

**DISEÑO DE UN PROTOTIPO ROV (REMOTELY OPERATED VEHICLE)
SUBACUATICO EXPERIMENTAL**

DAMIAN MADERO FONTECHA

JOHN JAIRO DURAN TRIANA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2012

**DISEÑO DE UN PROTOTIPO ROV (REMOTELY OPERATED VEHICLE)
SUBACUATICO EXPERIMENTAL**

DAMIAN MADERO FONTECHA

JOHN JAIRO DURAN TRIANA

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero mecánico**

DIRECTOR

CARLOS BORRAS PINILLA

Doctor, Ingeniero Mecánico

COORDIRECTOR

Ms. ALEXANDER MARTINEZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2012

A mis padres por su apoyo, no sería nada sin ellos, literalmente.

A mi padre Armando Madero Rincón quien me enseñó la importancia de la educación, la conciencia social, el instinto de curiosidad, además de demostrarme que se puede hacer mucho con poco. Cuando lo poco no es trivial.

A mi madre Marlene Fontecha Chacón por darme la santandereanidad que tanto nos gusta. Con su gran esfuerzo, valor y corazón fue un pilar sólido durante mi carrera. Fue ella quien me brindó el tinte que el dinero no puede comprar.

A mi hermano Jonathan Madero Agudelo, por estar a nuestro lado en los momentos más difíciles, siempre predispuesto a ayudar en lo necesario.

A mi tío Jorge Madero quien fue un gran soporte durante toda mi carrera, a su hijo Jorge Hernán, a mi abuela, mis tías, y en general a toda mi familia. Es mi familia quien ha estado siempre pendiente de mis metas. Mis primos y primas.

A mi compañero John Jairo Duran por su infinita paciencia, al Ingeniero Alexander Martínez por creer en nosotros y abrirnos las puertas del GIEP-ICP.

A los compañeritos de la UIS, Oscar Hernández, el hijo, chila, a Mayra Guarín, nos divertimos mucho, estudiamos juntos, muchas noches en vela estudiando, hablando o simplemente divagando. Ray, toy, Kelwin, Javier Agudelo, willi, Huérfano, Camilo sierra. Cristian Oliveros, Hansen, Lady Blue, Mónica Anteliz, a Lucy Milena Córdoba Moreno mi inmenso amor secreto, luz de mi vida aunque
QEPE.

Damián MaderoFontecha

Quiero dar gracias a mis padres Omar Duran Villamizar y Nancy Triana Núñez por estar siempre a mi lado en los momentos difíciles y también en estos instantes en donde puedo darme un respiro para seguir a adelante. Gracias por su amor, apoyo y entrega siempre incondicionales, gracias por sus consejos y sugerencias siempre imparciales y objetivos, gracias por su guía infaltable en cada situación que nos ha puesto la vida, gracias por ser lo que son personas de admirar y el mejor ejemplo de mi vida, gracias por permitirme ser lo que soy, su hijo y aprendiz.

Gracias a mis abuelos, a mis tíos, a mis hermanos, a mis primos a mi tía Sara y en general a toda mi familia ya que son piezas vitales del inmenso rompecabezas de mi vida y sin ellos la solución sería sin lugar a duda más difícil, con cada experiencia vivida, han enriquecido mi espíritu, mi voluntad y mi ser.

Gracias a mis compañeros porque con cada alegría han refrescado mi vida, a la universidad industrial de Santander por haberme adoptado como su hijo y a sus profesionales por haberme entregado su conocimiento.

Gracias a la vida porque me lo ha dado todo

John Jairo Duran Triana

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander.

Al profesor Carlos Borrás Pinilla por ser nuestro mentor.

Al Ingeniero Alexander Martínez quien fue un respaldo incondicional durante el proyecto.

A los grupos de investigación DICBOT y GIEP. Al convenio UIS-ICP.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION.....	24
ANTECEDENTES.....	26
MARCO TEORICO	37
1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	55
1.1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	55
1.2. JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA	56
1.3. OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO	57
1.3.1. Objetivos Generales	57
1.3.2. Objetivos Específicos	57
2. MODELO ESTRUCTURAL DEL ROV Y REQUERIMIENTOS DE DISEÑO.....	59
2.1. Clases de ROVs	59
2.2. Partes de un ROV	63
Extraído del libro THE ROV MANUAL	65
2.2.1. Marco	65
2.2.2. Módulo de flotabilidad.....	66
2.2.4. Equipo electrónico	68
2.2.5. Iluminación submarina	68

2.2.6. Sistema de control de un ROV.....	69
2.2.7. Control de Motores	71
2.2.8. El puente-H y la modulación por ancho de pulso (PWM)	72
2.2.9. Modelado de un ROV	73
2.3. CFD como una herramienta de modelado.	75
2.3.1. Desarrollo de los ROV's.....	77
2.4. ROV's al servicio de la industria petrolera	79
2.4.1. Versatilidad de los ROV's producción.	80
2.4.2. ROV durante la producción.....	81
2.4.3. Otras aplicaciones de los ROV's	81
3. MODELO MATEMÁTICO	82
3.1 Métodos.....	82
3.2. Dinámica del Vehículo.	83
3.3. Cinemática	83
3.4. Dinámica del cuerpo rígido	85
3.5. Hidrodinámica – Ecuaciones de movimiento	87
3.5.1. Fuerzas Hidrodinámicas	89
3.6 Masa adicional.....	90
3.7. Amortiguamiento Hidrodinámico	91

3.8. Fuerzas Hidrostáticas	92
4. CONSIDERACIONES DEL VEHICULO	93
4.1. Validación del software	93
4.2. Equipos del mercado	96
4.2.1. Caracterización de los equipos del mercado.....	98
4.3. Caracterización del ambiente de operación	98
4.3.1. Corrientes	98
4.3.2. Caracterización de los mares	99
4.4. Consideraciones del vehículo del proyecto	102
4.4.1. Configuración del sistema de propulsión	103
4.4.2. Dimensiones del vehículo	105
5. DESARROLLO DEL PROYECTO	108
5.1. Diseño de alternativas	109
5.1.1 Alternativa de diseño 1	109
5.1.2. Alternativa de diseño 2	112
5.1.3. Alternativa de diseño 3	114
5.1.4. Alternativa de diseño 4	117
5.1.5. Alternativa de diseño 5	119
5.1.6. Alternativa de diseño 6	122

5.1.7. Alternativa de diseño 7	124
5.1.8. Alternativa de diseño 8	127
5.1.9. Alternativa de diseño 9	129
5.1.10 Alternativa de diseño 10	131
5.2. ALTERNATIVA SELECCIONADA	135
6. DISEÑO EN DETALLE	142
6.1. Dimensionamiento del sistema propulsor	142
6.1.1. Requerimientos del sistema propulsor	142
6.1.2. Diseño del propulsor del proyecto.....	146
6.1.2.1. Selección de la hélice del proyecto	149
6.1.2.2 Pruebas con el set de hélices	152
6.1.2.3. Selección del moto-reductor	155
6.1.3. Diseño del sistema de encapsulado del propulsor	158
6.2. Configuración de los dispositivos periféricos	162
6.3. Flotabilidad y estabilidad del vehículo.....	164
6.3.1. Incidencia de la línea umbilical en el equipo	182
6.4. Control.....	184
6.4.1. Puente H	185
6.4.2. Puente H con L298N	187

6.4.3. Puente H con transistores MOSFET	190
6.5. Planos impresos	193
6.5.1. Etapa de Potencia	193
6.5.2. Etapa de control	194
6.5.3. Etapa de optoacopladores.	195
6.5.4. Puentes H.....	196
6.5.5. Plano final.....	197
7. CONSTRUCCION	198
7.1. MANUFACTURA DEL MARCO	198
7.2. MANUFACTURA DEL MODULO.....	204
7.3. MARCO	207
7.4. EL PROPULSOR.....	208
8. PRUEBAS	209
8.1. MODELO DE PRUEBA 1.....	209
8.2. MODELO DE PRUEBA 2.....	210
8.3. PRUEBAS A SUBSISTEMAS	211
8.3.1. PRUEBAS AL SISTEMA DE CONTROL EXPERIMENTAL	223
8.3.2. PRUEBA DE SELLADO.....	224
8.4. PRUEBAS PRELIMINARES	230

8.5. PRUEBA FINAL.....	234
9. CONCLUSIONES	237
10. RECOMENDACIONES.....	240
BIBLIOGRAFIA.....	241
ANEXOS	242

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Imagen de la campana de Edmund Halley.....	27
Figura 2. Dibujo del submarino tortuga	28
Figura 3. Submarino alemán SM U-1.....	29
Figura 4. Fotografía de Yves Le Prieur utilizando su sistema de buceo.	29
Figura 5. Imagen del sistema de buceo de Jacques Costeau.	30
Figura 6. Imagen del ROV Poodle.	30
Figura 7. ROV CURV siendo introducido en el agua.....	32
Figura 8. Imagen del ROV mini Snoopy.....	33
Figura 9. Imagen del Titanic a 4000 metros de profundidad.	34
Figura 10. Imagen del ROV Kaiko antes de sumergirse.	35
Figura 11. Clasificación de los vehículos submarinos.	38
Figura 12. Movimientos que puede realizar un ROV y sus grados de libertad.	44
Figura 13. Flotabilidad del ROV.....	45
Figura 14. Formas que puede tener un ROV.	46
Figura 15. Sedimentos que levanta un RVO inclinado.	47
Figura 16. Posición de las hélices de propulsión.	48
Figura 17. Dibujo de la resistencia que a de vencer un ROV.	50
Figura 18. Dibujo de un sistema Clump Weight.	53
Figura 19. Dibujo de un sistema con jaula.	54
Figura 20. Sistema TOP-HAT	54
Figura 21. Equipo representativo OCROV	59
Figura 22. Equipo representativo clase II Falcon DR de la empresa sueca SAAB	61
Figura 23. Equipo representativo ROV de trabajo pesado para empresa Sub Atlantic.....	62
Figura 24. Espiral de diseño de subsistemas de un ROV	64
Figura 25. Partes de un ROV.....	65
Figura 26. Marco del panther ROV y marco de un equipo de 150Hp respectivamente	66

Figura 27. Modulo de flotabilidad fundido en espuma rígida de poliuretano y mecanizado en una estación CNC.....	67
Figura 28. Absorción de la luz con la profundidad	69
Figura 29. Diagrama de funcionamiento del puente-H.	73
Figura 30. ROV.....	77
Figura 31. Análisis hidrodinámico para un cubo.....	94
Figura 32. Dirección y velocidad de las corrientes en el Caribe colombiano	99
Figura 33. Pycnoclina (gradiente de densidad), Haloclina (gradiente de salinidad) y Termoclina (gradiente de temperatura) del agua de mar	101
Figura 34. Centro de gravedad por debajo del centro de flotabilidad	105
Figura 35. Calculo del modulo de flotabilidad.....	106
Figura 36. Alternativa 1 modelada en CAD Solid Works	109
Figura 37. Análisis del flujo en la alternativa 1 COSMOSFLOWORKS	111
Figura 38. Alternativa 2 modelada en CAD Solid Works	112
Figura 39. Análisis del flujo en la alternativa 2 COSMOSFLOWORKS	113
Figura 40. Alternativa 3 modelada en CAD Solid Works	115
Figura 41. Análisis del flujo en la alternativa 3 COSMOSFLOWORKS	116
Figura 42. Alternativa 4 modelada en CAD Solid Works	117
Figura 43. Análisis del flujo en la alternativa 4 COSMOSFLOWORKS	118
Figura 44. Alternativa 5 modelada en CAD Solid Works	120
Figura 45. Análisis del flujo en la alternativa 5 COSMOSFLOWORKS	121
Figura 46. Análisis del flujo en la alternativa 5 COSMOSFLOWORKS	122
Figura 47. Análisis del flujo en la alternativa 6 COSMOSFLOWORKS	122
Figura 48. Alternativa 7 modelada en CAD Solid Works	125
Figura 49. Análisis del flujo en la alternativa 7 COSMOSFLOWORKS	126
Figura 50. Alternativa 8 modelada en CAD Solid Works	127
Figura 51. Análisis del flujo en la alternativa 8 COSMOSFLOWORKS	128
Figura 52. Alternativa 9 modelada en CAD Solid Works	130
Figura 53. Análisis del flujo en la alternativa 9 COSMOSFLOWORKS	131

Figura 54. Evolución del diseño del proyecto alternativa 1 vs alternativa 10 modeladas en CAD Solid Works.....	132
Figura 55. Análisis del flujo en la alternativa 10 COSMOSFLOWORKS	133
Figura 56. Evolución del diseño preliminar del equipo basado en su comportamiento frente a las líneas de flujo.....	134
Figura 57. Alternativa 10 seleccionada como diseño solución del proyecto.	137
Figura 58. Secciones transversales involucradas en la generación de los movimientos surge, sway y heave en la alternativa 10.	138
Figura 59. Valores mínimos de empuje requeridos para encontrar un estado de movimiento inminente.....	138
Figura 60. Comportamiento de las líneas de flujo en cada una de las áreas correspondientes a los movimientos surge sway y heave.....	139
Figura 61. Relación velocidad - Arrastre	140
Figura 62. Vista en explosión alternativa seleccionada.	142
Figura 63. Vista en planta de la configuración y distribución del empuje del equipo en SURGE.....	144
Figura 64. Detalle del sistema tipo trinquete para posicionar el vector de empuje en un ángulo requerido.....	145
Figura 65. Curvas de empuje y potencia mecánica de los propulsores.....	148
Figura 66. Data sheet del propulsor BTD-150 con hélices de $\varnothing=100$ mm.	149
Figura 67. Pruebas sobre las hélices.....	153
Figura 68. Hélice de prueba (Aspas planas)	154
Figura 69. Selección de sellos	160
Figura 70. Conectores con sus respectivos sellos.	162
Figura 71. Cámara con su respectiva capsula.	163
Figura 72. Posición dispositivos periféricos.....	164
Figura 73. Marco ROV	165
Figura 74. Soporte transversal del marco considerando el peso.....	166
Figura 75. Detalles del marco del ROV, considerando el peso.	167
Figura 76. Consideraciones de peso según software.....	168

Figura 77. Consideraciones de la masa del modulo de flotabilidad.....	171
Figura 78. Centro de masa del marco.....	173
Figura 79. Masa, volumen y área de superficie del marco.	175
Figura 80. Masa y volumen incluyendo 5 propulsores.	176
Figura 81. Adicionando soportes laterales. Calculo de masa.	177
Figura 82. Agregando dispositivos periféricos.....	178
Figura 83. Equipo final.....	180
Figura 84. Corrección lastre.....	181
Figura 85. Incidencia del umbilical en desplazamiento.	182
Figura 86. Incremento de la longitud.....	183
Figura 87. Controlador PIC16F876A.....	184
Figura 88. Montaje de prueba del controlador.....	185
Figura 89. Configuración de un Puente H con transistores.	185
Figura 90. Disposición de los transistores.....	186
Figura 91. Disposición de las piezas en la PCB.....	187
Figura 92. L298N.....	188
Figura 93. Esquema y diseño para PCB.....	189
Figura 94. Montaje para 2 integrados L298N.....	189
Figura 95. Conexiones para cada pin.	190
Figura 96. Configuración, especificaciones e imagen MOSFET.....	191
Figura 97. Esquema utilizado para los Puentes H.	192
Figura 98. 5 Puentes H en el recinto electrónico.....	192
Figura 99. Etapa de potencia.....	193
Figura 100. Etapa de control.....	194
Figura 101. Optoacopladores.....	195
Figura 102. Puente H con IRF1404.....	196
Figura 103. Esquema final.....	197
Figura 104. Análisis estructural.....	200
Figura 105. Simulación del material.....	201
Figura 106. Simulación cargas del impulsor.....	202

Figura 107. Simulación de cargas debido a la presión del agua.	203
Figura 108. Resultado final.	204
Figura 109. Espuma de poliuretano.	205
Figura 110. Análisis espuma de poliuretano.	206
Figura 111. ROV Marco en tubo de PVC.	209
Figura 112. ROV con tubos de PVC, prueba de inmersión.	210
Figura 113. ROV Marco de acrílico.	211
Figura 114. Pruebas sobre el primer impulsor.	212
Figura 115. Dinamómetro y Tacómetro generador de RPM's	213
Figura 116. Primera prueba condiciones impulsor.	213
Figura 117. Según variación diámetro de hélice.	218
Figura 118. En función del diámetro de la hélice.	218
Figura 119. Comparado con propulsor de UPB	219
Figura 120. Pérdida de potencia entregada por el motor.	219
Figura 121. Impulsor optimo.	221
Figura 122. Hélices de 80, 100 y 120 mm.....	222
Figura 123. Sistema de control implementado.	224
Figura 124. Montaje de prueba hidrostática.	225
Figura 125. Recinto electrónico.	227
Figura 126. Tipos de mandos para el control.	228
Figura 127. Cable Umbilical.....	229
Figura 128. Prueba de hermeticidad y encendido de motores.	230
Figura 129. Flotabilidad Neutra-positiva.....	231
Figura 130. Prueba de control.....	232
Figura 131. Velocidad del equipo.....	233
Figura 132.Fuente de poder del ROV	233
Figura 133. ROV final.	235

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Valores de arrastre generados por el software COSMOSFLOWWORKS...	94
Tabla 2 : Principales características de los equipos ROV observación con payload del mercado.....	97
Tabla 3: Valor de la fuerza de arrastre que experimenta la alternativa 1 por medio del software	111
Tabla 4: Valor de la fuerza de arrastre que experimenta la alternativa 2 por medio del software	114
Tabla 5: Valor de la fuerza de arrastre que experimenta la alternativa #3 por medio del software	116
Tabla 6: Valor de la fuerza de arrastre que experimenta la alternativa No.4 por medio del software.....	119
Tabla 7: Valor de la fuerza de arrastre que experimenta la alternativa No.5 por medio del software.....	121
Tabla 8: Valor de la fuerza de arrastre que experimenta la alternativa 6 por medio del software	124
Tabla 9: Valor de la fuerza de arrastre que experimenta la alternativa 7 por medio del software	127
Tabla 10: Valor de la fuerza de arrastre que experimenta la alternativa 8 por medio del software	129
Tabla 11: Valor de la fuerza de arrastre que experimenta la alternativa 9 por medio del software	131
Tabla 12: Valor de la fuerza de arrastre que experimenta la alternativa 10 por medio del software.....	134
Tabla 13: Componentes y arrastre total generados por el CFD para cada una de las alternativas.....	136
Tabla 14: tabla de valores de empujes, torques y potencias arrojados por SOLIDWORKS para las posibles hélices del proyecto.....	151
Tabla 15: Especificaciones del equipo moto-reductor del proyecto.....	157
Tabla 16. Variación del diámetro de la hélice.....	217

RESUMEN

TITULO: DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN PROTOTIPO ROV (REMOTELY OPERATED VEHICLE) SUBACUATICO EXPERIMENTAL*

***Damián Madero Fontecha
John Jairo Duran Triana*****

Palabras Claves: Impulsores, Flotabilidad, Estabilidad.

Resumen

Los Vehículos Operados Remotamente o ROV "*RemotelyOperatedVehicle*", son ampliamente utilizados en diversas industrias marinas, existen tres clases de ROV a saber, Tipo micro, Tipo inspección y Tipo Trabajo. Los elementos básicos que conforman el vehículo son: Estructura, impulsores, cámara filmadora, luminarias, umbilical, control electrónico y modulo de flotabilidad, no obstante, equipos más complejos incluyen brazos robóticos, sensores de profundidad, temperatura, velocidad, sistema GPS, brújula, sistemas hidráulicos para equipos de trabajo entre otros.

El siguiente texto ilustra el desarrollo de un ROV de tipo inspección con los elementos básicos para su funcionamiento, diseñado para una profundidad de 20 metros, con flotabilidad neutra – positiva y 4 grados de libertad. La hermeticidad garantiza la profundidad que se quiere alcanzar, el centro de gravedad por debajo del centro de flotabilidad dan la estabilidad del equipo y finalmente la disposición de los impulsores, los grados de libertad del vehículo.

La empresa internacional SaabSeaeye, es pionera en el desarrollo de vehículos operados remotamente de todo tipo, además de brindar diferentes servicios según las necesidades del cliente. A nivel nacional la Escuela Naval Almirante Padilla ha desarrollado 2 equipos de tipo inspección los cuales fueron construidos con tubos de PVC, tres impulsores tipo BTD-150, sensores y lógica programada entre otros dispositivos.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Carlos Borrás Pinilla.

ABSTRACT

TITULO: DESING AND CONSTRUCTION OF A PROTOTYPE ROV (REMOTELY OPERATDE VEHICLE) EXPERIMENTAL UNDERWATER*

***Damián Madero Fontecha
John Jairo Duran Triana*****

KEY WORDS: Thrusters, Buoyancy, Stability.

ABSTRACT

The Remotely Operated Vehicle or ROV, are widely used in various marine industries, there are three classes of ROV, micro, inspection and work. The basic elements that make up the vehicle are: Structure, thrusters, film camera, lights, umbilical, electronic control and buoyancy module, however, more complex equipment include robotic arms, depth sensors, temperature, speed, GPS, compass, hydraulic systems for work teams among others.

The next text show the development of a ROV of inspection with the basic elements for its operation, designed for a depth of 20 meters, with buoyancy neutral-positive and 4 degrees of freedom. The deal guarantees the depth to be achieved, the center of gravity below the center of buoyancy given the stability of equipment and finally the arrangement of the thrusters, the degrees of freedom.

The international company Saab Seaeye is pioneer in the development of Remotely Operated Vehicle of all kinds, addition to providing different services according to customer needs. Nationally the Escuela Naval Almirante Padilla has developed 2 equipments of inspection kind which were built with PVC tubes, three thruster kinds BTD-150, sensors, programmed logic and other devices.

* Work Degree

** Faculty Physic Mechanic.Mechanic Engineer School. Director: Carlos BorrásPinilla.

INTRODUCCION

La industria petrolera costa afuera presenta grandes retos de ingeniería en esta forma de extracción de hidrocarburos, trabajar a altas profundidades implica condiciones extremas de operación, específicamente bajas temperaturas y altas presiones. La imposibilidad de los buzos para alcanzar dichas condiciones, se refleja en la búsqueda de alternativas de solución que sean prácticas, económicas y muy seguras, y es allí donde a ingeniería juega un papel importante en el desarrollo de tecnología precisa que se ajuste a las necesidades.

Existen diversas formas de alcanzar grandes profundidades en el mar para la exploración, mediante: levantamientos batimétricos, sonar de barrido lateral, equipos autónomos sumergibles, y vehículos operados remotamente. Siendo estos últimos los más destacados en la obtención de grandes profundidades. El ROV por sus siglas en ingles *Remotely Operated Vehicle*, es como su nombre lo indica, un vehículo el cual es operado desde la superficie o desde un lugar remoto mediante un cable umbilical el cual es el encargado de transportar información en ambas direcciones. Desde superficie se envía la orden de movimiento al equipo y mediante una cámara filmadora instalada en el vehículo, se puede apreciar la respuesta del equipo.

Los ROV's extienden su campo de aplicación a la biología marina, seguridad militar naval y exploración petrolera. Son equipos muy versátiles que requieren de dinero, tiempo e investigadores dispuestos a construirlos.

En el presente texto se ilustra el procedimiento de diseño y construcción de un prototipo experimental que permite corroborar aspectos básicos de desplazamiento, flotabilidad y estabilidad. Los objetivos pretenden ser una

plataforma de investigación que dará soporte a la exploración petrolera costa afuera en el Océano Pacífico de Colombia.

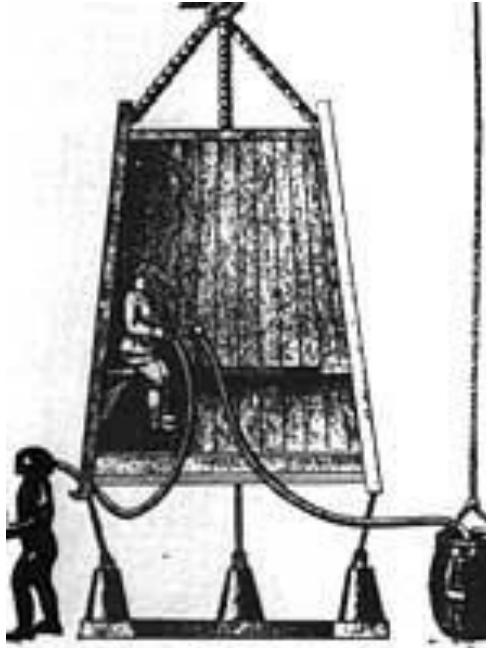
ANTECEDENTES

Desde tiempos antiguos el hombre ha tenido la necesidad de sumergirse en el mar para obtener recursos de sus profundidades. Por ejemplo en los tiempos antiguos el hombre buceaba para recolectar perlas o esponjas.

En el siglo IV a.C. se empiezan a intentar crear diversos mecanismos para aguantar más tiempo bajo el agua. Se cree que Alejandro Magno descendió en una máquina que fue, probablemente, una forma primitiva de campana de bucear; Aristóteles también mencionó inventos que permitían a los buceadores respirar bajo el agua.

En el año 1690 el británico Edmund Halley inventa una campana de madera forrada de plomo con el peso convenientemente distribuido para evitar que la campana vuelque durante la inmersión. La campana tiene una forma troncocónica y en la parte superior disponía de un vidrio para que se pudiera ver el exterior, mientras que en la parte inferior de ésta hay 3 cuerdas con un peso en cada extremo de 50 kilos para mantenerla fija en el fondo o en suspensión. Su innovación frente otras campanas anteriores es que esta campana tiene un sistema de alimentación de aire.

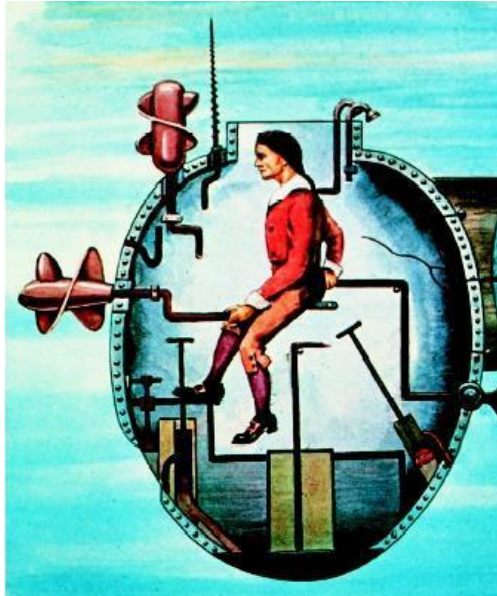
Figura 1. Imagen de la campana de Edmund Halley



Fuente: <http://upcommons.upc.edu/pfc/.pdf>

En 1776 el estadounidense David Bushnell se crea el primer submarino llamado tortuga (*Turtle*), era un submarino que sólo tenía capacidad para un tripulante, además este debía accionar con un brazo la hélice para avanzar bajo el agua.

Figura 2. Dibujo del submarino tortuga



Fuente: <http://upcommons.upc.edu/pfc/.pdf>

En 1879 el ingeniero Blume desarrolla el sumergible "El Toro" el cual es capaz de sumergirse a 12 metros de profundidad, y viajar a una velocidad de 3 nudos.

En 1906 se crea el SM U-1, el primer submarino de la armada alemana. Está diseñado para realizar misiones de 18 días y puede sumergirse hasta 30 metros.

Figura 3. Submarino alemán SM U-1.



Fuente: <http://upcommons.upc.edu/pfc/.pdf>

En 1934 Yves Le Prieur inventa un sistema que se basa en un tanque con aire a presión lo que da al buceador una total autonomía, el problema es que este circuito no tiene un regulador de demanda con lo que el aire no para de salir del tanque a la máscara y gran parte del aire es desaprovechado.

Figura 4. Fotografía de Yves Le Prieur utilizando su sistema de buceo.



Fuente: <http://upcommons.upc.edu/pfc/.pdf>

En el año 1942 Jacques Costeau y el ingeniero Emile Gagnan diseñan un sistema que permite suministrar aire comprimido al buceador con una ligera succión, por lo que tiene la ventaja que el aire solo sale de la botella cuando el buceador succiona aire por lo que el gasto de éste es mucho menor que en el sistema de Yves Le Prieur. Este sistema permitirá el acceso al fondo del mar con un bajo coste y dicho sistema se impondrá en el buceo.

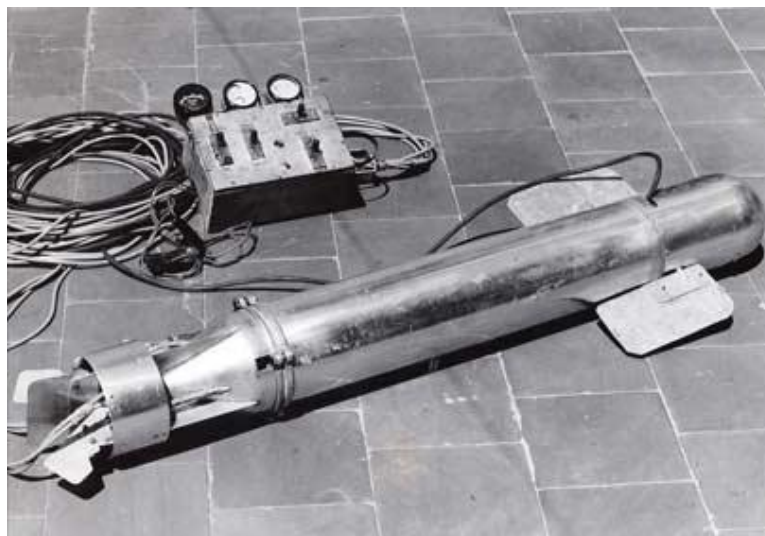
Figura 5. Imagen del sistema de buceo de Jacques Costeau.



Fuente: <http://upcommons.upc.edu/pfc/.pdf>

El primer ROV conocido como tal en la historia es el ROV llamado POODLE construido en 1953 por Dimitri Rebikoff. Este ROV fue utilizado principalmente para realizar investigaciones arqueológicas.

Figura 6. Imagen del ROV Poodle.



Fuente: <http://upcommons.upc.edu/pfc/.pdf>

Los primeros ROVs cabe decir que tenían problemas muy sencillos en comparación con los problemas que pueden tener actualmente, sus sistemas hidráulicos fallaban, si estaban mucho tiempo fuera del agua y expuestos al sol, la luz solar los dañaba, eran muy ruidosos por lo que eran ineficaces para operaciones secretas, eran difíciles de controlar y requerían de un mantenimiento constante.

A partir de la creación del ROV POODLE la marina de los Estados Unidos, empieza a interesarse en este tipo de robots y en poco tiempo pasa a ser la pionera en el desarrollo y avance tecnológico de los ROVs.

La marina de Estados Unidos empieza a emplear los ROVs para recuperar artefactos explosivos que se perdían en el fondo del mar en las fases de prueba, el primer ROV utilizado para estos fines fue el VARE XN-3 en 1961.

Los ROVs empezaron a tener una gran fama y demostraron su utilidad en cuatro incidentes importantes.

El primero fue en 1966, poco después de que la marina de los Estados Unidos se hubiera interesado por los ROVs, de modo que fue una gran oportunidad para comprobar la utilidad de éstos. El incidente sucedió en Palomares (España), al producirse la colisión de dos aviones de las fuerzas aéreas de los Estados Unidos, los cuales perdieron 3 bombas en tierra que fueron recuperadas rápidamente y una en el mar. Inicialmente se intentó encontrar la bomba con una búsqueda exhaustiva utilizando submarinos tripulados así como buzos, pero la bomba no fue hallada. Fue entonces cuando se empleó uno de los ROVs de la marina llamado CURV (*Cable Underwater Recovery Vehicle*), una versión mejorada del XN-3, el CURV pudo hallar y recuperar la bomba tipo H, con lo que se demostró la gran utilidad de estos robots. La bomba fue hallada a pocos kilómetros de la costa a una profundidad de 869 metros, una profundidad a la que ningún buzo podría haber llegado.

El segundo incidente sucedió en 1973 y se demostró nuevamente la gran utilidad de estos robots. En este caso para salvar a los dos pilotos de un mini submarino tipo Piscins III en Corck (Irlanda) a 480 metros de profundidad.

Figura 7. ROV CURV siendo introducido en el agua.



Fuente: <http://upcommons.upc.edu/pfc/.pdf>

A causa de estos 2 éxitos, la armada de los Estados Unidos invirtió más recursos en el desarrollo de los ROVs y creó vehículos más complejos. Se empezaron a desarrollar ROVs para ayudar en la recuperación de submarinos hundidos. A su vez paralelamente, la marina fue desarrollando ROVs cada vez más pequeños y electro-hidráulicos para la observación, el primero de éstos fue el ROV Snoopy.

Figura 8. Imagen del ROV mini Snoopy.



Fuente: <http://upcommons.upc.edu/pfc/.pdf>

A partir de 1974, la industria privada empezó a interesarse mucho por los ROVs hasta tal punto que casi todos los vehículos nuevos fueron financiados por ellos, la gran mayoría por el sector del petróleo, el cual vió que estos robots podían tener una gran utilidad en estaciones petrolíferas en alta mar. Dos de los primeros ROVs desarrollados para este tipo de trabajo fueron el VN-225 y el VN-150 desarrollados por la empresa HydroProducts en Estados Unidos. Fueron utilizados para acompañar a los buzos en las tareas de inspección. Además en esa época la industria eléctrica y electrónica mejoró mucho la fiabilidad de los componentes y redujo enormemente el tamaño de éstos con lo que los ROVs podían ser mucho más pequeños y mucho más fiables.

El tercer suceso importante ocurrió en 1985, cuando un avión Boeing 747-237b de matrícula VT-EFO llamado emperador Kanishka de la compañía Air Indian, se estrelló en el océano Atlántico a 175 Km de las costas de Irlanda mientras cubría la ruta Montreal-Londres. Los restos del avión fueron hallados en el lecho marino a una profundidad de 2000 metros. Gracias a un ROV llamado Escarabajo (*Scarb*) se consiguió extraer la caja negra del avión para investigar qué era lo que había sucedido, todo apuntaba a un ataque terrorista antes de recuperar la caja negra y

gracias a ella se confirmó. Además en los restos encontrados del avión también fueron hallados restos del artefacto explosivo que había sido utilizado. En este caso desgraciadamente no se pudo rescatar a nadie con vida y fueron 329 los fallecidos en el accidente.

Ese mismo año también gracias a un ROV se descubrieron los restos del Titanic, el cual reposaba en el fondo del mar desde 1912 a cuatro kilómetros de profundidad, este ROV se encargó de explorar y filmar el hallazgo.

Figura 9. Imagen del Titanic a 4000 metros de profundidad.



Fuente: <http://upcommons.upc.edu/pfc/.pdf>

A causa de estos 4 sucesos se demostró la gran utilidad de los ROV en diversos campos, lo que ayudó a que se invirtiera dinero en su desarrollo.

El siguiente avance por parte de los fabricantes de ROVs, fue crear ROVs de bajo coste para la observación de tuberías e instalaciones petrolíferas, ya que el alto precio de los ROVs hacía que no fueran muy viables para inspecciones rutinarias. Gracias a esto los ROVs también empezaron a ser utilizados por los departamentos de aduanas o la policía para inspeccionar los cascos de los barcos y por los científicos para investigaciones oceanográficas. Paralelamente se fueron desarrollando ROVs que fueran capaces de llegar a profundidades superiores, ya que cada vez había que buscar el petróleo en lugares de mayor profundidad, y las limitaciones físicas de los buzos (actualmente se ha conseguido bucear a 700 metros aclimatándose antes en estaciones submarinas) o la peligrosidad de sumergirse a tales profundidades hacían que el ROV fuera adquiriendo cada vez

más importancia, hasta llegar a convertirse en una herramienta fundamental para las operaciones petrolíferas. A causa de eso se crearon ROVs que podían llegar a profundidades de 3000 metros.

A partir de 1990 la marina de los Estados Unidos se volvió a interesar por los ROVs y consiguió que estos fueran capaces de llegar a profundidades de 6200 metros.

Poco después organizaciones japonesas como Mitsui y Jamstec crearon el ROV Kaiko el cual fue capaz de romper el record que habían conseguido los americanos sumergiéndose a una profundidad de 10900 metros, una profundidad que sólo se encuentra en las fosas de las Marianas. Con esto se demostró que cualquier cosa perdida en el mar puede ser recuperada o reparada, el único factor que puede hacer que no se haga es que los costes sean mayores que los beneficios.

Figura 10. Imagen del ROV Kaiko antes de sumergirse.



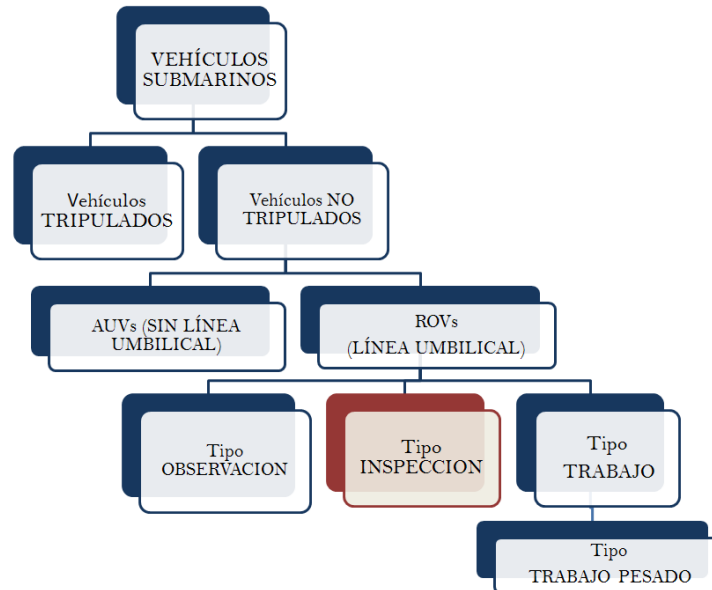
Fuente: <http://upcommons.upc.edu/pfc/.pdf>

Actualmente la tecnología ha avanzado mucho y muchos de los cordones umbilicales que se usan para enviar la información del ROV al centro de control en lugar de ser de acero están hechos de Kevlar. Otra novedad es que ahora los propios buzos pueden dirigir el ROV, de tal forma que pueden evaluar exactamente toda la situación mientras el ROV trabaja. También hay que decir que actualmente la mayor parte de los ROVs están equipados con cámaras de video para ver en todo momento lo que el ROV ve.

MARCO TEORICO

El control y conocimiento de su entorno ha llevado al ser humano a diseñar una cantidad de equipos que representen extensiones de sus sentidos en ambientes hostiles, en los cuales una intervención directa sería un riesgo elevado para su supervivencia. Uno de los ambientes más importantes en la vasta colonización del ser humano han sido las aguas, ya sean lagos, mares y ríos todos presentan secretos blindados por la oscuridad de las profundidades y la elevada presión que representan las inmersiones en busca de sus secretos. Pero la profundidad no es el único factor decisivo al momento de querer alcanzar un punto profundo, otras variables como temperaturas y ambientes contaminados son consideraciones suficientes para que el ser humano tome la decisión de reemplazar su imagen en estos lugares por maquinas que pudiesen desarrollar maniobras a distancia. Desde la aparición de los submarinos las profundidades se han presentado como un reto no solo por la curiosidad del ser humano al tratar de desenmarañar sus secretos sino también por parte de la expansión de la industria petrolera que ha llevado los campos de producción al mar (industria offshore) y es esta ultima la fuerza y apoyo del desarrollo de la tecnología de vehículos submarinos no tripulados.

Figura 11. Clasificación de los vehículos submarinos.



Fuente: The ROV manual

Un vehículo de operación remota (ROV), es en esencia un robot submarino que permite a su operador permanecer en un ambiente seguro, mientras que el equipo desarrolla una tarea.

Un sistema ROV está compuesto de forma general por un vehículo, enlazado a una estación de control y operado en superficie por medio de una línea umbilical, un sistema para controlar la dinámica del tendido del cable, un sistema de despliegue y una fuente de alimentación de energía. Los ROVs se diferencian de otros equipos (autónomos y tripulados) por tener un grado de autonomía limitado es así que siempre obedecen las señales de un operador desde la distancia a través de un control remoto vía ondas de radio o línea umbilical o tether, la cual transporta la energía eléctrica y señales de mando desde superficie, además de retroalimentar al operador de señales de control provenientes del sistema de data sensorial que se encuentra ubicado en el vehículo, los sensores son necesarios

para poder monitorear las condiciones del medio en las que se encuentra el equipo.

Los vehículos operados remotamente pueden variar en tamaño desde equipos pequeños equipados simplemente con cámaras de video (eyeball) utilizados para la observación simple, hasta sistemas de trabajo complejos que puede tener varios brazos manipuladores, cámaras de vídeo, herramientas mecánicas y otros equipos. Por lo general, los ROVs operan en un estado de vuelo libre, pero algunos casos algunos vehículos utilizan el fondo como una pista y soporte para ejecutar maniobras.

Los robots submarinos o UUV (*Unmannedunderwatervehicles*) se pueden dividir en tres grandes tipos:

1- ROV: Los ROVs (*Remotelyoperatedvehicle*) son vehículos manejados por control remoto de forma directa. La energía además les llega a través del cable por lo que nunca se les gasta la energía, pero tienen como inconveniente que no son autónomos. Dentro de este apartado nos encontramos con dos tipos de ROVs:

a- Tele-operados: El operador va observando por las pantallas lo que el ROV ve, y va dándole unas pautas ya programadas de lo que debe hacer, como por ejemplo subir a tantos metros, u otras operaciones ya programadas, por lo que el ROV ya tiene predefinidas unas operaciones y el operador sólo se encarga de introducir qué operación debe realizar en ese momento.

b- Operados con mando a distancia: El operador dirige completamente al ROV con un joystick y ve en cada momento lo que está realizando el ROV por lo que el ROV no realiza ninguna operación de forma automática o programada.

2- AUV: Los AUV (*Autonomous underwater vehicle*) los cuales operan sin una intervención humana directa, y por lo tanto no están conectados mediante ningún cable a un panel desde el cual controlar el robot. Esto les da la ventaja de una autonomía total, algunos incluso se programan para que recorran grandes distancias y vayan recogiendo muestras del mar durante su recorrido. La principal desventaja es que estos robots no pueden realizar operaciones que requieran mucha energía ya que agotarían sus baterías rápidamente. Dentro de este apartado nos encontramos con dos tipos de AUVs:

a- Autónomos totalmente: Hasta que el robot no ha completado completamente la misión, ésta no puede ser modificada, los datos se recogen al finalizar la misión para la que ha sido programado en el caso de que sea necesario recogerlos.

b- Semiautónomos: El robot tiene predefinidas unas operaciones y a medida que las va realizando va transmitiendo los datos de estas operaciones, en función de los resultados obtenidos en dichas operaciones se puede cambiar la siguiente operación a realizar. El robot no dispone de una cámara que vaya mostrando las cosas en tiempo real.

3- Mixtos: Son robots los cuales tienen la capacidad de conectarse y desconectarse del cable umbilical. La principal ventaja de esto es que pueden ser autónomos, y en el caso que se requiera que hagan tareas que consuman mucha energía se conecta el robot al cable umbilical. De esta manera sus baterías se recargan y no se agotan. Al ser mixtos este tipo de robots pueden ser teleoperados, operados con mando a distancia, semiautónomos o autónomos.

Más adelante explicaremos para qué tareas suelen ser utilizados los ROVs y para que tareas suelen ser utilizados los AUVs.

FORMAS DE TRANSMISIÓN DE LA INFORMACIÓN.

En este apartado explicaremos la forma y el medio por el que un ROV transmite la información al centro de control.

El medio por el que se puede transmitir la comunicación entre el robot y la central de control puede ser de diversas maneras, éstas dependen de la distancia y el medio por el cual ha de viajar la información. Dependiendo de esto la comunicación se puede dar de las siguientes formas:

- Con cableado directo, ya sea de forma eléctrica o con fibra óptica.

- Comunicación acústica, puede ser con un módem digital o analógico bajo el agua.

- Por comunicación óptica mientras éste no se sumerja, ya que si se sumerge la comunicación quedará cortada.

- De radio frecuencia, mientras el vehículo está en la superficie o cerca de la superficie.

La forma que tiene de transmitir la información el robot al operador puede ser de las siguientes formas:

- Por telemetría: Se transmiten datos y/o video a través del cable umbilical, por radio frecuencia, acústica, óptica u otros medios. Pero con un cierto retraso, es decir primero los datos son recogidos en intervalos de tiempo por el robot y luego son enviados en esos intervalos de tiempo.

- Tele-Presencia: Se envía información de forma continua, el operador tiene la misma información que si estuviera dentro del vehículo.

- Control: Se carga y descargan las instrucciones que se han de realizar o se han realizado, antes y después de finalizar la operación o misión.

- Registros: Se descarga la información que se ha obtenido de la misión, es muy parecida a la anterior pero en este caso sólo se carga y descarga información no procedimientos a realizar. Por lo que la misión no puede ser modificada.

La gran diferencia entre los ROVs y los AUVs en la transmisión de información, energía y transmisión de datos, es que el ROV recibe la energía, su transmisión de datos y las ordenes a traves del cable umbilical. Mientras que el AUV no usa ningún cable umbilical.

Finalmente para concluir este apartado comentar que se ha intentado eliminar el cable umbilical de los ROVs y por lo tanto convertirlos en AUVs y hacer que transmitan por ondas de radio, pero a causa de la potencia cada vez más elevada que se ha requerido que tenga el ROV, y que el agua de mar dificulta la transmisión de las ondas de radio, el cordón umbilical sigue siendo el mejor método para controlar las maquinas que operan debajo del agua. Además en las operaciones en las que se ha de ir observando de forma inmediata las tareas que está realizando el ROV, sería imposible actualmente enviar tal cantidad de información a través de RF, ya que se requiere un gran ancho de banda para enviar dicha información. Y otras tecnologías como las acústicas tampoco dan la posibilidad de operar y ver en tiempo real lo que hace el ROV, en cuanto al control remoto (Radio Control) este solo es posible en el agua mientras que el vehículo está en la línea de visión del operador, una vez esta visión ha desaparecido ya no se controla el vehículo.

FORMAS Y FUNCIONAMIENTO BÁSICO DE UN ROV.

En este apartado explicaremos el funcionamiento básico de un ROV, aunque nos centraremos sobre todo en tres puntos importantes, la fuente de alimentación; el

grado de autonomía que el ROV tiene; y las comunicaciones con el vehículo y el centro de control. Hay que remarcar que la parte más crítica e importante es la comunicación entre el ROV y el centro de control. También comentaremos brevemente las formas típicas que tiene un ROV.

Aunque parezca que los ROVs no son muy hidrodinámicos y por lo tanto malgastan mucha energía a causa de ello, el caso es que mucha de la resistencia es generada por el cordón umbilical que conecta el ROV con el centro de control, por lo que contra más diámetro tiene el cable umbilical más resistencia se crea. Es por ese motivo por el que en los ROVs lo que se busca es más una forma útil de trabajo que una forma hidrodinámica.

