Universidad Nacional "Pedro Ruiz Gallo"

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

TESIS

"DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN VEHÍCULO SUBMARINO OPERADO REMOTAMENTE PARA LA SUPERVISIÓN EN LA INDUSTRIA PETROLERA"

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE

INGENIERO ELECTRÓNICO

AUTORES:

Bach. PALACIOS AGUILAR ANGIE GABRIELA

Bach. GIL NARRO JAMES AGUSTÍN

ASESOR:

Ingº. QUISPE ROJAS JULIO ERNESTO

LAMBAYEQUE - PERÚ

2014

UNIVERSIDAD NACIONAL "PEDRO RUIZ GALLO"

FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS

Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica

TESIS

"DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN VEHÍCULO SUBMARINO OPERADO REMOTAMENTE PARA LA SUPERVISIÓN EN LA INDUSTRIA PETROLERA"

PARA OPTAR EL TITUL0 PROFESIONAL DE

INGENIERO ELECTRÓNICO

AUTORES:

- Bach. Palacios Aguilar Angie Gabriela
- Bach. Gil Narro James Agustín

ASESOR:

Ing°. Quispe Rojas Julio Ernesto

LAMBAYEQUE - PERÚ

2014

TESIS

"DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN VEHÍCULO SUBMARINO OPERADO REMOTAMENTE PARA LA SUPERVISIÓN EN LA INDUSTRIA PETROLERA"

Desarrollado por:

Bach. Palacios Aguilar Angie Gabriela

Autor

Bach. Gil Narro James Agustín

Autor

Ingº. Quispe Rojas Julio Ernesto

Asesor

TESIS

"DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN VEHÍCULO SUBMARINO OPERADO REMOTAMENTE PARA LA SUPERVISIÓN EN LA INDUSTRIA PETROLERA"

Aprobado por los miembros del jurado:

Ingº. Manuel Javier Ramírez Castro
Presidente

Ingº. Víctor Olegario Jara Sandoval
Secretario

Ingº. Carlos Leonardo Oblitas Vera
Vocal

DEDICATORIA

La presente tesis va dedicada en primer lugar a mis padres, Luis y Dany, por su amor, apoyo incondicional, y ser el mayor motivo de mi vida. A mi hermana menor, Leslie, por completar mi felicidad desde su llegada. A mis abuelos, Isidora, Elsa y Hernando, por los grandes recuerdos de mi infancia. A Maya, por sus travesuras, con las que alegra mi día a día.

Angie Palacios Aguilar

A Noemí, mi adorada madre.

A Manuel, mi querido padre.

Razón de mi vida y esfuerzo.

A mi hermano.

James Gil Narro

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi agradecimiento a nuestro asesor, Dr. Julio Quispe, porque a pesar de la distancia y el trabajo, siempre dispuso tiempo para apoyarnos en el desarrollo del presente trabajo. Agradezco también a todos los profesores de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica, por sus enseñanzas.

Angie Palacios Aguilar

Agradezco a todos mis profesores de la universidad y compañeros de estudios.

James Agustín Gil Narro

PRESENTACIÓN

Señores miembros del jurado pongo a su disposición el informe de investigación intitulado "Diseño e implementación de un vehículo submarino remotamente operado para la supervisión en la industria petrolera".

El informe de tesis consiste en el diseño e implementación de un prototipo de robot que, permita contribuir como prototipo básico a las industrias del petróleo y un trabajo tal que, nos proporcione una visión concatenada de los fenómenos, con un enfoque totalizador y global de la problemática en cuestión. Este informe con temática actual, que no deja de lado el análisis de los contextos locales, trata de englobar, asimismo, los internacionales, procurando proveer un estudio macro de los eventos que nos proporcione una comprensión universal, mundial o global de los acontecimientos sucedidos en la industria del petróleo.

Las industrias de petróleo y gas, se caracterizan por tener pocos accidentes pero, cuando se producen, suelen ser de severidad (alcances y efectos) elevada. Ello se debe y da lugar a que los aspectos de seguridad y prevención tengan una importancia y sean objeto de intensa atención en las actividades de diseño, proyecto, operación y mantenimiento de las plantas pertenecientes a dichas industrias. Estos accidentes pueden afectar a las personas, a los bienes y al medio ambiente tanto dentro como fuera de los límites de la planta en que tienen su origen aquéllos.

Por las razones expuestas someto al juicio de vuestro conocimiento y sabiduría la presente tesis.

Chiclayo, Diciembre del 2014.

RESUMEN

El presente informe de investigación contiene las experiencias recogidas en la validación de un informe basado en un conjunto de elementos como libros, revistas especializadas y diversas investigaciones en múltiples campos, en los que tiene que ver las realidades locales, nacionales y del globo entero, vistas y estudiadas desde diferentes ciencias tratando de alcanzar la integralidad de los fenómenos enfocados bajo la cultura del equilibrio natural, y en especial del principio prevención que permite abordar de manera sólida la realidad. Buscando siempre permitir que en la industria de petróleo se conozca la realidad total de los eventos y no solo una parte de él.

Se inició con una idea a la problemática del derrame de petróleo, la primera semana de abril del 2013, al comienzo del último semestre de estudios, con el propósito de observar en qué situación se encuentra aquello que se propone en esta investigación cuyos resultados se exponen al final de este informe.

La mayoría de las veces el modelo organizativo de las empresas no corresponde a sus objetivos y va en contra de los intereses del hombre y la naturaleza, que prefiere seguridad y no riesgo. El individuo espera que su trabajo, entre otras cosas, laborar en condiciones materiales adecuadas; las condiciones de seguridad e higiene son los principales aspectos para conseguir un rendimiento óptimo y de esa manera prevenir futuros desastres que acarreen una contaminación considerable.

La experiencia nos lleva a esperar que el modelo sirva a las compañías que laboran en suelo marino en especial a las de petróleo y gas de manera significativa como herramienta puntual para lograr que sus operarios a cargo tengan una mejor, y más profunda comprensión de la realidad submarina y una cultura de prevención de desastres.

El capítulo I se refiere al problema de investigación y contiene además el planteamiento, la justificación, el alcance, los antecedentes de la investigación, preguntas de investigación y los objetivos.

Este capítulo busca, con la presentación de las investigaciones y de sus conclusiones, exhiba los resultados a los que arribaron los autores revisados y el grado de carencia sobre el tema de la presente investigación de acuerdo a la exposición de motivos sobre la importancia de emprender el presente trabajo.

El título II abarca el marco teórico, o las bases teórico-científicas del tema. Además de un estudio de los principales principios del robot submarino, se incluye asimismo el estudio de la robótica submarina, los sistemas de comunicación y la estructura general del sistema robótico. Además de una descripción del Reglamento de Transporte de Hidrocarburos por Ductos, sustento legal de nuestro trabajo.

La parte III se ocupa del desarrollo de la ingeniería básica, la misma que será puesta en práctica en este proyecto. La ingeniería de detalle, la cual comprende la integración de unidades funcionales, la relación de variables y el diseño de la estructura.

Abarca también la adquisición de datos, técnicas e instrumentos para el recojo y análisis de la información.

La sección IV aborda una visión de la realidad de la robótica que sirve como base para la implementación del diseño planteado en el presente trabajo de investigación. Luego se enumeran los avances como la construcción y ensamblaje. Se continúa con la instalación de dispositivos de adquisición de datos. En seguida se propone la experimentación y resultados que sirve de soporte para el diseño final pasándose a la aplicación de los principios del robot para luego terminar proponiendo los pasos a realizar.

En el apartado V se presenta las conclusiones del trabajo de investigación y las sugerencias propuestas. Contiene también apreciaciones categóricas sobre el resultado de la investigación y plantea la necesidad de poner en práctica el diseño del robot como una herramienta útil a fin de proveer una cultura de prevención que permita abordar y comprender la importancia de la naturaleza marina.

Finalmente incluimos las referencias bibliográficas y los anexos.

ABSTRACT

The present research report contains collected experiences in the validation of a work based on a group of elements like books, specialized magazines and on investigations in multiple fields in which local, national and global realities have to do, seen and studied from different sciences trying to reach the integrity of phenomena, focusedunder natural equilibrium, and specially under prevention principles which allows to board reality in a solid way. Looking for permitting that in oil industry total reality of events be known and not a part of it.

It was started with an idea about oil spillage problem, the first week of April 2013, at the beginning of our last semester as students, with the purpose of observing in what situation the matter of this investigation is now, whose results are exposed at the end of this report.

Most of the time the enterprise organizational model is not in accordance to its goals and is against man and nature´s interest who prefer security and not risks.

People hope to work in adequate material conditions. Security and hygienic conditions are main aspects to be considered in order to get and optimum performance and in that way prevent future disasters that cause considerable pollution.

Experience takes us to hope that this model serve companies that work on sea soil, especially oil and gas ones in a meaningful way like an accurate tool in order o have their workers in charge obtain a better and deeper knowledge of submarine scenario and a culture of disasters prevention.

Chapter I is about the investigation problem and contains, besides, the approach, the justification, the scope, the investigation antecedents, questions of investigation and objectives.

This chapter looks for, with the introducing of investigations and its conclusions, exhibiting the results gotten by revised authors and the lack grade about the matter of this investigation according to the exposition of motives on the importance of undertaking the present task.

Chapter II is about the theoretical frame, or the scientific theoretical bases of the theme. Besides a study of main principles of submarine robot, robotic submarine, communication systems and general structure of robotic systems are included. In addition, a description of hydrocarbon transportation law, legal base of our research.

Chapter III is about the development of basic engineering, which will be put into effect in this project. The engineering detail, comprehends the integration of functional units, the variables relation and the design of the structure. Also includes the data acquisition, techniques and instruments for collecting and analysis of information.

Chapter IV tackles a vision of robotic reality that serves as base for implementing the design exposed in this work of investigation. Then the construction and assembly progresses are enumerated. The report continues talking about installation of devices and acquisition of data. Thence the report presents the experimentation and results that serve of support for the final design and the steps to be followed.

In chapter V the conclusions of the work of investigation and suggested proposals are presented. Also contains categorical appreciations on the result of investigation and establishes the need of putting into effect the design of the robot like a useful tool for providing a prevention culture that allows dealing with and comprehending the importance of submarine nature.

Finally, bibliographic references and attachments are included.

UNIVERSIDAD NACIONAL "PEDRO RUIZ GALLO"
OFICINA CENTRAL DE BIBLIOTECA
PROCESOS TECNICOS
Nº DE INGRESO:
CÓD. DE CLASIFICACIÓN:

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Clasificación de Robots Submarinos 38
Figura 2: Estructura de un ROV 39
Figura 3: ROV de observación 41
Figura 4: ROV de clase trabajo 42
Figura 5: Motor de imán permanente 49
Figura 6: Tubo Bourdon 52
Figura 7: Transistor modo interruptor para panel de led 95
Figura 8: P200 Mini-adaptador (Tenda) 98
Figura 9: Regulador USB 98
Figura 10: Circuito adaptado 1 99
Figura 11: Circuito Adaptado 2 100
Figura 12: Sistema de Comunicación Integrado 101
Figura 13: Conexión Cámara Web - Beaglebone Black 102
Figura 14: Distribución de GPIO's en headers de la tarjeta Beaglebone Black 103
Figura 15: Diseño de cabina en AutoCAD 105
Figura 16: Cabina principal y tapas laterales. 105
Figura 17: Despiece de tapas laterales 105
Figura 18: Estructura para motores de desplazamiento horizontal. 106
Figura 19: Estructura para motor de desplazamiento vertical. 106
Figura 20: Cabina 108
Figura 21: Estructura para los motores 109
Figura 22: Estructura PVC porta-pilas 110
Figura 23: Motores brushless y soportes. 111
Figura 24: Hélices y motores de desplazamiento horizontal 112
Figura 25: Hélice y motor de desplazamiento vertical 112
Figura 26: Vista de abajo del robot 113
Figura 27: Cámara Logitech c920 y estructura de acrílico 114
Figura 28: Paneles de led ensamblados a la estructura de acrílico. 114
Figura 29: Ubicación cámara en la cabina. 115
Figura 30: Circuito adecuado a la tarjeta Beaglebone 116
Figura 31: Circuito de comunicación PLC 116
Figura 32: Electronic Speed Control (ESC's) 117
Figura 33: Piscina para experimentación final 118

Figura 34: Prueba de impermeabilización 121
Figura 35: Prueba de motores 122
Figura 36: Prueba de motores 2 123
Figura 37: Prueba de emersión y sumersión 125
Figura 38: Prueba de desplazamiento horizontal 125
Figura 39: Imagen captada desde la cámara con el robot sumergido 127

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación según su profundidad 44
Tabla 2: Presión Hidrostática en función a la profundidad 66
Tabla 3: Características de los principales elementos de la unidad de control 70
Tabla 4: Evaluación de los principales elementos de la unidad de control 72
Tabla 5: Características de las principales tarjetas basadas en microprocesadores 75
Tabla 6: Evaluación de las principales tarjetas basadas en microprocesadores 78
Tabla 7: Características de los medios de comunicación 81
Tabla 8: Evaluación de los medios de comunicación 82
Tabla 9: Comparación distancia útil Interfaz Ethernet y USB. 84
Tabla 10: Clasificación Hélices 87
Tabla 11: Consumo de elementos del Robot 92
Tabla 12: Características de los principales materiales usados en el diseño de ROV's 94
Tabla 13: GPIO señal PWM a utilizarse 103

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1: Tendencia de la Presión Hidrostática en relación a la Profundidad..... 66

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I **21**
MARCO REFERENCIAL **21**
1.1. Formulación general del proyecto de tesis 23
1.1.1. Planteamiento del problema científico 23
1.1.2. Antecedentes de estudio 26
1.1.3. Justificación e Importancia 30
1.1.4. Alcances del Proyecto 32
1.2. Objetivos 33
1.2.1. Objetivo General 33
1.2.2. Objetivos Específicos 33
CAPÍTULO II **34**
MARCO TEÓRICO **34**
2.1. Robótica Submarina 36
2.1.1. Aplicación 36
2.1.2. Clasificación de los Robots Submarinos 38
2.1.2.1. Clasificación por tamaño 40
2.1.2.2. Clasificación por su profundidad 43
2.1.3. Tamaño en relación a la capacidad sensores/herramientas 44
2.1.4. Estructura general del sistema robótico 45
2.1.4.1. Unidad de control 45
2.1.4.1.1. Microcontrolador PIC 45
2.1.4.1.2. Tarjetas controladores comerciales 45
2.1.4.1.3. Controlador Lógico Programable 46
2.1.4.1.4. Sistema basado en microprocesadores 46
2.1.4.2. Sistema de accionamiento y propulsión 46
2.1.4.2.1. Propulsión & Empuje 47
2.1.4.3. Sistema sensorial 50
2.1.4.3.1. Adquisición de datos 51
2.1.4.4. Sistema de alimentación 53

2.1.4.5. Sistema de comunicación 54
2.1.4.5.1. Comunicación en robótica 54
2.1.4.5.2. Comunicación sub-acuática 55
2.1.4.5.3. Comunicaciones mediante cable eléctrico 56
2.1.4.6. Estructura 57
2.1.5. Reglamento de Transporte de Hidrocarburos por Ductos 58
CAPÍTULO III 63
DESARROLLO DE LA INGENIERÍA 63
3.1. Ingeniería Básica 65
3.1.1. Unidad de control 67
3.1.2.1. Requisitos 68
3.1.2.2. Selección de dispositivo 69
3.1.2. Sistema de comunicación 79
3.1.2.3. Requisitos 80
3.1.2.4. Selección de tecnología 81
3.1.3. Sistema de accionamiento y propulsión 85
3.1.3.1. Requisitos 85
3.1.3.2. Selección del sistema de propulsión 86
3.1.4. Sistema sensorial 88
3.1.4.1. Requisitos 89
3.1.4.2. Selección de sistema de visión 89
3.1.5. Sistema de alimentación 91
3.1.6. Diseño de la estructura exterior 92
3.1.6.1. Requisitos 93
3.1.6.2. Selección de material 94
3.1.7. Elementos adicionales 95
3.2. Ingeniería de Detalle 95
3.2.1. Integración de unidades funcionales 96
3.2.2. Adquisición de datos 102
3.2.3. Diseño de estructura exterior 103
CAPÍTULO IV 107
IMPLEMENTACIÓN 107
4.1. Construcción de estructura exterior 108

4.2. Ensamblaje de motores y hélices. 110
4.3. Instalación de dispositivo de adquisición de datos 113
4.4. Ensamblaje de circuitería 115
4.5. Experimentos y resultados 117
4.5.1. Condiciones experimentales 117
4.5.1.1. Ambiente 117
4.5.1.2. Condiciones externas 118
4.5.2. Experimentación 119
4.5.2.1. Impermeabilidad de la cabina y sistema de alimentación. 119
4.5.2.1.1. Objetivo del experimento 119
4.5.2.1.2. Criterios de éxito. 119
4.5.2.1.3. Experimentos. 119
4.5.2.2. Funcionamiento de motores bajo el agua. 121
4.5.2.2.1. Objetivo del experimento 121
4.5.2.2.2. Criterios de éxito 121
4.5.2.2.3. Experimentos. 121
4.5.2.3. Emergerse, sumergirse y cambiar de dirección. 123
4.5.2.3.1. Objetivo del experimento 123
4.5.2.3.2. Criterios de éxito 123
4.5.2.3.3. Experimentos 124
4.5.2.4. Proporcionar imágenes y video. 126
4.5.2.4.1. Objetivo del experimento 126
4.5.2.4.2. Criterios de éxito 126
4.5.2.4.3. Experimentos. 126
CONCLUSIONES 128
BILIOGRAFÍA 129
REFERENCIAS EN LÍNEA 131

CAPÍTULO 1

MARCO REFERENCIAL

La arrogancia es uno de los rasgos más persistentes en las grandes empresas petroleras. Llegando al punto de caer en el pecado que los antiguos griegos llamaban Hybris, según la cual los hombres inflados de vanidad desafiaban a los dioses. Tanto en la mitología como hoy en día, los que aspiran a superar las leyes de la naturaleza terminan mal. Aproximadamente un año antes del masivo derrame el Golfo de México, en el cual se vertieron 779 000 toneladas de petróleo, el jefe de exploración y producción de British Petroleum (BP), empresa dedicada a la exploración, explotación y comercialización de hidrocarburos, alardeaba "Nosotros no hacemos las cosas simples, estamos preparados para trabajar al límite y manejar los riesgos". En una reseña de BP, en 2009 sobre exploraciones en aguas profundas, se lee: "Estamos excepcionalmente bien situados para mantener nuestro éxito en las aguas profundas del Golfo de México en el largo plazo". Tal era la confianza de BP en que podía extraer petróleo de las profundidades del atlántico que sus ingenieros señalaron que en caso de accidente podrían recuperar una fuga de hasta 250 mil barriles de petróleo diarios. Es decir, un derrame a la escala del accidente del buque Exxon Valdez en el cual se derramaron 257 000 barriles

vertidos en suelo marino, podía neutralizarse en apenas un par de días. Ya se sabe que es más fácil decirlo que hacerlo y en el caso del Golfo de México no fue la excepción. Las estimaciones sobre la magnitud del desastre son materia de estudio, pero hay cierto consenso en que se trató de unos cinco millones de barriles vertidos al océano los cuales constituyen de lejos, uno de los más grandes desastres medio ambientales sufridos en el mundo entero.

La combinación de errores humanos y fallas mecánicas es una condición recurrente en la mayoría de los desastres industriales. Ambos factores se potencian de formas imprevisibles en una cadena que culmina en tragedia.

Cada vez es más frecuente el uso de sistemas robotizados que permitan acceder de forma sencilla a zonas críticas. Para inspecciones, labores de mantenimiento, observación, supervisión o para investigación oceanográfica se utilizan los ROV (Remote Operated Vehicle) dado que permiten realizar operaciones que no están al alcance de los buzos, por limitaciones de profundidad, dificultad de acceso o simplemente por la peligrosidad de las misiones.

1.1. Formulación general del proyecto de tesis:

1.1.1. Planteamiento del problema científico:

Para dar comienzo a la descripción del objeto de estudio, es necesario expresar que en esta parte del trabajo, se hace alusión a diferentes aspectos de la realidad que se concatenan con la problemática que se aborda en este estudio.

El 28 de agosto de 2008, dos grandes vertidos de petróleo alteraron la vida de 69.000 habitantes en Bodo, localidad de la región ogoni, u Ogoniland, del delta del Niger prolongándose durante semanas antes de que los detuvieran.

Como era de esperarse, la compañía Royal Dutch Shell, asumió la responsabilidad del vertido. Según el informe del grupo de investigación conjunta dirigido por la empresa, fue causado por un "fallo de soldadura".

Tres años después, la prolongada falta de medidas de Shell Petroleum Development Company, empresa filial de Shell, para limpiar el petróleo derramado, continuó teniendo consecuencias catastróficas para la comunidad de Bodo. La contaminación en dicho lugar es muy visible: el agua, los manglares y el suelo.

El 7 de diciembre de 2008 se produjo un segundo vertido en Bodo. Se le comunicó a Shell dos días después, el 9 de diciembre. Tanto la comunidad local como el informe del grupo de investigación conjunta atestiguaron que este segundo vertido era mayor que el primero.

Diez semanas más tarde, entre el 19 y el 21 de febrero de 2009, Shell, la Agencia Nacional de Detección y Respuesta a los Vertidos de Petróleo (National Oil Spill Detection and Response Agency, NOSDRA) de Nigeria y la comunidad de Bodo llevaron a cabo una investigación conjunta. Una vez más, Shell manifestó

posteriormente que el vertido había sido causado por una avería debida a la corrosión natural.

El costo humano también se pone de manifiesto con crudeza. La vida de decenas de miles de personas se ha visto afectada directamente por los vertidos y la persistente contaminación. Muchas temen por su salud y no se atreven a comer pescados en la zona ni a beber agua de los canales ni de lluvia, como hacían antes de los vertidos de petróleo.

Las que dependían de la pesca se han quedado sin medios de vida y sin ingresos. Los agricultores aseguran que sus cosechas son más pequeñas que antes. En general, la población de Bodo no puede ya cultivar ni pescar tanto como antes. Con sus medios de vida destruidos y el precio de los alimentos en aumento, muchas personas no tienen medios para conseguir alimentos nutritivos.

Por razones como las anteriores, hay quienes piensan que debe permitirse a la Robótica que sea la guía, "las riquezas minerales del mundo están ocultos debajo de esas olas. La única forma de llegar a ellos es con la robótica" (D. Christ 2014 p. 8). Que sea ella la que devuelva al hombre la manera de cómo pensar de modo globalizante, sintético; que permita abandonar esa forma absolutista que tiene la ciencia actualmente, y, específicamente, la tecnología, por lo que es importante que se adopte el enfoque actual que permita ver los fenómenos de una manera positiva, como anota Henrik Scharfe "La robótica no se trata de reemplazar a los humanos, sino de aprender sobre nosotros mismos". Por lo que debemos prepararnos para poder ver cómo unos hechos de otras realidades, de otros contextos, repercuten en la en todos los demás.

Los Robots Submarinos son un método moderno para la exploración y supervisión en aguas profundas. Los robots tele-operados ROVs (Remotely Operated Vehicles), son muy utilizados en la industria petrolera mundial, y en ellos un operador humano toma las decisiones mediante una comunicación por medio de un cable.

Actualmente, en las operaciones desarrolladas en la industria de petróleo y gas, los ROVs han sido instrumentales en su creciente desarrollo. Tanto es así que cuando se diseña la nueva infraestructura submarina, un requisito importante es permitir el libre funcionamiento del ROV. Desde perforaciones (donde el ROV es usado para supervisar y prevenir explosiones y elevaciones), e incluso en la fase de desmantelamiento, el ROV es la forma más fácil y segura de interactuar con el medio ambiente submarino permitiendo sorprendentes hazañas de la ingeniería y el ingenio.

Desde su desarrollo inicial hasta su forma actual, los ROV han visto muchos cambios y mejoras. Se han vuelto más capaces, llegando más lejos y haciendo frente a una mayor variedad de tareas. También existe hoy en día una mayor gama de vehículos remotamente operados, desde pequeños sistemas portátiles a los grandes sistemas Work-Class sofisticados que funcionan a 1000 pies de los buques abastecedores.

El problema de la contaminación de petróleo en los ambientes marinos ha recibido gran atención en los últimos años y sobre todo en el aspecto de los efectos tóxicos del petróleo derramado. Hay certeza de que los derrames resultantes de las industrias, operaciones de exploración y explotación y de las actividades asociadas, se incrementarán en los años por venir en tanto la demanda del petróleo como principal recurso energético del planeta siga en aumento.

1.1.2. Antecedentes de estudio:

Dentro de los pocos estudios sobre vehículos remotamente operados a los que hemos podido acceder, se encuentra el trabajo de investigación elaborado por Palacios García (2007) "Prototipo de robot acuático explorador", la misma que llega a las siguientes conclusiones:

- El diseño y la construcción del prototipo de robot acuático explorador a prueba de agua no fueron tareas fáciles, debido a la poca experiencia que se tenía en el diseño de este tipo de sistemas y a los recursos limitados con que se contaba.

  Se concluye que el uso de acrílico para la estructura física del robot es adecuado, al menos para aguas poco profundas, además del uso de pegamentos epóxidos y silicones que permiten en conjunto que el robot sea totalmente a prueba de agua.

- Se concluye que para el dispositivo de aire comprimido empleado por el robot, debe reservarse un área de proporciones del orden del 40 % de las dimensiones totales del prototipo.

- Se concluye que el presupuesto y los medios disponibles para la construcción de un prototipo de robot acuático son importantes, su orden es proporcional al equipamiento y materiales empleados durante la construcción. Sin embargo, se puede construir un robot como el nuestro a bajo costo.

- En general, el robot acuático explorador construido en esta tesis tuvo un desempeño exitoso, debido a los resultados obtenidos en los experimentos realizados de cada uno de los comportamientos propuestos para el robot.

El autor teniendo como base el uso de la tarjeta controladora Handyboard y una tarjeta de expansión, la cual es amalgamada a sensores, motores y demás materiales, ha podido desarrollar las competencias, capacidades sensoriales y físicas que es

precisamente lo requiere la robótica contemporánea, que ya no espera de la robótica clásica una simple repetición de los conceptos y de los conocimientos, ya que no permite que los investigadores desarrollen la innovación ni creen ciencia nueva. Con el uso de una tarjeta controladora así como de una tarjeta de expansión, se logra una mejora notable en el rendimiento, siendo entonces un nuevo reto para abordar por los investigadores, por la robótica y la ciencia en general.

Lo que se necesita hoy son investigaciones que desarrollen en los robots competencias, habilidades y técnicas. Porque son ellas las que le van a permitir a la robótica actual enfrentarse con la realidad submarina.

