with PLA filament. The payload of the proposed ROV is based on the Raspberry Pi 3 embedded system and the Atmel 328P microcontroller. The remote control of the ROV is through a wire link by using Ethernet communication with the Raspberry Pi 3. The management of sensors and control of the engines is through the Atmel 328P microcontroller, which has direct USB communication with Raspberry Pi 3. The main advantage of this ROV, is that it is developed with low-cost materials and open source software. Its main applications can be underwater exploration, underwater monitoring in aquaculture areas, oil platforms, supervision of underwater pipes, mapping of underwater surfaces and in general for any underwater research (vegetation and animals life) where the physical capacities of the human would be at risk.

Keywords: Submarine, remote operated vehicle, underwater exploration, prototype, ROV.

A mi Familia

Agradecimientos

A **DIOS**, por tenerme siempre bajo su protección, por las bendiciones que me ha dado todos los días de mi vida.

Al **Dr. Everardo Inzunza González**, por su amistad, por haberme dirigido en la realización del presente trabajo de tesis de maestría, la atención y el apoyo incondicional que me ha brindado.

Al **Dr. Enrique Efrén García Guerrero**, por su amistad, atención, por sus enseñanzas que me permitieron desarrollar con éxito el presente trabajo de tesis de maestría.

Al **Dr. Oscar Roberto López Bonilla**, por su amistad, por sus comentarios y enseñanzas, que me permitieron desarrollar el presente trabajo de tesis de maestría.

Al **Dr. Xavier Flores Vidal**, **MC Sergio Omar Infante Prieto**, un especial agradecimiento por sus comentarios muy acertados en las presentaciones y revisiones del presente trabajo de tesis de maestría.

A mi esposa **Yurivia Miranda Zavala**, por ser siempre mi apoyo incondicional en todos los proyectos de mi vida, por su motivación en los momentos difíciles y ser un pilar de mi familia.

A mis hijos **Pamela Aguirre**, **Oscar Santiago Aguirre**, **Vania Aguirre**, que con su alegría y cariño son un motivo para seguir adelante preparandome.

A mis padres **Francisco Oscar Aguirre González**, **Ana Elia Castro Lozoya**, por estar siempre alientandome a cumplir todos mis sueños y que mas se puede agradecer a las dos personas que siempre han visto por mi, me han enseñado a crecer tanto personal, como profesionalmente, gracias por TODO!!!.

A mis hermanas, **Eliana Aguirre y Paloma Aguirre**, por ser ejemplos de vida, por su apoyo y sus consejos.

A mis **familiares y amigos**, que siempre con sus consejos y comentarios, me hicieron crecer personalmente, gracias por su apoyo incondicional.

Al **CONACyT**, que con su programa de becas me proporcionaron los recursos necesarios durante esta etapa importante en mi vida profesional.

*A nuestra alma mater: **Universidad Autónoma de Baja California**, que es como mi segundo hogar y donde se me ha permitido desarrollarme profesionalmente.*

*Al **coordinador de posgrado**, Dr. Miguel Enrique Martínez Rosas, por sus asesorías administrativas.*

Ensenada, B. C. México.
de Junio de 2018.

OSCAR ADRIAN AGUIRRE CASTRO

Tabla de Contenido

	Página
Tabla de Contenido	i
Resumen	iii
Abstract	iv
Agradecimientos	vi
Lista de figuras	x
Lista de tablas	xii
I Introducción	1
I.1 Motivación	5
I.2 Planteamiento de problema	6
I.2.1 Descripción del problema	6
I.2.2 Preguntas de investigación	8
I.2.3 Delimitación del problema	8
I.3 Metodología	9
I.4 Objetivos del proyecto	10
I.4.1 Objetivo general	10
I.4.2 Objetivos específicos	11
I.5 Organización de la tesis	11
II Marco Teórico	13
II.1 Vehículos no-tripulados	13
II.2 Vehículos Autónomos Submarinos (ROVs)	14
II.2.1 Aplicaciones de los ROVs	17
II.3 Diseño de los ROVs	19
II.4 Desafíos de los ROVs	19
II.4.1 Fuente de alimentación	20
II.4.2 Grado de autonomía.	21
II.4.3 Comunicación.	21
II.5 Los ROVs ideales	22
III Metodología.	24
III.1 Búsqueda del estado del arte.	24
III.2 Selección de componentes electrónicos.	25
III.3 Acoplamiento de componentes electrónicos.	25
III.4 Desarrollo de interfaz gráfica.	26
III.5 Integración del prototipo.	26
III.6 Pruebas experimentales y elaboración de tesis.	27
IV Desarrollo del ROV propuesto	28
IV.1 Construcción de hardware del ROV.	28
IV.1.1 Diseño del ROV propuesto.	29

Tabla de Contenido (Continuación)

	Página
IV.1.2 Primer prototipo propuesto.	30
IV.1.3 Segundo rototipo propuesto.	30
IV.2 Hidrostática y flotabilidad.	31
IV.3 Topología para colocación de motores.	34
IV.4 Motores propulsores.	35
IV.5 Etapa de Potencia.	38
IV.5.1 Controlador de velocidad.	38
IV.5.2 Generador de señales PWM.	42
IV.6 Sensores propuestos para el ROV.	46
IV.7 Desarrollo de interfaz gráfica del ROV.	49
IV.7.1 Sistema embebido de alto rendimiento.	50
IV.7.2 Desarrollo del software.	53
V Resultados.	55
V.1 Resultados del hardware.	55
V.2 Pruebas de motores.	57
V.3 Software y acoplamiento de sensores.	63
V.4 Comunicación del ROV.	70
V.5 Autonomía del ROV.	71
V.6 Pruebas en ambiente acuático.	76
V.7 Temperatura dentro de la cápsula del ROV.	79
V.8 Conclusiones.	81
V.9 Trabajo a futuro.	82
Bibliografía	84

Lista de figuras

Figura	Página
1 Campana de Edmund Halley(Damian Madero Fontecha, 2012).	2
2 Submarino Turtle de David Bushnell(Damian Madero Fontecha, 2012).	2
3 Poodle desarrollado por Dimitri Rebikoff en 1952 (Christ y Robert L. Wernli, 2007).	4
4 CURV desarrollado en 1963 (Christ y Robert L. Wernli, 2007).	4
5 CURV III desarrollado en 1966 (Christ y Robert Wernli, 2013).	4
6 Snoopy ROV desarrollado en 1974 (Christ y Robert L. Wernli, 2007).	5
7 Esquema de bloques del ROV propuesto.	9
8 Vehículos no-tripulados: aéreos, terrestres y submarinos.	14
9 Clasificación de vehículos submarinos (Moreno y Saltarén, 2014).	16
10 Sistema de componentes básicos de los ROVs.	16
11 Tipos de ROVs comerciales (Christ y Robert L. Wernli, 2007).	23
12 Primer prototipo de ROV propuesto	30
13 Prototipo de ROV realizado	31
14 Primer prototipo de ROV realizado con tubería PVC	32
15 Dimensiones del ROV propuesto.	33
16 Movimientos del ROV, en distintos ejes	34
17 Puente inversor conectado a un motor CD sin escobillas (Zhao y Yu, 2011).	35
18 Circuito equivalente en un estado de conducción, en este caso A y B (Zhao y Yu, 2011).	36
19 Motor sin escobillas XCSOURCE de 5 aspas en la propela (XCSource, 2018).	37
20 Especificación de dimensiones del motor QF2611 (XCSource, 2018).	38
21 Aspecto físico de los controladores de velocidad ESC-30A.	42
22 Diagrama de relevadores para invertir el sentido del giro de los motores	43
23 Topologías de motores con controlador de vuelo comercial (ArduSub, 2018).	44
24 Controlador de vuelo Ardu-Pilot 2.6 y IFLY-C6W	45
25 Tarjetas de desarrollo Arduino Nano y Teensy 3.6	46
26 Sensor de posición MPU6050.	48
27 Sensor de temperatura DS18B20 modelo TO-92.	48
28 Cámara de acción.	49
29 Tarjeta Raspberry pi 3.	51
30 Principales procesos a realizar por el sistema embebido Raspberry Pi 3	52
31 Diagrama a bloques del sistema electrónico en el interior del ROV.	54
32 Diseño de la estructura dibujada en 3D y estructura realizada.	56

Lista de figuras (Continuación)

Figura		Página
33	Pruebas de inmersión en ambientes acuáticos controlados.	57
34	Pruebas de motores en tina con agua.	59
35	Señal PWM del controlador de vuelo Ardu-Pilot y microcontrolador Atmel 328P (Arduino nano).	60
36	Ejemplo de señales PWM. a) y b) Señal PWM obtenida en la salida del microcontrolador Atmel 328P. c) y d) Señal PWM obtenida a la salida del controlador ESC-30A	61
37	Diagrama de flujo de programa en microcontrolador Atmel 328P (Arduino Nano).	62
38	Diseño e impresión 3D de bases para motores propulsores.	63
39	Diferencia entre programación en serie y programación en hilos.	64
40	Interfaz gráfica inicial.	66
41	Obtención de valores del sensor MPU6050.	67
42	Obtención de valores del sensor MPU6050 con filtro complementario.	68
43	Pruebas de la aplicación ROV en laboratorio.	69
44	Pruebas de aplicación ROV en piscina.	70
45	Diagrama a bloques de comunicación Ethernet del ROV.	70
46	Diagrama a bloques del subsistema de alimentación del ROV.	72
47	Batería de Li-Ion para el sistema embebido Raspberry Pi.	73
48	Batería de Li-po para subsistema de potencia.	74
49	Gráficas de autonomía de ROV.	75
50	Pruebas del ROV en tina con agua	77
51	Pruebas del ROV en piscina.	78
52	Gráficas de temperatura del ROV	80

Lista de tablas

Tabla	Página
I Materiales a utilizar en la construcción de la estructura del ROV. . . .	56

Capítulo I

Introducción

Desde el principio de los tiempos el ser humano ha tenido la necesidad de explorar el océano, ya sea para la pesca o para la recolección de materias primas. En el siglo IV A.C. se empiezan a intentar desarrollar diversos mecanismos para aguantar más tiempo bajo el agua. Se cree que Alejandro Magno descendió en una máquina que fue probablemente una forma primitiva de bucear; Aristóteles también mencionó inventos que permitían a los buceadores respirar bajo el agua. En el año de 1960 el británico Edmund Halley inventa una campana de madera forrada de plomo con el peso convenientemente distribuido para evitar que la campana vuelque durante la inmersión. La campana tiene una forma troncocónica y en parte superior disponía de un vidrio para que se pudiera ver el exterior, mientras que en la parte inferior de ésta hay 3 cuerdas con un peso en cada extremo de 50 kilos para mantenerla fija en el fondo o en suspensión. Su innovación frente a otras campanas anteriores es que esta campana tiene un sistema de alimentación de aire como se muestra en la figura 1 (Damian Madero Fontecha, 2012).

En 1776 el estadounidense David Bushnell desarrolla el primer submarino llamado la tortuga (Turtle), este prototipo era un submarino que sólo tenía la capacidad para llevar un tripulante, además este debía accionar con un brazo la hélice para avanzar bajo el agua, en la figura 2 se ilustra el submarino turtle.

Por otra parte exactamente el crédito de quien desarrolló el primer ROV (Remote Operate Vehicle) probablemente seguirá siendo una incógnita, sin embargo, hay dos



Figura 1: Campana de Edmund Halley(Damian Madero Fontecha, 2012).



Figura 2: Submarino Turtle de David Bushnell(Damian Madero Fontecha, 2012).

autores que merecen ese crédito. El VUP (Programed Underwater Vehicle) que fue un torpedo desarrollado por Luppis-Whitehead en Austria en el año de 1864, sin embargo, el primer ROV conectado a una computadora fue desarrollado en 1953 por Dimitri Rebikoff, el cual lo llamó “POODLE”, en la figura 3 se pueden apreciar más detalles. En la década de 1960 la armada de Estados Unidos financió la mayor parte del desarrollo de la tecnología ROV. Al inicio desarrollaron un prototipo de cámara subacuática maniobrable llamado VARE XN-3 el cual fue entregado en Pasadena, California en 1963. El desarrollo de dicho prototipo dio paso al nacimiento del vehículo llamado “Cable-Controlled Underwater Recovery Vehicle” (CURV), tal como se muestra en la figura 4. Esto creó la capacidad para llevar a cabo la operación de rescate en el alta mar y recuperar objetos en el fondo del océano, tales como una bomba nuclear perdida en el mar Mediterráneo. El sucesor del CURV, el CURV III fue capaz de viajar a 2850 pies de profundidad en 1966, en la figura 5 se puede observar el CURV. Con tales éxitos en su haber, la Marina de USA desarrolló vehículos más complejos, como el Pontoon Implacement Vehicle (PIV), que se utilizaba para el trabajo de recuperación de submarinos hundidos. En la siguiente década se desarrollaron los primeros ROVs de observación, este tipo de ROVs fueron creados de un menor tamaño, este era un vehículo totalmente eléctrico y con el cual se amplió el alcance de exploración. En la figura 6 se puede apreciar el Snoopy ROV (Christ y Robert L. Wernli, 2007).

Se les denomina como ROV una década después, en 1980 cuando los grandes avances tecnológicos superan las profundidades alcanzadas por los humanos. A mediados de la década de 1980 la industria ROV sufrió un estancamiento en el desarrollo tecnológico, causado por la caída en el precio del petróleo y la recesión económica mundial. Desde entonces, el desarrollo tecnológico en la industria ROV se ha acelerado y hoy un ROV puede realizar numerosas tareas en muchos campos. Sus tareas van desde la simple inspección de estructuras submarinas, tuberías y plataformas para la conexión de tuberías

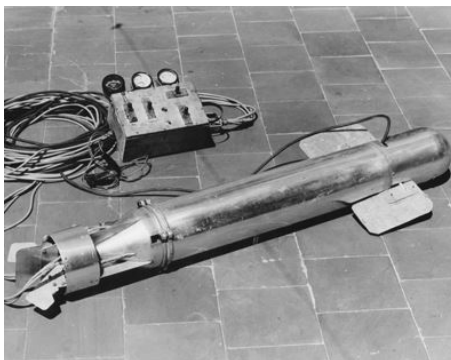


Figura 3: Poodle desarrollado por Dimitri Rebikoff en 1952 (Christ y Robert L. Wernli, 2007).



Figura 4: CURV desarrollado en 1963 (Christ y Robert L. Wernli, 2007).



Figura 5: CURV III desarrollado en 1966 (Christ y Robert Wernli, 2013).



Figura 6: Snoopy ROV desarrollado en 1974 (Christ y Robert L. Wernli, 2007).

y colocación de colectores submarinos. Se utilizan ampliamente tanto en la construcción inicial de un desarrollo submarino, así como la posterior reparación y mantenimiento (Nicolás Soria y Guerra, 2014).

I.1 Motivación

Desde tiempos antiguos el hombre ha tenido la necesidad de sumergirse en el mar para obtener recursos de sus profundidades. Por ejemplo, en los tiempos antiguos el hombre buceaba para recolectar perlas o esponjas. Hoy en día se sabe que hay más vida en nuestros mares que sobre la tierra. Pero no la estamos cuidando: aproximadamente el 50% de los ecosistemas costeros del mundo (por ejemplo, los arrecifes coralinos, los manglares, los pastos marinos, etc.) han sido alterados o destruidos por la demanda creciente de las ciudades, industrias, acuicultura, turismo etc. Hasta ahora, menos de 10% del océano ha sido explorado por los seres humanos. La tecnología ha permitido un gran avance en el conocimiento de los océanos. Sin embargo, parece que sabemos más sobre el espacio exterior que sobre nuestro planeta azul. Profundizar en la investigación sobre sus ecosistemas mejoraría su conservación porque entenderíamos mejor los océanos y como cuidarlos.

Los ROVs se crean a causa de la necesidad del hombre de trabajar en un medio hostil

como es el agua. Es cierto que un buzo puede trabajar debajo del agua y es más eficiente, pero un buzo está mucho más limitado que un ROV por causas físicas como la falta de oxígeno, la pérdida de temperatura al trabajar durante muchas horas debajo del agua, la presión que se ejerce sobre él, la cual hace que a ciertas profundidades un buzo requiera posteriormente una cámara hiperbárica o que directamente sea incapaz de trabajar a dichas presiones y bajas temperaturas.

La motivación inicial para realizar este proyecto fue el poco conocimiento que se tiene de este entorno, los avances que se puede aportar con una herramienta semejante como el explorar el ambiente oceánico, el saber que se le está haciendo al planeta con la contaminación en el mar, la conservación de especies y las diversas aplicaciones que puede llegar a tener para diferentes sectores de la industria pesquera, petrolera, minera entre otras. El desarrollar una herramienta con la capacidad a los ROV comerciales con materiales económicos es uno de los objetivos que en este trabajo se plantean, además que este proyecto pueda estar en constante desarrollo para así lograr tener un producto competitivo en el ámbito comercial adicionando el desarrollo científico que se podría llegar a tener una gran ventaja sobre los ROV comerciales.

I.2 Planteamiento de problema

I.2.1 Descripción del problema

Sin bien existen diversos equipos oceanográficos con capacidad de viajar y explorar el fondo del océano, el común denominador de los mismos es el alto costo y disponibilidad. El estar monitoreando algunos niveles de la industria acuícola y pesquera puede ser de alto costo y en ocasiones peligroso. Tener un vehículo no-tripulado capaz de tomar diferentes parámetros, además de estar monitoreando en tiempo real del progreso de la producción lleva a las empresas a adquirir equipos de elevado costo. En este trabajo se

plantea la construcción de un dispositivo electrónico submarino con capáz de adaptarle diversos sensores oceanográficos y enviar la información recolectada a servidores de cómputo donde la información pueda ser desplegada en tiempo real, además de poder explorar y monitorear por medio de una cámara digital el medio ambiente donde se desarrolla dicho cultivo. Un aporte importante de este trabajo es su diseño, que emplea componentes económicos, pero con calidad para ser sumergidos en agua salada. Esto permitirá a científicos y productores aplicar esta tecnología de forma masiva, lo que podría potencialmente generar un mejor flujo información sobre la dinámica oceánica, regional, nacional o internacional.

Para esta investigación y diseño se realiza la búsqueda de los materiales óptimos para el desarrollo de nuestro dispositivo electrónico que sea capaz de ser sumergido en agua dulce y salada, explorando así los diferentes ambientes. Optimizando los recursos tanto económicos como electrónicos no dejando al lado la calidad requerida. Para esto se estudiarán los diferentes componentes que se necesitarán para la realización del proyecto (Motores, sensores, sistema embebido de alto desempeño, etc.). El modelado y control del ROV propuesto es el principal objetivo de esta investigación.

La comunicación del ROV propuesto es uno de los principales puntos a estudiar, por los diferentes factores que pueden influir sobre ella (interferencias, pérdidas de datos, ruido, alcance), este es uno de los objetivos críticos del proyecto, ya que sin una buena comunicación puede ocasionar colisiones o fallas mecánicas. Esta debe tener la capacidad de mandar la información rápida y eficientemente. No solo por la muestra de datos, sino porque el usuario estará interactuando con el dispositivo en tiempo real y será necesaria para un buen control. El estudio de diferentes estándares de comunicación nos proporcionará el indicado para dicha función. Para el control del dispositivo se diseñará una interfaz gráfica amigable que tenga lo necesario para que el control sea de una forma fluida y ágil.

I.2.2 Preguntas de investigación

- ¿Qué tipos de motores se utilizarán para el diseño del dispositivo electrónico submarino?
- ¿Qué tipo de control se implementará para el manejo de motores?
- ¿Qué tipo de comunicación se integrará en el dispositivo electrónico submarino?
- ¿Cómo se protegerá la electrónica del dispositivo de los diferentes ambientes acuáticos que explorarán?
- ¿A qué distancia se podrá controlar y que límites tendrá?
- ¿En caso de un mal funcionamiento, cuál será el sistema de recuperación de nuestro dispositivo electrónico submarino?

I.2.3 Delimitación del problema

En la exploración oceanográfica se estudia la manera de construir dispositivos capaces de la exploración marítima. No dejando al lado el elevado costo de dichos dispositivos. En México la tecnología de exploración marina es de costo muy elevado y de procedencia extranjera, el cual limita la posibilidad para las empresas e instituciones científicas, siendo esta una de las principales limitantes. En este proyecto se delimitará en realizar un dispositivo de bajo costo, pero con las características y posibilidades de uno comercial, esta herramienta será capaz de alojar la instrumentación necesaria y adecuada para las distintas operaciones a realizar.