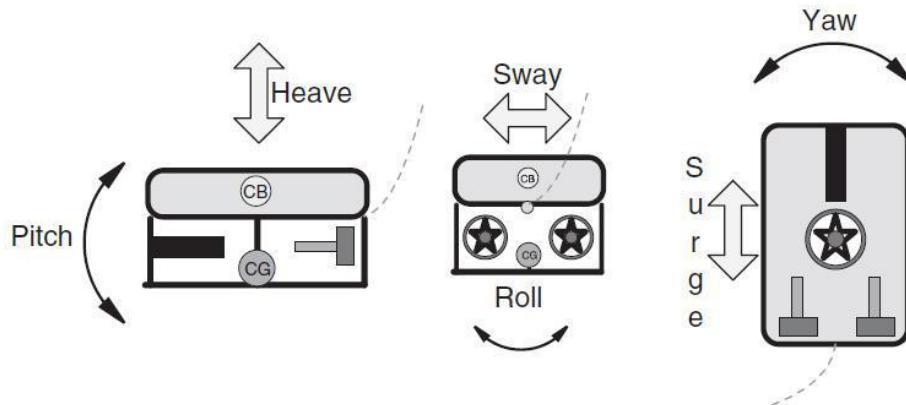
El hecho de que gran parte de la resistencia se genere en el cable umbilical, hace que contra más pequeño sea el ROV y menos energía requiera, el cable pueda tener un umbilical más fino y por lo tanto genere menos resistencia. Por lo que es en los ROVs pequeños donde la forma hidrodinámica del ROV adquiere importancia.

También es importante comentar que la gran mayoría de ROVs tienen propulsores en sus cuatro esquinas, por lo que si se hiciera hidrodinámico por un lado por otro no lo sería. El tamaño y la geometría de los ROVs dependerán también de las operaciones que éstos tengan que realizar.

ESTABILIDAD DEL ROV:

Los ROVs no están preparados normalmente para que se produzca momentos cabeceo y balanceo. El sistema del ROV está construido con un centro de flotabilidad más elevado que el centro de gravedad, para dar a la cámara que hay en el ROV la máxima estabilidad en los ejes laterales y longitudinales. Además el centro de gravedad y el centro de flotación se suele intentar que estén en el centro del vehículo, por lo que al estar el vehículo sumergido; el centro de gravedad y el centro de flotación alineados, en el caso de que el ROV se incline éste volverá a su equilibrio estático es decir volverá a su estado original.

Figura 12. Movimientos que puede realizar un ROV y sus grados de libertad.

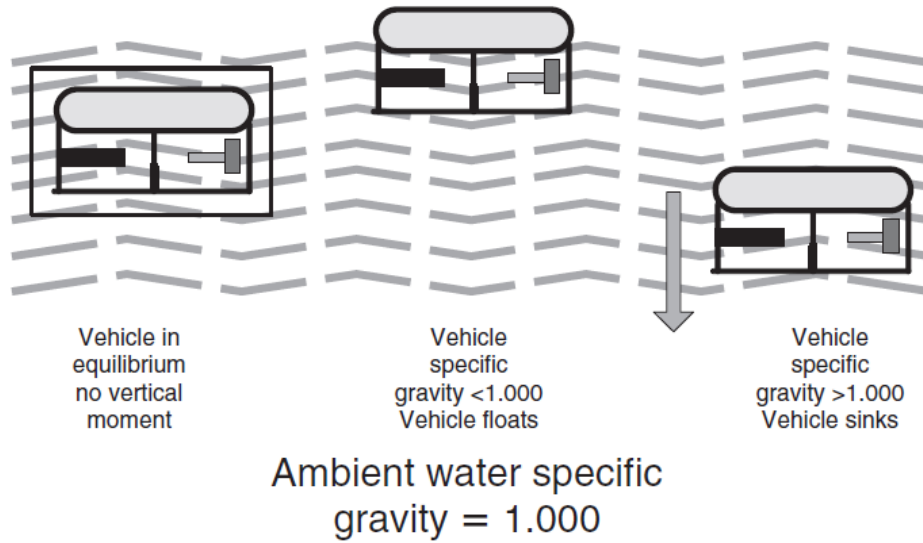


Fuente: The ROV Manual

En cuanto a la flotabilidad los ROVs tienen una flotabilidad positiva, aunque muy poca para que no haya que hacer una gran fuerza continuamente para ir hacia abajo. Tienen un poco de flotabilidad positiva para que en caso de avería eléctrica estos salgan a la superficie aunque sea lentamente, en el caso de los ROVs pequeños la flotabilidad positiva suele ser de unos 450 gramos mientras que en ROVs mas grandes es de unos 5 ó 7 Kg.

Al tener una flotabilidad positiva tan pequeña habrá que saber las condiciones de temperatura presión y salinidad del agua en las que el ROV opera, ya que esto variará la flotabilidad del ROV y puede hacer que la flotabilidad ligeramente positiva se convierta en negativa y en caso de producirse un fallo eléctrico no se pueda recuperar el ROV, o que se produzca una flotabilidad demasiado positiva y por lo tanto requerir mucha energía para llevar al ROV a las profundidades este último caso sería el caso de un ROV que normalmente opera en agua dulce y es utilizado para operar en agua salada.

Figura 13. Flotabilidad del ROV.



Fuente: The ROV Manual

En el caso de la salinidad, entre océanos ésta varía muy poco, por lo que un ROV diseñado para trabajar en un océano podrá trabajar fácilmente en cualquier otro océano.

Por otro lado la temperatura del agua sí que será un factor a tener en cuenta ya que no tendrá la misma viscosidad el agua del polo norte que el agua de las costas de Cuba, por lo que la potencia que requiere el ROV sí se verá afectada de manera importante en el caso de la temperatura del agua, el agua del polo norte será mucho más viscosa que el agua de las costas de Cuba. Esto es así ya que la viscosidad cinemática varía, por lo que si varía ésta, la potencia que requiere el ROV para desplazarse a través del agua también lo hará, lo que podría hacer que el ROV no fuera capaz de llegar a las mismas profundidades. (Anexo 1 tablas de viscosidad cinemática).

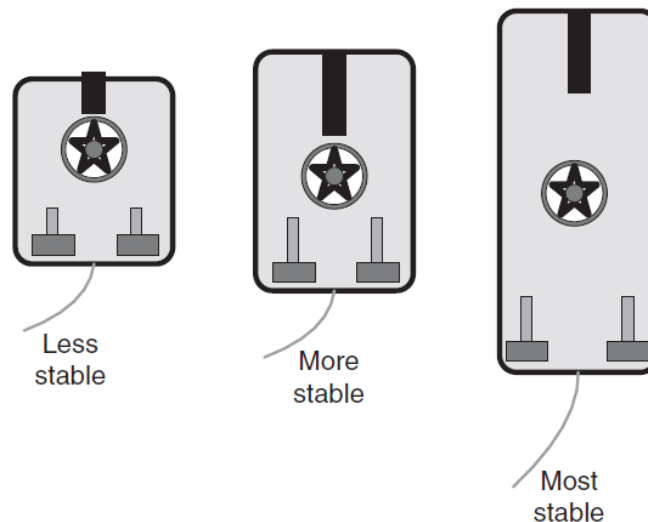
En el caso de pasar un ROV de agua dulce a agua salada será necesario introducirle al ROV un mayor lastre para que la flotabilidad positiva se vea reducida. Y en el caso de que fuera al revés sería necesario quitar lastre al ROV

de forma homogénea para que los centros de gravedad y flotabilidad estuvieran en el mismo punto que antes en los ejes longitudinales y transversales.

También hay que decir que a medida que el ROV se sumerge la densidad del agua cada vez es mayor, aunque en este caso la variación será mínima y se verá parcialmente compensada por la compresión de los espacios de aire del sumergible, por lo que este cambio de densidad no es muy importante. Este equilibrio dependerá de la cantidad de aire cerrado que haya en el ROV, siendo mejor un ROV con mucho aire dentro que un ROV con poco. Además contra menos aire tenga el ROV y más profundo se requiera ir, esta diferencia de densidad irá cobrando cada vez más importancia.

La hélice superior también es una parte fundamental de la estabilidad del vehículo, contra más grande sea la hélice vertical en proporción al ROV más alto estará el centro de gravedad de éste, por lo que más fácilmente se podrá producir el cabeceo y balanceo.

Figura 14. Formas que puede tener un ROV.

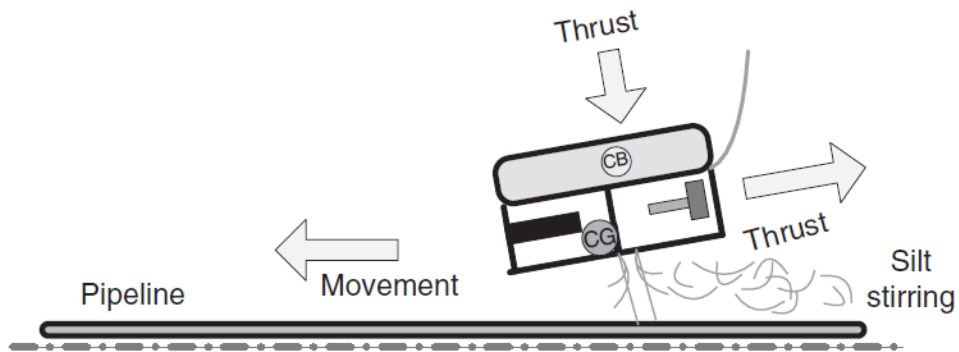


Fuente: The ROV Manual

Hay dos casos en los que es interesante que el centro de gravedad y el centro de flotación no estén alineados provocando así que el ROV esté inclinado hacia proa. El primero sería en el caso que se requiera la visión inclinada para la inspección de una tubería.

El segundo caso sería si el ROV tuviera que inspeccionar una tubería en el suelo. Si el ROV no estuviera inclinado, al moverse levantaría sedimentos a todo su alrededor ya que los propulsores de avance levantarían sedimentos en todas direcciones, además el propulsor vertical tendría que funcionar para ir alejándose del fondo marino levantando así más sedimentos, ya que al utilizar los propulsores de avance el ROV tiende a ir hacia el fondo y se ha de usar la hélice vertical, con lo que la inspección de la tubería o cable no sería posible, al estar inclinado se levantan menos sedimentos y estos van hacia la parte posterior del ROV con lo que la cámara puede inspeccionar mejor, y no hay tantos sedimentos que dificultan la visión.

Figura 15. Sedimentos que levanta un RVO inclinado.



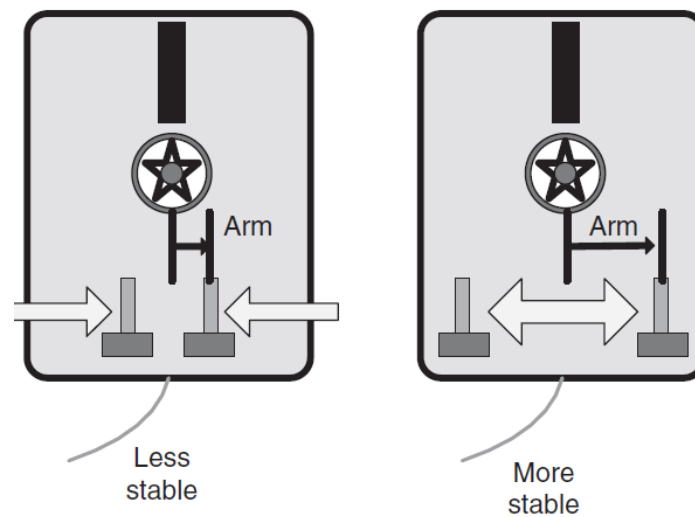
Fuente: The ROV Manual

PROPULSORES Y VELOCIDAD:

En cuanto a las hélices propulsoras, contra más en las esquinas estén más estabilidad darán al ROV, por lo que el balanceo será menor, por ese motivo la

mayoría de los ROVs tienen formas cuadradas, ya que al poseer hélices de propulsión en los cuatro costados estos son geoméricamente mucho más estables que si les hélices estuvieran en el medio. Y en el caso de sólo poseer dos hélices de propulsión éstas se separan lo máximo posible para que el balanceo mencionado anteriormente sea el mínimo y el adrizamiento sea muy rápido en el caso de producirse balanceo.

Figura 16. Posición de las hélices de propulsión.



Fuente: The ROV Manual

La relación óptima de eslora/manga en vehículos sumergidos para dar la mejor estabilidad se considera de 7:1, pero en los ROVs esto no sucede por diversos motivos. Entre ellos destaca, que no requieren una velocidad muy elevada, la ubicación de los propulsores (que normalmente están situados en cada esquina) y la necesidad de maniobrar en espacios reducidos muchas veces.

Contra más velocidad requiera el ROV, más importante será la correcta colocación de los propulsores.

Si se quieren velocidades de crucero altas tendremos el problema que al subir y descender el ROV se desestabilizará más, ya que sus propulsores estarán

colocados más en el centro para que este sea más hidrodinámico, por otro lado si no se requieren altas velocidades, el ROV sufrirá menos momentos de balanceo ya que los propulsores podrán estar lo más alejados de su centro transversal.

Los pequeños ROVs del mercado actual tienen hélices de empuje que envían al ROV hacia adelante y hacia abajo, esto es así a causa de que da un mayor rendimiento en la dirección de avance.

Los propulsores tienen alrededor de la hélice unas toberas Kort (la cual se explicará más adelante) para que el agua desplazada se mueva en la dirección deseada y de esta manera se aumenta el rendimiento de la hélice.

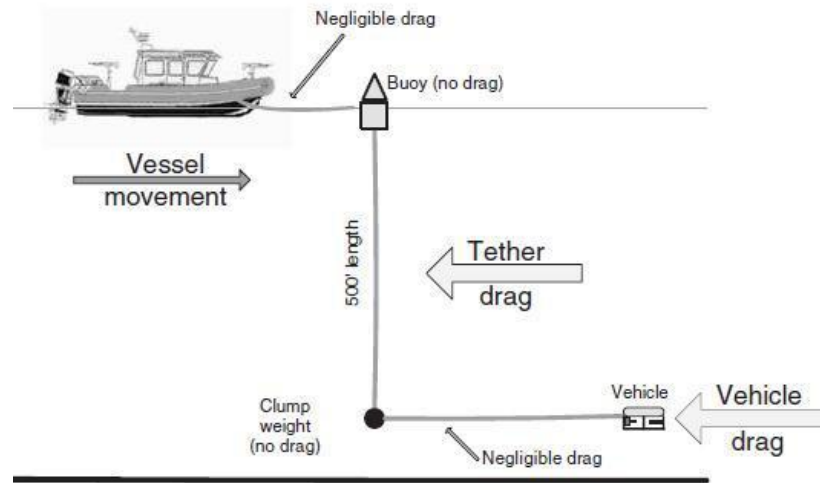
Si el vehículo opera en el fondo del mar será mucho más importante la potencia que la velocidad ya que el cable umbilical creara resistencias muy grandes.

La mayoría de ROVs están preparados para trabajar a velocidades de 3 o menos nudos, además a partir de los 6 nudos se requerirían diseños mucho más resistentes, y la forma del ROV sería mucho más importante ya que actuarían fuerzas hidrodinámicas mayores, que podrían causar que el ROV rodara sobre el mismo, un suceso llamado en ingles *Snap Roll* (Cabecear hacia arriba, luego girar transversalmente 360 grados para volver a la posición inicial).

Como hemos dicho antes un ROV a de generar la potencia necesaria para avanzar, venciendo así a la propia resistencia que el genera más la resistencia del cable que arrastra. Para calcular la potencia que requerirá un ROV, se calcular de una forma un poco diferente a como se aria con un buque ya que el ROV tiene dos factores que lo diferencian, el primero es que está sumergido, y el segundo es que tiene un cable el cual le crea una resistencia muy grande al ROV.

Si el ROV no es capaz de vencer la resistencia que genera el cable umbilical y el mismo este se convierte simplemente en un ancla muy cara.

Figura 17. Dibujo de la resistencia que a de vencer un ROV.



Fuente: The ROV Manual

EL CORDÓN UMBILICAL:

El cordón umbilical puede ponerse justo encima del ROV o en la parte posterior superior.

Las ventajas de colocar el cordón umbilical justo en el centro del vehículo, son que los escombros que generan las hélices no son lanzados hacia el cordón umbilical por lo que el cordón umbilical no hace una fuerza negativa en el avance del ROV, además resulta mucho más fácil sacar el ROV del agua al igual que introducirlo, ya que al estar en el centro el vehículo entra y sale del agua de una forma perpendicular a ésta. Colocar cable en el centro del ROV es beneficioso si el vehículo es operado en zonas con pocas corrientes.

Por otro lado si el cable umbilical está situado en la parte trasera, se tiene la ventaja de que en zonas de corriente no se producirá tanto cabeceo en cambio si el cordón estuviera en el centro sí se produciría esto.

También es muy importante que siempre haya el cordón umbilical justo para que el ROV opere y nunca soltar más cable del que sea necesario, ya que éste será arrastrado por la corriente y creará una fuerza que el ROV tendrá que vencer. Si

esto sucede lo recomendable es colocar el ROV en un punto del fondo marino y recoger el cordón umbilical sobrante, esta técnica es la mejor, ya que es la que consume menos energía y en el caso de que el cable se haya enredado con el mismo es más probable que se desenrolle, además de esta forma se sabe exactamente el umbilical sobrante, ya que sabemos la profundidad a la que se encuentra el ROV y por lo tanto el umbilical que debería tener. Hay que añadir que un exceso de cordón umbilical en un ROV en el cual éste está situado en su parte posterior superior, puede crear un momento de giro que incline el ROV hacia abajo.

El grosor del cable también es un factor importante, ya que contra menos diámetro tenga el cable menos resistencia ofrecerá, pero por otro lado menos potencia proporcionará al ROV. Los umbilicales más rígidos pueden resultar más difíciles de manejar pero por lo general ofrecen menos resistencia que los umbilicales más flexibles. Ciertamente los umbilicales más flexibles suelen gustar mucho más a los operadores ya que son más fáciles de almacenar y de manipular pero tienen la desventaja de que es más fácil que se enreden o que se suelte más cable del necesario. Y hay que remarcar que cuando el ROV opera en el fondo marino el cable influye mucho más en la resistencia que el propio ROV.

MÉTODOS PARA INTRODUCIR LOS ROVS EN EL AGUA:

Actualmente existen dos grandes métodos para introducir el ROV en el agua, cada uno con sus ventajas e inconvenientes, son el método de despliegue directo y el método de despliegue con TMS.

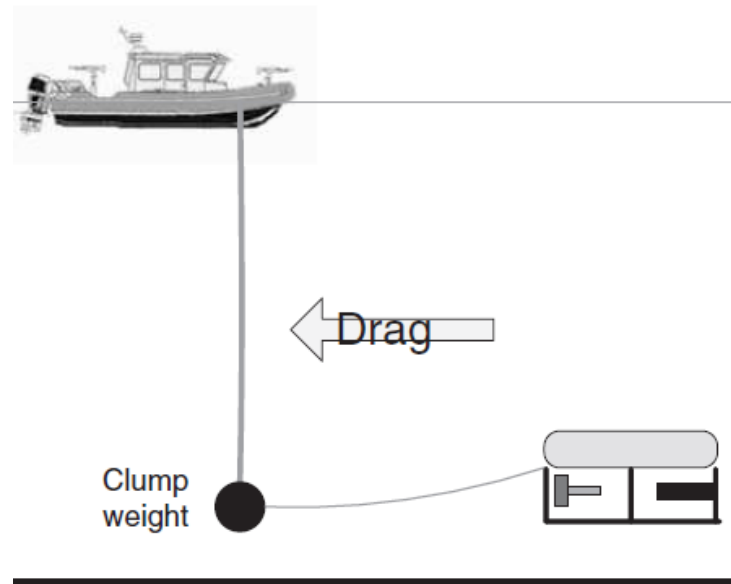
- Directamente desplegado: El ROV puede ser lanzado directamente desde la cubierta del barco, aunque contra más pese el ROV más riesgo hay de que este se dañe por la fricción con el suelo, por lo que este método se suele utilizar sólo con ROVs de poco peso. Otro inconveniente es que contra más peso tenga el ROV el cable umbilical deberá resistir más el peso del ROV cuando es introducido y sacado del agua. Una solución a este último problema es introducir el ROV con

unas cadenas que lo sujeten aunque esto limitará los movimientos del ROV. Aún introduciendo el ROV con las cadenas sigue habiendo otro problema en este método, que es que el ROV es muy vulnerable a las corrientes que hay en la superficie.

- Despliegue con TMS: El TMS es un nexo de unión entre el ROV y el buque o plataforma petrolífera, esto da ciertas ventajas al ROV, una de ellas es que el cable que hay entre el ROV y la TMS es mucho más delgado que si fuera directamente del barco por lo que la fuerza que ejerce el cable umbilical es mucho menor. Normalmente el ROV se puede alejar a una distancia de 200 metros del TMS, de esta forma el cable no es tan gordo. La TMS recibe el cable umbilical de mayor diámetro y del barco y de aquí va a al ROV el cual recibe energía eléctrica para todas sus herramientas. El TMS es simplemente un sistema de gestión de amarre. El cable umbilical del TMS al ROV es de un diámetro menor a causa de que no tiene que sufrir las mismas tensiones que si estuviera unido directamente del barco al ROV. Dentro de éste hay 2 sistemas, el sistema llamado clumpweight o peso macizo y el sistema llamado con jaula.

1- ClumpWeight: Es muy utilizado en los ROVs de observación, si se trabaja cerca o en el fondo del mar, el sistema clumpweight da mucha facilidad para utilizar el cordón umbilical y resulta muy cómodo y fácil. Además sabes que todo el cable que sale del barco está situado justo debajo de él hasta llegar al final del fondo marino, cosa que si lanzas el ROV sin el sistema TMS ClumpWeight el cable podría estar en cualquier lado, de esta forma te aseguras que no hay cable flotando y que el cable solo se encuentra debajo del barco o en el fondo. Además gracias a esto el ClumpWeight absorbe casi toda la fuerza que crea la corriente haciendo que el ROV no tenga que luchar contra ella por culpa del cable umbilical. Otra ventaja es que sabes el área de trabajo en que puede operar el ROV ya que se crea un círculo de trabajo justo debajo del barco.

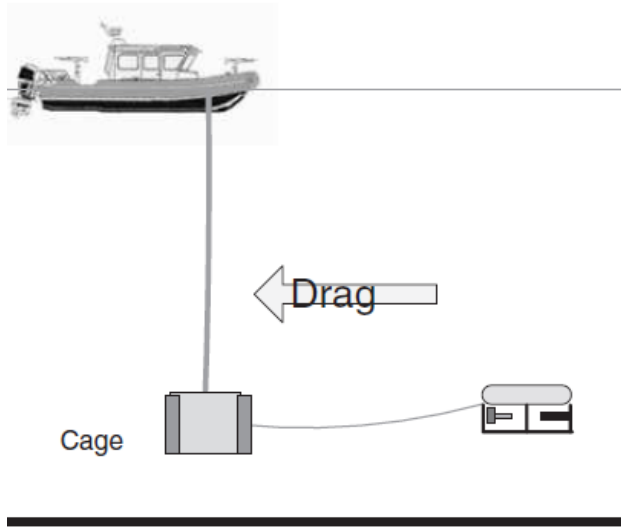
Figura 18. Dibujo de un sistema ClumpWeight.



Fuente: The ROV Manual

2- Sistema TMS con Jaula: Este sistema es utilizado sobre todo para grandes ROVs para protegerlos de abrasiones y cuando son desplegados ya que están más protegidos de la inestabilidad propia del buque mientras está navegando. Las jaulas también funcionan como una ancla ya que tienen flotabilidad negativa, de esta forma el ROV entra y se sumerge rápidamente en el agua. Esto permite que sea la jaula la que luche contra la corriente y no el ROV, ya que el cable estará tenso gracias a la jaula y no a la fuerza que tiene que hacer el ROV, además la jaula dispone de un sistema que va dejando ir cuerda de tal forma que evita que esta cuerda se enrede. La jaula normalmente está hecha de Kevlar, acero, u otros materiales similares. Dentro de los cables de acero o Kevlar que van del buque a la jaula están los cables que conducen la energía al ROV.

Figura 19. Dibujo de un sistema con jaula.



Fuente: The ROV Manual

3- TMS con sombrero de copa (*Top Hat*): Es un sistema similar al TMS convencional pero con la particularidad de que no hay jaula, en lugar de una jaula el ROV es levantado con una bobina de cable la cual se encuentra encima de él, ésta es lanzada junto con el ROV al agua y realiza la misma función que la jaula, con la única diferencia que el ROV no sale de ella, sino que se deja ir.

Figura 20. Sistema TOP-HAT



Fuente: ROV Triton XL 14

1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

La exploración petrolera ha llevado al hombre a trabajar a mayores profundidades en el mar, y es en este medio que la industria offshore presenta los máximos retos de ingeniería en la actualidad. Desde sus comienzos, inmensas estructuras de última generación y un constante desarrollo de tecnología con los más altos estándares de calidad han acompañado la explotación del petróleo en los mares, presentado la solución de problemas propios de este campo. Pero las extremas condiciones operacionales a las que están sometidos los equipos, además de proporcionar verdaderos retos de ingeniería al momento de generar diseños eficientes y seguros, constituye un obstáculo para las empresas operadoras al momento de presentarse sucesos no previstos, que rompen las estrategias implementadas en estos proyectos.

Es así que en estas condiciones extremas de operación, solo vehículos submarinos operados remotamente o ROVs están capacitados para ejecutar maniobras propias en la implementación de un campo petrolero costa afuera como construcción, acoples de equipos, recuperación de estructuras averiadas y remediación de problemas como el sucedido en el Golfo de México. Además del mantenimiento y continua inspección de estas estructuras, juega un papel vital en la prevención de catástrofes y pérdidas económicas, debidas a fallas en los equipos y sucesos imprevistos en el lecho marino.

1.2. JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

La falta de experiencia en la exploración y producción costa afuera de ECOPETROL S.A, Empresa Colombiana de Petróleos, muestra la necesidad de adquirir el conocimiento en implementación de tecnologías propias en esta forma de producción de hidrocarburos. Por esta razón se hace necesario la formación de profesionales en ciencias que concurren para implementar equipos de producción costa afuera seguros y confiables.

Los costos elevados generados por la contratación de buzos en la inspección y mantenimiento de las infraestructuras costa afuera en la actualidad, además de la imposibilidad de superar profundidades considerablemente altas, soportan la implementación de la tecnología de equipos operados remotamente (ROVs) para suplir esta falencia y proporcionar a la empresa y al país, infraestructura segura que disminuya el riesgo de un accidente de sus operarios y proteja al medio ambiente en el cual se ejecuta la producción y transporte de hidrocarburos.

De esta forma el desarrollo del proyecto brindará sensibilización de las operaciones básicas de los ROV's necesarias para el desarrollo de un campo offshore. El conocimiento que brindara esta investigación, es una fuente de desarrollo e investigación para el país.

1.3. OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO

1.3.1. Objetivos Generales

Contribuir a la misión impartida por la Universidad Industrial de Santander en la formación de profesionales e investigadores con calidad científica; que construyan, apliquen y divulguen sus conocimientos, desarrollos y transferencia de tecnologías junto con los grupos de investigación DICBOT Y GIEP, incentivando así el interés de la comunidad, en la versatilidad de aplicaciones de los conocimientos adquiridos durante el pregrado de ingeniería mecánica, la investigación, la capacidad de trabajo y el desarrollo de proyectos que integren áreas de conocimiento en pro de nuestra formación como ingenieros mecánicos y la solución a necesidades de proyectos de ingeniería local.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Diseñar la configuración mecánico-estructural de un ROV subacuático para una profundidad de operación de 20 m, controlado de manera remota por medio cableado, propulsado por “*thrusters*”, con dimensiones entre los siguientes rangos:
70 cm _ Longitud _ 100 cm
40 cm _ Ancho _ 60 cm
30 cm _ Alto _ 50 cm
- Estudiar los parámetros físicos de la hidrodinámica que inciden en el diseño de un ROV estable y los factores dinámicos relevantes que afectan el desplazamiento del ROV en el fluido.
- Simular el modelo propuesto con el uso de herramientas computacionales CAD, CAE y CFD tales como SolidWorks, Cosmosworks y/o Ansys Workbench y de simulación como Matlab (Simulink) y/o ComsolMultiphysics que permita

analizar los parámetros físicos y fenómenos que encierran el modelado, de un ROV en dinámica de fluidos con flujo unidimensional.

- Construir un prototipo experimental, a escala 1:1 de los rangos establecidos, que permita corroborar aspectos básicos del diseño como flotabilidad, estabilidad, y fenómenos correspondientes al desplazamiento, además de ser concebido como una plataforma investigativa para futuros proyectos en este campo.
- Estudiar el desempeño del prototipo en operación a nivel cualitativo en una piscina.
- Lograr que el prototipo tenga como mínimo 4 grados de libertad, estos son: movimiento longitudinal (*surge*), lateral (*sway*), rotacional (*yaw*), movimiento de ascenso y descenso (*heave*).

2. MODELO ESTRUCTURAL DEL ROV Y REQUERIMIENTOS DE DISEÑO

2.1. Clases de ROVs

Según el trabajo que deben realizar y las características del medio ambiente en el que se desenvuelven los ROVs están provistos de variedad de sistemas que suplen las necesidades en maniobras en el fondo marino, es así que podemos encontrar cinco clases diferentes.

Clase I – Vehículos de pura observación

Figura 21. Equipo representativo OCROV



Fuente: <http://www.videoray.com/>

Los vehículos de pura observación (OCROVs) son aquellos que se limitan a la observación física del medio haciendo uso de sistemas de vídeo. Generalmente son vehículos pequeños también llamados “flyingeyeball” por la tarea que realizan, son generalmente portátiles con un peso inferior a las 20 Lbs. (9 Kg) el cual se encuentra distribuido en tres equipos principales como son las cámaras de vídeo, luces y propulsores. Los ROVs de clase observación han tenido en los avances tecnológicos, la miniaturización de la electrónica y sistemas de video como el apoyo suficiente frente a un número creciente de misiones. Estos equipos no

pueden llevar a cabo cualquier tarea diferente a una simple inspección sin una considerable modificación en su estructura y subsistemas, además misiones como inspección de presas, inspecciones nucleares, la caza de tesoros, la arqueología, el estudio de peces, la inspección de buques y la seguridad nacional se han convertido en rutinas para los OCROVs.

Ha habido un reciente aumento en el desarrollo de vehículos pequeños, debido principalmente a la mejora en la tecnología para sistemas alimentados eléctricamente. Estas mejoras se han traducido en un aumento de la capacidad, el rendimiento y profundidad antes no alcanzados. Entre las empresas fabricantes VIDEO RAY presenta modelos con pesos inferiores a 11 libras (5 kg) y con 1000 pies (305m) de profundidad de operación, estos vehículos se han convertido en el diminutivo OCROV más rentable del mercado con más de 1.200 unidades vendidas en todo el mundo.

Debido a su bajo peso estos equipos presentan como desventaja el hecho de perder su estabilidad fácilmente por efecto de corrientes marinas además de presentar una reducida carga de trabajo (pay load).

Clase II – vehículos de observación con carga de trabajo (payload)

Son vehículos capaces de transportar elementos adicionales, tales como cámaras de color, sistemas de protección catódica, de medición, cámaras de vídeo adicionales y sistemas de sonar. Los vehículos de la clase II deben ser capaces de operar sin pérdida de la función original y presentan sensores adicionales en comparación con los equipos de pura observación. Debido a su mayor tamaño se hace posible la implementación de un sistema de control para la estabilización de sus movimientos.

Figura 22. Equipo representativo clase II Falcon DR de la empresa sueca SAAB



Fuente: <http://www.seaeye.com/index.html>

Clase III – vehículos de trabajo

Son equipos lo suficientemente grandes como para llevar sensores adicionales y/o manipuladores. Los vehículos de esta clase III suelen tener una capacidad de multiplexación que permite a los sensores y herramientas adicionales operar sin ser "integrados" a través de un sistema umbilical. Estos vehículos son más grandes y más poderosos que las clases I y II, además se subdividen en:

Clase III A - vehículos de trabajo <100 Hp

Clase III B - vehículos de trabajo 100 Hp a 150 Hp

Clase III C - vehículos de trabajo > 150 Hp

Clase IV – vehículos de trabajo pesado

Son vehículos que operan en el lecho marino, se desplazan en el fondo del mar por medio de ruedas, sistemas de tracción por oruga, thrusters o propulsión a chorro o combinaciones de cualquiera de estos sistemas. Los vehículos de esta clase son normalmente mucho más grandes y más pesados que los vehículos de la clase “trabajo normal” y se han configurado para tareas de propósito especial. Estas tareas incluyen típicamente la excavación de zanjas para cables y tuberías, el dragado de fondos marinos y otros trabajos de construcción a control remoto.

Figura 23. Equipo representativo ROV de trabajo pesado para empresa Sub Atlantic.



Fuente: <http://www.sub-atlantic.co.uk/>

Estos equipos representan la clase de ROV mas usada para operaciones en aguas ultra profundas a mas de 10.000 pies (3.000 metros), que van desde 100 hasta 1200 Hps de fuerza y que pueden tener capacidades de elevación de hasta 11.000 libras (5.000 kg). Los nuevos requerimientos para llevar a cabo operaciones submarinas de amarre en instalaciones de aguas ultra profundas y el transporte de sistemas de gran intervención, hacen que esta clase de ROV se esté convirtiendo cada vez más en un equipo más grande, potente y capaz de

transportar y levantar grandes cargas, de ahí que el término "vehículo pesado de clase trabajo" haya sido adoptado por la industria. Estos vehículos pueden pesar más de 10000 Lbs. y se asemejan en tamaño a una minivan. En la actualidad son comunes sistemas capaces de operar a 3000m de profundidad y se encuentran equipos que han llegado hasta 6000 m. la aplicación mas común de estos equipos es como sistemas de enterramiento de cables, los cuales se encuentran propulsados por thrusters electro-hidráulicos con potencias de hasta 1000 Hps en total, además estos equipo incluyen en su diseño manipuladores capaces de levantar cientos de kilos capaces de maniobrar cargas de hasta 1600 Lbs. Cámaras, luces, sonares y otros sensores necesarios están fácilmente disponibles para operar a estas profundidades.

Clase V – Prototipos o vehículos en desarrollo

Los vehículos de esta clase se incluyen los que están siendo desarrollados y los considerados como prototipos. Los vehículos para fines especiales que no encajan en una de las otras clases son también en la Clase V. los AUV están actualmente asignados a la clase V.

2.2. Partes de un ROV

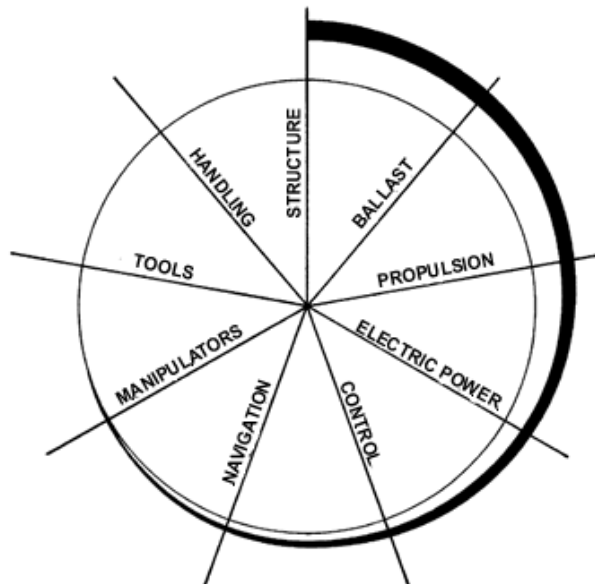
Un equipo ROV es un conjunto de subsistemas altamente relacionados, solo una completa armonía entre el funcionamiento y buen rendimiento de estos subsistemas entregaran un equipo de excelentes cualidades. En vista que las funciones específicas de cada equipo determinan sus características, podemos identificar a estos vehículos como dispositivos con múltiples variables a los cuales se llega como resultado de un diseño concurrente de sus sistemas. Es así que el rendimiento del sistema ROV es un delicado equilibrio entre diseño y requerimientos operacionales. Un equipo completo puede dividirse en una serie de subsistemas principales. Estos son:

- Herramientas y sensores
- Control / Pantalla de consola
- Sistema de distribución de energía
- Línea umbilical y cadena
- Sistema de control

El factor crítico en el proceso de diseño de un ROV es la profundidad de operación ya que esta determinara el valor de la presión que debe soportar el vehículo y por supuesto sus subsistemas, los cuales deben funcionar con un buen rendimiento frente al incremento de la presión debido a la inmersión del vehículo a mayores profundidades.

El diseño de un equipo submarino trae consigo un eslabón vicioso de diseño. Al dividir el vehículo en subsistemas funcionales. La interrelación de estos subsistemas puede ser representada por una espiral de diseño la cual enlaza cada uno de estos subsistemas y muestra sus relaciones de dependencia durante la búsqueda de un diseño optimizado.

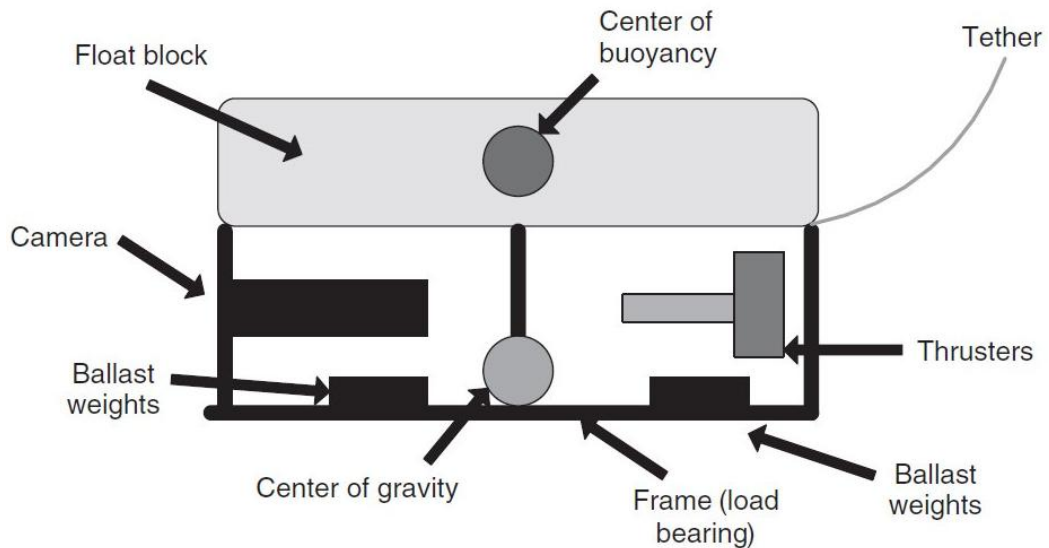
Figura 24.Espiral de diseño de subsistemas de un ROV



Fuente: The ROV Manual

Un vehículo ROV cuenta con un marco. Un modulo de flotabilidad, un sistema de propulsión, un modulo electrónico, un sistema de iluminación y video.

Figura 25. Partes de un ROV.



Extraído del libro THE ROV MANUAL

2.2.1. Marco

El marco de un ROV debe proporcionar una estructura firme y resistente para el montaje de los componentes y subsistemas que conforman el equipo como sistemas mecánicos periféricos (brazos manipuladores, herramientas de corte, de inspección y en el caso de equipos oceanográficos, equipos de muestreo) sistema de propulsión y elementos electrónicos propios de la estrategia de control implementada, además entre los subsistemas se incluyen herramientas e instrumentos especiales como sonares, cámaras, iluminación etc. Los marcos de los ROV se han hecho de materiales compuestos como el plástico, tuberías y secciones de aluminio de calidad marina como la 6082 una aleación con magnesio y silicio. Las consideraciones en la selección de los materiales utilizados para el marco de un ROV además de la resistencia a la corrosión son proveer al equipo

de una estructura con máxima resistencia y peso mínimo debido a que el peso tiene que ser compensado con un modulo de flotabilidad y esto es fundamental al momento de generar un equipo de proporciones acordes a su función primaria.

Figura 26. Marco del panther ROV y marco de un equipo de 150Hp respectivamente



Fuente: <http://www.seaeye.com/index.html>

Fuente: <http://www.advmfg1.com/>

El marco del ROV también debe cumplir con las regulaciones relativas a la carga que soporta y la fuerza por sustentación. La selección del material para el marco depende de los siguientes criterios:

- Peso de la unidad completa en el aire.
- Volumen del equipamiento a bordo (sensores y herramientas)
- Volumen de dispositivo de flotabilidad.
- La carga crítica que pudiese soportar el marco.

2.2.2. Módulo de flotabilidad

Según el principio de Arquímedes, el cual afirma que un cuerpo total o parcialmente sumergido en un fluido en reposo, será empujado con una fuerza vertical ascendente igual al peso del fluido desplazado por dicho cuerpo. De esta forma el objetivo del modulo de flotabilidad es compensar el peso de materiales

como (marcos, propulsores, recintos electrónicos e instrumentos periféricos) y así lograr un flotabilidad neutra-positiva.

El material del modulo de flotación deberá soportar los incrementos de presión propios de las profundidades de operación, manteniendo su integridad.

Los materiales más comunes utilizados para este fin son la espuma rígida de poliuretano y polímeros.

Posteriormente a la manufactura del molde puede recubrirse el modulo con una capa protectora que minimice los efectos de la abrasión e intrusión de agua, los materiales utilizados para tal fin pueden ser la fibra de vidrio o pintura.

Estos bloques de espuma han sido probados a profundidades de 1.000 fts (220 m) de agua de mar y han demostrado ser un sistema de flotación barato y eficaz para aplicaciones de agua poco profundas (Figura 8)

Figura 27. Modulo de flotabilidad fundido en espuma rígida de poliuretano y mecanizado en una estación CNC



Fuente: <http://www.fabrinco.com/aplicacion.php?id=48>

La Espuma de Poliuretano es un material sintético y duro plástico, altamente reticulado y no fusible, que se obtiene de la mezcla de dos componentes

generados mediante procesos químicos a partir del petróleo y el azúcar: el Isocianato y el Polioli.

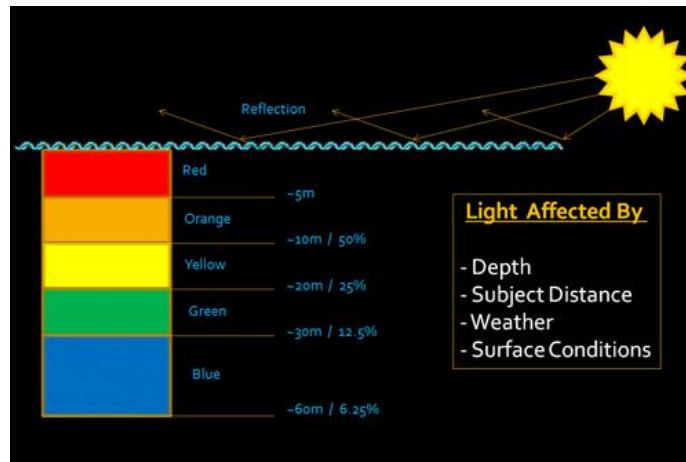
2.2.4. Equipo electrónico

Después de desplazarse hacia la zona de trabajo la capacidad de percibir el entorno, ya sea por medio de video o sistemas de adquisición, juega un papel fundamental en la realización de una misión. Los subsistemas necesarios para esta tarea se presentan a continuación.

2.2.5. Iluminación submarina

En una inmersión de pocos metros la iluminación bajo el agua se hace necesaria debido a que la luz ambiental visible es rápidamente atenuada por una combinación de los fenómenos de dispersión y absorción, por lo que requiere iluminación artificial para ver los elementos bajo el agua con algún grado de claridad. El agua absorbe la luz muy rápidamente debido al hecho de que es más densa que el aire, aproximadamente 800 veces, esta densidad absorbe la luz de forma rápida dando como resultado imágenes sin color y notoriamente disminuida en su contraste y nitidez. El color de los cuerpos se debe a la reflexión de las longitudes de onda de luz que representan los colores del espectro visible en sus superficies.

Figura 28. Absorción de la luz con la profundidad



<http://www.clubdelamar.org/propagacion.htm>

Otra propiedad del agua para tener en cuenta, es la refracción. Técnicamente, la refracción es el cambio en la dirección de una onda debido a un cambio en su velocidad, que se produce al pasar de un medio a otro - por ejemplo, entre el océano y el aire. El agua tiene un índice de refracción de aproximadamente 1.33, mientras que el aire tiene un índice de refracción de aproximadamente 1.0003. En la práctica, esta diferencia en el índice de refracción hace que los objetos parezcan más grandes y más bajo el agua, aproximadamente un 25% más grandes.

De esta forma la selección de una lámpara para proporcionar esta iluminación artificial es necesaria para identificar el color real de los cuerpos sumergidos. Los tipos más utilizados son los LEDs, lámparas halógenas, bombillas fluorescentes y HID.

2.2.6. Sistema de control de un ROV

La función principal del sistema de control es la asignación de las señales enviadas por el operador del equipo desde superficie a cada uno de los diferentes

sistemas como son el sistema de propulsión, iluminación, video y llegado el caso, algún dispositivo manipulador.

Los elementos que conforman este sistema son un ordenador desde el cual se monitorea y controla el accionar del equipo, la interface de control del subsistema y las líneas de comunicación que van desde líneas de potencia en el pasado hasta fibra óptica digital en la actualidad.

Todos los ROVs tienen en común una interface de video proporcionada por una o más cámaras en la estructura del vehículo y algún mecanismo de mando o control a distancia ya sea un sistema analógico antiguo conformado por reóstatos para regular la potencia en los propulsores o un control digital moderno en vehículos más avanzados. Además de las imágenes proporcionadas por el sistema de video, los datos requeridos por el operador para soportar el posicionamiento, orientación, estado y dinámica del vehículo son recogidos por un completo sistema sensorial conformado por acelerómetros, giroscopios, compases magnéticos, sensores de presión, GPS, sofisticadas unidades inerciales de medición IMU, equipos sonares y posicionamiento acústico que permiten al operador el control desde superficie de todas las condiciones de operación del equipo. Desde la superficie las estaciones de Control de los ROVs van desde completas instalaciones requeridas por los equipos de trabajo pesado hasta computadores personales con joysticks para sistemas micro de tipo observación.

Los equipos utilizados para estos fines son equipos con sofisticados programas de ordenador y secuencias de control. Hoy en día, se pueden encontrar computadoras con alta calidad en el centro de estos sistemas con código abierto que permiten a los operadores la flexibilidad de las estrategias planteadas en una misión.

Con el auge de la robótica como una sub-disciplina de la electrónica, se implementaron sistemas de control robótico basado en la interacción intuitiva a través de la emulación de las entradas sensoriales humanas. En sistemas más antiguos analógicos, un comando de "giro a la izquierda" fue un comando de

control complejo que requería el funcionamiento de varios reóstatos para obtener un vector empuje y lograr el movimiento deseado. Como la introducción de los sistemas de control digital, se generaron matrices de control más complejos pudiendo aplicarse mucho más fácilmente a través del circuito de control en proporción a la salida de los propulsores basándose en la simple posición de un control o joystick.

La introducción del joystick en la industrial moderna, junto con circuitos lógicos programables ha facilitado el control del vehículo durante la operación a través de interfaces mucho más simples e intuitivas. Hoy más que nunca los sensores están disponibles para el ser humano y permiten una interacción intuitiva con el robot, la cual hace más fácil el trabajo del operador.

2.2.7. Control de Motores

De manera muy común se controlan motores de corriente continua con una resistencia variable o variando la resistencia conectada a un transistor. Mientras que el enfoque funciona bien, genera calor y por lo tanto, desperdicio de energía. La modulación por ancho de pulso para el control de motores DC elimina estos problemas. Controla la velocidad del motor, conduciendo el motor con pulsos cortos. Estos pulsos varían en el tiempo para cambiar la velocidad del motor. Cuanto más tiempo duran los impulsos, más rápido gira el motor, y viceversa.