En cuanto a exploración submarina, la tesis perteneciente a Oña Medina & Armijos Galárraga (2011): "Diseño e implementación de un robot submarino controlado por radiofrecuencia para exploración en pequeños estanques de agua dulce", tiene como conclusiones:

- Se implementó un prototipo robótico controlado por radiofrecuencia capaz de desplazarse tanto en la superficie del agua como sumergirse en la misma, mediante elementos disponibles en centros ferreteros.
- Se desarrolló un sistema de propulsión para el prototipo, basado en motores los cuales le permiten desplazarse hacia adelante hacia atrás, así como su desplazamiento hacia la derecha e izquierda, sumergirse y emerger.
- Se instaló una micro-cámara inalámbrica la cual permite captar imágenes cuando el submarino deja la superficie, este elemento es muy importante pues permite tener una visión de lugares en los cuales el hombre no tiene acceso por varios motivos los cuales son captados en un receptor como un televisor.

- Incentivar a los estudiantes el desarrollo de equipos robóticos para su inclusión en ambientes diferentes del terrestre o lugares hostiles para el hombre, ya que la robótica puede abarcar muchos campos y no solo limitarse a la superficie terrestre.

  Gracias a la aplicación de su modelo de robot, basado en radiofrecuencia, el autor consigue – a pesar de usar materiales relativamente de bajo costo - en primer lugar desplazarse en el agua, tanto dentro como fuera de ella, y, en segundo es lugar, como resultado observaron que con la micro-cámara instalada no pudo capturar imágenes, debido a la interferencia en el agua, es por esto que al final realizaron el cableado de esta cámara, esta experimentación es esencial en nuestra investigación ya que uno de los principales objetivos es la transmisión de video en tiempo real.

En la tesis de Moreno Avalos (2013) "Modelado, Control y Diseño de Robots Submarinos de Estructura Paralela con Impulsores Vectorizados" se llega a las siguientes conclusiones.

- La impulsión vectorial representa una alternativa válida como sistema de propulsión. Permite el uso de una menor cantidad de impulsores, esto a su vez tiene consecuencias en el volumen y el costo del robot a medida que una mayor potencia de propulsión es requerida. El empleo de mecanismos seriales o paralelos para controlar la postura del impulsor dependerá en cierta medida del problema de diseño y del criterio del diseñador del sistema.

- En esta tesis se tomó como objeto de estudio el robot Remo 2, cuya estructura paralela representa una gran parte del volumen y esto hace que su análisis sea el más complejo que se pueda tener en los robots de esta categoría. El propósito de

este trabajo de investigación fue explorar los aspectos de mayor relevancia relativos al modelado, control y diseño de robots submarinos con impulsores vectorizados de estructura paralela.

- Una contribución importante de este trabajo fue el planteamiento (y solución) de los problemas cinemáticos y dinámicos inversos para un robot submarino de estructura paralela. Por otro lado se demostró por primera vez el funcionamiento del concepto del robot submarino originalmente presentado en (Yime, 2008). Esto se realizó empleando un potente paquete de simulación cuyas prestaciones han sido validadas por diversas instituciones alrededor del mundo. Haciendo uso de esta herramienta se exploró el desempeño del robot bajo diversos esquemas de control, se encontró que el robot es capaz de ejecutar con éxito maniobras empleando controladores clásicos. Posteriormente se presentó un apartado cuyo propósito es exponer aspectos importantes sobre el diseño de este tipo de robots, sobre todo aquellos que influyen en su desempeño cinetostático. Se plantea el problema del diseño óptimo de un robot tipo Remo II, y se proponen un par de índices de desempeño globales. Otra distribución fue, en condición de coautoría, el diseño y análisis de una nueva estructura paralela la cual no había sido considerada anteriormente en la literatura.

Moreno Avalos, logra con su trabajo unir la estructura y el impulso, y propone soluciones a los problemas de arquitectura que dicho trabajo conlleva. Pues frente a lo asistemático de los robots submarinos y a la desintegración entre lo diseñado y lo implementado; la carencia de una visión global, el diseño deviene en rutinario, monótono y carente de investigación e innovaciones, entonces a pesar de lo anterior y en virtud de la aplicación de su modelo, los autores consiguen demostrar el concepto del robot submarino a través de una herramienta de simulación.

Herramienta que permitió explorar el desempeño del robot bajo diversos esquemas de control y se encontró además que el robot es capaz de ejecutar con éxito diversas maniobras empleando controladores clásicos.

1.1.3. Justificación e Importancia:

Nivel Teórico

La base teórica en la que se sustenta esta investigación, es la teoría de Robert D. Christ que en su libro The ROV Manual, se acerca a nuestro objetivo el cual es producir un amplio panorama de la tecnología ROV, partiendo de sus limitaciones. Y de acuerdo a lo que sostienen muchos de los autores que relacionados con el vertido de petróleo e indignados por el mismo, ponen a prueba el juicio de las grandes empresas a la hora de operar en aguas profundas. Ésta realidad radica en que se concibe la necesidad de preservar el lecho marino y la naturaleza en general, en la relación con las industrias de petróleo y gas en quienes se deposita la confianza de quienes se cree poseen la capacidad para actuar, laborar y obrar con un juicio que nos procure un desarrollo sostenible de los mares y océanos.

Nivel Práctico

En la práctica, las actuales y potenciales aplicaciones de los robots submarinos son tan variadas y diferentes, que es difícil encontrar una definición suficientemente amplia y concreta a la vez de lo que significa la contribución de los robot puestos al servicio, más aún por cuanto la gran diversificación de estas aplicaciones y bajo un sin fin de estrategias (en muchos casos son sistemas o aplicaciones únicas) dificulta su catalogación. Tratando no obstante de

establecer una amplia justificación práctica en estas aplicaciones tanto industriales como no industriales.

Y, así como los recientes estudios de la robótica actual establecen que, en el estudio de los fenómenos, especialmente en el ambiente submarino, alrededor de la empresas petroleras, éstas pierden en muchos de los casos la noción de seguridad al ingresar, al mundo marino que es primordial en pro la conversión del medio ambiente, así también advertir, que al interpretar y criticar los fenómenos sociales, su interpretación y su crítica estará preñada de sus propias desastres en el lecho marino y la alteración del ecosistema en general.

Nivel Social

Décadas atrás, en los laboratorios y centros de investigación dedicados a la robótica, se trató de reanimar la importancia de los robots en nuestra sociedad, tratando de sacarle el máximo provecho a éstos, aplicándolos a aquellas funciones en las que no se buscaba necesariamente una ventaja considerable asociada al momento de ejecutar una determinado labor. En lugar de ello, se plantearon las virtudes que el uso del robot podría tener en tareas en las que el ser humano asumía importantes riesgos o en las que las capacidades de aquel estaban limitadas por factores como la fuerza o la precisión. En la mayor parte de estos casos, los robots deberían desarrollar su trabajo en un entorno no especialmente adaptado a sus características, a priori desconocido, continuamente cambiante y con una importante interacción con zonas de alto riesgo. Puesto que no se trata en muchos de los casos de un uso retributivo, sino más bien, preventivo en el empleo para desarrollar tareas para las personas en las nuevas aplicaciones que el avance de la tecnología conlleva.

Estos esfuerzos por aplicar al robot fuera de las fábricas e incluirlas dentro de campos hostiles e inexplorados, han tenido importantes resultados y son un paso más en la búsqueda de nuevos retos.

1.1.4. Alcances del proyecto:

En lo que se refiere a esta sección, de lo que la presente investigación tratará de alcanzar a cubrir, es contribuir con la industria del petróleo y gas, proveyéndoles de un prototipo básico de un robot con un diseño actual, el cual podrá ser la base para el desarrollo de un proyecto a mayor escala con el objetivo de supervisar, inspeccionar y alertar ante un posible derrame de petróleo en el lecho marino, complementar las acciones correspondientes para el cumplimiento de las exigencias hacia las empresas petroleras, así también despertar el interés en su difusión en los centros de estudio de nuestro medio, considerando que ya en países como los Estados Unidos, Brasil, México y Argentina, aparte de la Unión Europea, ya incentivan la investigación de estos, incluyéndolos dentro de un área en unos casos nuevas y en otras desafiante, cuya enseñanza esté orientada por esta nueva tecnología.

Las limitaciones que los investigadores hemos debido confrontar son de índole variada, en primer lugar la referente a la escasez de bibliografía en el medio en el cual se desarrolla la misma, teniendo que recurrir en la mayoría de los casos a bibliotecas digitales, aquellas por la cual accedimos la información de distintos países eliminando así las barreras de la distancia.

1.2.Objetivos:

1.2.1. Objetivo General:

Diseñar e implementar un prototipo de un vehículo submarino remotamente operado que sirva de base de un robot capaz de realizar tareas de supervisión en las instalaciones submarinas para la industria petrolera, a través de transmisión de video en tiempo real, captura de imágenes y segmentos de video.

1.2.2. Objetivos Específicos:

- Describir los conceptos fundamentales de la morfología, tecnología y equipamiento necesario para desarrollar la ingeniería que sustenta la implementación de un vehículo remotamente operado.

- Desarrolla la ingeniería básica y de detalle de un prototipo de ROV equipado de una cámara de alta definición para la supervisión e inspección de instalaciones sub-acuáticas.

- Definir y programar un conjunto de comportamientos básicos y acciones sobre la estructura del ROV para la etapa de experimentación.

- Idear estrategias que garanticen el muestreo detallado y dirigido que faciliten la experimentación y de esta manera conseguir una adecuada gestión y conservación del lecho marino ante posibles derrames de petróleo.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

Desde siempre, el ser humano ha deseado crear vida artificial, en sus inicios, lo hacían como entretenimiento u ovación a sus dioses, como es el caso de los egipcios, quienes desarrollaban brazos mecánicos para sus estatuas y su operación era atribuida a la inspiración de sus dioses o los griegos quienes construyeron estatuas que operaban con sistemas hidráulicos y se utilizaban para sorprender a los fieles adoradores de sus templos. Más adelante la robótica surge para necesidades más específicas como el reemplazo del ser humano en algunas tareas o llegar a lugares hostiles para el hombre. Empezaron como sistemas robóticos con un sistema de control sencillo de lazo abierto y hoy en día son sistemas avanzados zoomórficos, androides, etc. los cuales utilizan microprocesadores, inteligencia artificial y tecnología desarrollada en la actualidad. Su aplicación es muy amplia, desde los usados para entretenimiento y educación, androides, humanoides, robótica médica

utilizada para cirugías, robots para ambientes submarinos hasta los robots aplicados para procesos industriales. La robótica submarina surge en respuesta a la carencia de información sobre el mundo acuático y la dificultad de exploración por el mismo ser humano. El presente capitulo se desarrollará alrededor de la robótica submarina, definiciones, clasificación, estructuras y principios básicos, así como también leyes que regulan la supervisión submarina de la industria petrolera, todo a ser base del desarrollo de la ingeniería del presente proyecto de tesis.

2.1 Robótica Submarina:

Un robot submarino es un sistema electromecánico que tiene la capacidad de navegar bajo el agua además de por la superficie, gracias a un sistema de flotabilidad variable y un sistema de control autónomo u operado desde la superficie alámbrica o inalámbricamente.

Los robots submarinos nacen a partir de la necesidad del ser humano de conocer el medio sub – acuático para poder utilizarlo en diferentes aplicaciones, como tendidos de cable para comunicaciones, exploración de gas o petróleo, la investigación de especies submarinas o rescate de objetos. El entorno submarino es otro de los ambientes hostiles y arriesgados donde un robot puede aportar importantes ventajas, evitando riesgos a los seres humanos y ampliando la operatividad de las misiones.

2.1.1 Aplicación:

En el campo de la investigación se utiliza robots submarinos ensamblados con cámaras, GPS y sensores para obtener datos de variables necesarias para estudios meteorológicos, biológicos o geológicos, también son usados para la generación de mapas del suelo marino, respuesta a eventos oceanográficos y geotérmicos, supervisión del comportamiento de especies submarinas, entre otros. En el campo militar, los robots son usados para la eliminación de minas submarinas y reconocimiento de rutas y zonas, así como la inspección y supervisión de áreas de interés. En otros campos, son utilizados para la inspección en barcos del casco y los tanques internos, inspección de plantas nucleares, instalación e inspección de cables de comunicación y energía y cuidado de pescaderías submarinas. Una de las más importantes aplicaciones

y en la que enfocaremos el estudio es la industria del petróleo, las empresas petroleras usan estos robots para el estudio del océano y evolución de recursos, construcción y mantenimiento de estructuras submarinas, así como la inspección y supervisión de ductos submarinos de transporte de hidrocarburos o plataformas de perforación, también son usados para la exploración de posibles pozos petroleros. Petrobras, compañía petrolera brasilera, invierte grandes cantidades de dinero en investigación en robótica submarina, apoyados en su centro de investigación (CENPES) y sus convenios con diferentes universidades brasileras. Ingenieros de Petrobras desarrollaron un robot submarino para vigilar la región de la Amazonía en donde Petrobras construyó un gigantesco gasoducto entre las ciudades amazónicas de Coarí y Manaos para verificar que los ríos no fuesen afectados por eventuales derrames de hidrocarburos. Actualmente, Petrobras cuenta con una flota de robots submarinos utilizados para la supervisión e inspección en sus instalaciones submarinas, estos robots tienen incorporadas cámaras de alta de resolución que permiten advertir deficiencias en estructuras o ductos. El CENPES también trabaja en el desarrollo de robots submarinos que puedan ser utilizados en las tareas de exploración en los yacimientos en aguas muy profundas en los que Petrobras descubrió gigantescas reservas que pueden convertir a Brasil en uno de los mayores exportadores mundiales de petróleo.

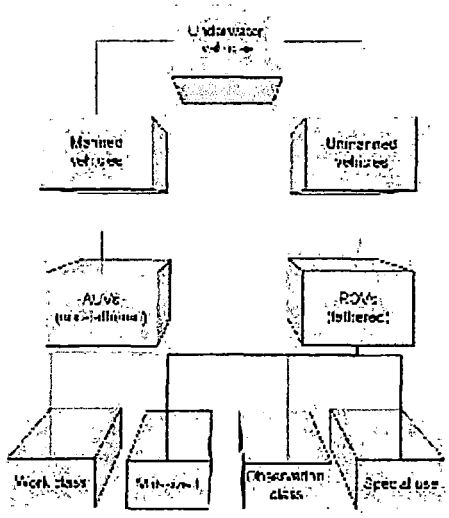
En el Perú, se aprueba un reglamento, que obliga a las empresas de este rubro a cumplir ciertas condiciones para el transporte de hidrocarburos por ductos submarinos, estas empresas son reguladas por OSINERGMIN (Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería), a través del Decreto Supremo N° 081-2007-EM: Reglamento de transporte de Hidrocarburos por

Ductos. Las empresas petroleras ponen hincapié en el cumplimiento de este reglamento debido a las altas multas. Este reglamento será descrito con mayor detalle más adelante.

2.1.2 Clasificación de los Robots Submarinos:

Actualmente, los vehículos submarinos se dividen en dos categorías básicas (Ver Figura 1): Vehículos submarinos tripulados (Manned vehicles) y vehículos submarinos no tripulados (Unmanned vehicles – UUVs). A menudo se utiliza la definición de UUV como sinónimo de vehículos submarinos autónomos (AUV), aunque esa definición no es un estándar en toda la industria.

Figura 1: Clasificación de Robots Submarinos



De acuerdo con el US Navy's UUV Master Plan (edición de 2004, sección 1.3), un "vehículo submarino no tripulado" se define como:

"Sumergible autopropulsado cuyo funcionamiento es o bien totalmente autónomo (pre-programado o control de misión de adaptación en tiempo

real) o bajo mínimo control de supervisión y es sin cables, excepto, posiblemente, para los enlaces de datos, como un cable de fibra óptica."

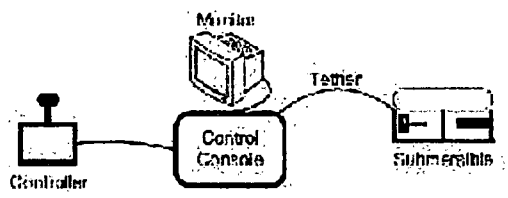
El sobrenombre para un vehículo submarino inalámbrico es el AUV, que está libre de cables y puede funcionar tanto como trayectoria pre-programada o con lógica impulsada.

La diferencia entre AUV y el vehículo operado remotamente (ROV) es la presencia (o ausencia) de un cableado directo (para la comunicación y/o potencia) entre el vehículo y la superficie.

Sin embargo, los AUVs también puede ser (figurativamente) vinculados a la superficie para la comunicación directa a través de un módem acústico, o (mientras en la superficie) a través de un RF (frecuencia de radio) y/o un enlace óptico. El ROV se encuentra dentro una amplia gama de vehículos robóticos móviles generalmente denominados "robots móviles controlados remotamente." El movimiento del vehículo puede ser a través de la dirección lógica autónoma o del control de un operador remoto.

La etapa de potencia del vehículo puede estar incorporada, o fuera (es decir, la alimentación entregada a través del cable umbilical), o un híbrido, en otras palabras tener baterías incorporadas y a la vez ser alimentado desde la superficie. De manera simple, un ROV es una cámara montada en un equipo a prueba de agua, con propulsores para maniobrar, unidas a un cable a la superficie sobre la cual una señal de vídeo (Ver Figura 2).

Figura 2: Estructura de un ROV



A medida que el ROV va desde su forma más simple trabajando a poca profundidad hacia los más complejos vehículos de trabajo en aguas profundas, el grado de sofisticación sube sustancialmente. El ROV tiene una tecnología con normas establecidas, operaciones seguras y un historial comprobado de trabajos en los entornos más "desconocidos, sucios y peligrosos" de las aguas del mundo.

En las siguientes secciones se proporciona una mejor comprensión del alcance de esta definición.

2.1.2.1 Clasificación por tamaño:

Los ROVs pueden ser descritos más específicamente como vehículos submarinos no tripulados tele-operados que nadan libremente. Estos se utilizan en una variedad de aplicaciones desde soporte para buzos hasta construcciones subacuáticas para la marina pesada. El mercado está segmentado sustancialmente en cuatro grandes categorías basadas en el tamaño y la capacidad del vehículo:

a. **ROV de clase observación OCROVs (Observation Class ROV):** Estos vehículos van desde los más pequeños micro-ROVs a otros de un peso vehicular de 100 kg. Estos (Ver Figura 3) son generalmente más pequeños, alimentados por corriente continua, son vehículos eléctricos de bajo costo, usados ya sea como soporte o como sustituto para los buzos en las tareas de inspección en aguas poco profundas.

Los Vehículos en esta clasificación se limitan generalmente a profundidades de menos de 300 metros de agua de mar debido al peso de los componentes que suministran la energía y a la presión en la carcasa de una atmósfera que impone limitaciones sobre el tamaño del vehículo.

Figura 3: ROV de observación

El término más utilizado para los vehículos de esta clasificación es "ROV de bajo costo."

b. ROV de tamaño medio MSROV (Middle-size ROV):

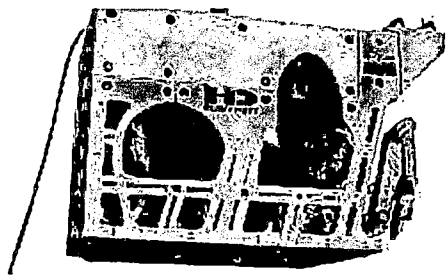
Estos vehículos pesan de 100 kg a un máximo 1.000 kg. Ellos son por lo general una versión con clasificación más profunda que los OCROVs con componentes de suministro de energía con suficiente corriente alterna y carcasas de presión capaces de lograr mayores profundidades sobre longitudes de cables de comunicación más largos. Estos son también generalmente vehículos totalmente eléctricos (accionando motores primarios (propulsores) y controles de movimiento de la cámara) con energía hidráulica para el funcionamiento de los manipuladores.

La potencia eléctrica del vehículo se redujo a una tensión manejable para el funcionamiento de los diversos componentes y puede ser AC o CC. Los vehículos en esta clasificación son a veces conocidos como vehículos de "clase de trabajo ligero" para diferenciar plenamente de OCROVs. Debido al peso de estos vehículos, a menudo se necesita un sistema de lanzamiento y de recuperación así como un sistema de gestión de cable.

c. **ROV de clase de trabajo WCROV (Work class ROVs):**

Los vehículos en esta categoría son generalmente vehículos electromecánicos pesados que se ejecutan en circuitos de alta tensión (mayores a 3000 V) desde la superficie hasta el vehículo (Figura 4).La potencia suministrada al vehículo generalmente se cambia inmediatamente a potencia mecánica (hidráulica) en el vehículo para la locomoción, así como todas las funciones de manipulación y herramientas.

Figura 4: ROV de clase trabajo



d. **ROV de uso especial (Special-use ROV):**

Los vehículos no comprendidos en las categorías principales de los ROV, debido a su naturaleza de no-nadar tales como

vehículos submarinos deslizables, vehículos remolcadores, o vehículos estructuralmente compatibles.

La diferencia principal entre el OCROV y el MSROV es el poder de transmisión y la profundidad. La diferencia principal entre el MSROV y el WCROV es el tamaño de la fuente de energía hidráulica la potencia nominal para el funcionamiento de los manipuladores y herramientas. Tanto el MSROV y la WCROV son vehículos de profundidad nominal y ambos pueden trabajar a profundidad. El WCROV, sin embargo, puede realizar tareas más pesadas que las del MSROV, debido a que el músculo agregado de accionamiento hidráulico de sus componentes (en comparación con el accionamiento eléctrico de la MSROV). Hay unos pocos WCROVs en el mercado, pero la gran mayoría de la población de WCROVs en todo el mundo son del tipo hidráulico debido a la necesidad de potencia y la fiabilidad inherente de los sistemas hidráulicos sobre sus contrapartes eléctricas en el entorno de agua de mar. El trabajo principal de los OCROVs generalmente es funcionar como una plataforma de vídeo en aguas poco profundas. El MSROV tiene capacidades adicionales en aguas profundas junto con de fibra óptica para el rendimiento. El WCROV posee todos los atributos tanto del OCROV como del MSROV junto con manipuladores hidráulicos de gran potencia y capacidades de herramientas.

2.1.2.2 Clasificación por su profundidad:

Las capacidades generales del hombre y máquina para trabajar en el medio marino se encuentran dentro de las limitaciones de profundidad previstas en la tabla 1. En el estado actual de la

tecnología con los sistemas móviles robóticos, el hombre (un buzo) en el medio ambiente será mucho más capaz que una máquina. Esto es debido a la conciencia de la situación proporcionado por el hombre, así como la destreza final del efector terminal (una mano de un hombre y una garra manipuladora para la máquina). Sin embargo, los costos y el peligro de colocar al hombre en el ambiente de trabajo de alta presión de las profundidades del mar son considerables. Dentro de las industrias comerciales, científicas y gubernamentales, más y más clientes están buscando soluciones robóticas a las exigencias mayores para la detección de submarinos e intervención; su objetivo es limitar la exposición de costos y responsabilidades ejercitadas por posibles daños "al hombre".

Tabla 1: Clasificación según su profundidad

Category	Depth Limitation
Air diving	150 ft (60 m)
Mixed gas diving	300 ft (100 m)
Saturation diving	1000 ft (300 m)
Atmospheric diving system	2500 ft (700 m)
OCROV	1000 ft (300 m)
MSROV	>5000 ft (>1500 m)
WCROV	>10,000 ft (>3000 m)

2.1.3 Tamaño en relación a la capacidad sensores/herramientas:

La pregunta entonces es: "¿Qué tan grande necesita ser el vehículo a fin de acomodar eficazmente los sensores y herramientas?". En general, cualquier ROV puede llevar a bordo cualquier sensor o herramientas, todo lo que se necesita es colocar suficiente flotación a bordo del vehículo para compensar el peso en agua de la carga útil. El tamaño del vehículo entonces tiene que variar para acomodar de manera óptima el motor primario (propulsores),

herramientas, y sensores al tiempo que la alimentación de estos elementos sea suficiente.

2.1.4 Estructura general del sistema robótico:

2.1.4.1 Unidad de control:

La unidad de control es el cerebro del ROV, es donde se procesa la información. Esta unidad determina los movimientos precisos de cada parte de la estructura para que el elemento terminal pueda ser movido a la posición y orientación requeridas. Puede tratarse de un PLC (Programmable Logic Controller), un microcontrolador en los modelos menos avanzados o de un sistema basado en microprocesadores en los más avanzados. A continuación se detalla brevemente los dispositivos que pueden conformar la unidad de control.

2.1.4.1.1 Microcontrolador PIC:

Un microcontrolador es un circuito integrado de alta escala de integración que incorpora la mayor parte de los elementos que configuran un controlador. Es un elemento muy común como unidad de control para la enseñanza de la robótica, es muy usado para el diseño de robots para concursos como seguidor de línea, robots sumos o warbots.

2.1.4.1.2 Tarjetas controladores comerciales:

Cuando describimos a este tipo de tarjetas nos referimos a un microcontrolador de alta gama más dispositivos adicionales que le permitirán trabajar en interfaz con una computadora o algún otro dispositivo. Este tipo de tarjetas cuenta con un entorno de desarrollo, están diseñadas para facilitar el uso de la electrónica en proyectos multidisciplinares. Entre las más conocidas están las tarjetas Arduino y Pingüino.

2.1.4.1.3 Controlador Lógico Programable:

Un PLC es una computadora utilizada en el campo de la ingeniería de automatización industrial, para automatizar procesos electromecánicos, tales como el control de la un nivel en un tanque o el accionamiento de una bomba de carga. Los PLC son usados mayormente en procesos de mayor nivel, como la robótica industrial.

2.1.4.1.4 Sistema basado en microprocesadores:

Un microprocesador es la parte de una computadora diseñada para llevar acabo o ejecutar los programas, entiéndase como computadora no solo a una laptop o desktop, sino a cualquier sistema inteligente. El microprocesador es el cerebro , el motor, el corazón del sistema. En la actualidad podemos encontrar tarjetas basadas en un sistema con microprocesadores, estas tarjetas son esencialmente una mini-computadora, cuentan con diferentes interfaces y un sistema operativo.

2.1.4.2 Sistema de accionamiento y propulsión:

Como una parte de cualquier sistema robótico móvil, algunos medios de locomoción son necesarios con el fin de mover el sistema robótico. En la tecnología ROV de nado libre, gobiernan los propulsores. Los propulsores son de diseño importante para cualquier sistema ROV. Sin el empuje adecuado el vehículo puede ser agobiado por las condiciones ambientales y por lo tanto incapaces de realizar las tareas deseadas. En esta sección se abordarán los fundamentos del diseño del propulsor y la colocación en el vehículo. La sección final se discutirá la cuestión general de qué tipo de propulsor se elegirá (eléctrico o hidráulico), y en última instancia que tipo de vehículo (todo eléctrico, todo hidráulico, o una combinación) debe ser elegido para el trabajo.