I.3 Metodología

La figura 7, muestra el esquema a bloques de la propuesta de solución para el desarrollo de la parte interior y exterior del ROV propuesto, a continuación se describe cada bloque:

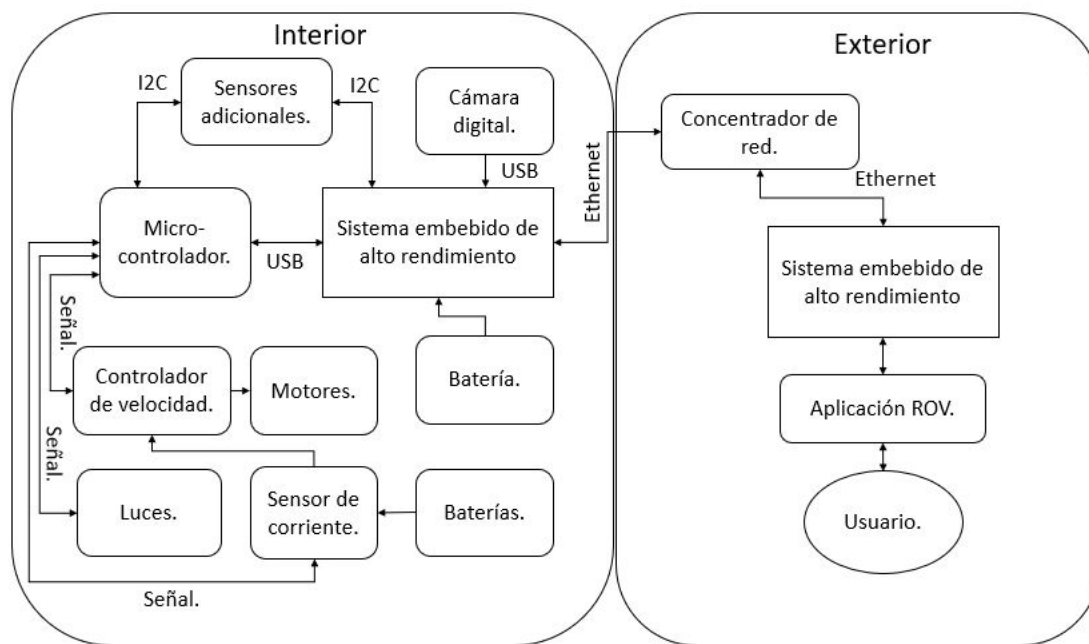


Figura 7: Esquema de bloques del ROV propuesto.

- **Parte interior del ROV.**

- **Sistema embebido de alto rendimiento:** Este representará el cerebro de nuestro diseño, ya que en él se estará ejecutando el software embebido diseñado para el dispositivo electrónico submarino, además de ser el dispositivo electrónico que tendrá la comunicación con el exterior.
- **Microcontrolador:** Dispositivo electrónico que será el encargado de proporcionar las señales adecuadas para el funcionamiento de los motores y de

recibir la información de los diferentes sensores que tendrá el ROV para la medición de parámetros o variables de interés.

- **Controladores de velocidad y sensores de corriente:** Circuitos integrados capaces de proporcionar la etapa de potencia de los motores, contando con sensores de corriente que nos permitirán tener un mejor control del ROV.
- **Baterías:** El dispositivo electrónico propuesto cuenta con baterías independientes, donde contiene 6 pilas de litio exclusivas para los motores y una especial para la electrónica.

- **Parte exterior del ROV.**

- **Concentrador de red:** Dispositivo que hace posible la comunicación entre la parte interior y exterior del dispositivo electrónico submarino.
- **Sistema embebido de alto rendimiento:** Es capaz de mantener una comunicación confiable con la parte interior a larga distancia de nuestro ROV propuesto.
- **Usuario:** Persona capacitada para operar correctamente el dispositivo electrónico submarino,(ROV).

I.4 Objetivos del proyecto

I.4.1 Objetivo general

Desarrollar y construir un prototipo electrónico submarino para aplicaciones de instrumentación oceanográfica.

I.4.2 Objetivos específicos

- Buscar y seleccionar los componentes electrónicos adecuados para el prototipo electrónico submarino.
- Diseñar una cápsula hermética capaz de aislar la electrónica del prototipo submarino para profundidades menores de 30 mts.
- Diseñar la etapa de potencia para el control manual de los motores.
- Integrar la etapa de potencia al sistema embebido de alto rendimiento computacional.
- Implementar una comunicación entre la interfaz gráfica y el prototipo submarino propuesto.
- Desarrollar una interfaz gráfica para el control manual de los motores.
- Realizar pruebas en diferentes entornos para observar el comportamiento del prototipo electrónico submarino al ser sumergido y puesto en funcionamiento en diferentes ambientes acuáticos.
- Integrar la instrumentación electrónica para la medición de variables en exploraciones oceanográficas.

I.5 Organización de la tesis

El presente trabajo de tesis se organiza de la siguiente manera. En el **capítulo II** se presenta un marco teórico relacionado con los conceptos de los vehículos controlados remotamente, como lo son los ROVS. En el **capítulo III** se presenta la implementación de la metodología propuesta para el desarrollo del prototipo. En el **capítulo IV** se presenta el desarrollo de construcción del prototipo electrónico submarino, donde

se describirán los materiales elegidos para el desarrollo, los diferentes componentes electrónicos, sensores utilizados para adquisición de variables y materiales usados para la construcción del ROV que se presenta. Para finalizar en el **capítulo V** se mostrarán los resultados obtenidos en los diferentes entornos acuáticos donde se desarrollaron las pruebas del prototipo electrónico submarino.

Capítulo II

Marco Teórico

II.1 Vehículos no-tripulados

Un ROV es un robot submarino no-tripulado y conectado a un barco en la superficie por medio de un cable largo (umbilical). Los avances en vehículos no-tripulados se han dado de forma paralela en los diferentes medios de operación. Actualmente tienen mayor impacto los proyectos destinados a la exploración espacial o con fines militares. Los vehículos remotamente operados (ROV), pueden ser autónomos o remotamente operados. Estos vehículos pueden ser aéreos, terrestres y submarinos.

Los vehículos aéreos “unmanned aerial vehicle” por sus siglas en inglés (UAV). Estos vehículos aéreos han avanzado mucho al paso de los años, ya que en nuestros días ya se pueden encontrar para diversas aplicaciones, al inicio fueron con fines militares, misiones de reconocimiento o bombardeos y diferentes tipos de proyectos orientados a la exploración geofísica o meteorológica (Christ y Robert L. Wernli, 2007).

Los vehículos no tripulados terrestres, “unmanned ground vehicle” (UGV), también han tenido un gran avance, sobre todo los vehículos cuyo control es autónomo. En su principio también fueron utilizados para muchas aplicaciones militares y donde ha crecido mayormente en aplicaciones espaciales. Estos vehículos como los aéreos ya están al alcance como juguetes tele-dirigidos.

Finalmente, los vehículos no-tripulados submarinos “unmanned underwater vehicle” (UUV) o más conocidos solamente como “remotely operated underwater vehicle” (ROV) el cual es el objetivo de esta investigación, son usualmente de alto costo, están disponibles para realizar múltiples tareas, como la exploración marina, creación de mapas

del fondo marino, estudio biológico de fosas, monitoreo en la acuicultura entre otras aplicaciones (A. Alessandri, 1999). Un ejemplo de estos vehículos se muestran en la figura 8 .



Figura 8: Vehículos no-tripulados: aéreos, terrestres y submarinos.

II.2 Vehículos Autónomos Submarinos (ROVs)

Los vehículos submarinos remotamente operados (ROV), son un tipo de vehículo no tripulado, destinado a la realización de tareas en diferentes ámbitos sin necesidad de tripulación humana a bordo y caracterizado por requerir un cable conectado a un barco. Actualmente, la investigación en el área de los UVs comprende tanto a los vehículos submarinos como a los terrestres, aéreos o espaciales, con fines científicos o militares. Este conjunto de vehículos puede dividirse en dos categorías: tele-operados y autónomos. Los primeros son controlados de forma remota por un operador humano, mientras que los segundos son capaces de operar de forma independiente y no requieren interacción con un operador excepto en casos específicos.

Una de las principales características de estos vehículos representa un reto al momento de diseñarlo, tanto en el punto de vista hardware como en el software. Centrándonos en el aspecto hardware los ROVs por lo general están equipados por un conjunto de sensores y actuadores, controlados por medio de un sistema embebido de alto desempeño, generalmente de bajo consumo, para el control con dicho sistema, el control y procesamiento de datos debe realizarse de acuerdo a las posibilidades del

sistema embebido.

En algunos casos, como el de los vehículos autónomos, recae en su propio diseño del sistema de control ya que este se encarga de la tarea de interpretación de la información sensorial y del control de los diferentes actuadores. En los vehículos remotamente operados, la interpretación de datos se delega a un operador humano para poder comandar el vehículo según se requiera.

Según el plan maestro UUV de la marina de Estados Unidos en la edición del 2004 define al ROV como: “Un sumergible autopropulsado cuya operación es completamente autónoma”. Donde el control puede ser autoprogramado o de adaptación en tiempo real. En la figura 9 , se muestra la clasificación de vehículos submarinos. Primero están los tripulados y no tripulados, donde se encuentran los AUV y los ROV. Sus características como su tamaño son completamente diferentes, así como sus capacidades a los tripulados al momento de la exploración. Después se clasifican en autónomos, que realizan la exploración por medio de un control programado, este tipo de dispositivos sumergibles no tienen la necesidad de estar conectados al exterior, aunque también hay algunos con este tipo de comunicación. Por otra parte están los ROV estos dispositivos son controlados en tiempo real por medio de un técnico en el exterior este tipo de dispositivos dependen de una comunicación cableada a la parte exterior que generalmente se conecta al barco o estación donde se estará explorando.

Los ROV pueden ser de trabajo, exploración y usos especiales como monitoreo científico. Aunque hoy en día existen gran diversidad de aplicaciones que pueden tener, los ROV tienen un sistema de componentes básico el controlador o técnico para manejar el ROV, el será encargado de manejar el ROV, para esto necesitamos una consola de control y un monitor para controlarlo. Como se vio anteriormente los ROV se caracterizan por tener un canal de comunicación anclado a la superficie, teniendo al final el dispositivo que se controlara.

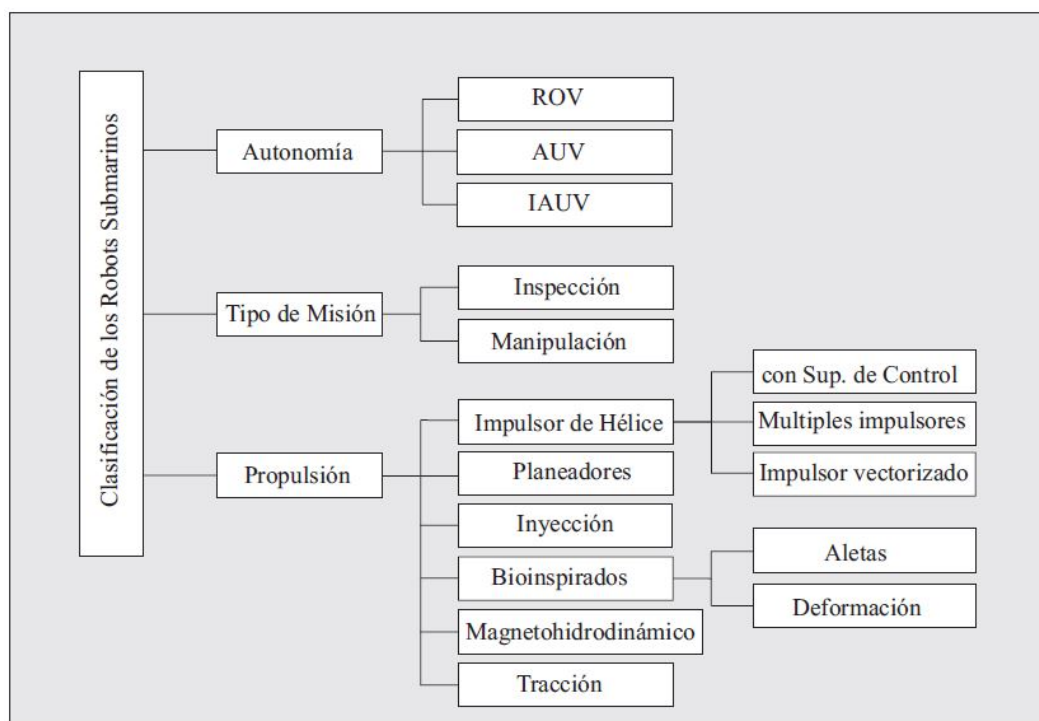


Figura 9: Clasificación de vehículos submarinos (Moreno y Saltarén, 2014).

En la figura 10 , se puede observar el sistema de componentes que se deben tener para un ROV, que es simplemente una cámara a prueba de agua, con propulsores para maniobrar, unida con un cable la cual transmite una señal de video.

La mayoría de los vehículos submarinos son muy poco accesibles, pero con una gran cantidad de aplicaciones posibles. El uso que le daremos es debido a la zona geográfica



Figura 10: Sistema de componentes básicos de los ROVs.

donde nos encontramos, nos enfocaremos en la medición de parámetros oceanográficos y físico-químico, esto para un buen desarrollo de la industria pesquera. Los ROVs tienen una gran cantidad de aplicaciones como en el control de la pesca para que la crianza de los peces sea óptima. Para esto se necesitan diversas técnicas, tales como el control de la alimentación, el control del medio donde se desenvuelven. Algunas variables a medir son el oxígeno, temperatura, PH, salinidad.

Un ROV nos permitirá manipular con más facilidad la instrumentación electrónica, ya que juega un papel de suma importancia en la acuicultura, para poder tener un ambiente controlado en los cultivos donde se encuentran los peces, se necesita el sensado de las variables físicas ya mencionadas y es ahí donde entra la implementación de sensores electrónicos que se encargarán del monitoreo y control de dichas variables en el medio ambiente que más nos convenga. Cabe destacar que el uso de un ROV electrónico mejorará de manera notable el desarrollo de los peces que se estén cultivando, debido a la exactitud con la que se puede trabajar y disminuyendo el riesgo de un accidente en el lugar de trabajo, en lugar de que se encuentre un técnico (buzo) monitoreando el proceso en los estanques, se podrá acceder a los datos que se estén monitoreando de una manera remota y segura (Christ y Robert L. Wernli, 2007).

II.2.1 Aplicaciones de los ROVs

Después de 1980 el desarrollo tecnológico en la industria ROV se ha acelerado y hoy un ROV puede realizar numerosas tareas en muchos campos. Sus tareas van desde la simple inspección de estructuras submarinas, tuberías y plataformas para la conexión de tuberías y colocación de colectores submarinos. Se utilizan ampliamente tanto en la construcción inicial de un desarrollo submarino, en la posterior reparación y mantenimiento. Algunos ROVs han alcanzado trabajar a una profundidad de 10,000 pies, la

tecnología ha alcanzado un nivel de rentabilidad que permite a las organizaciones de los departamentos de policía y a las instituciones académicas para operar los vehículos que van desde pequeños vehículos de inspección a los sistemas de investigación del fondo del océano, MTS (2018). Alguna vez se pensó que algo tirado en el océano estaba perdido y se ha ido para siempre, sin embargo, organizaciones como Mitsui y JAMSTEC en Japón han terminado esa visión. Con el desarrollo de su ROV Kaiko, que han llegado a la parte más profunda del océano a 10,909 metros. Algunas aplicaciones que se pueden realizar por medio de los ROVs son:

- **Pesca:** Como monitores de actividades necesarias en maniobras de pesca, tele presencia en áreas de pesca potenciales. Recabado de datos ambientales y de especies capturadas, identificación de especies por medio de visión artificial, así como control de crecimiento, grado de madurez de especies destinadas a corral de engorda, acuicultura.
- **Embarcación:** Monitoreo e inspección de cascos de barcos, tanques internos. Cuidado y control pesquerías submarinas y cuidado de profundidades.
- **Ciencia :** Inventario de video gráfico de fauna marina, apoyo de instituciones de investigación y divulgación científica. Arqueología submarina, generación de mapas de suelo marino.
- **Construcción:** Evaluación de basamento de zonas potenciales de construcción, antes de instalar cualquier sistema sumergido para estudiar el estado y condiciones del entorno, así como soporte y mantenimiento de estructuras submarinas.
- **Otras :** Minería oceánica, industria del petróleo e inspección de plataformas petroleras.

II.3 Diseño de los ROVs

Como se ha mencionado anteriormente existen ROVs para distintas aplicaciones (QSTAR, 2018). En el transcurso de los años estos dispositivos electrónicos han tenido un gran avance, ajustándolos a sus necesidades. En esta área se pueden clasificar en 3 clases:

- **Trabajo:**

Dispositivos electrónicos submarinos con capacidades de maniobra para la recolección de muestras, adaptado con brazos mecánicos para trabajos en el entorno al momento de la exploración.

- **Monitoreo:**

Dispositivos para observar el entorno donde se explora, estos son frecuentemente utilizados en el mantenimiento de plataformas petroleras y de cascos en las embarcaciones.

- **Exploración especial:**

Dispositivos adecuados para diferentes aplicaciones especiales, estos son utilizados frecuentemente en las universidades o centros de investigación científica.

II.4 Desafíos de los ROVs

A pesar de tener diversas aplicaciones, todos los dispositivos electrónicos submarinos tienen las mismas carencias y problemas que pueden enfrentar todos los diseños. Los principales problemas que se enfrentan son:

- Fuente de alimentación.
- Grado de autonomía.

- Comunicación.

Ya que estas características son los primeros problemas que se enfrentarán los dispositivos electrónicos submarinos y todos equipos electrónicos que se utilizan en la industria. De estos factores dependerá la vida útil de cualquier dispositivo, lo sencillo que pueda ser utilizarlo y la información que se puede perder al momento de la comunicación (Christ y Robert L. Wernli, 2007).

II.4.1 Fuente de alimentación

La fuente de alimentación para alimentar al ROV propuesto se puede realizar mediante tres configuraciones, las cuales se analizan a continuación:

- Fuente de alimentación superficial.

Los vehículos con fuente de alimentación superficial, son dispositivos que al depender de una fuente externa, por practicidad deben estar sujetos a la superficie.

- Fuente de alimentación interna.

Este tipo de vehículos dependen solamente de su energía almacenada en baterías o generada por algún combustible, este tipo de dispositivos por su configuración tienen un menor tiempo de trabajo.

- Fuente de alimentación híbrida.

Este tipo de fuente de alimentación combina la fuente de alimentación superficial e interna, en este tipo de configuración por lo general las baterías son utilizadas para la recuperación del dispositivo.

II.4.2 Grado de autonomía.

El grado de autonomía define el modo de operación de un vehículo no tripulado, a continuación se presenta algunas configuraciones de control:

- Autónomos.

Son vehículos que cuentan con una ruta programada, que no tiene intervención humana al momento de la exploración.

- Semi-autónomo.

Son vehiculos submarinos, que al momento de la exploración, necesita la interacción humana para realizar ciertas tareas, no dejando de hacer lo ya programado al inicio de la exploración.

- Tele-operados.

Es una configuración donde el operador humano, por medio de la retroalimentación de video o sensorial controla directamente el dispositivo electrónico submarino.

II.4.3 Comunicación.

El medio de comunicación de la superficie a el dispositivo electrónico submarino puede variar de formas o métodos dependiendo de diferentes factores como la distancia donde explorará. Estos enlaces pueden realizarse por medio de:

- Comunicación de cable rígido (ya sea eléctrica o por fibra óptica).
- Comunicación acústica.
- Comunicación óptica.
- Comunicación por radiofrecuencia (RF).

II.5 Los ROVs ideales

Para realizar un dispositivo electrónico submarino ideal, debe tener una serie de características, a continuación se muestran algunas:

- El cable de comunicación debe tener el mínimo diámetro.
- Fuente de alimentación externa con resistencia ilimitada.
- El tamaño debe ser pequeño para exploraciones alrededor y dentro de cuencas marinas.
- Tener una memoria de gran capacidad de almacenamiento para tener distintos tipos de sensores de alta resolución.