En vista del preferente lugar que ocupan los motores electrónicos entre los sistemas de propulsión de los sistemas ROV, su control juega un papel esencial en el rendimiento del equipo al momento de llevar a cabo una misión. Desde un simple movimiento hasta un posicionamiento se hace necesario por parte del operador la tenencia de un control básico sobre la dirección y aplicación proporcional del empuje de cada propulsor para ejecutar movimientos con alto grado de precisión. Correcciones durante el desplazamiento de los vehículos deben ser generadas debido a perturbaciones provenientes del ambiente

submarino, de esta forma con un control ON-OFF del sistema de propulsión el operador rápidamente perdería el control del vehículo debido a la incapacidad de hacer las correcciones finas necesarias, es así que el control electrónico entrega varias opciones de control proporcional a los propulsores para obtener en el equipo una navegación precisa.

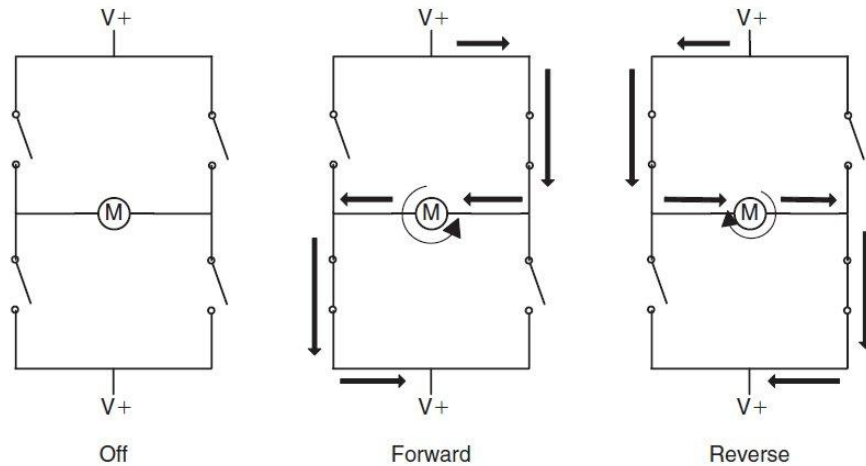
El circuito electrónico básico que genero el control de motores electrónicos utilizados en la robótica y componentes industriales es conocido como el "Puente-H". Gracias al control digital del puente-H se puede obtener una notable contribución a la comprensión de la locomoción robótica.

2.2.8. El puente-H y la modulación por ancho de pulso (PWM)

El circuito que controla los motores eléctricos en un ROV se conoce como "puente-H" debido a su configuración similar a la de una letra "H" (Figura 10). A través de la variación de la distribución, así como la inductancia de filtrado (descrito anteriormente), el puente-H permite controlar la dirección y la velocidad de aceleración se controla de una manera práctica y sencilla.

El control por modulación por ancho de pulso (PWM) consiste en la generación de pulsos de ancho variable para representar la amplitud de una señal analógica de entrada. La salida de conmutación del transistor se encuentra en tiempos mayores para una señal de baja amplitud y tiempos menores para una señal de gran amplitud. La naturaleza digital (totalmente encendido o apagado) del circuito de PWM es menos costosa, que un circuito analógico que no deriva en el tiempo.

Figura 29. Diagrama de funcionamiento del puente-H.



Extraído del libro THE ROV MANUAL

La modulación por ancho de pulso (PWM) no solo se utiliza en equipos ROV para controlar la velocidad de sus propulsores también puede usarse como un eficiente dimmer de luz. Los motores DC grandes son controlados más eficientemente con tiristores de alta potencia, mientras los motores DC pequeños y medianos de imán permanente, son controlados más exitosamente con transistores de conmutación por ancho de pulso. El PWM es un dispositivo para controlar motores que manejen unos cuantos amperios.

2.2.9. Modelado de un ROV

El modelado dinámico preciso de un equipo operado remotamente, es un comienzo necesario durante su proceso de diseño, sobre este reposa en gran parte el rendimiento y eficiencia del sistema de control autónomo que se establece para cada ROV, sin embargo el modelado y estrategia de control de estos vehículos es difícil. La dinámica que los gobierna es difícil de implementar en la práctica para obtener su control durante una misión real. El problema recae en la inclusión de no linealidades e incertidumbres propias de las ecuaciones que

modelan la dinámica de los fluidos. Estas no linealidades hidrodinámicas e inerciales están presentes debido al acoplamiento entre los grados de libertad del vehículo. De esta manera, corrientes submarinas que normalmente existen en el medio se convierten en las señales que generan en el ROV, movimientos en direcciones erróneas y sin control. La presencia de estas dinámicas no lineales demanda el uso de técnicas numéricas para determinar la respuesta del vehículo a las señales de entrada en los propulsores y las perturbaciones externas del medio en una amplia gama de condiciones de funcionamiento propias del medio submarino. De esta forma el proceso de modelado de un ROV puede ramificarse en dos técnicas:

Un modelado basado en análisis con dinámica de fluidos computacional y otro basado en técnicas experimentales.

Los métodos predictivos calculan los parámetros dinámicos del vehículo sin tener que construir el equipo desde una etapa de diseño, esto reduce generosamente los costos de los equipos, además de vislumbrar en parte, el posible comportamiento del diseño. Tiene las ventajas de tener un bajo costo y facilidad de implementación, pero tiene la desventaja de proporcionar un análisis con una menor precisión. Por otra parte, las técnicas experimentales se realizan normalmente mediante el uso de bancos de pruebas, para ser más específico en tanques que tiene la ventaja de ser más precisos por presentar todos los fenómenos que afectan la dinámica del vehículo pero con su correspondiente elevación de costos.

2.3. CFD como una herramienta de modelado.

Durante el diseño hidrodinámico de un equipo submarino hoy en día, se hace necesario la implementación de una herramienta CFD para contribuir al diseño del vehículo, ya que su dinámica exige una cuidadosa selección de formas. Las herramientas CFD pueden proporcionar contribuciones que van desde los estudios iniciales conceptuales del proyecto hasta el diseño en detalle. Podemos utilizar los CFD para realizar estudios de optimización del comportamiento frente a flujos. Los cálculos con CFD están en disposición de ayudar a los métodos normalmente establecidos y aceptados. Desafortunadamente, para la mayoría de los ingenieros estas herramientas se presentan aún lejanas desde el punto de vista práctico, en parte por su complejidad de manejo, el cual requiere en ocasiones verdaderos especialistas en el tema, esto es debido al desconocimiento que se tiene de los fenómenos que se están simulando. Aunque algún ingeniero experimentado podría intuir la influencia de ciertas modificaciones en la resistencia de un vehículo, no se dispone de medios para juzgar los efectos de diseños innovadores en lo que a formas se refiere. Las herramientas CFD permiten evaluar estas modificaciones a partir de los resultados de los cálculos realizados; las variables calculadas son diferentes de las obtenidas en los ensayos experimentales y su significado físico debe considerarse con cuidado y en muchos casos, no de manera absoluta.

La mayor mejora que los CFD pueden introducir en el proceso de diseño de un proyecto se encuentra en la forma permitir la evaluación y comparación de diferentes formas, sin necesidad de llevarlas a un ensayo experimental. Aunque para la evaluación final del comportamiento del vehículo la puesta en funcionamiento será la prueba definitiva. La mayor parte de los diseños alternativos de un proyecto se pueden realizar con estas herramientas numéricas. Los análisis CFD permiten determinar la distribución de los campos de velocidades, presión y corrientes en todo el dominio del análisis, entre otros.

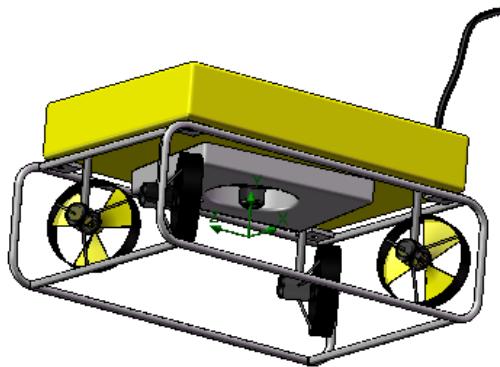
Campos difíciles de precisar experimentalmente como la distribución de estelas, las líneas de corriente sobre superficies, fuerzas de arrastre en superficies, son resultados inmediatos por medio de un análisis CFD. Debido a la gran cantidad de resultados que se pueden obtener de un análisis CFD, se debe hacer un gran esfuerzo para conseguir una exposición inteligible de las cantidades calculadas y en este campo la representación gráfica de datos es una ayuda fundamental para un mejor uso de esta herramienta. Una vez visualizados los resultados, el ingeniero debe saber cómo usarlos. Los criterios aplicados como en el caso del coeficiente de resistencia son bastante obvios, a menor coeficiente de resistencia se obtienen un diseño más eficiente hidrodinámicamente. Pero estos criterios basados en la experiencia tradicional son restrictivos. Otra de las ventajas de un análisis CFD es que se obtiene una gran cantidad de información, no disponible en la práctica habitual, puede ser de interés considerar otros valores calculados para evaluar comparativamente la calidad de las formas y no comprometerse exclusivamente en un único parámetro global. Por ejemplo un análisis de las líneas de corriente sobre un cuerpo sumergido puede asemejar lo que ocurre en muchos tipos de ensayos experimentales. En este proyecto no se pretende presentar un manual de referencia de optimización de formas mediante cálculos de CFD nuestro objetivo es dar ideas generales sobre los criterios que debemos interpretar para la mejora hidrodinámica de las formas. De esta manera procederemos a desarrollar nuestro trabajo por medio de la optimización de formas basado en las siguientes etapas:

- Definición de las condiciones de velocidades de operación.
- Definición de las formas del vehículo y apéndices preliminares utilizando métodos empíricos o simples, modelos hidrodinámicos basados en la teoría de potencial.
- Construcción del prototipo experimental a escala 1:1.

- Análisis experimental del comportamiento hidrodinámico del pre-prototipo en el medio
- Reiterar el proceso de diseño hasta alcanzar las especificaciones deseadas del comportamiento del vehículo.

Es evidente que esta metodología es un proceso difícil y costoso, que generalmente es insuficiente para alcanzar un comportamiento óptimo frente al fluido, definido por el máximo nivel de eficiencia hidrodinámica. Sin embargo este ciclo es posible en la práctica si sustituimos la evaluación experimental por el uso de herramientas CFD.

Figura 30. ROV



Fuente: Autores

2.3.1. Desarrollo de los ROV's

En la actualidad las profundidades de operación y capacidades de carga de los vehículos han aumentado, esto sin sacrificar la principal consideración de diseño que demanda equipos compactos y maniobrables. Por esta razón las tecnologías y dispositivos involucrados en la construcción han ido evolucionando junto con la necesidad de cumplir con los exigencias de la industria en la actualidad. Las espumas de baja densidad para el modulo de flotabilidad con diseños hidrodinámicos han disminuido el volumen del equipo a grandes profundidades

mejorando además de la dinámica los requerimientos de carga útil, entregando al equipo la posibilidad de adicionar una extensa cantidad de herramientas lo han transformado en una facilidad imprescindible en la actualidad desarrollando cualquier tarea en estos ambientes de operación.

El calentamiento de las aguas superficiales debido a la radiación solar, afecta la distribución de la temperatura, la salinidad y la densidad en la columna de agua. Los valores de estos tres parámetros en aguas superficiales permanecen prácticamente invariables hasta los 200 metros de profundidad (que es la zona de mezcla del océano); A partir de esa distancia tienen lugar cambios rápidos en la temperatura y la salinidad, que a su vez repercuten en otros cambios rápidos en la densidad del agua. He igual de cambiantes que estas condiciones del ambiente de operación son los diseños de los módulos encontrándose de flotabilidad variable por medio de mecanismos de llenado de lastres y con flotabilidad constante siendo estos los más comunes.

En las condiciones extremas propias de la explotación OFF SHORE el hombre debe sortear retos de ingeniería no solo en diseño de dispositivos y estructuras, también en lo operacional y es aquí donde debe ser apoyado por tecnología de vehículos submarinos. Los cuales van en dimensiones reducidas como un balón de fútbol hasta llegar hasta las 5 toneladas en el aire y dimensiones que pueden abarcar volúmenes de 2m x 3m x 2m de alto. Junto con su gran variedad de equipos de monitoreo y control, sistemas de lanzamiento y recuperación, sistemas de monitoreo y control para la gran mayoría de sus subsistemas son un complejo conjunto de sistemas eléctricos, electrónicos, hidráulicos y mecánicos.

Su robusto diseño estructural y unidades integradas de flotabilidad deben acoplarse entregando vehículos con flotabilidad neutra en el agua y un buen rendimiento y autonomía al momento de ejecutar movimientos y traslados en su campo de trabajo.

La fuerza económica que ha movido desde sus comienzos el desarrollo de esta tecnología es la exploración y producción de hidrocarburos, en la actualidad solo un pequeño porcentaje de la capacidad de trabajo de estos equipos está asociado con el mantenimiento de cables y estructuras submarinas

En la actualidad hay cerca de 1500 equipos ROV's en los mares y océanos del planeta los cuales generan más de 10000 empleos de personas que los operan manipulan mantienen, transportan y fabrican. Aunque el mayor porcentaje de los equipos utilizados en el mundo se encuentra en la zona del mar del norte este comportamiento se modificara en los años venideros debió a la incorporación de empresas de países como Australia, Brasil, Mar Caspio, China, el Lejano Oriente, el Golfo de México, la India, el Mediterráneo, el Golfo Pérsico, Rusia, América del Sur y África occidental en la exploración y extracción de recursos en los oceanos.

El triunfo de los ROV's es poder realizar casi todas las tareas submarinas que llevan a cabo los buzos, con la ventaja de llegar a aguas más profundas, de forma más segura y con costos menores en la mayoría de los casos.

2.4. ROV's al servicio de la industria petrolera

Después de identificar las reservas de petróleo o gas en mar adentro, se inicia el desplazamiento de la infraestructura la cual deberá ser posicionada y ensamblada en el lecho marino, en aguas someras esta tarea pueden ser llevada a cabo desde superficie con cierto nivel de precisión pero a mas de mil metros de profundidad el posicionamiento de los equipos se torna difícil y aun más la conexión de las tuberías es casi imposible debido a las dimensiones de los equipos y al delicado proceso de llevarlos desde la superficie al lecho marino.

Esta tareas y maniobras de posicionamiento deben ser dirigidas desde el campo mismo y es en este punto donde vuelven a trabajar los ROV's de tipo heavy workclass con sus grandes potencias las cuales sirven para remolcar elementos llevar acabo conexiones de tuberías que un ROV de tipo observación apenas

podría contemplar. En el aspecto económico los ROV's no solo soportan maniobras que difícilmente realizarían buzos, también dan la posibilidad a las empresas productoras de expandir o reducir sus campos minimizando costos y enormes sumas de dinero que serian una inversión de tener que implementar procedimientos convencionales como la incorporación de estructuras de producción flotantes y las correspondientes estrategias que van acompañadas de un incremento de la inversión planteada en las etapas de estudio de los proyectos.

2.4.1. Versatilidad de los ROV's producción.

Al terminar la instalación de la infraestructura destinada para la etapa de producción de un campo petrolero costa fuera, como son plataforma o FPSO, riser de producción, colectores submarinos, tuberías, arboles de producción, una vez más el ROV es una facilidad necesaria para ejecutar maniobras de seguridad, modificaciones al campo, maniobras de prevención y corrección que pudiesen tener lugar.

A pesar del extenso estudio que precede la implementación de un campo petrolero costa fuera y la excelente confiabilidad de los equipos, dispositivos y mecanismos asociados a este estudio, la instalación de nuevas tuberías, la modificación del tendido existente, la reinstalación de elementos por sucesos inesperados como desconexión de las tuberías de transporte a superficie o accidentes por condiciones inesperadas son maniobras que deben ser ejecutadas en durante el tiempo de vida de un campo aquí es donde los ROV's han desempeñado un papel principal como extensión del control humano, soportando el porqué de la necesidad de esta tecnología.

2.4.2. ROV durante la producción

Durante la etapa de producción el monitoreo y mantenimiento de los elementos en un campo OFF SHORE juega un papel esencial, la inspección visual es solo una tarea preliminar durante una estrategia de inspección la incorporación de diversos sensores, como pipetrackers y sonares multihaz, cámaras, sensores de protección catódica y otros sensores, tales como sondas de detección de miembros, para proporcionar un análisis completo de estado de las estructura y elementos de producción. Para el mantenimiento de un campo petrolero la incorporación de equipos de tipo observación y de trabajo pesado juega un papel decisivo en el desarrollo de maniobras y tareas el tamaño de los ROV's de tipo observación facilita el cambio de módulos submarinos y otros tipos de reparación y mantenimiento, sirviendo como equipo auxiliar mientras los equipos de trabajo pesado con capacidad de carga manipulan la infraestructura.

2.4.3. Otras aplicaciones de losROV's

Además de labores de inspección losROV's en cada una de sus clases realizan tareas como instalación de cables, mantenimiento, toma de muestras, arado de zanjas y posicionamiento y conexión de líneas umbilicales. También a estos equipos puede ser acoplado una gran cantidad de accesorios y herramientas eléctricas, mecánicas e hidráulicas.

El mantenimiento de un ROV demanda personal calificado en áreas afines como la ingeniería mecánica y electrónica que comprendan la importancia de aislar electricidad del agua en cualquier punto del vehículo. Tener profesionales educados y entrenados es un punto a favor de las empresas ya que los paquetes ROV's son tan versátiles como las capacidades de sus operadores los cuales simplemente tienen que hacer un reconocimiento del ambiente de trabajo para adaptar el vehículo a los requerimientos de las tareas a realizar y esto solo es posible con conocimientos especializados, habilidades y experiencia.

3. MODELO MATEMÁTICO

3.1 Métodos

Para poder controlar un vehículo operado remotamente es necesario llevar a cabo un buen análisis de la dinámica que gobierna los desplazamientos de estos equipos. Un modelo dinámico que sea preciso permitirá la incorporación de un sistema electrónico con un alto nivel de maniobrabilidad y control.

La dinámica que gobierna los vehículos operados remotamente está bien definida pero es difícil de manejar al momento de desarrollar un equipo en la práctica, esto se debe principalmente a la inclusión de muchas no linealidades e incertidumbres en el modelado. La esencia de estas no linealidades hidrodinámicas e inerciales son debidas al acoplamiento de los grados de libertad. Los vehículos submarinos están sometidos a fuerzas debidas a corrientes que intervienen en la dirección de los movimientos del vehículo.

La presencia de estas no linealidades dinámicas requieren la aplicación de técnicas numéricas para determinar la respuesta del vehículo a las señales de control y las perturbaciones externas en un gran rango de condiciones operacionales.

Las técnicas de modelado pueden ser dos tipos:

- Métodos predictivos basados en software de dinámica de fluidos computacional
- Técnicas experimentales

Las técnicas numéricas estudian los parámetros de movimiento de la dinámica del vehículo desde el diseño del vehículo. Estas tienen como ventaja su bajo costo, la fácil implementación se puede llevar a cabo antes de que el vehículo sea construido pero tienen como desventaja un vacío en la precisión debido a su naturaleza predictiva.

Por otra parte las técnicas experimentales pueden llevarse a cabo en recintos cerrados y debido a la incorporación de instrumentos de medida para la gran mayoría de variables que interviene son más precisos pero con un incremento de costo.

Estas dos técnicas serán usadas para desarrollar el modelo de nuestro proyecto, el cual será diseñado para operarse a una profundidad de 20m, entre sus subsistemas podemos encontrar el modulo de flotabilidad un marco definido, un tether y el sistema de propulsión (propulsores y recinto electrónico) el vehículo debe ser dotado de una flotabilidad neutra-positiva y debe ser hidrostáticamente estable esto con ayuda de la distribución de cargas en su estructura.

Considerando el vehículo como un cuerpo en el espacio con cuatro grados de libertad definidos como surge, sway, heave y yaw. Para ejecutar los movimientos, el empuje diferencial será una herramienta primordial los cuatro propulsores horizontales generaran los movimientos de surge, sway y yaw. Y el heave necesitara de un quinto propulsor. Con esto podemos recalcar la naturaleza sobreactuada del equipo (Por lo tanto, el VideoRay Pro III entra en la categoría de vehículos subactuado porque la dimensión del vector de control es menor que el grados de libertad).

3.2. Dinámica del Vehículo.

Dos marcos de referencia se utilizan para describir el estado del vehículo, uno es el sistema de referencia inercial (o fijo a la tierra), y el otro siendo el marco local fijo al cuerpo con su origen coincidiendo con el centro de masa y los tres ejes en las direcciones del vehículo.

3.3. Cinemática

Los movimientos del vehículo en sus grados de libertad son descritos por los siguientes vectores.

$\eta_1 = [x, y, z]^T$: Posición en el marco inercial.
 $\eta_2 = [\varphi, \theta, \psi]^T$: Orientación (Ángulos de Bryant) que describe la relación del sistema de referencia inercial con el marco fijo.
 $\eta = [\eta_1^T, \eta_2^T]^T$: Posición y orientación en el marco inercial.

$v_1 = [u, v, w]^T$: Velocidad de traslación en el marco fijo al cuerpo.
 $v_2 = [p, q, r]^T$: Velocidad rotacional en el marco fijo al cuerpo.
 $v = [v_1^T, v_2^T]^T$: Velocidad de traslación y rotación en el marco fijo al cuerpo.

$\tau_1 = [X, Y, Z]^T$: Fuerzas actuando sobre el vehículo en el marco fijo al cuerpo.
 $\tau_2 = [K, M, N]^T$: Momentos actuando sobre el vehículo en el marco fijo al cuerpo.
 $\tau = [\tau_1^T, \tau_2^T]^T$: Fuerzas y momentos actuando sobre el vehículo en el marco fijo al cuerpo.

La velocidad de traslación del vehículo expresada en el marco fijo al cuerpo es expresada como velocidad de traslación en el marco inercial a través de la siguiente transformación.

$$\dot{\eta}_1 = J_1(\eta_2)v_1,$$

Donde

$$J_1(\eta_2) = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta & -\cos \psi + \cos \psi \sin \theta \sin \phi & \sin \psi \sin \phi + \cos \psi \sin \theta \cos \phi \\ \sin \psi \cos \theta & \cos \psi \cos \phi + \sin \psi \sin \theta \sin \phi & -\cos \psi \sin \phi + \sin \psi \sin \theta \cos \phi \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \phi & \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix}$$

La velocidad rotacional del vehículo expresada en el marco fijo al cuerpo es expresada como velocidad de traslación en el marco inercial a través de la siguiente transformación.

$$\dot{\eta}_2 = J_2(\eta_2)v_2,$$

Donde

$$J_2(\eta_2) = \begin{bmatrix} 1 & \sin \phi \tan \theta & \cos \phi \tan \theta \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi / \cos \theta & \cos \phi / \cos \theta \end{bmatrix}$$

3.4. Dinámica del cuerpo rígido

El movimiento de traslación y rotación de un cuerpo rígido en general con 6 grados de libertad es formulado como sigue:

$$\begin{aligned} m(\dot{v}_0 + w \times v_0 + \dot{w} \times r_G + w \times (w \times r_G)) &= f_0 \\ I_0 \dot{w} + w \times (I_0 w) + m r_G \times (\dot{v}_0 + w \times v_0) &= m_0 \end{aligned}$$

Donde

I_0 Denota el tensor de inercia definido en el origen del marco fijo al cuerpo.

$r_G = [x_G, y_G, z_G]^T$ Es el vector desde el origen del marco hasta el centro de gravedad.

w denota el vector de velocidad de rotación.

v es el vector de velocidad de traslación.

m es la masa del cuerpo rígido.

f_0 constituye el vector de fuerza actuando sobre el vehículo.

m_0 constituye el vector de momentos actuando sobre el vehículo.

\dot{v}_0 denota la derivada con respecto al tiempo del vector velocidad en el marco de referencia fijo al cuerpo.

\dot{w} denota la derivada con respecto al tiempo del vector velocidad de rotación en el marco de referencia fijo en el cuerpo.

De acuerdo a la notación definida en la sección 2.1, aplicando la sustitución de $\tau_1 = f_0$, $\tau_2 = m_0$, v_1 como el vector velocidad de traslación y v_2 como el vector velocidad de rotación, a este campo de ecuaciones.

$$\begin{aligned}
m[\dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] &= X \\
m[\dot{v} - wp + ur - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(qp + \dot{r})] &= Y \\
m[\dot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rq + \dot{p})] &= Z \\
I_x \dot{p} + (I_z - I_y)qr - (\dot{r} + pq)I_{xz} + (r^2 - q^2)I_{yz} + (pr - \dot{q})I_{xy} \\
+ m[y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{v} - wp + ur)] &= K \\
I_y \dot{q} + (I_x - I_z)rp - (\dot{p} + qr)I_{xy} + (p^2 - r^2)I_{zx} + (qp - \dot{r})I_{yz} \\
+ m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] &= M \\
I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq - (\dot{q} + rp)I_{yz} + (q^2 - p^2)I_{xy} + (rq - \dot{p})I_{zx} \\
+ m[x_G(\dot{v} - wp + ur) - y_G(\dot{u} - vr + wq)] &= N
\end{aligned}$$

Dado que el marco de referencia fijo al cuerpo es elegido para que coincida con los tres ejes principales del ROV, tenemos $I_{xz} = I_{yz} = I_{xy} = 0$. Ahora, la dinámica del cuerpo rígido del vehículo se puede expresar en forma matricial como:

$$M_{RB} \dot{v} + C_{RB}(v)v = \tau_{RB}$$

Donde

$$\mathbf{M}_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_G & -my_G \\ 0 & m & 0 & -mz_G & 0 & mx_G \\ 0 & 0 & m & my_G & -mx_G & 0 \\ 0 & -mz_G & my_G & I_{xx} & 0 & 0 \\ mz_G & 0 & -mx_G & 0 & I_{yy} & 0 \\ -my_G & mx_G & 0 & 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix}$$

$$C_{RB} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -m(y_G q + z_G r) & m(y_G p + w) & m(z_G p - v) \\ m(x_G q - w) & -m(z_G r + x_G p) & -m(z_G q + u) \\ m(x_G r + v) & m(y_G r - u) & -m(x_G p + y_G q) \\ m(y_G q + z_G r) & -m(x_G p - w) & -m(x_G r + v) \\ -m(x_G q + w) & m(z_G r + x_G p) & -m(y_G r - u) \\ -m(x_G r - v) & -m(z_G q + u) & m(x_G p + y_G q) \\ 0 & I_{zz} q & -I_{yy} p \\ -I_{zz} q & 0 & I_{xx} p \\ I_{yy} q & -I_{xx} p & 0 \end{bmatrix}$$

3.5. Hidrodinámica – Ecuaciones de movimiento

Las fuerzas externas y momentos actuando sobre un vehículo sumergible puede ser clasificado como:

- Masa adicional debido a la inercia del fluido que lo rodea.
- Amortiguamiento hidrodinámico debido a los efectos como fricción, vórtices y energía transportada por las ondas superficiales.
- Fuerzas de restablecimiento debido al peso del vehículo y el modulo de flotabilidad.
- Corrientes
- Impulsores / fuerzas de la hélice

La masa adicional es un concepto de fuerzas y momentos de presiones-inducidas debido al movimiento armónico forzado del cuerpo, la cuales son proporcional a la

aceleración del cuerpo. Por lo tanto, la fuerza por masa adicional y la aceleración estarán desfasadas 180° del movimiento armónico forzado:

$$-M_A \dot{v} - C_A(v)v$$

Las fuerzas de amortiguamiento hidrodinámico normalmente consisten en términos de amortiguamiento lineal y cuadrático. Están en la dirección opuesta a la velocidad del vehículo y pueden ser expresados como una suma de estos dos términos:

$$-D_{lin}(v)v - D_{quad.}(v)v$$

Las fuerzas de restablecimiento, a veces llamadas fuerzas hidrostáticas, consisten en la fuerza de gravedad y la fuerza boyante. Estas son funciones de la posición del vehículo y son denotadas como $g(\eta)$. Las fuerzas de propulsión y momentos son los efectos de control actuando sobre el vehículo, se denotan como τ .

En hidrodinámica básica, es común asumir que las fuerzas hidrodinámicas y momentos sobre un cuerpo rígido pueden ser linealmente superpuestas. Por lo tanto, las fuerzas externas y momentos actuando sobre el vehículo pueden ser expresadas como:

$$\tau_{RB} = \tau_H + \tau_E + = -M_A \dot{v} - C_A(v)v - D_{lin}(v)v - D_{quad.}(v)v + \tau_E + -g(\eta)$$

Con el fin de simplificar este modelo, las corrientes serán despreciables, $\tau_E = 0$

En base a esta suposición, el modelo matemático de un vehículo sumergible puede ser expresado, con respecto al marco local de referencia fijo al cuerpo, por las ecuaciones no lineales del movimiento en forma matricial:

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau \text{ Ecuación 1}$$

$$\dot{\eta} = J(\eta)v$$

Donde:

$$M = M_{RB} + M_A$$

$$C(v) = C_{RB}(v) + C_A(v),$$

$$D(v) = D_{quad.}(v) + D_{lin}(v),$$

$g(\eta)$ Es la matriz de la fuerza hidrostática de restablecimiento, vea sección 2.5

τ Es el vector de entrada del impulsor

$J(\eta)$ Es la matriz transformada en coordenadas la cual trae el marco inercial dentro la alineación con el marco fijo al cuerpo.

$$\mathbf{J}(\eta) = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1(\eta) & 0 \\ 0 & \mathbf{J}_2(\eta) \end{bmatrix}$$

La matriz de masa M consiste de la componente del cuerpo rígido M_{RB} y la componente de la masa adicional M_A . La fuerza centrípeta y de Coriolis se representa por la matriz C y consiste en la componente del cuerpo rígido C_{RB} y la componente de la masa adicional C_A . La matriz de amortiguamiento D consiste de un término lineal de arrastre D_{lin} y un término cuadrático de arrastre D_{quad} . El término cuadrático de arrastre es significativo cuando el vehículo se está moviendo a alta velocidad, mientras que el término de arrastre lineal es predominante a baja velocidad.

3.5.1. Fuerzas Hidrodinámicas

Las fuerzas aplicadas al vehículo sumergible por medio del líquido que lo rodea pueden ser divididas en masa adicional, sustentación, resistencia, y la fuerza hidrostática o de restauración. Aparte de las fuerzas hidrostáticas, expresiones analíticas exactas para estas fuerzas son muy difíciles de obtener. En la práctica, estas son descritas en términos de sus correspondientes coeficientes hidrodinámicos, los cuales son estimados con la expansión de la serie de Taylor de primer orden. Estos coeficientes son expresados en la forma de derivadas hidrodinámicas de acuerdo con la notación SNAME (1950).

Por ejemplo, la fuerza axial cuadrática de arrastre X sobre un cuerpo en movimiento a una velocidad u en un medio fluido es modelado como:

$$X = -\left(\frac{1}{2}\rho C_d A_f\right)u|u| = X_{u|u}|u|$$

Lo cual implica que la derivada de la fuerza de arrastre en la dirección *surge* con respecto a $u|u|$ es:

$$X_{u|u|} = \frac{\partial X}{\partial (u|u|)} = -\frac{1}{2} \rho C_d A_f$$

La tarea de modelar el vehículo se convierte entonces en la aproximación analítica o experimental para determinar los coeficientes para completar las ecuaciones de movimiento del vehículo. *Ecuación 1.*

3.6 Masa adicional

El concepto de masa adicional se refiere a fuerzas y momentos por presión-inducida proporcionales a la aceleración del cuerpo. Para la dinámica de un cuerpo rígido, las fuerzas y momentos de masa adicional τ_A pueden ser expresadas en términos de una matriz de inercia adicional M_A y una matriz de términos hidrodinámicos centrípetos y Coriolis C_A :

$$M_A \dot{v} + C_A(v)v = \tau_A.$$

En general, el movimiento de un vehículo sumergible moviéndose a alta velocidad será altamente no lineal y acoplado. Asumiendo que el vehículo se mueve a baja velocidad, simples expresiones para M_A y C_A puede ser obtenido como:

$$\mathbf{M}_A = \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{\dot{v}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{\dot{w}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{\dot{p}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_{\dot{r}} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}_A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -Z_{\dot{w}}w & Y_{\dot{v}}v \\ 0 & 0 & 0 & Z_{\dot{w}}w & 0 & -X_{\dot{u}}u \\ 0 & 0 & 0 & -Y_{\dot{v}}v & X_{\dot{u}}u & 0 \\ 0 & -Z_{\dot{w}}w & Y_{\dot{v}}v & 0 & -N_{\dot{r}}r & M_{\dot{q}}q \\ Z_{\dot{w}}w & 0 & -X_{\dot{u}}u & N_{\dot{r}}r & 0 & -K_{\dot{p}}p \\ -Y_{\dot{v}}v & X_{\dot{u}}u & 0 & -M_{\dot{q}}q & K_{\dot{p}}p & 0 \end{bmatrix}$$

En la práctica, esta aproximación diagonal es razonable, debido al hecho de que los elementos fuera de la diagonal de la matriz de inercia son mucho mas pequeños que los de la diagonal.

3.7. Amortiguamiento Hidrodinámico

Ya que el ROV es simétrico alrededor del plano x-z, y casi simétrico alrededor del plano y-z, asumimos que el movimiento en *surge*, *sway*, *pitch* y *yaw* son desacoplados. Aunque esto no es simétrico para el plano x-y, los movimientos en *surge* y *heave* son considerados desacoplados porque cuando el vehículo es operado a relativamente baja velocidad, los efectos de unidad pueden ser despreciables. Esto sugiere una estructura diagonal para D_{lin} y D_{quad} :

$$\begin{aligned}
\mathbf{D}_{\text{lin.}}(\nu) &= \begin{bmatrix} X_u & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_v & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_w & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_q & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_r \end{bmatrix} \\
\mathbf{D}_{\text{quad.}}(\nu) &= \begin{bmatrix} X_{u|u}|u| & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{v|v}|v| & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{w|w}|w| & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{p|p}|p| & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_{q|q}|q| & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_{r|r}|r| \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

3.8. Fuerzas Hidrostáticas

Para vehículos sumergibles, la fuerza gravitacional y boyante, son llamadas fuerzas hidrostáticas o fuerzas de restauración. La fuerza gravitacional actúa a través del centro de gravedad $r_G = [x_G, y_G, z_G]^T$ del vehículo, el cual se asume que coincide con el centro de masa. Similarmente, la fuerza boyante actúa a través del centro de flotabilidad $R_B = [x_B, y_B, z_B]^T$.

Para un vehículo sumergible, el peso del cuerpo sumergido es W y la fuerza de flotación B , entonces la fuerza de restauración y el vector momento en el marco fijo al cuerpo es representado con los ángulos de Euler como:

$$\mathbf{g}(\eta) = \begin{bmatrix} (W - B) \sin(\theta) \\ -(W - B) \cos(\theta) \sin(\phi) \\ -(W - B) \cos(\theta) \cos(\phi) \\ y_B B \cos(\theta) \cos(\phi) - z_B B \cos \theta \sin(\phi) \\ -z_B B \sin(\theta) - x_B B \cos(\theta) \cos(\phi) \\ x_B B \cos(\theta) \sin(\phi) + y_B B \sin(\theta) \end{bmatrix}$$

4. CONSIDERACIONES DEL VEHICULO

En este capítulo se presenta la etapa preliminar del diseño, se inicia con la validación del software CFD utilizado para realizar el modelado del vehículo, para llevar a cabo esta tarea se procede a modelar figuras tridimensionales contempladas en la literatura y de las cuales se hace posible llevar a cabo un cálculo analítico del arrastre que pudiesen experimentar en un flujo de esta forma se puede evaluar la competencia del software CFD COSMOSFLOWWORKS como ayuda durante el desarrollo del diseño del prototipo de este proyecto. De igual forma se modela una hélice del mercado extraída por experiencia previa del grupo de investigación de la Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín.

La identificación de las principales características de los equipos en el mercado como son sus dimensiones, potencias, velocidades, configuraciones del sistema propulsor, permitirá la generación de un primer modelo, como punto de partida para el desarrollo del proyecto.

Posteriormente se modelara un diseño básico, basado en las conclusiones extraídas del estado de arte de los equipos, esta tarea se llevara a cabo en nuestro software de apoyo SOLIDWORKS. Haciendo uso del paquete CFD COSMOSFLOWWORKS se extraerá el valor de fuerza de arrastre que generara este modelo.

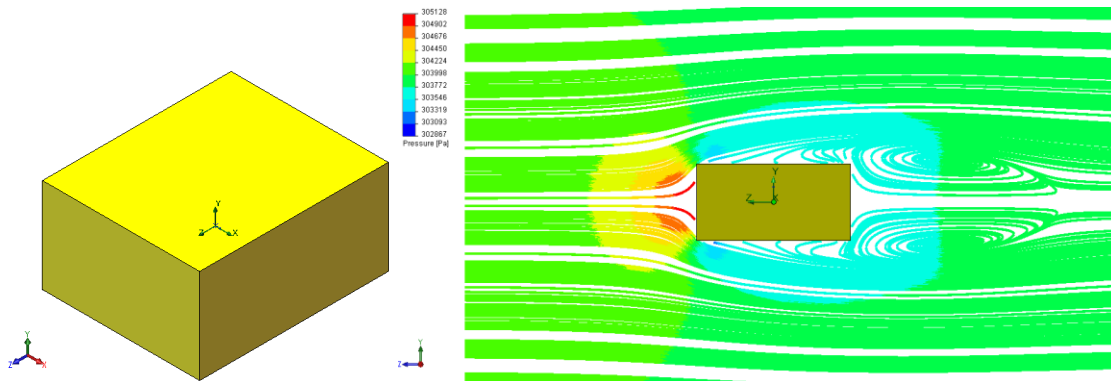
4.1. Validación del software

Para validar los resultados arrojados por el software se planteara la solución analítica que conlleva a la obtención del valor de la fuerza de arrastre que genera un vehículo básico en el flujo. Estos dos análisis deberán coincidir en un margen de error de un 5%

Para poder validar la competencia del software en nuestro análisis modelamos en primera instancia un bloque con el volumen estimado del equipo del proyecto en

SOLIDWORKS, posteriormente procedemos a simular la inmersión del modelo en un flujo a una velocidad de 1 m/seg con la ayuda del paquete CFD COSMOSFLOWWORKS que encontramos en nuestro software de apoyo.

Figura 31. Análisis hidrodinámico para un cubo.



Fuente: Autores

Tabla 1: Valores de arrastre generados por el software COSMOSFLOWWORKS

Parámetro	Valor	Componente- X	Componente- Y	Componente Z	Superficie [m ²]
Fuerza [N]	86	(-)0,01	0,009	(-)86	0,15

La densidad es $1.027[\text{Kg}/\text{m}^3]$

Características del modelo

Dimensiones:

$700 \times 500 \times$

300 , largo, ancho y alto respectivamente A (Seccion transversal) $[\text{m}^2] = 0,15$

v (Velocidad del flujo) $[\text{m}/\text{seg}] = 1,5$

$$\rho \text{ (Densidad promedio de los mares)} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] = 1027$$

$$C_D = 1.10$$

De la ecuación correspondiente a la fuerza de arrastre por medio analítico podemos extraer el valor del coeficiente de arrastre C_D del cubo el cual debe encontrarse en los rangos que postula la literatura para que el análisis del software sea una estimación aproximada. Así:

$$F_D [N] = C_D \left(\frac{\rho v^2}{2} \right) A = (1.10) \left(\frac{1027(1^2)}{2} \right) 0.15 = 84.73 \text{ N}$$

Durante el desarrollo de la función de calidad del proyecto se identificaron en el mercado de tres clases principales de equipos operados remotamente, como son los vehículos de observación pura, los vehículos de trabajo y los vehículos de inspección con carga de trabajo reducida. Estos últimos por sus características son los equipos de mayor versatilidad en la implementación de un campo OFFSHORE permite el acople a su estructura de herramientas de trabajo como sonares, instrumentos de inspección de tuberías, instrumentos de limpieza, herramientas de corte y demás herramientas de trabajo que no sería posible con un equipo de observación pura debido a su carga de trabajo prácticamente nula. Otra de las características que sugieren la selección de un vehículo de estas características es su fácil acceso a zonas en las que un equipo de trabajo no llegaría o tareas para las cuales estaría sobredimensionado como una simple inspección.

4.2. Equipos del mercado

Tabla 2 : Principales características de los equipos ROV observación con payload del mercado.

EQUIPO	DIMENSIONES				RENDIMIENTO		POTENCIA Y EMPUJE			
	Largo [cm]	Ancho [cm]	Alto [cm]	Peso [Kg]	Payload [Kg]	Velocidad [Nudos]	frontal	vertical	lateral	Angulo de configuración de los propulsores
Diávolo	130	65	50	65	-----	4	900 W	450 W	450 W	65
Stingray	99	46	46	32	2.5	3	370 W	370 W	370 W	45
Seamor 300F	47.2	35.5	35.5	20	-----	3	180 W	180 W	180 W	45
Predador	90	62	45	60	10	3	-----	-----	-----	-----
Seeker	55.5	30.5	28	18	-----	3	-----	-----	-----	-----
Vector M5	106.7	80	76.2	105	23	-----	68 Kgf	23 Kgf	50 Kgf	50
Seaeye 600	100	76	60	75	10	2.5	36 Kgf	15 Kgf	18 Kgf	65
SeaeyeFalcon	100	60	50	55	14	3	50 Kgf	13Kgf	28 Kgf	65
Promedios	65	50	35	54	8	2.4				

4.2.1. Caracterización de los equipos del mercado

Al observar los vehículos del mercado se puede inferir algunas características importantes que pueden direccionar el diseño del equipo del proyecto como:

- El rango de dimensiones entre los que se encuentran estos equipos son:

Longitud: (50-79) [cm]

Ancho: (40-60) [cm]

Alto: (30-60) [cm]

- La velocidad de operación de los vehículos se especifica solo en el grado surge y se encuentra alrededor de los 3 nudos $\cong 1.5 \text{ m/seg}$ aproximadamente.
- Existe una marcada tendencia en el diseño de estos vehículos de presentar una relación de potencia entre el grado de libertad surge/sway de 2/1 dotando al equipo de un mejor desplazamiento en su eje longitudinal (movimiento surge) y un movimiento más lento en su eje transversal (movimiento sway), además hay que tener presente que la resistencia que presenta el vehículo al desplazarse en sway es mayor debido a la sección transversal superior que tiene el vehículo en dirección a este desplazamiento
- La configuración del sistema propulsor más común que se presenta en estos equipos consta de un propulsor vertical y cuatro horizontales los cuales se encuentran ubicados a 45° con respecto al eje longitudinal de los equipos.

4.3. Caracterización del ambiente de operación

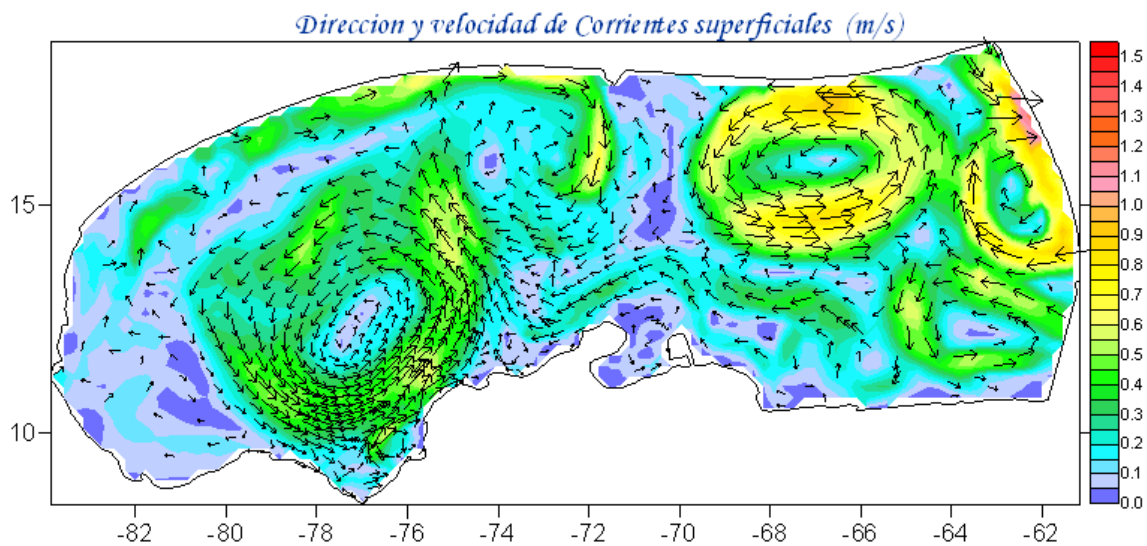
4.3.1. Corrientes

La energía calorífica que proviene del Sol modifica las condiciones climatológicas del planeta de tal forma que en combinación con los movimientos de traslación y rotación de la tierra, producen patrones de vientos periódicos y definidos como vientos alisios. Estos vientos inciden a su vez sobre la superficie del mar generando corrientes marinas superficiales y subsuperficiales (que se encuentran

hasta los 50-100 m de profundidad), los cuales tienen casi el mismo sentido de los vientos dominantes. El viento ejerce una fuerza de fricción sobre la superficie del mar y esta la transmite hacia sus profundidades debido a la viscosidad lo cual tiende a desplazar agua en la misma dirección.

Durante las estaciones secas, cuando los vientos alisios se encuentran en mayor actividad, las corrientes del Caribe están bien pronunciadas alcanzando una velocidad de 60 – 80 [cm/s]. Sin embargo, en las estaciones húmedas, su velocidad disminuye a 40 – 60 [cm/s]. Por otra parte en el Pacífico las corrientes alcanzan una velocidad máxima de 70 – 90 [cm/s].

Figura 32. Dirección y velocidad de las corrientes en el Caribe colombiano



Fuente: Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas CIOH

4.3.2. Caracterización de los mares

La densidad del agua pura es de 1 000 kg/m³. El agua de los océanos es más densa porque contiene sal. La densidad del agua de los océanos, en su superficie, es de aproximadamente 1 027kg/m³.