2.1.4.2.1 Propulsión & Empuje:

El sistema de propulsión tiene impacto significativo en el diseño del vehículo. Los tipos de propulsores, su configuración, y la fuente de energía para impulsar los llevan normalmente a ser prioridad sobre muchos de los otros componentes.

a. Sistemas de Propulsión

Los sistemas de propulsión del ROV vienen en tres tipos diferentes: hélice accionada eléctricamente, hélice de accionamiento hidráulico, y (rara vez) de propulsión a chorro canalizado (impulsados eléctricamente o hidráulicamente). Estos diferentes tipos se han desarrollado para adaptarse al tamaño del vehículo y tipo de trabajo. En algunos casos, la ubicación real del trabajo ha determinado el tipo de propulsión. Por ejemplo, si el vehículo opera en profundidades menores casi en la superficie, lo que podría ser utilizado un sistema de impulsor de chorro, este sistema es apropiado para los vehículos de tamaño más pequeños. Si el vehículo requiere de herramientas de trabajo pesado para la intervención, el vehículo podría funcionar con el sistema hidráulico (incluyendo el poder propulsor), este sistema comúnmente es usado en los MSROVs hasta los WCROVs. El ROV de clase observación cambia a los sistemas de clase de trabajos pesados, en la mayoría de los casos, los sistemas de propulsión también cambian de eléctrica a hidráulica.

La fuerza impulsora en el área de sistemas de propulsión es el deseo de los operadores de ROV para extender el funcionamiento de equipos. Otra preocupación es la fiabilidad del sistema de propulsión y de sus

subcomponentes asociados. En el desarrollo inicial del ROV, una práctica general era reemplazar y volver a montar las unidades de motor eléctrico cada 50 - 100 horas de funcionamiento. Esto aumentó el inventario de las piezas necesarias y las posibilidades de errores por los técnicos en volver a montar los motores. Por lo tanto, invertir en un diseño fiable desde el principio puede ahorrar tiempo y dinero. El sistema de propulsión tiene que tener un balance entre lo que el ROV requiera para el cumplimiento de una tarea de trabajo y sus dimensiones prácticas. Por lo general, cuanto más poder se requiere en un sistema de propulsión, más pesado es el ROV.

b. Clasificación de los motores

I. Motor Eléctrico

Los motores eléctricos vienen en muchas formas, tamaños y tecnologías, cada uno diseñado para diferentes funciones. Por el momento, el motor con hélice más común en los sistemas de ROV clase de observación es el motor de corriente continua, debido a su poder, disponibilidad, variedad, fiabilidad y facilidad de la interfaz. El motor de corriente continua, sin embargo, tiene algunas dificultades de costo, diseño y operacionales. Los factores que hacen menos que perfecto para esta aplicación incluyen:

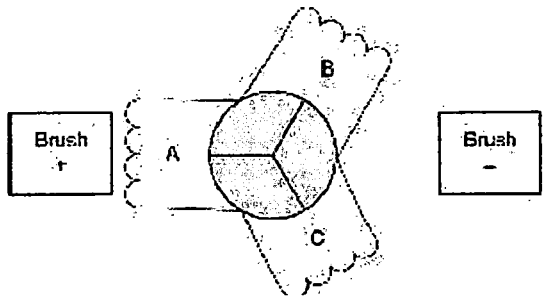
- La velocidad óptima del motor es mucho mayor que la velocidad de rotación de la hélice normal en-agua, por lo que requiere engranaje para obtener la velocidad de operación más eficiente.

- Motores de corriente continua consumen una gran cantidad de corriente.
- Se requiere un esquema de control de motor de modulación de ancho de pulso bastante complejo para obtener operaciones precisas.

II. Motores DC de imanes permanentes:

Según Clark y Owings (2003), el motor de corriente continua de imán permanente tiene, dentro del mecanismo, dos imanes permanentes que proporcionan un campo magnético dentro de la cual la armadura gira. La parte central de rotación del motor (la armadura) tiene un número impar de polos-cada uno de ellos tiene su propio bobinado (Figura 5). El devanado está conectado a una almohadilla de contacto en el eje de centro llamado el "conmutador". Escobillas unidas a los cables (+) y (-) del motor conectado a los devanados de tal manera que uno de los polos será repelido por el imán permanente más cercano y el otro devanado será atraído a otro polo. Como la armadura gira, los cambios del conmutador, la determinan que devanado consigue que polaridad del campo magnético. Una armadura siempre tiene un número impar de polos, y esto asegura que los polos de la armadura nunca puedan alinearse con su imán opuesto en el motor, lo que detendría todo movimiento.

Figura 5: Motor de imán permanente



III. Motores DC Brushless (sin escobillas):

Para motores de corriente continua sin escobillas, se utiliza un sensor para determinar la posición de la armadura. La entrada desde el sensor activa un circuito externo que invierte la polaridad de la corriente de alimentación adecuadamente. Los motores sin escobillas tienen una serie de ventajas que incluyen una vida más larga de servicio, menos ruido operativo (desde un punto de vista eléctrico), y, en algunos casos, una mayor eficiencia. Los motores de corriente continua sin escobillas de hoy, con electrónica de control integrada, se han utilizado para alinear propulsores eficientemente y altamente confiables.

2.1.4.3 Sistema sensorial:

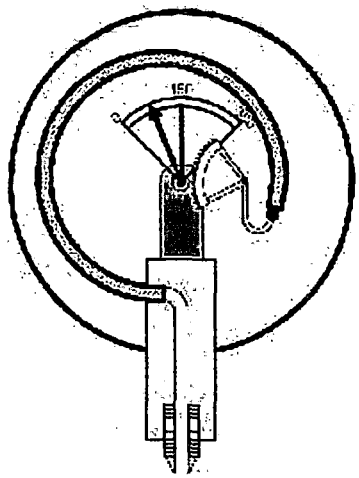
Desde el comienzo del nuevo milenio, enormes saltos hacia adelante en la tecnología de sensores se han logrado a través de los dominios de la ciencia y la industria. Desde los primeros días del sencillo termómetro de mercurio a la evolución posterior del tubo de Bourdon hasta los modernos sensores macro y nano-escala del nuevo siglo, se han utilizado fenómenos físicos para detectar y convertir las medidas en información perceptible por los humanos u otras máquinas para nuevas medidas. Los sensores están por todas partes en nuestras vidas. En nuestros hogares, los circuitos de los sensores de temperatura con retroalimentación directa a los elementos que controlan nuestro sistema de calefacción, refrigeración, así como los aparatos de cocina, sensores ópticos y de presión se utilizan en nuestros sistemas de seguridad, sensores acústicos para nuestros teléfonos, sensores de tensión/ corriente para la seguridad eléctrica, y otros. En nuestros autos,

las ruedas vehículo (con el uso de diversas tecnologías) se convierten en contadores para cronometrar la velocidad nuestro vehículo (y la policía utilizan sensores ópticos y de radiofrecuencia para cronometrar nuestra velocidad también...), Sensores ópticos encender/apagar de los faros, presión/ temperatura/nivel de líquido/tacómetro/etc. parámetros de funcionamiento de motor sensorial. Barcos, plantas de energía, aviones, vehículos espaciales y especialmente vehículos bajo el agua hacen un amplio uso de la tecnología de sensores para la operación de la maquinaria que utilizamos todos los días en el mundo moderno. La gran variedad de cámaras para sistemas de video-vigilancia también entran en esta definición, ya que nos permiten supervisar e inspeccionar lugares o zonas remotas, desde una sala de control o incluso desde un celular. La tecnología de sensores es un organismo amplio y diverso de conocimiento que está avanzando rápidamente en cuanto a su alcance y profundidad.

2.1.4.3.1 Adquisición de datos:

A los propósitos de esta tesis, el término "sensor" tratará de los mecanismos que detectan parámetros físicos y luego convierte sus mediciones en señales eléctricas (a diferencia de los sistemas de visión pasiva simples, tales como el termómetro de mercurio o el tubo de Bourdon, se muestra en la Figura 6.

Figura 6: Tubo Bourdon



Una gran cantidad de tecnologías de sensores se puede emplear para llegar a la misma conclusión con respecto a un determinado fenómeno físico (por ejemplo, la temperatura es la simple medición de la excitación molecular, pero se puede medir a través de termistor, la presión del fluido, acopladores térmicos, o detector de temperatura resistiva (RTD)).

Por ejemplo, los RTD son sensores utilizados para medir la temperatura mediante la correlación de la resistencia del elemento con la temperatura. Siguiendo este ejemplo, varias tecnologías para detectar la temperatura son sensibles/precisos sólo dentro de ciertos rangos. Además, la salida del sensor tiene una gran cantidad de cuestiones involucradas antes de que un uso lógico y práctico de esa salida puede ser empleada. Un ejemplo de una salida precisa pero inutilizable del sensor sería un sensor de temperatura ambiente de agua montado en una bomba hidráulica de alta presión a bordo de un ROV -el sensor podría medir con precisión la temperatura del agua que rodea la bomba, pero indicaría una temperatura (con toda probabilidad) mayor que la temperatura ambiente debido al calor generado por la bomba.

El sensor perfecto tiene las siguientes características:

- ✓ El sensor detecta sólo el fenómeno físico deseado.
- ✓ El sensor es insensible a otros factores ambientales o físicos.
- ✓ El sensor no influye en el elemento que se está midiendo.

2.1.4.4 Sistema de alimentación:

En un sistema de alimentación-superficial en el ROV, la energía llega al vehículo a partir de una fuente de energía en la superficie. La potencia de la superficie puede estar en cualquier forma de energía básica en la orilla (por ejemplo, 110 VCA 60 Hz o 220 VAC 50 Hz, que es estándar para la mayoría de los consumidores en todo el mundo) a 480 VAC (50 o 60 Hz) a una fuente de corriente continua de baterías. Para un sistema ROV-clase de observación, que se ejecuta en la corriente continua en el vehículo, la fuente de CA está primero rectificado a CC (ya sea en la superficie o en la primera llegada en el vehículo) y se envía a los componentes de los sumergibles para su distribución a los propulsores. La ubicación del sistema controlador y distribución puede variar entre los fabricantes y puede ser en cualquier lugar a partir de la estación de control de la superficie, dentro de la cabina electrónica del sumergible o dentro de la unidad propulsora.

El propósito de esta fuente de energía es la entrega de potencia suficiente para accionar el propulsor a través de su tarea de trabajo. Para los ROVs de tamaño medio y de la clase de trabajo (MSROV y WCROV), el poder es convertido en la superficie a una forma apropiada para la longitud del umbilical(típicamente 3000 VAC o mayor) y luego se envía al vehículo. Típicamente, el fabricante del vehículo decide sobre la capacidad de

profundidad y diseña el sistema eléctrico del vehículo para ajustarse a la longitud del cable umbilical. La mayoría de los sensores del vehículo funcionan con corriente continua de baja tensión; por lo tanto, un rectificador debe estar en algún lugar del circuito. Los ROVs en aguas profundas (MSROV o WCROV) funcionan con alimentación de AC de alta tensión por el cable umbilical. La mayoría de MSROVs tienen un transformador reductor que alimenta los componentes y al ROV a la tensión más baja. Algunos propulsores eléctricos están diseñados para funcionar con corriente alterna, mientras que otros funcionan con corriente continua (que determina la ubicación del rectificador). A partir de ahí, múltiples circuitos de alimentación son diseñados en función de las necesidades de los componentes. El circuito propulsor es normalmente en un circuito separado compatible a las necesidades de los propulsores eléctricos. En los vehículos hidráulicos, es simplemente las luces, sensores/electrónica, y la bomba.

2.1.4.5 Sistema de comunicación:

Existe una multitud de aplicaciones basadas en robots en las que se hace necesario el intercambio de información entre distintos elementos, por ejemplo, la comunicación hacia su estación de operación. En esta sección abordaremos de forma general los diversos sistemas de comunicación en robots y nos enfocaremos en el intercambio de información entre robots submarinos y sus estaciones.

2.1.4.5.1 Comunicación en robótica:

Una característica importante de la robótica es la comunicación entre el robot y su estación de operación remota. Hay que pensar entonces en las comunicaciones que este sistema necesita establecer con el exterior (puede

ser con una computadora, tablet o un celular). Está también la posibilidad de que el robot necesite intercomunicarse con otros circuitos, centrales de carga de energía, sistemas para el posicionamiento, etc. Al hablar de comunicación en robótica lo primero que se piensa es en comunicaciones inalámbricas o alámbricas (mediante un cable). La comunicación alámbrica de un sistema robótico se realiza mediante un cable umbilical por el cual se transporta la información recogida por el robot hacia la estación base y al mismo tiempo se envían los comandos de operación u otra información necesaria, una desventaja relevante de este tipo de comunicación es que el cable usado dificulta en cierto grado la movilidad del robot y es factor de posibles enredos u obstrucciones durante el funcionamiento. Cuando nos referimos a comunicaciones inalámbricas, estamos acostumbrados a escuchar hablar sobre radio frecuencia, sin embargo existen otros tipos de comunicaciones como las comunicaciones ópticas y acústicas.

2.1.4.5.2 Comunicación sub-acuática:

La comunicación con submarinos es una materia poco estudiada que está tomando mayor importancia en estos últimos años debido a la creciente necesidad de obtener información del fondo marino para diferentes aplicaciones. La comunicación inalámbrica es muy complicada debido a que las ondas de radio no viajan bien a través de conductores eléctricos gruesos como el agua, las ondas electromagnéticas son atenuadas en distinta medida por diferentes materiales, dependiendo de la frecuencia de las mismas. Actualmente, las aplicaciones se basan en sistemas acústicos debido a que las ondas acústicas se adaptan mejor al medio, aunque por las características de este tipo de ondas, presenta limitaciones importantes como que al utilizar

las frecuencias bajas es la falta de ancho de banda para transmitir datos a alta velocidad. Para trabajar con anchos de banda mayores, la mejor técnica sería utilizar señales ópticas, para establecer la comunicación entre los nodos. Sin embargo, se deben considerar varios factores muy limitantes. El principal problema que presenta este método es las distancias máximas entre nodos, además de ser una tecnología muy sensible a la turbidez y a la presencia de partículas en suspensión. Cuando necesitamos transmitir mayor ancho de banda, por ejemplo, para la transmisión de video, debemos recurrir al uso de radiofrecuencia. La comunicación por cable en robots submarino es la alternativa más viable cuando se quiere transmitir mayores anchos de bandas, el mayor problema es la cantidad de cables que este sistema necesitaría lo cual repercutiría en la maniobrabilidad y en la libertad de movimiento del robot. En este punto es donde nos centramos en una tecnología que facilitaría usar solo dos cables para transmitir una mayor cantidad de información a altas tasas de transferencias, es la tecnología Comunicación mediante cable eléctrico (Power-line Comunication (PLC)), la cual detallaremos en el siguiente punto.

2.1.4.5.3 Comunicaciones mediante cable eléctrico:

Esta tecnología consiste en utilizar las líneas de distribución eléctricas para la transmisión de información. La tecnología PLC aprovecha la red eléctrica para convertirla en una línea digital de alta velocidad de transmisión de datos, permitiendo, entre otras cosas, el acceso a Internet mediante banda ancha. Funciona por una diferencia de frecuencias es decir, las redes normalmente pueden transmitir señales regulares de baja frecuencia en 50 o 60 Hz y señales mucho más altas, sobre 1 MHz sin que ambas frecuencias se

molesten entre sí, ya que las de baja frecuencia llevan energía mientras que las de alta frecuencia llevan los datos. La tecnología PLC tiene importantes ventajas, tales como que permite utilizar la infraestructura de la red eléctrica ya existente, esto se refleja en los costos de implementación. Por otro lado, esta tecnología no ha madurado en su totalidad, debido a que tiene escasa competencia tecnológica y debido a la falta de producción de equipos necesarios y la ausencia de estándares tecnológicos para la interoperabilidad de equipos.

En el caso de cableado para redes caseras, los dispositivos PLC se utilizan como sustitutivos de las redes Ethernet. Concretamente, el uso de varios dispositivos PLC equivale a una conexión Ethernet con medio de acceso compartido, esto es, es como si estuviéramos conectando los ordenadores a un concentrador en vez de a un conmutador, por lo que las comunicaciones son half-duplex. De aquí, se deduce que los anunciados 200Mbps de muchos kits de PLC terminen en torno a los 80-100Mbps efectivos.

2.1.4.6 Estructura:

La forma de la estructura del vehículo afecta directamente a su hidrodinámica. Vehículos largos y delgados por lo general tienen características inferiores de fricción a velocidades más altas. Los vehículos pequeños tienen mucho mejores capacidades de estacionamiento junto con una mayor capacidad de maniobra en los tres ejes de desplazamiento (x/y/z), pero tienen perfiles de arrastre mucho más altos cuando la velocidad aumenta. Los AUVs típicamente exhiben la forma clásica de torpedo con un mínimo de propulsores acoplados con aletas de control para viajes de larga distancia a velocidades más altas. El ROV se utiliza típicamente en tareas de

mantenimiento (u observación a baja velocidad) para inspección cercana y/o el sensado. Los AUVs tienen típicamente una estructura cerrada para el flujo de fluido ininterrumpido sobre el vehículo (para la mínima resistencia a velocidades más altas) mientras que los ROV típicamente tienen una estructura abierta para permitir el flujo de fluido a través de su estructura debido a un mayor número de propulsores montados internamente.

2.1.5 Reglamento de Transporte de Hidrocarburos por Ductos:

Mediante el Decreto Supremo N° 081-2007-EM se aprueba el Reglamento de Transporte de Hidrocarburos por Ductos, este reglamento establece las normas que las empresas del sector petrolero deben considerar y aplicar en sus instalaciones utilizadas para el transporte de hidrocarburos. Este reglamento contiene nueve títulos cada uno con sus respectivos artículos y las disposiciones complementarias (Anexos), los cuales se detallan a continuación:

REGLAMENTO DE TRANSPORTE DE

HIDROCARBUROS POR DUCTOS

- ✓ TÍTULO I: Disposiciones Generales (Art. 1 al 6.)
- ✓ TÍTULO II: Concesión De Transporte (Art. 7 al 58)
- ✓ TÍTULO III: Servicio de Transporte (Art. 59 al 77)
- ✓ TÍTULO IV: Ductos (Art. 78 al 93)
- ✓ TÍTULO V: Uso de Bienes Públicos y de Terceros (Art. 94 al 112)
- ✓ TÍTULO VI: Tarifas para el Transporte de Gas Natural (Art. 113 al 148)
- ✓ TÍTULO VII: Tarifa para el Transporte de Hidrocarburos Líquidos (Art. 149 al 150)
- ✓ TÍTULO VIII: Solución de Conflictos (Art. 151 al 153)

- ✓ TÍTULO IX: Protección Ambiental (Art. 154 al 156)
- ✓ ANEXO 1: Normas de Seguridad para el Transporte de Hidrocarburos por Ductos (Art. 1 al 92)
- ✓ ANEXO 2: Sistema de Integridad de Ductos (Art. 1 al 26)
- ✓ ANEXO 3: Diagramas
- ✓ ANEXO 4: Procedimiento para Control de Emergencias

En general, este reglamento nos proporciona normas y demás disposiciones para asegurar el funcionamiento adecuado de los ductos para el transporte de hidrocarburo de las empresas involucradas, de esta manera tratar de evitar accidentes, derrames de petróleo, explosiones, y contaminación. El reglamento obliga a las empresas de este rubro a cumplir exigentes medidas de seguridad y prevención, siendo OSINERGMIN (Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería), la institución pública encargada de la supervisión y fiscalización del cumplimiento de este reglamento. Como sustentación del presente proyecto, nos enfocaremos en los artículos que detallan la necesidad de inspeccionar y supervisar antes y después de la construcción un ducto submarino y en un continuo programa de supervisión. De acuerdo a esto, vamos a analizar los Anexos 1 y 2, el primero con el siguiente contenido:

ANEXO 1

NORMAS DE SEGURIDAD PARA EL TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS POR DUCTOS

- ✓ TÍTULO I: DISPOSICIONES GENERALES
- ✓ TÍTULO II: DISEÑO
- ✓ TÍTULO III: CONSTRUCCIÓN

Capítulo Primero: Requisitos Generales

Capítulo Segundo: Actividades en el Derecho de Vía

Capítulo Tercero: Supervisión e Inspección

Capítulo Cuarto: Soldadura de tuberías y Pruebas No Destructivas

Capítulo Quinto: Pruebas de Presión

Capítulo Sexto: Documentación de obra

- ✓ TÍTULO IV: CONTROL DE CORROSIÓN
- ✓ TÍTULO V: PRECOMISIONAMIENTO Y COMISIONAMIENTO
- ✓ TÍTULO VI: OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO
- ✓ TÍTULO VII: SEGURIDAD INDUSTRIAL Y SALUD OCUPACIONAL
- ✓ TÍTULO VIII: ABANDONO
- ✓ TÍTULO IX: REGISTROS
- ✓ TÍTULO X: NORMAS COMPLEMENTARIAS DISPOSICIÓN COMPLEMENTARIA

Según este reglamento, en el Título III, Capítulo Tercero, mediante el artículo Nº 44, obliga a las empresas petroleras o encargadas de la construcción del ducto a una supervisión e inspección directa antes, durante y después de la construcción, para asegurar la buena calidad del material, la correcta construcción de las instalaciones, el proceso de soldadura, el ensamblaje y las pruebas. La información recopilada debe ser obligatoriamente presentada a OSINERGMIN. En el caso de las líneas submarinas, esta inspección y supervisión comúnmente es realizada mediante la contratación de buzos. En el Título IV, artículos Nº 54

al 59, OSINERGMIN solicita el control de corrosión de la tubería, tanto interna como externamente, exige la protección y revestimiento de las líneas. El Título VI, sobre operación y mantenimiento, requiere un programa de mantenimiento y monitoreo de la líneas lo cual es realizado en la mayoría de los casos, por costosos raspa-tubos inteligentes, también solicita estudios técnicos para operar a máxima presión, evaluación e inspección de tuberías, así como la inmediata información de situaciones de riesgo, estos programas y estudios deben ser obligatoriamente presentados ante OSGINERGMIN, y cada año la empresa deberá presentar resultados de los programas de mantenimiento y monitoreo ejecutados. El título VII, sobre seguridad industrial y salud ocupacional obliga a la elaboración de un manual de seguridad y un plan de contingencias, donde exige como actividad para disminuir los riesgos, la inspección y evaluación de las áreas sujetas a derrumbes y Programas de monitoreo del movimiento de tuberías o del suelo.

A continuación, se detalla el contenido del Anexo 2:

ANEXO 2

SISTEMA DE INTEGRIDAD DE DUCTOS

- ✓ TÍTULO I: DISPOSICIONES GENERALES
- ✓ TÍTULO II: DESCRIPCIÓN GENERAL

  Capítulo Primero: Alcances de la Gestión de Integridad de Ductos

  Capítulo Segundo: Responsabilidades

- ✓ TÍTULO III: GESTIÓN DE INTEGRIDAD DE DUCTOS

  Capítulo Primero: Registros

Capítulo Segundo: Competencia y Capacitación

Capítulo Tercero: Manejo de cambios

- ✓ TÍTULO IV: MANEJO DEL SISTEMA DE INTEGRIDAD DE DUCTOS

Capítulo Primero: Planes y Programas

Capítulo Segundo: Inspección, pruebas, patrullaje y monitoreo

Capítulo Tercero: Auditoria del Programa de Integridad de Ductos

- ✓ TÍTULO V: Rol de OSINERGMIN
- ✓ TÍTULO VI: Determinación de Áreas de Alta Consecuencia

El Anexo 2, trata sobre el desarrollo de un sistema de integridad de ductos, en sus artículos se refiere a registros de diseño, construcción, operación, mantenimiento, seguridad y ambiente del ducto, planes y programas para las actividades relacionadas con el sistema de integridad de ductos y demás consideraciones para un sistema de integridad de ductos.

CAPÍTULO III

DESARROLLO DE LA INGENIERÍA

Parte primordial de un proyecto de robótica es, sin duda, el desarrollo de los conceptos básicos de ingeniería que permiten sustentar la implementación. El presente capitulo tiene como objetivo detallar los elementos que cumplan los requisitos y los cálculos necesarios, así como la selección de los dispositivos de acuerdo a las condiciones planteadas, con la finalidad de materializar un prototipo de vehículo remotamente operado para la supervisión en la industria petrolera, basándonos en los conceptos fundamentales descritos en el capítulo anterior.

Todos los robots son sistemas, es decir, constan de componentes que forman un todo. El sistema robótico está compuesto por diferentes unidades de acuerdo a la aplicación, donde cada unidad funcional realiza una función específica. Como se expuso en el capítulo anterior, los robots tienen, por lo general, las siguientes unidades funcionales principales:

- Unidad de control (controlador)

- Sistema de accionamiento (actuadores)
- Sistema sensorial (sensores)
- Sistema de Alimentación

La unidad de control gobierna las acciones a realizar. Este gobierno debe cumplir ciertos criterios u objetivos del control como la estabilización ante perturbaciones, o la evolución temporal y el comportamiento dinámico óptimo respecto a determinados parámetros de calidad. Los avances en el campo de la inteligencia artificial permiten dotar a estas unidades de aspectos más avanzados como la toma de decisiones o el aprendizaje.

En el sistema de accionamiento se encuentran los actuadores quienes realizan las acciones programadas bajo la supervisión de la unidad de control. La coordinación entre ambos componentes mediante el intercambio de información es lo que permite conseguir la correcta realización de las tareas.

También, se identifica el sistema sensorial como un componente más en un sistema robótico, compuesto por los sensores que recogen información acerca del estado del propio robot y de su entorno, este sistema es esencial dependiendo de la aplicación del robot.

Para lograr el total entendimiento del lector, hemos divido este capítulo en dos temas claves: Ingeniería básica, donde se detallaran todos los requerimientos y se procederá a la selección de componentes e Ingeniería de detalle, donde nos centraremos en el diseño, elaboración de planos, circuitos, así como la integración de los componentes de nuestro sistema robótico.

3.1. Ingeniería Básica:

En este subcapítulo se establecerán los requerimientos necesarios para que las unidades funcionales sean capaces de alcanzar el funcionamiento esperado, de este modo, cumplir con los objetivos establecidos en el capítulo I. De la misma manera, también se evaluaran las diferentes opciones por las que pueden ser conformadas y en consecuencia, se seleccionará la opción más conveniente, basándonos en las condiciones propuestas.

Para alcanzar el propósito de esta sección necesitamos estudiar algunas consideraciones generales respecto al medio-acuático.

Uno de los aspectos a considerar es que el hecho de que un vehículo pueda flotar en un medio acuático se debe a un fenómeno físico, este es el Principio de Pascal el cual se introduce en el capítulo II.