Los sistemas ROV son una compensación de una serie de factores, que incluyen costo, tamaño, plataforma de implementación y requisitos operativos. Pero la conclusión, es que el diseño de la correa puede ayudar a crear o destruir el ROV ideal (Christ y Robert L. Wernli, 2007). Existen hoy en día una gran variedad de ROVs comerciales, en la figura 11, se puede observar algunos de ellos.

Existen diversos tamaños de dispositivos electrónicos submarinos que dependerá de la aplicación el tipo de ROV que se utilizará, los dispositivos más grandes tienen una mayor capacidad de carga y empuje, estos son mejores en operaciones en aguas abiertas. Los ROVs más pequeños son mucho más ágiles y se utilizan para trabajar en penetraciones de estructuras cerradas por lo ágil que pueden ser (Christ y Robert L. Wernli, 2007).



Figura 11: Tipos de ROVs comerciales (Christ y Robert L. Wernli, 2007).

Capítulo III

Metodología.

El método con el que se realizará el proyecto, es seguir una serie de etapas, llevando una secuencia lógica adecuada para cumplir cada uno de los objetivos antes señalados, analizando las capacidades para una mejor optimización de recursos tanto electrónicos, como económicos, tratando de así alcanzar nuestro objetivo general.

III.1 Búsqueda del estado del arte.

En la primera etapa se lleva a cabo la búsqueda del estado del arte relacionado con el sistema embebido de alto desempeño, este es la parte fundamental, ya que es el cerebro del dispositivo electrónico submarino, el cual es encargado de establecer la comunicación con la computadora que estará monitoreando el usuario, además el encargado de ejecutar el control digital de los motores y mantenerlos sincronizados. Esta primera etapa consiste en:

- Búsqueda del estado del arte sobre dispositivos electrónicos submarinos.
- Búsqueda y selección de sistema embebido de alto desempeño.
- Definir sistema de comunicación óptimo para el diseño del dispositivo electrónico submarino.

III.2 Selección de componentes electrónicos.

En la segunda etapa se presenta el diseño e instrumentación de los diferentes sensores y motores. Se analizan una serie de microcontroladores capaces de adaptarse a los diferentes sensores y motores antes mencionados, además se busca la mejor compatibilidad con el sistema embebido de alto desempeño, para que nos proporcionen un funcionamiento óptimo, mejor compatibilidad y fácil acoplamiento. Esta etapa consiste en:

- Investigación y adquisición de sensores y microcontrolador.
- Investigación y adquisición de Motores.
- Diseño e implementación del control de motores.
- Programación y acondicionamiento de sensores al microcontrolador.
- Medición de parámetros.

III.3 Acoplamiento de componentes electrónicos.

En esta etapa se interconectan los diferentes sensores con el microcontrolador y se definen los valores a medir, se ajusta la programación o la electrónica. Con los diferentes sensores funcionando correctamente se procede a realizar el acoplamiento del microcontrolador y sistema embebido de alto desempeño. Se trabaja principalmente en obtener una buena comunicación entre ambos, ya que en el sistema embebido de alto desempeño realiza la comunicación con la computadora del usuario, además se acondiciona la programación para una buena instrumentación como un mejor control digital y el cual consiste en:

- Medición, calibración y ajuste de sensores.

- Programación y acoplamiento del microcontrolador con el sistema embebido de alto desempeño.
- Investigación para el desarrollo de interfaz de comunicación con el usuario.

III.4 Desarrollo de interfaz gráfica.

La cuarta etapa consistirá en desarrollar una interfaz gráfica del usuario y desarrollo de cápsula hermética donde se introducirá la mayor parte de la electrónica del dispositivo electrónico submarino. Para esto, el sistema de sensores ya deben estar bien acondicionados, todo el sistema debe estar interconectado correctamente. La cuarta etapa consiste en:

- Desarrollo de interfaz gráfica de usuario.
- Ajuste y calibración de sensores.
- Pruebas experimentales de sistema de comunicación.
- Diseño de encapsulado hermético, del dispositivo electrónico submarino.

III.5 Integración del prototipo.

La quinta etapa consiste mayormente en realizar pruebas experimentales y en acoplar los motores junto con la etapa de potencia para el control de dicho dispositivo submarino, así como el diseño de un chasis capaz de soportar dicha cápsula. La quinta etapa consiste en:

- Integración del Chasis.
- Interconexión de motores mediante etapa de potencia.
- Desarrollo de interfaz gráfica para manejo de dispositivo submarino.

- Pruebas experimentales en laboratorio y en campo.

III.6 Pruebas experimentales y elaboración de tesis.

La sexta etapa es la final donde se redacta el trabajo de tesis con la teoría, se comprueba la teoría con los resultados experimentales y al final las mediciones obtenidas en pruebas de campo.

La sexta etapa consiste en:

- Inicio de escritura de trabajo de tesis.
- Depuración del prototipo electrónico submarino.
- Depuración de la interfaz gráfica.
- Defensa de tesis.

Capítulo IV

Desarrollo del ROV propuesto

En esta sección se describe el desarrollo del ROV diseñado, se describirá las características del hardware así como el desarrollo del algoritmo de control, así como el desarrollo del software.

IV.1 Construcción de hardware del ROV.

Para el hardware del ROV propuesto se estudiaron y revisaron diversos materiales con los cuales se puede construir el prototipo electrónico submarino. Los materiales que se proponen tienen ciertas características de soportar la presión bajo del agua, una durabilidad aceptable y de fácil mantenimiento. El policloruro de vinilo (PVC) es un material que se obtiene a partir de la sal y el petróleo. Así, el PVC contiene un 57% de cloruro que proviene de la sal, mientras que el 43% restante corresponde al etileno, que se obtiene del petróleo. Por ello, es uno de los materiales plásticos menos dependientes del petróleo. Además, gracias a su capacidad de aditivación y tratamiento, es muy versátil y permite obtener distintos productos rígidos o flexibles, transparentes u opacos y compactos o espumados. Este material cumple con las características que se buscan para el desarrollo del prototipo, la profundidad que puede alcanzar se calcula con respecto la información del fabricante con el punto de ruptura que alcanza, dando una presión de 250 psi, con esta información se puede calcular la profundidad (1). En donde P es la presión, d es la densidad del agua de mar, g es la fuerza de gravedad y h es la profundidad. Para conocer la profundidad se despeja de la primera ecuación obteniendo como resultado una profundidad de 159 metros, para un tubo con cedula 40

de media pulgada incrementando a 300 metros si se utiliza el tubo de PVC con cedula 80 de media pulgada (Juan Carlos, 2009).

$$P = d \cdot g \cdot h,$$

$$h = P/(gd),$$

es decir,

$$h = 250psi/((9.81m^2/s)(1100kg/m^2))$$

por lo tanto,

$$h = 159.89mts. \tag{1}$$

Tal como se deduce, esta profundidad es aceptable para el diseño y desarrollo del prototipo electrónico submarino, en una primera etapa estará limitado a 30 metros. En esta primera etapa se desarrolla para su control remoto, contando así con un ambiente controlado para evitar corrientes marinas externas que puedan dañar la estructura. Por el momento sus dimensiones y practicidad están diseñadas para ambientes controlados donde el prototipo electrónico submarino pueda navegar sin ningún problema dentro de una alberca, estanque o piscina. Al momento de seleccionar el material que por sus características cumplen con lo que se desea para empezar a desarrollar el prototipo, se proponen dos diseños que a continuación se describen.

IV.1.1 Diseño del ROV propuesto.

Para el diseño del dispositivo electrónico submarino o ROV, se proponen un par de prototipos para su fabricación. El primer prototipo, que es algo inestable de su estructura y otro de diseño un poco más robusto, este es el que se utilizará para adaptar la configuración de un control remoto, adaptando los motores a la estructura para que cumpla con los estándares establecidos en el diseño. A continuación se describen los

diseños propuestos.

IV.1.2 Primer prototipo propuesto.

El desarrollo del primer prototipo comienza con la generación de un prototipo diseñado en 3D, en la figura 12 , se muestra el primer prototipo propuesto, este dispositivo cuenta con una cápsula hermética capaz de guardar toda la electrónica que llevará el dispositivo submarino, contando con dos extremidades laterales, donde en cada extremo se colocan un par de motores, al igual que en la parte superior se le colocaran otros dos.

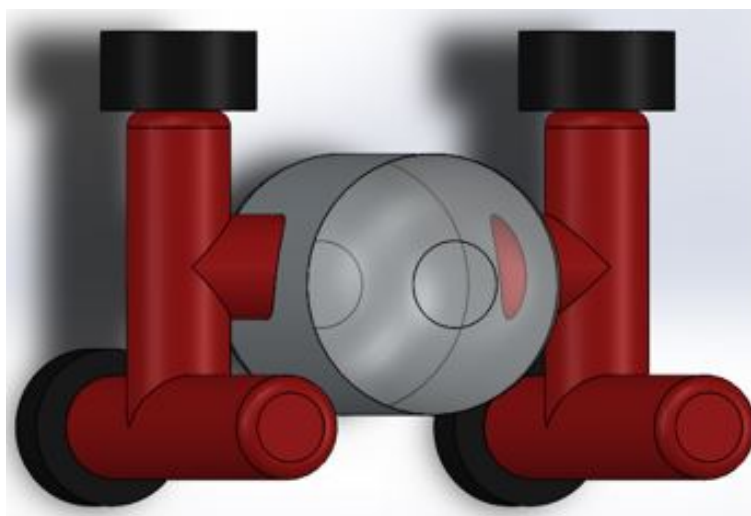


Figura 12: Primer prototipo de ROV propuesto .

Este primer prototipo es algo inestable, ya que sus extremidades no tienen soporte alguno que los mantenga, rigidos y fuertes. Además que la cápsula que se diseño debe ser de un material el cual se pueda mandar torneear elevando el costo de construcción de dicho prototipo.

IV.1.3 Segundo rototipo propuesto.

Como se mostró en la anterior sección, la estructura se puede realizar con tubería de PVC. El prototipo que se muestra en la figura 13, está simétricamente diseñado para evitar colisiones al momento de la exploración.

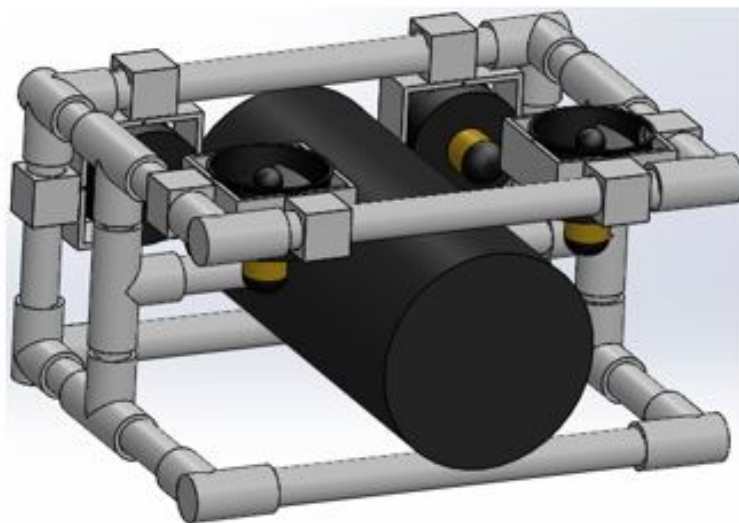


Figura 13: Prototipo de ROV realizado .

Esta configuración está diseñada para tener un equilibrio en el peso, obteniendo una mejora al momento de acoplar la topología de motores más apropiada. Para construir la estructura se propone utilizar tubería de PVC como se observa en la figura 14, con tubería de media pulgada con PVC cedula 40. Esta estructura está diseñada en un editor de figuras 3D y simulador de figuras 3D (SolidWorks), y se implementó la hidrostática diseñada para tener un mejor control de bajo del agua. La hidrostática y la flotabilidad dependerá del entorno donde se mande a explorar, ya sea el mar o en un ambiente controlado, esto se debe a la densidad del agua ya sea dulce o salada.

IV.2 Hidrostática y flotabilidad.

La flotabilidad o boyancia es la capacidad de un cuerpo para sostenerse dentro de un fluido. Un cuerpo está en flotación cuando permanece suspendido en un entorno líquido o fluido. La flotabilidad del cuerpo dentro del fluido está determinada por diferentes fuerzas que actúan sobre el mismo y el sentido de estas. Es positiva cuando el cuerpo tiende a ascender dentro del fluido y negativa cuando el cuerpo tiende a descender dentro del fluido, y es neutra cuando se mantiene en suspensión dentro del fluido. La

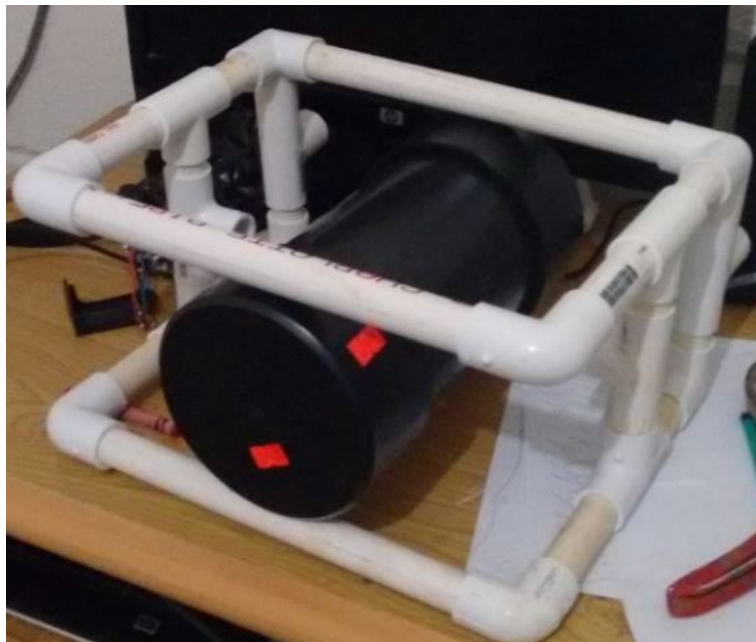


Figura 14: Primer prototipo de ROV realizado con tubería PVC .

ley de flotabilidad también conocida como el principio de Arquimides, establece que: Todo cuerpo sumergido total o parcialmente en un fluido recibe de este la fuerza hacia arriba llamada empuje que es igual al peso del fluido desplazado por dicho cuerpo, como se muestra en la ecuación 3, donde E es el empuje, es la fuerza que actúa sobre el objeto, P_f es la densidad del fluido, g es la gravedad, V es el volumen ocupado por el objeto (A. Alessandri, 1998).

$$E = -P_f \cdot g \cdot V \quad (2)$$

Al poder tener el peso y las dimensiones estimadas del prototipo electrónico submarino por el diseño en 3D, se puede calcular la fuerza de empuje, para obtener una flotabilidad neutra o positiva según se requiera en el submarino. Partiendo del segundo diseño realizado se tiene las estimaciones aproximadas, mostradas en la figura 15 y con un peso aproximado de 15 Kg .

$$\begin{aligned}
 E &= -(1,000 \frac{Kg}{m^3}) \cdot (9.81 \frac{m}{s^2}) \cdot (18.19 \cdot 10^{-3} m^3) \\
 E &= -178.44 N
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

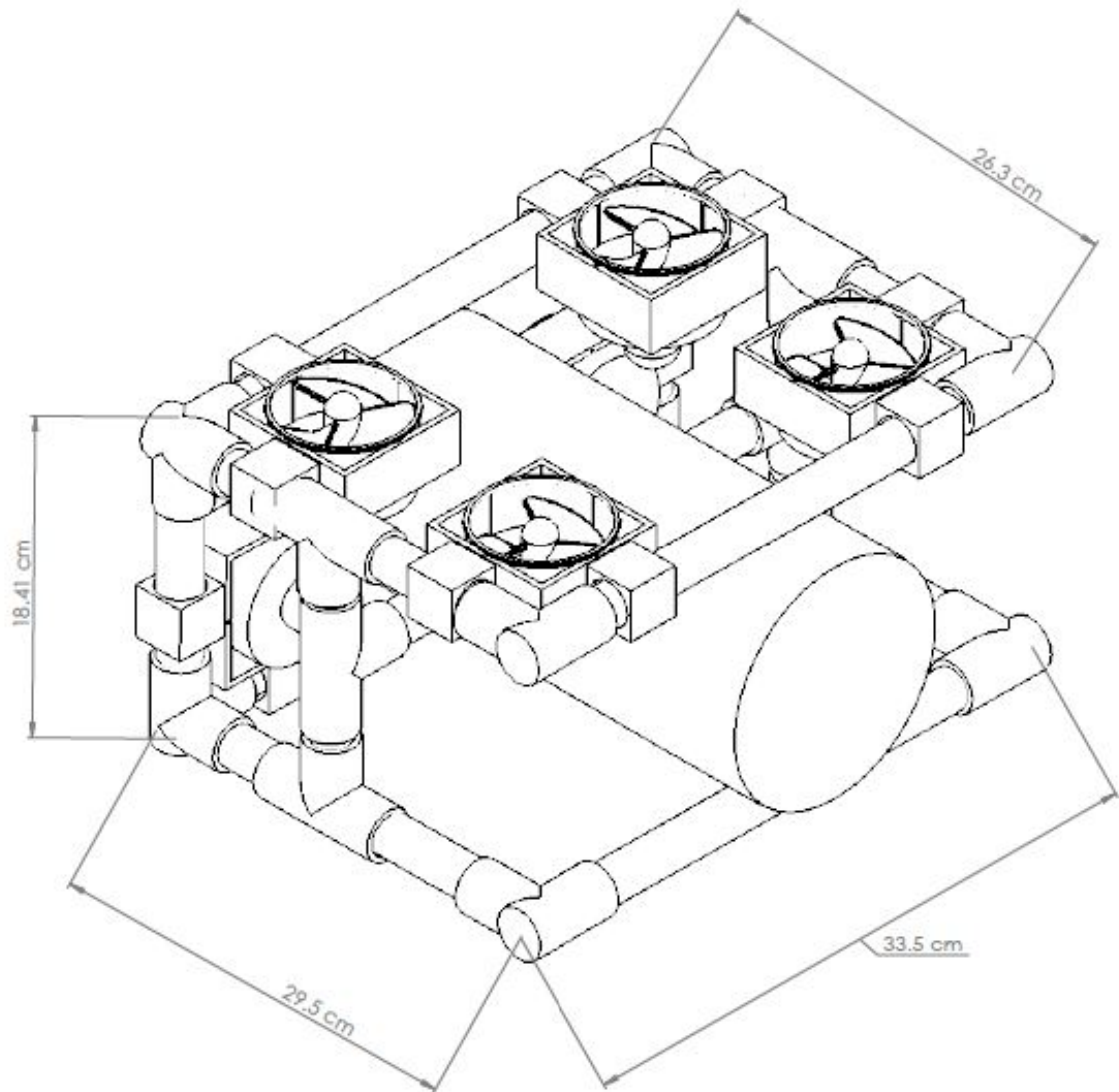


Figura 15: Dimensiones del ROV propuesto.

IV.3 Topología para colocación de motores.

Las diferentes configuraciones de los ROVs que se encuentran en el mercado o que fueron diseñados por diferentes sectores públicos, los motores son colocados en sentidos opuestos para obtener los diferentes movimientos que pueda tener el ROV. Los movimientos que tienen la mayoría de los ROVs son de seis grados de libertad, el movimiento en los tres ejes X, Y, Z y movimientos en Yaw, Roll, Pitch, tal como se muestra en la figura 16, (Christ y Robert L. Wernli, 2007). Este sistema de movimientos se dan a partir de la hidrostática del dispositivo electrónico submarino, estudiando las diferentes topologías, realizadas por diferentes ROV comerciales. Estos movimientos se pueden dar, gracias al grado de la flotabilidad (boyancia) necesaria para tener un mejor control en el fondo del mar o ambiente controlado ya sea una alberca o estanque.