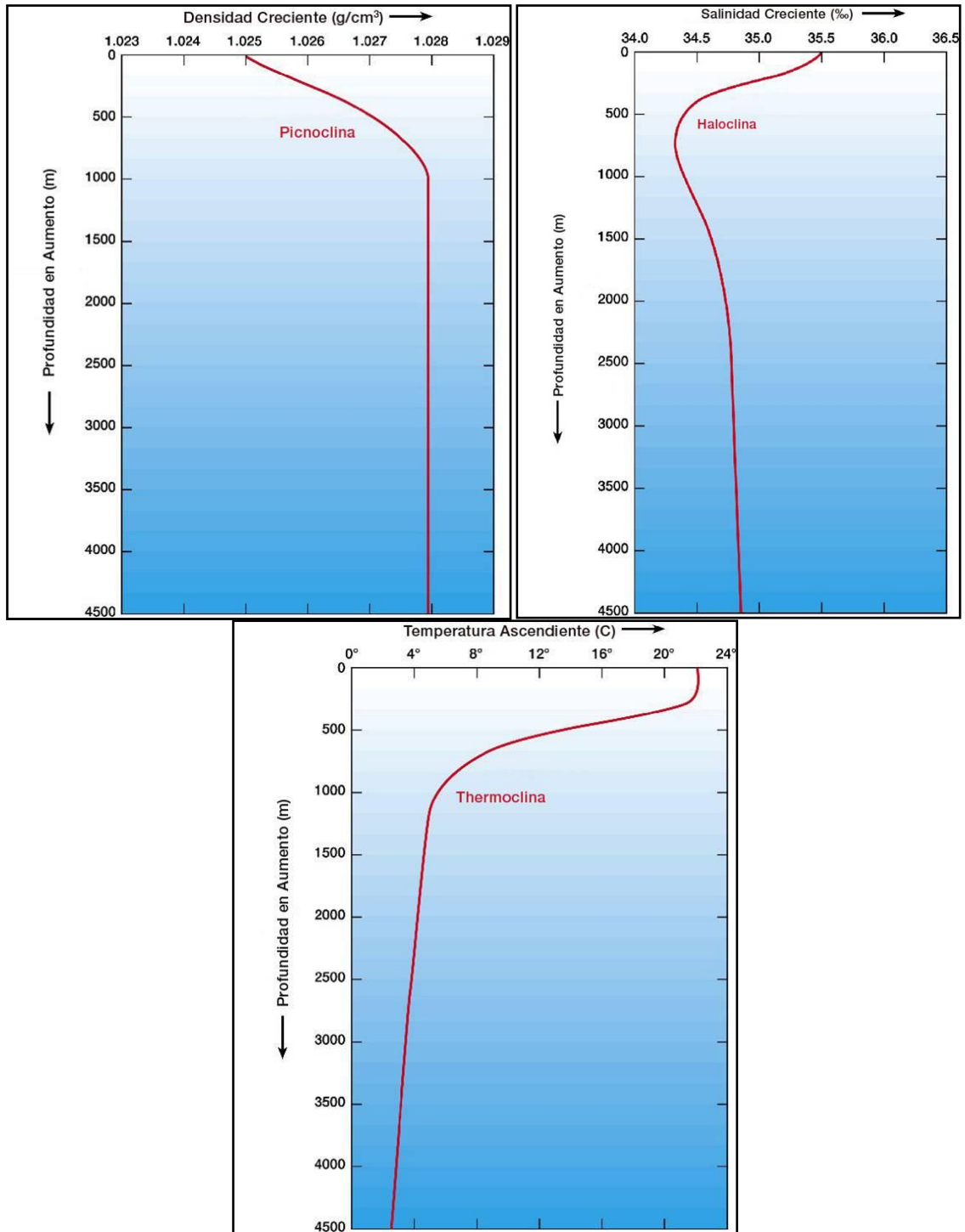
Existen dos factores principales que hacen que el agua de los océanos sea más o menos densa que $1\,027\text{ kg/m}^3$: la temperatura del agua, y la salinidad del agua. El agua de los océanos se hace más densa a medida que desciende la temperatura. De manera que mientras más fría esté el agua, más densa es. El aumento en la salinidad también hace que aumente la densidad en el agua de mar.

El agua menos densa flota sobre el agua más densa. Dadas dos capas de agua, con el mismo grado de salinidad, el agua más caliente flotará sobre el agua más fría. Sin embargo, ¡existe un fenómeno!. La temperatura tiene mayor efecto sobre la densidad del agua que la salinidad. De manera que el agua con mayor grado de salinidad puede flotar sobre el agua con menor grado de salinidad, siempre que la capa con más salinidad sea un poco más caliente que la capa con menor grado de salinidad.

A medida que se desciende hacia el fondo del océano, la temperatura desciende cada vez más. Por lo que a medida que se desciende hacia el fondo del océano, la densidad aumenta cada vez más. En la profundidad de los océanos el agua más densa se encuentra en el fondo y la más liviana está por encima. La circulación, en las profundidades de los océanos es horizontal. Es decir, el agua se desplaza junto a capas de igual densidad.

La densidad de las aguas de los océanos raramente se mide de forma directa. Si se desea medir el agua de los océanos, se tendría que recolectar una muestra de agua de mar y traerla al laboratorio para su medición. Usualmente, la densidad se calcula a través de una ecuación. Sólo necesitan medirse; el grado de salinidad, la temperatura y la presión, para poder determinar su densidad. Usualmente, estas mediciones se llevan a cabo a través de un instrumento CTD ; este instrumento se sumerge en el agua del océano, desde un barco o plataforma.

Figura 33. Pícnoclina (gradiente de densidad), Haloclina (gradiente de salinidad) y Termoclina (gradiente de temperatura) del agua de mar



Fuente: <http://cambioclimaticoenergia.blogspot.com/2010/09/las-corrientes-oceanicas-1.html>

4.4. Consideraciones del vehículo del proyecto

- Cada una de las partes del equipo deberán estar diseñadas buscando la mayor simetría posible en cada uno de sus ejes, esto para evitar problemas de estabilidad propios de la ubicación del centro de gravedad y centro de flotabilidad debido a la distribución de pesos en el equipo. De esta forma se evita en etapas posteriores del desarrollo del proyecto la implementación de lastres y módulos de estabilidad extras que modifiquen el estudio previo generado en el proyecto.
- La configuración del sistema de propulsión de cuatro propulsores horizontales y uno vertical deberá dotar al equipo de un desplazamiento eficiente en mínimo cuatro grados de libertad. El ángulo que formaran los propulsores con respecto al eje longitudinal del equipo será de 45° . Además el pre prototipo generado deberá permitir la modificación de los ángulos de aplicación de empuje en los propulsores horizontales, buscando estudiar la incidencia de este factor en la dinámica del vehículo.
- El vehículo deberá estar dotado de una flotabilidad positiva en un rango entre un 1% (como mínimo) y 3% (máximo valor estándar utilizado en los submarinos) del peso total del vehículo, esto buscando minimizar el consumo de potencia del equipo al sumergirse y dando a sus constructores un grado de seguridad en caso de presentarse algún problema con el sistema propulsor que impida la recuperación del vehículo.
- El valor de velocidad de operación de la cual se dotara al vehículo será de 1.0 m/seg esto teniendo en cuenta que el promedio de la velocidad de los vehículos de características similares, manufacturados con tecnología de punta alcanzan los 1.5 m/seg .

Para analizar el comportamiento de las alternativas se propone, llevar a cabo en primera instancia el modelamiento de los tres subsistemas básicos del ROV, como son el modulo de flotabilidad, el marco y la posible configuración del sistema de propulsión de forma individual, para poder observar su incidencia en la generación de la fuerza de arrastre en el equipo y posteriormente

4.4.1. Configuración del sistema de propulsión

La dinámica básica de un equipo ROV convencional incluyen como mínimo 4 DOF, movimientos en el plano horizontal surge-sway-yaw y un movimiento de ascenso y descenso el eje vertical o heave. Al tener definidos los planos de movimiento en el vehículo, se puede ver claramente la necesidad de generar un esquema de propulsión independiente para cada plano. De esta manera el vehículo alcanzara una posición determinada superponiendo desplazamientos en los dos planos que enmarcan su dinámica.

Ahora al analizar las necesidades de empuje para cada grado de libertad, se necesitaría como mínimo un propulsor en cada dirección de los ejes longitudinal, transversal y vertical para generar cada uno de estos movimientos. Pero para poder generar el yaw (rotación en el eje vertical) se debe tener como mínimo un propulsor con su respectivo vector de empuje por fuera de la línea del centro de gravedad el cual proveerá al vehículo de un par de rotación que le permitirá ejecutar este movimiento.

La configuración en la figura se presenta como una primera alternativa, frente a la configuración del sistema de propulsión consiste en cuatro propulsores, tres propulsores horizontales como se muestra en la figura y un propulsor vertical. Esta configuración presenta un inconveniente y es el dimensionamiento de la potencia requerida para llevar a cabo cada movimiento, debido a que al estar ubicado el vector de empuje paralelamente a los ejes longitudinal y transversal solo serán

útiles al momento de llevar a cabo movimiento en estos ejes, demandando un propulsor más potente para poder llevar a cabo el desplazamiento y presentando el inconveniente de al no estar accionado de transformarse en una sección transversal mas frentes a la dirección del movimiento.

El desplazamiento de un equipo operado remotamente siempre se verá modificado por la presencia de perturbaciones en el ambiente. La perturbación más significativa es la que se produce por el efecto de las corrientes marinas, presentes en todos los océanos y es precisamente esta condición ambiental la que unida a las potencias limitadas de los equipos, entregan a los diseñadores las condiciones de operación de los vehículos en un ambiente determinado.

al limitado poder de conducción de la propulsión- sistema de propulsión, sus velocidades lineales son a menudo comparables con la velocidad actual

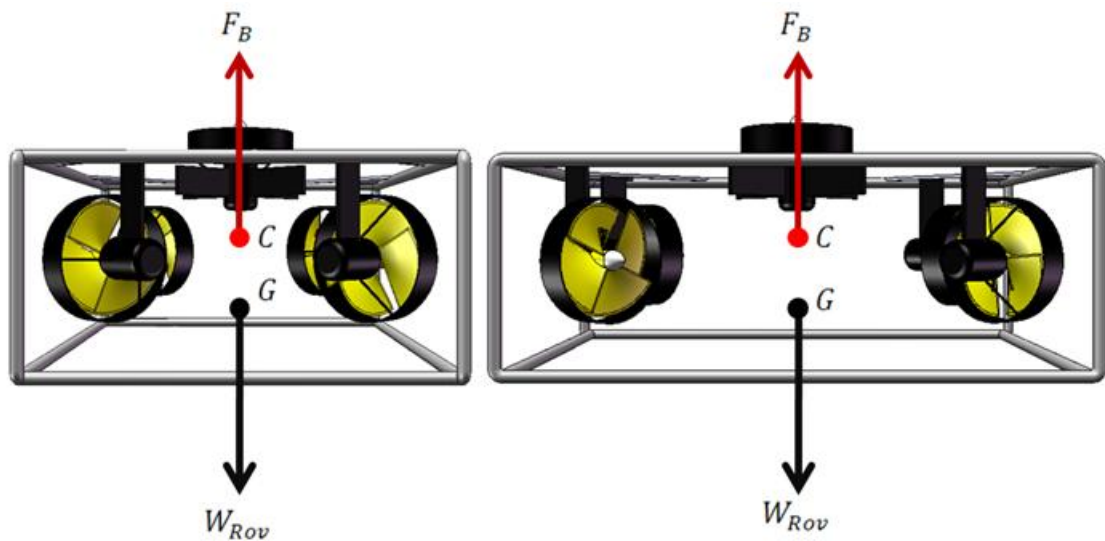
INCIDENCIA DEL GRADO DE INCLINACIÓN DE LOS PROPULSORES EN LA GENERACIÓN DE ARRASTRE DEL VEHÍCULO A LA VELOCIDAD DE OPERACIÓN 3[Nudos]			
Angulo del vector de empuje respecto al eje longitudinal	Surge [N]	Sway [N]	Heave [N]
45 ⁰	85	85	30
60 ⁰	104	60	30

Este análisis se llevo a cabo asumiendo un thruster que genera un empuje de 30 [N], la configuración de 60⁰ entrega alrededor de un 20% mas empuje en surge y un 10% menos en sway que un equipo que configura sus propulsores a 45⁰, se debe tener cuidado en el grado de libertad sway ya que la sección transversal del vehículo será mucho mayor y la disminución de la componente de empuje podría impedir que el vehículo se desplazara en esta dirección

4.4.2. Dimensiones del vehículo

Teniendo el peso estimado del vehículo (35 Kg) y unas dimensiones de partida (70 × 50 × 40 cm longitud, ancho y alto respectivamente), se puede calcular el volumen del modulo de flotabilidad necesario para obtener la flotabilidad neutra/positiva que se requiere en el equipo, así:

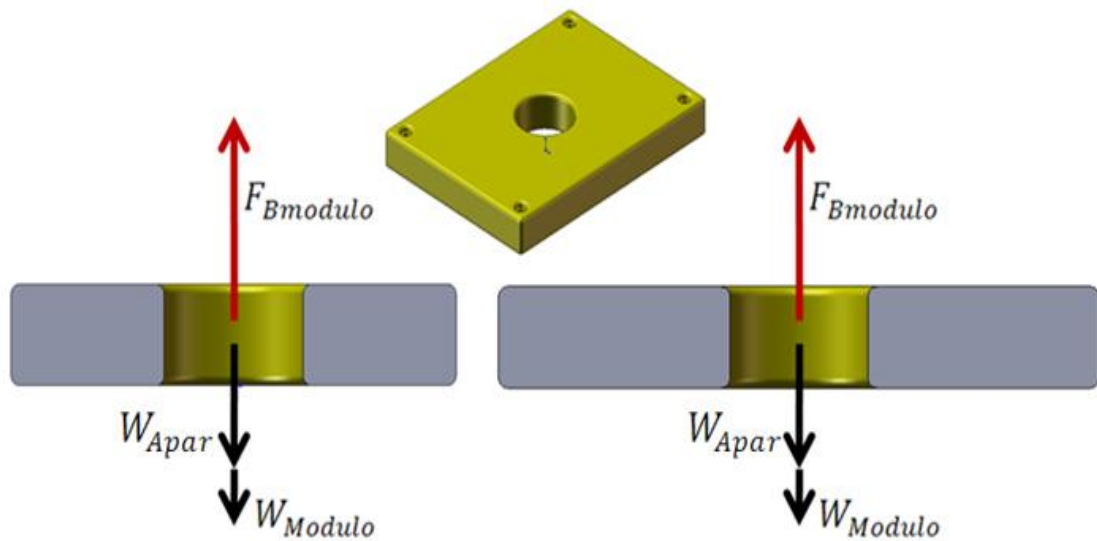
Figura 34. Centro de gravedad por debajo del centro de flotabilidad



Fuente: Autores

$$\begin{aligned} W_{rov} &= W_{thusters} + W_{marco} + W_{electrónica} + W_{modulo} \\ &= 35 \text{ Kg} \times 9.81 \text{ m}/(\text{seg})^2 = 0.35 \text{ KN} \end{aligned}$$

Figura 35. Calculo del modulo de flotabilidad.



Fuente: Autores

Ahora se tiene:

$$W_{rov} = 0.35 \text{ [KN]} = FB_{modulo} = W_{specifico\ agua} \times V_{modulo}$$

$$= 10 \text{ [KN]} / [\text{seg}]^3 \times V_{modulo} = 0.35 \text{ [KN]}$$

Al Despejar se obtiene el volumen del modulo:

$$V_{modulo} = 0.035 \text{ (m)}^3 = 0.7 \text{ [m]} \times 0.5 \text{ [m]} \times \text{altura [m]}$$

$$\text{Altura [m]} = 0.1 \text{ [m]} = 10 \text{ [cm]}$$

De esta manera las dimensiones del modulo de flotabilidad se asemejan más a las condiciones reales del equipo

VENTAJAS	DESVENTAJAS
El equipo posee un diseño simétrico que facilita la ubicación de los centros de flotabilidad y gravedad	Superficies planas que generan una fuerza arrastre considerable en comparación con un diseño hidrodinámico.
La configuración del sistema de propulsión permitirá un buen numero de actuadores disponibles para los grados de libertad en el plano horizontal, movimientos YAW y SURGE	La configuración del sistema de propulsión La configuración del sistema de propulsión.

5. DESARROLLO DEL PROYECTO

La incursión de Colombia en la industria OFFSHORE por parte de ECOPETROL, sustenta el desarrollo de tecnologías que solucionen los problemas propios de este tipo de producción, entre ellos y el más representativo, la implementación de campos y estructuras petroleras en las profundidades del mar, es por esta razón que se hace necesario el estudio y diseño de un equipo operado remotamente como elemento fundamental entre las facilidades requeridas para iniciar esta estrategia productiva.

En este capítulo se propondrán diseños alternativos de un equipo operado remotamente. Para la realización del estudio y diseño de un ROV se enfocó el proyecto en las características de un equipo de clase observación con carga de trabajo reducida, por tener dimensiones óptimas que permitan el análisis de los fenómenos hidrodinámicos más relevantes que inciden en el diseño de un equipo operado remotamente.

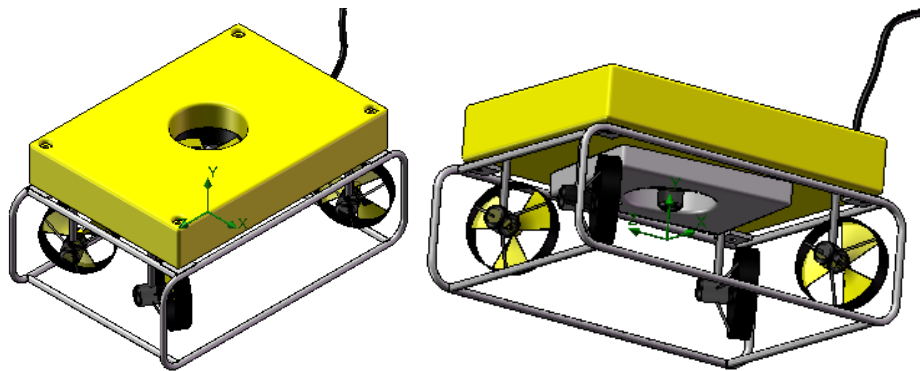
Basados en este estudio del capítulo anterior, se presentarán varias alternativas que van, desde un vehículo básico, el cual será modificado hacia un diseño hidrodinámico, buscando incrementar el rendimiento y la autonomía del equipo inicial. Posteriormente seleccionaremos la alternativa que presente la mejor dinámica frente al flujo. Para esto utilizaremos el software SOLIDWORKS y su paquete CFD COSMOSFLOWWORKS, el cual permitirá obtener un valor estimado primario de las fuerzas que inciden en la dinámica del vehículo.

5.1. Diseño de alternativas

5.1.1 Alternativa de diseño1

El primer diseño planteado como posible solución, es un equipo básico, con superficies planas que asemeja su geometría aun bloque. Sus dimensiones son $80 \times 50 \times 40$ [cm] y consiste en un marco de tubo de aluminio de diámetro externo $5/8$ " de ϕ_{ext} y pared de $1/32$ ", un modulo de flotabilidad de espuma de poliuretano rígida de dimensiones $80 \times 50 \times 10$ [cm] un recinto electrónico que se encuentra acoplado al marco y cinco propulsores, configurados de tal forma que cuatro propulsores sean horizontales y uno sea vertical, todo como se muestra en la figura 36.

Figura 36. Alternativa 1 modelada en CAD Solid Works



Fuente: Autores

La velocidad de operación que se utilizó como requerimiento de diseño del vehículo es de 1 m/seg la cual se obtuvo del análisis de las velocidades de operación promedio que tienen estos equipos en el mercado y de las condiciones ambientales que presentan las corrientes en el Caribe y pacífico colombiano.

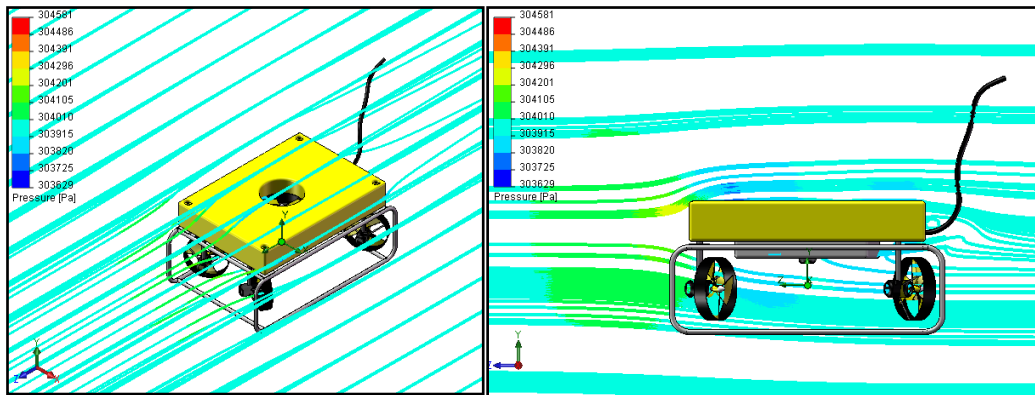
Analizaremos el valor total de la fuerza de arrastre en el equipo ensamblado en nuestro software CFD COSMOSFLOWORKS.

Al observar cualitativamente el comportamiento del vehículo en el flujo circundante figura 37, pudimos observar que las secciones de los tubos, no modificaron relevantemente el comportamiento de las líneas de flujo, esto debido a la reducida sección del material que obstaculiza el flujo.

Por otra parte el modulo de flotabilidad, genero una fuerza de arrastre considerable, la cual hizo variar el perfil de presiones del flujo durante su desplazamiento a lo largo del equipo. El flujo en la sección interior al marco en donde se encuentran obstrucciones correspondientes a la configuración de los propulsores y recinto electrónico no presentaron alteraciones significativas.

De esta manera se puede intuir, que el diseño hidrodinámico del vehículo ira enfocado al rediseño del modulo de flotabilidad principalmente, debemos recordar que la disminución de la fuerza de arrastre puede significar un ahorro de potencia considerable además de mejorar la dinámica del vehículo.

Figura 37. Análisis del flujo en la alternativa 1 COSMOSFLOWWORKS



Fuente: Autores

Los valores cuantitativos de las fuerzas simuladas debidas al flujo en este diseño, se muestran en la tabla 4.2 aquí podemos observar que el valor de la fuerza de arrastre en la dirección del sentido del flujo el z se encuentra alrededor de 34,3 N, de esta manera el valor de la fuerza de propulsión deberá igualar esta fuerza para que el equipo se pueda desplazar a la velocidad de operación. Por otro lado el valor de la componente de la fuerza en y tiene un valor de 4 N.

Tabla 3: Valor de la fuerza de arrastre que experimenta la alternativa 1 por medio del software

Parámetro	Valor	Componente-X	Componente-Y	Componente Z	Superficie [m ²]
Fuerza [N]	35	(-)0,35	4	(-)34,3	1,5

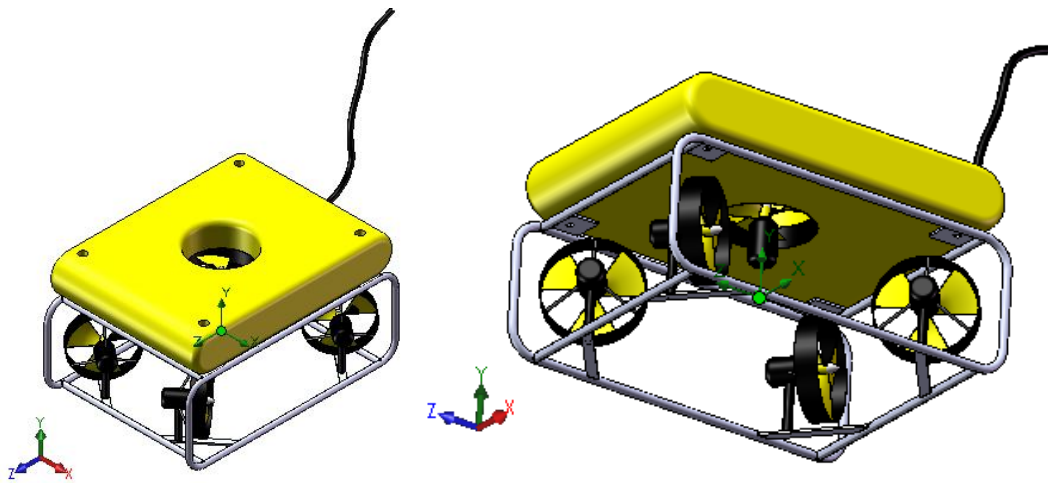
El análisis de los resultados del modelado del flujo en esta primera alternativa es el punto de partida del diseño, por lo tanto en los diseños posteriores se buscaran variantes que tienen como objetivo generar un diseño hidrodinámico que minimice

el valor de la fuerza de arrastre en la componente principal del movimiento y anule las componentes auxiliares expuestas por el software.

5.1.2. Alternativa de diseño 2

La segunda alternativa de diseño, presenta modificaciones en la forma del modulo de flotabilidad en sus bordes delantero y trasero, ataque y fuga respectivamente como se muestra en la figura 38. Con esto se espera minimizar el incremento de presión debido a los bordes agudos del diseño básico, las demás superficies son planas y su geometría aun se asemeja a un bloque. Sus dimensiones son $80 \times 50 \times 40$ [cm], no se modifico la forma y configuración del marco el cual sigue siendo de tubo de aluminio de $5/8$ " de \varnothing_{ext} y pared de $1/32$ ", un modulo de flotabilidad con espuma de poliuretano rígida, recinto electrónico y la configuración planteada como solución del sistema de propulsión figura 38.

Figura 38. Alternativa 2 modelada en CAD Solid Works

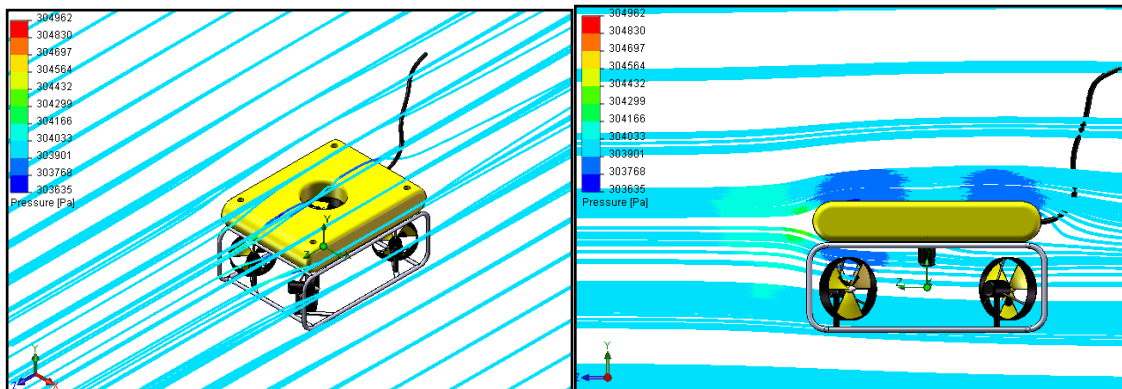


Fuente: Autores

La velocidad de operación que se utilizó es la planteada como requerimiento de diseño 1 m/seg .

Al observar cualitativamente el comportamiento del vehículo en el flujo, se puede observar una disminución en la presión en el borde de ataque del vehículo respecto a la primera alternativa de diseño y caídas de presión (azul más intenso) después del borde de ataque a lo largo de la longitud del equipo. Debido a estos fenómenos en la distribución de presiones se obtuvo una leve disminución en el valor de la fuerza de arrastre resultante del vehículo. Las secciones del marco, no modificaron el comportamiento de las líneas de flujo al igual que las secciones internas al vehículo zonas en donde no se presentó alteraciones significativas ya que no modificaron el perfil de presiones como se muestra en la figura 39.

Figura 39. Análisis del flujo en la alternativa 2 COSMOSFLOWWORKS



Fuente: Autores

El valor de la fuerza de arrastre después de la simulación debidas al flujo en este diseño, se muestran en la tabla 4,2 aquí podemos observar que el valor de la fuerza de arrastre en la dirección del sentido del flujo el z arrojada por el software es de $31,3\text{ N}$. Por otro lado el valor de la componente de la fuerza en el eje y tiene un valor considerable de $3,4\text{ N}$ es así que el diseño presentara posiblemente la tendencia a generar una fuerza de sustentación que lo hará descender al

desplazarse en surge. Para poder alcanzar un posicionamiento deseado esta fuerza debe ser reducida hasta todo lo posible de forma que no interfiera en el control del desplazamiento del vehículo.

Tabla 4: Valor de la fuerza de arrastre que experimenta la alternativa 2 por medio del software

Parámetro	Valor	Componente-X	Componente-Y	Componente Z	Superficie [m ²]
Fuerza [N]	31,5	(-)0,37	3,4	(-)31,3	1,2

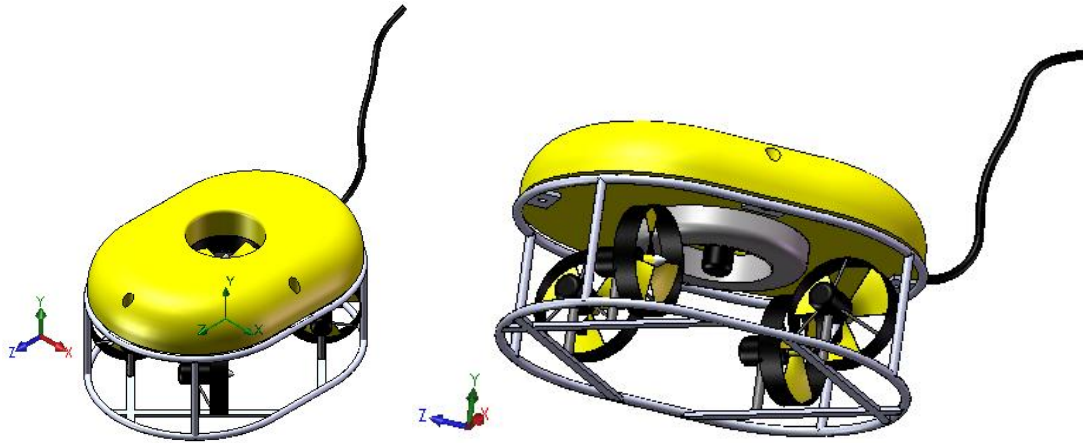
El análisis de los resultados del modelado del flujo en esta alternativa, presenta una leve disminución de la fuerza de arrastre inicial, debido a una entrada y salida más suave del fluido en los bordes de ataque y salida, de esta manera el modelo se encamina al cumplimiento de los objetivos.

5.1.3. Alternativa de diseño 3

La tercera alternativa acopla al diseño de los bordes de entrada y salida secciones semicirculares que mejoran el ataque y la fuga del fluido, ya no se encuentran superficies planas y el vehículo se torna curvilíneo en todas sus secciones. En primera instancia se espera en los resultados de la simulación un incremento en el valor de la componente en el eje Y, esto debido a que se incrementa el área superior del vehículo lo cual traerá como consecuencia un incremento en la fuerza que empuja al vehículo hacia fondo. Las dimensiones son $70 \times 50 \times 40$ [cm], se mantiene la sección del marco (*tubo de aluminio de 5/8" de ϕ_{ext} y pared de 1/32"*) pero se modifica su configuración de forma tal que se adapto a la forma del modulo de flotabilidad.

El modulo de flotabilidad es de espuma rígida de poliuretano, el equipo tienen su respectivo recinto electrónico y sistema de propulsión, todo como se muestra en la figura 40.

Figura 40. Alternativa 3 modelada en CAD Solid Works



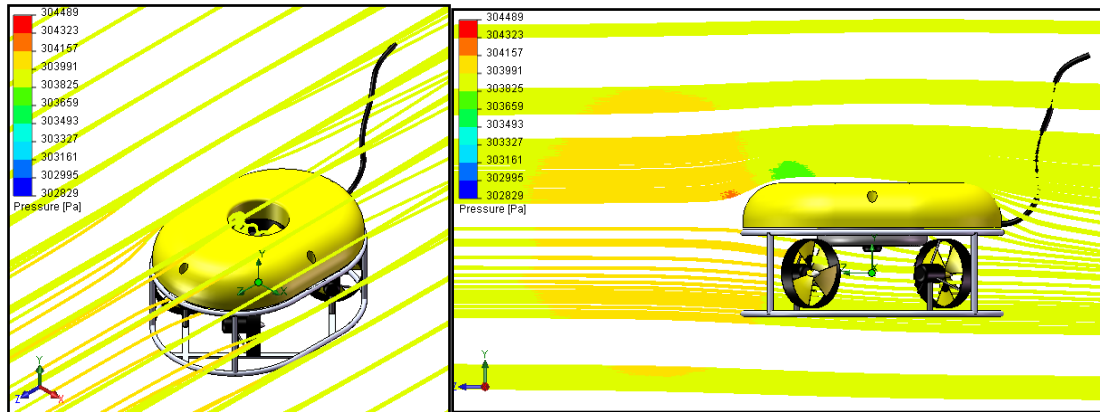
Fuente: Autores

La velocidad de operación que se utilizó como requerimiento de diseño del vehículo es de 1 m/seg .

Al observar cualitativamente el comportamiento de las líneas de flujo se pueden observar un incremento de presión en la parte delantera del vehículo esto debido probablemente al acople entre el modulo de flotabilidad y el marco el cual incrementa de alguna forma la sección del borde de ataque como se presenta en la figura 41.

El flujo en la sección interior al marco en donde se encuentran obstrucciones correspondientes a la configuración de los propulsores y recinto electrónico no presenta alteraciones significativas en el perfil de presiones.

Figura 41. Análisis del flujo en la alternativa 3 COSMOSFLOWWORKS



Fuente: Autores

Los valores arrojados por el software para esta alternativa dejan ver una disminución en el valor de la fuerza de arrastre en la componente Z 18 N, es de esperarse que esta mejora se deba a la implementación de las nuevas formas de los bordes de ataque y fuga, ya que no se llevaron a cabo cambios significativos en la configuración de los demás componentes del vehículo.

La componente en el eje Y 14,5 N arrojó un valor esperado ya que se incrementó la superficie superior del vehículo y esto durante el desplazamiento del vehículo en el flujo presentará un comportamiento muy similar al efecto de un alerón en los automóviles sustentación-inversa que incrementará la componente en el eje Y.

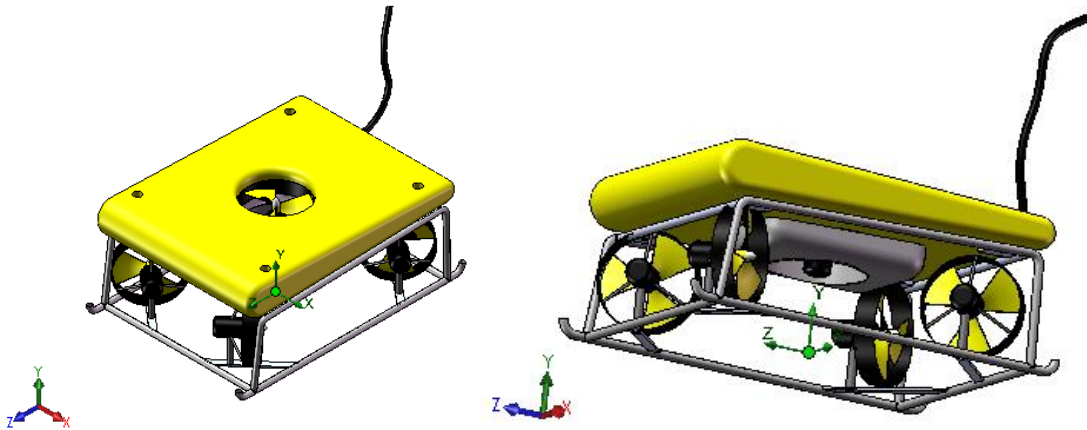
Tabla 5: Valor de la fuerza de arrastre que experimenta la alternativa #3 por medio del software

Parámetro	Valor	Componente-X	Componente-Y	Componente Z	Superficie [m ²]
Fuerza [N]	32,4	(-)0,3	5,1	(-)32	1,2

5.1.4. Alternativa de diseño 4

Este diseño recoge la aplicación de una forma estructural naval, se acopla al diseño en la dirección principal que se tiene como requerimiento esperando que esto se refleje en una disminución significativa de la fuerza de arrastre que presenta el diseño. Esta alternativa tiene un borde de ataque, y borde de fuga de diferente radio en su modulo de flotabilidad, debido a lo irregular de su forma el dimensionamiento de la flotabilidad de este equipo, deberá ser estudiada en detalle ya que la variación del volumen del modulo de flotabilidad a lo largo del equipo, generara cambios en la flotabilidad del vehículo. El marco es de tubo de aluminio de $5/8"$ de ϕ_{ext} y pared de $1/32"$, un recinto electrónico que se encuentra ensamblado al marco y cinco propulsores, configurados con cuatro propulsores horizontales y un propulsor vertical, todo como se muestra en la figura 42.

Figura 42. Alternativa 4 modelada en CAD Solid Works

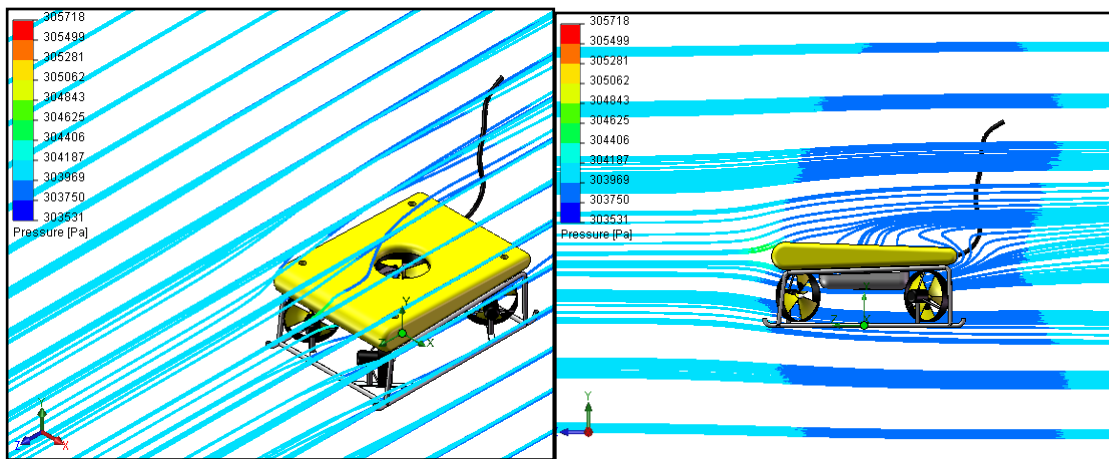


Fuente: Autores

La velocidad de operación es de 1 m/seg , al simular el desplazamiento del vehículo en el flujo, se puede observar cualitativamente una caída de presión a la salida del borde de ataque este fenómeno se prolonga por toda la longitud del vehículo hasta el borde de fuga. Esta caída de presión generará una resistencia

extra al flujo del fluido lo cual incrementara el valor de la fuerza de arrastre que este equipo presentara al desplazarse. Por otra parte el flujo en la sección interior al marco en donde se encuentran obstrucciones correspondientes a la configuración de los propulsores y recinto electrónico no presento alteraciones significativas del flujo en su paso a través del vehículo como se observa en la figura 43.

Figura 43. Análisis del flujo en la alternativa 4 COSMOSFLOWWORKS



Fuente: Autores

Los valores cuantitativos de las fuerzas simuladas debidas al flujo en este diseño, se muestran en la tabla 6 aquí podemos observar que el valor de la fuerza de arrastre en la dirección del sentido del flujo el z se encuentra alrededor de 33,4 N, de esta manera se presento un incremento en el valor de la fuerza de propulsión que debe superar el vehículo. Por otro lado el valor de la componente de la fuerza en y tiene un valor de 2,3N.

Tabla 6: Valor de la fuerza de arrastre que experimenta la alternativa No.4 por medio del software

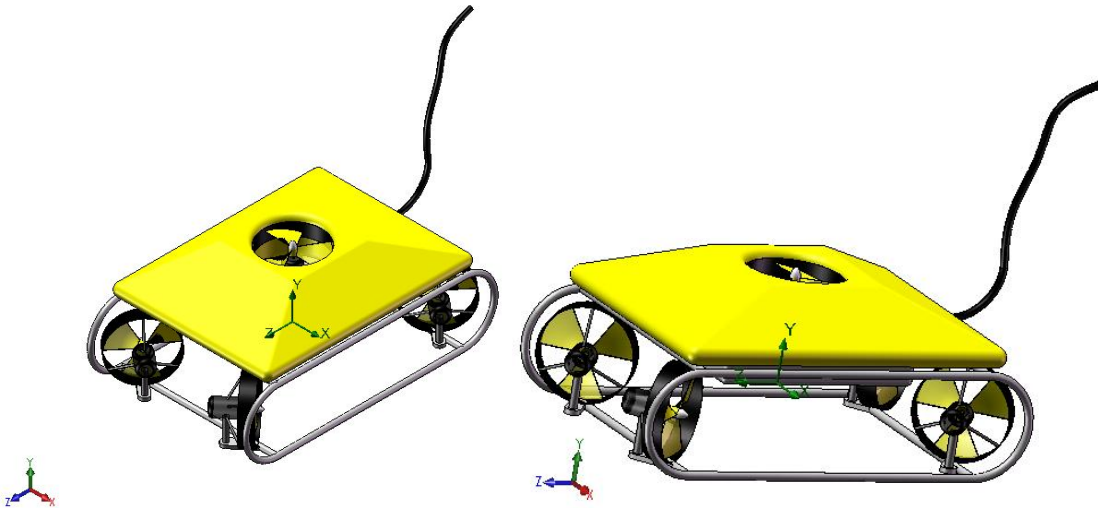
Parámetro	Valor	Componente-X	Componente-Y	Componente Z	Superficie [m ²]
Fuerza [N]	33,4	(-)0,05	2,3	(-)33,4	1,3

Los resultados del modelado del flujo de esta alternativa arrojaron un valores en la dirección el movimiento surge, muy similares en comparación con el diseño básico con el que se comenzó el diseño de alternativas de esta manera que da descartado con posible solución, además este modelo plantea una serie de desventajas en cuando a la asimetría del diseño, de esta forma se presentara inestabilidad en el vehículo estáticamente debido a la distribución de cargas irregular que debe implementarse para cumplir con este diseño.

5.1.5. Alternativa de diseño 5

El quinto diseño planteado como posible solución, es un equipo básico, con superficies planas en forma de pirámide truncada. Las dimensiones de un bloque equivalente son $63 \times 50 \times 35$ [cm]. El equipo consiste en un marco de tubo de aluminio de $5/8"$ de ϕ_{ext} y pared de $1/32"$, un modulo de flotabilidad con espuma de poliuretano rígida y un recinto electrónico que se encuentra ensamblado al marco con cinco propulsores, configurados como se muestra en la figura 44.

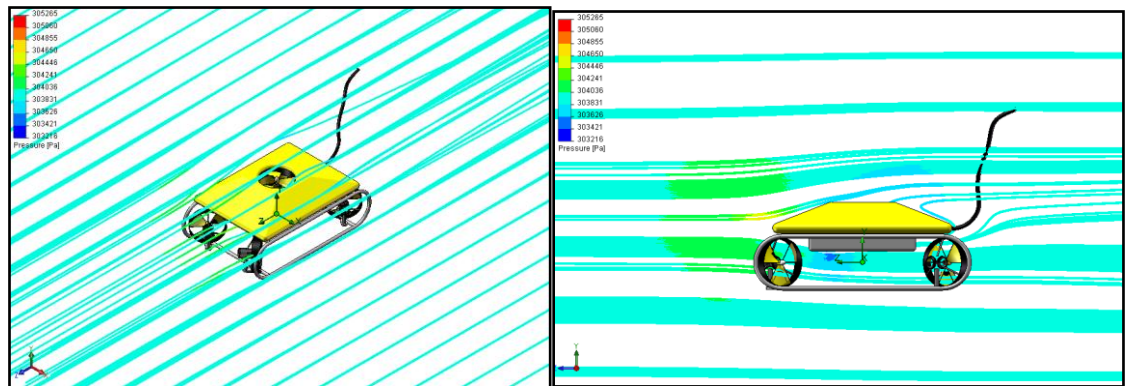
Figura 44. Alternativa 5 modelada en CAD Solid Works



Fuente: Autores

La velocidad de operación que se utilizó como requerimiento de diseño del vehículo es de 1 m/seg esta se obtuvo de las velocidades de operación promedio que tienen estos equipos en el mercado.

Figura 45. Análisis del flujo en la alternativa 5 COSMOSFLOWWORKS



Fuente: Autores

Los valores cuantitativos de las fuerzas simuladas debidas al flujo en este diseño, se muestran en la tabla 7 aquí podemos observar que el valor de la fuerza de arrastre en la dirección del sentido del flujo el z se encuentra alrededor de 29 N, de esta manera el valor de la fuerza de propulsión deberá superar esta fuerza para poder desplazar a nuestro equipo a la velocidad de requerimiento. Por otro lado el valor de la componente de la fuerza en y tiene un valor 3,7 N.

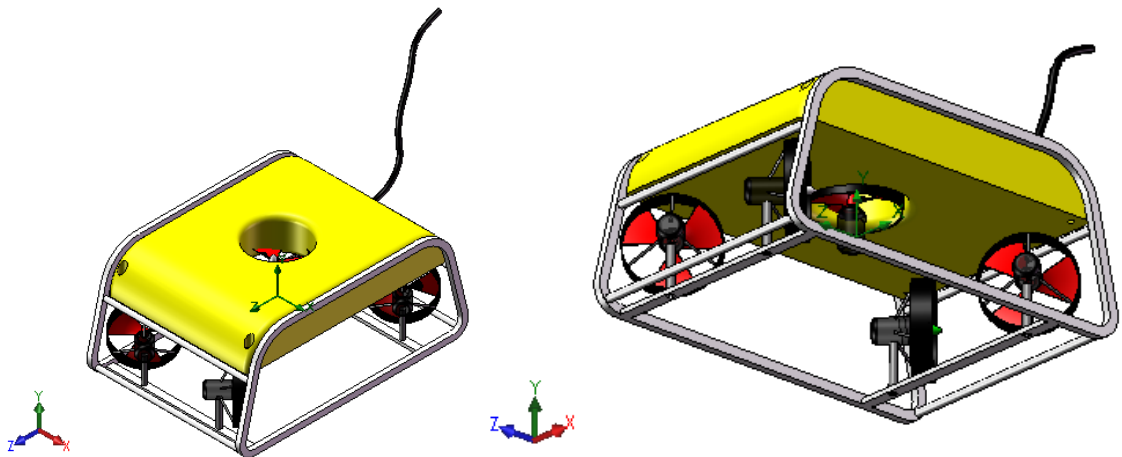
Tabla 7: Valor de la fuerza de arrastre que experimenta la alternativa No.5 por medio del software

Parámetro	Valor	Componente-X	Componente-Y	Componente Z	Superficie [m ²]
Fuerza [N]	29,2	(-) 0,3	3,7	(-)29	1,2

5.1.6. Alternativa de diseño 6

En este segundo grupo de alternativas se analizara la incidencia de otro diseño de marco en el arrastre del vehículo. El diseño planteado como alternativa 6, es un equipo básico, con superficies planas que asemeja su geometría aun bloque, el cual presenta redondeos en sus bordes de ataque y fuga. Sus dimensiones son $80 \times 50 \times 40$ [cm] y consiste en un marco de polipropileno de espesor $\varepsilon = 3/8$ ", un modulo de flotabilidad con espuma de poliuretano rígida, recinto electrónico y un sistema de propulsión todo como se muestra en la figura 46.

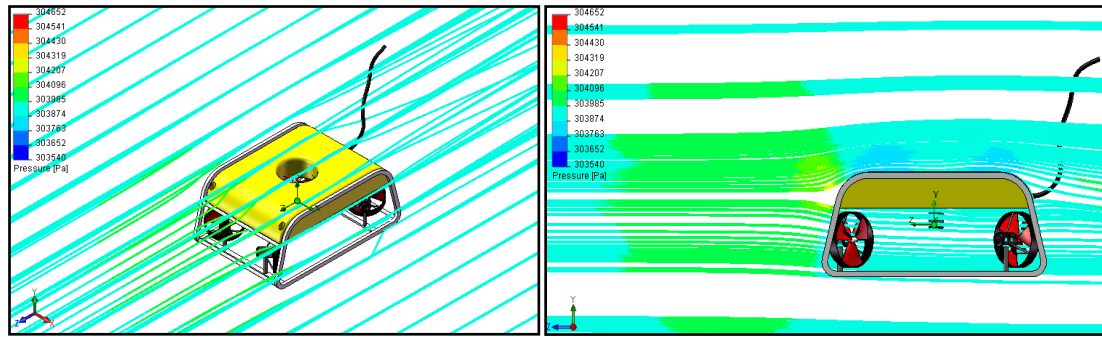
Figura 46. Análisis del flujo en la alternativa 5 COSMOSFLOWWORKS



Fuente: Autores

Al observar el comportamiento del vehículo en el flujo, figura 47.se presenta un incremento de presión considerable en el borde de ataque y pequeñas caídas de presión a la salida del mismo y en el borde de fuga, esto pronostica muy seguramente una mala reacción del diseño en cuanto a disminución de arrastre se refiere. La velocidad de operación es de $1m/seg$.