Si aplicamos el principio de pascal a un ROV entonces sobre cada punto de la carcasa del robot estando sumergido, el agua ejercerá una presión perpendicular a la superficie de la carcasa en dicho punto, esta presión, es la presión hidrostática, detallada en el capítulo II. La suma vectorial de las presiones hidrostáticas en todos los puntos es igual a la fuerza F, que es aplicada a un punto interior de la estructura del robot llamado "Centro de flotabilidad", dicha resultante, cuya dirección es hacia la superficie del agua, indica que en virtud del Principio de Pascal, el submarino tiende a subir hacia la superficie y en dirección perpendicular a ella.

Para hacer un análisis de la presión hidrostática, hemos elaborado una gráfica donde mostramos el comportamiento de la presión de acuerdo a la profundidad en la que se sumergiría el robot, para este caso, establecemos el rango de 10 a 50 metros de profundidad.

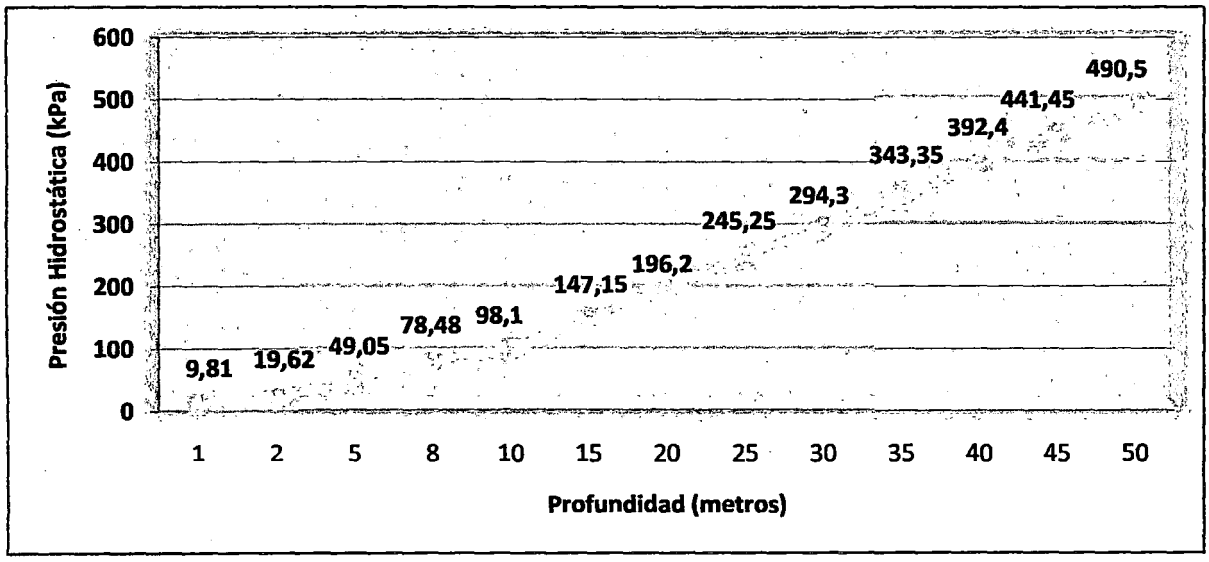
Tabla 2: Presión Hidrostática en función a la profundidad

h (metros)	Ph(kPa)	Ph(Kg/cm²)
1	9,81	0,10003416
2	19,62	0,20006832
5	49,05	0,5001708
8	78,48	0,80027328
10	98,1	1,0003416
15	147,15	1,50051241
20	196,2	2,00068321
25	245,25	2,50085401
30	294,3	3,00102481
35	343,35	3,50119562
40	392,4	4,00136642
45	441,45	4,50153722
50	490,5	5,00170802

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la Tabla 2, se representa la siguiente gráfica:

Gráfica 1: Tendencia de la Presión Hidrostática en relación a la Profundidad



Fuente: Elaboración propia.

Como vemos el comportamiento de la presión es de forma ascendente, lo que explica que cuanto más profundidad sea alcanzada por el robot tendremos una presión hidrostática mayor ejercida sobre la estructura del ROV. Esto puede afectar al robot en

diferentes aspectos, es por esto que este factor se debe tener muy en cuenta en el desarrollo del presente capítulo.

Otro aspecto bastante importante a tener en cuenta es la profundidad a la que comúnmente se encuentran las instalaciones petrolíferas submarinas. En el mundo existen plataformas petroleras que operan hasta 2438 metros de profundidad siendo la plataforma *"Perdido"* la estructura que a más profundidad opera en la actualidad, esta plataforma pertenece a Shell y se encuentra en el golfo de México. En el Perú, no encontramos profundidades muy grandes, por ejemplo Savia tiene una plataforma que opera entre 100 a 120 metros, PetroPerú en Talara cuenta con instalaciones para recepción y transporte de crudo por buques, esta instalación se encuentra a una profundidad menor de 20 metros. Siendo nuestro proyecto de tesis un prototipo que eventualmente servirá de apoyo para un diseño más avanzado y con alcance de mayores profundidades, nos destinamos a realizar pruebas en profundidades hasta 10 metros.

Descritas las consideraciones generales más importante para ser tomadas en cuenta, procedemos al desarrollo del capítulo empezando con la unidad de control.

3.1.1. Unidad de control:

La unidad de control está formada por elementos computacionales y el software que regula el comportamiento global del robot, es el órgano de tratamiento de la información. Comúnmente nos referimos a ella como el "cerebro" del robot. Como se mencionó anteriormente, es el responsable de determinar los movimientos precisos de cada parte del mecanismo para que el elemento terminal pueda ser movido a la posición y orientación requeridas en el espacio. Actualmente, en el campo de la robótica, puede tratarse de un Microcontrolador PIC, tarjetas de desarrollo con Microcontroladores más avanzados y entorno de desarrollo o tarjetas

con sistemas basados en microprocesadores. En su memoria se encuentra el modelo físico, un modelo del entorno y la programación para desarrollar la función de control del robot.

3.1.2.1. Requisitos:

Para el propósito de este proyecto, la unidad de control necesita cumplir los siguientes requisitos:

- Debe tener la capacidad de procesar señales de video, teniendo en cuenta que uno de los objetivos es el de transmitir video en tiempo real, de esta manera poder supervisar las instalaciones subacuáticas de la industria del petróleo.
- De acuerdo a las características y especificaciones del ordenador a usarse, es necesario contar con un entorno de desarrollo sobre su respectivo sistema operativo, para dar facilidades de programación e interacción humano-maquina (HMI: Human-Machine Interface).
- La unidad de control debe contar con una cantidad considerable de canales de entrada y salida, del tipo analógico, PWM y digital para el control del sistema de accionamiento y la adquisición de datos del sistema sensorial.
- El dispositivo debe contar con un puerto USB, para la interacción con la cámara, ya que la mayoría de cámaras comerciales cuentan con interfaz USB.
- También debe tener soporte de interfaz Ethernet, con la finalidad de usar como método de comunicación la tecnológica "Power Line Comunication" descrita en el capítulo II.

- Debe tener la capacidad de ejecutar más de una aplicación a la vez, con esto poder adquirir señales de video, imagen y sensores y al mismo tiempo controlar sus movimientos bajo el agua.
- El dispositivo debe estar disponible en el mercado nacional o internacional, su adquisición debe ser viable y de un precio accesible.
- Debe ser de tamaño y peso considerables y adecuados para la aplicación de un prototipo de ROV.
- Por último, este dispositivo debe ser de bajo consumo de energía, para asegurarnos un mayor tiempo de vida del sistema de alimentación.

3.1.2.2. Selección de dispositivo:

Nos disponemos a escoger el dispositivo que mejor se adapte a las necesidades detalladas anteriormente de la unidad de control. Como primer paso, vamos a establecer las diferencias entre un microcontrolador, tarjeta de desarrollo con microcontrolador y tarjetas basado en sistema con microprocesadores, descritos en el capítulo II como componentes que pueden conformar la unidad de control.

Para esto, establecemos las características generales de cada dispositivo más importantes para nuestro proyecto:

Tabla 3: Características de los principales elementos de la unidad de control

Características	MICROCONTROLADOR PIC	TARJETA DE DESARROLLO	TARJETA CON MICROPROCESADOR
CPU	Microcontrolador basado en arquitectura Harvard	Microcontrolador integrado (Atmel, Motorola, Microchip)	Microprocesador integrado (Arquitectura ARM)
Memoria flash	256 bytes a 256 kB	32 kB a 512 kB	256 MB
Memoria RAM	No tienen	No tienen	512MB
Multiproceso	No, pero se puede simular procesos simultáneos a través de interrupciones	No, pero se puede simular procesos simultáneos a través de interrupciones	Si
Voltaje e/s	0V - 5,5V	0V -3,3V- 5V	0V -3,3V
Soporte de interfaz Ethernet	Soporte de controlador Ethernet (no integrado)	Algunas versiones de algunas tarjetas vienen con soporte ethernet integrado	Soporte de controlador Ethernet Integrado
Soporte de interfaz USB	Soporte de interfaz USB (no integrado)	Algunas versiones de algunas tarjetas vienen con soporte USB integrado	Soporte de interfaz USB Integrado
Capacidad de procesar video	No	Algunas versiones tienen capacidad de procesar video	Si
E/s digitales, analógicas, PWM	Si	Si	Si
Entorno de desarrollo	Si	Si	Si (Sistemas operativos Linux y Android)

Fuente: Elaboración propia

Después de resumir las características principales de cada dispositivo en la tabla anterior, vamos a hacer una valorización de los requisitos y calificar cada dispositivo, los criterios tomados para esta calificación son:

- Capacidad de procesar señal de video
- Entorno de desarrollo
- Disponibilidad de puertos de entradas y salidas
- Soporte de interfaz USB
- Accesibilidad a través de interfaz Ethernet
- Capacidad Multiproceso

- Disponibilidad en el mercado
- Tamaño y peso
- Consumo de Energía

En la siguiente tabla de calificación, se recurrirá a evaluar según un valor asignado a cada criterio. Este valor porcentual se establece de acuerdo a la prioridad de cada uno de estos, a lo que debe ajustarse la unidad de control. La calificación será del 0 al 10, donde 10 es la puntuación máxima. Después serán comparadas las puntuaciones finales de cada uno y se llegará a una conclusión. De este modo, lograremos escoger la opción que mejor cumpla con los requisitos descritos al inicio de esta sección.

Tabla 4: Evaluación de los principales elementos de la unidad de control

		MICROCONTROLADOR PIC		TARJETA DE DESARROLLO		SISTEMA CON MICROPROCESADOR	
CRITERIO	VALOR	PUNTUACION	CALIFICACION	PUNTUACION	CALIFICACION	PUNTUACION	CALIFICACION
Capacidad de procesar señal de video	25%	0	**0**	6	**1.5**	10	**2.5**
Entorno de desarrollo	10%	3	**0.3**	9	**0.9**	8	**0.8**
Disponibilidad de puertos de entradas y salidas	10%	7	**0.7**	10	**1**	10	**1**
Soporte de interfaz USB	15%	5	**0.75**	7	**1.05**	10	**1.5**
Accesibilidad a través de interfaz Ethernet	15%	5	**0.75**	7	**1.05**	10	**1.5**
Capacidad multiproceso	10%	4	**0.4**	4	**0.4**	10	**1**
Disponibilidad en el mercado	5%	10	**0.5**	9	**0.45**	7	**0.35**
Tamaño y peso	5%	10	**0.5**	8	**0.4**	8	**0.4**
Consumo de energía	5%	10	**0.5**	10	**0.5**	10	**0.5**
	100%		**4.4**		**7.25**		**9.55**

Fuente: Elaboración Propia

Entonces, de la tabla 4 de valorizaciones, rescatamos que el dispositivo de mayor puntuación es el sistema con microprocesador, la más clara diferencia, es decir, la mayor ventaja que tienen estos dispositivos sobre los otros es la capacidad del proceso de señales de video e imágenes, también es evidente la diferencia en el soporte de interfaz USB y Ethernet, que en el caso de los Microcontroladores PIC no pueden tener este soporte por sí solo (necesitan un circuito y programación adicional), y refiriéndonos a las tarjetas de desarrollo, solo algunas versiones o modelos cumplen con estos criterios. El criterio con menor puntuación para los sistemas con microprocesadores es el de disponibilidad en el mercado, ya que es muy difícil conseguir empresas distribuidoras o tiendas de electrónica que suministren este tipo de tarjetas, puesto que aún es una tecnología poco conocida en el país, a diferencias de los PIC que son muy comerciales y las tarjetas de desarrollo que se pueden pedir o encontrar en tiendas en capital y provincias, sin embargo, existe la posibilidad de adquirir este tipo de tarjetas del extranjero. Otro punto muy importante, es la capacidad multiproceso, con el que cumplen a cabalidad las tarjetas con sistemas de microprocesadores, en cuanto a los Microcontroladores PIC y tarjetas de desarrollo esto no es posible, ya que un microcontrolador está diseñado para realizar una aplicación a la vez, de igual manera la tarjeta de desarrollo que está integrado por un microcontrolador, como se explica en el capítulo anterior.

Después de haber realizado estas valorizaciones, concluimos que el dispositivo que mejor se adapta a las necesidades del proyecto es el sistema basado con microprocesadores.

Para poder utilizar un sistema basado en biprocesadores, recurrimos a las tarjetas que tienen integradas este sistema.

A continuación se realizará la elección de la tarjeta con sistema basado en microprocesador que más se ajusta a nuestra aplicación.

Buscando tarjetas con estas características, cuyo precio sea accesible y que su adquisición sea factible, ya sea poder conseguirlas en nuestro país o comprarlas del extranjero encontramos entre las tarjetas comerciales con microprocesadores las siguientes:

- Rapsberry Pi
- Beaglebone Black
- Pandaboard
- PCDuino

Estas 4 tarjetas son las más comerciales y fáciles de adquirir, todas tienen incorporado un sistema basado en microprocesadores, además de poder encontrar información (en inglés) en internet. Sin embargo existen otras tarjetas, pero la mayoría de estas son de distribuidoras asiáticas, y son poco o nada comercializadas en tiendas o distribuidoras a las que podemos acceder, además existe muy poca información sobre sus especificaciones y programación, sea porque recibió poca aceptación de la comunidad electrónica o por el idioma de origen. Entre ellas están la tarjeta IGEPv2, OLinuXino, Banana Pi, Cubieboard, siendo las tres últimas de fabricación y distribución china. Por esto motivo, nos vamos a limitar a realizar una evaluación con las 4 tarjetas mencionadas inicialmente.

Para proceder a la selección entre estas tarjetas se van a evaluar las características individuales en sus últimas versiones, las cuales detallamos a continuación:

Tabla 5: Características de las principales tarjetas basadas en microprocesadores

	Raspberry Pi	BeagleBone Black	PandaBoard	PCDuino
Costo	$35, sin accesorios	$45	$150 - $180	$60 - $80
Procesador	700 MHz ARM1176JZFS	1GHz TI Sitara AM3359 ARM Cortex A8	Dual-core 1.2 GHz ARM® Cortex™-A9 MPCore™ with SMP	1GHz ARM Cortex A8
Memoria RAM	512 MB SDRAM @ 400 MHz	512 MB DDR3L @ 400 MHz	1024MB DDR2 RAM	1GB DRAM
Conexión de monitor	1 HDMI, 1 Composite	1 Mini-HDMI	HDMI v1.3 Connector (Type A)	1 HDMI
Resolución soportada	640×350 a 1920×1200, incluye 1080p	1280×1024 (5:4), 1024×768 (4:3), 1280×720 (16:9), 1440×900 (16:10),	High definition (HD) (1920 × 1080 p, 30 fps)	HDMI 720p or 1080p 60Hz
Cámara	Soporta extensión de conector de cámara, soporta cámara por interfaz USB	Soporta extensión de conector de cámara, soporta cámara por interfaz USB	Soporta extensión de conector de cámara, soporta cámara por interfaz USB	Soporta extensión de conector de cámara, soporta cámara por interfaz USB
Audio	Stereo over HDMI, Stereo from 3.5 mm jack	Stereo over HDMI	Stereo over HDMI, Stereo from 3.5 mm jack	Stereo from 3.5 mm jack I2S stereo digital audio interface

Sistemas operativos	Raspbian Android, ArchLinux, FreeBSD, Fedora, RISC OS	Angstrom, Ubuntu, Android, ArchLinux, Gentoo, Minix, RISC OS	Windows™ CE, WinMobile™ Symbian OS™ Linux® Palm OS™	Linux3.0 Ubuntu12.04 Android ICS 4.0
Voltaje de alimentación	150-350 mA @ 5V	210-460 mA @ 5V	500 mA @ 5V	2000 mA @ 5V
Capacidad de puertos	8 GPIO pins 1 UART interface 1 SPI bus 1 I2C bus	65 GPIO pins 3 I2C buses CAN bus SPI bus 4 timers 5 serial ports 8 PWM outputs 7 analog inputs (1.8V max 12 bit A/D converters)	28 GPIO 1 UART interface 1 SPI bus 1 I2C bus	14 GPIO pins 1 UART RX, one UART TX 2 PWM pins 6 ADC pins 4 SPI pins 2 I2C pins
Perifericos	2 USB Hosts, 1 Micro-USB Power, 1 10/100 Mbps Ethernet, RPi camera connector	1 USB Host, 1 Mini-USB Client, 1 10/100 Mbps Ethernet	2 USB port 10/100 Ethernet	2 USB port 10/100 Ethernet
Tamaño	85.60mm × 3.98mm (3.370 × 2.125 inch)	86.40 mm × 53.3 mm (3.402 × 2.098 inch)	114.3 mm × 101.6 mm (4.5 by 4.0 inch)	125mm X 52mm (4.92 x 2.08 inch)
Peso	45 g	37 g	81.5 g	90.72 g

Fuente: Elaboración Propia

Como podemos observar en la tabla 5, las tarjetas tienen características muy similares, las cuales pueden cumplir a cabalidad con los requisitos de la aplicación del proyecto, es por este motivo que se calificará de una manera detallada y minuciosa, para poder seleccionar la tarjeta que mejor se adapte a nuestras necesidades.

En seguida, estableceremos los criterios a ser calificados en la tabla de valorización:

- Costo
- Disponibilidad en el mercado
- Disponibilidad de puertos de entradas y salidas (PWM)
- Soporte de interfaz USB para cámara web
- Calidad cámara
- Sistema operativo
- Velocidad de procesador
- Tamaño y peso
- Consumo de energía

En la siguiente tabla de calificación, se recurrirá a evaluar según un valor asignado a cada criterio, este valor se establece de acuerdo a los requisitos que debe cumplir la unidad de control de la misma manera en que se detalló el proceso anteriormente.

Tabla 6: Evaluación de las principales tarjetas basadas en microprocesadores

		RAPSBERRY PI		BEAGLEBONE BLACK		PANDABOARD		PCDUINO	
CRITERIO	VALOR	PUNTUACION	CALIFICACION	PUNTUACION	CALIFICACION	PUNTUACION	CALIFICACION	PUNTUACION	CALIFICACION
Costo	20%	10	**2**	10	**2**	4	**0.8**	7	**1.4**
Disponibilidad en el mercado	5%	10	**0.5**	9	**0.45**	7	**0.35**	9	**0.45**
Disponibilidad de puertos E/S	20%	6	**1.2**	10	**2**	6	**1.2**	7	**1.4**
Soporte de interfaz USB para cámara web	15%	10	**1.5**	10	**1.5**	10	**1.5**	10	**1.5**
Calidad cámara	10%	10	**1**	8	**0.8**	10	**1**	10	**1**
Sistema operativo	5%	10	**0.5**	10	**0.5**	10	**0.5**	10	**0.5**
Velocidad de procesador	10%	8	**0.8**	9	**0.9**	10	**1**	9	**0.9**
Tamaño y peso	10%	10	**1**	10	**1**	7	**0.7**	6	**0.6**
Consumo de energía	5%	10	**0.5**	10	**0.5**	10	**0.5**	10	**0.5**
	100%		**9.00**		**9.65**		**7.55**		**8.25**

Fuente: Elaboración Propia

Por lo tanto, de la tabla 6 en el criterio de coste, las tarjetas Beaglebone Black, PCDuino y Rapsberry Pi tienen precios relativamente bajos a diferencia de la Pandaboard. Con respecto a la calidad de imagen y el soporte USB para la cámara las 4 tarjetas pueden cumplir estos criterios, diferenciándose en la resolución soportada, pero lo cual no es determinante, ya que otro punto donde encontramos una clara diferencia es en la disponibilidad de puertos, como podemos ver la tarjeta Beaglebone Black cuenta con una mayor diversidad de puertos.

Al finalizar, podemos concluir que la tarjeta Beaglebone Black es la que mejor cumple los requisitos planteados para la unidad de control. Beaglebone Black es prácticamente un miniordenador funcional en el que se puede ejecutar un sistema operativo, y al ser casi un ordenador nos permitirá procesar señales de video provenientes de una cámara e interactuar con otra computadora.

3.1.2. Sistema de comunicación:

Las redes subacuáticas de comunicación son, en la actualidad, un importante campo de investigación para la comunidad científica. Este tipo de redes se prevén que sean utilizadas para posibilitar el desarrollo de aplicaciones para la recolección de datos oceanográficos, toma de muestras del océano, la monitorización de contaminación ambiental, entre otros.

Los ROV ofrecen nuevas soluciones a problemas críticos y también cotidianos como búsqueda y rescate, exploración, supervisión e inspección en ambientes sub-acuáticos. En muchos de estos problemas es posible incrementar el impacto del robot si estos son capaces de comunicarse a una alta velocidad con la superficie y a

tiempo real. Cada uno de los diferentes sistemas de comunicación inalámbricos y alámbricos tiene ventajas y limitantes propias de las características del canal, pero todos han demostrado su viabilidad en distintas situaciones. Independientemente del tipo de canal empleado se encuentran los paradigmas de comunicación, los cuales determinan la forma en que los robots utilizarán el canal para comunicarse con la superficie. El ROV requiere para las operaciones esperadas, comunicación en tiempo real, que se refiere a la transmisión de información con un margen de velocidad dentro de límites de tolerancia establecidos. Algunos sistemas requieren que esta medida sea inferior a los nanosegundos, otros sistemas toleran incluso segundos.

En esta sección vamos a plantear los requisitos a ser cumplidos por el sistema de comunicación de nuestro proyecto, y a continuación, daremos paso a la evaluación, valorización y selección de tecnología que mejor se adecua a nuestras necesidades.

3.1.2.3. Requisitos:

El sistema de comunicación, en su totalidad, debe cumplir con las siguientes condiciones:

- El sistema de comunicación debe ser de alta velocidad, para proporcionar una interacción en tiempo real con su base de control en la superficie.
- Debe permitir transmitir información en tiempo real para el procesamiento de las señales de video e imágenes.
- Debe permitirnos alcanzar profundidades entre 10 a 50 metros, dado que este proyecto será un prototipo para servir de apoyo a proyectos posteriores que puedan alcanzar mayores profundidades.

3.1.2.4. Selección de tecnología:

Como se estudió en el capítulo anterior, las comunicaciones del robot con la superficie pueden ser inalámbricas y alámbricas, primero debemos inclinarnos por un tipo de comunicación en base al medio acuático en que desenvolverá el ROV y luego elegir la tecnología más apropiada, para lo cual realizaremos la evaluación correspondiente.

Primero describiremos las principales características de cada tipo de comunicación:

Tabla 7: Características de los medios de comunicación

CARACTERISTICA	INALAMBRICO	ALAMBRICO
Transmisión de información	La información viaja en forma de impulsos eléctricos (ondas electromagnéticas), en forma de luz o en señales acústicas	La información viaja a través de un conductor que transporta corriente eléctrica
Cableado	Cantidad de cables mínima	El cableado es necesario
Costo	Los módulos inalámbricos para robots son de alto costo	Los cables utilizados es este tipo de comunicación para robots son de bajo costo
Movilidad	Permite mejor movilidad del Robot	Al estar conectados con un cable umbilical, la maniobrabilidad del robot se encuentra relativamente limitada
Desempeño en el medio acuático	1. Ondas electromagnéticas: MALO 2. Ondas ópticas: REGULAR 3. Ondas acústicas: REGULAR	Bueno
Velocidad	Muy baja	Buena, dependiendo de la distancia
Adquisición de señales	1. Ondas electromagnéticas: MALO 2. Ondas ópticas: REGULAR 3. Ondas acústicas: MALO	Bueno dependiendo del calibre del cable y la distancia, lo cual incluye las caídas de tensión
Permitir video en tiempo real	No en un medio acuático	Sí

Fuente: Elaboración Propia

Después de esclarecer las principales características de cada tipo de comunicación de acuerdo a las necesidades de la aplicación del proyecto, procedemos a realizar la valorización para esto consideraremos los siguientes criterios:

- Costo
- Desempeño en el medio acuático
- Velocidad
- Adquisición de señales
- Video en tiempo real
- Maniobrabilidad

Realizamos la evaluación establecimiento porcentajes por cada uno de los criterios mencionados. Podemos ver la evaluación en la tabla 7.

Tabla 8: Evaluación de los medios de comunicación

		INALAMBRICO		ALAMBRICO	
CRITERIO	VALOR	PUNTUACION	CALIFICACION	PUNTUACION	CALIFICACIÓN
COSTO	15%	8	**1.2**	10	**1.5**
DESEMPEÑO EN EL MEDIO ACUATICO	30%	5	**1.5**	9	**2.7**
VELOCIDAD	10%	7	**0.7**	9	**0.9**
ADQUISICION DE SEÑAES	20%	6	**1.2**	9	**1.8**
VIDEO EN TIEMPO REAL	20%	5	**1**	10	**2**
MANIOBRABILIDAD	5%	10	**0.5**	6	**0.3**
	100%		**5.6**		**9.2**

Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo a la aplicación de nuestro proyecto de tesis, necesitamos un sistema de comunicación que pueda desempeñarse de la manera más

adecuada para cumplir los objetivos del proyecto, como observamos en la tabla 6 la mejor opción para este caso sería un sistema de comunicación alámbrico.

En los criterios donde vemos una amplia diferencia es en el de desempeño en el medio acuático y el video en tiempo real ya que en las comunicaciones inalámbricas tenemos desventajas bastante importantes al utilizar enlaces acústicos, enlaces basados en ondas electromagnéticas o señales ópticas. Según lo descrito en el capítulo II, las ondas acústicas se adaptan mejor al medio acuático, aunque por las características de este tipo de ondas, presenta limitaciones importantes. El principal problema al utilizar las frecuencias bajas es la falta de ancho de banda para transmitir datos a alta velocidad, por tal motivo es casi imposible obtener señales de video en tiempo real. Con respecto a los enlaces electromagnéticos, estas se dispersan en el agua de mar, debido a que las ondas electromagnéticas se atenúan muchísimo al intentar atravesar un material conductor de la electricidad, como el metal, o el agua salada. Las señales ópticas tienen dos desventajas principales. Por una parte, las partículas en suspensión causan la dispersión de la luz y por otra, debido a las propiedades físicas del agua, las señales ópticas se absorben rápidamente. Al descartar de esta manera los tres tipos de enlaces que se pueden realizar de manera inalámbrica y siendo nuestro proyecto un prototipo, se concluye que la mejor opción para el sistema comunicación en un medio acuático es usar un medio alámbrico, ya que este satisface de manera integral las necesidades del proyecto.