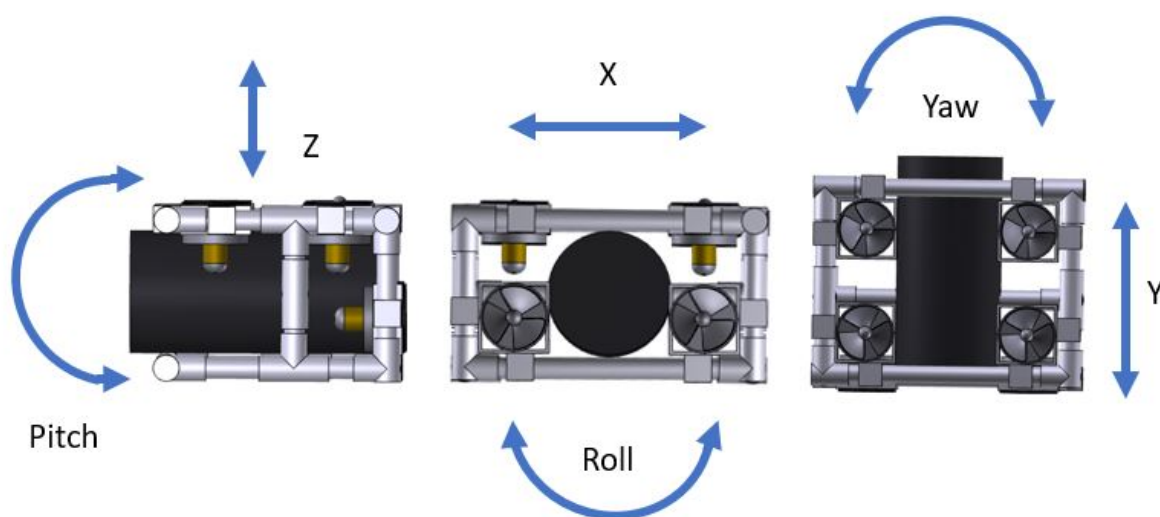


Figura 16: Movimientos del ROV, en distintos ejes .

IV.4 Motores propulsores.

Los motores “brushless” o también llamados motores sin escobillas, son motores trifásicos conectados en estrella como se aprecia en la figura 17. Estos actúan según sea la posición del rotor, la cual puede ser determinada por los sensores de efecto hall, ya que se activan una pareja de transistores simultáneamente. El motor tiene una parte mecánica y otra eléctrica, esto permite que sea analizado como un motor de corriente directa (Zhao y Yu, 2011).

Este motor funciona a dos fases sincronizadas a tiempo; mientras un par de transistores están conduciendo los otros cuatro están en un circuito abierto. Por ejemplo, si Q1 y Q4 están en conducción, Q2, Q3, Q5 y Q6 no lo hacen, lo que permite que fluya la corriente de la batería entre las fases A y B, dejando la fase C inactiva, de manera que pueda simplificar el sistema de ecuaciones como se muestra en la figura 18 .

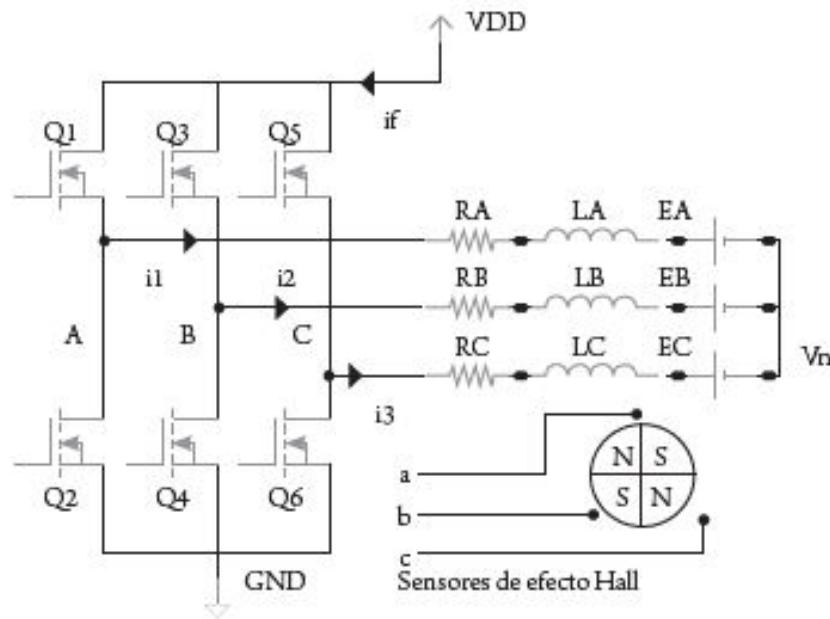


Figura 17: Puente inversor conectado a un motor CD sin escobillas (Zhao y Yu, 2011).

Donde la ecuación de la malla para el estado de conducción A y B se puede observar

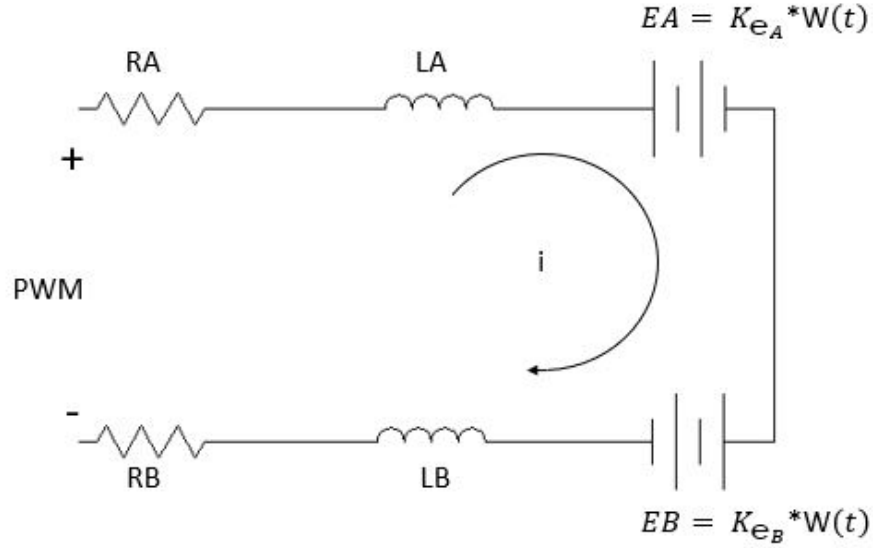


Figura 18: Circuito equivalente en un estado de conducción, en este caso A y B (Zhao y Yu, 2011).

en la ecuación de malla 4.

$$VPWA = (R_A + R_B)i + (L_A + L_B)L\left(\frac{di}{dt}\right) + (E_1 + E_2). \quad (4)$$

de donde E1 y E2 representan la fuerza contraelectromotriz, definida por (5) .

$$E = K_e * W(t). \quad (5)$$

Este tipo de motores no tienen fricción al momento de estar en funcionamiento, por lo tanto no hay sobrecalentamiento y al estar en contacto con el agua no presenta ninguna malformación. Este tipo de motores también llamados de imán permanente nos ofrecen una característica especial a diferencia de motores convencionales de corriente directa, este tipo de motores nos ofrecen una mayor resistencia bajo el agua, además

de una mayor velocidad en el giro de dichos motores, esta se puede controlar por medio de una señal PWM que podemos generar por medio de un microcontrolador para drones o diseñar algoritmo especial para tener un control más fino al momento de la exploración. En este tipo de motores las revoluciones dependen del voltaje, estos suelen girar aproximadamente 1000 revoluciones por volt, esto hace que con una batería de 3 celdas de 11.1V tengan alrededor de 11,000 revoluciones por minuto, en la figura 19 se muestra el tipo de motor a utilizar contando con las siguientes características:



Figura 19: Motor sin escobillas XCSOURCE de 5 aspas en la propela (XCSource, 2018).

El modelo del motor es QF2611 de XCSOURCE, es un motor elaborado con una alta resistencia al impacto y resistencia a altas temperaturas, contando con buena rigidez y dureza para disminuir una relación de daños, la combinación echa de aluminio lo hace más estable al momento de estar en funcionamiento.

Características principales del motor:

- Revoluciones : 4500 KV.
- Número de celdas de batería LiPo: 3 S.
- Máxima corriente continua: 25A.

- Controlador de velocidad: 35A.
- Las medidas de este motor se muestran en la figura 20.



Figura 20: Especificación de dimensiones del motor QF2611 (XCSource, 2018).

IV.5 Etapa de Potencia.

IV.5.1 Controlador de velocidad.

Para la etapa de potencia para los motores sin escobillas (brushless), se necesitan controladores de velocidad o variadores de velocidad o “ESC” por sus siglas en inglés (Electronic Speed Control). Un control de velocidad electrónico o “ESC” es un circuito electrónico que controla y regula la velocidad de un motor eléctrico. También puede proporcionar la inversión del motor y el frenado dinámico. Controles de velocidad electrónicos en miniatura se utilizan en modelos controlados por radio con alimentación eléctrica. Los vehículos eléctricos de tamaño completo también tienen sistemas para controlar la velocidad de sus motores de accionamiento. Un variador de velocidad (ESC) está compuesto por un circuito con varios componentes. El propósito del variador es

controlar la velocidad de un motor eléctrico junto con el sentido de giro. Un control de velocidad electrónico sigue una señal de referencia de velocidad (derivada de una palanca del acelerador, joystick u otra entrada manual) y varía la velocidad de conmutación de una red de transistores de efecto de campo (FET). Ajustando el ciclo de trabajo o la frecuencia de conmutación de los transistores, puede variar la velocidad del motor. La rápida conmutación de los transistores es lo que hace que el propio motor emita su característico zumbido agudo, especialmente notable a velocidades más bajas.

Se requieren diferentes tipos de controles de velocidad para motores de corriente continua con escobillas y motores de corriente continua sin escobillas. Un motor con escobillas puede tener su velocidad controlada variando el voltaje en su armadura. (Industrialmente, los motores con bobinados de campo del electro-imán en lugar de imanes permanentes también pueden tener su velocidad controlada ajustando la intensidad de la corriente del campo del motor). Un motor sin escobillas requiere un principio de funcionamiento diferente. La velocidad del motor se varía ajustando la temporización de los impulsos de corriente entregados a los varios devanados del motor (Cotte y Moreno, Junio de 2010).

Los sistemas ESC sin escobillas básicamente producen energía de CA trifásica, como en un variador de frecuencia, para operar motores sin escobillas. Los motores sin escobillas son populares entre los aficionados a los aviones y vehículos a control remoto, debido a su eficiencia, potencia, longevidad y peso ligero en comparación con los motores tradicionales cepillados. Los controladores de motor de CA sin escobillas son mucho más complicados como se vio anteriormente, que los controladores de motor con escobillas.

Los ESC se clasifican normalmente de acuerdo con la corriente máxima que soportan, por ejemplo, 25 amperios o 25 A. En general, cuanto mayor es la calificación, más grande y más pesado tiende a ser el ESC, que es un factor al calcular la masa y el equilibrio en los aviones. Muchos ESC modernos admiten baterías de hidruro metálico de níquel,

polímero de ion de litio y fosfato de hierro de litio con una gama de voltajes de entrada y corte. El tipo de batería y el número de celdas conectadas es una consideración importante cuando se elige un circuito eliminador de batería (BEC), ya sea integrado en el controlador o como una unidad independiente. Un número mayor de células conectadas dará como resultado una potencia nominal reducida y por lo tanto, un número menor de servos soportados por un BEC integrado, si usa un regulador de voltaje lineal. Un BEC bien diseñado que utilice un regulador de conmutación no debería tener una limitación similar.

Para la selección de los controladores de velocidad, es necesario revisar las especificaciones técnicas de los motores que se utilizarán. Estos controladores son utilizados para diferentes aplicaciones de vehículos eléctricos propulsados por motores sin escobillas y el tener un adecuado controlador nos proporciona una mejor estabilidad en el funcionamiento evitando sobrecalentamiento y a su vez daños electrónicos, causados por consumos excesivos de corriente provenientes de la batería de alimentación. Lo recomendable es elegir un controlador que tenga ampacidad superior a la demanda del motor, de lo contrario un pico de corriente podrá dañar el controlador de velocidad al momento de la exploración (Delgado y Bolanos, 2013).

Por lo tanto, las principales especificaciones a considerar son:

- Tipo de batería que puede utilizar, ya que existen varios tipos de baterías LiPo, níquel, acido-plomo, etc.
- Capacidad de reserva de la batería.
- Numero de celdas soportadas o el voltaje máximo.
- Peso de la batería.

- tamaño de la batería.
- Corriente máxima del motor en conducción.
- Control de velocidad recomendado.

El funcionamiento general de los controladores de velocidad, son principalmente controlados por modulación de ancho de pulso (PWM). Hoy en día en los vehículos eléctricos, los receptores mandan una señal PWM al controlador de velocidad con variaciones de 1 a 10 milisegundos según sea la configuración del ESC. Esta modulación hace que el motor varíe su velocidad. En unos modelos de controladores de velocidad podemos modificar el sentido de giro y el frenado de los motores, elevando el costo total del producto así como el producto final.

Teniendo en cuenta las especificaciones del motor a utilizar en este caso, un motor QF2611 de XCSOURCE. Hoy en día en el mercado existen gran variedad de controladores de velocidad en la figura 21, se muestra un controlador con las siguientes características:

- Batería polímero de Litio (LiPo).
- Confiere 3 celdas máximo a un voltaje 11.1 V.
- Corriente máxima del motor en conducción es de 30A.
- Control de velocidad recomendado 30A.

Para invertir el sentido de giro de los motores se propone utilizar una nomenclatura de actuadores que nos puedan proporcionar los cambios de giro necesarios, al tener motores trifásicos se necesita cambiar dos fases del motor. Para que el motor sin escobillas (brushless) cambie de sentido se propone utilizar dos relevadores por motor, esto nos



Figura 21: Aspecto físico de los controladores de velocidad ESC-30A.

proporcionará un cambio de giro, tal como se muestra en el diagrama de la figura 22. En el primer estado cuando los relevadores están en estado normalmente cerrado tendremos la configuración A, B, C y el motor estará girando en el sentido de las manecillas del reloj, con la velocidad proporcionada por el microcontrolador. Cuando los relevadores cambian de estado de normalmente cerrado a normalmente abierto cambian la fase en dos entradas en el motor, esto nos proporcionará un cambio de giro y tendremos una configuración de C, B, A .

IV.5.2 Generador de señales PWM.

Para el control de velocidad de los motores se necesita una señal por modulación de ancho de pulso o por sus siglas en inglés PWM. Hoy en día existen varios controladores de

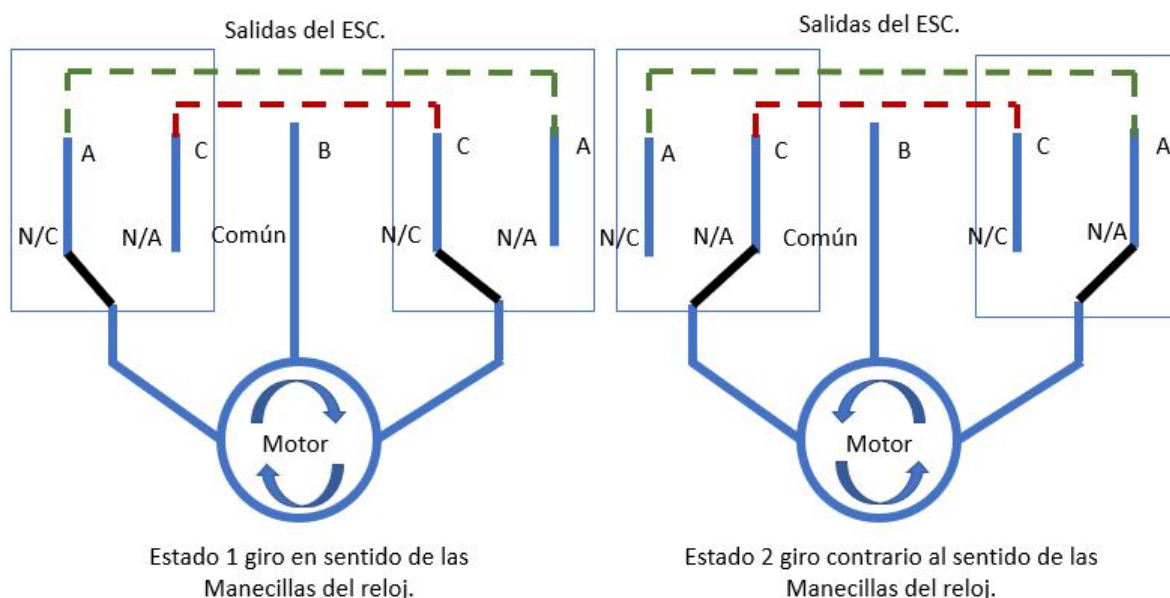


Figura 22: Diagrama de relevadores para invertir el sentido del giro de los motores .

vuelo para los diferentes configuraciones de vehículos aéreos como los drones. Estos controladores de vuelo y receptores, pueden generar señales PWM según la configuración de su “firmware” programado, para el dispositivo electrónico submarino este tipo de componentes podrían ser utilizados modificando las configuraciones en los firmwares. A continuación, en la figura 23, se muestran algunas topologías que se han realizado con un controlador de vuelo (Ardu-Pilot) modificando el “firmware” de dicho componente. Estas topologías realizadas con controladores comerciales no tienen la capacidad de modificar el sentido de giro, así que se puede observar que dos tipos de motores, unos verdes y otros azules. Los motores azules giran en sentido de las manecillas de reloj y los motores verdes giran al sentido contrario, así se logra tener los movimientos en la mayoría de los ejes.

Para este dispositivo electrónico submarino, las señales se generarán a través de un microcontrolador Atmel 328P, que es usualmente encontrado en la mayoría de los controladores aéreos y en placas de desarrollo como Arduino nano. Este microcontrolador

de 8 bits basado en arquitectura RISC, es un microcontrolador que se caracteriza por su alto rendimiento y baja potencia. Al tenerlo en una placa de desarrollo Arduino nano, facilita la programación de dicho componente, ya que se puede manipular con las configuraciones necesarias para el funcionamiento óptimo del dispositivo electrónico submarino utilizando la topología propuesta mencionada anteriormente.

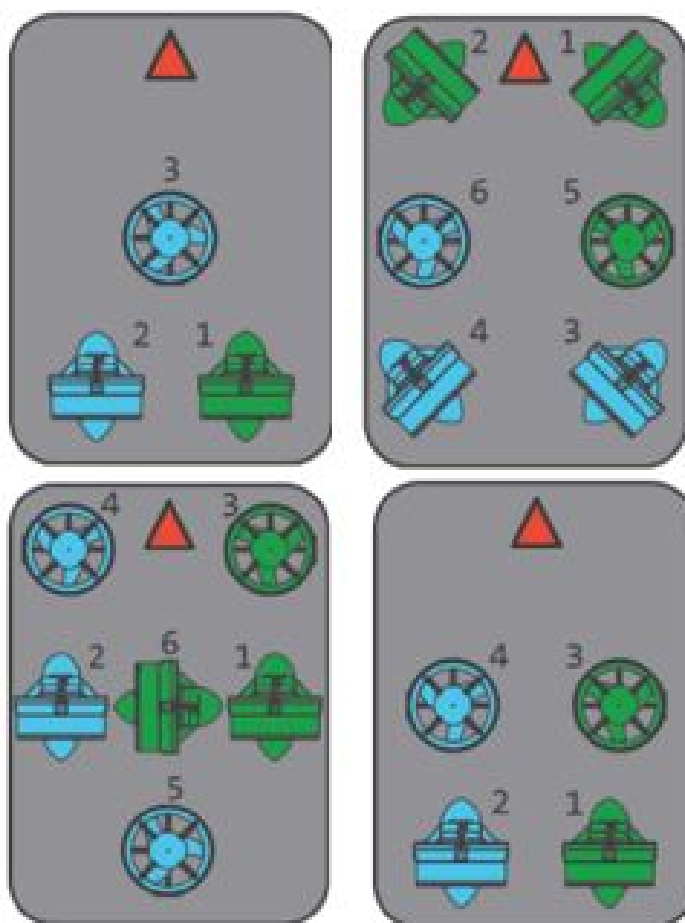


Figura 23: Topologías de motores con controlador de vuelo comercial (ArduSub, 2018).

En este trabajo se propone trabajar con dos microcontroladores comerciales, el Ardupilot APM2.6 y el Idefly IFLY-C6W mostrados en la figura 24, este tipo de componentes son controladores de vuelo comercial, estos dispositivos están desarrollados para la fabricación y desarrollo de Drones. En este proyecto también se propone el

desarrollo de un controlador con una placa de desarrollo Arduino y Teensy y se compara su comportamiento físico.