Figura 47. Análisis del flujo en la alternativa 6 COSMOSFLOWWORKS



Fuente: Autores

Este incremento de presión en la parte delantera del modelo puede ser ocasionado por, un incremento de la sección transversal del marco y por otra parte la configuración del modulo de flotabilidad planteada.

Al igual que en simulaciones anteriores el flujo en la sección interior al marco en donde se encuentran las obstrucciones correspondientes a la configuración de los propulsores y recinto electrónico presento alteraciones, pero no fueron significativas.

Los valores cuantitativos de las fuerzas simuladas debidas al flujo en este diseño, se muestran en la tabla 8 aquí podemos observar que el valor de la fuerza de arrastre en la dirección del sentido del flujo el z se encuentra alrededor de 34,2 N, inferior al valor extraído de la simulación del diseño inicial planteado como punto de referencia de la etapa de diseño. Por otro lado el valor de la componente de la fuerza en y tiene un valor de 4,7N es así que el diseño tendrá la tendencia a presentar una fuerza de sustentación que lo hará descender.

Tabla 8: Valor de la fuerza de arrastre que experimenta la alternativa 6 por medio del software

Parámetro	Valor	Componente-X	Componente-Y	Componente Z	Superficie [m ²]
Fuerza [N]	34,5	(-) 0,1	4,7	(-)34,2	1,1

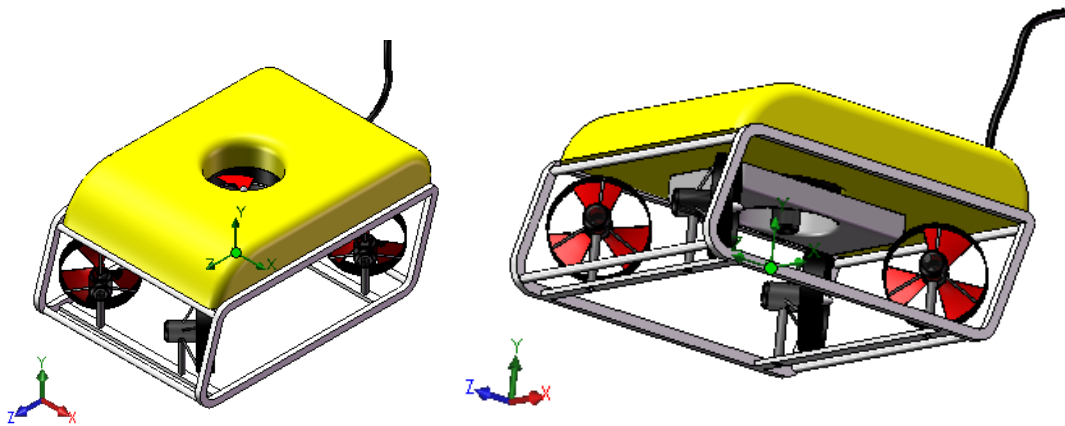
El análisis de los resultados del modelado del flujo en esta alternativa se presenta como el mejor diseño en lo que se refiere a comportamiento del flujo respecto del vehículo en comparación con los diseños predecesores.

5.1.7. Alternativa de diseño 7

La alternativa de diseño 7 se asemeja a los diseños anteriores con la diferencia que sus modificaciones buscan combatir el fenómeno de incremento de presión en la parte delantera de los modelos, así se procede a incrementar la curvatura del borde de ataque de forma tal que permita el acceso del fluido mas suavemente y disminuir esté fenómeno.

El equipo se describe como básico, con superficies planas que asemeja su geometría aun bloque de dimensiones son $70 \times 50 \times 35$ [cm] y consiste en un marco de polipropileno de espesor $\varepsilon = 3/8$ ", un modulo de flotabilidad con espuma de poliuretano rígida, un recinto electrónico que se encuentra ensamblado al marco y cinco propulsores, configurados con cuatro propulsores horizontales y un propulsor vertical, todo como se muestra en la figura 48.

Figura 48. Alternativa 7 modelada en CAD Solid Works



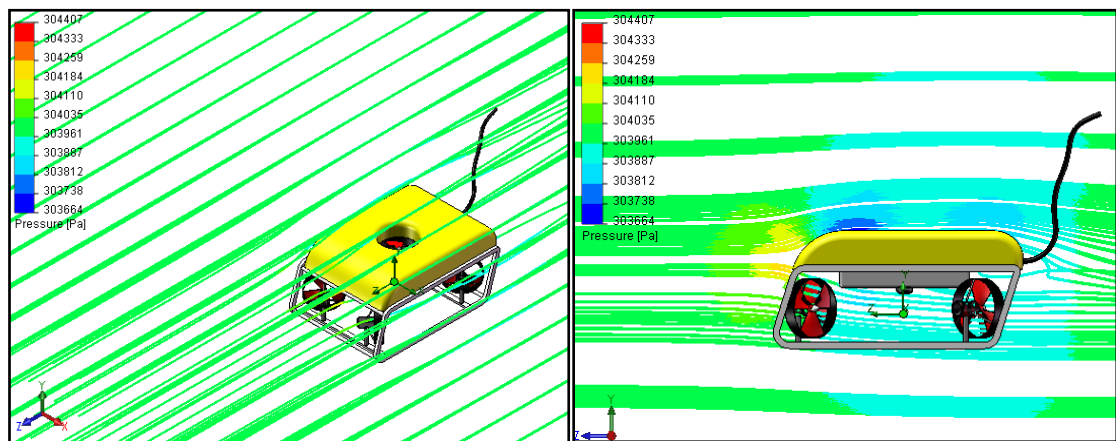
Fuente: Autores

La velocidad de operación que se utilizó como requerimiento de diseño del vehículo es de 1 m/seg . Al observar el comportamiento del diseño frente al flujo se disminuyó la presión en la parte frontal del diseño, pero a lo largo de longitud del vehículo se presentó una caída de presión que se percibe claramente por el color aguamarina que presenta el entorno del modelo, este comportamiento podría deberse a que al disminuir la presión a la entrada el fluido recorrería el cuerpo del equipo más rápidamente lo cual conlleva a una caída de presión. Por esta razón a la salida del borde de ataque se presenta la mayor caída de presión fenómeno que va disminuyendo en intensidad conforme el fluido atraviesa el cuerpo del módulo de flotabilidad figura 35.

Por otra parte el módulo de flotabilidad, generó una fuerza de arrastre considerable, la cual hizo variar el perfil de presiones del flujo durante su desplazamiento a lo largo del equipo. El flujo en la sección interior al marco en donde se encuentran obstrucciones correspondientes a la configuración de los propulsores y recinto electrónico presentó alteraciones, pero no fueron significativas.

De esta manera podemos intuir cualitativamente, que la modificación del borde de ataque con un incremento del radio de la circunferencia demostró ser una estrategia positiva en lo que a disminución de la presión en la parte frontal se refiere.

Figura 49. Análisis del flujo en la alternativa 7 COSMOSFLOWWORKS



Fuente: Autores

Los valores cuantitativos de las fuerzas simuladas debidas al flujo en este diseño, se muestran en la tabla 4.7 aquí podemos observar que el valor de la fuerza de arrastre en la dirección del sentido del flujo el z se encuentra alrededor de 32,4 N, de esta manera el valor de la fuerza de propulsión deberá superar esta fuerza para poder desplazar a nuestro equipo a la velocidad de diseño. Por otro lado el valor de la componente de la fuerza en y tiene un valor de 5,2 N.

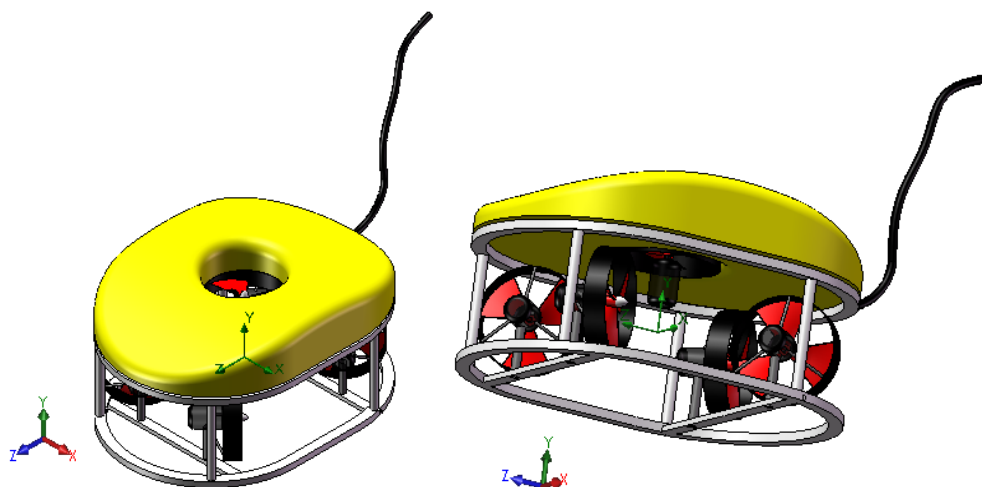
Tabla 9: Valor de la fuerza de arrastre que experimenta la alternativa 7 por medio del software

Parámetro	Valor	Componente-X	Componente-Y	Componente Z	Superficie [m ²]
Fuerza [N]	32,8	(-)0,023	5,2	(-)32,4	1,3

5.1.8. Alternativa de diseño 8

Este diseño se baso, en la disminución de la fuerza de arrastre debida a la implementación en el modulo de flotabilidad de semicircunferencias como bordes de ataque y escape respectivamente. Sus dimensiones son $70 \times 50 \times 35$ [cm] y consiste en un marco de polipropileno con semicircunferencias de 250 mm de radio , la configuración del sistema propulsor es la planteada como solución, todo como se muestra en la figura 50.

Figura 50. Alternativa 8 modelada en CAD Solid Works

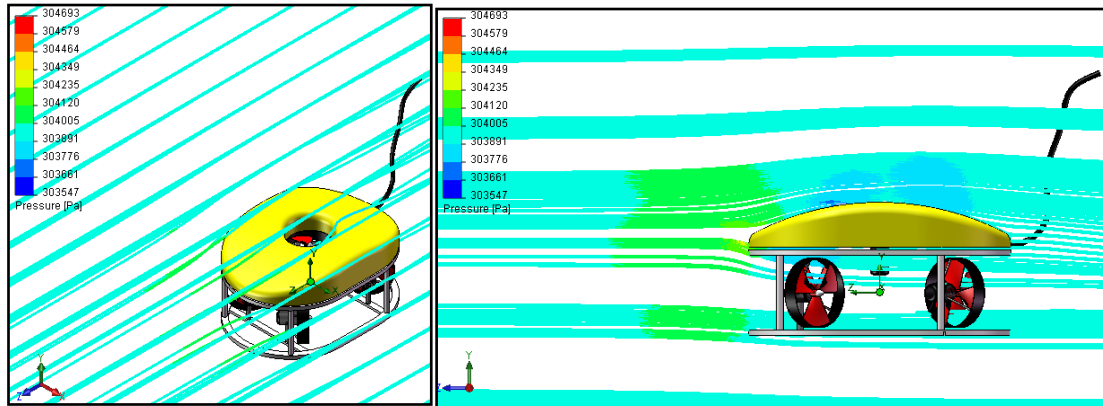


Fuente: Autores

La velocidad de operación que se utilizo como requerimiento de diseño del vehículo es de 1 m/seg velocidad planteada como objetivo.

Al analizar el comportamiento del vehículo en el flujo, se puede observar un incremento de presión en la sección de ataque del vehículo en la sección de fuga el flujo se escapa suavemente sin caídas de presión ni turbulencias figura 51.

Figura 51. Análisis del flujo en la alternativa 8 COSMOSFLOWWORKS



Fuente: Autores

Por otra parte las secciones del marco de polipropileno, no modifica relevantemente el comportamiento de las líneas de flujo, de esta forma la incidencia de el diseño estructural planteado no incrementa considerablemente el valor de la fuerza de arrastre generada por el equipo. El flujo en la sección interior al marco en donde se encuentran obstrucciones correspondientes a la configuración de los propulsores y recinto electrónico no presento alteraciones en su perfil de presiones.

Los valores cuantitativos del las fuerzas simuladas debidas al flujo en este diseño, se muestran en la tabla 10 aquí podemos observar que el valor de la fuerza de arrastre en la dirección del sentido del flujo el z se encuentra alrededor de 32,1 N, componente en el eje Z necesario para desplazar al vehículo a la velocidad de diseño.

Tabla 10: Valor de la fuerza de arrastre que experimenta la alternativa 8 por medio del software

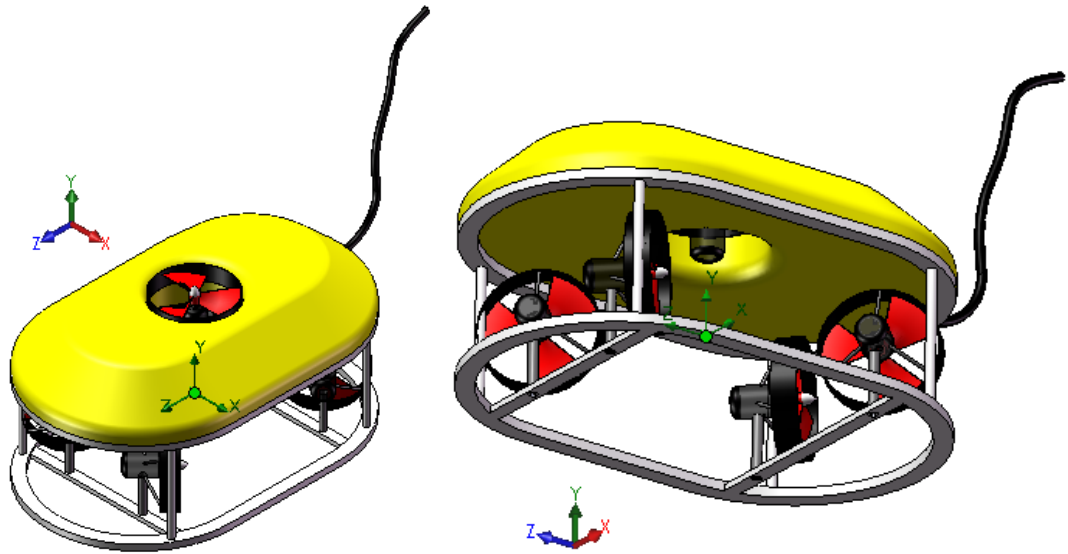
Parámetro	Valor	Componente-X	Componente-Y	Componente Z	Superficie [m ²]
Fuerza [N]	32,4	(-)0,015	4,9	(-)32,1	1,2

Al analizar los resultados del modelado arrojados por este diseño podemos ver que la fuerza de arrastre ha disminuido a un valor bajo, aunque ahora se ha incrementado el valor de la componente en el eje Y lo que generara una carga vertical en el diseño. En una posterior alternativa se deberá corregir este inconveniente ya que este fenómeno entorpece la búsqueda de un punto de meta al cual se quiera dirigir el vehículo.

5.1.9. Alternativa de diseño 9

El diseño propuesto como alternativa 9 sigue la línea de los diseños antecesores que han mostrado una evolución en el objetivo planteado en este capítulo (Disminuir al máximo el valor de la fuerza de arrastre) habiendo asimilado las secciones circulares como la base de diseño a mejorar, en el modelo anterior se implemento un bisel en el borde de ataque que mostro ser efectivo, ya que disminuyo el valor de la fuerza de arrastre, así se implementa esta forma a lo largo de todo el perímetro del modulo de flotabilidad como se muestra en la figura 52.

Figura 52. Alternativa 9 modelada en CAD Solid Works

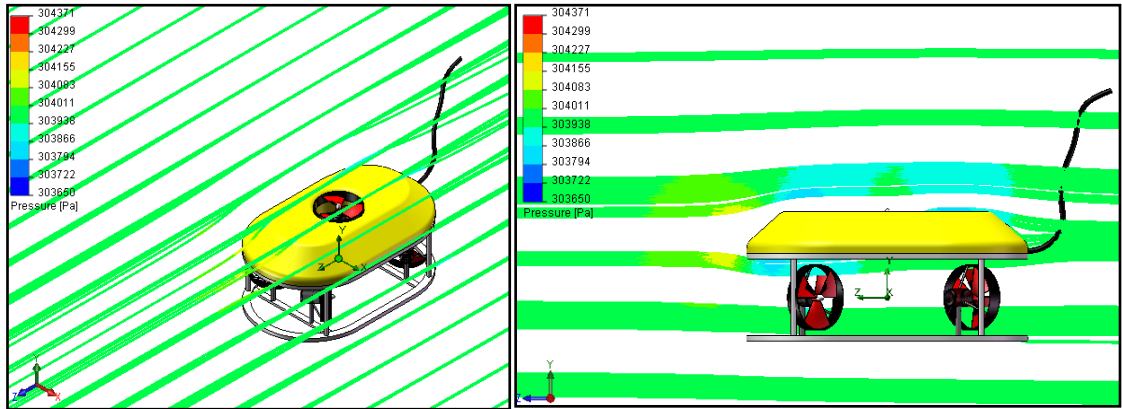


Fuente: Autores

Este equipo tiene un volumen equivalente de dimensiones $70 \times 50 \times 30$ [cm] y consiste en un marco de polipropileno blanco de espesor $\varepsilon = 3/8$ ", con semicircunferencias 250 mm en sus extremos, un modulo de flotabilidad con espuma de poliuretano rígida, un recinto electrónico que se encuentra ensamblado al marco y cinco propulsores configurados como se muestra en la figura anterior. Su velocidad de operación es de 1 m/seg.

Al observar el comportamiento del flujo circundante al vehículo, se puede observar un gran disminución de la presión en los bordes de ataque y fuga, por otro lado aun se presenta el fenómeno de caída presión a lo largo de longitud del equipo, esto probablemente incrementara el valor correspondiente de la fuerza de arrastre. Por otra parte el modulo de flotabilidad, genero una fuerza de arrastre considerable, la cual hizo variar el perfil de presiones del flujo durante su desplazamiento a lo largo del equipo como se puede observar en la figura 53.

Figura 53. Análisis del flujo en la alternativa 9 COSMOSFLOWWORKS



Fuente: Autores

Los valores cuantitativos de las fuerzas simuladas debidas al flujo en este diseño, se muestran en la tabla 11 aquí podemos observar que el valor de la fuerza de arrastre en la dirección del sentido del flujo el z se encuentra alrededor de 29,2 N. Por otro lado el valor de la componente de la fuerza en y tiene un valor de 10 N.

Tabla 11: Valor de la fuerza de arrastre que experimenta la alternativa 9 por medio del software

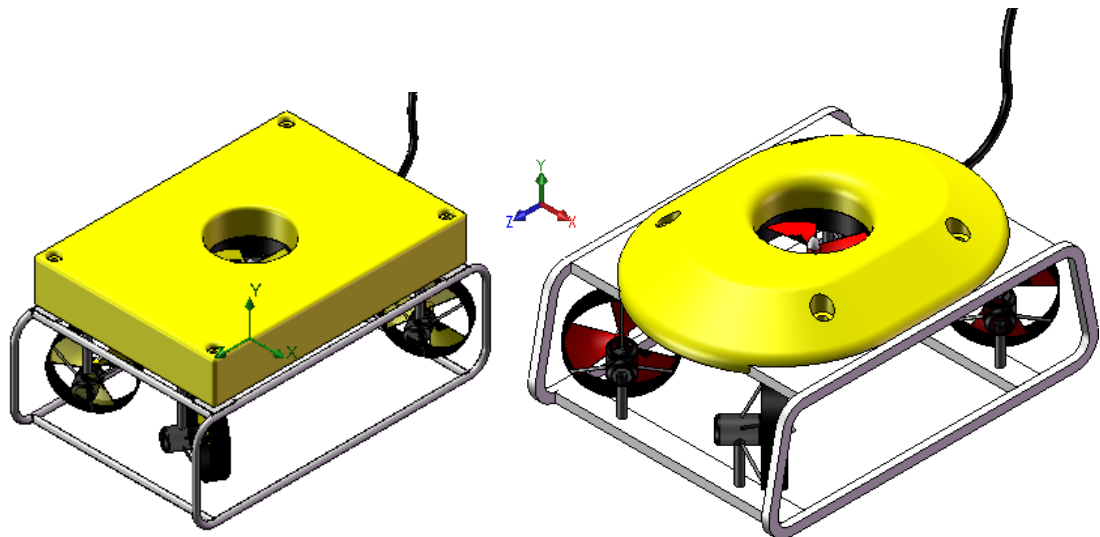
Parámetro	Total	Componente-X	Componente-Y	Componente-Z	Superficie [m ²]
Fuerza [N]	29,6	(-)0,09	5,3	(-)29,2	1,3

5.1.10 Alternativa de diseño 10

La alternativa 10 reúne todas las características que determinaron el buen desempeño hidrodinámico de sus diseños predecesores, en la figura 54.se puede observar la gran evolución entre el diseño básico que dio fundamento al desarrollo de este proyecto y el diseño final planteado como solución, el cual dejo atrás las superficies planas básicas que asemejaban su geometría aun bloque.

Las dimensiones de la propuesta son $73 \times 50 \times 35$ [cm] y consiste en un marco polipropileno blanco de espesor $\varepsilon = 3/8$ ", un modulo de flotabilidad con espuma de poliuretano rígida de dimensiones $80 \times 50 \times 10$ [cm] un recinto electrónico que se encuentra ensamblado al marco y cinco propulsores, configurados con cuatro propulsores horizontales y un propulsor vertical, todo como se muestra en la figura 54.

Figura 54. Evolución del diseño del proyecto alternativa 1 vs alternativa 10 modeladas en CAD Solid Works



Fuente: Autores

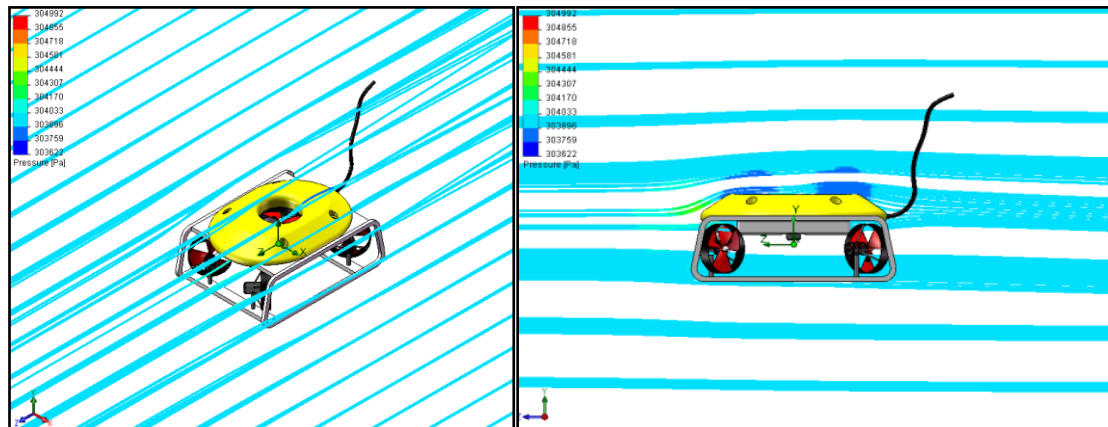
El desarrollo del diseño basado en las simulaciones en el software fueron determinantes al momento de generar la forma del modulo de flotabilidad es por esta razón que las semicircunferencias en los bordes de ataque y fuga, la forma de chaflán o bisel que se adopto en el perímetro del modulo, el análisis estructural y su influencia en el coeficiente de arrastre fueron direccionados por las diferentes experiencia conforme se avanzaba en el diseño.

La velocidad de operación que se utilizó como requerimiento de diseño del vehículo es de 1 m/seg . Al observar cualitativamente el comportamiento del flujo circundante en el vehículo, se puede observar una clara disminución de la fuerza de arrastre, fenómeno reflejado en los incrementos y caídas de presión, respecto de los diseños anteriores.

El flujo en la sección interior al marco en donde se encuentran obstrucciones correspondientes a la configuración de los propulsores y recinto electrónico presentó alteraciones, pero no fueron significativas, debido a que la modificación del perfil de presiones no es percibida figura 55.

El cambio de un material metálico del marco (aluminio) a un polímero como el polipropileno sin duda alguna fue un acierto tanto en el sentido estético, y de manufactura, además la disminución del peso maximiza la eficiencia propulsiva, la cual se ve afectada por secciones transversales considerables que impiden el desplazamiento de los cuerpos inmersos en los fluidos.

Figura 55. Análisis del flujo en la alternativa 10 COSMOSFLOWWORKS



Fuente: Autores

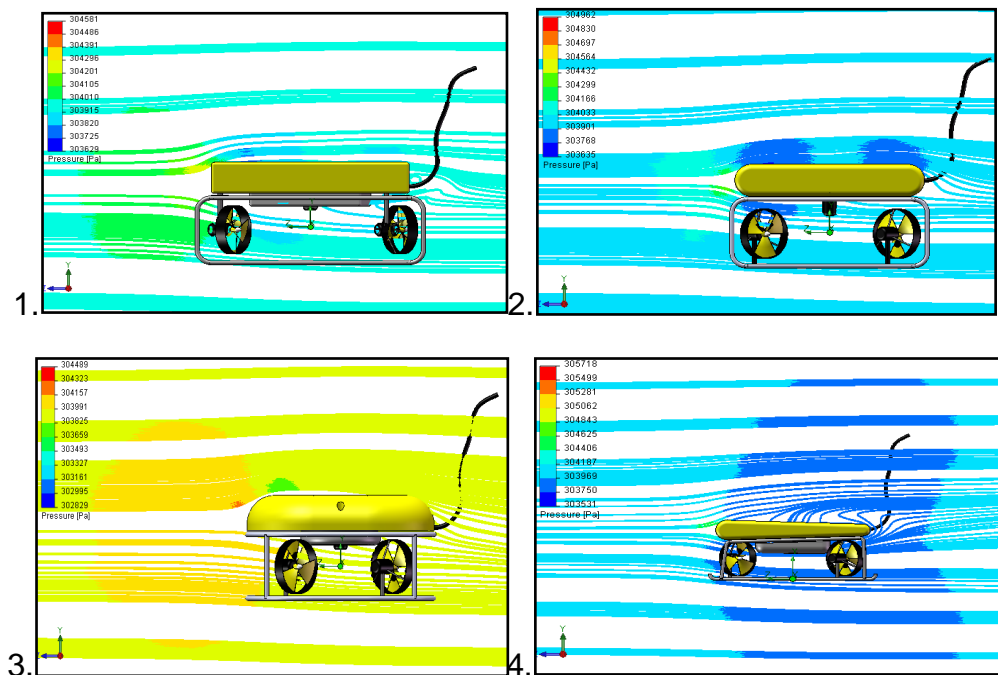
Los valores cuantitativos de las fuerzas simuladas debidas al flujo en este diseño, se muestran en la tabla 12 aquí podemos observar que el valor de la fuerza de

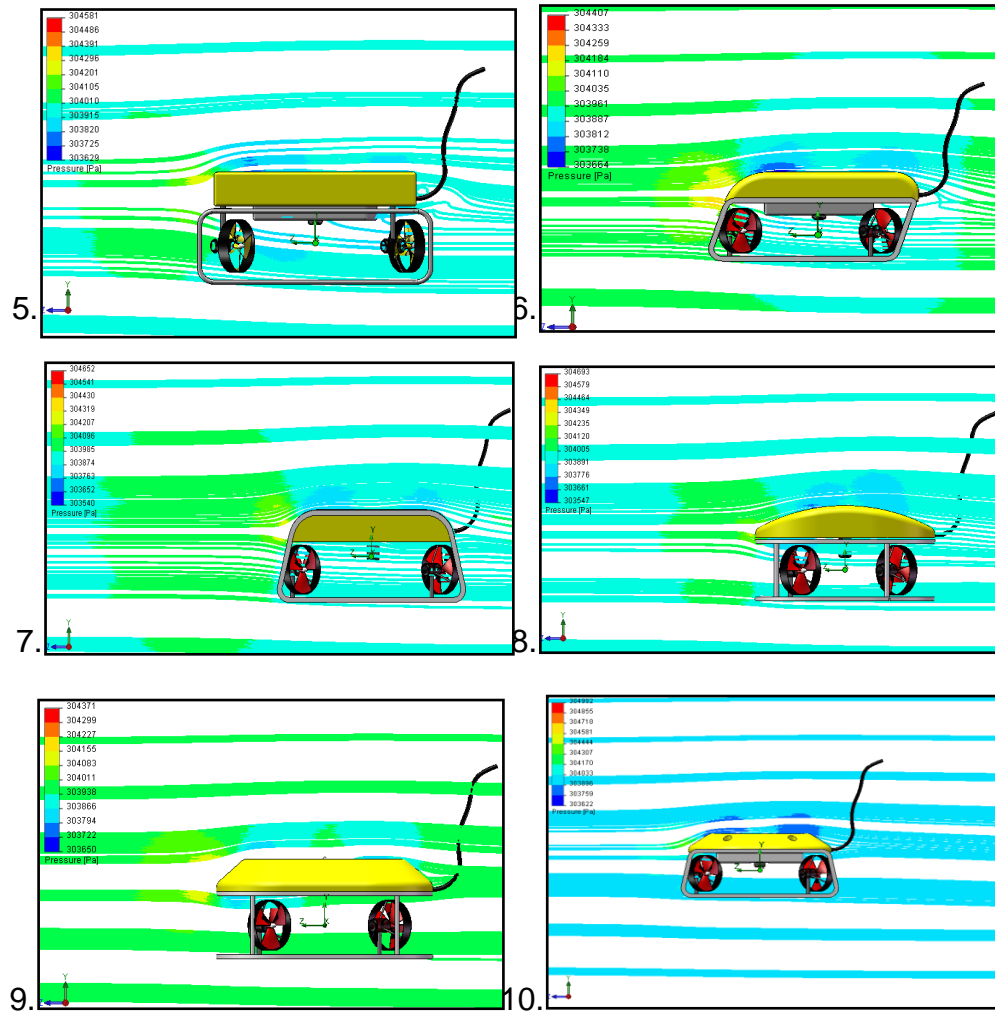
arrastre en la dirección del sentido del flujo el z se encuentra alrededor de 28,3 N, de esta manera el valor de la fuerza de propulsión deberá igualar esta fuerza para poder desplazar el equipo a la velocidad de operación. Por otro lado el valor de la componente de la fuerza en Y tiene un valor considerable de 9,2 N.

Tabla 12: Valor de la fuerza de arrastre que experimenta la alternativa 10 por medio del software

Parámetro	Total	Componente-X	Componente-Y	Componente-Z	Superficie [m ²]
Fuerza [N]	28,4	(-)0,02	3,2	(-)28,3	1,1

Figura 56. Evolución del diseño preliminar del equipo basado en su comportamiento frente a las líneas de flujo





Fuente: Autores

5.2. ALTERNATIVA SELECCIONADA

Al observar los resultados arrojados por cada una de las alternativas en la tabla 13, se selecciono la alternativa 10 como la mejor alternativade diseño para dar solución a los objetivos planteados.

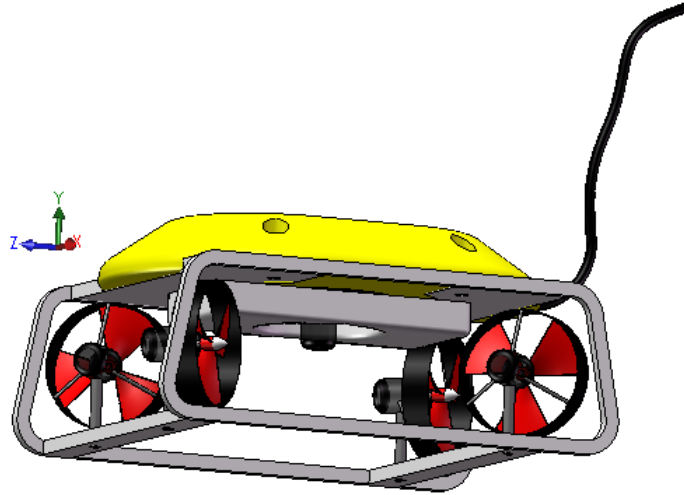
Tabla 13: Componentes y arrastre total generados por el CFD para cada una de las alternativas

Alternativa	Componente-X[N]	Componente-Y[N]	Componente-Z[N]	Total [N]	
1	0,35	4	34,3	35	
2	0,37	3,4	31,3	31,5	
3	0,3	5,1	32	32,4	
4	0,05	2,3	33,4	33,5	
5	0,3	3,7	29	29,2	
6	0,1	4,7	34,2	34,5	
7	0,023	5,2	32,4	32,8	
8	0,015	4,9	32,1	32,4	
9	0,09	5,3	29,2	29,6	
10	0,02	3,2	28,3	28,4	ok

Fuente: Autores

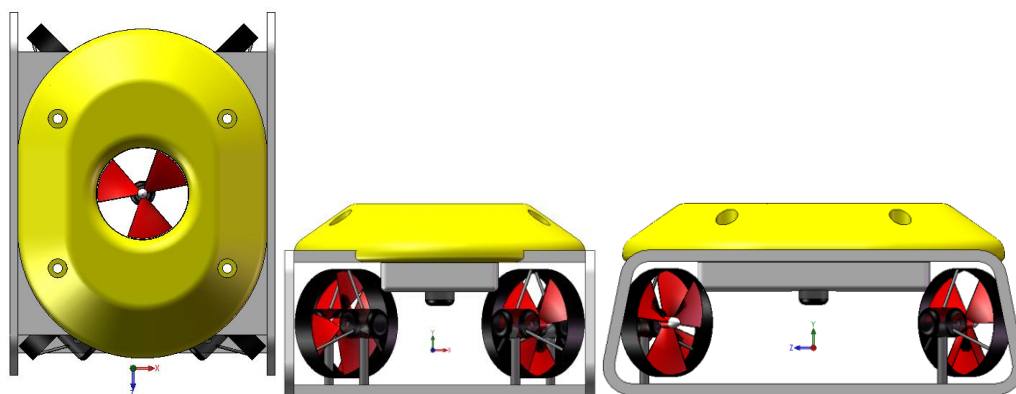
La alternativa 10 es la que se procede a seleccionar, ya que presenta el menor valor de arrastre.

Figura 57. Alternativa 10 seleccionada como diseño solución del proyecto.



Ahora se debe desarrollar un análisis más riguroso de la dinámica que va a presentaren los tres ejes, ya que aunque el movimiento surge es un requerimiento de diseño, para los movimientos sway y heave se debe incluir particular atención debido a que las secciones transversales involucradas en estos movimientos son mayores y una selección del sistema de propulsión sin esta consideración podría derivar en la ineffectividad del vehículo para desarrollar maniobras que involucren estos grados de libertad.

Figura 58. Secciones transversales involucradas en la generación de los movimientos surge, sway y heave en la alternativa 10.



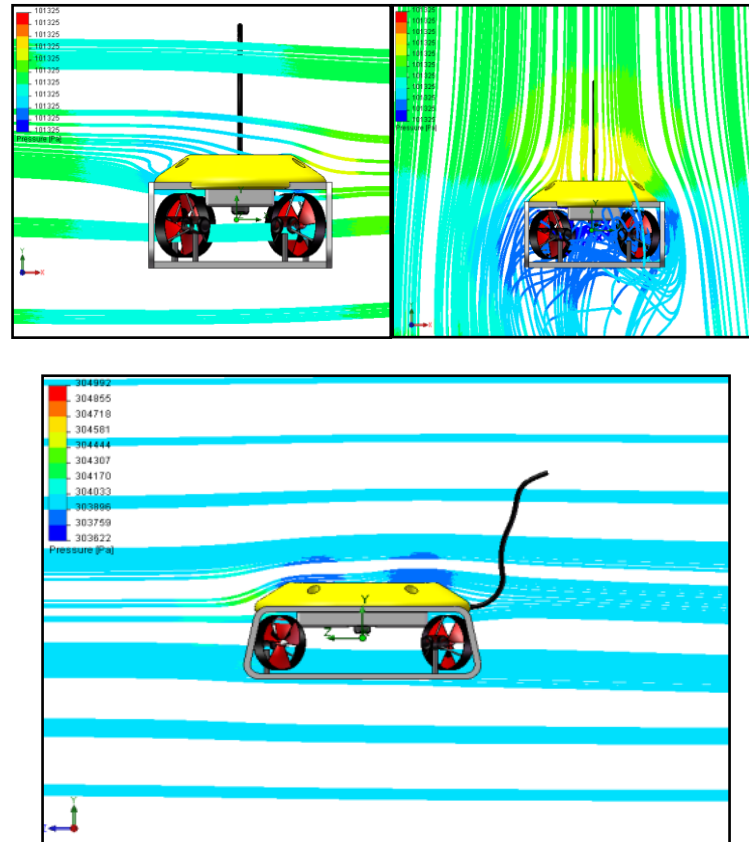
Fuente: Autores

Los valores de empuje que presenta el vehículo para su movimiento inminente en los grados de libertad surge, sway y heave muestran lo que se esperaba.

Figura 59. Valores mínimos de empuje requeridos para encontrar un estado de movimiento inminente

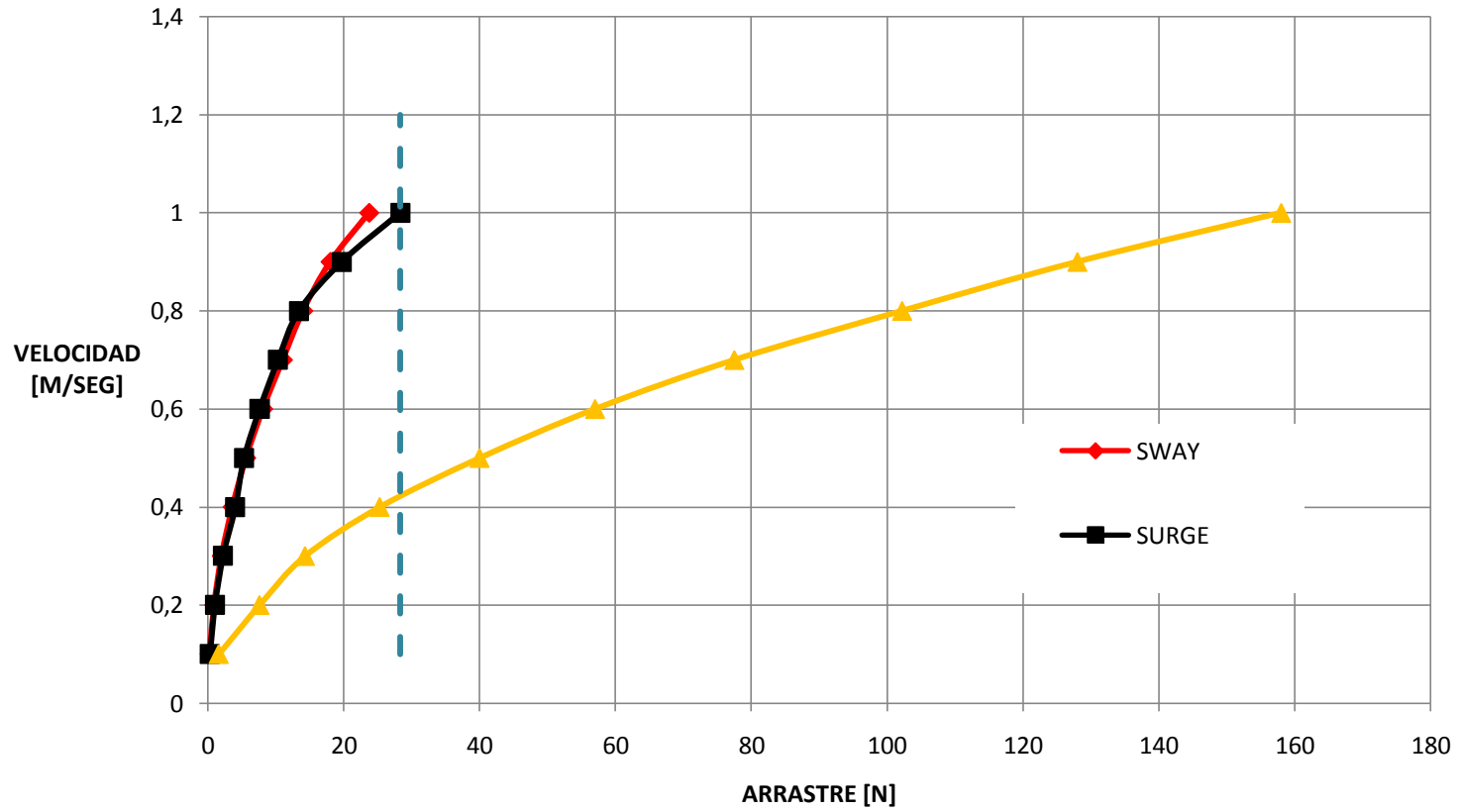
SWAY				
Parámetro	Valor	Componente-X	Componente-Y	Componente Z
Fuerza [N]	0,0026	(-)0,003	0,0002	(-)3,3E-0,5
HEAVE				
Parámetro	Valor	Componente-X	Componente-Y	Componente Z
Fuerza [N]	0,005	3,9E-0,6	0,0042	0,003
SURGE				
Parámetro	Valor	Componente-X	Componente-Y	Componente Z
Fuerza [N]	0,0033	(-)3,8E-05	0,0008	(-)0,0032

Figura 60. Comportamiento de las líneas de flujo en cada una de las áreas correspondientes a los movimientos surge sway y heave



Fuente: Autores

Figura 61. Relación velocidad - Arrastre



Fuente: The ROV Manual

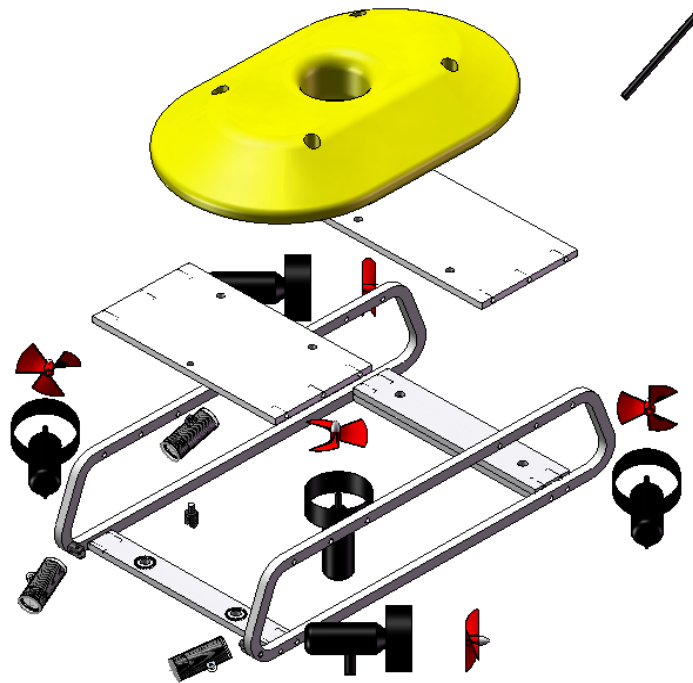
Como podemos observar en la grafica hay un comportamiento muy similar entre los valores de arrastre que genera el vehículo ante el flujo, entre los movimientos surge y sway. Esto se debe probablemente a la compensación entre área perpendicular y superficie en contacto con el fluido de esta forma el modelo presenta un requerimiento de empuje balanceado en el plano horizontal y la configuración de los propulsores a 45° entregara al vehículo de una igual capacidad para ejecutar estos dos movimientos.

Por otra parte como se esperaba, la sección transversal superior que debe exponerse al flujo en el movimiento heave incrementa los requerimientos de empuje en un 600% aproximadamente con respecto a los requerimientos en los movimientos surge y sway. En vista que el movimiento de ascenso y descenso no es prioritario en el diseño se puede utilizar el mismo propulsor seleccionado para los movimientos surge y sway con su correspondiente disminución de velocidad alrededor de $0,4 \text{ m/seg}$ buscando reducir el consumo de potencia.

6. DISEÑO EN DETALLE

En este capítulo se cubrirán aspectos del modelo como el dimensionamiento del sistema de propulsor, configuración de dispositivos periféricos (cámara, luces y recinto electrónico), estabilidad y flotabilidad del vehículo, análisis del efecto del umbilical en la dinámica del equipo, y finalmente la optimización de la dinámica involucrada en los desplazamientos.

Figura 62. Vista en explosión alternativa seleccionada.



Fuente: Autores

6.1. Dimensionamiento del sistema propulsor

6.1.1. Requerimientos del sistema propulsor

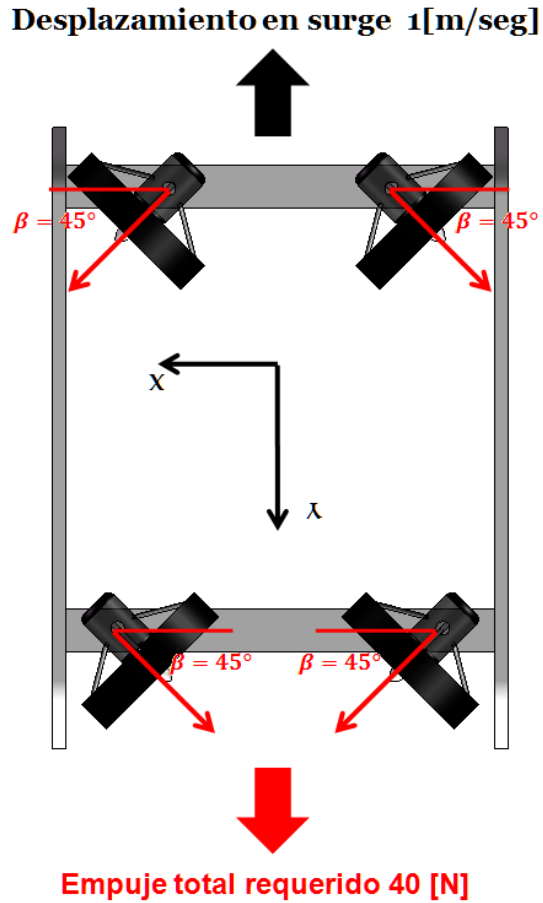
A partir del análisis de empuje del equipo en las direcciones de sus tres movimientos se puede observar que existe una proporción entre las secciones transversales involucradas en cada movimiento y factores como la superficie

deflujo libre que cruce a través del cuerpo. Este comportamiento frente al flujo entrega al vehículo la capacidad de desplazarse a la misma velocidad con un ángulo del propulsor de 45° (*respecto de la línea longitudinal*) gracias a su diseño. Es importante recalcar que la configuración del sistema propulsor no solo entrega la cantidad de grados de libertad al vehículo, también influye directamente en la calidad de la ejecución de los movimientos.

Durante la revisión del mercado se encontró que la gran mayoría de los equipos presentaban una marcada tendencia en la configuración de su sistema de propulsión, entregando al equipo una relación de potencia entre el grado de libertad surge/sway de 2/1 dotando al equipo de un mejor desplazamiento en su eje longitudinal (movimiento surge) y un movimiento más lento en su eje transversal (movimiento sway). Esto es de esperarse debido a su función primaria de inspección, ya que la ejecución de dicha tarea debe ser realizada a una velocidad que permita una observación adecuada del entorno, por otra parte el desplazamiento frontal demanda gran parte de la potencia total del vehículo, ya que con esta potencia se desea acceder a una zona para posteriormente ejecutar la labor de inspección.