De la sección anterior, en el punto de selección del dispositivo de la unidad de control, se concluyó que la tarjeta Beaglebone Black es la que mejor se adapta a la funcionalidad de dicha unidad. Por esto, basaremos la elección del canal de comunicación alámbrico de acuerdo a las características de esta tarjeta. Según las especificaciones estudiadas anteriormente esta tarjeta puede interactuar con la computadora a través de su interfaz USB y/o interfaz Ethernet. Debemos decidir cuál interfaz se ajustará mejor a la aplicación para esto proponemos un solo criterio bastante relevante, el cual es la distancia máxima útil, según esto tenemos:

Tabla 9: Comparación distancia útil Interfaz Ethernet y USB.

CARACTERISTICA	INTERFAZ USB	INTERFAZ ETHERNET
DISTANCIA MAXIMA UTIL	5 metros	100 metros

Fuente: Elaboración Propia.

Fundamentándonos en que uno de los requisitos es alcanzar distancias entre 1 a 10 metros se determina que la interfaz más conveniente para el proyecto es la interfaz Ethernet. Pero también presenta una desventaja importante que es la poco flexibilidad del cable Ethernet, lo cual no ayudaría en la maniobrabilidad del robot, es aquí donde se llegó a determinar que podemos usar la tecnología Power Line Communication (PLC) puntualizada en el capítulo II, esta tecnología nos permitirá utilizar las ventajas del protocolo Ethernet en velocidad y transmisión de datos, ya que se podrá transmitir los datos a través de sólo dos cables de los ocho que tienen los cables Ethernet, lo cual nos proporciona no solo más flexibilidad , sino mayores distancias alcanzadas por esta tecnología PLC.

3.1.3. Sistema de accionamiento y propulsión:

Los sistemas de accionamiento suministran al robot el poder muscular necesario, estos son cualquier mecanismo que permita realizar una acción. Son dispositivos para conversión de energía, que transforman una potencia eléctrica, hidráulica o neumática en una potencia mecánica.

El sistema de propulsión está conformado por los dispositivos que permiten que los robots submarinos avancen en el medio acuático. Consideramos como parte del sistema de propulsión, tanto los elementos que generan las fuerzas (sistema de accionamiento), como aquellos que controla la dirección de estas fuerzas.

Como se ha visto en el capítulo II la mayoría de los sistemas de propulsión de los robots submarinos consisten en impulsores de hélices accionadas eléctricamente, hidráulicamente o de propulsión a chorro canalizado, este último siendo el menos utilizado.

3.1.3.1. Requisitos:

Uno de los temas más críticos en la construcción de robot submarino es la elección del sistema de accionamiento y propulsión, ya que los componentes que conforman este sistema deben estar acondicionados para soportar algunos factores del medio acuático, tales como la presión hidrostática descrita al inicio del presente capítulo, así como el nivel de corrosión de acuerdo a las piezas que conformaran el sistema, ya que este se verá afectado en mayor o menor grado por el agua salada.

Dado la aplicación del robot, el sistema de accionamiento y propulsión deberá cumplir con las siguientes condiciones:

- El sistema de accionamiento y propulsión debe poder trabajar bajo el mando de la unidad de control, la tarjeta Beaglebone Black.
- Tiene que operar el robot en los comportamientos básicos como: emerger, sumergir, avanzar, voltear en dirección derecha o izquierda.
- Su funcionamiento debe tomar en cuenta las consideraciones explicadas inicialmente, presión hidrostática y profundidad.
- Siendo el presente proyecto un prototipo, debe ser de fácil instalación y bajo costo.

3.1.3.2. Selección del sistema de propulsión:

En este punto vamos a seleccionar el sistema de propulsión que más se adecue a la aplicación de nuestro proyecto.

De lo explicado en el capítulo II, podemos decir que nuestro prototipo podrá encajar en el la clasificación de OCROVs, ya que será un robot de pequeñas dimensiones y con un cámara instalada, por esto el sistema de propulsión más adecuado para nuestro vehículo es el de accionamiento eléctrico, que también es comúnmente más usado en vehículos OCROVs, ya que el sistema hidráulico se usa para vehículos mucho más pesados y complejos.

Al usar motores eléctricos de corriente continua podrá trabajar bajo el control de la tarjeta Beaglebone Black y de acuerdo a la posición y la cantidad de motores podrá desplazarse en los comportamientos básicos que se mencionan en los requisitos. Debemos escoger minuciosamente el motor a usar, ya que estos estarán la mayor parte expuesto al agua y las

partes de un motor pueden presentar corrosión, para esto es necesario aislarlos del contacto con el agua. En la selección del tipo de motor se decide usar motores brushless, por el hecho de que al no tener escobillas no tienen contactos eléctricos abiertos, por esto, teóricamente, este tipo de motores no se afectaría al contacto con el agua, pero el problema es la duración del propio motor, tienen diferentes metales en contacto que con su inmersión en agua con sales disueltas provocarían pares eléctricos y corrosión, para evitar este problema se debe aislar el motor del agua, esto lo lograríamos a través de silicona en spray, lo cual es comúnmente usado en el campo automotriz.

Los sistema de propulsión con hélice se clasifican en tres tipos de hélices: de paso variable, paso constante y paso fijo, en la siguiente tabla damos una descripción de cada de una de ellas:

Tabla 10: Clasificación Hélices

	Hélice de Paso Fijo	**Hélice de Paso Variable**	**Hélice de Velocidad Constante**
Descripción	La velocidad es constante y no es modificable	Permite ajustar el paso acomodándolo a las diferentes velocidades	Su paso se regula de forma automática, manteniendo fija la velocidad de giro de la hélice, con independencia de los cambios de potencia en el motor

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la tabla 10, la hélice de tipo paso fijo y hélice de velocidad constante no son apropiadas para el proyecto, ya que necesitamos controlar la velocidad del sistema de propulsión, ya que de acuerdo a eso el robot podrá realizar los comportamientos básicos y desplazarse en el agua bajo

el control de la estación en la superficie. Para modificar las velocidades de los motores del sistema de propulsión necesitamos un controlador de velocidad, para cumplir este objetivo podemos usar un ESC (Electronic Speed Controller), este es un circuito electrónico que tiene el propósito de variar la velocidad de un motor. Un controlador electrónico de velocidad que recibe información del control y la utiliza para manipular la conmutación en su red de transistores que controla el motor a través de la electricidad.

3.1.4. Sistema sensorial:

Los robots submarinos, en general, suelen estar equipados con sistemas de sensores dedicados a la adquisición de datos del medio externo, también a determinar la localización, velocidad y aceleración del mismo robot. Los sensores que proporcionan esta información y, en general, todos aquéllos que producen información sobre el estado interno del robot, se denominan sensores internos.Por otra parte, en la mayoría de las tareas es necesario conocer datos del mundo que rodea al robot, esta información puede obtenerse con dispositivos muy variados se denominan sensores externos. Sin ellos, cualquier suceso inesperado podría bloquear o dañar al robot. Basándonos en la teoría estudiada en el capítulo II, los sistemas de visión entran en esta categoría de dispositivos. Para nuestro proyecto de tesis necesitamos un eficiente sistema de visión que cumpla con los requisitos descritos en la sección siguiente.

3.1.4.1. Requisitos:

Parte fundamental del presente proyecto, es el sistema visual, ya que es el mayor apoyo en el objetivo de supervisión en tiempo real. Por este motivo, se plantean los siguientes requisitos del sistema de visión:

- El sistema visual debe soportar un sistema de video con mayor resolución que la definición estándar, es decir de alta definición (HD: High Definition), por motivo que se requiere un mejor procesamiento de imagen para así visualizar el fondo marino con la mejor calidad posible.
- Debe ser un dispositivo que pueda interactuar con la interfaz USB de la tarjeta Beaglebone Black (unidad de control).
- Debe ser de un tamaño y peso adecuado para ser instalado en la cabina interna del robot así poder aislarlo del agua.
- El dispositivo debe estar disponible en el mercado nacional o internacional, su adquisición debe ser viable y de un precio accesible.

A continuación, se realizara la selección del dispositivo de acuerdo a los requisitos aquí planteados.

3.1.4.2. Selección de sistema de visión:

En el mercado nacional e internacional, existen diferentes tipos de cámara que puedan cumplir con los requerimientos planteados en el punto anterior. Por este motivo, vamos a priorizar la interacción con la unidad de control, la tarjeta Beaglebone Black. Esta tarjeta es una mini-computadora totalmente funcional, por lo cual nos centraremos en las cámaras que

mejor trabajen con una minicomputadora y basándonos en las definiciones del capítulo II estas son las Cámara Web o de Red.

Una cámara web o de red es una pequeña cámara digital conectada a una computadora que captura imágenes y puede transmitirlas. Este tipo de cámara necesita una computadora para transmitir las imágenes, y este es el lugar que ocupará la mini-computadora Beaglebone Black. Sin embargo, existen otras cámaras autónomas que tan sólo necesitan un punto de acceso a la red, bien sea Ethernet o inalámbrico. Para diferenciarlas de las cámaras web se las denomina cámaras de red. Sabemos que la tarjeta Beaglebone Black también cuenta con soporte Ethernet, pero teniendo en cuenta que este punto de acceso ya se estará usando para la interfaz con la computadora, es que concluimos que necesitaremos una Cámara Web con soporte USB.

Para no ir muy lejos, en el país podemos encontrar una infinidad de modelos y marcas de cámara web USB en conocidas tiendas de productos electrónicos, entre las más conocidas están Logitech, Genius, Microsoft, Micronics, etc. Para poder cumplir las condiciones anteriores la cámara web debe ajustarse a las siguientes características:

- Tener sistema de video HD (High Definition), para tener una mejor resolución de la imagen o video a capturar.
- Codificación de video H.264, para obtener una gran calidad de vídeo con una alta tasa de compresión.
- Soporte interfaz USB.

- El lente debe estar en el centro de la estructura de la cámara, para que sea instalada adecuadamente en el centro de la carcasa del robot, de esa manera podrá tener un mejor ángulo de visión y estabilidad respecto al peso y los demás dispositivos electrónicos.
- Debe ser de un precio al alcance del presupuesto con el que contamos para el proyecto.

En el caso de nuestro proyecto, se decidió adquirir una cámara de la marca Logitech (modelo c920), la cual cumple con las características anteriormente mencionadas.

3.1.5. Sistema de alimentación:

Al igual que el sistema de propulsión y accionamiento, las fuentes de energía de un robot submarino son un punto muy crítico debido a que el tipo de fuente define el tiempo de operación del robot, además del volumen y el peso del vehículo. Las fuentes de energía más comunes utilizadas en robots submarinos son las baterías. Se cree apropiado el uso de baterías recargables, ya que son más cómodas y fáciles de emplear, tratándose este proyecto de un prototipo se creyó más conveniente usar la fuente de mayor disponibilidad en nuestro país, además encontraremos baterías en diferentes marcas y tamaños, así como de voltaje y corriente variados.

Para una mejor selección del sistema de alimentación se hace un análisis del consumo de los elementos del robot, a continuación, en la tabla 10, señalamos dicha información.

Tabla 11: Consumo de elementos del Robot

	Detalle	Consumo (mA)
Unidad de control	Tarjeta Beaglebone Black	**500**
Sistema de Comunicación	Tarjeta Tenda (2)	**200**
Sistema de visión	Cámara Logitech c920	**200**
Sistema de accionamiento y propulsión	Motores Burshless (3)	**3000**
Elementos adicionales	Paneles led	**500**
Circuitería adicional	Circuito de regulación y puertos de tarjeta	**1000**
TOTAL (mA)		**5400**

Fuente: Elaboración propia.

El consumo total aproximado del robot es 5.4 amperios, para esto se cree conveniente asegurarse con un sistema de alimentación que nos proporcione 10000 mAh, de esta manera tendremos, teóricamente, un tiempo de operatividad de 1 hora y 48 minutos aproximadamente.

Es complicado encontrar baterías con alto amperaje y de un peso adecuado para el robot, evaluamos diferentes opciones hasta llegar al modelo de TrustFire, de 3,7 voltios y 5000 mAh, entonces debemos adquirir 6 de estas unidades y colocar 3 en serie para obtener aproximadamente 12 voltios y en paralelo para obtener 10000 mAh.

3.1.6. Diseño de la estructura exterior:

Parte esencial y una de las más importantes es el diseño de la estructura exterior, la cabina o carcaza consiste de la estructura y el material que cubre al robot submarino. En la carcasa estarán instalados y contenidos, los elementos de la unidad de control, el equipo eléctrico y electrónico y los elementos

mecánicos, en este caso las hélices. En el siguiente punto se definirán las condiciones a las que la estructura debe estar adecuada.

3.1.6.1.Requisitos:

Los factores que determinan el diseño de una cabina son: la profundidad a la que se va operar (y por lo tanto la presión hidrostática que va soportar); los niveles de temperatura que va a resistir, la resistencia a la corrosión, el volumen de los elementos que contendrá, la facilidad para ensamblar/desensamblar; la factibilidad de su construcción y costo.

Por otro lado otro factor que se debe de considerar son las fuerzas de arrastre que se generan por el movimiento del robot. Estas fuerzas son proporcionales al cuadrado de la velocidad del robot. Cuando el robot se mueve a la velocidad constante, la fuerza generada por el impulsor es igual a las fuerzas de arrastre. Por lo tanto, a menores fuerzas de arrastre menor es la energía consumida durante la navegación de robot. Las fuerzas arrastre depende en gran medida de la geometría de la cabina.

El diseño de una cabina con forma cilíndrica es una elección muy popular. Esto se debe a que (para un determinado volumen del robot) las fuerzas de arrastre que se generan son pequeñas cuando se comparan con otras geometrías. Por otro lado, esta forma geométrica es adecuada para resistir la presión hidrostática generada a grandes profundidades. Además, la manufactura de una cabina con esta geometría es relativamente simple y eso a su vez tiene consecuencias favorables en el costo. Por otro lado, una parte elemental del diseño de la cabina es la forma del extremo frontal. Un extremo frontal plano no es aconsejable para un robot que realizara tareas

a altas velocidades, ya que en las aristas de la cara frontal se lleva a cabo de fenómeno llamado cavitación que puede provocar la erosión o ruptura del material de la cabina, se aconseja el uso de una extremo ovalado para reducir la cavitación y las fuerzas de arrastre en el robot.

3.1.6.2.Selección de material:

Otro aspecto importante del diseño de la cabina es el tipo de material. Se presenta una discusión sobre los diferentes tipos de materiales mayormente utilizados en la construcción de robots submarinos. Estos materiales son principalmente metálicos, compuestos y plásticos, en la tabla se presentan las propiedades de algunos materiales utilizado la construcción de robots:

Tabla 12: Características de los principales materiales usados en el diseño de ROV's

MATERIAL	Densidad (Kg/dm3)	Resistencia a la fluencia (Mpa)	Módulo de tensión (Gpa)	Resistencia Especifica (kNm/Kg)
Acero de alta resistencia	7.86	550	207	70
Aleación de aluminio (7075)	2.9	503	70	172
Aleación de Titanio (6-4 STOA)	4.5	830	120	184
CFRP (Epoxy/S-lass)	2.1	1200	65	571
CFRP (Epoxy/HS)	1.7	1200	210	706
Acrílico	1.2	103	3.1	86
PVC	1.4	48	35	34

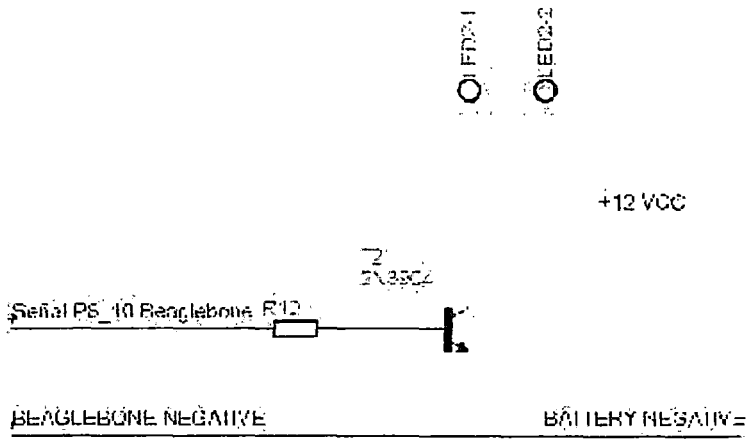
Fuente: Elaboración propia.

Siendo nuestro proyecto un prototipo, se cree conveniente usar como material para el diseño de la carcasa el acrílico, debido a su costo accesible y su disponibilidad en el mercado, además podemos encontrar establecimiento que realizan corte en laser, a través de una maquina CNC de acuerdo a un diseño elaborado (Autocad, SolidWorks, etc).

3.1.7. Elementos adicionales:

Respecto a los elementos adicionales que necesitaría nuestro sistema robótico nos referimos a elementos que puedan hacer que las funciones del robot sean más eficientes, en este caso, se creyó necesario implementar un sistema de iluminación para facilitar la visión a través de la cámara, como será un prototipo pequeño se usaran paneles de led de alta luminosidad los cuales se podrán encender en el caso necesario. Estos paneles serán comandados a través de una señal de la Beaglebone, teniendo en cuenta que los paneles escogidos funcionan con 12 voltios, se diseñó el circuito adecuado para que puedan ser activados a través de pulso de la tarjeta, este circuito es un transistor en modo interruptor y para mandar el pulso elegimos uno de los pines de salida digital de la tarjeta, en este caso utilizaremos el pin 10 de la cabecera 8 (P10_8) (Ver Figura 7).

Figura 7: Transistor modo interruptor para panel de led.



3.2.Ingeniería de Detalle:

El subcapítulo de ingeniería de detalle es la fase en la que quedan definidos todos y cada uno de los subsistemas, componentes o partes que integran el proyecto, en nuestro caso, el sistema robótico, de tal manera que los planos y

esquemáticos que se van a desarrollar han de ser suficientes para llevarlo a la práctica. Es decir, definir las bases para la implementación.

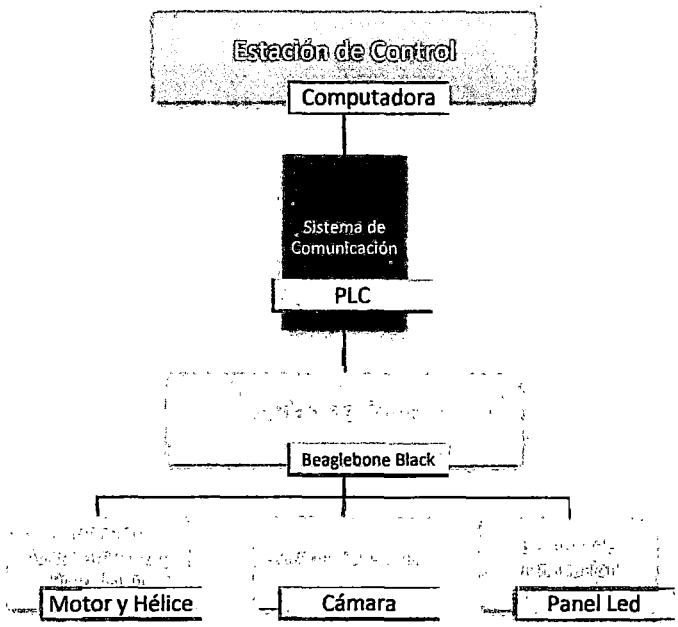
La Ingeniería de Detalle constituye el aspecto más importante en el desarrollo de lo que al inicio solo fue concebido como una posibilidad, como una idea y que en esta etapa del desarrollo se visualiza ya como algo tangible y real. Al inicio, cuando se desarrolla la ingeniería Básica tomamos en consideración todos los aspectos y requerimientos que determinarán el rumbo que tomará la ejecución considerando la viabilidad del proyecto, sin embargo, los detalles de estos aspectos son lo que determinarán la funcionalidad y el cumplimento de los objetivos planteados.

A estas alturas del proyecto, ya contamos con los datos previos que nos ayudan a definir los aspectos finos y finales del proyecto. Una vez analizados estos aspectos el proyecto será sometido a un filtro cuya intención es pulir los detalles que pudieran ser considerados un punto débil en la ejecución del mismo. En el siguiente punto nos centraremos en como las unidades funcionales descritas en el subcapítulo anterior trabajaran y se comunicarán entre sí.

3.2.1. Integración de unidades funcionales:

En esta sección estableceremos la manera en que las unidades funcionales trabajaran en conjunto. El sistema de accionamiento y propulsión, el sistema sensorial y el sistema de iluminación (Elemento adicional) deberán estar bajo el mando de la unidad de control, la tarjeta Beaglebone Black, la cual se comunicará a través del sistema Power Over Line (PLC) elegido como medio de comunicación, con la estación de control en la superficie la cual, en el caso del proyecto será una computadora. En el siguiente diagrama

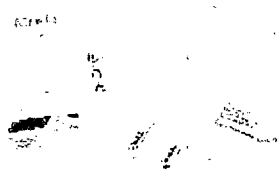
podremos visualizar la integración de las unidades funcionales comunicadas con la estación de control.



La estación de control debe ser básicamente una computadora, escogemos una laptop por la facilidad de movilizarla. Está laptop debe ser compatible con la tarjeta Beaglebone Black y tener interfaz Ethernet para la comunicación con esta misma, escogemos el sistema operativo Windows 7 debido a la experiencia previa trabajando con este sistema.

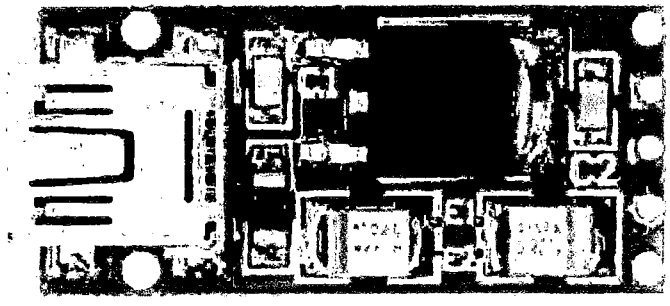
Con respecto al sistema de comunicación PLC, usaremos mini-adaptadores con tecnología Power Over Line, los cuales adaptaremos para funcionar con la computadora y la Beaglebone Black. Estos módulos vienen de fábrica para funcionar entre 110 – 220 VAC, pero las tarjetas contenidas en su interior pueden ser adaptadas para trabajar con corriente continua. En el mercado existen diversas marcas que comercializan mini-adaptadores de este tipo tales como TP-Link, Tenda, etc. Para nuestro proyecto se decide utilizar el mini-adaptador de la marca Tenda, debido a que pudo ser adquirido de la misma distribuidora online en la que se compraron los demás componentes del proyecto. Ver Figura 8.

Figura 8: P200 Mini-adaptador (Tenda)



Estas tarjetas se alimentan con 3.3 voltios y la tarjeta Beaglebone Black con 5 voltios, para poder alimentarlas, vamos a usar un regulador USB, el cual conectándolo a la computadora mediante un cable mini-USB, nos proporciona 5 y 3.3 voltios. Como se muestra en la Figura 9.

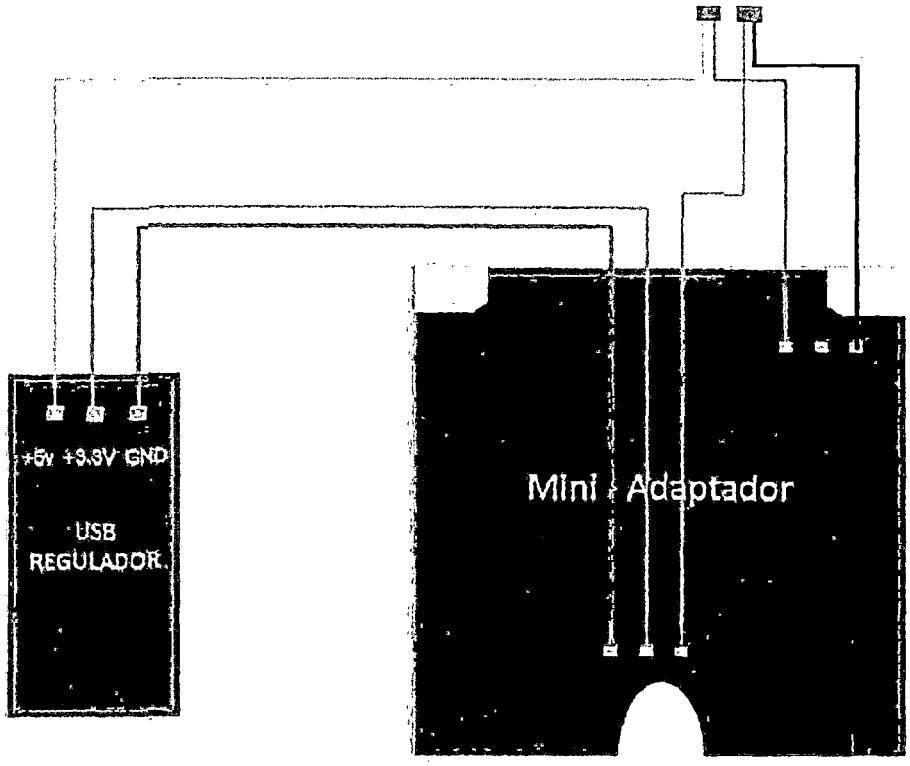
Figura 9: Regulador USB



Luego se analiza los circuitos contenidos en los mini-adaptadores en funcionamiento con corriente alterna. Estos son dos circuitos en placas distintas, al desmontar el mini-adaptador nos percatamos que uno de ellos es la fuente reguladora que alimenta el circuito principal, y la otra placa es la que da funcionalidad al PLC (Power Over Line). Tomando medidas de voltaje y continuidad de las líneas, podemos obtener un diagrama adaptado a nuestro proyecto.