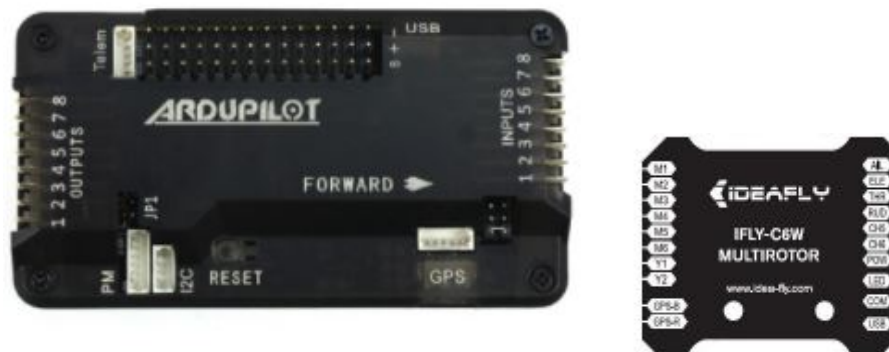


Figura 24: Controlador de vuelo Ardu-Pilot 2.6 y IFLY-C6W .

Algunas de las ventajas que tienen las placas de desarrollo Arduino o Teensy con respecto a los controladores de vuelo son:

- Configuración y generación de pulsos con variación variable.
- integración de sensores externos.
- Control del sentido de giro de los motores.
- Menor consumo de energía.
- Bajo costo.

En la figura 25 se muestran las dos tarjetas de desarrollo que se proponen utilizar para el control de los motores del dispositivo electrónico submarino. Este tipo de tarjetas son muy utilizadas para la creación de diferentes vehículos no-tripulados, aunque las tarjetas tienen un gran acoplamiento en el desarrollo de estos dispositivos, se necesita un hardware adicional para la adquisición de datos provenientes de los sensores y en este caso para la adquisición de imágenes en tiempo real.



Figura 25: Tarjetas de desarrollo Arduino Nano y Teensy 3.6 .

IV.6 Sensores propuestos para el ROV.

En esta sección se presentan los sensores a utilizar en el ROV. Para este trabajo se estudiaron sensores de posición y temperatura. Uno de los objetivos de este trabajo es el desarrollo del ROV como herramienta para la adaptación de diferentes sensores para la medición de diferentes parámetros físico-químicos

. En el subcapítulo anterior, se comentó sobre utilizar un controlador de vuelo comercial y una placa de desarrollo, por un lado con el controlador de vuelo el sensor de posición ya está integrado en la placa, sólo que se desconoce los parámetros enviados para su manipulación o integración al software. Con este controlador de vuelo no se tiene la opción de agregar más sensores. Al contrario con la placa de desarrollo Arduino, se tiene que utilizar un sensor de posición externo, pero permite una gran adaptación de sensores que se pueden ir integrando gradualmente. A continuación se describen brevemente cada uno de los sensores.

- **Sensor de movimiento:** Un sensor de posición o movimiento que se utiliza en controladores de vuelo o en placas de desarrollo es el MPU6050, mostrado en la figura 26, este sensor de posición es compatible con la mayoría de los microcontroladores en el mercado y cuenta con las siguientes especificaciones técnicas:

- Acelerómetro con sensibilidad variable.

- Giroscopio con sensibilidad variable.
- Salida digital de 6 ejes.
- Comunicación por I^2C , SPI .
- Voltaje de operación: 3V/3.3V-SV DC.
- Regulador de voltaje en placa.
- Rango de acelerómetro: 2g,4g,8g,16g.
- Rango de giroscopio: 250 grad/seg, 500grad/seg, 1000grad/seg, 2000 grad/seg.
- Conversor AD de16 bits.
- Dimensiones: 20x16x3 mm.

Este sensor de movimiento mide la aceleración en tres ejes X,Y y Z. Tiene la referencia de la gravedad terrestre, esto permite calcular el ángulo de inclinación en los ejes X, Y. Es decir si el MPU6050 está perfectamente alineado con el suelo, el eje Z marcara una fuerza normal de 9.8, dejando los otros ejes X y Y en cero. Ahora supongamos que giramos el MPU6050 90 grados, en ese momento el eje X estará perpendicular al suelo, por lo tanto marcara la aceleración de la gravedad (AndrewBirkett, 2013).

- **Sensor de temperatura:** Para esta medición se propone utilizar un termómetro digital DS18B20, este sensor proporciona mediciones desde los -55°C hasta los 125°C de temperatura y con una resolución programable de 9 a 12 bits. El DS18B20 se comunica a través de un Bus de central utilizando el protocolo 1-wire que requiere una sola línea de datos para la comunicación a un microcontrolador



Figura 26: Sensor de posición MPU6050.

central. Una ventaja de este sensor es que se puede obtener potencia directamente desde la línea de datos, eliminando la necesidad de una fuente de alimentación externa. Algunas de las aplicaciones que se pueden cumplir con DS18B20 modelo TO-92 mostrado en la figura 27 se presentan a continuación.

- Control termostático.
- Sistemas industriales.
- Productos alimenticios.
- Termómetros digitales.
- Sistemas sensibles a la temperatura.
- Exploración en diferentes ambientes hostiles.



Figura 27: Sensor de temperatura DS18B20 modelo TO-92.

- **Cámara de acción:** Para la visualización al momento de la exploración se necesita una cámara de acción para la filmación y monitoreo del dispositivo electrónico submarino. Algunas características que se necesitan al momento de la exploración para tener una mayor claridad, en la figura 28 se muestra la cámara que se propone utilizar.



Figura 28: Cámara de acción.

IV.7 Desarrollo de interfaz gráfica del ROV.

En esta sección se presenta el desarrollo la interfaz gráfica, los componentes necesarios, el algoritmo, así como los leguajes de programación para el desarrollo de una unidad de procesamiento central del dispositivo electrónico submarino. Para el desarrollo del dispositivo electrónico submarino, se necesita que el hardware cumpla con las siguientes características:

- Sistema embebido de alto rendimiento computacional.
- Facilidad de integración con dispositivos como sensores y controladores de vuelo.
- Permita el desarrollo de diversas aplicaciones en investigación científica y producción acuícola.
- Multilenguaje de programación.

- Programación multitarea.
- Comunicación estable capaz de interactuar con el ROV.
- Bajo consumo de energía.
- Facilidad de control para el usuario.

IV.7.1 Sistema embebido de alto rendimiento.

En el mercado existen gran variedad de sistemas embebidos de alto desempeño, estos sistemas son pequeñas placas de desarrollo tecnológico, el avance de estos dispositivos han abierto un rumbo importante para la industria. En este trabajo se propone utilizar un Raspberry pi 3, como cerebro principal del dispositivo electrónico submarino. Este mini-ordenador se eligió por su gran estabilidad en proyectos de vehículos no-tripulados, además de cumplir con la mayor parte de las características necesarias para realizar la interfaz gráfica y por ser de código abierto. En la figura 29, se muestra el Raspberry pi 3, el cual tienen las siguientes especificaciones técnicas.

- Microprocesador:
 - Chipset Broadcom BCM2387.
 - 1.2 GHz de cuatro núcleos ARM Cortex-A53
- GPU.
 - Dual Core VideoCore IV. Proporciona Open GL ES 2.
 - Capacidad de 1 Gpixel/s, 1.5 Gtexel/s ó 24 GFLOPs.
- RAM: 1GB LPDDR2

- Conectividad:
 - Ethernet socket Ethernet 10/100 BaseT.
 - 802.11B/G/N LAN inalámbrica y bluetooth 4.1.
 - HDMI video y RCA.
 - 4 puertos USB 2.0
 - 40 pines GPIO. .



Figura 29: Tarjeta Raspberry pi 3.

Este sistema embebido de alto desempeño tiene la función de realizar varios procesos. En la siguiente figura 30 se muestran los principales procesos que debe realizar.

De inicio el software tiene que ser interactivo, este debe estar ejecutando las instrucciones que debe realizar el ROV en funcionamiento, este debe tener la compatibilidad de interactuar con el microcontrolador para las variaciones de velocidad de los motores y recibir la información que se miden con los sensores de posición, así como

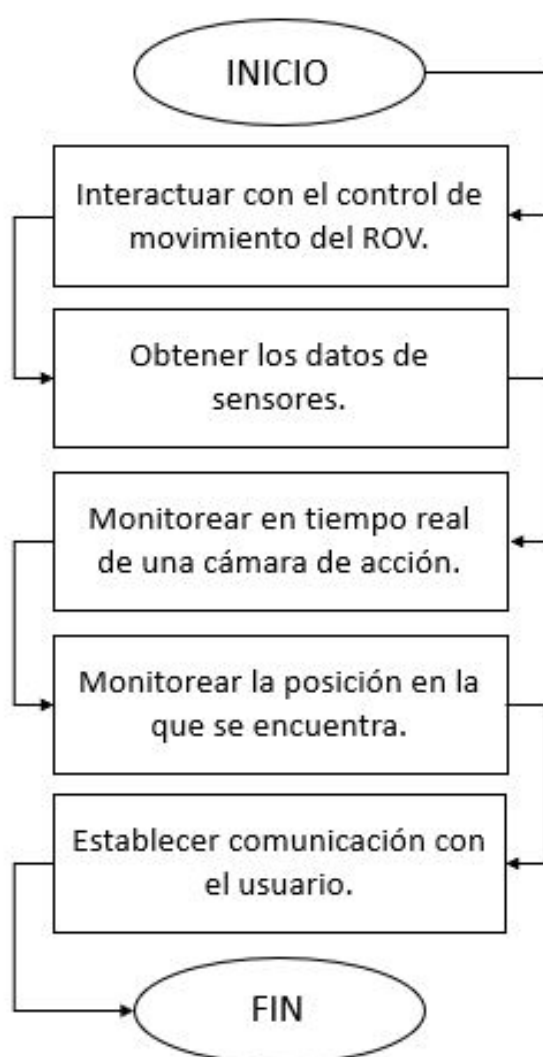


Figura 30: Principales procesos a realizar por el sistema embebido Raspberry Pi 3 .

de temperatura. Estar monitoreando con video en tiempo real lo que el ROV esta explorando, por medio de la cámara de acción resistente al agua. Tener una comunicación cableada empleando el protocolo ethernet adecuada con el dispositivo electrónico submarino.

IV.7.2 Desarrollo del software.

Se propone el desarrollo del software en Python, esta aplicación sirve para mover y controlar al dispositivo electrónico submarino (ROV) en los movimientos rotacionales en los tres ejes, este software monitorea el estado del ROV, monitor de la cámara al momento de la exploración, la posición y la temperatura en con la que se está trabajando. Esta aplicación está en comunicación con el microcontrolador Atmel 328P con el que puede interactuar para la obtención de parámetros de temperatura, así como la modificación de la aceleración de los motores. Esta parte es el cerebro del dispositivo electrónico submarino ya que este también tiene la comunicación con el exterior. La comunicación se establecerá por medio del RJ45 Ethernet del Raspberry Pi a través del escritorio remoto. En la figura 31 se muestra el diagrama a bloques de la parte interior del prototipo electrónico submarino.

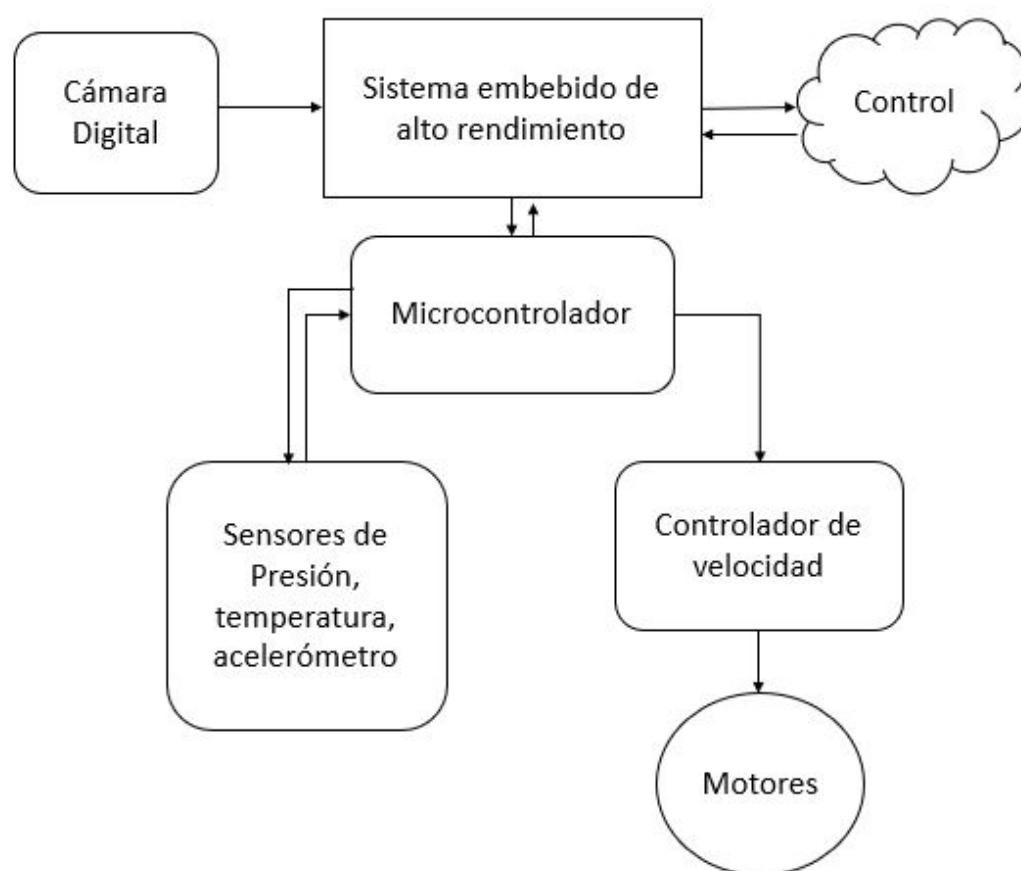


Figura 31: Diagrama a bloques del sistema electrónico en el interior del ROV.

Capítulo V

Resultados.

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos del desarrollo del prototipo electrónico submarino (ROV). Estos se obtuvieron a lo largo del desarrollo del presente trabajo, considerando el cambio de algunos materiales, algunas pruebas se hicieron en laboratorio y las pruebas finales se hicieron dentro de un ambiente acuático. Adicionalmente, en este capítulo se describe el desarrollo del prototipo electrónico submarino en las diferentes etapas de construcción de hardware y desarrollo del software.

V.1 Resultados del hardware.

El utilizar tubería PVC para la parte de hardware del dispositivo electrónico submarino reduce de manera considerable el costo total del prototipo ROV propuesto. Inicialmente se pretende que el material se pueda encontrar fácilmente y sea de bajo costo. Los ROV encontrados en el mercado tienen algo en común, su elevado costo y una estructura metálica u otro material que hace que se incremente considerablemente su precio. En este trabajo se diseñaron dos tipos de estructuras del prototipo electrónico submarino. La primera estructura cuenta con una cápsula donde contiene la electrónica, con dos extensiones donde se colocan los motores, muy parecida a la configuración realizada. El prototipo propuesto contiene la topología indicada con anterioridad, con la cual se tiene los movimientos en los diferentes ejes donde se puede trasladar. Para realizar este diseño se utilizaron los materiales que se mencionan en la tabla I.

En la figura 32 se muestra el dibujo diseñado y la estructura real construida. Inicialmente se realizó la cápsula con un par de orificios a los lados, realizados en un taller

Materiales para diseño del ROV.	
Cantidad	Descripción
4 piezas	Tubo de PVC de $\frac{1}{2}$ " con 25 cm de largo
4 piezas	Conector esquina de $\frac{1}{2}$ ".
2 piezas	Tubo de PVC $\frac{1}{2}$ " con 11.5 cm de largo
5 piezas	Conector T de $\frac{1}{2}$ ".
4 piezas	Tubo de PVC de $\frac{1}{2}$ " con 5 cm de largo
4 piezas	Conector L de $\frac{1}{2}$ ".
1 pieza	Tubo de ABS 4" con 25 cm de largo

Tabla I: Materiales a utilizar en la construcción de la estructura del ROV.

de tornillo, con acoples de $\frac{1}{2}$ ". Al tener la estructura realizada, fue sumergido en una pila donde el agua en la cápsula fue abundante. Para el siguiente diseño se realizó otro tubo de 4", en donde se le colocó una abrazadera de 4" con salida de $\frac{1}{2}$ ". Esta abrazadera proporciona un par de salidas de $\frac{1}{2}$ ", con las cuales se evitara un corte mayor en el tubo principal, así se evitaran filtraciones de agua en la cápsula.

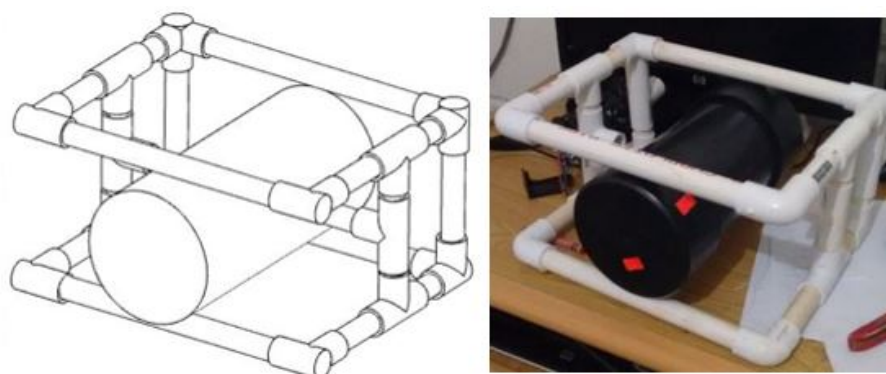


Figura 32: Diseño de la estructura dibujada en 3D y estructura realizada.

Al momento de realizar pruebas en una tina se observó que la estructura no tenía el suficiente peso, por lo que se le colocaron barras aceradas para aumentar el peso y poder trabajar con la flotabilidad. Este peso se compensa por barras de metal introducidas en medio de la estructura producen un mayor peso distribuido por toda la estructura, manteniendo el equilibrio para evitar colisiones al momento de la exploración. En la figura 33, se muestran las primeras pruebas de inmersión, ya contando con la abrazadera,

con el peso colocado y distribuido, se observó una mejora al momento de ser sumergido.

Después de ya tener el control de la flotabilidad y de ya tener herméticamente la capsula central este prototipo electrónico submarino ya puede transportarse a un ambiente no controlado como lo es el mar.

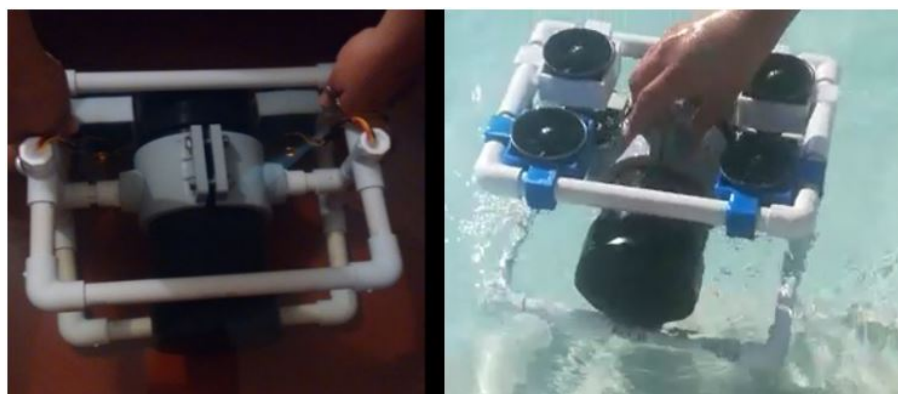


Figura 33: Pruebas de inmersión en ambientes acuáticos controlados.

V.2 Pruebas de motores.

Una vez obtenido el hardware hermético, se trabajó con los componentes eléctricos y electrónicos necesarios para mover y controlar al prototipo electrónico submarino, para esto se estudiaron diferentes tipos de motores, además de ver cuáles son la mejor opción tanto para la economía, fuerza y durabilidad, siendo la economía un punto que en este proyecto se está buscando. En esta parte se buscaron propulsores comerciales, motores de corriente directa, motores de corriente alterna o motores que se puedan modificar para tener un mejor control al momento de la exploración. Los propulsores comerciales que se encontraron tienen un diseño que le permite estar en contacto con el agua, también tienen la fuerza suficiente para el control del vehículo submarino. A continuación se presentan algunas características de los motores encontrados:

- **Propulsores comerciales.** Estos propulsores son realizados especialmente para

la construcción de los ROVS comerciales, estos motores son sellados para evitar filtraciones de agua, son motores de corriente directa. El elevado costo de estos motores hacen que estos motores no sean una opción. Se adquirieron cotizaciones de dos fabricantes de propulsores donde los precios van desde \$70 hasta los \$250 dólares.