Del capítulo anterior en el cual se esbozo de forma preliminar el diseño del vehículo se pudo obtener como resultado arrojado por el software un valor correspondiente al requerimiento de empuje que demanda el equipo alrededor de 28 N , teniendo en cuenta que el arrastre generado por el umbilical se encuentra alrededor de los 2 N por metro debemos tener un empuje aproximado de 40 N para cumplir con los requerimientos operativos en la piscina

Figura 63. Vista en planta de la configuración y distribución del empuje del equipo en SURGE



Fuente: Autores

Para cada propulsor se tiene que:

$$F_y = \frac{40}{4} = 10 \text{ [N]}$$

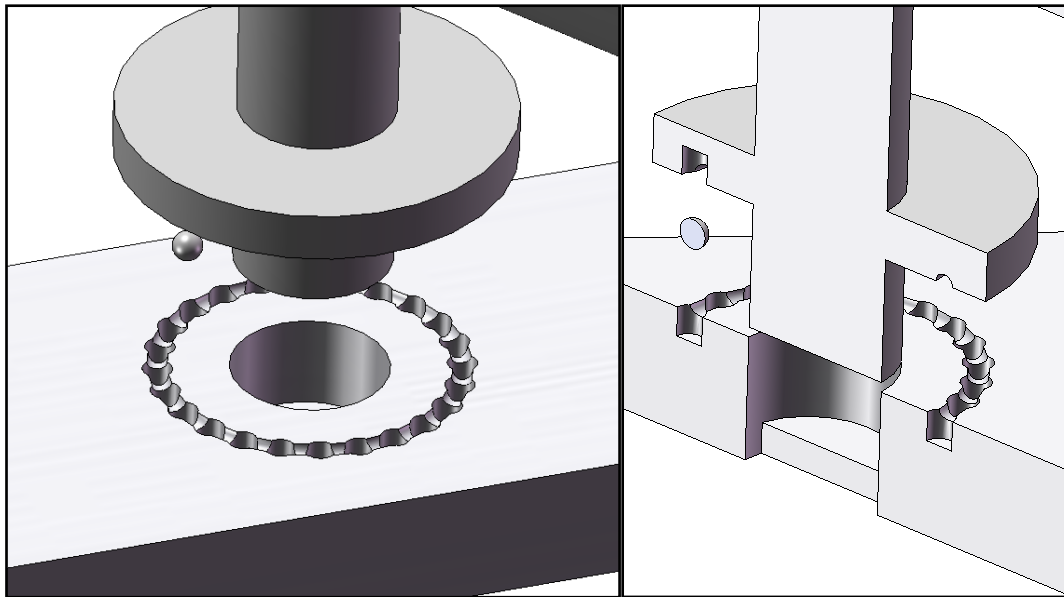
$$F_T = \frac{10}{\sin(45)} \cong 14.2 \text{ [N]}$$

El empuje total máximo que debe generar cada thruster debe estar alrededor de los 18 N alrededor de 2 kgf. Este valor de empuje deberá ser producido por cada

propulsor independientemente es decir, su conjunto moto reductor-hélice deberá empujar diseñarse de forma tal que alcance este requerimiento de empuje.

Además para analizar el efecto de la configuración de cada uno de los propulsores se entregara a cada propulsor la posibilidad de rotar en el eje del soporte que lo une al marco del equipo, de esta manera se obtendrá una configuración variable del ángulo de cada propulsor buscando analizar su incidencia en la dinámica del diseño planteado. Esto entregara al vehículo la capacidad de variar sus características de operación, ya que al modificar los ángulos del vector de empuje del propulsor, se afectara directamente su dinámica pudiendo obtener desplazamientos en sway con mayor velocidad o de ser necesarias rotaciones más controladas yaw.

Figura 64. Detalle del sistema tipo trinquete para posicionar el vector de empuje en un ángulo requerido



Fuente: Autores

El mecanismo planteado para resolver de forma práctica el posicionamiento del propulsor es un trinquete en la base del propulsor la cual permita de forma eficaz y rápida el cambio de la inclinación del vector de empuje generado por el propulsor. Sobre la base transversal en donde se apoya el propulsor se mecanizaran orificios en los ángulos requeridos para el equipo, mientras que en la base del propulsor ira encajado un balón que al momento de ser liberado permitirá ubicar el propulsor en el ángulo necesitado y al ajustarlo restringe la rotación del propulsor.

6.1.2. Diseño del propulsor del proyecto

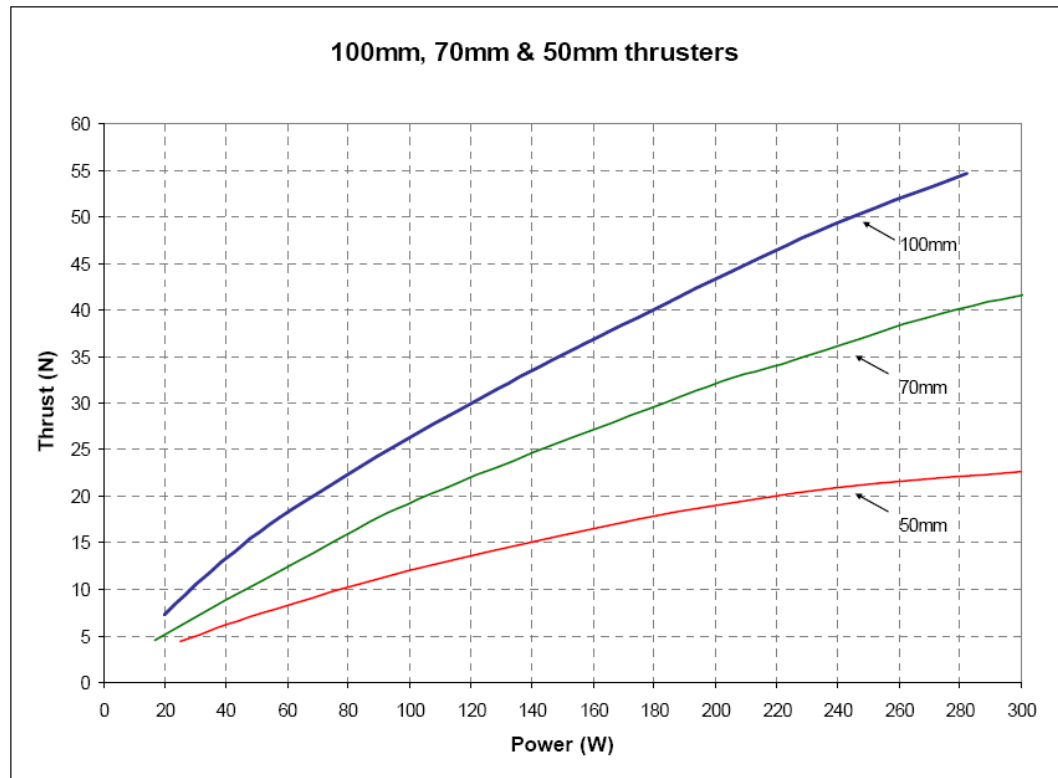
Con la misma importancia que tiene un motor en un automóvil, el propulsor provee a los cuerpos sumergidos su capacidad para desplazarse en un fluido. Pero la dinámica que modela los fenómenos presentes en la propulsión marina presenta grandes retos solucionables a partir de técnicas numéricas que muchas veces son solo estimaciones del comportamiento real que se pudiese esperar de un cuerpo inmerso en un fluido. Aun así personal con experticia solo podría dar una aproximación del comportamiento de un diseño, esto plantea un reto especial en desarrollo del proyecto ya que el dimensionamiento de la fuerza de arrastre generada por el fluido o medida la del deslizamiento de las hélices son datos que no se obtienen fácilmente en la literatura, de esta manera el proceso de diseño de un propulsor deberá ir acompañado de pruebas que evalúen los avances extraídos en los análisis numéricos arrojados por los paquetes software utilizados por los diseñadores. A partir de los requerimientos de empuje arrojados por el software en el capítulo anterior para el arrastre generado por el modelo, se deberá diseñar el thruster que cubra como mínimo la misma cantidad de empuje para entregar las condiciones de operación, por medio del conjunto motor-hélice.

Para generar la configuración del propulsor del proyecto se analizara la información suministrada por proveedores de estos dispositivos, además algunos

resultados arrojados por una experiencia previa por parte de la Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín durante el diseño de un propulsor para un equipo que desarrollo, los cuales encajan con los requerimientos de empuje demandados por el modelo planteado como solución, esto buscando especificaciones que direccionen el diseño.


Uno de los factores de mayor influencia en el rendimiento del thruster es el de deslizamiento de la hélice, ya que es una medida de la eficiencia de la hélice y del torque necesario para desplazar el fluido. El valor del deslizamiento es una medida de la eficiencia del empuje que puede generar el conjunto motor-hélice, ya que de tener valores elevados no se dotaría a la hélice de un rango de velocidades completo que permita identificar su punto de óptimo funcionamiento. Según las curvas de la empresa TSL technology y el propulsor BTD-150 de la empresa Sea Botix que posee una hélice de 100 mm de diámetro acoplada en su sistema propulsor, se requiere una potencia mínima de 100 W para entregar un empuje entre $(2 - 3)[Kgf]$ ($18 - 27[N]$) valor suficiente para entregar al vehículo del proyecto la condición de velocidad de operación deseada de 1 m/seg .

Figura 65. Curvas de empuje y potencia mecánica de los propulsores.



Fuente: Empresa TSL technology

Figura 66. Data sheet del propulsor BTD-150 con hélices de $\phi=100$ mm.

		BTD150 SPECIFICATIONS
DEPTH RATING		
FRESH WATER:		150 METERS - 500 FEET
MOUNTING HARDWARE		
QTY:		3 (INCLUDED)
TYPE:		SHEET METAL SCREW, PAN HEAD PHILLIPS, 316 SS
SIZE:		#6 X 3/4"
McMASTER P/N:		90184A152 (OR EQUIVALENT)
SEABOTIX P/N:		FN308
ELECTRICAL INTERFACE		
VOLTAGE:		+19.1V DC $\pm 10\%$
POWER:		110W MAXIMUM (DEPENDING UPON RPM OR DRAG)
MAX AMPERAGE:		5.8 AMPS (30 SECOND DURATION)
MAX CONTINUOUS AMPERAGE:		4.25 AMPS
CABLE:		39IN (1 M) 2 WIRE COLOR CODED
WEIGHT		
IN AIR:		705 GRAMS
IN FRESH WATER:		350 GRAMS
PERFORMANCE		
PEAK BOLLARD THRUST:		2.9 KGF (6.4 FT/LBS)
CONTINUAL BOLLARD THRUST:		2.2 KGF (4.85 FT/LBS)

Fuente: Empresa Sea Botix

Al observar las figuras 65 y 66 correspondientes a equipos del mercado, se puede extraer que el requerimiento de empuje demandado por el vehículo podrá ser cumplido con hélices de diámetros entre [50 a 100 mm] y con potencias de hasta [300 W]. Este análisis de información se presenta como un bosquejo de las características mecánicas de las cuales deberá estar dotado el moto-reductor con el que se configurara el propulsor.

6.1.2.1. Selección de la hélice del proyecto

El diseño del thruster del equipo del proyecto tuvo su soporte en las simulaciones llevadas a cabo en software SOLIDWORKS y su paquete CFD

COSMOSFLOWWORKS además de la implementación de un banco de pruebas experimentales. De esta manera se creara el modelo CAD y se generará posteriormente la grafica de *empuje vs rpm teorica* y *empuje vs rpm real* que debería presentar las posibles hélices del proyecto. Para esto se generaron modelos de hélices de 80, 100, 120 y 140 mm de diámetro elementos que se pudiesen adquirir en el mercado y que encajan con las necesidades del propulsión del proyecto.

Los modelos de hélices modelados en el CAD-SOLIDWORKS presentan un diseño de aspas planas que facilitan su manufactura y un costo fabricación reducida para la etapa de pruebas, posterior a la selección se estudiara la posible compra de estos elementos habiendo caracterizado su comportamiento.

Haciendo uso del software SOLIDWORKS se procedió a obtener los empujes generados por hélices de diferentes características (diámetro y paso) y a diferentes condiciones operacionales (diferentes rpm) buscando esbozar el elemento que cumpla con los requerimientos de empuje del vehículo. Es así que se llevo a cabo el diseño diámetro de hélice 80, 100, 120 y 140.

Los valores de torque arrojados por el software deberán ser comprobados por medio del banco de pruebas, además datos de torque extraídos del trabajo desarrollado por la universidad Pontificia Bolivariana de Medellín para una hélice de 80 mm también serán de ayuda al servir de valor de comparación para los resultados del software.

Velocidad [rpm/rad]		80 [mm]			100 [mm]			120 [mm]			140 [mm]		
[Rpm]	[Rad/seg]	Empuje [N]	Torque [N*m]	Potencia [W]	Empuje [N]	Torque [N*m]	Potencia [W]	Empuje [N]	Torque [N*m]	Potencia [W]	Empuje [N]	Torque [N*m]	Potencia [W]
100	11	0,04	0,0008	0,0088	0,07	0,002	0,022	0,12	0,003	0,033	0,17	0,004	0,044
200	21	0,14	0,003	0,063	0,3	0,006	0,126	0,44	0,01	0,21	0,62	0,014	0,294
300	31	0,3	0,007	0,217	0,6	0,01	0,31	0,9	0,02	0,62	1,35	0,031	0,961
400	41	0,05	0,01	0,41	1	0,022	0,902	1,6	0,04	1,64	2,4	0,05	2,05
500	52	0,8	0,02	1,04	1,6	0,04	2,08	2,6	0,06	3,12	3,8	0,085	4,42
600	63	1,24	0,03	1,89	2,4	0,05	3,15	3,8	0,08	5,04	5,6	0,12	7,56
700	73	1,7	0,04	2,92	3,2	0,07	5,11	5,2	0,11	8,03	7,5	0,2	14,6
800	84	2,2	0,05	4,2	4,2	0,09	7,56	6,8	0,14	11,76	10	0,22	18,48
900	94	2,8	0,06	5,64	5,2	0,11	10,34	8,5	0,2	18,8	12,4	0,3	28,2
1000	105	3,5	0,07	7,35	6,6	0,14	14,7	11	0,23	24,15	16	0,34	35,7
1100	115	4,2	0,09	10,35	8	0,17	19,55	13	0,3	34,5	19	0,4	46
1200	126	5	0,1	12,6	9,5	0,2	25,2	15	0,3	37,8	22,4	0,5	63
1300	136	6	0,12	16,32	11	0,23	31,28	17	0,4	54,4	26	0,6	81,6
1400	147	7	0,14	20,58	13	0,3	44,1	20	0,5	73,5	30	0,7	102,9
1500	157	8	0,16	25,12	15	0,31	48,67	24	0,52	81,64	35	0,8	125,6
1600	168	9	0,2	33,6	17	0,36	60,48	27	0,6	100,8	40	0,8	134,4
1700	178	10	0,21	37,38	19	0,4	71,2	31	0,7	124,6	44	1	178
1800	188	11	0,23	43,24	21,2	0,45	84,6	34,3	0,74	139,12	50	1,1	206,8
1900	199	12	0,26	51,74	24	0,5	99,5	38	0,83	165,17	56	1,23	244,8
2000	209	14	0,28	58,52	26	0,6	125,4	42,3	0,92	192,28	62	1,4	292,6

Tabla 14: tabla de valores de empujes, torques y potencias arrojados por SOLIDWORKS para las posibles hélices del proyecto

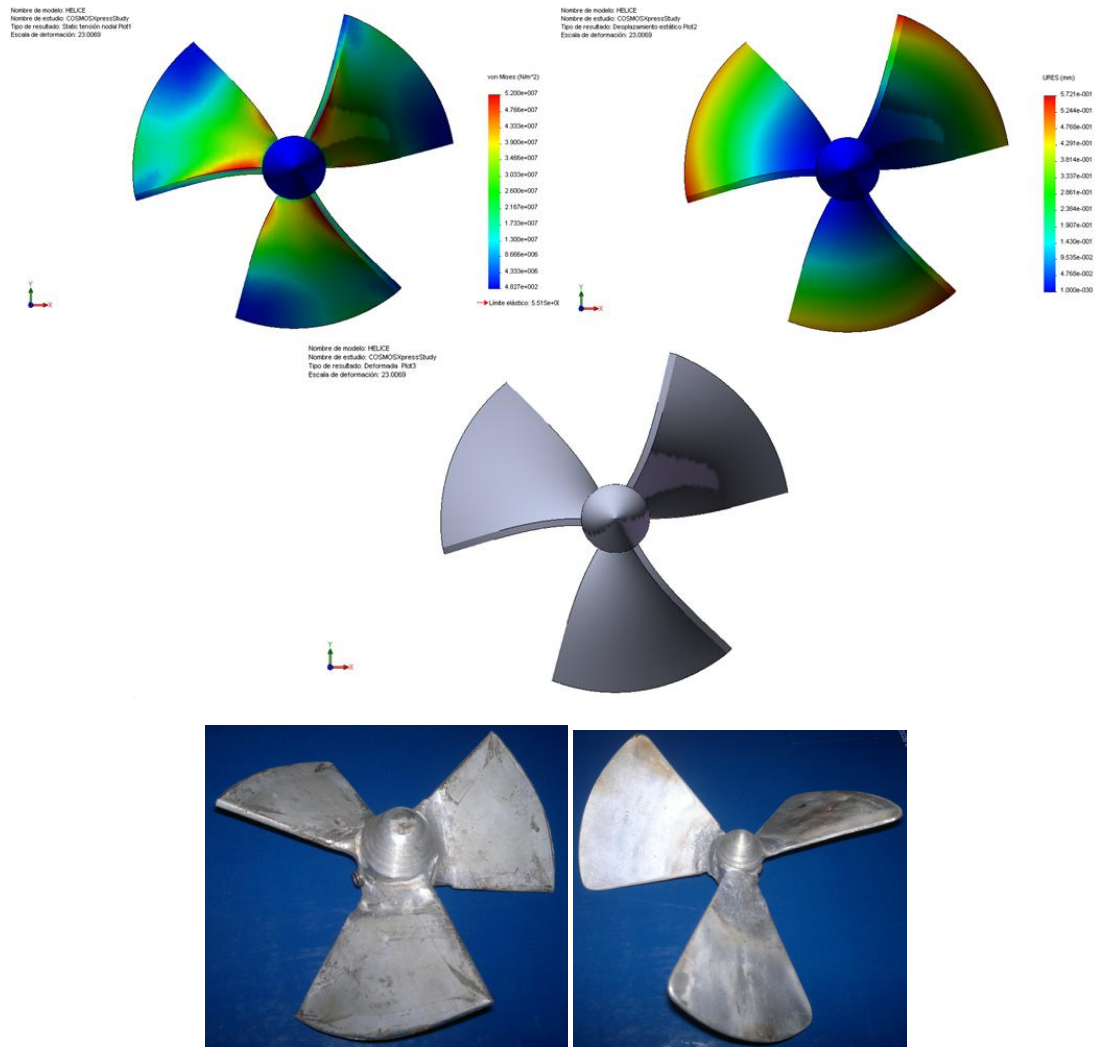
Como se puede observar en la tabla de resultados arrojados por SOLIDWORKS para una hélice de **80 [mm]**, se tiene un empuje de magnitud alrededor de los **10 [N]** a una velocidad de operación de **1600 [rpm]** y la potencia mecánica demandada por este elemento mecánico se encuentra alrededor de los **33 [W]** Toda la caracterización de esta simulación concuerda con los resultados arrojados por la universidad pontificia bolivariana, corroborando la efectividad del software para esta aplicación.

Teniendo en cuenta que el tamaño del HUB de la hélice es un factor de gran incidencia en el desempeño del propulsor, esta consideración no es indiferente a la selección de equipo motor, esa así que el tamaño juega un papel importante en el valor de empuje del thruster. Haciendo uso de SOLIDWORKS se obtuvo un diseño mecánico más eficiente, para la hélice del proyecto, el hub se minimizo y el espesor del aspa de la hélice se optimizo, generando un elemento mecánico más liviano y eficiente.

6.1.2.2 Pruebas con el set de hélices

Al generar un set de hélices de diferentes dimensiones se pudo llevar a cabo la experiencia que arroja la variación del empuje de las hélices con respecto a su tamaño y a la vez se pudo obtener la potencia real que demanda del dispositivo motor. Esta prueba no solo confirma la capacidad de empuje real proporcionado por las hélices el cual puede ser comparado con el empuje arrojado con el software, también entrega un dato más cercano del consumo real que está demandando el dispositivo al momento de generar la propulsión.

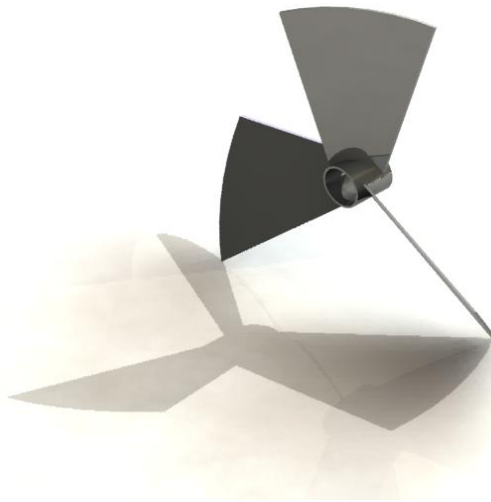
Figura 67. Pruebas sobre las hélices.



Fuente: Autores

Motor de 12V a una velocidad máxima en el eje de 930 rpm				
Diámetro [mm]	Empuje [N]	Revoluciones [rpm]	Consumo[A]	Potencia [W]
80	2.5	820	3.0	36
100	4.9	760	4.0	48
120	6.8	610	7.0	84
140	12	540	9.0	108

Figura 68. Hélice de prueba (Aspas planas)



Fuente: Autores

De esta comparación entre los niveles de empuje que entrega el diseño en el software y las pruebas preliminares llevadas a cabo con el propulsor, las cuales arrojaron el empuje real y consumo demandado para la generación del mismo, se selecciona la hélice de diámetro de 100 *mm* como el elemento que se encaja en los requerimientos de empuje y consumos necesarios para desarrollar el equipo.

6.1.2.3. Selección del moto-reductor

Ahora se procede a seleccionar una maquina rotativa que provea la potencia al propulsor. Al analizar opcionalmente la posible selección de un micro-motor DC sencillo se descarta esta alternativa, debido a lo elevado del torque que demanda la hélice, por otra parte de contemplarse esta alternativa se debería seleccionar un equipo muy robusto, el cual intervendrá en el rendimiento del propulsor. De esta manera la selección se enfoca a un mecanismo micro reductor el cual provea a la hélice de la capacidad de torque requerida, velocidad de operación y un tamaño adecuado

Para seleccionar el moto-reductor del equipo se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- La velocidad de salida en el eje del equipo debe encontrarse entre las 1000 – 1300 [rpm]. Esto según los resultados arrojados por el software, a partir del cual la hélice de 100 mm de diámetro entrega un empuje de los datos proporcionados por los fabricantes y la experiencia del equipo de la pontificia bolivariana. Su valor exacto está directamente relacionado con la geometría de hélice seleccionada y el empuje deseado.
- El torque de salida del equipo debe ser como mínimo de 0.3 [N.m] ya que las condiciones de operación de las hélices de 80, 100, 120 y 140 [mm] demandan esta condición, para generar un empuje superior a 10 [N].
- Teniendo en cuenta el incremento de carga debido a la densidad del agua y a las características de los thrusters del mercado, se debe seleccionar un equipo de voltaje nominal de operación de 12 – 24 – 48 [V], esto para poder manejar el consumo en el sistema de control, frente a valores elevados de amperaje que se pudiesen presentar durante la operación.
- La potencia requerida en el motor para generar la propulsión en la hélice se ve afectada por la eficiencia del sistema de reducción y la eficiencia del motor, así que deberá ser superior a la potencia mecánica en la hélice en un factor igual al producto de la eficiencia del moto-reductor

- Las dimensiones del conjunto moto-reductor deberán ser lo más reducidas posibles, ya que al ser un equipo inmerso en agua, deberá ser encapsulado en un sistema que le permita estanqueidad hacia el ambiente de operación y es precisamente esta protección ante el medio, la que pudiese proveer al dispositivo un tamaño excesivo, que afecte negativamente el proceso de propulsión.

En vista de la limitación que presenta el mercado de micro-reductores se debe analizar las posibles velocidades de operación que se pudiesen obtener. Una búsqueda preliminar de los conjuntos moto-reductores que cumplen con esta consideración y de esta forma incluir estas velocidades de operación en la selección de la hélice que más se adapte a las condiciones de operación y a los requerimientos de diseño como es el empuje requerido y así poder dirigir las conclusiones del modelado a una solución eficaz del dispositivo, más acorde con las necesidades y con la posible velocidad real que se pudiese alcanzar por oferta de moto-reductores en el mercado.

El fabricante de los moto-reductores mas opcionado a ser parte del proyecto debido a su calidad y bajo costo es la empresa BANEOTS (<http://banebots.com/>) por medio de su proveedor autorizado Dinamo electronics en Bucaramanga.

Tabla 15: Especificaciones del equipo moto-reductor del proyecto

Motor Specifications Performance	Gearbox Specifications
Model M5-RS775-18	Type Planetary
Operating v : 6v - 20v	Reduction : 16:1
Nominal v : 18v	Stages : 2 - 4:1, 4:1
No Load RPM : 19500	Gear Material : Steel
No Load A : 2.7A	Weight : 8.0oz (227g)
Stall Torque : 166.4 oz-in(1175 mN-m)	Length : 1.9in (48.3mm)
Stall Current : 130A	Width (Square) : 1.5 in (38.1mm)
Kt : 1.28 oz-in/A (9 mN-m/A)	Shaft Diameter : 0.50 in (12.7mm)
Kv : 1083 rpm/V	Shaft Length : 1.5 in (38.1mm)
Efficiency : 78%	Shaft Key : 0.125 in (3.2mm)
RPM - Peak Eff : 17040	Shaft End Tap : #10-32
Torque - Peak Eff : 23.99 oz-in(169.4 mN-m)	Mounting Holes (8) : #10-32
Current - Peak Eff : 18.7A	
Physical	
Weight : 11.9 oz (337g)	
Length - for motor : 2.81 in (71.3mm)	
Diameter (with flux ring): 1.85 in (47mm)	
Diameter (no flux ring) : 1.66 in (42.1mm)	
ShaftDiameter : 0.2 in (5mm)	
Shaft Length : 0.3 in (7.6mm)	
Mounting Screws (2) M4	

Como se puede observar en las especificaciones del motoreductor, se puede obtener una potencia en su maximo punto de eficiencia de alrededor de 360 W que cubre las posibles necesidades demandas por el propulsor según las graficas presentadas por las empresas Seabotix y TSL technology los cuales utilizan para sus propulsores potencias entre 100 – 300 [W] para un equipo de prestaciones que cubren las necesidades del proyecto.

Otros proveedores fueron tenidos en cuenta en el estudio de alternativas estos fueron MAXON MOTORS y FAUL HABBER, pero aunque en su stock de

productos presentan una gran variedad de alternativas en lo que se refiere a potencias, condiciones de operación y tipos de dispositivos, presentaron el inconveniente de tener elevados costos, además de tener que sumar los costos de importación ya que no se tenían en el mercado proveedores autorizados.

El Moto-reductor de la empresa MAXON MOTORS de 120 W de potencia con una reducción de 3.5: 1 y con una velocidad y torque de salida de 1348 rpm y 0,707 N · m respectivamente el precio de este equipo se encuentra alrededor de los 492 euros alrededor de 1'475040 pesos más gastos de envío.

Por otra parte el equipo de la empresa FAUL HABBER es el DC-Micro-motor serie 3863048C con una reducción planetaria de 4.8: 1 y con una velocidad y torque de salida de 1200 rpm y 0,6 N · m respectivamente el precio de este equipo se encuentra alrededor de los 1210 US\$/unidad, alrededor de 2'200.000 pesos más gastos de envío.

6.1.3. Diseño del sistema de encapsulado del propulsor

Para evitar la intrusión de agua en el moto-reductor, se genero una capsula de aluminio para aislar el sistema eléctrico. La selección del material estuvo influenciada por el aseguramiento de las juntas el cual es más resistente en aluminio, el factor transferencia de calor que se vería disminuido por el uso de materiales poliméricos que aunque reducen el peso del vehículo, también aislarían el calor interno generado por el moto-reductor, aunque este factor no ha demostrado ser lesivo para la integridad del dispositivo se ha tenido en cuenta para evitar este posible problema.

Entre las consideraciones de diseño del encapsulado se tienen:

- El acceso al dispositivo moto-reductor deberá ser de fácil armado y ensamble que permita en cualquier momento no solo una verificación de las condiciones del equipo, también un posible reparación de forma fácil y eficiente.

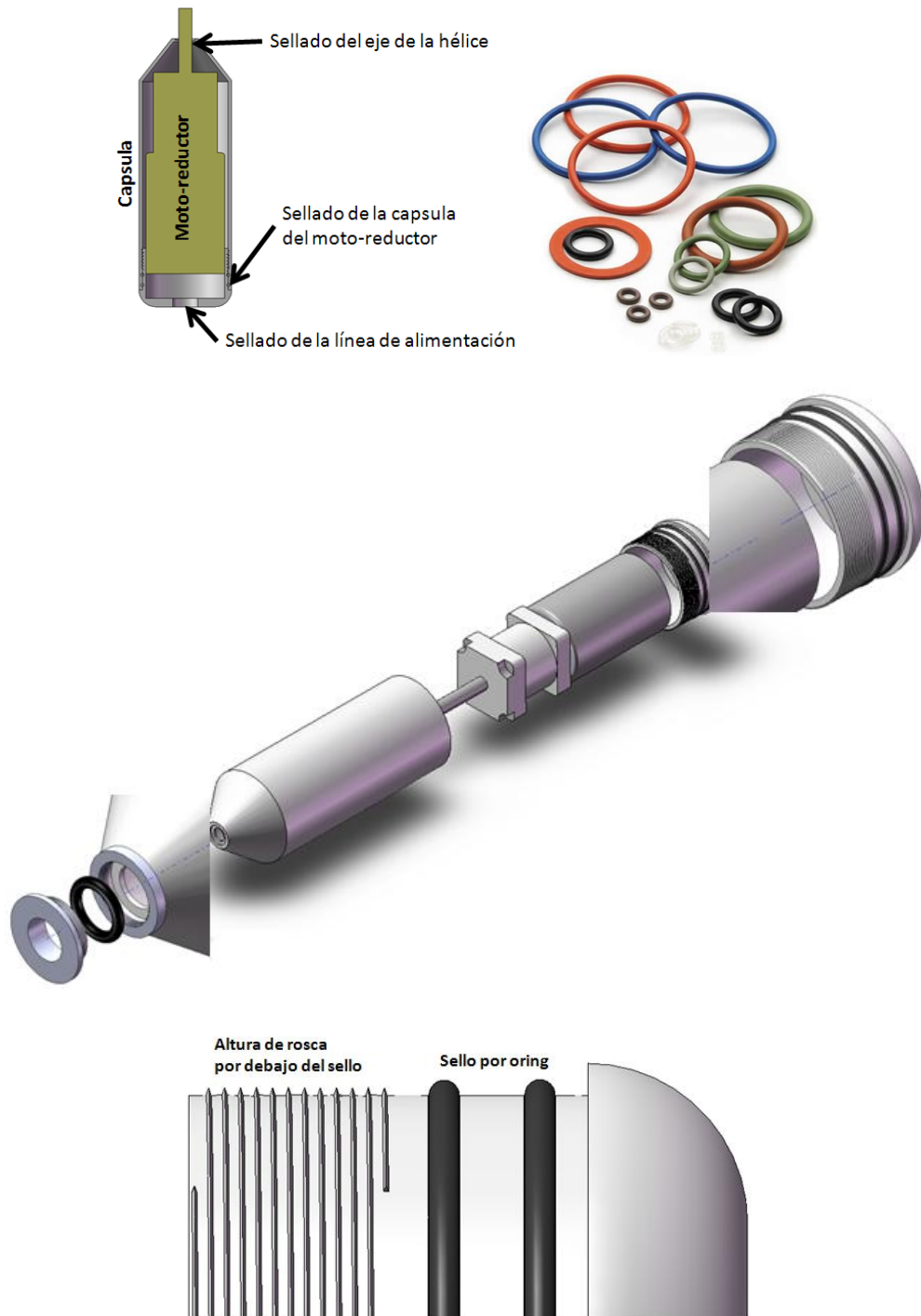
- Completo sellado de puntos críticos como son, el eje que transmitirá la potencia mecánica a la hélice y la conexión de la alimentación de sistema.

Teniendo en cuenta las anteriores consideraciones se ha planteado como solución, un diseño roscado para el encapsulado que provea al moto-reductor un dispositivo de fácil montaje y que entregue la estanqueidad deseada.

El sello será llevado a cabo por medio de sello por orings, este elemento se escogió debido a que es accesible y eficaz para prevenir la fuga de fluidos, bajo distintas condiciones de servicio. Sus principales ventajas son:

- Puede ser utilizado como sello estático, cuando las piezas no tienen movimiento y también en uso dinámico como en el eje del moto reductor (rotativo).
- Está disponible en una amplia variedad de dimensiones, tolerancias y compuestos, normalizados, además de permitir el sellado en todas las direcciones, radial, axial u oblicua.
- Son de bajo precio relativo.
- Permiten el sellado en un amplio rango de presiones, temperaturas y tolerancias. La dureza también puede variar de acuerdo a las funciones que cumplirá el o-ring, prefiriéndose los compuestos más duros para prestaciones de alta presión y los más blandos para las bajas presiones.
- Son de peso reducido y requieren muy poco espacio, permitiendo un diseño muy compacto.

Figura 69. Selección de sellos

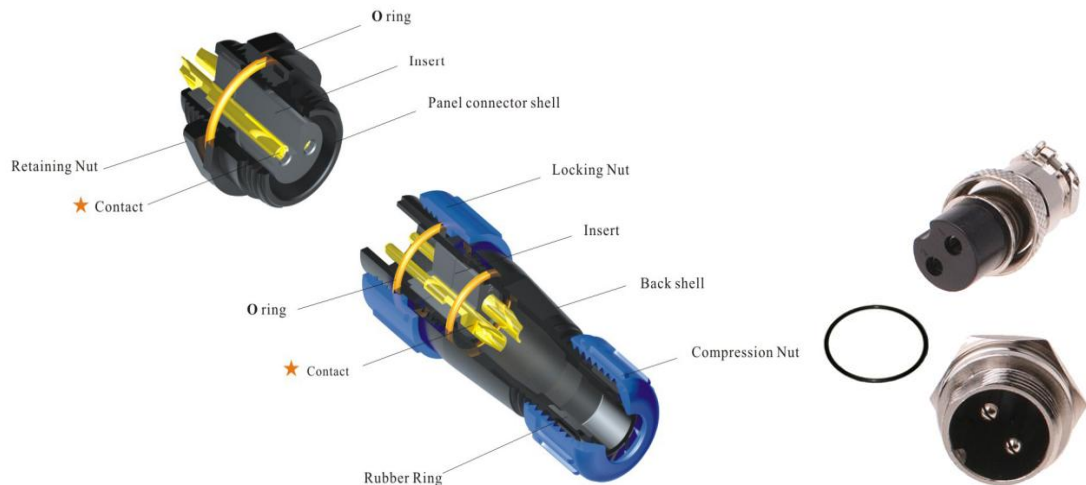


Fuente: Autores

La presión de diseño a 20 m de profundidad es de 45 *psi*, según las especificaciones entregadas por varios fabricantes los orings pueden alcanzar sellos que llegan a soportar hasta 300 *psi* características suficientes para cumplir los requerimientos del proyecto. Aun se contempla la posibilidad de hacer uso de un sello mecánico, con el cual se podrá alcanzar la estanqueidad fácilmente, con una pequeña demanda de potencia. Ya que las dimensiones del dispositivo motorreductor son reducidas la selección de este dispositivo estará obligada a la disposición en el mercado en lo que a tamaño se refiere y al cumplimiento de la presión mínima a la profundidad de diseño, el elemento más pequeño que se pudo alcanzar debe ser acoplado a un eje de 10 mm diámetro, pero su montaje en el cuerpo del propulsor demanda un espacio considerable que se presenta como inconveniente, de ser posible la adquisición de un sello mecánico de menor dimensión se acoplara al propulsor mecanizando el eje de salida del equipo motorreductor a esta dimensión.

Por otra parte el sellado de las líneas de alimentación se llevara a cabo por medio del dispositivo conector hermético que aislé las líneas de potencia. En vista de la dificultad para adquirir el elemento idóneo para esta aplicación un conector hermético, se procedió a utilizar un elemento del mercado que permite una fácil adaptación junto con un oring para obtener el sello deseado.

Figura 70. Conectores con sus respectivos sellos.



Fuente: Improtek

6.2. Configuración de los dispositivos periféricos

Los elementos periféricos de los cuales se dotara al vehículo del proyecto son unacámara y un juego de luces, los cuales deberán resistir la presión a la profundidad de diseño 20 m a través de estos elementos el vehículo se entregaraal mundo exterior la información resultado de la inspección.

Como primera medida es necesario el dimensionamiento físico de estos elementos ya que la carga que entregan al equipo es considerable teniendo en cuenta que el vehículo debe navegar afectando directamente su estabilidad, la solución que entregue estanqueidad a estos elementos no solo proporcionara protección a los dispositivos, también agrega carga extra al vehículo así que entre las consideraciones de diseño deberá estar presente su tamaño.

Figura 71. Cámara con su respectiva capsula.



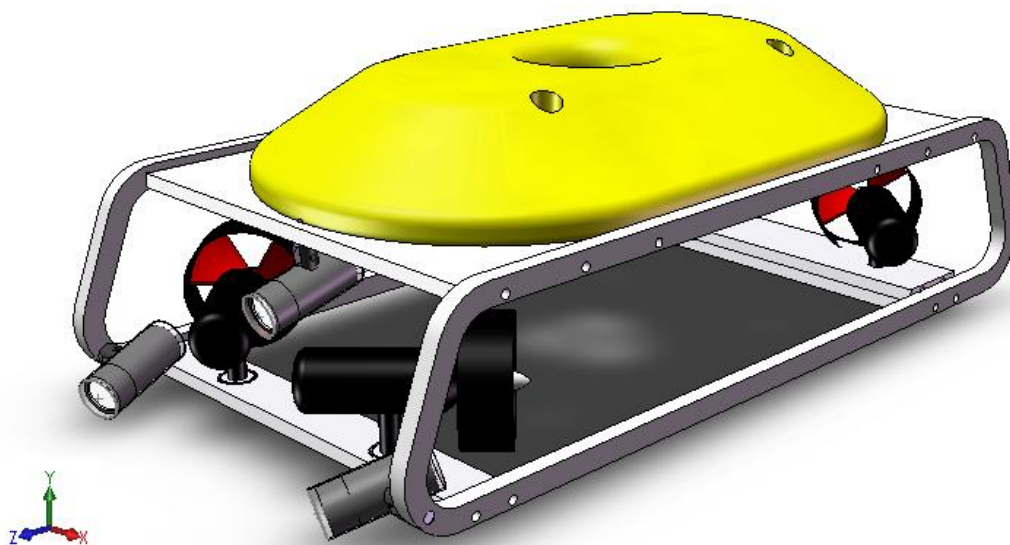
Fuente: Autores

La forma del dispositivo es un factor que mejora la posibilidad de un sellado de los elementos de forma más eficiente, por esta razón la selección de elementos geométricos, permitirán la fácil generación de la capsula que lo mantendrá protegido frente a la presión y humedad del medio. Se han identificado dos elementos con características muy favorables en lo que se refiere al cumplimiento de estas dos consideraciones.

Las cámaras de vigilancia de tipo fingerbullet tienen un diámetro que oscila entre 30 – 40 *mm* y una longitud entre 60 – 80 *mm* peso alcanza un máximo de hasta 200 *gr* y con capacidades de video entre 420 – 520 *LTV* según el modelo. Por otra parte la linterna de leds modelo Warriortienen diámetros que oscilan de igual forma entre los 30 – 40 *mm*, longitudes entre 100 – 120 *mm* y un peso de hasta 150 *gr* y con capacidades de iluminación desde 100 lumens.

Los dispositivos periféricos estarán ubicados en la parte frontal del vehículo y el peso extra que adicionan estos elementos a la estructura del equipo, deberá ser compensado por medio de lastres en la parte posterior que devuelvan la estabilidad al equipo.

Figura 72. Posición dispositivos periféricos.



Fuente: Autores

La cantidad de elementos y sus características físicas están limitadas por el incremento de carga, el cual deberá ser compensado por modulo de flotabilidad.

De esta manera tres elementos, dos luces y una cámara con las características demandadas por las condiciones del ambiente de operación, serán suficientes para la experiencia del vehículo.

La ubicación de estos elementos es de modo tal que puedan cumplir con su función de la forma más eficiente, así la cámara de video estará ubicada en la parte superior-frontal del equipo y las cámaras en los extremos inferiores de la parte delantera proporcionando un incremento del lastre con su correspondiente beneficio en pro de la estabilidad del vehículo.

6.3. Flotabilidad y estabilidad del vehículo

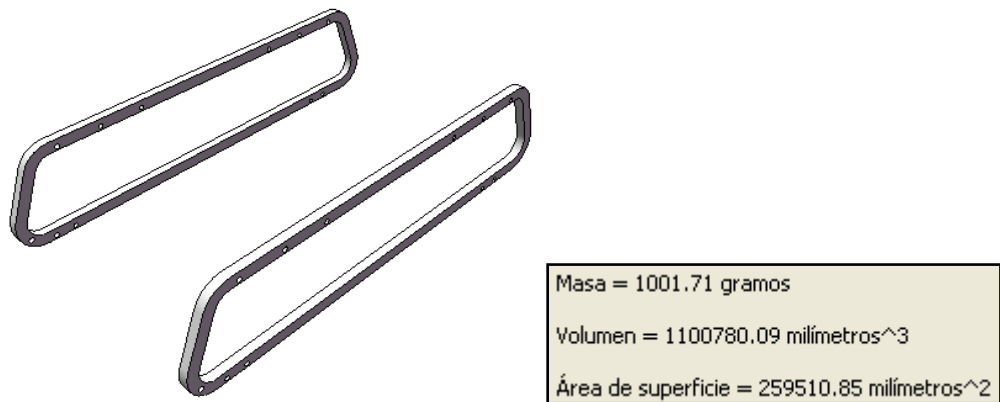
La condición de estabilidad necesaria para un cuerpo completamente sumergido en un fluido es que el centro de gravedad (G) del cuerpo debe estar por debajo del

centro de flotabilidad (B). De esta forma el cuerpo adquiere una configuración dinámica que permite un par de estabilidad que restablece la posición inicial de equilibrio al momento de ser perturbado por una fuerza externa. El centro de flotabilidad de un cuerpo se encuentra en el centroide del volumen desplazado, y es a través de este punto donde actúa la fuerza boyante (flotación) en dirección vertical. El peso del cuerpo actúa verticalmente hacia abajo a través del centro de gravedad.

Para poder analizar las modificaciones del centro de gravedad y flotabilidad se debe conocer características físicas como el volumen, peso y centro de gravedad de cada uno de los subsistemas que componen el vehículo.

El material utilizado para manufacturar el marco es el polipropileno que tiene un densidad promedio de $0,91 \left[\frac{gr}{cm^3} \right] : 0,00091 \left[\frac{gr}{mm^3} \right]$. El volumen de esta sección del equipo se encuentra alrededor de los $0,001 m^3$ con una masa de $1 Kg$ aproximadamente.

Figura 73. Marco ROV

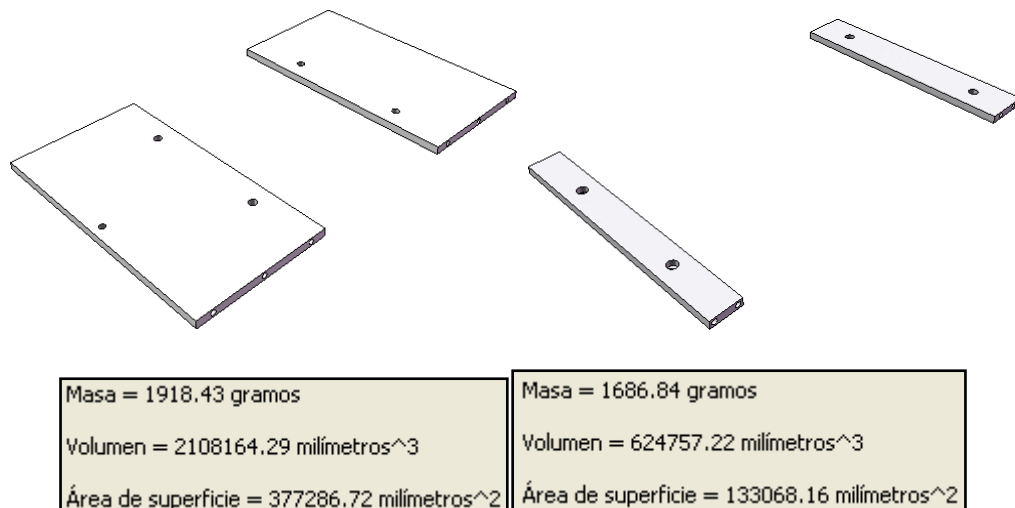


Fuente: Autores

Debido a sus características mecánicas, excelente comportamiento frente al fenómeno de la corrosión, bajo peso y fácil conformación, el polipropileno se presenta como la mejor alternativa material para manufacturar el marco del equipo.

Las bases inferiores y superiores del vehiculó tienen como función dar soporte y rigidez al equipo, soportan el peso del sistema propulsor, las cargas que aparecen la momento de su accionamiento y además soportar el peso del modulo de flotabilidad y de la fuerza boyante que este entrega a la estructura.

Figura 74. Soporte transversal del marco considerando el peso.

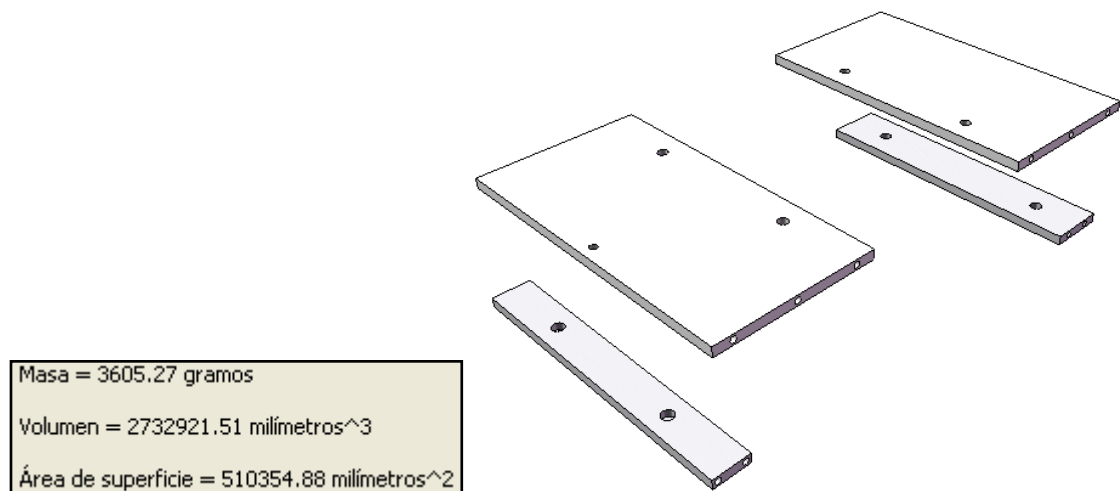


Fuente: Autores

La base superior además de tener una función mecánica en la estructura del equipo también cumple una labor de soporte, ya que en esta sección se ubican los dispositivos periféricos como son cámaras y luces, así que su área deberá ser un poco mayor a la de las bases inferiores. Debido a que el efecto del peso de la base superior no contribuye a la estabilidad del equipo, podrá ser manufacturada de un material liviano y resistente como el polipropileno que además permita una fácil conformación. El peso de los soportes superiores se encuentra alrededor de los 2 Kg

Por otra parte los soportes inferiores juegan un papel vital en lo que a la obtención de estabilidad se refiere ya que provee al sistema de lastre necesario para hacer descender el centro de gravedad. El material de manufactura deberá tener una resistencia mecánica, resistencia a la corrosión y adicionalmente un peso específico significativo para poder cumplir con su función de lastre. Por los requerimientos necesarios el aluminio y acero inoxidable son las dos opciones posibles.