A continuación, en la Figura 10, se mostrará el diagrama de cómo debemos adecuar estos mini-adaptadores y el regulador USB:

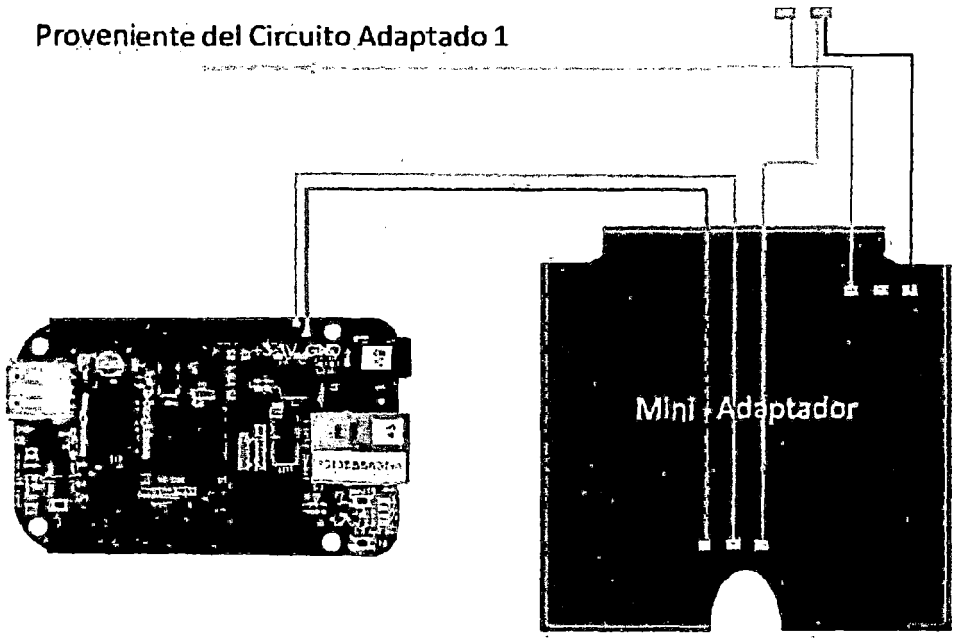
Figura 10: Circuito adaptado 1



Este circuito es el que ubicaremos en la estación de control, ya que el regulador USB debe estar conectado a la computadora. Se diseñará un circuito de fusión entre la placa y el regulador USB.

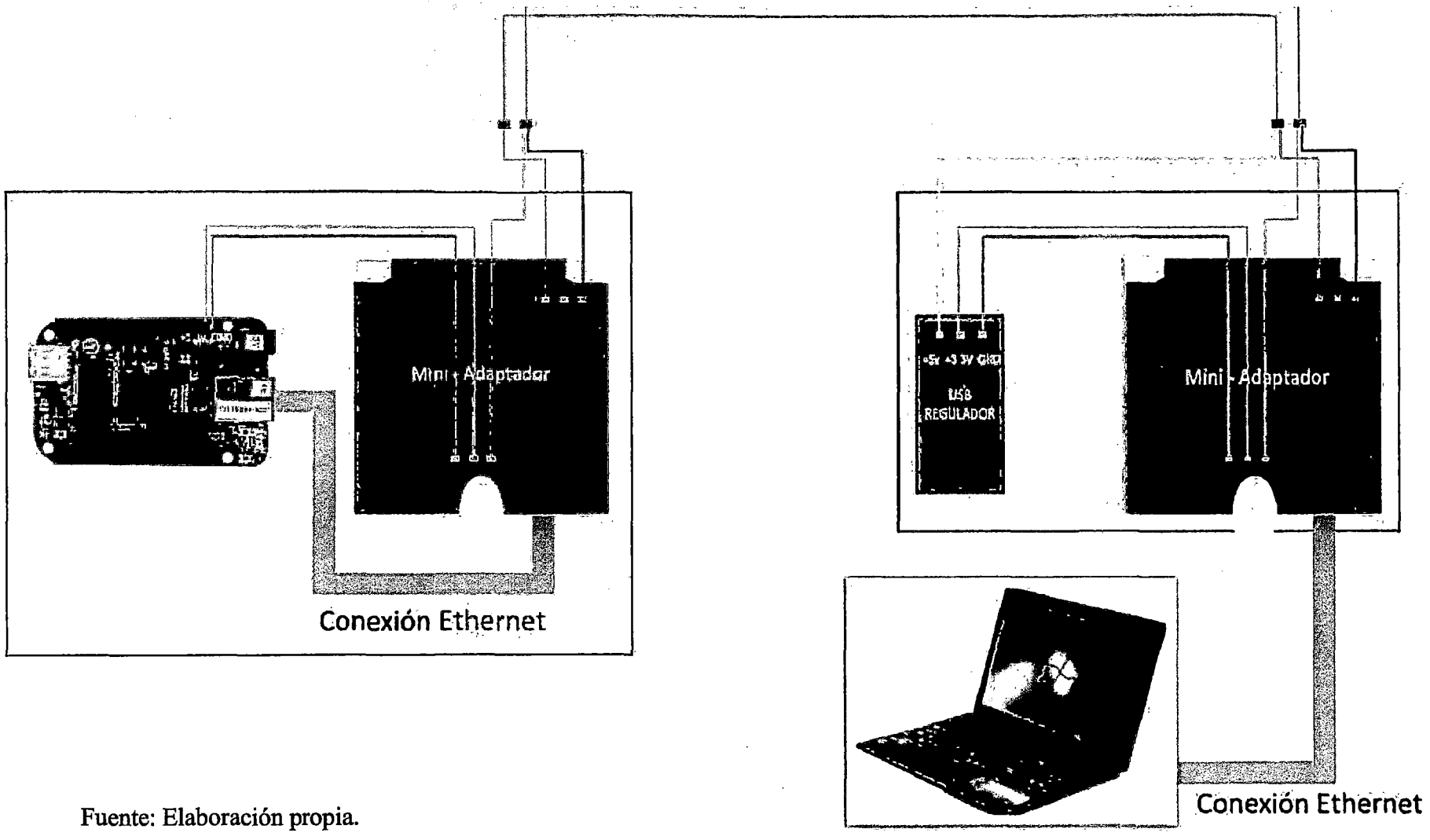
Para la recepción, es decir dentro de la estructura del robot que estará sumergida, se usará para alimentar los circuitos, la tarjeta Beaglebone Black que nos proporciona 3.3 voltios. Utilizaremos el diagrama de la Figura 11:

Figura 11: Circuito Adaptado 2



En este punto, ya podemos diseñar un diagrama general de conexión de los dos circuitos adaptados, el cual, en su totalidad, será nuestro sistema de comunicación. En la Figura 12 podemos observar el sistema a mayor detalle.

Figura 12: Sistema de Comunicación Integrado



Fuente: Elaboración propia.

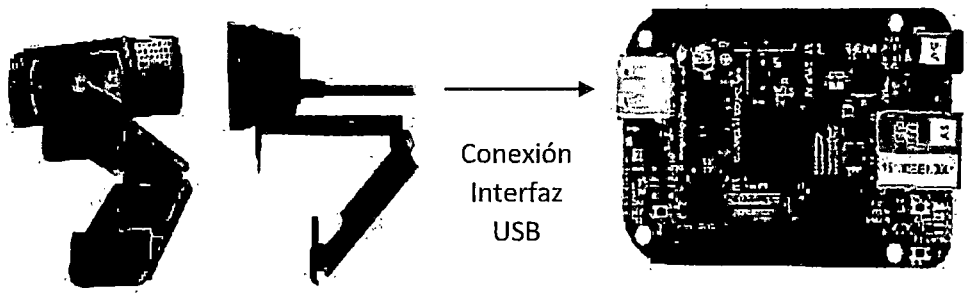
Por lo tanto, con la configuración de los dispositivos mostrada en la Figura 12, podemos, teóricamente, tener una comunicación entre la computadora y el robot en la superficie, la experimentación de este diagrama se llevará a cabo en el capítulo IV.

3.2.2. Adquisición de datos:

La adquisición de datos esta soportada a través de la tarjeta Beaglebone Black, la cual cuenta con 65 GPIO (General Port Input/Output), 3 I2C buses, CAN bus, SPI bus, 4 temporizadores, 5 puertos seriales,8 salidas PWM, 7 entradas analógicas (1.8V máximo, 12 bit A/D convertidor).

El sistema sensorial interactuará a través de la interfaz USB con la tarjeta Beaglebone Black, como podemos ver en la Figura 13.

Figura 13: Conexión Cámara Web - Beaglebone Black

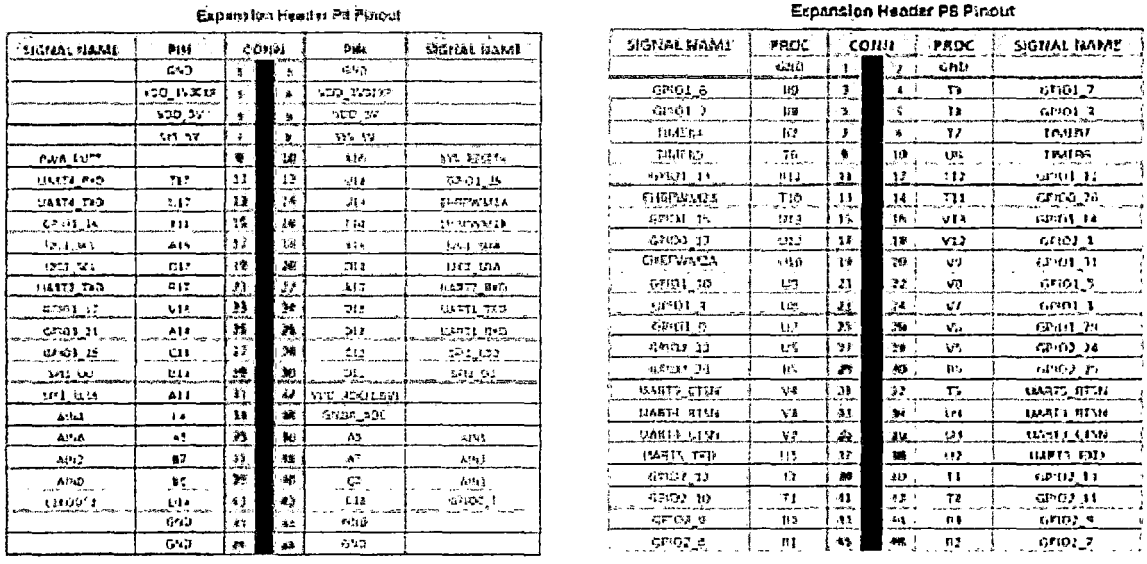


Fuente: Elaboración propia.

La tarjeta Beaglebone Black también deberá controlar al sistema de propulsión a través de los ESC. Estos controladores de velocidad, son comandados por una señal PWM, por este motivo usaremos los puertos de la tarjeta que puedan generarnos esta señal. La tarjeta tiene dos cabeceras de expansión de GPIO, P8 y

P9, en estas cabeceras se distribuyen las diferentes clases de GPIO, así como se puede apreciar en Figura 14.

Figura 14: Distribución de GPIO's en headers de la tarjeta Beaglebone Black



Fuente: Datasheet Beaglebone Black

De la figura 14, podemos seleccionar los puertos que nos proporcionarán señal PWM. Según nuestro sistema de propulsión necesitamos 3 ESC, por lo tanto requerimos de 3 puertos PWM. Se decide utilizar los siguientes puertos:

Tabla 13: GPIO señal PWM a utilizarse

Cabecera	Puerto
P8	P8_13
	P8_19
P9	P9_14

3.2.3. Diseño de estructura exterior:

El diseño de la estructura exterior es una de las más difíciles labores de este proyecto, como mencionamos anteriormente, la estructura debe ser totalmente aislada del agua para proteger a la electrónica del robot, debe permitir ajustar el

sistema de propulsión de la manera más adecuada y soportar el ambiente acuático y la presión que genera la profundidad a la que será sometida a prueba. En esta parte del diseño nos guiamos en algunos modelos en hardware libre que pudimos encontrar de proyectos anteriores, los cuales modificamos y adaptamos a nuestros elementos de potencia y dispositivos electrónicos.

Para empezar, diseñaremos la estructura que contendrá la unidad de control, la tarjeta Beaglebone Black, y sus periféricos, es decir, el sistema sensorial, los ESC del sistema de propulsión, los circuitos adaptados y los elementos adicionales. De acuerdo a la investigación realizada en el capítulo anterior, sabemos que las formas geométricas determinan como la carcasa va a soportar la presión, se recomienda para los robots submarinos optar por la forma de un cilindro para el diseño ya que está comprobado una mayor eficiencia con respecto a las otras formas geométrica, además de facilitar el ángulo visual de la cámara debido a su cuerpo en forma circular. Adicional a esto, tenemos que proteger el cilindro por los costados, para esto se diseñan tapas adecuadas al diámetro del cilindro, se decide utilizar varios círculos los cuales se unirán uno sobre otro para mayor seguridad, la unión de todas las piezas será descrita en el capítulo siguiente. A continuación presentamos las Figuras 15,16 y 17 de la cabina y sus tapas a los extremos del diseño en AutoCAD.

Figura 15: Diseño de cabina en AutoCAD

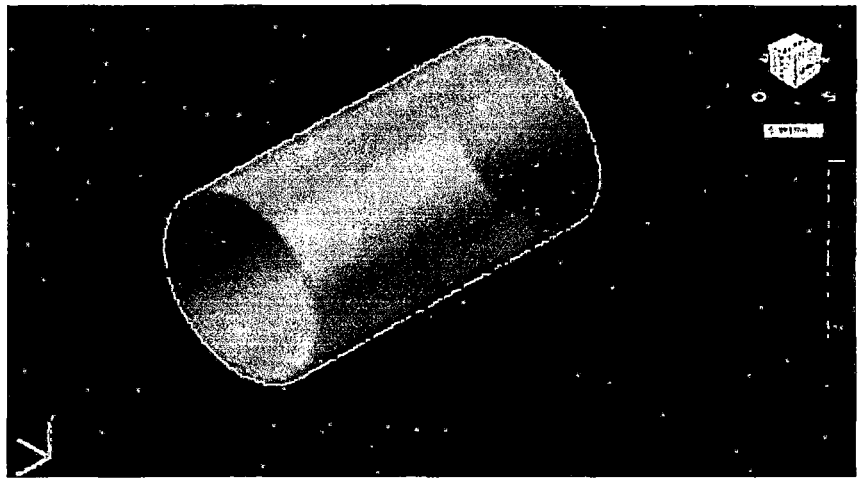


Figura 16: Cabina principal y tapas laterales.

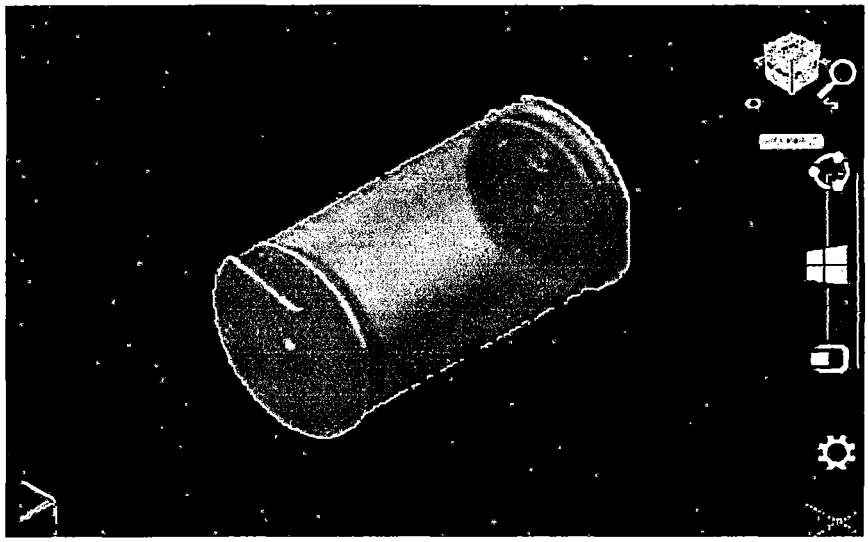
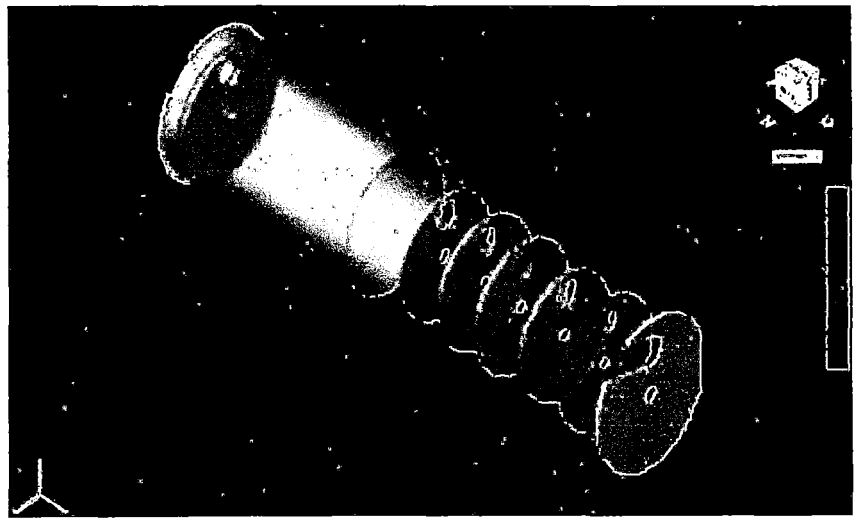


Figura 17: Despiece de tapas laterales



Luego, se debe implementar un diseño que nos permita instalar los motores fácilmente, sabemos, por el subcapítulo anterior, que se utilizarán tres motores brushless, uno que será ubicado de manera que la hélice esté horizontal y los otros dos, en cada costado ubicados verticalmente. Este diseño deberá unirse al diseño de la cabina principal. Como se presenta en las figuras 18 y 19, las estructuras que soportarán a los motores brushless.

Figura 18: Estructura para motores de desplazamiento horizontal.

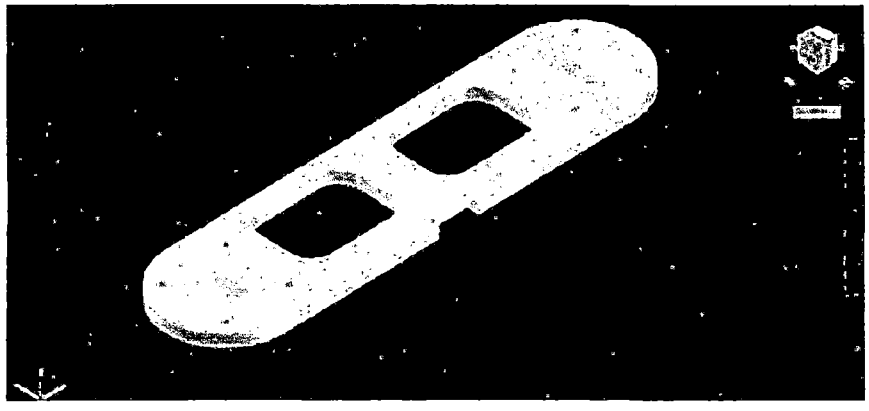
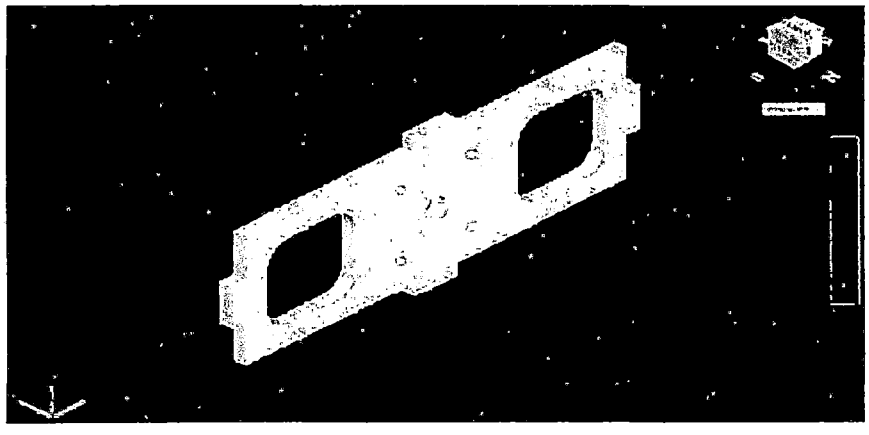


Figura 19: Estructura para motor de desplazamiento vertical.



A estas piezas fundamentales se agregaran estructuras de unión de protección y de soporte, así como pegamentos especiales para el material y elementos aislantes. El diseño en Autocad será cortado, como se decidió en la sección anterior, en acrílico de 3, 4 y 6 mm según la criticidad de la pieza. Esta parte de la implementación se describirá con mejor detalle en el capítulo IV.

CAPÍTULO IV

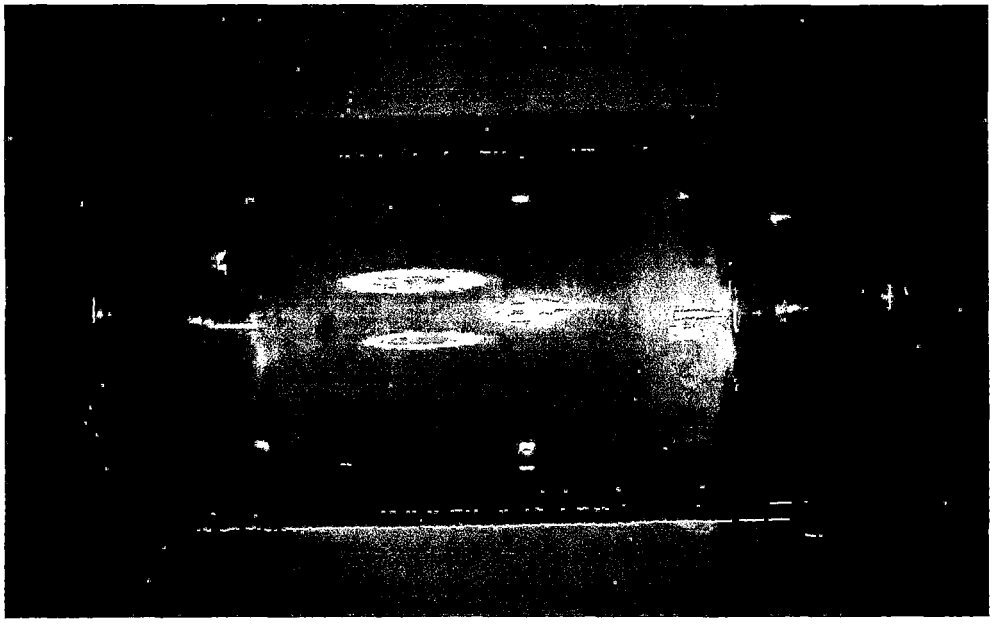
IMPLEMENTACIÓN

En este capítulo se presentará el procedimiento de implementación del robot en base a la ingeniería desarrollada en el capítulo anterior, de igual manera se plantearan las condiciones y criterios de éxitos para los experimentos de los comportamientos básicos y de la capacidad de procesamiento de imágenes y video del robot. Para cada experimento, se analizarán las pruebas elegidas de un gran número de pruebas realizadas en esta etapa del proyecto. También describiremos los inconvenientes, cambios necesarios y otros obstáculos encontrados en el desarrollo de la experimentación.

4.1.Construcción de estructura exterior:

Sustentándonos en la evaluación de materiales y diseño de la estructura en la ingeniería de detalle desarrollada anteriormente, en la cual, se concluyó utilizar el material acrílico para la estructura exterior, se procede a materializarlo a través del diseño dibujado en Autocad 3D, mediante una maquina cortadora láser CNC. En nuestra ciudad, existen diferentes locales que ofrecen esta clase de servicio de corte. Para hacer más fácil el trabajo de este tipo de máquina y reducir el coste del material, hemos plasmado todas las piezas en un plano 2D, intentando ocupar el menor espacio posible, de este modo reducir el tamaño y el coste de la plancha de acrílico. La etapa de control, potencia, alimentación irán ensambladas dentro del cilindro con tapas a los extremos, el cual llamamos cabina y está diseñada con el tamaño adecuado para el espacio que ocuparán junto con la cámara. Como se puede apreciar en la Figura 20.

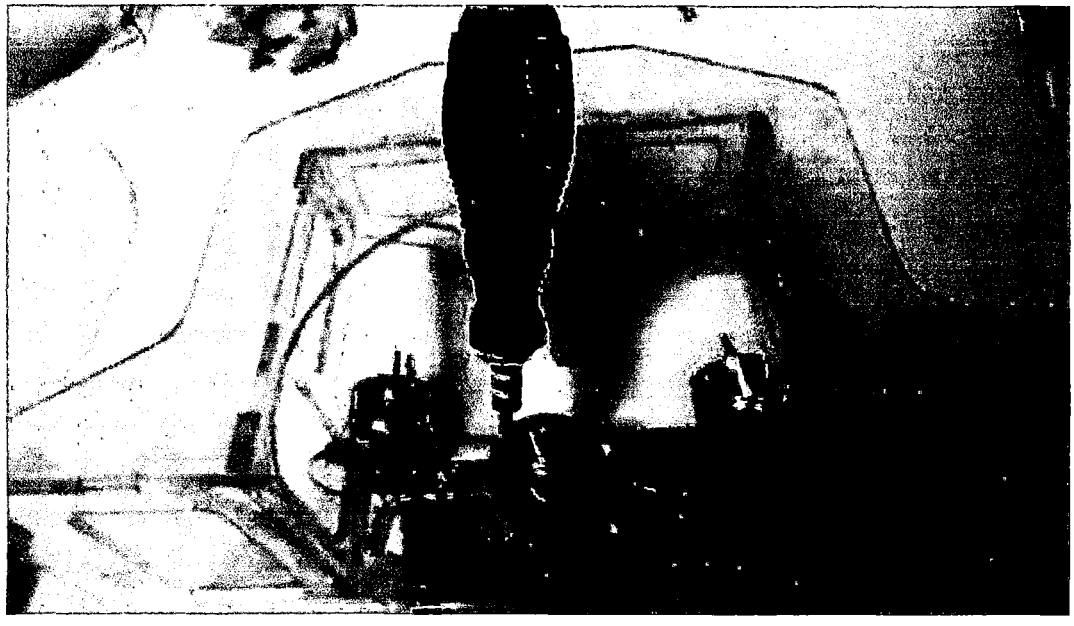
Figura 20: Cabina



Para los motores se diseñó una estructura tal cual permita asegurar dos motores a la izquierda y derecha para el desplazamiento horizontal y un motor para el

desplazamiento vertical, este diseño estará adecuado para las bases del motor. Ver Figura 21.