- **Motores de CD, CA.** Estos tipos de motores por su forma eléctrica y construcción se dificulta el mantenimiento interno de los motores, así como el desgaste de los diferentes componentes que lo constituyen, que después de algún tiempo se tienen que remplazar, por la fricción generada por el movimiento. Estos motores son de precio accesible, pero las desventajas de este tipo de motores es que dependiendo de la fuerza que se dese los motores pueden ser de mayor tamaño.
- **Motores sin escobillas.** Estos tipos de motores también son de corriente continua pero con diferente configuración sin escobillas. Son motores que por lo general son encontrados en los ROV, o su configuración esta implementada en los propulsores comerciales adecuados para el funcionamiento de los mismos. Estos motores son de fácil mantenimiento, ya que el rotor esta estático con el embobinado y el estator es el que puede girar. La velocidad de giro puede ser variada por medio de una señal PWM, el giro puede ser modificado gracias a la configuración del controlador de velocidad.

La prueba de motores se realizó dentro de una tina con agua, para ver la fuerza y el agua que expulsa. En la figura 34, se muestra las pruebas, de manera individual y con la configuración de motores diseñada del prototipo electrónico submarino. Al observar como se comportaban los motores dentro del agua, podemos probar los controladores de velocidad para dichos motores. Los motores que se implementaron al prototipo electrónico submarino son modelo QF2611 de XCSOURCE de 4,500KV.



Figura 34: Pruebas de motores en tina con agua.

Al contar con el modelo de motor específico se requiere encontrar un controlador para variar la velocidad, se probaron distintos microcontroladores capaces de generar una señal PWM. Estos motores necesitan un controlador de velocidad (ESC) que conviertan la señal PWM en una señal trifásica para el funcionamiento óptimo del motor, según sea el ancho de pulso, será la velocidad del motor. Primeramente esta señal fue generada por medio un controlador de vuelo Ardu-Pilot, los cambios de giro que proporciona este controlador nos permite cambios de velocidad muy abruptos, cada cambio se realiza en intervalos de 10 microsegundos esto se debe a la gran velocidad que puede alcanzar el modelo de los motores. Al ver el comportamiento de los motores usando el controlador de vuelo, posteriormente se generó una señal PWM con un microcontraldor Atmel 328P, particularmente empleando un microcontrolador Arduino nano capaz de tener un cambio menor a 10 microsegundos. En este microcontrolador la señal generada tiene un cambio de 1 microsegundo, así permite tener un cambio de velocidad más

gradual, la comparación de las señales se muestran en la figura 35.

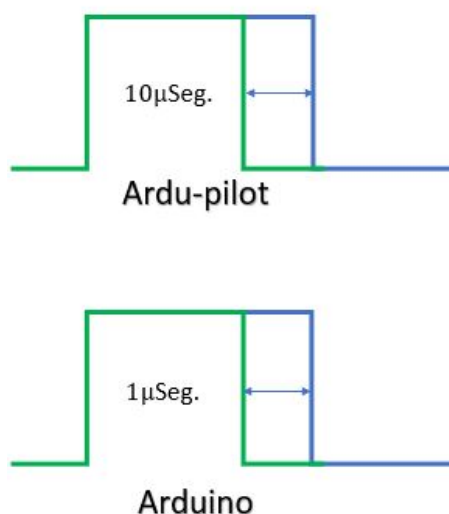


Figura 35: Señal PWM del controlador de vuelo Ardu-Pilot y microcontrolador Atmel 328P (Arduino nano).

La figura 36 a) y 36 b) muestra dos ejemplos de señales PWM obtenidas a la salida del microcontrolador Atmel 328P, se puede observar que mientras mayor sea el ancho (tiempo) de los pulsos, mayor será la velocidad en los motores del ROV. En la figura 36 c) y 36 d) se pueden observar dos ejemplos de señal PWM obtenida a la salida del controlador de velocidad ESC-30A, la cuales se aplican directamente a los motores del ROV.

Una vez obtenidos los intervalos necesarios para los cambios de velocidad, posteriormente se desarrolló el programa para el microcontrolador Arduino nano, este algoritmo es capaz de realizar los cambios de giro proporcionados por dos relevadores, estos están conectados en las entradas del motor como se ha mencionado anteriormente. En la figura 37 se muestra el diagrama a bloques del algoritmo realizado para el control del ROV, al inicio se auto calibran los controladores de velocidad para trabajar con los motores, al momento de tener el controlador de velocidad calibrado, el ROV espera la

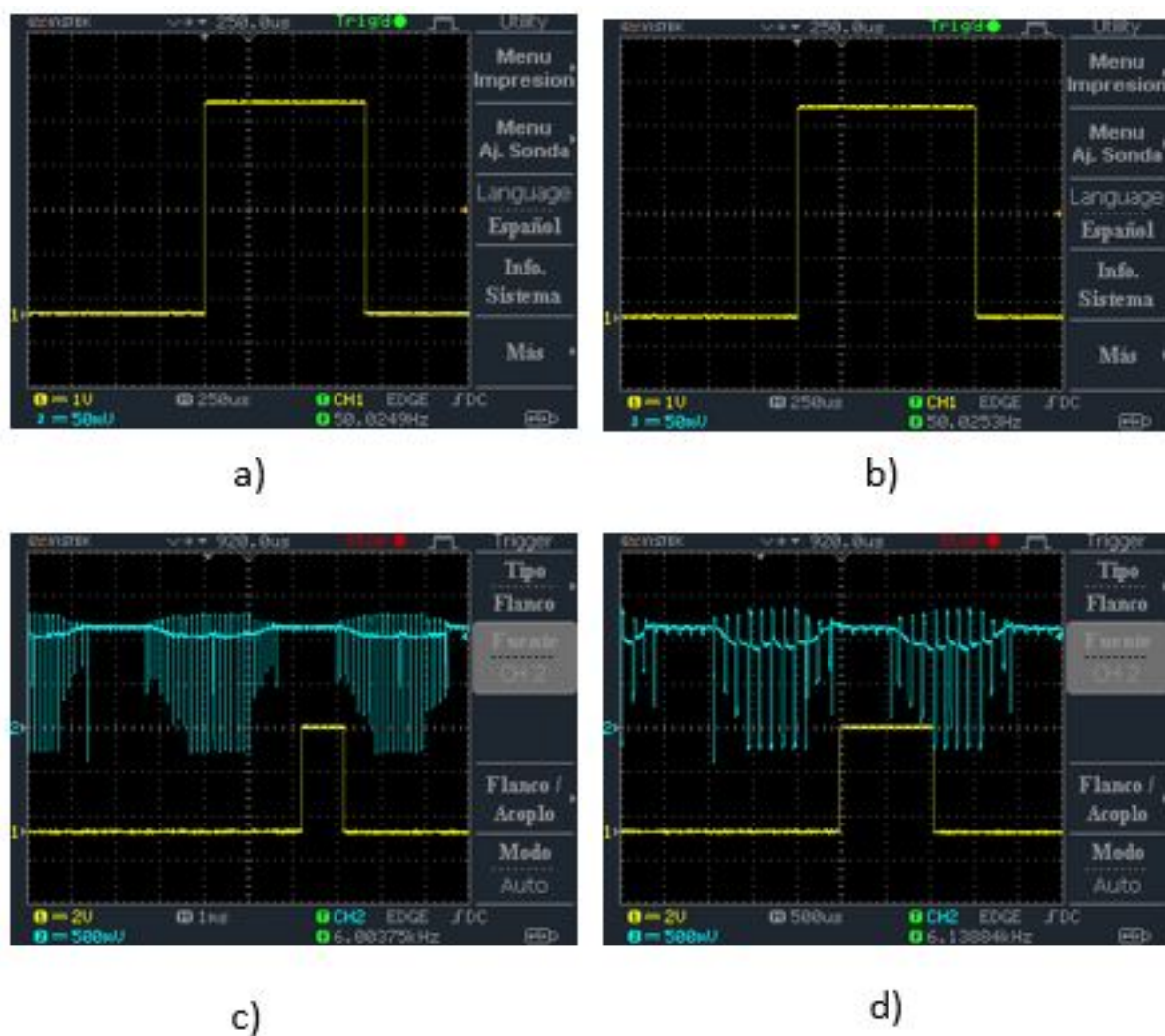


Figura 36: Ejemplo de señales PWM. a) y b) Señal PWM obtenida en la salida del microcontrolador Atmel 328P. c) y d) Señal PWM obtenida a la salida del controlador ESC-30A

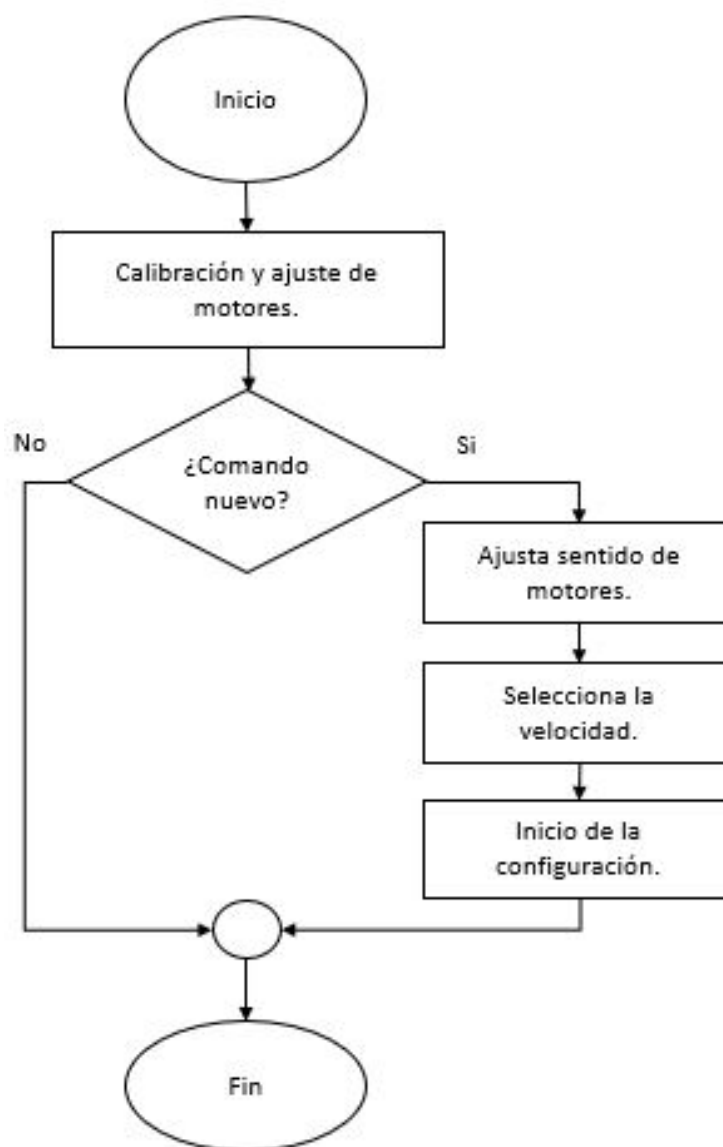


Figura 37: Diagrama de flujo de programa en microcontrolador Atmel 328P (Arduino Nano).

instrucción de movimiento, dependiendo cual instrucción sea la asignada, el algoritmo ajusta los relevadores necesarios para el movimiento que se desee, la configuración está dada por la topología de distribución de los motores descrita anteriormente. Después de la calibración y selección de la configuración de los motores, se selecciona la velocidad inicial, que para esto tendrá una velocidad baja, media y alta, después de esto los motores empiezan su funcionamiento.

Al momento de tener funcionando este algoritmo de control de motores, se tuvo la necesidad de diseñar unas bases para adherir los motores a la estructura del prototipo electrónico submarino, las bases se diseñaron usando un software de diseño 3D, para después ser impresas en 3D, las bases fabricadas se pueden observar en la figura 38, estas bases son capaces de adaptarse a la estructura diseñada para lograr así la topología que fue seleccionada.

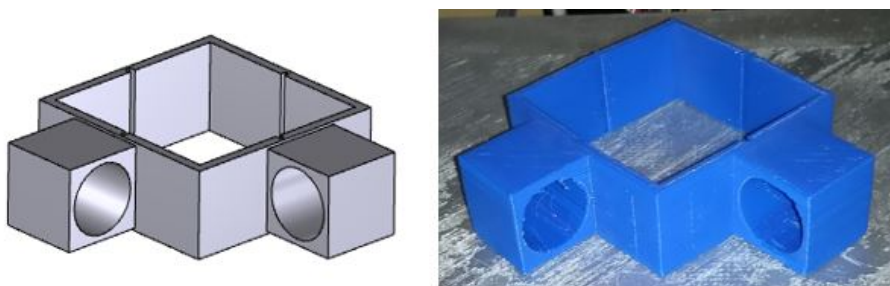


Figura 38: Diseño e impresión 3D de bases para motores propulsores.

V.3 Software y acoplamiento de sensores.

El software embebido del ROV se desarrolló en Python, se utilizaron bibliotecas adecuadas para la elaboración de interfaces gráficas y reproducción de video, nos proporciona una facilidad para la creación de una interfaz gráfica que ayuda a interactuar con el dispositivo electrónico submarino. Este algoritmo se empezó a realizar inicialmente solo como una interfaz gráfica, que era capaz de interactuar con el algoritmo realizado para el control de motores. Con este programa inicialmente realizado en programación

serie o secuencial ya tenía la interacción con el usuario y el ROV. Al tener la primera interfaz realizada, posteriormente se agregó una pestaña para monitorear por medio de la cámara digital el área que se está explorando. Primeramente el algoritmo se realizó en programación en serie o secuencial, y es aquí donde se presenta una limitación de dicha programación. Al momento de ejecutar el programa solo ejecutaba la aplicación o iniciaba la cámara pero no ambas a la vez, debido a esta limitación técnica, que se optó por desarrollar el software en programación en paralelo o en hilos. Esta programación se realiza mediante funciones que se ejecutan al mismo tiempo, en la figura 39 se muestra la diferencia entre una programación en serie y la programación en hilos. Esta programación nos proporciona un mejor tiempo en la ejecución, así como separar las diferentes aplicaciones que se tendrán en el prototipo electrónico submarino.

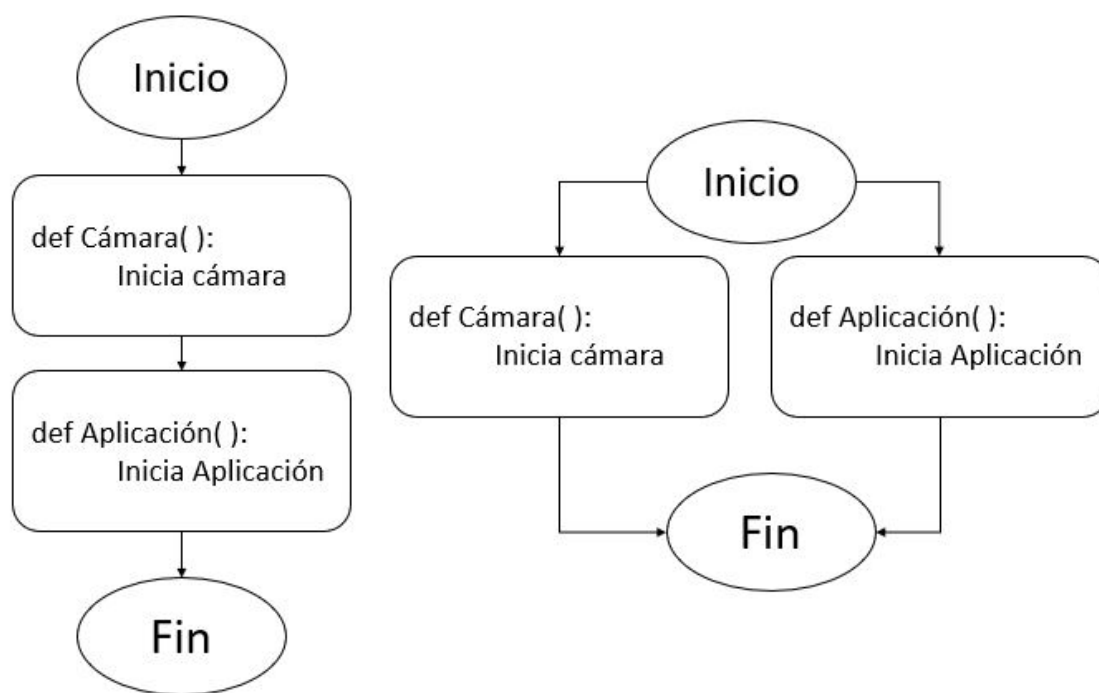


Figura 39: Diferencia entre programación en serie y programación en hilos.

- **Programación en Serie:** Esta programación nos ofrece una gran variedad

de bondades al momento de programar, aunque está limitada para ciertos programas donde el procesamiento y obtención de variables no necesiten demasiado procesamiento informático.

- **Programación en Paralelo:** Esta programación está orientada especialmente a aplicaciones de alto procesamiento para disminuir el tiempo a diferencia de una programación en serie, otra rama es la que se plantea en este trabajo, donde se necesita que la aplicación desarrollada se ejecute en diferentes hilos, donde cada hilo tiene una tarea asignada, disminuyendo el tiempo de ejecución y no trasladando tareas, la cual que era una deficiencia que se tenía al inicio del desarrollo de este trabajo de tesis.

En la figura 40 se muestra la ventana de la primera fase del desarrollo de la aplicación, donde solamente era el control del ROV, este algoritmo de control se colocó en un proceso (una tarea o hilo). Este algoritmo es iniciado verificando la conexión del microcontrolador Atmel 328P, es decir que la comunicación este establecida con la aplicación, esperando que una tecla sea presionada para enviar el comando necesario al microcontrolador para que el algoritmo del microcontrolador empiece a funcionar. La segunda fase es el acoplamiento de la cámara digital, esta estará monitoreando el ambiente que se explora. Este programa para la obtención de imagen a través de la cámara también es implementado en un hilo, para que al momento que se ejecute el programa del control, también se ejecute el programa de la cámara.

Otro factor importante en este trabajo es el acoplamiento de un sensor de posición y temperatura, que cada uno estará siendo monitoreado en dos hilos diferentes. El sensor MPU6050 es un acelerómetro con giroscopio, este sensor entrega la posición del ROV al momento del descenso o ascenso durante la exploración. Al inicio del estudio de los



Figura 40: Interfaz gráfica inicial.

sensores, se observó cómo funcionaba el sensor de posición, luego se generó un programa para ver su funcionamiento, en los resultados del algoritmo se puede observar el ruido generado por el sensor de posición, para complementar esta medición se utilizó un filtro Kalman de estado estacionario, o también llamado un filtro complementario. Este filtro combina la salida del acelerómetro y el giroscopio para obtener una mejor estimación del ángulo de orientación del ROV. Este tipo de filtro son muy utilizados en sistemas de comunicación inercial. Este filtro combina una unión de dos filtros diferentes, un filtro pasa altas para el giroscopio y un filtro pasa bajas para el acelerómetro. Para la obtener los ángulos en X e Y , se emplean las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} \text{Angulo}X &= \arctg\left(\frac{y}{\sqrt{x^2 + z^2}}\right) \\ \text{Angulo}Y &= \arctg\left(\frac{x}{\sqrt{y^2 + z^2}}\right) \end{aligned} \quad (6)$$

Por medio de la trigonometría se puede conocer el ángulo de inclinación, en las ecuaciones 6 nos permite conocer los ángulos del acelerómetro, para tener mejores lecturas del sensor se puede medir la inclinación en ambos ejes.

$$\begin{aligned} G_{(x)} &= G_{(x-1)} + G_{(x)} * \Delta t \\ G_{(y)} &= G_{(y-1)} + G_{(y)} * \Delta t \end{aligned} \quad (7)$$

Con el giroscopio se obtiene la velocidad angular, los grados que se giran por segundo, al conocer el ángulo inicial del sensor se suma el valor actual que marca al cambio del giro por el tiempo transcurrido, en la ecuación 7 se muestra la forma de calcular la velocidad angular. En la figura 41 se muestran las primeras mediciones del sensor de posición, se puede observar una gran inestabilidad en el momento de la lectura, para evitar que la muestra tenga ruido, se programa e implementa un filtro complementario para obtener una señal con mejores lecturas obtenidas (AndrewBirkett, 2013).