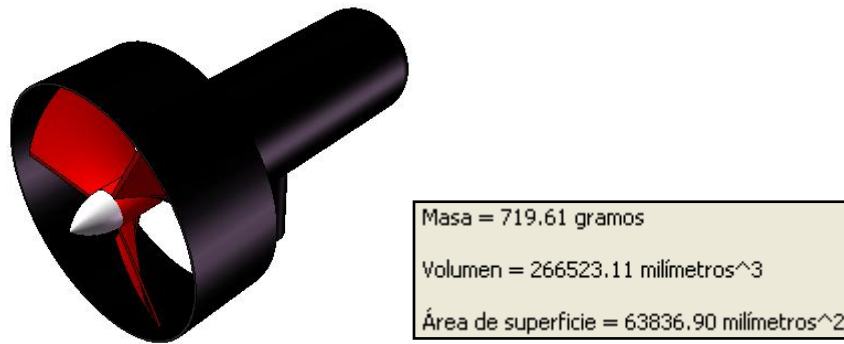
Figura 75. Detalles del marco del ROV, considerando el peso.



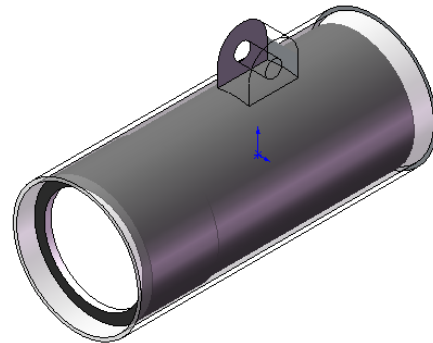
Fuente: Autores

El sistema propulsor se encuentra configurado por el conjunto moto reductor que tiene un peso que se encuentra alrededor de los 500 *gr* y una capsula que le entrega la estanqueidad necesaria para proteger su integridad. Las dimensiones definitivas de este elemento se obtendrán en detalle solo después de las pruebas pero para efectos de esta primera experiencia se escogerá un dispositivo macizo de aluminio para toda su configuración hélice, nozzle, interior y capsula, ya que es el material mas opcionado, debido a que entrega no solo una buena resistencia a la corrosión además facilita la transferencia de calor del moto reductor, cualidad que se ve disminuida con una capsula de polipropileno la cual prácticamente aísla el calor en el interior del dispositivo. Teniendo en cuenta estas consideraciones el peso de este elemento se encuentra alrededor de los 725*gr*.

Figura 76. Consideraciones de peso según software.



Masa = 239.98 gramos
 Volumen = 88883.16 milímetros³
 Área de superficie = 33469.17 milímetros²



Fuente: Autores

Teniendo todos los pesos aproximados de los dispositivos se procede a obtener el peso total para poder dimensionar el volumen del modulo de flotabilidad

<i>Subsistema</i>	<i>Material</i>	<i>Masa [gr]</i>
Marco	Polipropileno	1002
Soporte superior	Polipropileno	1919
Soportes inferiores	Aluminio	1687
5 Propulsores	Aluminio (Modelado)	3600
3 Periféricos	Aluminio (Modelado)	1000
Peso total		9208
<i>Peso de la estructura + 3% flotabilidad</i>		12000

Teniendo el peso estimado del vehículo es de(12) [Kg] y las dimensiones del modulo de flotabilidad(640 × 40 cm longitud y ancho),de área aproximadamente, se puede calcular el volumen del modulo de flotabilidad necesario para obtener la flotabilidad neutra/positiva que se requiere en el equipo, así:

$$\begin{aligned}
 W_{rov} &= W_{thusters} + W_{marco} + W_{electrónica} + W_{modulo} \\
 &= 12 \text{ Kg} \times 9.81 \text{ m}/(\text{seg})^2 = 0.118 \text{ KN}
 \end{aligned}$$

Ahora se tiene:

$$\begin{aligned}
 W_{rov} &= 0.118 \text{ [KN]} = F_{B\text{modulo}} = W_{\text{specifioa gua}} \times V_{\text{modulo}} \\
 &= 10 \left[\text{KN}/\text{seg}^3 \right] \times V_{\text{modulo}} = 0.118 \text{ [KN]}
 \end{aligned}$$

Al Despejar se obtiene el volumen del modulo debe estar alrededor de los $0.012 \text{ [m}^3\text{]}$ para un lastre de aluminio que pueda entregarle al equipo la condición de flotabilidad deseada. Ahora que se tiene un volumen aproximado de modulo de flotabilidad se puede estimar el peso del mismo para hallar el valor final de volumen que es necesario para que el equipo obtenga una condición de flotabilidad neutra/positiva. Teniendo en cuenta que densidad de la espuma de poliuretano requerida para las condiciones de operación se encuentra alrededor de los $60 \left[\text{kg}/\text{m}^3 \right]$ el peso aproximado será de 720 [gr] .

Este valor deberá ser incluido en el análisis de las cargas de todos los elementos para recalculer el volumen del modulo de flotabilidad ahora para compensar su propio peso mas el de los elementos.

<i>Subsistema</i>	<i>Material</i>	<i>Masa [gr]</i>
Marco	Polipropileno	1002
Soporte superior	Polipropileno	1919
Soportes inferiores	Aluminio	1687
5 Propulsores	Aluminio (Modelado)	3600
3 Periféricos	Aluminio (Modelado)	1000
Modulo	Espuma de poliuretano	720
Peso total		9928

<i>Peso de la estructura + 3% flotabilidad</i>	13000
---	--------------

0.013 [m³] Con una densidad de 60 $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$ el peso aproximado será de 780 [gr].

Figura 77. Consideraciones de la masa del modulo de flotabilidad.



Masa = 864.94 gramos
Volumen = 14415609.20 milímetros ³
Área de superficie = 542144.66 milímetros ²

Fuente: Autores

Ahora el equipo tiene un valor de 13 Kg

$$\begin{aligned}
 W_{rov} &= W_{thusters} + W_{marco} + W_{electrónica} + W_{modulo} \\
 &= 13 \text{ Kg} \times 9.81 \text{ m}/(\text{seg})^2 = 0.127 \text{ KN}
 \end{aligned}$$

Ahora se tiene:

$$\begin{aligned}
 W_{rov} = 0.127 \text{ [KN]} &= F_{Bmodulo} = W_{specificoagua} \times V_{modulo} \\
 &= 10 \left[\frac{\text{KN}}{\text{seg}^3} \right] \times V_{modulo} = 0.127 \text{ [KN]}
 \end{aligned}$$

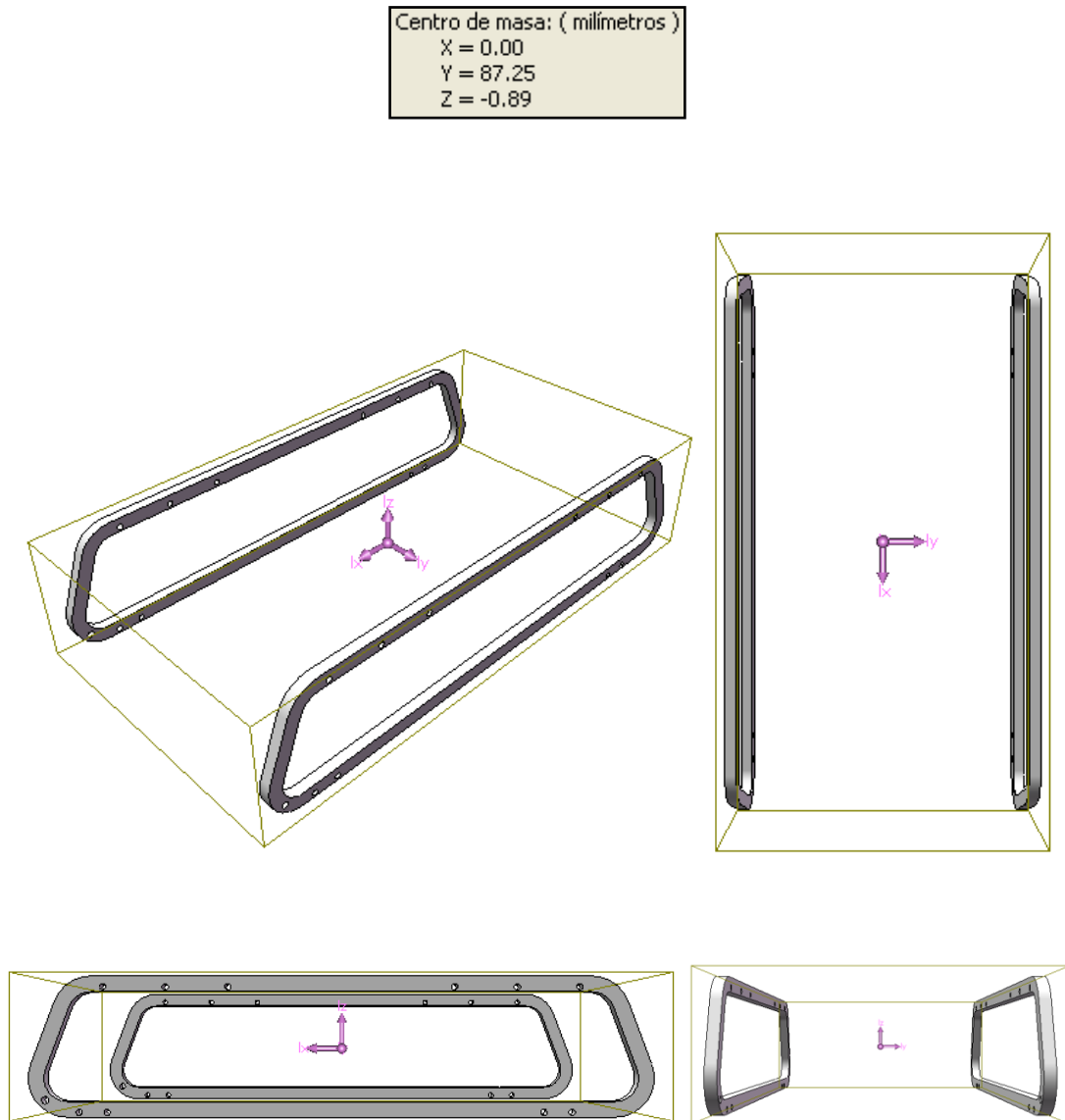
Así el volumen del modulo de flotabilidad tendrá un valor de ser de 0.013 [m³]

y su forma estará definida por los resultados arrojados por el software en el análisis hidrodinámico que presento el mejor comportamiento frente al flujo alternativa final de la fase de diseño de alternativas capítulo 4.

Como primera medida se tiene el marco del vehículo fabricado con polipropileno con la gran mayoría de la masa distribuida uniformemente con respecto a sus ejes de simetría. Solo los orificios de ensamble que permiten el armado del marco traen como consecuencia una pequeña desviación de decimas de milímetro en el eje

longitudinal del vehículo como se puede observar por la ubicación del centro de gravedad entregado por el software Solidworks.

Figura 78. Centro de masa del marco.



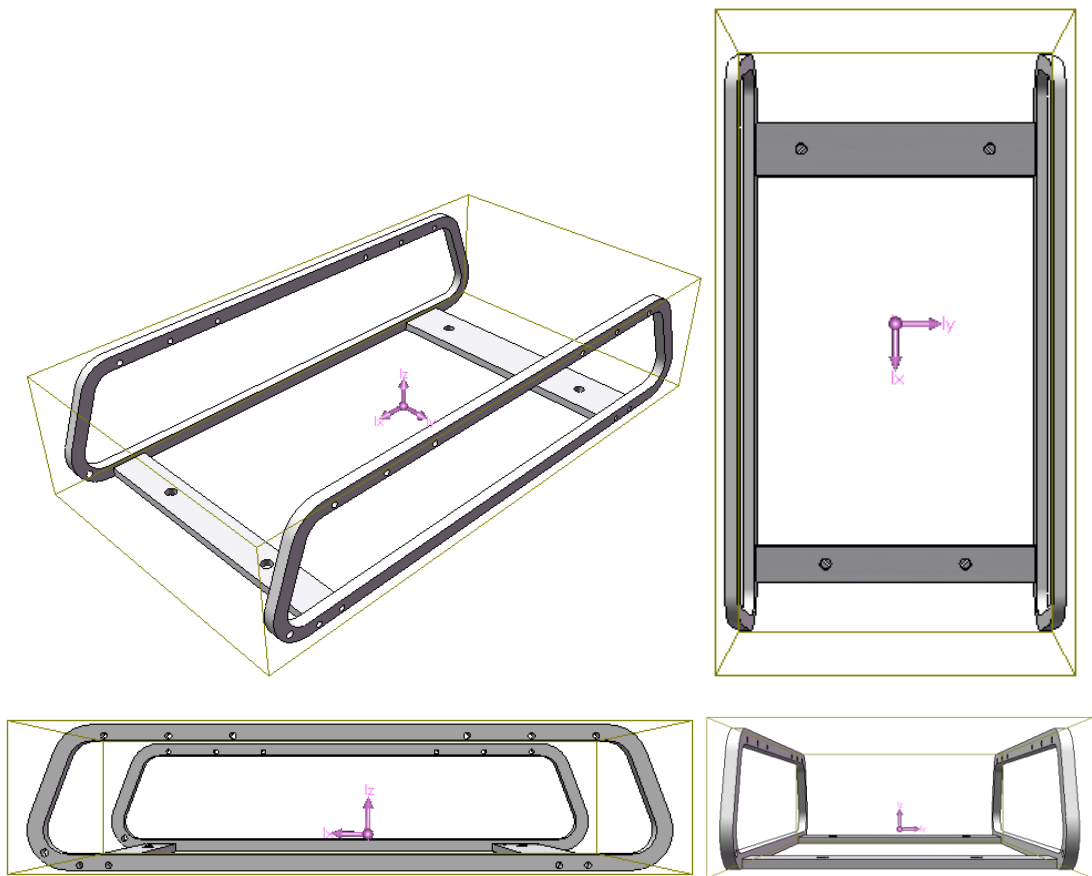
Fuente: Autores

Ahora al añadir los soportes del equipo propulsor se debe tener en cuenta la adición de peso para poder trasladar el centro de gravedad lo mas bajo posible en

la estructura del vehiculo, de esta forma se obtendra una condicion de estabilidad favorable ya que el centro de gravedad estara ubicado lo mas lejano posible del centro de flotabilidad y de esta forma se generara un par de estabilidad mas alto. Es importante aclarar que el peso añadido por estos soportes tendra un limite y este limite se encuentra directamente relacionado con el dimensionamiento del modulo de flotabilidad que compense el incremento de carga y por supuesto con el incremento de arrastre generado por un modelo con mayor seccion transversal.

Figura 79. Masa, volumen y área de superficie del marco.

Masa = 2688.55 gramos
Volumen = 1725537.31 milímetros ³
Área de superficie = 392579.01 milímetros ²
Centro de masa: (milímetros)
X = 0.00
Y = 36.48
Z = -26.27



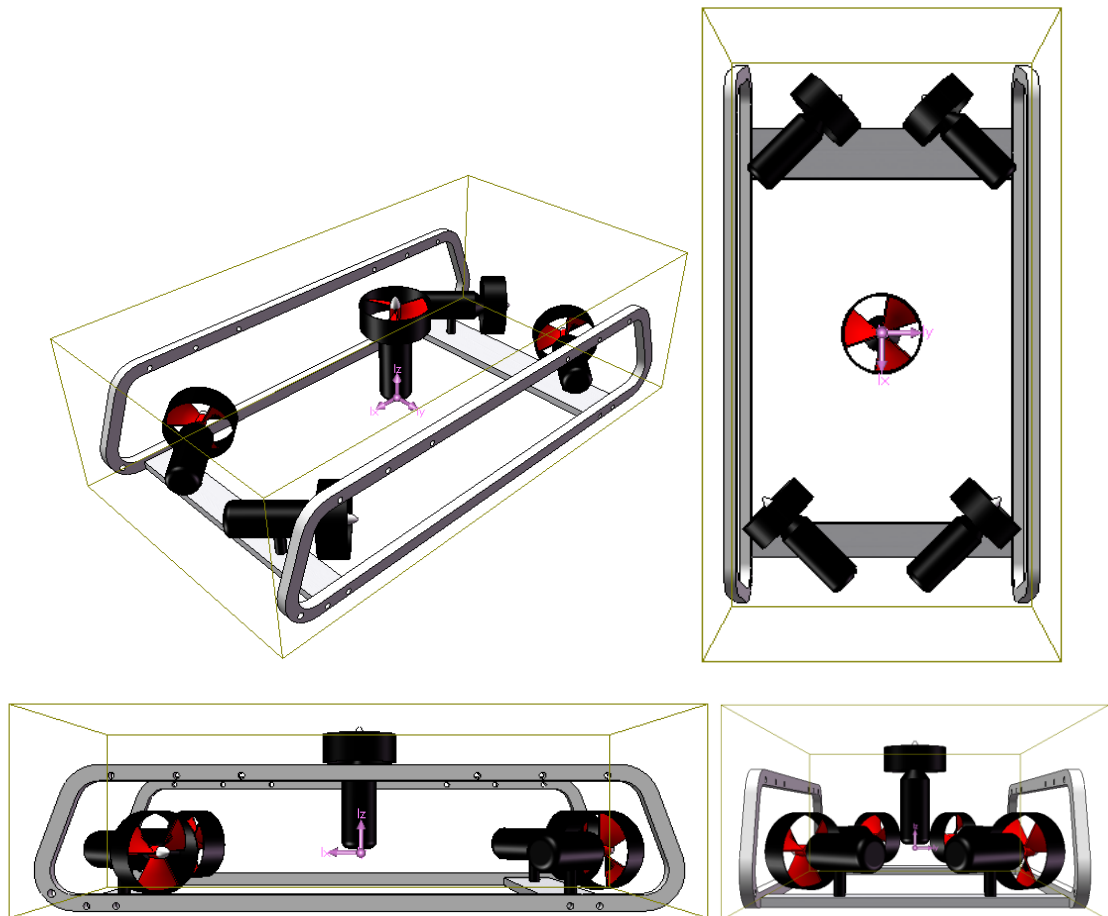
Fuente: Autores

Ahora al añadir la configuración del sistema propulsor el centro de gravedad se eleva alrededor de 20 mm esto es de esperarse debido a que los centros de gravedad individuales de los propulsores están por encima del centro de gravedad

de la estructura al momento de ubicarlos y esta será la tendencia del centro de gravedad al adicionar elementos que tengan su centro de gravedad por encima del centro de gravedad actual.

Figura 80. Masa y volumen incluyendo 5 propulsores.

Masa = 6263.55 gramos
Volumen = 3049611.55 milímetros ³
Área de superficie = 709524.96 milímetros ²
Centro de masa: (milímetros)
X = 0.00
Y = 62.55
Z = -2.09

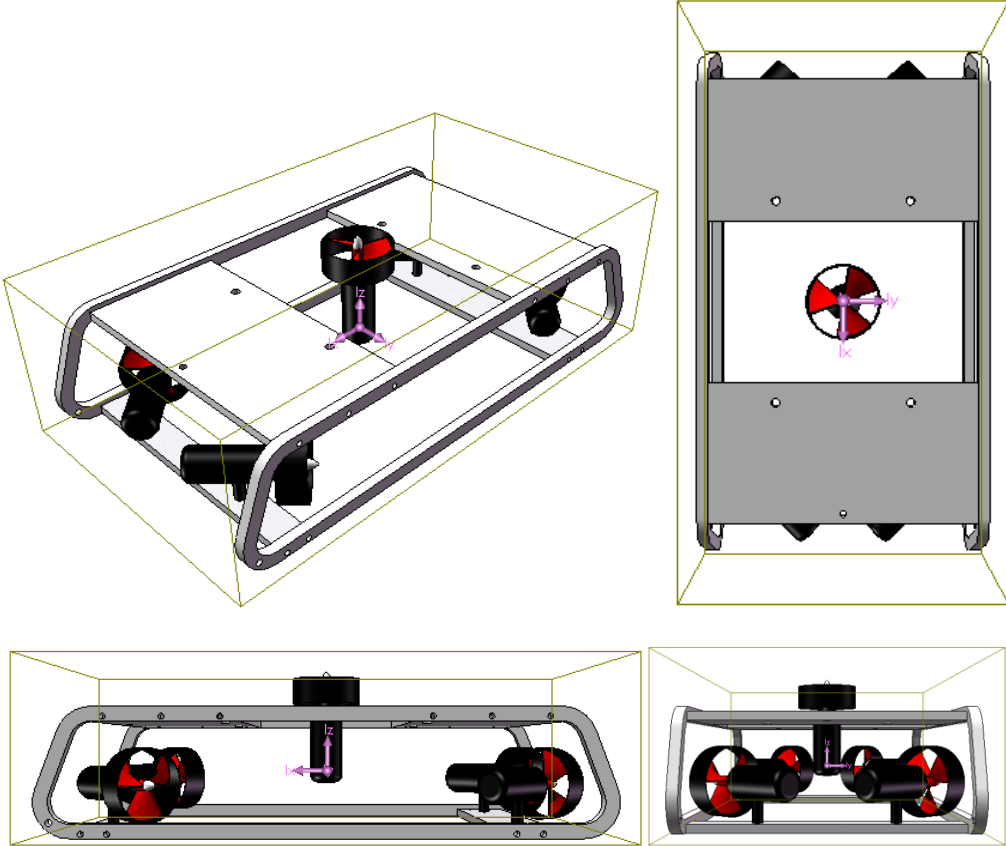


Fuente: Autores

Al igual que al momento de añadir el sistema propulsor, al incluirle a la estructura los soportes del modulo de flotabilidad, el centro de gravedad del conjunto se ve forzado a desplazarse más hacia la parte superior del vehículo, este fenómeno contribuye a la inestabilidad del equipo

Figura 81. Adicionando soportes laterales. Calculo de masa.

Masa = 8181.98 gramos
Volumen = 5157775.85 milímetros ³
Área de superficie = 1086811.68 milímetros ²
Centro de masa: (milímetros)
X = 0.00
Y = 86.89
Z = -1.63

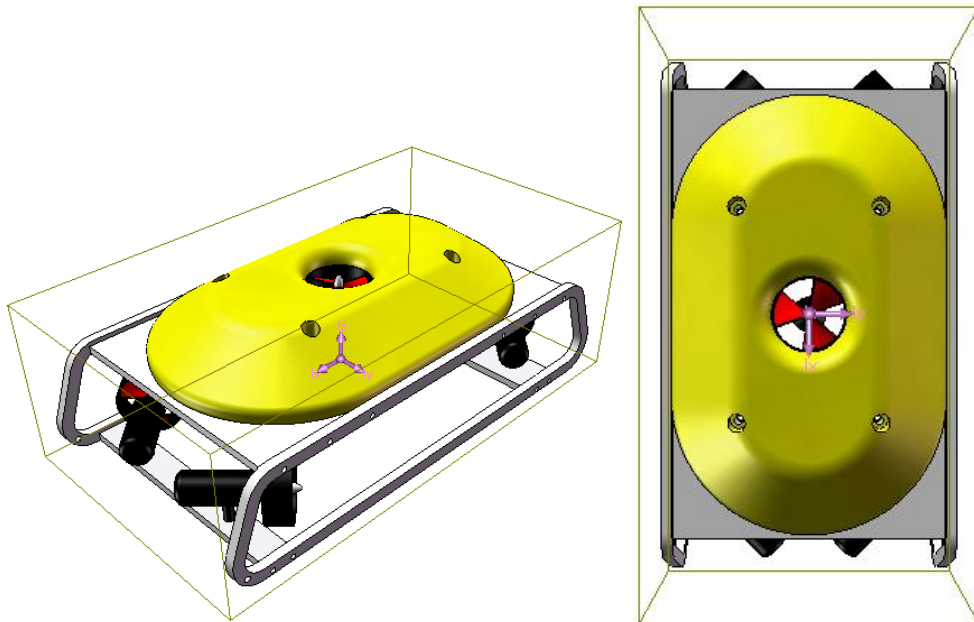


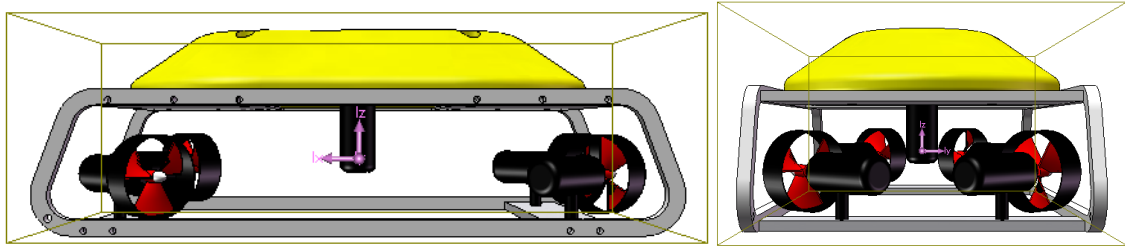
Fuente: Autores

Finalmente al añadir el modulo de flotabilidad el centro de gravedad del equipo se desplaza hacia arriba, así que es imperativo incrementar el peso en la parte inferior del equipo para poder desplazar el centro de gravedad, esto es posible con la adición de lastres externos o por medio de la implementación de otros materiales más pesados en determinadas secciones del equipos como puede ser en las bases de los propulsores.

Figura 82. Agregando dispositivos periféricos.

Masa = 8268.48 gramos
Volumen = 19573385.05 milímetros ³
Área de superficie = 1628956.34 milímetros ²
Centro de masa: (milímetros)
X = 0.00
Y = 88.15
Z = -1.61





Fuente: Autores

Como se puede observar en el último resultado arrojado por el software el centro de gravedad se ha desplazado hacia la parte delantera del equipo debido a la distribución de cargas, ya que el centro de gravedad de los propulsores delanteros están más alejadas, del centro de gravedad del conjunto por esta razón se ve desplazado hacia adelante, así que para balancear el equipo se utilizó un material más robusto para la base de los propulsores posteriores, de esta manera se pudo conseguir que el centro de gravedad se desplazara hacia atrás hasta el centro geométrico del vehículo.

Figura 83. Equipo final.

Masa = 10798.32 gramos
Volumen = 20230754.52 milímetros³
Área de superficie = 1814572.04 milímetros²
Centro de masa: (milímetros)
X = 0.00
Y = 87.91
Z = -3.00

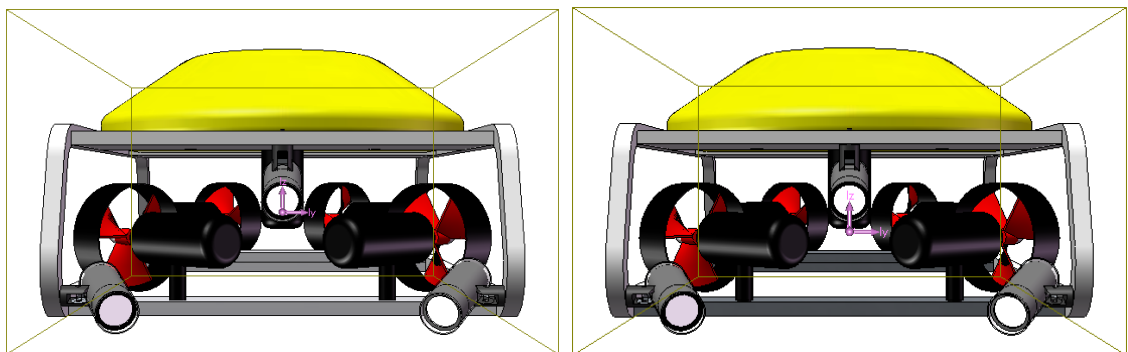


Fuente: Autores

Por otra parte al observar el efecto del lastre generado por las bases metálicas, se puede inferir que al variar el material utilizado, se puede obtener el desplazamiento del centro de gravedad hacia un punto inferior con lo cual se puede obtener más estabilidad, pero al incrementar el peso para obtener estabilidad también se está sacrificando eficiencia en el sistema propulsor ya que se deberá incrementar el volumen del modulo de flotabilidad para contrarrestar este peso y de igual manera se incrementara la sección transversal expuesta al flujo.

Figura 84. Corrección lastre.

Masa = 10798.32 gramos	Masa = 16107.07 gramos
Volumen = 20230754.52 milímetros ³	Volumen = 20230754.52 milímetros ³
Área de superficie = 1814572.04 milímetros ²	Área de superficie = 1814572.04 milímetros ²
Centro de masa: (milímetros)	Centro de masa: (milímetros)
X = 0.00	X = 0.00
Y = 87.91	Y = 62.60
Z = -3.00	Z = -44.87



Fuente: Autores

Las diferencias entre los pesos reales y simulados de los subsistemas se atribuye a los diferentes tipos de materiales que se utilizan en la etapa de construcción.

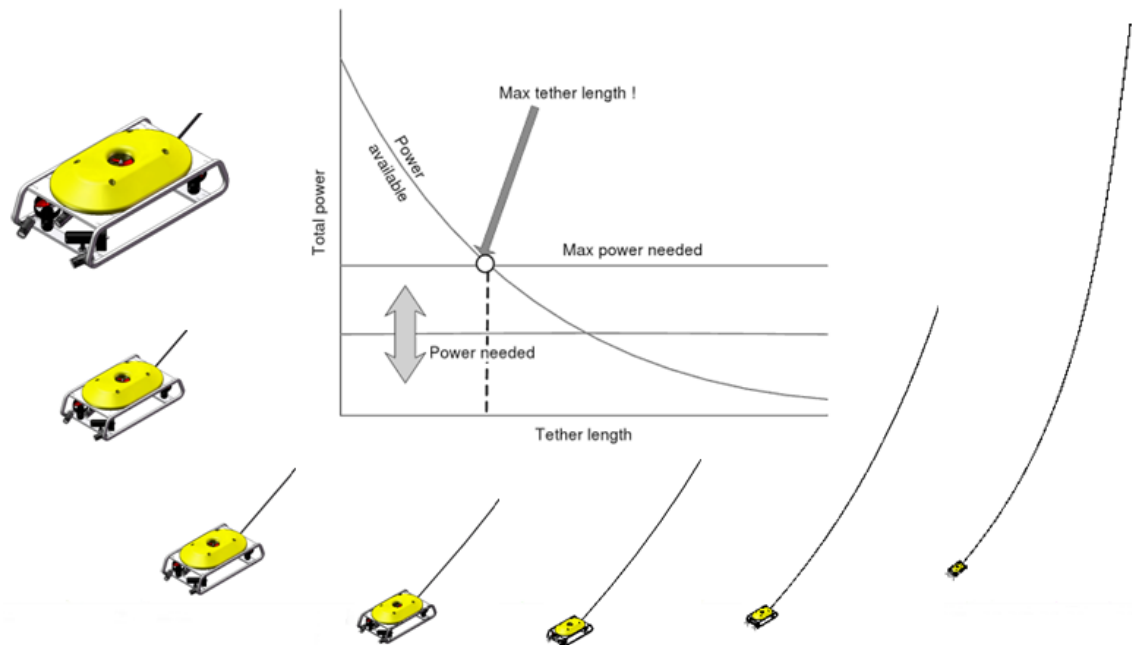
Para poder tomar una decisión es necesario construir el modelo ya que no se tiene un valor cuantificado de la estabilidad necesaria para que el vehículo se desplace de forma correcta, de esta manera debemos comprobar que la estabilidad que

entrega el lastre de aluminio sea suficiente y esto solo será posible con el modelado físico del equipo.

6.3.1. Incidencia de la línea umbilical en el equipo

El diseño y selección de la línea umbilical tienen una gran influencia en la dinámica de un ROV, en parte debido a las posibles pérdidas de energía que se pudiesen presentar debido a líneas umbilicales demasiado largas, es decir equipos diseñados para grandes profundidades. Aunque este problema no tendrá mucha influencia en el equipo del proyecto por ser un prototipo con una profundidad de operación de 20 m, es importante considerar el fenómeno al seleccionar la línea umbilical. Este inconveniente se resuelve analizando los calibres de las líneas conductoras, sus resistencias y los voltajes de alimentación.

Figura 85. Incidencia del umbilical en desplazamiento.

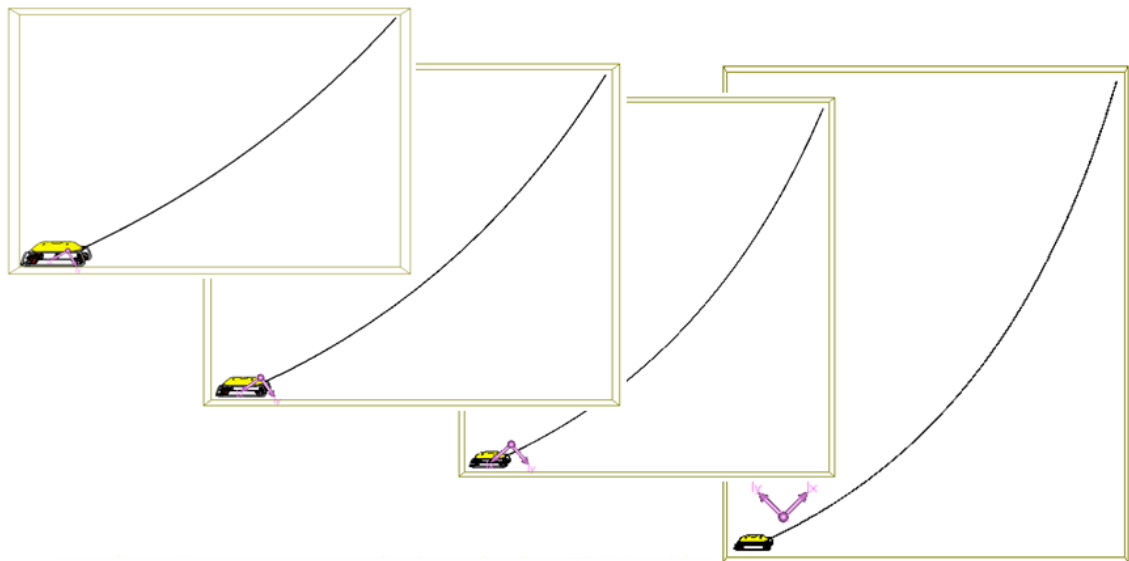


Fuente: Autores

La rigidez y la flotabilidad de la línea umbilical son factores que aparecen en cualquier proyecto ROV de tipo observación debido a las potencias reducidas que manejan este tipo de vehículo y al hecho de que su posicionamiento al momento de llevar a cabo una tarea es llevado a cabo por medio de la navegación y sustento del sistema propulsor. Es importante garantizar la selección de una línea umbilical optimizada con la cual se pueda reducir al mínimo el valor del peso por longitud y de esta manera llevar a cabo más fácilmente la solución al problema de la flotabilidad de este elemento.

De igual forma es muy importante seleccionar la línea umbilical más flexible posible para que permita las maniobras del vehículo, ya que en las líneas rígidas aunque se obtenga una flotabilidad deseada el hecho de tener que generar el movimiento de toda la longitud umbilical sumergida, produce un arrastre considerable para el vehículo, por el contrario al tener una línea flexible el equipo solo tendrá que maniobrar con una menor resistencia producto de la sección umbilical cercana a su estructura.

Figura 86. Incremento de la longitud.



Fuente: Autores

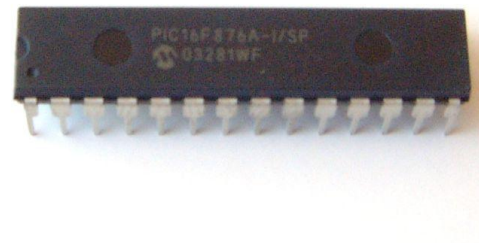
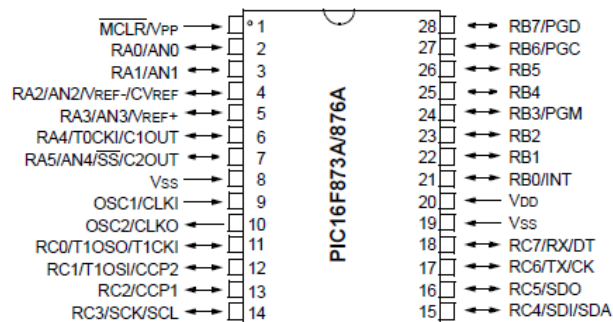
Como podemos observar y era de esperarse el incremento de la longitud de la línea sumergida modifica la ubicación del centro de gravedad del vehículo proporcionando una carga extra en la parte posterior de la estructura, es muy común en la industria entregar un grado de flotabilidad al umbilical ya sea desde su proceso de manufactura o posterior a este por medio de módulos de flotabilidad distribuidos a lo largo de la longitud.

6.4. Control

Debido al poco espacio disponible en el recinto electrónico, se utilizó el microcontrolador PIC16F876A. Este microcontrolador posee dos puertos de PWM los cuales son suficientes para maniobrar el ROV, la programación en Visual Basic fue sencilla y eficiente a la hora de obtener los grados de libertad requeridos. El tiempo de respuesta del vehículo es suficiente para entender en grado cualitativo el buen comportamiento del controlador.

Figura 87. Controlador PIC16F876A

28-Pin PDIP, SOIC, SSOP



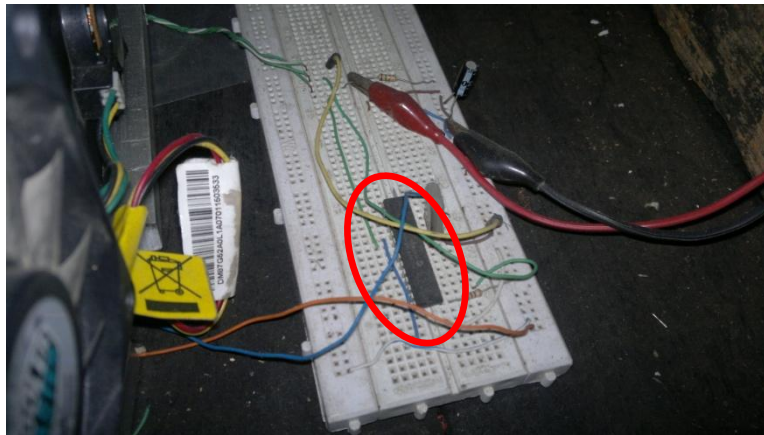
Fuente: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39582b.pdf>

Las principales características del controlador son:

- Reloj de 20 MHz.
- Hasta 368 x 8 bytes de memoria de datos (RAM).

- Hasta 256 x 8 bytes de memoria de datos EEPROM.
- Amplio rango de voltaje (2.0V a 5.5V).
- Diseño totalmente estático.
- Comerciales e Industriales rangos de temperatura.
- Bajo consumo de potencia.

Figura 88. Montaje de prueba del controlador.



Fuente: Autores

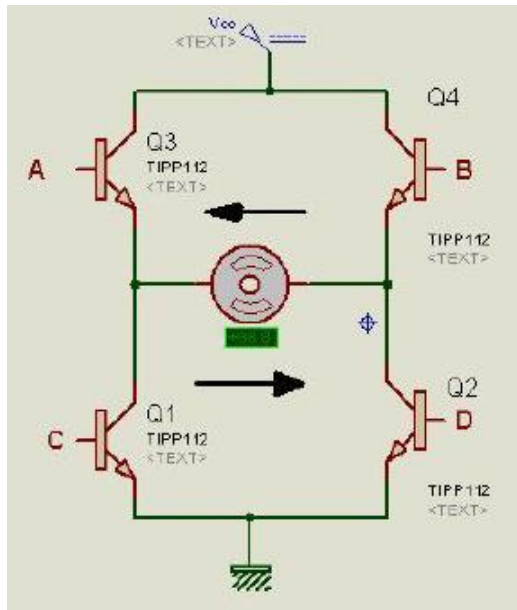
Las señales del controlador se envían al Puente H y dispositivos de potencia, se comprueba el correcto funcionamiento de los mismos, también se analiza los picos de corriente entre otros aspectos.

6.4.1. Puente H

Los grados de libertad del ROV, implican que los propulsores deben girar en un sentido y en otro. El puente H es la parte del circuito que une la etapa de control con la etapa de potencia, ayuda entre otras cosas a regular la velocidad de los propulsores. Una figura simple del funcionamiento se muestra en la figura 89.

La referencia de los transistores varía según los requerimientos de corriente y de voltaje, el control de la velocidad se realiza desde comandos enviados a través del controlador, utilizando los puertos de PWM con su respectivo código.

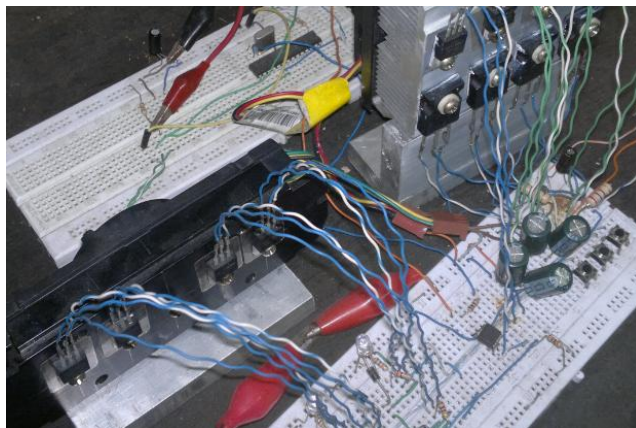
Figura 89. Configuración de un Puente H con transistores.



Fuente: <http://www.google.com.co/imgres?q=diagramas+punte+h>

Después de tener programado el controlador y la etapa de potencia en esquema, se procede a hacer pruebas en protoboard. El primer aspecto a considerar es el recalentamiento de los transistores que deben soportar la corriente que exige cada propulsor, por lo tanto, se adjuntan a disipadores de calor además de poner ventiladores a los mismos. A través de cada transistor pasa una corriente de 3[A].

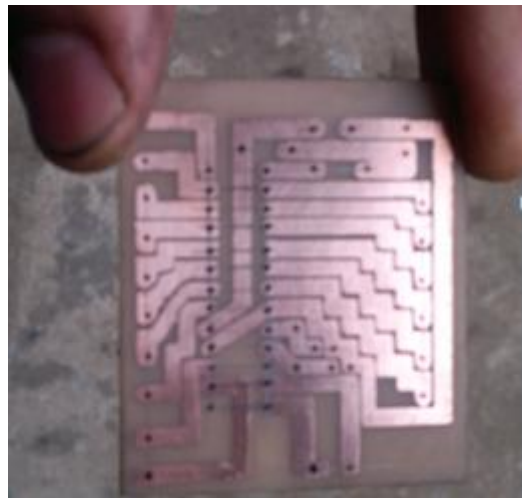
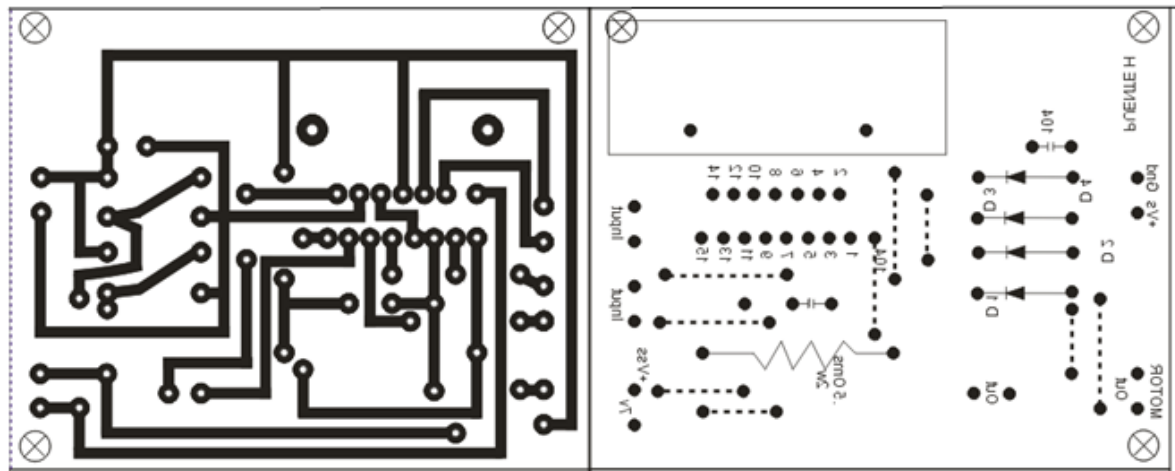
Figura 90. Disposición de los transistores.



Fuente: Autores

La siguiente figura muestra el plano que se imprime sobre la baquelita o (PCB). Se aprecia que las letras están invertidas, esto es debido a que al momento de realizar la impresión y ubicar esta sobre la baquelita, la imagen queda al derecho.

Figura 91. Disposición de las piezas en la PCB.



Fuente: Autores

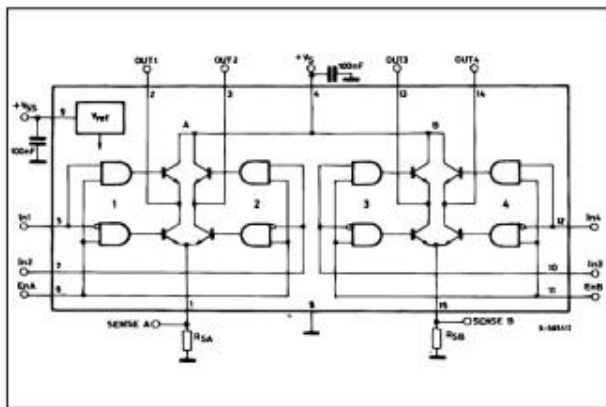
6.4.2. Puente H con L298N

Estesencillos y práctico puente H tienen la capacidad de soportar entre 2A y 3A, se consiguen fácilmente en el mercado local a un precio bajo. Se debe observar cuidadosamente la ficha técnica para tener claro cuáles son los pines de control y

cuales los de potencia, ya que un error en dicha conexión resulta en un mal funcionamiento del mismo o posible daño. El voltaje de control está entre 5V y 7V, teniendo en cuenta que el microcontrolador envía una señal de 5V es ideal para acoplar con este.

Después de tener claridad conceptual en las conexiones, se procede a realizar pruebas en la protoboard, este puente H se utilizó en el vehículo de prueba 1, obteniendo excelentes resultados en su funcionamiento ya que los motores demandaban 0,2 A.