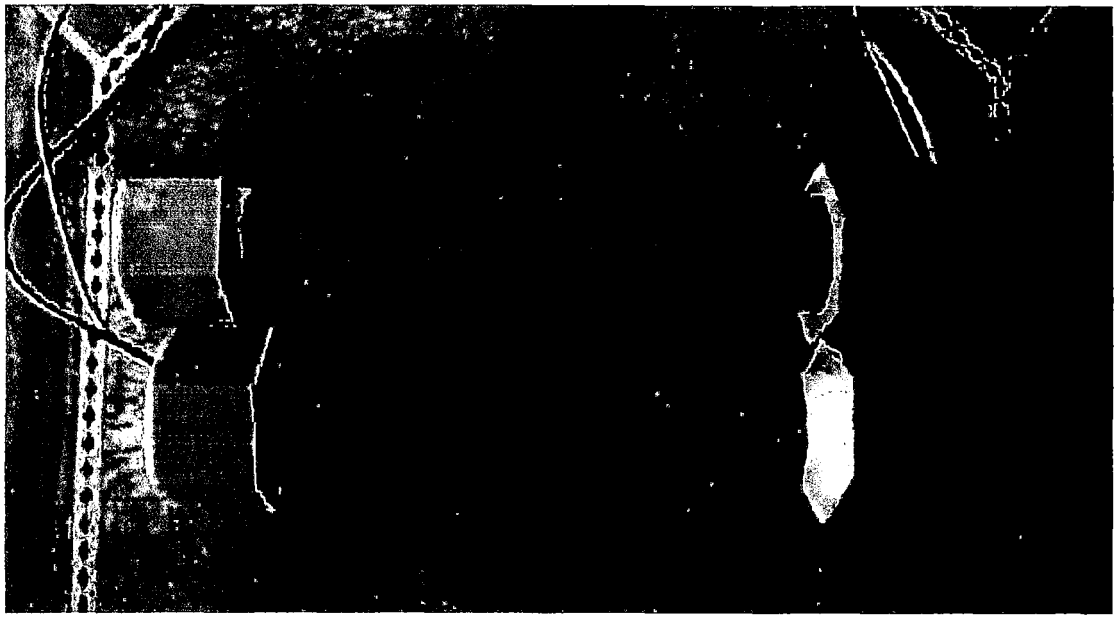
Figura 21: Estructura para los motores



Después de moldear las piezas cortadas en 2D, procedemos a unir las piezas con el pegamento especial de material acrílico.

Para la estructura donde serán localizadas las baterías utilizaremos tubo PVC de 1', adaptándolo al tamaño de las baterías en serie para obtener 12V trabajando a 5000 mAh, construiremos 2 de estos porta-pilas que en paralelo nos proporcionarán una mayor corriente, es decir 10 000 mAh, se adaptarán cables para la salida de voltaje y se aislaran del agua utilizando teflón, silicona y pegamento soldimix para los agujeros realizados en las tapas usados para el paso de los cables hacia la cabina. Ver Figura 22.

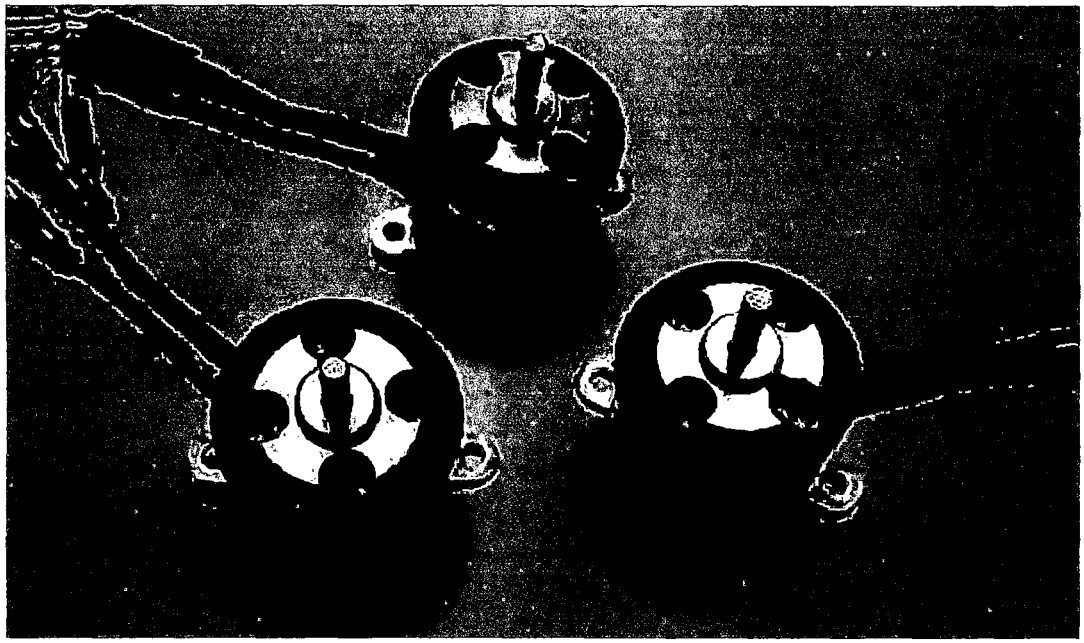
Figura 22: Estructura PVC porta-pilas



4.2.Ensamblaje de motores y hélices:

En el capítulo anterior se determinó utilizar motores brushless (Ver Figura 23), por la efectividad en su funcionamiento en contacto con el agua, teóricamente el circuito eléctrico de este tipo de motor no se vería afectado por la presencia de agua, por no haber contactos eléctricos abiertos como podrían ser las escobillas, pero el mayor problema sería la duración del mismo, si bien es cierto, teóricamente, no hay problemas al trabajar con el agua, estos motores tienen diferentes metales en contacto que con su inmersión en agua con sales disueltas (incluso el agua común lleva sales y cloro en disolución) provocarían pares eléctricos y corrosión. Por este problema, es que debemos aislar lo mejor posible a los motores, basándonos en experiencias previas con esta clase de motores, encontramos diferentes maneras de protegerlos del agua, como es la aplicación de aislantes como la silicona en spray, pegamento epóxico, y grasas no solubles en agua. Para nuestro caso usaremos la silicona en spray al ser más accesible, ya que podemos encontrarlo en cualquier establecimiento ferretero debido a que es muy usado como lubricante y por su capacidad de impermeabilización y protección en piezas de automóviles.

Figura 23: Motores brushless y soportes.



Para el sistema de propulsión, usamos3 ventiladores de microprocesador que se utilizan en tarjetas madres como hélices, los cuales desmontamos y adaptamos con piezas en acrílico para lograr que se sujeten al rotor de los motores de la manera más estable y segura posible, se eligieron los ventiladores de estructuras más gruesas y fuertes, ya que algunos de los modelos al ser retirados se rompían fácilmente. La estructuras finales con las hélices anteriormente seleccionadas se observan en las Figuras 24 y 25, los motores y hélices ya instalados en el robot.

Figura 24: Hélices y motores de desplazamiento horizontal

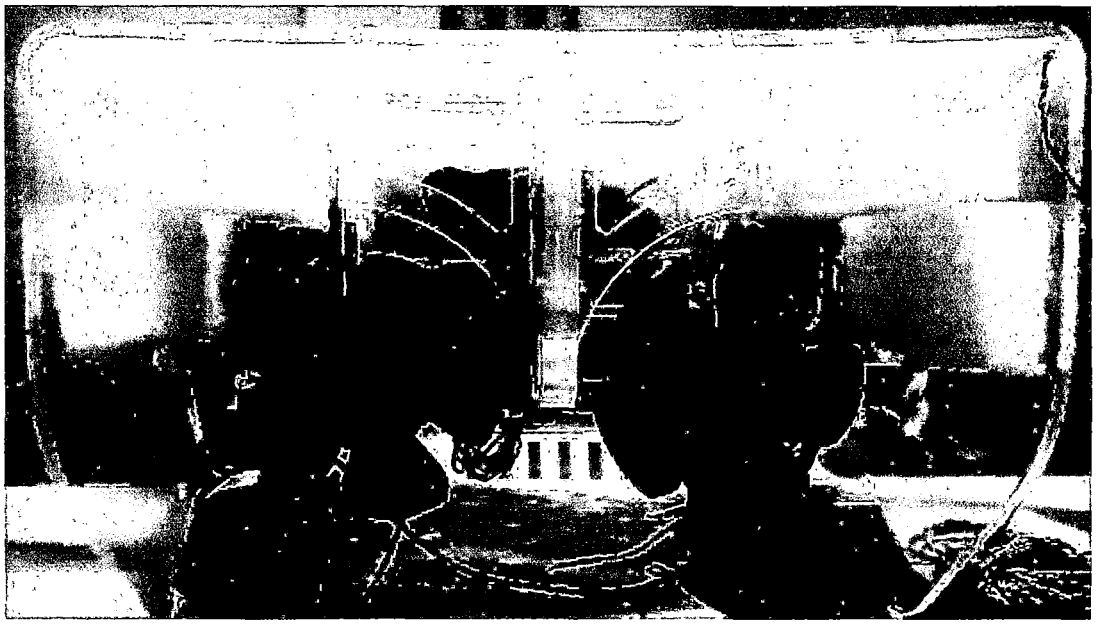
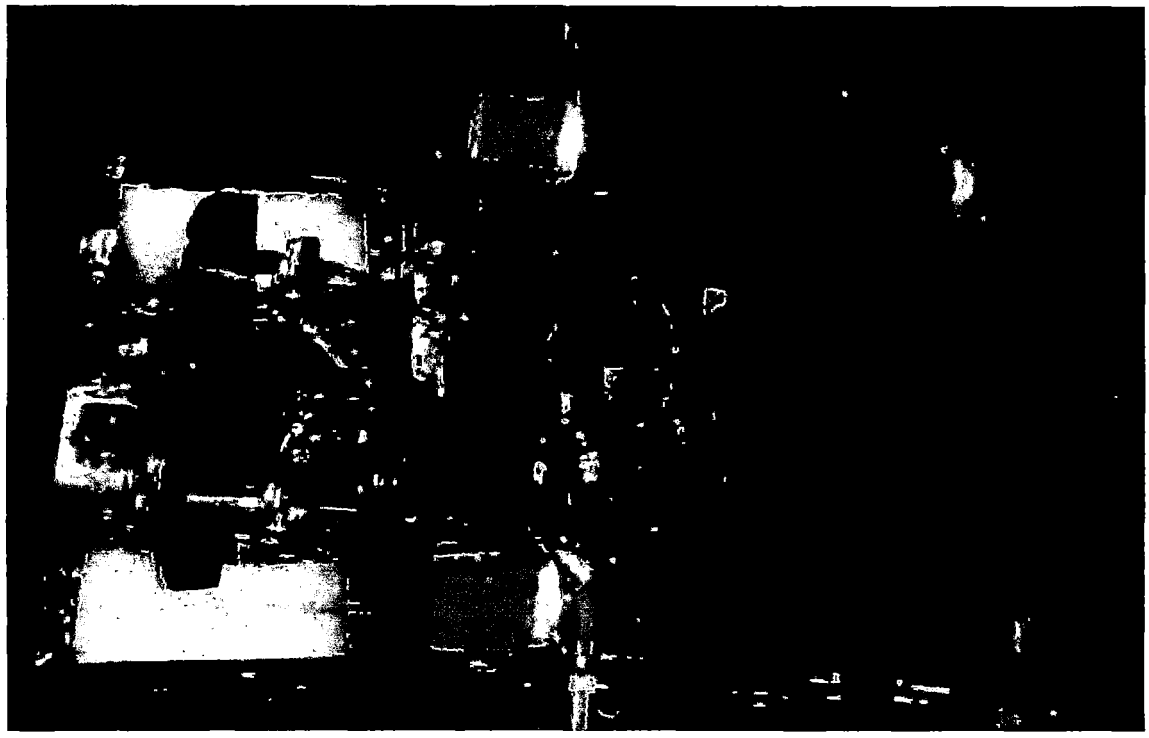


Figura 25: Hélice y motor de desplazamiento vertical

Se aseguran los motores con sus bases a la estructura diseñada para el tamaño exacto de las bases con pernos y se sueldan los cables de la manera más apropiada para ser guiados hasta dentro de la cabina donde se encontrará el cerebro del robot. Ver figura 26.

Figura 26: Vista de abajo del robot



4.3.Instalación de dispositivo de adquisición de datos:

La cámara modelo Logitech c920 llevará un soporte que tendrá un orificio en el centro de tal manera que permita total visibilidad al lente de la cámara y también nos facilite colocar los paneles de led de alta luminosidad a los dos extremos, los cuales servirán de apoyo cuando el robot se encuentre en lugares como poca luminosidad. Como se observa en las Figuras 27 y 28.

Finalmente, la cámara será instalada en el interior de la cabina procurando ubicarla en el centro para mayor visibilidad. La estructura será adherida usando pegamento epóxido, el cual asegura adecuadamente la cámara al cilindro y al mismo tiempo permite ser retirada por si en algún momento sea necesario separar la cámara para revisiones o cambios. Ver figura 29.

Figura 27: Cámara Logitech c920 y estructura de acrílico

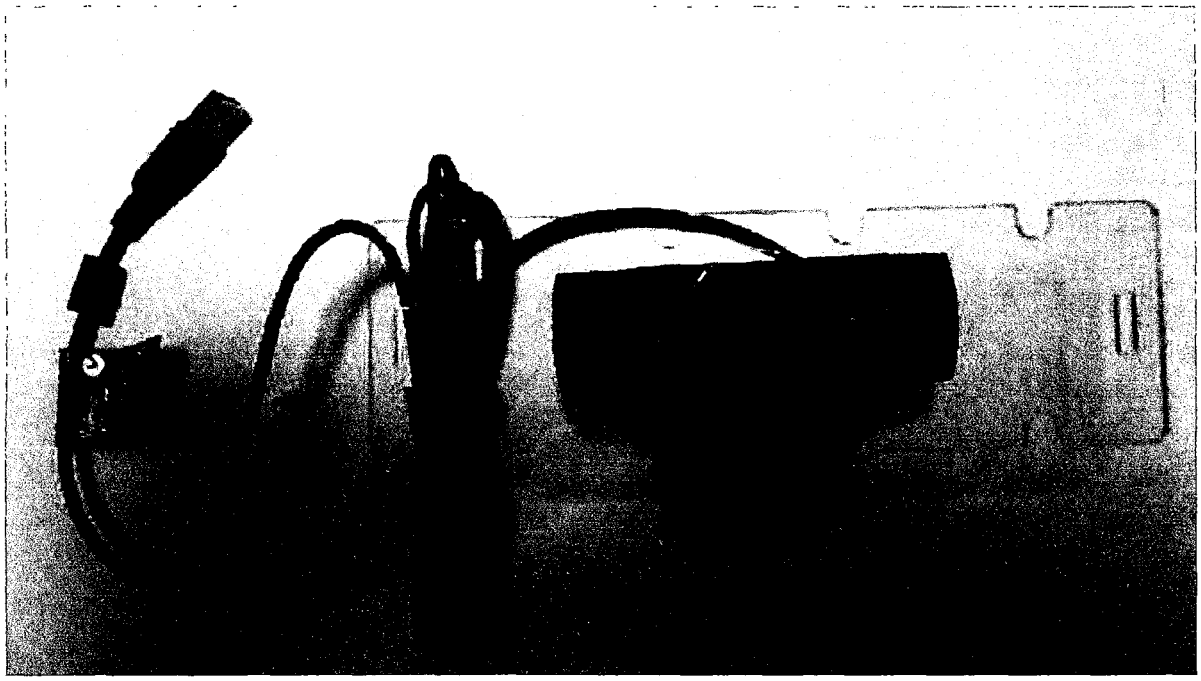


Figura 28: Paneles de led ensamblados a la estructura de acrílico.

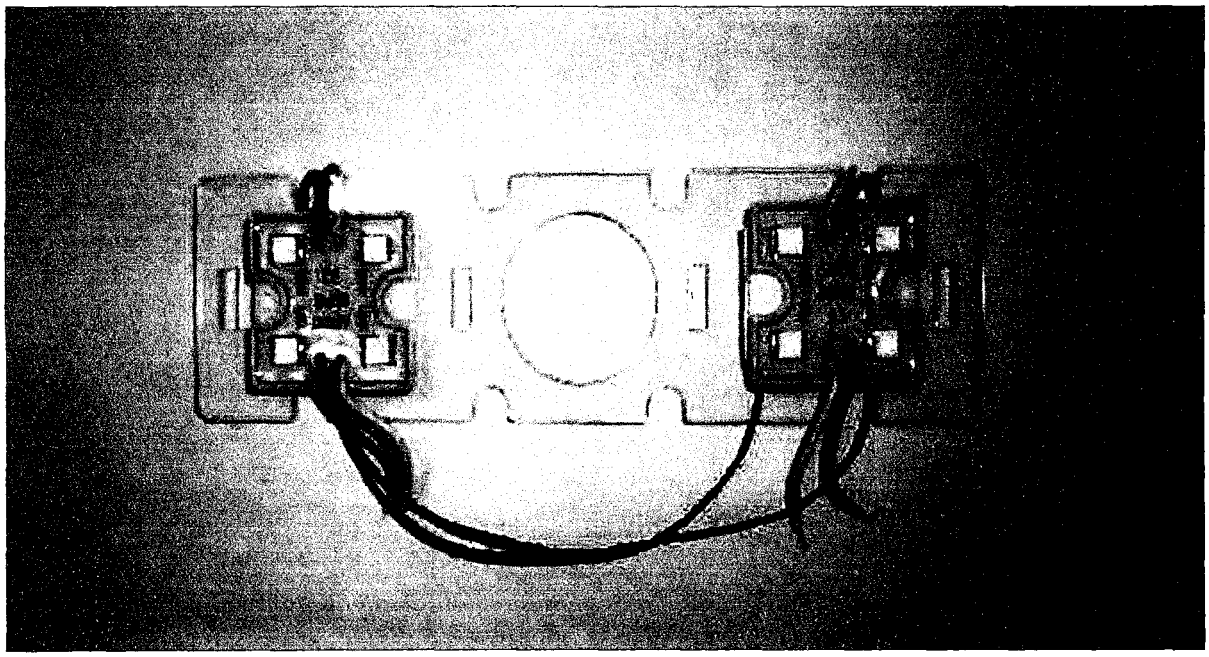
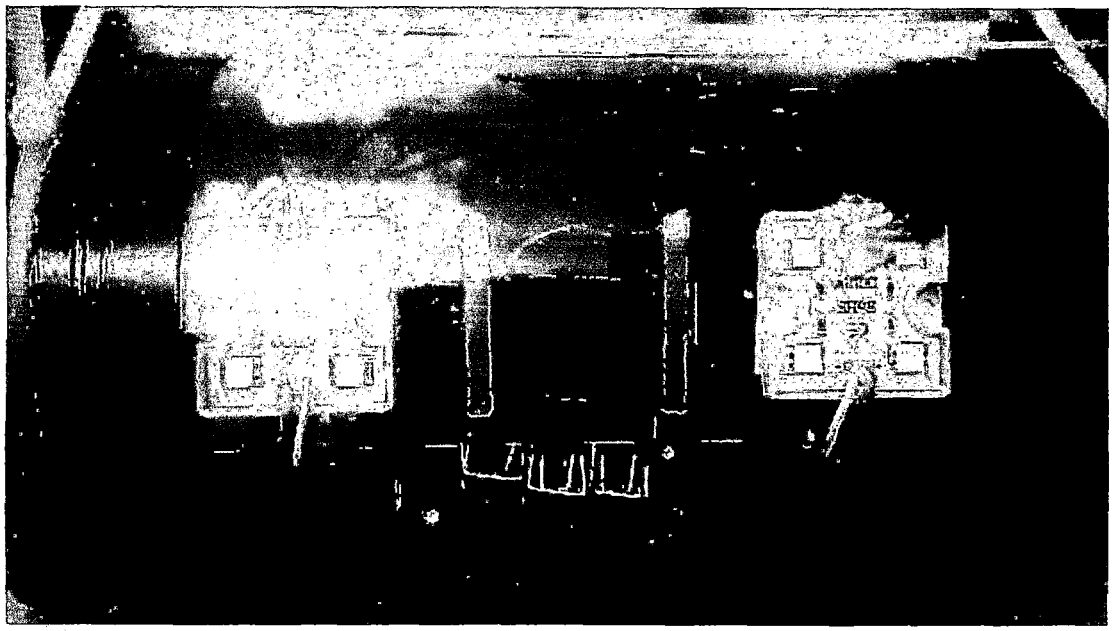


Figura 29: Ubicación cámara en la cabina.



Estos paneles trabajan a 12 voltios y tendrán que ser activados por una señal proveniente de tarjeta Beaglebone para lo cual se utiliza un transistor configurado en modo interruptor, con el circuito diseñado en el capítulo anterior se diseña la placa y se adecua con la demás circuitería de la mejor forma para que el tamaño de toda la placa posibilite el ingreso en la cabina sin problemas.

4.4.Ensamblaje de circuitería:

A partir del diseño del circuito de interfaz de la tarjeta Beaglebone procedemos a materializarlo en una placa de fibra de vidrio En esta placa está incluida el sistema de alimentación, el transistor en modo interruptor, también las conexiones de puerto de las tarjeta Beaglebone; los conectores espadines están acotados para el tamaño exacto de la tarjeta, de manera que puedan acoplarse. Ver Figura 30.

Los circuitos de comunicación (Ver Figura 31) se colocarán de acuerdo a la posición de la entrada Ethernet de la tarjeta Beaglebone para que el cable de conexión sea lo más corto posible. Los ESC's serán instalados al final, se tendrá en cuenta que sus

cables se coloquen en una posición adecuada junto a los cables de los motores y la batería. Ver Figura 32.

Figura 30: Circuito adecuado a la tarjeta Beaglebone

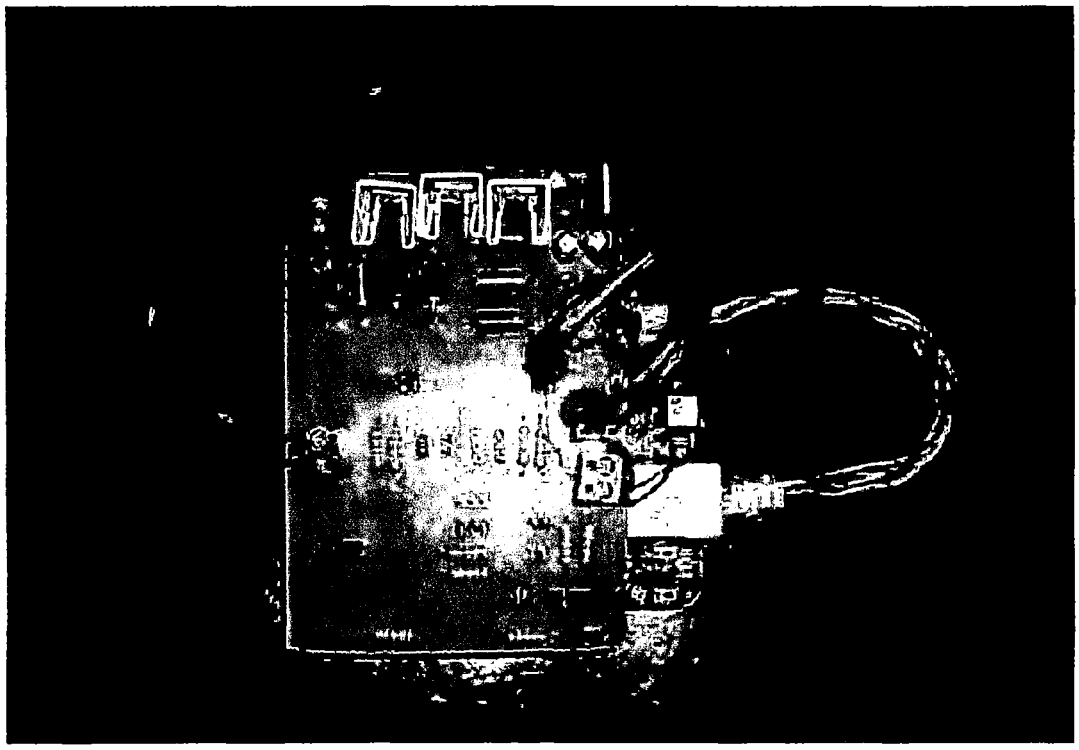


Figura 31: Circuito de comunicación PLC

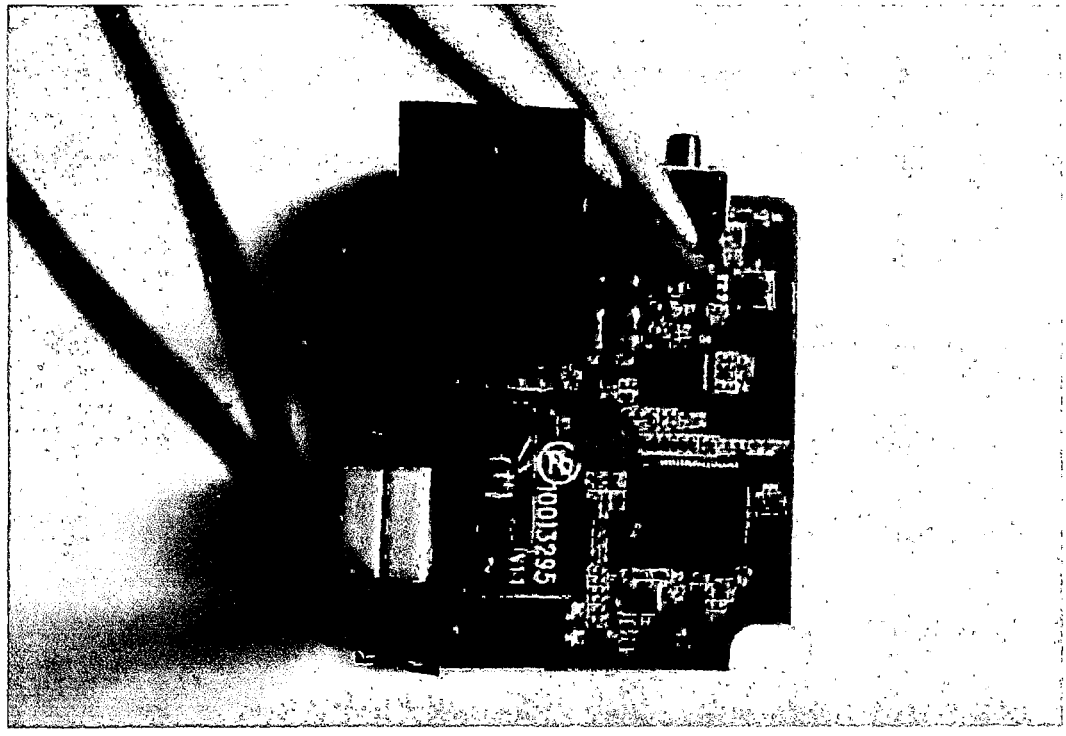
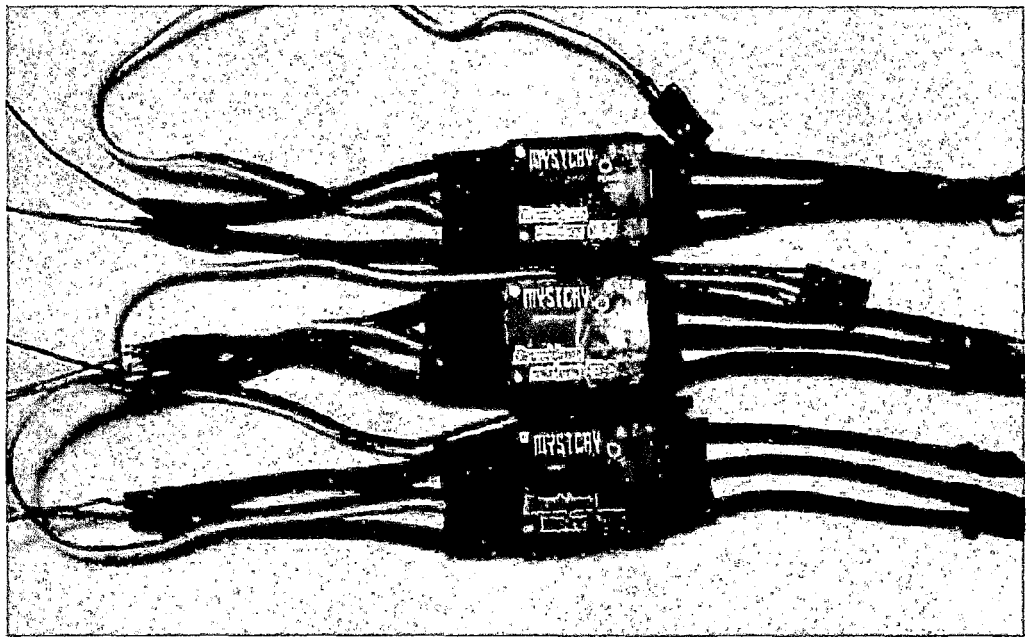


Figura 32: Electronic Speed Control (ESC's)



4.5.Experimentos y resultados:

En esta etapa del proyecto, al haber finalizado el ensamblaje del robot, debemos cerciorarnos de que el sistema de control, de potencia y de adquisición de datos estén funcionando correctamente, de igual manera también asegurarnos de la total impermeabilidad de la estructura a fin de no dañar ningún circuito electrónico.