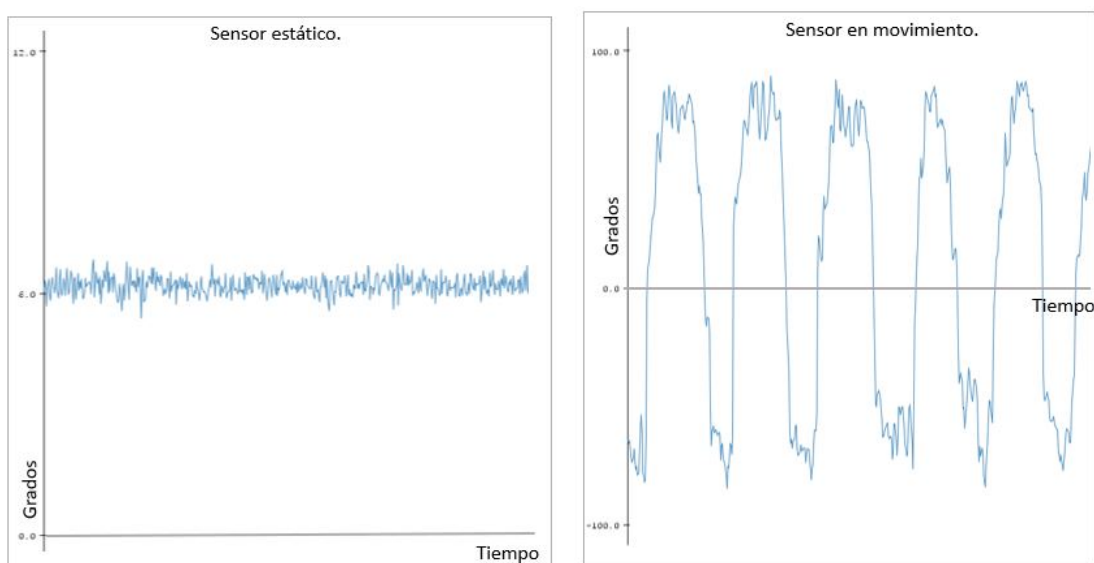


Figura 41: Obtención de valores del sensor MPU6050.

Filtro complementario. La idea básica del filtro complementario es combinar la salida del acelerómetro y del giroscopio para obtener una buena estimación del ángulo de orientación del prototipo electrónico submarino y en si, es básicamente un filtro pasa altas para las lecturas del giroscopio y un filtro pasa bajas en las lecturas del acelerómetro. Suponiendo que la función de transferencia del acelerómetro y giroscopio son igual a 1

$$\begin{aligned}
H_{a(s)}G_{(s)} &= \frac{\alpha}{s + \alpha} = 1 \\
H_{g(s)}(1 + G_{(s)}) &= \frac{s}{s + \alpha} = 1
\end{aligned}
\tag{8}$$

Si las funciones de transferencia son ideales entonces:

$$\begin{aligned}
\frac{\hat{\theta}_{(s)}}{\theta_{(s)}} &= G_{(s)} + (1 + G_{(s)}) = 1 \\
\hat{\theta}_{(s)} &= \theta_{(s)}
\end{aligned}
\tag{9}$$

Con esto se obtiene una señal de salida igual que la de entrada libre de ruido. Aplicando este filtro en el algoritmo inicial, se obtiene una señal filtrada como se muestra en la figura 42.

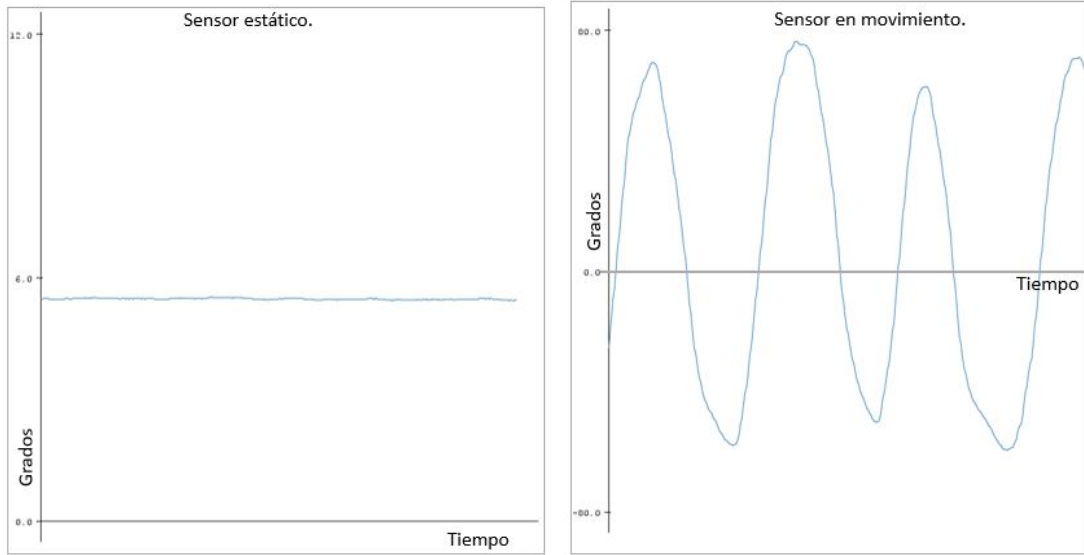


Figura 42: Obtención de valores del sensor MPU6050 con filtro complementario.

Con estos valores obtenidos, se introducen al algoritmo desarrollado en este trabajo de tesis, el cual produce una interfaz y muestra en un pequeño recuadro que nos indica

en tiempo real la posición del dispositivo electrónico submarino al momento de la exploración. En la figura 43 se muestra la interfaz gráfica principal desarrollada para el control remoto del ROV. En la parte superior izquierda se puede observar la captura de video que esta obteniendo el ROV, en la parte superior derecha se observa la posición 3D del ROV, finalmente en la parte inferior izquierda se observan las diferentes opciones para el control del ROV en el eje horizontal, las cuales son: adelante, atrás, izquierda, derecha, freno. Para el control del ROV en el eje vertical, se tienen las opciones arriba, abajo y alto (detener).

Al tener este algoritmo funcionando tenemos nuestra aplicación como se muestra en la siguiente figura .

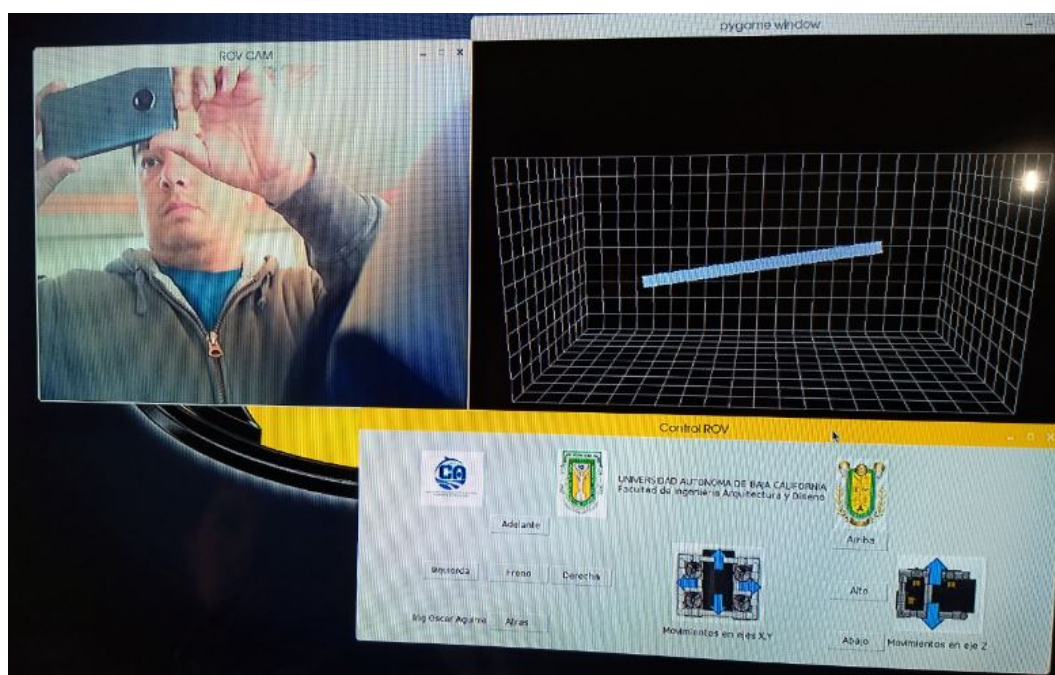


Figura 43: Pruebas de la aplicación ROV en laboratorio.

En la figura 44, se muestra la imagen del prototipo electrónico submarino al momento de la exploración en un ambiente acuático controlado, se puede observar la parte lateral de la piscina, así como la interfaz gráfica desarrollada para el control remoto del ROV.

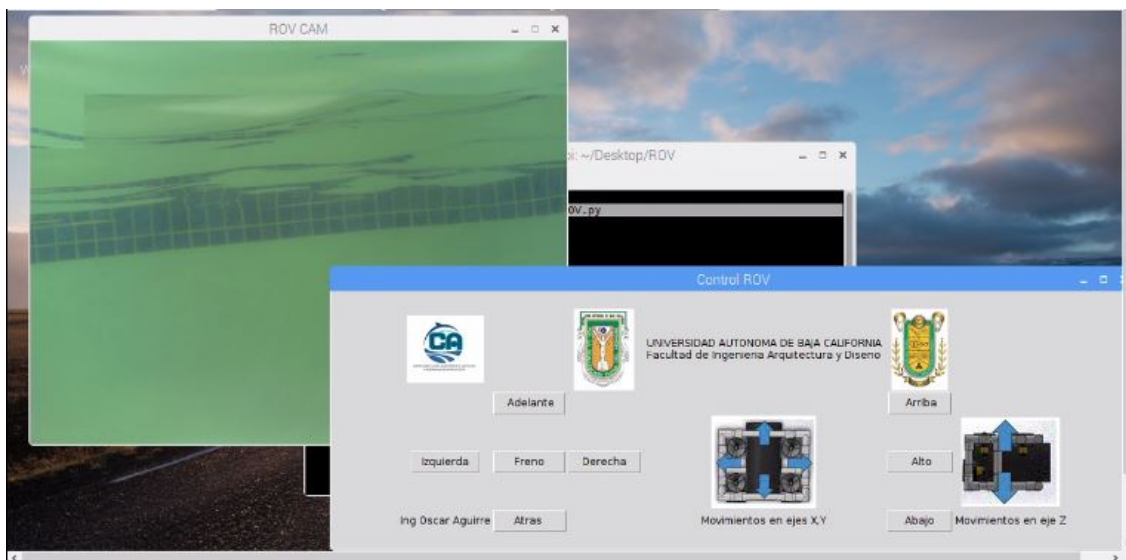


Figura 44: Pruebas de aplicación ROV en piscina.

V.4 Comunicación del ROV.

La comunicación del ROV es por medio de conexión alámbrica Ethernet y empleando computación virtual en red - VNC (Virtual Network Computing), este protocolo hace una conexión a un escritorio remoto, para esto se necesita un punto de acceso que asigne una dirección IP con el que se conecta a dicha computadora. En la figura 45, se muestra un diagrama a bloques de la conexión de comunicación Ethernet.

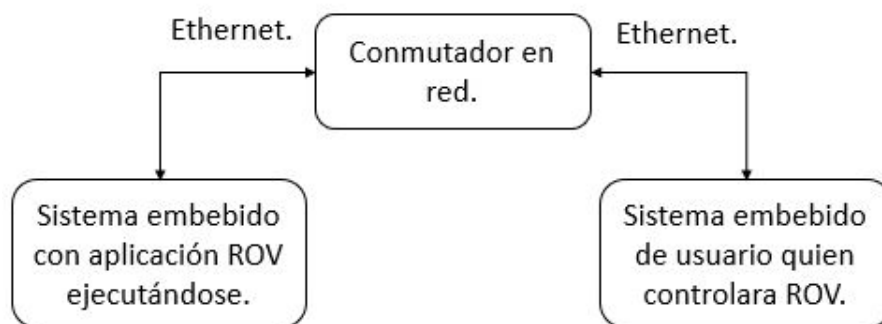


Figura 45: Diagrama a bloques de comunicación Ethernet del ROV.

En el sistema embebido de alto desempeño que se encuentra dentro del ROV, se estará ejecutando la aplicación de ROV, de este solamente sale un cable Ethernet que va hacia a un conmutador en red (switch Ethernet), donde este asigna una dirección al sistema embebido de alto desempeño. Una ventaja de este tipo de conexión o control del ROV es la que se propone en este trabajo, que cualquier computadora con una conexión remota puede conectarse al prototipo electrónico submarino (ROV), desde otro sistema embebido de alto desempeño, hasta una computadora de alta gama. Para poder utilizar el protocolo VNC solo se necesita que el sistema embebido que está en el ROV se configure como servidor y que todos los clientes puedan conectarse a ese ordenador, en este trabajo se buscó la forma de que esta aplicación sea multiplataforma y que no esté casado necesariamente de un control exclusivo del mismo o sistema operativo.

V.5 Autonomía del ROV.

Una de las partes importantes y relevantes para que el prototipo electrónico submarino funcione o en especial donde los ROVS han tenido una gran incógnita es el de la alimentación energética, esta hace que nuestro sistema no funcione correctamente, para este caso la parte de alimentación esta internamente, adentro del prototipo electrónico submarino. Si bien existen diferentes tipos de ROVs en el mercado, una de las principales características que se tiene que preguntar es el que tipo de alimentación utiliza, puede ser interna, externa o mixta. Cada una de estas características tienen sus pros y contras. Para la construcción de este prototipo se utilizó una alimentación interna con mínimo 5 baterías de Ión de Litio polímero a bordo del prototipo electrónico submarino, donde la alimentación está distribuida como se muestra en la figura 46.

Como se puede apreciar en la imagen de la figura 46, la alimentación del ROV es independiente en lo digital y en el sistema de potencia.

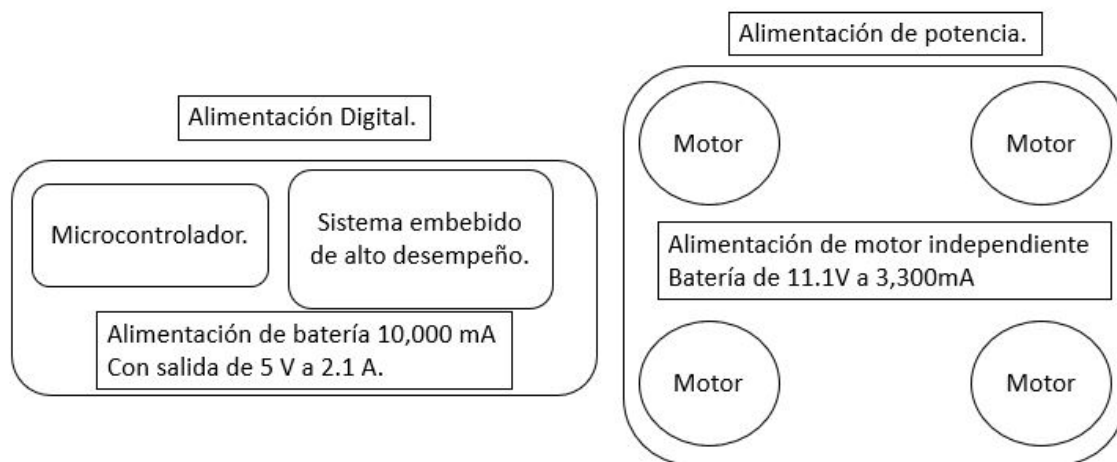


Figura 46: Diagrama a bloques del subsistema de alimentación del ROV.

- **Subsistema de alimentación digital.** En este sistema se necesita una batería que su salida sea de 5 V a 2 A para un funcionamiento óptimo del sistema embebido, en este caso un Raspberry Pi 3. En la figura 47 se puede observar la batería seleccionada, esta batería cuenta con las siguientes características:

 - Capacidad de carga de 10,000mAh.
 - Dos salidas de voltaje de 5V - 1A y 5V - 2.1A.
 - Indicador de porcentaje de carga de batería.
 - Batería de Li-Ion (Iones de Litio).
- **Subsistema de alimentación de potencia.** Para este sistema se buscó una batería que nos proporcionara una durabilidad aceptable ya que esta alimentará a todos los motores propulsores, para un mayor tiempo de trabajo se plantea que cada motor tenga su propia alimentación, en la figura 48 se puede observar la



Figura 47: Batería de Li-Ion para el sistema embebido Raspberry Pi.

batería seleccionada para el subsistema de alimentación de potencia, la cual tiene las siguientes características:

- Capacidad de carga 3,000mAh.
- Salida de voltaje de 11.1V
- Tasa de descarga 30C
- Material Li-Po (Polímero de litio).

Con el subsistema de alimentación separado se evitan picos de voltaje que puedan re-iniciar o dañar al sistema embebido al momento del arranque de los motores. Con esta configuración se realizaron pruebas de duración, se dejó encendido el sistema embebido junto con un motor, donde el tiempo de funcionamiento en el sistema digital trabajo alrededor de 8 horas continuas. El sistema de potencia por motor fue alrededor de dos horas con un giro de motor a media velocidad, estos tiempos variaran conforme el trabajo vaya aumentando o disminuyendo, ya que las mismas pilas van sufriendo



Figura 48: Batería de Li-po para subsistema de potencia.

deterioro entre cada carga y descarga. Este tiempo de trabajo se muestra en la figura 49, se puede observar la disminución del voltaje con respecto al tiempo.

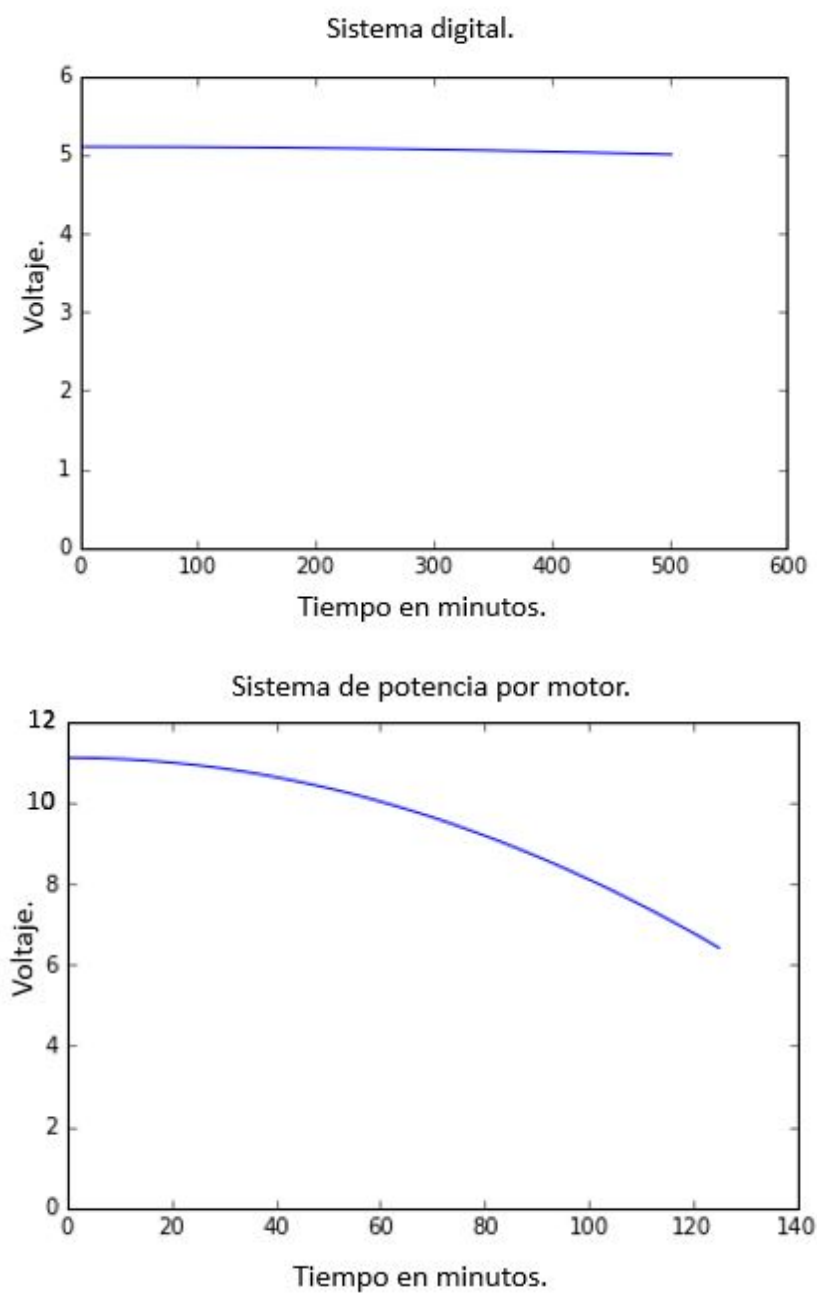


Figura 49: Gráficas de autonomía de ROV.

V.6 Pruebas en ambiente acuático.

Las pruebas de campo se realizaron en dos partes, inicialmente se probaron en ambientes totalmente controlados, en una tina con agua y en una piscina.

- **Pruebas en tina con agua.** En esta parte se realizaron pruebas de motores, materiales resistentes al agua, potencia en los motores, impermeabilidad de la estructura y flotabilidad. En la figura 50 se puede observar una imagen del ROV sumergido en la tina con agua.
- **Pruebas en piscina.** Se probó principalmente el prototipo electrónico submarino, flotabilidad, manejo y exploración. En la figura 51 se puede observar una imagen del ROV sumergido en la piscina con agua.

Inicialmente se utilizaron estos ambientes controlados para probar los materiales que se utilizaron en la construcción del prototipo electrónico submarino, la tina fue utilizada para probar los diferentes diseños que en este trabajo se mencionaron tanto el prototipo propuesto y el prototipo realizado. Esta fue la primera prueba donde el diseño fue cambiando hasta llegar al prototipo que se ha realizado y mostrado en la figura 32. Los motores se probaron igualmente en este ambiente, para observar su comportamiento, se observó la potencia de los mismos al contacto con el agua, además se realizaron las pruebas de impermeabilidad y flotabilidad. En estas pruebas se estuvo trabajando principalmente para encontrar el peso necesario para poder trabajar con la flotabilidad.

Flotabilidad. Una de las aportaciones importantes en este trabajo es el control de la flotabilidad, que está dada por la fuerza de empuje. Los cuerpos flotan cuando la fuerza resultante de la presión ejercida en la parte inferior del cuerpo, es superior a la fuerza resultante de su peso más la presión ejercida en la parte superior. Este es el principio

de Arquímedes que explica la naturaleza de la flotabilidad: Un cuerpo sumergido total o parcialmente en un líquido experimenta una fuerza ascendente (empuje) igual al peso del líquido desplazado.

$$E = m * g = \rho_f * g * V \quad (10)$$

Donde:

- E = Fuerza de empuje.
- m = Masa del cuerpo.
- g = Aceleración de gravedad = 9.81 m/s^2 .
- ρ_f = Densidad del fluido.
- V = Volumen de fluido desplazado.

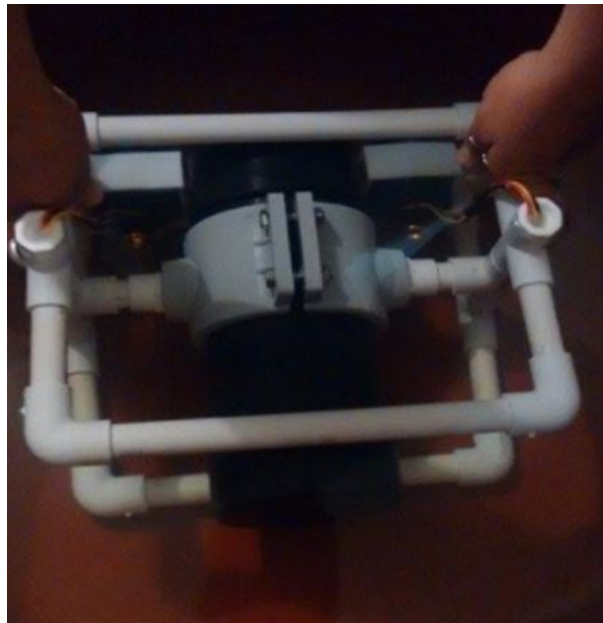


Figura 50: Pruebas del ROV en tina con agua .

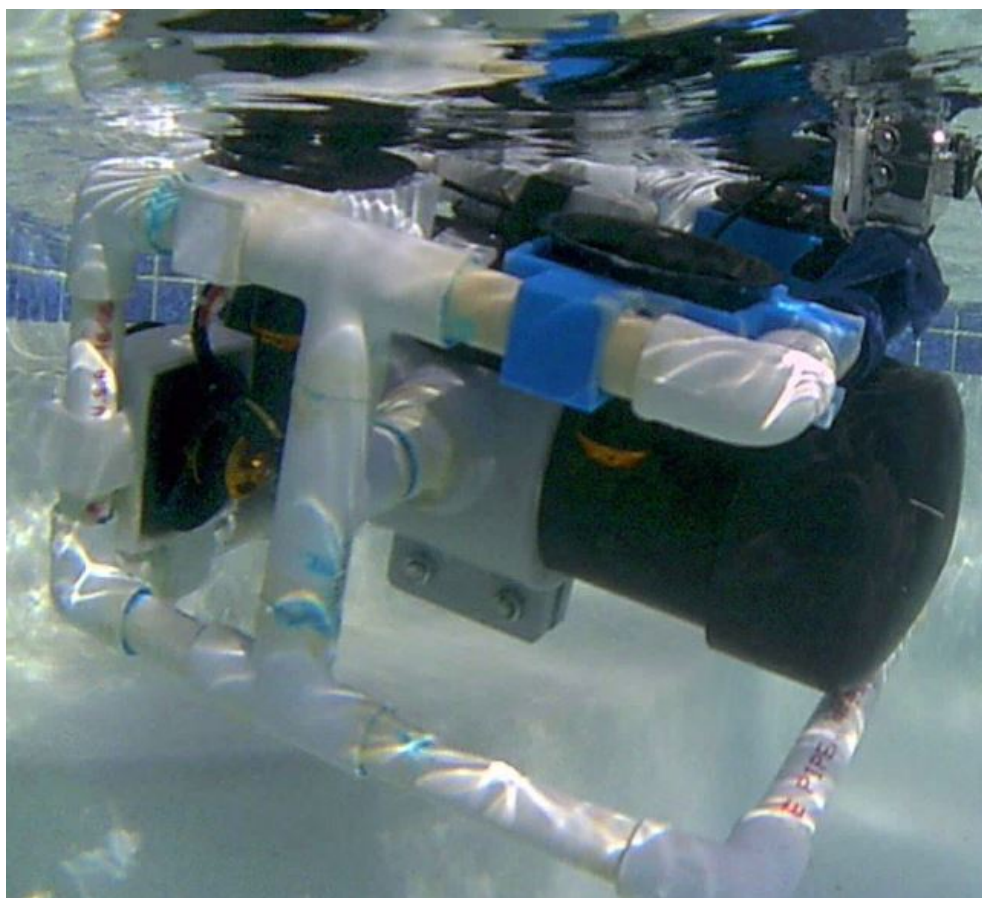
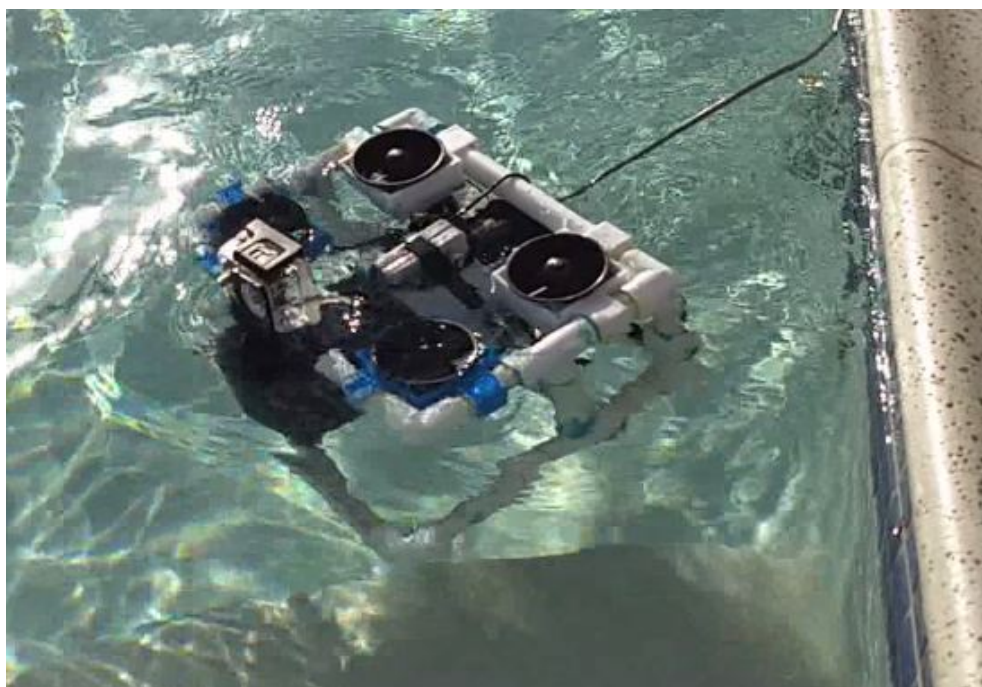


Figura 51: Pruebas del ROV en piscina.

V.7 Temperatura dentro de la cápsula del ROV.

El factor que se presentó al momento de las pruebas en laboratorio es el calor generado por el procesamiento al momento de la exploración, este aumento en la temperatura interna del prototipo electrónico submarino se genera al momento que se ejecuta la aplicación del control de motores para la operación del ROV. El monitorear la temperatura del ROV se puede prevenir en que momento pudiese afectar a la electrónica que se encuentra dentro del ROV, causando un mal funcionamiento de los componentes electrónicos. En la figura 52 se muestra las lecturas de temperaturas obtenidas. En las gráficas de temperatura interna se puede observar el aumento de la misma, cuando el programa de control del prototipo electrónico submarino se está ejecutando. Se muestra que en el ambiente interno del prototipo electrónico submarino aumenta alrededor de los 40 grados centígrados, el sensor de temperatura que se utilizó para la medición del ambiente es el DS18B20 modelo TO-92 mencionando sus características en capítulos anteriores. Para la medición de la temperatura interna del Raspberry Pi se generó por medio de un archivo tipo “Bash” con comandos GNU/Linux ejecutable con instrucciones para la medición de la temperatura del SoC de Raspberry Pi 3 y guardando los datos medidos en un archivo ASCII con formato CSV, el periodo de tiempo en el que se tomaron las pruebas es en una hora y con toma de mediciones por segundo. Al momento que la temperatura en el Raspberry Pi va incrementando, la temperatura del ambiente interno del prototipo electrónico submarino también aumenta y no solo por el calor proporcionado por el Raspberry Pi 3, si no también por el calentamiento en los controladores de velocidad que operan junto con el control de motores. Al momento que se dejó de utilizar los motores, se observó un descenso de temperatura (después de los 3000 segundos), tal como se puede observar en las gráficas de la figura 52.

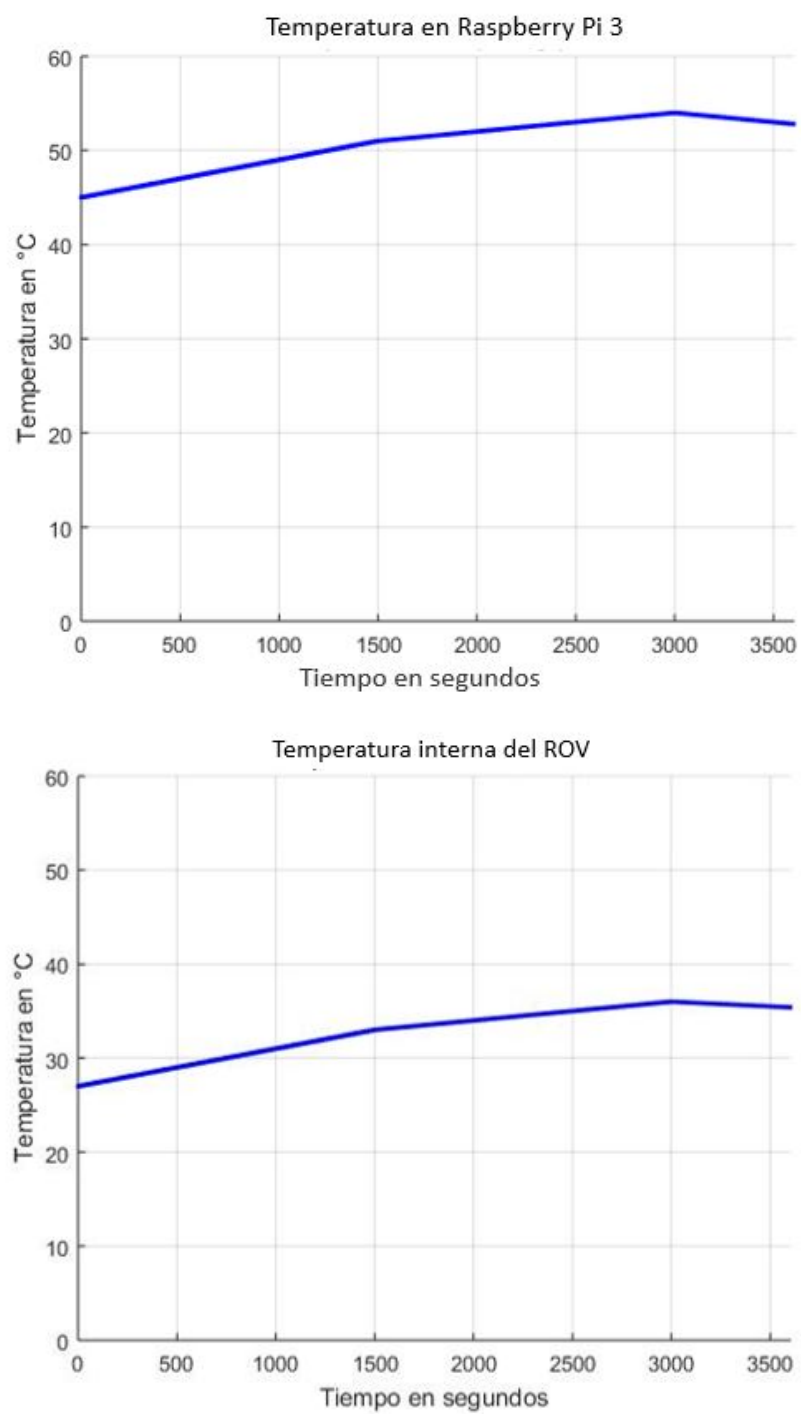


Figura 52: Gráficas de temperatura del ROV .

V.8 Conclusiones.

En este trabajo de tesis, se presentó el desarrollo de un prototipo electrónico submarino. Estos prototipos sirven para la exploración de ambientes acuáticos, los cuales pueden tener una gran cantidad de aplicaciones. El desarrollo de este prototipo es de bajo costo y se fabricó con materiales disponibles en cualquier ferretería. Con este ROV es posible el estudio de diferentes especies marinas. Uno de los retos de este trabajo, fue utilizar materiales económicos y con gran durabilidad para el prototipo electrónico submarino, empezando por su estructura diseñada con material PVC y ABS, los que se pueden adquirir fácilmente en cualquier lugar, estos materiales tienen una gran resistencia a altas presiones, que se pueden presentar al momento de la exploración. Los componentes electrónicos utilizados son de gran capacidad tecnológica para el desarrollo de aplicaciones de alto procesamiento y ejecución en paralelo. Las técnicas de cómputo paralelo utilizadas en este trabajo, permiten separar las subrutinas para que se ejecuten al mismo tiempo. La programación en paralelo proporciona alta eficiencia en cálculos numéricos con grandes cantidades de información. La autonomía del ROV propuesto es de 2 a 3 horas de uso en promedio, esto depende de los tiempos de uso de cada motor. El control remoto del ROV, se realiza mediante una interfaz gráfica, la cual es amigable para el usuario, es multiplataforma y código abierto, es decir, se puede ejecutar en cualquier sistema operativo (Windows, GNU/Linux y OS X). Al ser una herramienta de código y hardware abierto, permite que se le vayan agregando más sensores y funcionalidades. Se concluye que los ROVs tienen una aplicación potencial en maniobras de pesca, control de crecimiento en ambientes controlados para especies en corrales de engorda y en general para investigación científica para el estudio del mar.

V.9 Trabajo a futuro.

Como trabajo a futuro, se recomienda probar el ROV en el mar, tal como se comentó en los capítulos IV y V, la fuerza de empuje cambia según el entorno en el que se desee explorar, es decir, para realizar esto se recomienda hacer mejoras en la parte estructural del ROV, así como utilizar cápsulas herméticas de algunos de los siguientes materiales: acrílico, aluminio, polietileno de alta densidad (HDPE) y/o fibra de vidrio. Si bien existen diversos materiales para realizar diversos cambios en la estructura, se tiene que estudiar las ventajas y desventajas que se pueden tener al momento de la exploración o en el rendimiento del equipo. Utilizar en la estructura un material que pueda brindar un mayor peso o que se pueda ajustar al entorno donde se desee explorar. El emplear materiales con los cuales puedan aportar menor resistencia y flotabilidad al momento de la exploración es un trabajo que se puede integrar a la herramienta desarrollada.

Con respecto a la comunicación del ROV, se recomienda utilizar un cable Ethernet de dos hilos con refuerzo Kevlar de hasta $120\text{ Kg} \cdot F$ y flotabilidad neutra, esto hace que el ROV no tenga una flotabilidad adicional como lo es con un cable Ethernet convencional.

Una propuesta de mejora en software, es incorporar inteligencia artificial al ROV, para ser más específicos, visión artificial, esto permitirá que el ROV pueda percibir y comprender una imagen o secuencia de imágenes y actuar según convenga en una determinada situación. Con visión artificial se puede monitorear las diferentes especies deseadas solo con un entrenamiento previo para la identificación o reconocimiento específico de ciertos patrones. Con la incorporación de inteligencia artificial al ROV se pueden añadir diferentes algoritmos de manejo autónomo, tal como el reconocimiento

de fuerzas externas, corrientes marinas, etc.

Con respecto a la autonomía del ROV, se recomienda incrementar la ampacidad ($Amperes \cdot Hora$) del banco de baterías, es decir para que el ROV tenga mayor tiempo de exploración en el fondo marino.

También es recomendable agregarle un brazo robótico, el cual permita tomar algunas muestras de interés submarinas.

Por último, también se recomienda integrar otra cámara digital al ROV, para que tenga visión artificial delantera y trasera.

Bibliografía

- A. Alessandri, M. Caccia, G. V. (1998). A model-based approach to fault diagnosis in unmanned underwater vehicles.
- A. Alessandri, T. H. (1999). Robust model-based fault diagnosis for unmanned underwater vehicles using sliding mode-observers.
- AndrewBirkett (2013). Pitch, roll and yaw using MPU6050 & HMC5883l (with tilt compensation and complementary filter). <http://blog.bitify.co.uk/2013/12/pitch-roll-and-yaw-using-mpu6050.html>.
- ArduSub (2018). <https://www.ardusub.com/>.
- Christ, R. y Robert Wernli, S. (2013). *The ROV manual II*. 30th October.
- Christ, R. D. y Robert L. Wernli, S. (2007). *The ROV manual*. 9 july.
- Cotte, J. M. y Moreno, A. F. (Junio de 2010). *Diseño de control robusto de velocidad de motores brushless para robótica aérea*. Tesis de doctorado, Universidad Nacional de Colombia.
- Damian Madero Fontecha, J. J. D. T. (2012). *Diseño de un prototipo ROV subacuático experimental*. Tesis de doctorado, Universidad Industrial de Santander.
- Delgado, D. y Bolanos, C. (2013). *Control de velocidad para motor brushless sin sensores*. Tesis de doctorado, Pontificia Universidad Javeriana.
- Juan Carlos, Chandra Dhanesh, C. (2009). Investigación en materiales sometidos a altas presiones.
- Moreno, H. A. y Saltarén, R. (2014). Robótica submarina: Conceptos, elementos, modelado y control. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* 11.

MTS (2018). <http://www.rov.org/>. Marine Technology Society.

Nicolás Soria, D. C. y Guerra, P. (2014). Diseño y construcción de un ROV submarino USFQ.

QSTAR (2018). <https://www.rovs.es/>. QSTAR ROV Training center.

XCSOURCE (2018). <https://www.xcsource.com/rc379>. XCSOURCE.

Zhao, J. y Yu, Y. (2011). Brushless DC motor fundamentals application note. *MPS the future of analog IC technology*.