Al tener todo listo para la pruebas en agua, realizamos la búsqueda de un lugar adecuado para estas pruebas, debemos encontrar un lugar de dimensiones adecuadas para el correcto funcionamiento del robot.

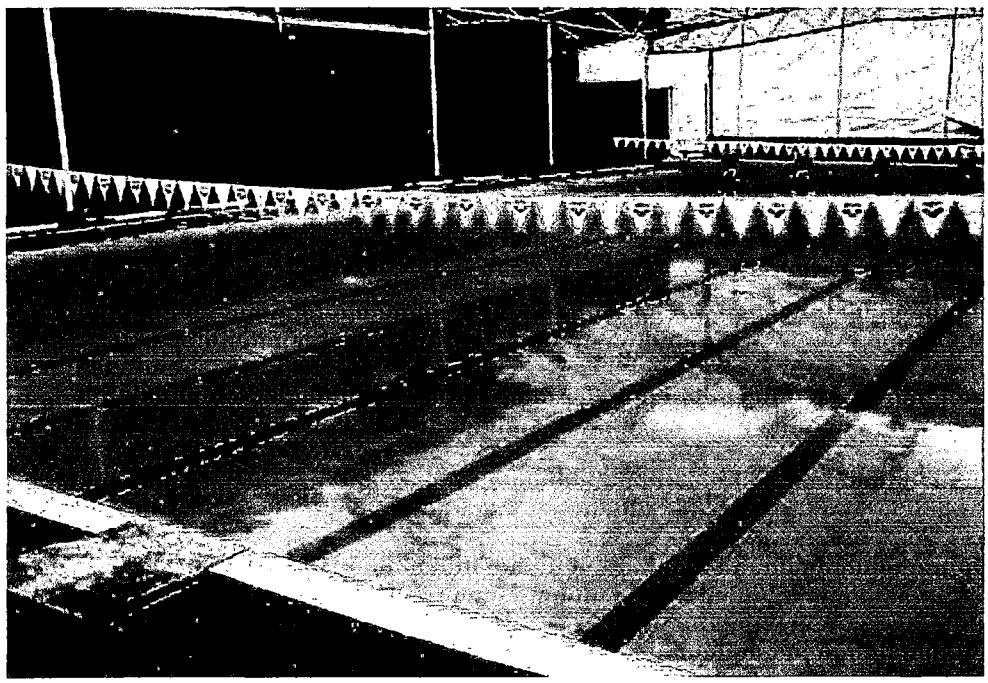
4.5.1. Condiciones experimentales:

4.5.1.1. Ambiente:

En la etapa de experimentación fue bastante complicado encontrar un lugar apropiado para las pruebas que se necesitaban hacer, por esta razón se decide hacer las primeras pruebas en una piscina armable. Después de una intensa búsqueda, se encontró una establecimiento con una piscina donde permitieron efectuar las

pruebas con el robot, es aquí donde realizaremos las respectivas grabaciones para la demostración de esta etapa. Ver figura 33.

Figura 33: Piscina para experimentación final



4.5.1.2. Condiciones externas:

Debido a que las primeras pruebas (en la piscina armable) se realizaron en exterior, era casi imposible controlar factores tales como la iluminación, por esto las pruebas se realizaron desde temprano hasta cierta hora que empezaba a oscurecer. Las pruebas finales fueron en un solo carril de la piscina de la Figura 33, debido a que las piscina estaba en funcionamiento y abierta al público, esto también provocó movimiento en el agua lo cual no permitió estabilizar el robot por completo.

4.5.2. Experimentación:

4.5.2.1. Impermeabilidad de la cabina y sistema de alimentación:

4.5.2.1.1. Objetivo del experimento:

Verificar la impermeabilidad total de la cabina principal una vez instalados en interior la circuitería, cámara y tarjetas, de igual manera se hará para las baterías del sistema de alimentación, las cuales están dentro de los portapilas diseñados.

4.5.2.1.2. Criterios de éxito:

Consideramos exitoso este experimento cuando no haya ingreso de agua por ninguna de las tapas de la cabina y de los portapilas, hasta la presión máxima ejercida en el fondo de la piscina.

4.5.2.1.3. Experimentos:

Se realizan las primeras pruebas en la piscina armable de longitud 4 metros de largo y 2 de ancho, y 1 metro de profundidad. Primero se tapa uno de los lados del cilindro asegurándolo con silicona, en la superficie no observamos ningún problema, pero al introducir más el cilindro identificamos el ingreso de agua, se retiró el agua con cuidado de no humedecer la circuitería y se buscó posibles entradas de agua, las cuales rellenamos con silicona, de esta manera se realizaron 4 pruebas y no se logró impermeabilizar por completo la cabina utilizando silicona, si bien es cierto cada vez había menos ingreso de agua, era necesario protegerlos a su totalidad y nos percatamos que la silicona no pega adecuadamente el acrílico al ver que sin importar la cantidad que usemos, ésta se despegaba fácilmente, es por esto que se recurre a utilizar juntas tóricas (O-

ring), estas juntas son muy utilizadas para asegurar la estanqueidad de fluidos, por ejemplo en cilindros hidráulicos y cilindros neumáticos, como también en equipamiento de submarinismo acuático. Por lo general, se encuentra en equipos para impedir el intercambio de líquidos o gases en las uniones entre piezas desmontables. Después de incluir esta protección nos percatamos que no era suficiente ya que se podían notar pequeños orificios donde posiblemente entre el agua. A esta etapa se decidió tapar por completo uno de los lados, utilizando un poderoso pegamento, soldimix, el cual requería bastante tiempo para llegar a pegar en su totalidad el cilindro, se probó bajo el agua este lado y se logró el objetivo al no tener entrada alguna de agua. para el otro extremo, el cual debía ser una parte que se pueda abrir y cerrar fácilmente, por este motivo, se le incluyo teflón y se le agregó vaselina, al realizar las pruebas nos admiramos al ver que la vaselina y el teflón lograron sellar por completo la cabina.

Para el portapilas se usó teflón y para asegurar silicona la cual pego sin ningún problema, se rellenó con pegamento soldimix el agujero para el paso de los cables y se pudo impermeabilizar sin inconvenientes en el primer intento. En la Figura 34 podemos apreciar en robot trabajando en la mitad de profundidad sin problemas de ingreso de agua.

Figura 34: Prueba de impermeabilización

4.5.2.2. Funcionamiento de motores bajo el agua:

4.5.2.2.1. Objetivo del experimento:

Verificar el correcto funcionamiento de los tres motores brushless con las hélices ya ensamblados bajo el agua.

4.5.2.2.2. Criterios de éxito:

Este experimento será considerado exitoso cuando los tres motores y sus hélices funcionen correctamente, probando sus velocidades máximas y mínimas, y así comprobar que los motores brushless pueden ser una opción efectiva para aplicaciones robóticas submarinas.

4.5.2.2.3. Experimentos:

El experimento se enfocó en la inmersión de los motores en el agua, antes de esta prueba se usó silicona en spray para protegerlos de la corrosión, se trató de cubrir todas las partes del motor con la silicona. Se conectaron a los ESC y éstos, se conectaron a la unidad de control, también se alimentó todo el sistema con las baterías

totalmente cargadas. Los tres motores ya atornillados a la estructura se sumergieron en el agua y primero se probó cada uno, luego dos al mismo tiempo y al final los tres, los motores encendidos fueron ubicados a diferente profundidad y se varío su velocidad, los motores respondieron de la forma esperada, esto se realizó durante 20 minutos, y en el tiempo de prueba no se encontró ningún problema. Al siguiente día se realizó la prueba durante 30 minutos y la prueba también fue igual de satisfactoria. El funcionamiento de los motores en el agua superó las expectativas, pero se decide cambiar la estructura base del motor por un acrílico de mayor grosor debido a la fuerza que ejercen estos al girar a mayor velocidad. En las Figura 35 y 36 se puede observar las imágenes captadas durante la prueba de motores.

Figura 35: Prueba de motores

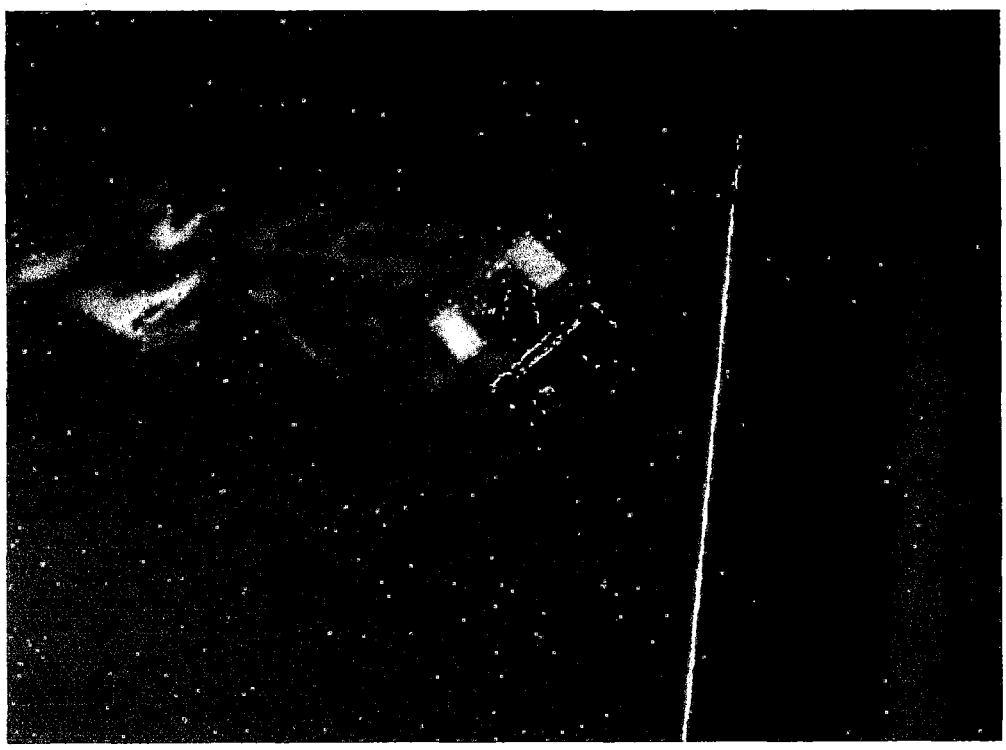
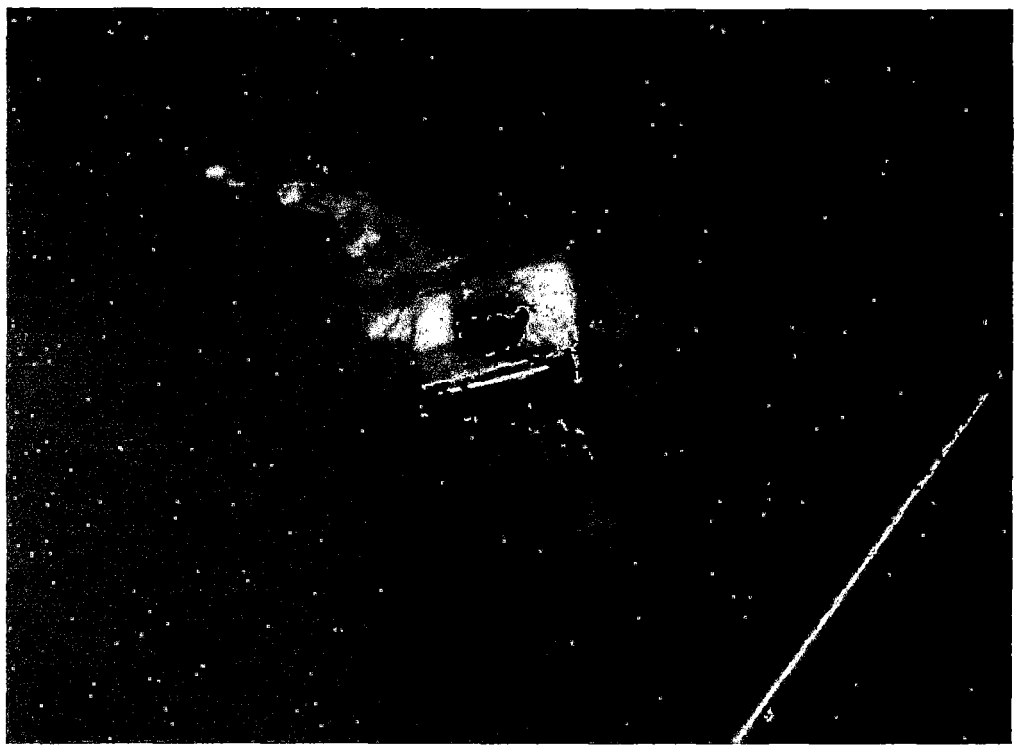


Figura 36: Prueba de motores 2



4.5.2.3. Emergerse, sumergirse y cambiar de dirección:

4.5.2.3.1. Objetivo del experimento:

Verificar el correcto desplazamiento del robot en el agua a través de los comportamientos básicos: emergerse, sumergirse y cambiar de dirección.

4.5.2.3.2. Criterios de éxito:

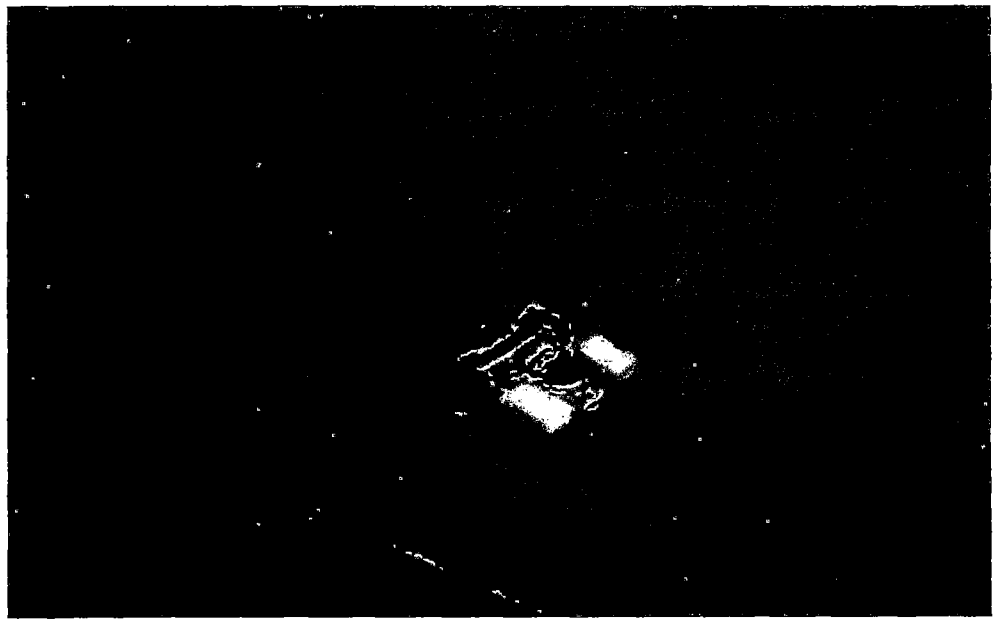
Se considera que esta prueba se realizó exitosamente si el sistema de propulsión comandado por la unidad de control logra sumergir el robot hasta llegar al fondo de la piscina para después emerger a la superficie, del mismo modo se debe lograr cambiar de dirección.

4.5.2.3.3. Experimentos:

En esta etapa nos enfocaremos en la prueba de sumersión del robot, este comportamiento es el más complejo y el que exige un mayor esfuerzo del motor y su etapa de potencia. Fue complicado tener una completa estabilidad del robot debido a que habían personas en la piscina y generaban movimiento en el agua. Se realiza la primera prueba donde podemos observar dificultad del robot para poder sumergirse de una manera estable debido a los movimientos del agua. En la cuarta y quinta prueba, donde se procuró tener un menor movimiento del agua, verificamos mayor estabilidad durante el descenso del robot y se sumergió el robot en diferentes puntos de la piscina. Al mismo tiempo el robot pudo emerger fácilmente posicionándose en diferentes profundidades. El cambio de dirección se realizó de manera exitosa al poder girar a la derecha e izquierda sin inconvenientes. El desplazamiento horizontal también fue poco inestable debido al mismo motivo. Sin embargo, el robot cumplió las expectativas al poder desplazarse horizontalmente, sumergirse y emergerse a profundidades diferentes y en posiciones aleatorias. En la Figura 37 podemos observar una imagen captada de las muchas pruebas realizadas de emersión y sumersión y en la Figura 38 se proporciona una imagen de las pruebas de desplazamiento horizontal y cambio de dirección.

Figura 37: Prueba de emersión y sumersión

Figura 38: Prueba de desplazamiento horizontal



4.5.2.4. Proporcionar imágenes y video:

4.5.2.4.1. Objetivo del experimento:

Verificar la operatividad de la cámara y la imagen en la computadora, esto debe ser transmitido en tiempo real, también se desea grabar videos y tomar fotografías para poder almacenarlas en la computadora, se tendrá en cuenta también la calidad de imagen y la función del sistema de iluminación como apoyo en lugares con poca luz.

4.5.2.4.2. Criterios de éxito:

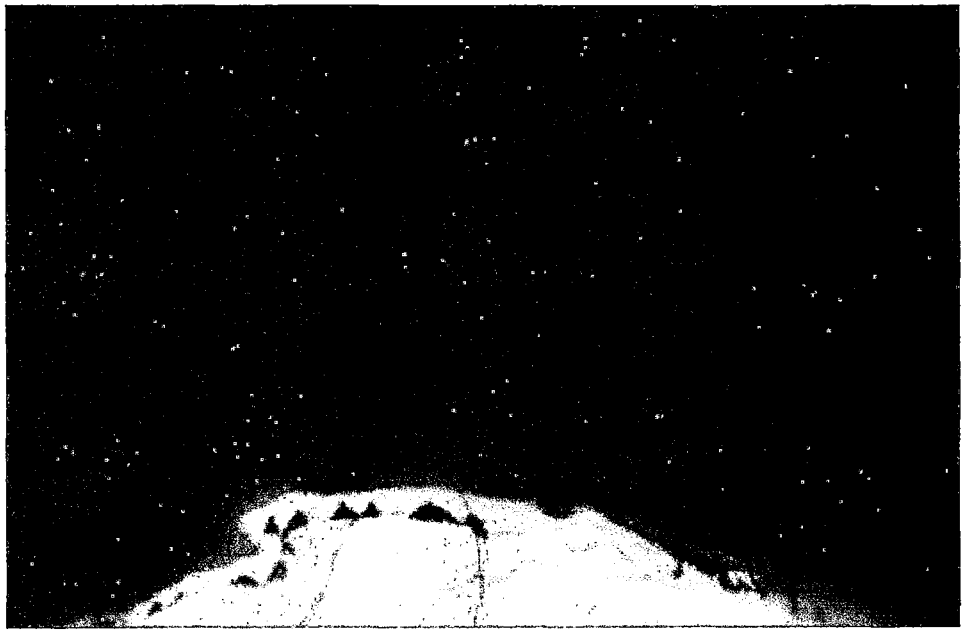
Este experimento se considera exitoso al obtener video de buena calidad y transmitida en tiempo real. También se desea poder grabar fragmento de videos y tomar fotografías, incluso con poca luz, apoyándonos con el sistema de iluminación.

4.5.2.4.3. Experimentos:

Podemos visualizar la imagen de la cámara a través de cualquier reproductor, como VLC o Security Home, a través de la comunicación Ethernet con la Tarjeta Beaglebone Black. Se decide grabar videos y tomar fotografías en posiciones aleatorias del robot. Primero vamos a verificar la operatividad de la cámara, sumergimos el robot hasta la mitad de la piscina y encendemos la cámara, cambiamos de posición el robot, observamos que la imagen se visualiza en la computadora de acuerdo a la posición del robot, lo que nos demuestra que la transmisión en tiempo real está funcionando correctamente. Probamos con el programa Security Home y VLC, como resultado podemos ver que el programa más

adecuado es el Security home, ya que tiene un menor tiempo de retardo. A través de este programa grabamos los tres videos y obtenemos las imágenes. Este experimento se realiza sin ningún inconveniente. En la Figura 40 se presenta una de las imágenes captadas desde la cámara del robot sumergiéndose en el agua, se observa cierta distorsión debido al movimiento del agua.

Figura 39: Imagen captada desde la cámara con el robot sumergido



CONCLUSIONES

Se realizó el diseño del prototipo de ROV a través de la ingeniería básica y de detalle teniendo como base el fundamento teórico. Se implementó un prototipo de vehículo operado remotamente con un sistema basado en microprocesadores, una cámara de alta definición que permitía obtener video en tiempo real a través del sistema de comunicación PLC.

El diseño y la implementación del prototipo de ROV no fueron tareas fáciles, debido a la poca experiencia que se tenía en el diseño de este tipo de sistemas y a los recursos limitados con que se contaba. Fue necesario realizar diferentes pruebas para poder lograr su impermeabilización total. A partir de esto, se concluye que el uso de acrílico para la estructura física del robot es adecuado, al menos para bajas profundidades, además del uso de pegamentos epóxidos, soldimix, teflón, y vaselina que permiten en conjunto que la estructura sea totalmente a prueba de agua.

También llegamos a la conclusión de que el presupuesto y los medios disponibles para la construcción de un prototipo de robot acuático como el aquí presentado son importantes, su orden es proporcional al equipamiento y materiales empleados durante la construcción. Sin embargo, se puede construir un robot como el nuestro a bajo costo.

Este proyecto constituye un prototipo para dar pautas a futuros mejoramientos e implementaciones con mayores recursos y tecnología.

BILIOGRAFÍA

1. Christ, R. y Wernli, R. (2014) The ROV Manual, Second Edition: A User Guide for Remotely Operated Vehicles. United Kingdom. Butterworth-Heinemann.

3 Bohm H. et Jensen V. (2003). Build Your Own Underwater Robot. Vancouver. Westcoast Words.

3. Ramirez C., C (1996). Seguridad Industrial: Un enfoque integral. México. Limusa.

4. Sohr, R. (2011). Chao Petróleo: El mundo de las energías del futuro. Chile. Penguin Random House.

5. Storch de Gracia, J. y Garcia, M. (2008). Seguridad industrial en plantas químicas y energéticas. España. Díaz de Santos S. A.

6. Moreno A., H. (2013). Modelado, Control y Diseño de Robots Submarinos de Estructura Paralela con Impulsores Vectorizados. Tesis Esc. Técnica superior de Ingenieros Industriales.

7. Hernández R., J. (2006). Diseño e implementación de un Vehículo Operado Remotamente para Exploración Marítima. Tesis Ins. Tecnológico de Veracruz.

6. Mahtani M., A. (2012). Diseño e implementación de una arquitectura de control de un ROV. Tesis Univ. de Las Palmas de Gran Canaria.

7. Madrid R., E. (2012). Sistema automático de estabilización para un vehículo submarino operado remotamente utilizando visión por computadora. Tesis Univ. Pontificia Universidad Católica del Perú.

8. Smith S., E. (2003). A Modular Control System for Remote Subsea Equipment. Tesis Univ. North Carolina State.

9. Vega A. (2013). Desarrollo de un robot sumergible no tripulado (ROV) para inspección de tuberías en el Canal de Panamá. Tesis Univ. Tecnológica de Panamá.

10. Bin A., A. (2009). Development of remotely operated vehicle (ROV) for underwater exploration. Tesis Univ. Malaysia Pahang.

11. Palacios G., A. (2007). Prototipo de robot acuático explorador. Tesis Univ. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

12. Chopitea C., J. (2010). Diseño y construcción de un prototipo de robot submarino para la inspección de los cascos de buques. Tesis Esc. Politécnica del Ejército.

REFERENCIAS EN LÍNEA

1. Electrónica digital y sistemas con microprocesadores, http://derekmolloy.ie/tag/beaglebone-black/

2. Sistemas Robóticos, http://platea.pntic.mec.es/vgonzale/cyr_0708/archivos/_15/Tema_5.3.htm

3. Beaglebone Black Librería Python, https://learn.adafruit.com/category/beaglebone

4. Beaglebone Black, http://beagleboard.org/BLACK

5. Beaglebone Black Datasheet, http://www.adafruit.com/datasheets/BBB_SRM.pdf

6. ESC (Electronic Speed Control), http://en.wikipedia.org/wiki/Electronic_speed_control

7. Comparación de sistemas de comunicación inalámbrica para robots móviles, http://www.utp.ac.pa/documentos/2014/pdf/08_Comunicacio_n_inala_mbrica_1.pdf

8. Comunicaciones inalámbricas subacuáticas, https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/14605/memoria.pdf?sequence=1

9. Power Line Communication, http://es.wikipedia.org/wiki/Power_Line_Communications

10. Transmisión de datos por la Red Eléctrica, http://www.victorgarcia.org/files/PLC-v2.0RC.pdf