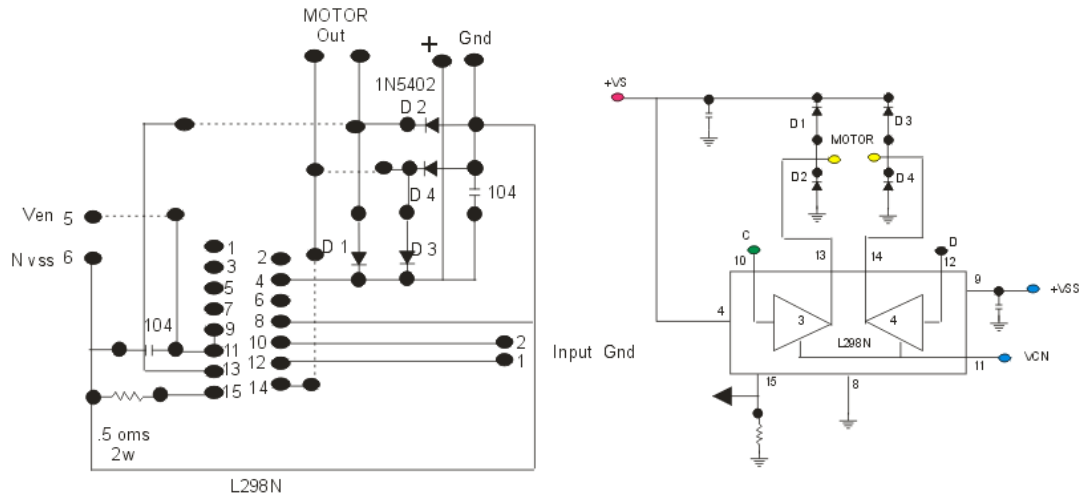
Figura 92. L298N



Fuente: http://www.datasheetcatalog.net/es/datasheets_pdf/L/2/9/8/L298N.shtml

Para este puente H se realizó el plano y se imprimió en baquelita. Algunas páginas de internet muestran el plano y sus respectivas conexiones, aunque no todas son efectivas se debe realizar un montaje previo en protoboard. Presentan inconvenientes al intentar trabajar con más de 3[A].

Figura 93. Esquema y diseño para PCB

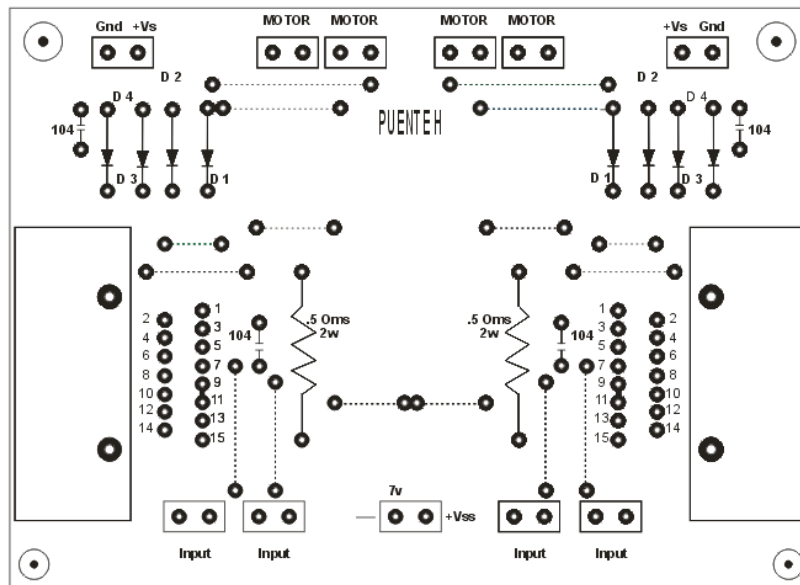


Fuente: Autores

Este esquema funciona para un motor, aunque el integrado L298N, funciona para dos motores, se fabricaron 3 de estos esquemas para controlar los 5 motores del ROV.

En la siguiente figura se aprecia el montaje para 2 integrados lo cual permite controlar 4 motores.

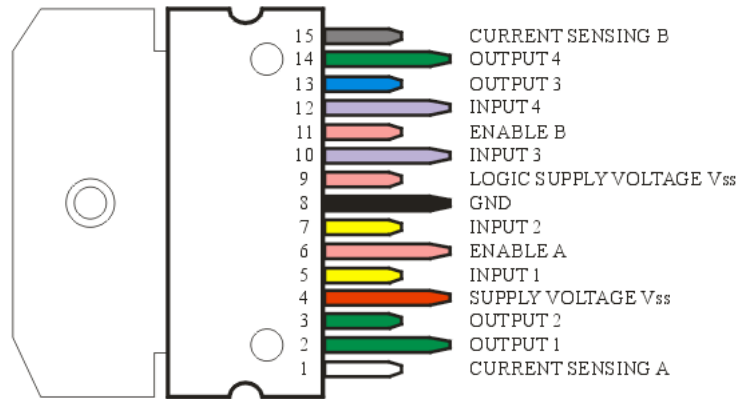
Figura 94. Montaje para 2 integrados L298N



Fuente: Autores

Las respectivas conexiones para cada pin del integrado se ilustra a continuación.

Figura 95. Conexiones para cada pin.



Fuente: Autores

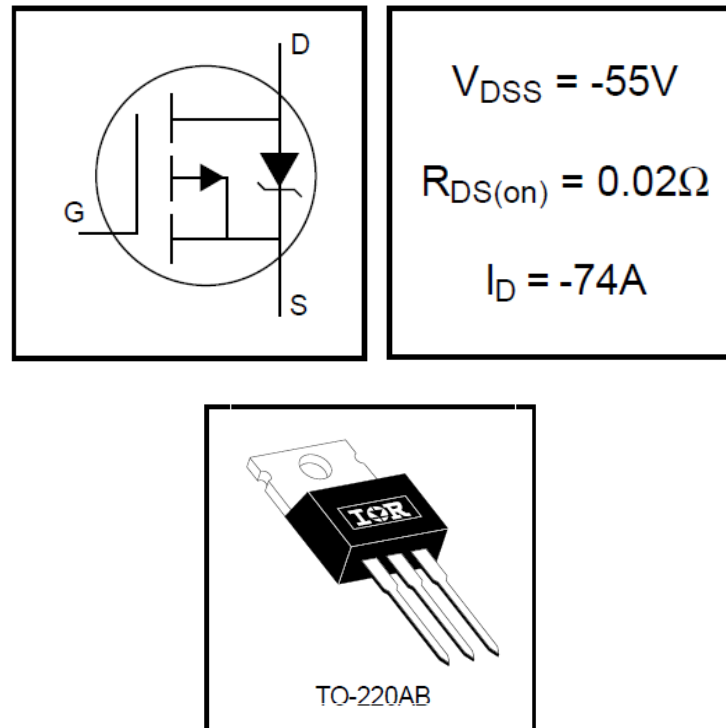
6.4.3. Puente H con transistores MOSFET

Cada vez que se sobrepasa el límite de corriente de los integrados L298N se queman, por tanto surge la necesidad de trabajar con elementos más robustos que soporten altas corrientes y altas temperaturas. Los transistores MOSFET de gama alta son un poco más costosos y se consiguen en tiendas locales.

Se pueden realizar montajes en paralelo para aumentar la capacidad de corriente, algunas referencias como la IRF48N, IRF4004, IRF4905, entre otras, son las más utilizadas para este tipo de trabajo donde se requiere no solo convertir el sentido de giro del motor, sino además variar su velocidad en cada sentido.

La estructura interna del transistor permite que mientras una entrada recibe señal de PWM desde el microcontrolador, la otra entrada este en cero y el motor gira en un sentido, si se envían las señales al contrario el motor gira en el otro sentido.

Figura 96. Configuración, especificaciones e imagen MOSFET

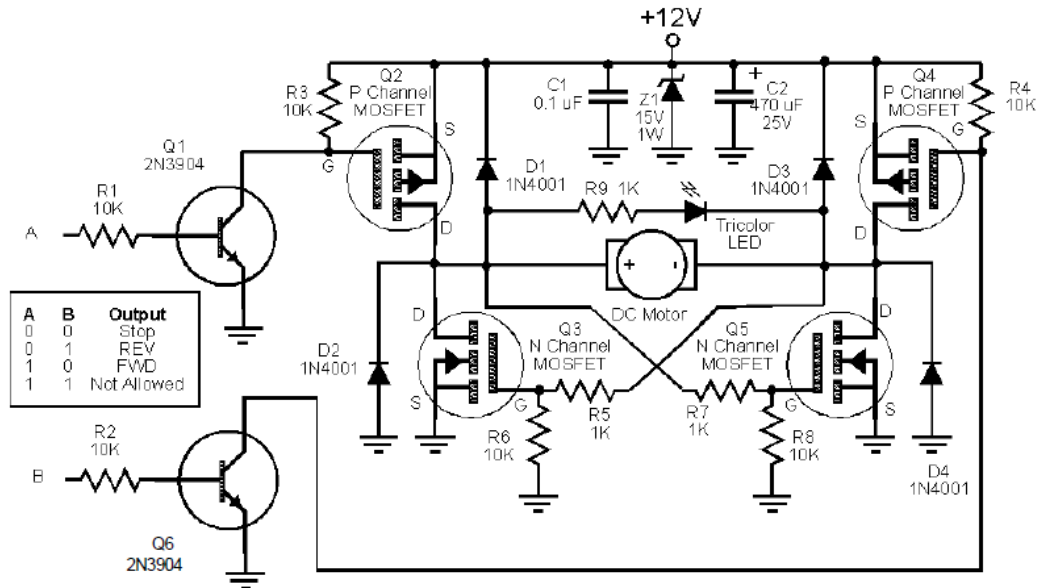


Fuente: <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/irf/irf4905.pdf>

En ningún momento las dos entradas deben quedar al mismo tiempo con 5V ya que esto daña inmediatamente el MOSFET. La alimentación de este transistor es de 24V los cuales llegan a el por medio de un optoacoplador, el optoacoplador es un elemento de protección para el transistor ya que primero se daña el mismo, antes que dejar pasar corriente al transistor.

La configuración del montaje se ilustra en la figura 97, este montaje es para un motor, nuestro vehículo ROV posee 5 motores, por lo tanto después de probar este montaje en protoboard, se procedió a realizar 5 PCB's y ensamblar los componentes electrónicos.

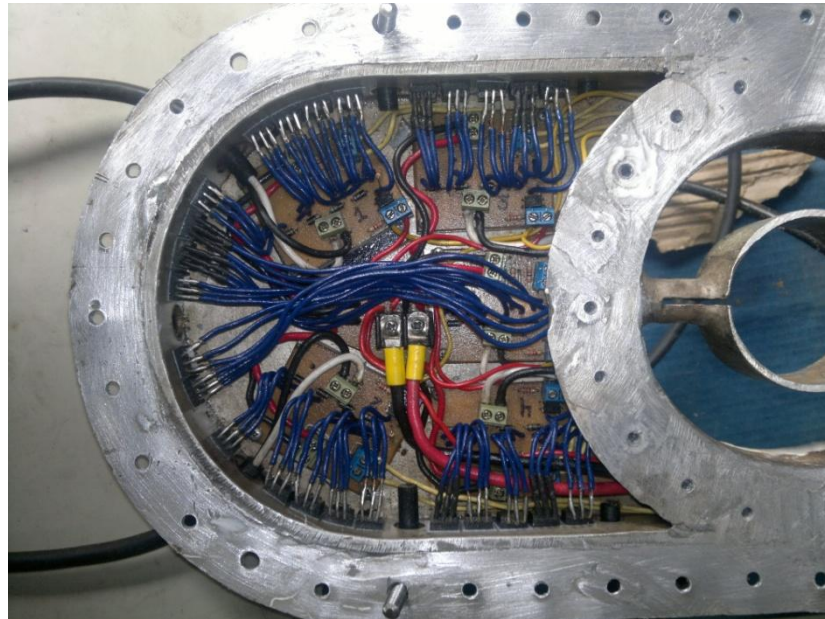
Figura 97. Esquema utilizado para los Puentes H.



Fuente: <http://www.todorobot.com.ar/documentos/hbridge-mosfet.pdf>

El resultado final de comprimir este plano, elaborarlo en PCB, y montarlo en el recinto electrónico del ROV se aprecia a continuación:

Figura 98. 5 Puentes H en el recinto electrónico.



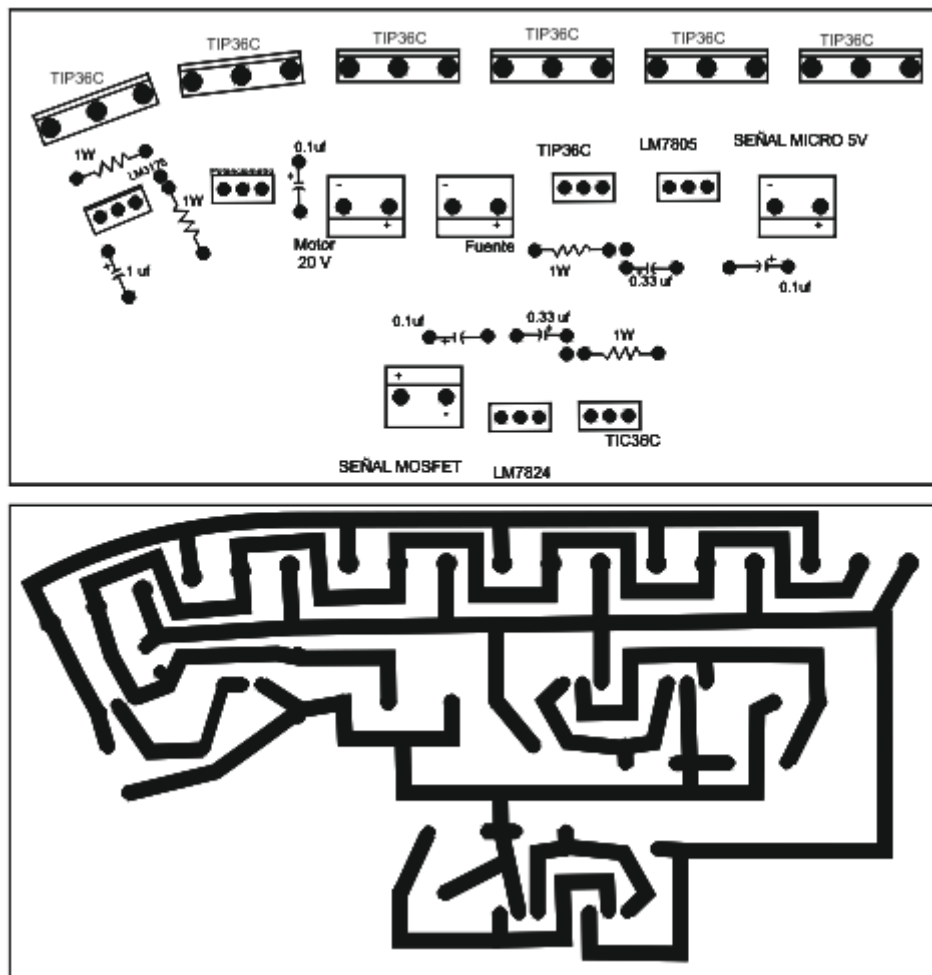
Fuente: Autores

6.5. Planos impresos

6.5.1. Etapa de Potencia

Esta etapa es la encargada de distribuir el voltaje desde la fuente hacia los elementos de todo el circuito, la fuente de 30 V envía el voltaje a través de la línea umbilical y llega a los transistores TIP36C, estos a su vez envían voltaje a los transistores MOSFET (24V), a los motores (20V), y al microcontrolador (5V).

Figura 99. Etapa de potencia.

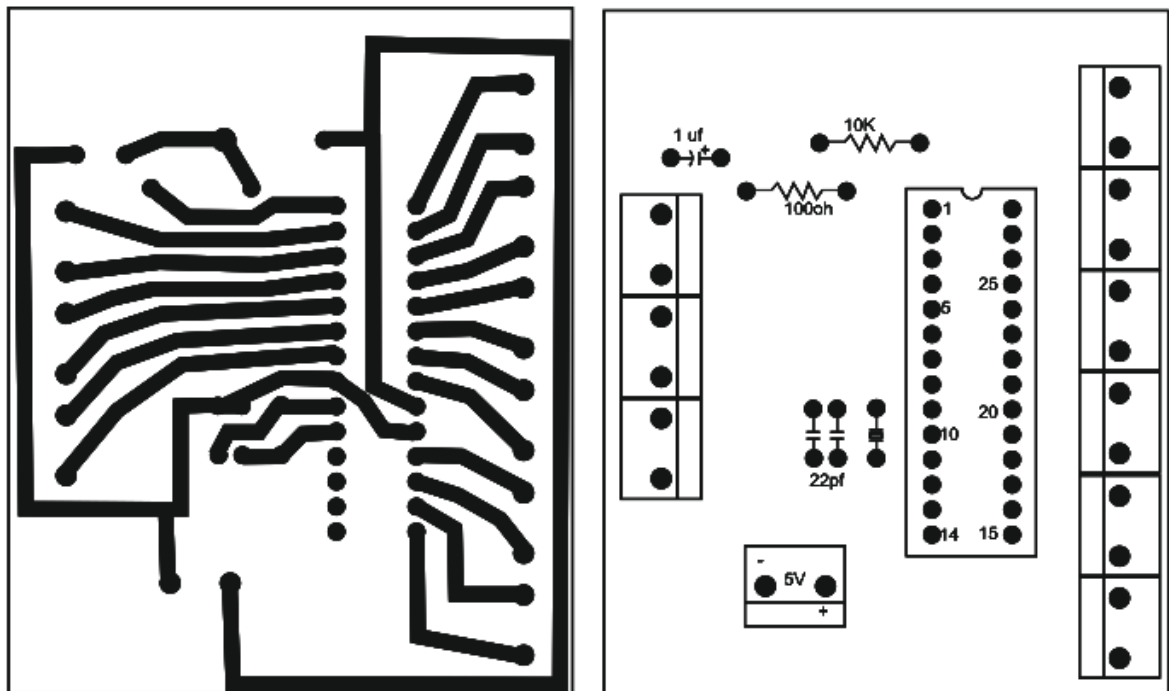


Fuente: Autores

6.5.2. Etapa de control

Esta etapa recibe la señal desde el control, el cual se elaboró con potenciómetros, estos envían su señal entre 0 y 5V, el microcontrolador detecta esta señal y activa puertos de salidas los cuales dan el sentido de giro de cada motor. El PIC16F876A es el encargado del control, las borneras del lado izquierdo reciben las señales y las del lado derecho son enviadas a una etapa con optoacopladores y estos a su vez envían la señal a los puentes H.

Figura 100. Etapa de control.



Fuente: Autores

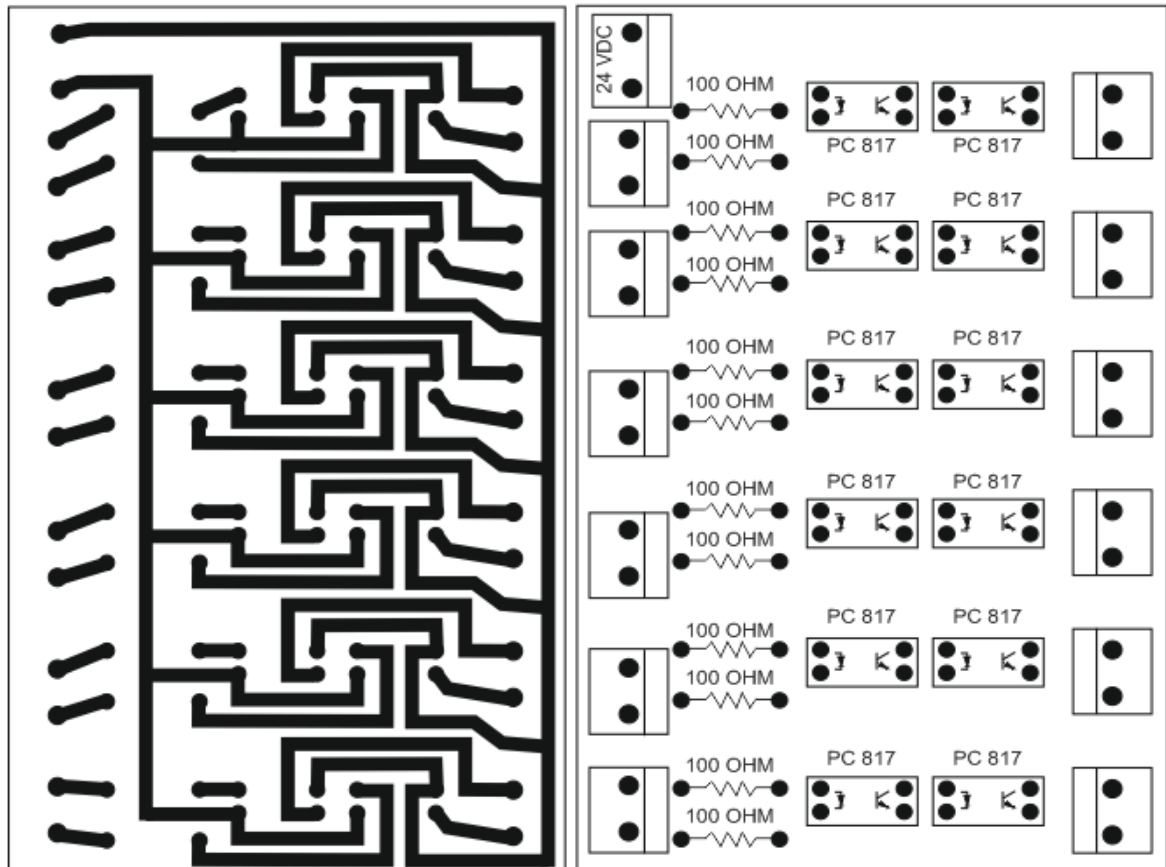
Al lado derecho se aprecia espacio para seis borneras, no obstante, solo se utilizaron 5 y se dejó una como reserva, estas cinco borneras representan la cantidad de motores a controlar.

A través del código de programación se logró controlar los motores con PWM, es decir, se puede controlar la velocidad del ROV.

6.5.3. Etapa de optoacopladores.

La actual etapa recibe señales desde el microcontrolador, señales de inversión de giro y señales de velocidad mediante PWM, esta etapa recibe 24V y envía de forma controlada este voltaje a cada Puente H. Sirve de protección para los MOSFET.

Figura 101. Optoacopladores

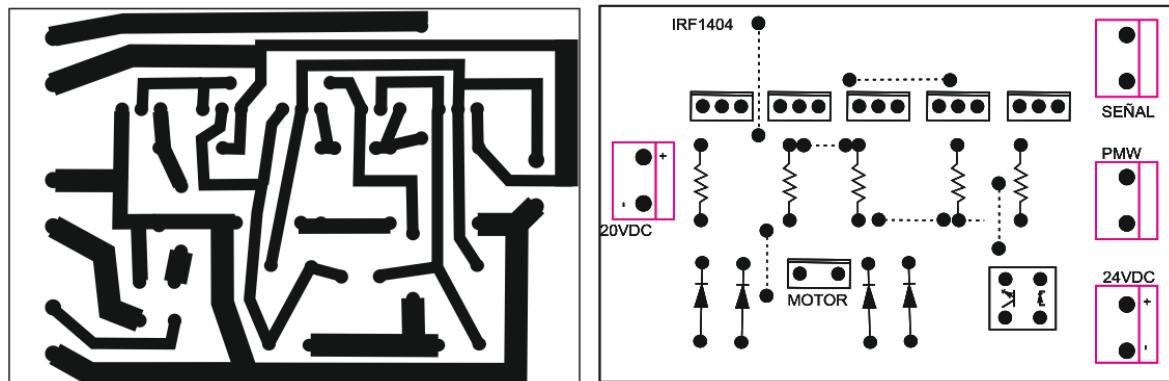


Fuente: Autores

6.5.4. Puentes H

Finalmente se trabajó con puente H construido con MOSFET, ya que estos soportan más corriente que los L298N. El disipador de todos los transistores es el mismo recinto electrónico ya que está construido de aluminio. Como se aprecia en la figura 98.

Figura 102. Puente H con IRF1404



Fuente: Autores

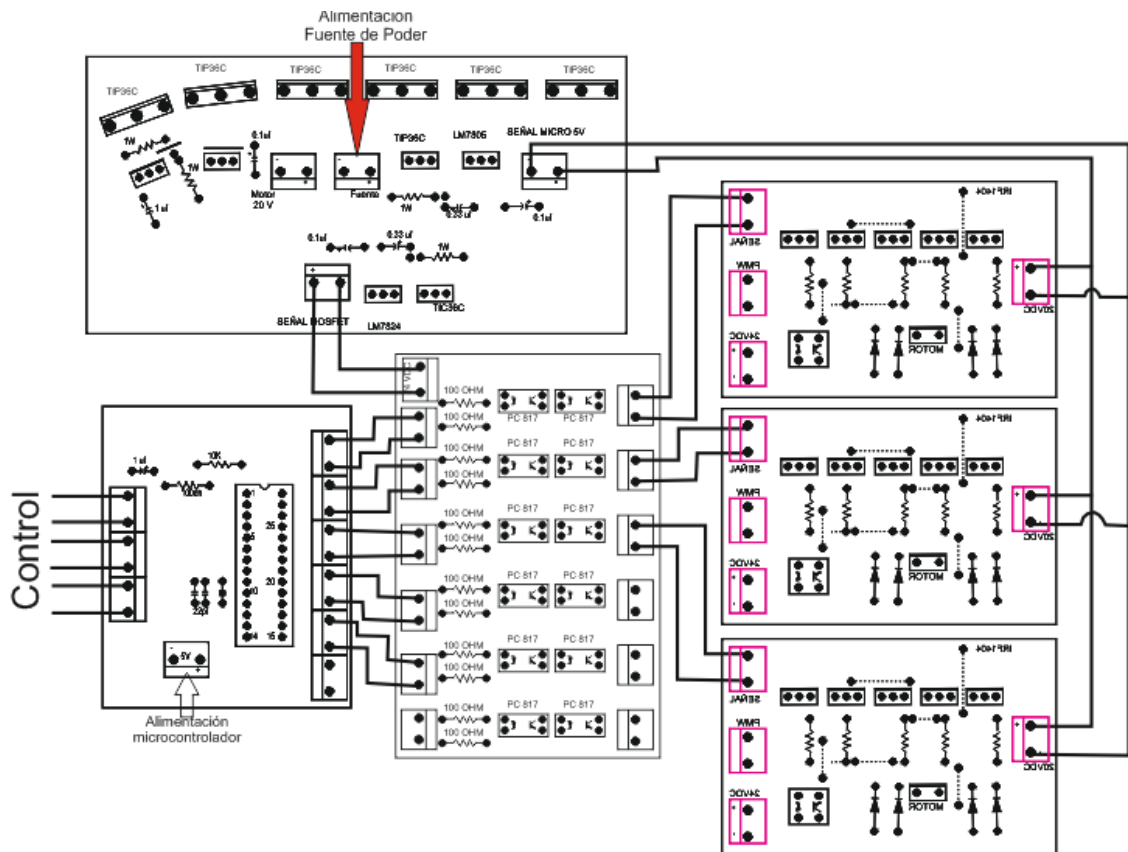
Borneras en esta plaqueta:

- De 20V para alimentación del motor
- De 24V para abrir compuertas del transistor
- PWM para regular velocidad del propulsor
- Señal, para cambiar sentido de giro
- Para la conexión del motor.

6.5.5. Plano final

Finalmente se integran todas las etapas, en la siguiente figura aparecen 3 puentes H, pero el recinto electrónico en realidad contiene 5, uno para cada motor. Este esquema es suficiente para controlar los motores y hacer que el ROV tenga los cuatro grados de libertad.

Figura 103. Esquema final.



Fuente: Autores

7. CONSTRUCCION

7.1. MANUFACTURA DEL MARCO

Para manufacturar el marco del vehículo del proyecto se contemplaron dos materiales muy utilizados en esta industria el aluminio y el polipropileno.

El primero con mejores características en lo que a resistencia se refiere, forma parte de la gran mayoría de equipos operados remotamente desde sus comienzos y de forma imprescindible en equipos de tipo pesado que requieren su resistencia y bajo peso para entregar las prestaciones de este tipo de vehículos.

Por otra parte el polipropileno trae consigo características como pesos muy reducido y buena resistencia para equipos de menores potencias como son los de tipo observación.

Las consideraciones que inclinaron la balanza a favor del polipropileno sobre el aluminio como material de la estructura son:

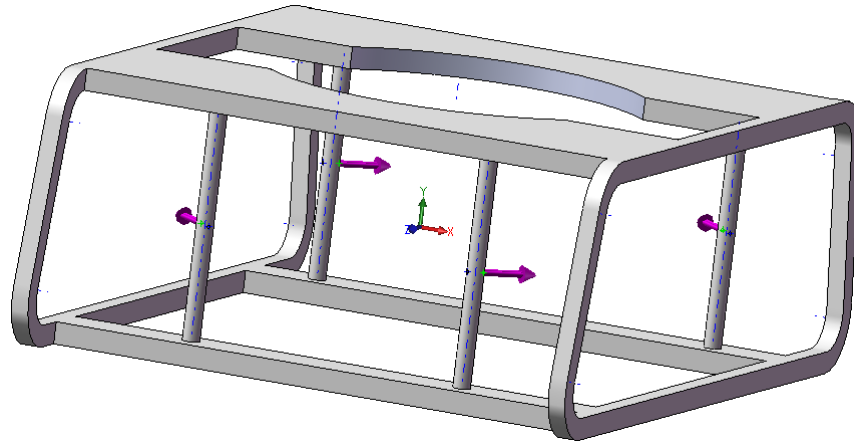
- El proceso de manufactura de un marco en aluminio requiere una estrategia de ensamble cuidadosa, ya que la simetría es uno de los parámetros a obtener, para evitar problemas de estabilidad en etapas posteriores del proyecto.
- Esta clase de ROV (tipo observación) modelo requiere la selección de perfiles tubulares para reducir el peso de la estructura, aunque el material es de fácil acceso, los costos del proceso de soldadura que se requiere para construir el modelo seria elevados en comparación con el otro material alternativo debido a la dificultad del proceso.
- El polipropileno presenta una resistencia que cubre las necesidades del vehículo, además aporta con su bajo peso la disminución del modulo de flotabilidad, lo cual se traduce finalmente en reducción de área (Sección transversal del vehículo en la dirección de los movimientos) que mejora el valor de arrastre y por supuesto una disminución de potencia necesaria para desarrollar desplazamientos.

- Debido a la fácil maniobrabilidad del polipropileno, los dispositivos periféricos como cámara y luces pueden ser fácilmente añadidos o modificados en la estructura, lo cual aporta al diseño versatilidad en lo que respecta a modificaciones que se deban llevar a cabo.

Para poder descartar errores estructurales en el vehículo debemos simular las condiciones ambientales y operacionales a las cuales estará expuesto, es así que a una profundidad de 20 *m* tendremos una presión de 44,1 *psi* , presión a la cual el marco deberá mantener su configuración y estructura material en perfecto estado, las corrientes y la velocidad de operación del vehículo no son lo suficientemente altas, para generar deformación por interacción fluido estructura, así que no será necesario este análisis. Por otra parte las fuerzas transmitidas de los propulsores al marco al momento de generar el impulso para una maniobra, deberán ser simuladas de igual forma, esto buscando cubrir cualquier deformación que se pudiera permitir por el material debido a la configuración del sistema de propulsión.

En esta figura podemos observar los vectores de empuje que influyen en la estructura durante el desplazamiento del vehículo en surge, hacia la parte delantera del vehículo (proa para los barcos). Debido a que en este estado la estructura soporta los mayores esfuerzos debido al múltiple accionamiento de los thrusters se analizará la competencia de la estructura para soportar estas cargas

Figura 104. Análisis estructural.

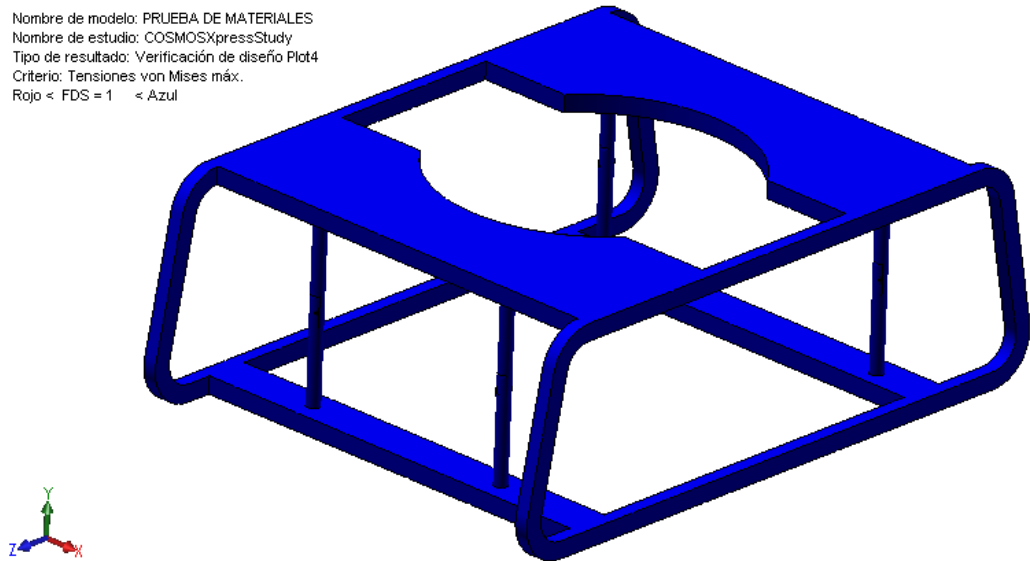


Fuente: Autores

Al simular las cargas de los propulsores en la estructura se puede obtener un valor cualitativo del grado de seguridad que tiene el diseño. Es así que el software SOLIDWORKS y su paquete estructural COSMOS permite este análisis, el cual al ser llevado a cabo, arrojo una muy buena respuesta del diseño de la estructura frente a estas cargas como se muestra en la figura, en la cual el marco se encuentra resaltado de un color azul el cual indica u su factor de seguridad es superior a 1, lo cual hace seguro el diseño.

Figura 105. Simulación del material.

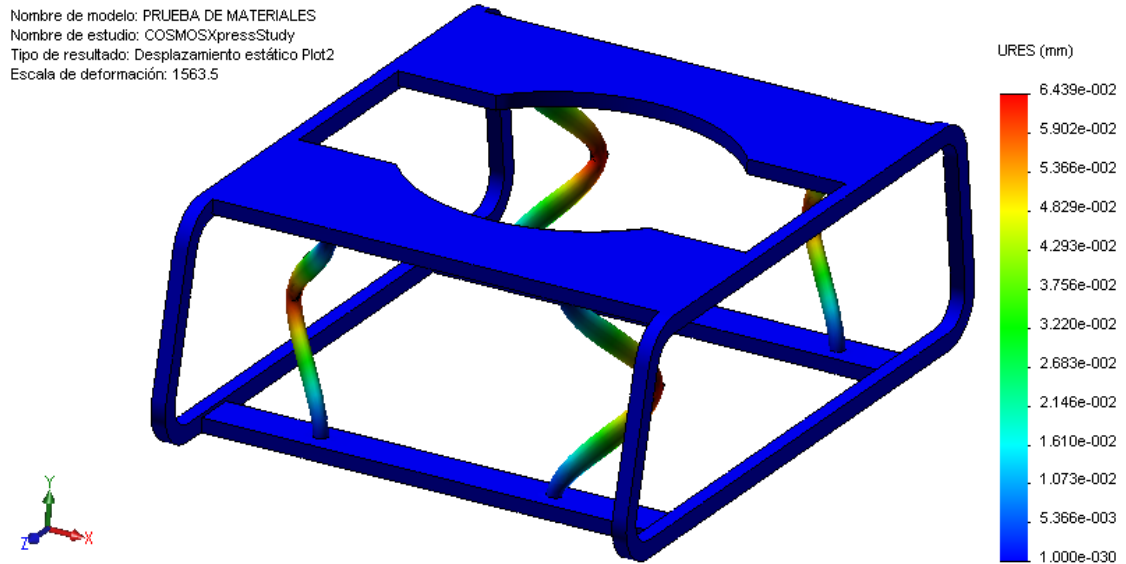
Nombre de modelo: PRUEBA DE MATERIALES
Nombre de estudio: COSMOSXpressStudy
Tipo de resultado: Verificación de diseño Plot4
Criterio: Tensiones von Mises máx.
Rojo < FDS = 1 < Azul



Fuente: Autores

Otro resultado muy útil que se puede extraer del software consiste en el valor de desplazamientos que permite las estructuras al momento de ser cargadas, en el caso del marco diseñado los puntos con color rojo (las deformaciones se encuentran exageradas de forma tal que el usuario de software pueda identificar con toda seguridad los puntos críticos en un análisis estructural) presentan los máximos desplazamientos que se encuentran en el orden de $6 \times 10^{-2} \text{ mm}$ un valor prácticamente insignificante para el objetivo del proyecto.

Figura 106. Simulación cargas del impulsor.



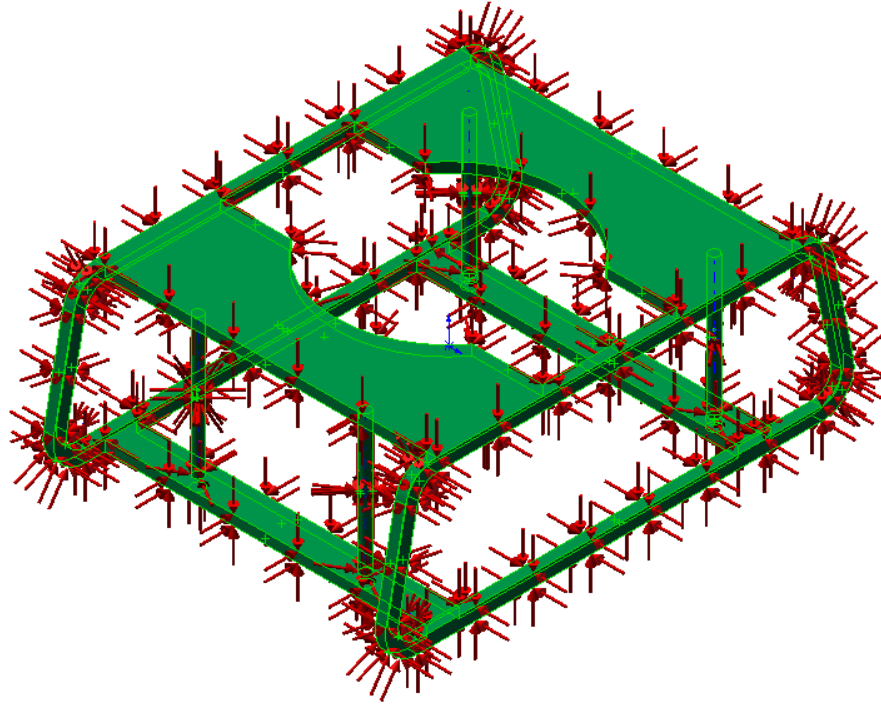
Fuente: Autores

Finalmente podemos concluir que el diseño cumple a cabalidad las condiciones de empuje generadas por el accionamiento de su sistema propulsor.

Ahora la presión a la profundidad de operación también deberá ser analizada, aunque a 20 m, el valor que pudiera alcanzarse alcance los 44 *psi*. Al generar el modelo en el software y simular este estado de presión podemos obtener el grado de seguridad del diseño.

En las figuras podemos observar los vectores que representan la presión del ambiente sobre la estructura, el resultado correspondiente al factor de seguridad que presenta la estructura frente a este fenómeno y la figura de los posibles desplazamientos de cada uno de los puntos del marco. Este análisis avala por completo el diseño del marco del vehículo

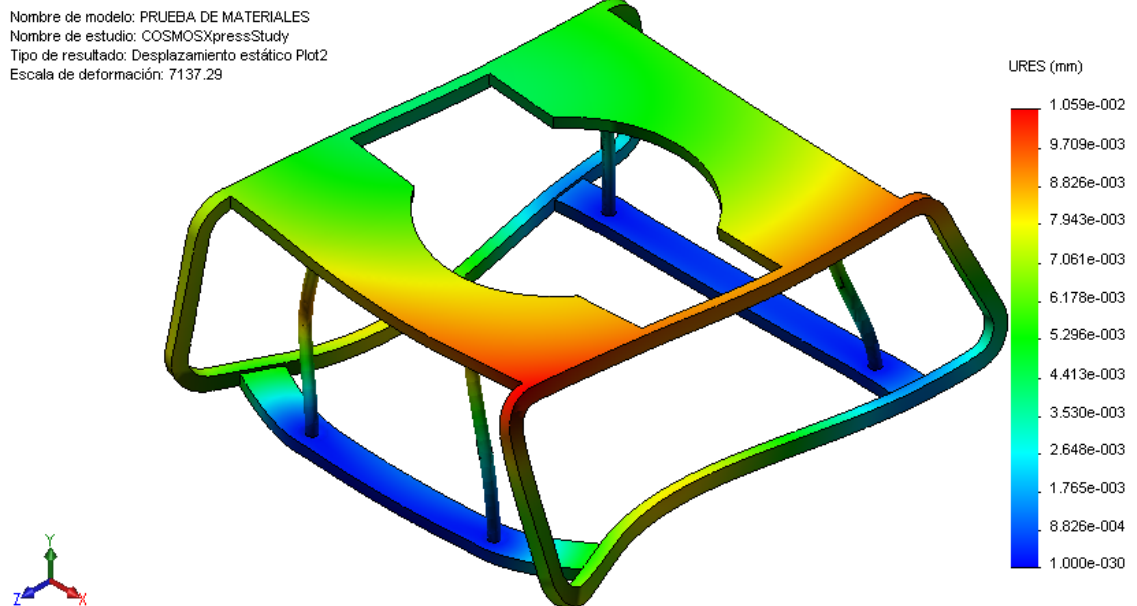
Figura 107. Simulación de cargas debido a la presión del agua.



Fuente: Autores

Imagen extraída del software en la cual se carga a la estructura del los vectores correspondientes a la presión que genera la profundidad del agua

Figura 108. Resultado final.



Fuente: Autores

Imagen de las deformaciones debidas a la presión en la estructura (las deformaciones son exageradas por el software) se puede ver en la escala que la deformación máxima del sistema alcanza los $1,059 \times 10^{-2} \text{ mm}$

7.2.MANUFACTURA DEL MODULO

En vista que a la profundidad de diseño 20 m tenemos una ambiente con una presión de $0,304 \text{ MPa}$ y según la grafica proporcionada por las normas UNE* (Las normas UNE-EN son la versión oficial en español de las normas europeas

Plásticos.

Figura 109. Espuma de poliuretano.

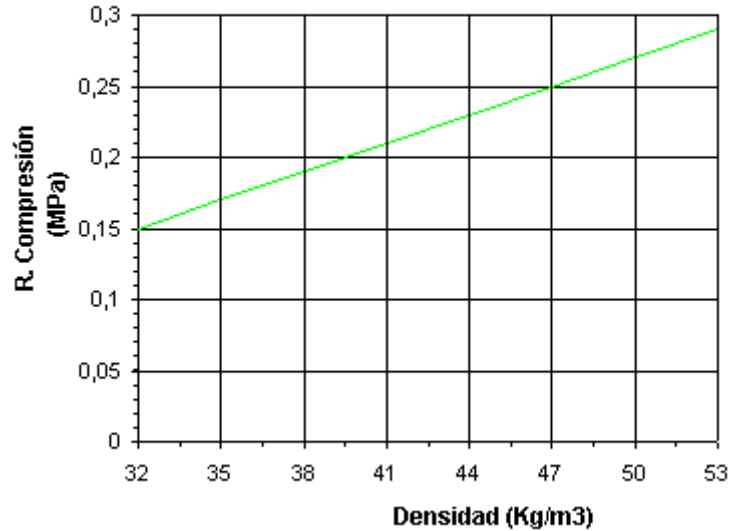


Fuente: <http://www.google.com.co/imgres?q=espuma+poliuretano+imagenes>

Materiales plásticos celulares rígidos. Resistencia. Especificaciones) y extrapolando se encuentra que será necesaria una espuma de poliuretano con una densidad mínima de $55 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ para poder soportar la compresión que generar la columna de fluido y el modulo pueda mantener su integridad.

Figura 110. Análisis espuma de poliuretano.

Resistencia a la compresión en función de la densidad, según UNE 53 205



Fuente: UNE

De esta forma se puede definir un valor mínimo de densidad como es $55 \text{ [kg / m}^3\text{]}$ para manufacturar el modulo de flotabilidad, es importante recordar que una selección inadecuada de la densidad demandada por las condiciones de operación, se verá reflejada en un vehículo más robusto, el cual presentara un coeficiente de arrastre más grande al tener que dimensionar el modulo de flotabilidad a ese exceso de peso para poder ser compensado.

7.3.MARCO

El marco del vehículo del proyecto será manufacturado con dos materiales el aluminio y el polipropileno. El aluminio se encuentra en la estructura en forma de platinas de 2" y 3" de ancho y calibres de 3/8" y 1/2" que se encuentran ubicadas en forma de vigas transversales. La consideración tenida en cuenta para selección del aluminio es la generación de lastre en la parte inferior del vehículo de traslade el centro de gravedad al punto más bajo posible en el vehículo sin incurrir en exceso de peso que deba ser compensado por el modulo de flotabilidad. Por esta razón la platina de 1/2" se ubicara en la parte inferior del vehículo. Los soportes laterales del marco serán manufacturados en polipropileno un material de buenas propiedades mecánicas como dureza, rigidez, excelente resistencia al impacto, química y dieléctrica, baja densidad. Debido a sus bajos pesos, buena resistencia y fácil configuración estos materiales son hace idóneos para la aplicación en un vehículo como el del proyecto. Al igual que con cada uno de los subsistemas del vehículo el marco fue diseñado buscando la mayor simetría posible y de esta manera disminuir el efecto de la inestabilidad propia de la distribución de cargas.

Las densidades típicas utilizadas en los vehículos operados remotamente van desde $200 [kg / m^3] (13 [lbs / ft^3])$ hasta $450 [kg / m^3] (28 [lbs / ft^3])$

<http://www.eis.uva.es/~macromol/curso05-06/pu/espuma.htm> dato de resistencia a la compresión

$$1 \left[\frac{Kg}{cm^2} \right] = 98040 [Pa]$$

Las normas UNE-EN son la versión oficial en español de las normas europeas Plásticos. Materiales plásticos celulares rígidos. Resistencia. Especificaciones

$$60 \left[\frac{Kg}{m^3} \right] = 325000 [Pa]$$

7.4.EL PROPULSOR

La configuración del sistema de propulsión en el equipo no permite simetría en lo que se refiere a la distribución de cargas ya que los propulsores deben estar ubicados de forma tal que puedan favorecer la dinámica de los grados de libertad relacionados. Con respecto al marco del vehículo de esta forma el centro de gravedad del vehículo ya no será el centro del plano zx

El dispositivo de propulsión se encuentra configurado de la siguiente forma:

Elemento	Material(es)	Peso [gr]
Conjunto moto-reductor banebots	-----	700
Encapsulado	Aluminio	150
Hélice	Aluminio	50
Boquilla Kort	Aluminio	40
Elemento de alimentación	Cable-conector	5

La ubicación del centro de gravedad de este elemento se obtuvo a partir del software

8. PRUEBAS

En el proceso de diseño y construcción del ROV, se realizaron prototipos preliminares los cuales fueron un primer acercamiento al equipo. También se observó el ROV desarrollado por la Escuela Naval Almirante Padilla. Finalmente se realizaron pruebas sobre cada elemento del ROV, impulsores, marco, módulo de flotabilidad, recinto electrónico y cable umbilical.

8.1. MODELO DE PRUEBA 1

ROV de tubos de PVC: Gracias a este vehículo se realizó un primer acercamiento a este tipo de vehículos, se consideraron aspectos del control ON-OFF, un control simple y funcional, el código se realizó en lenguaje Basic y el controlador fue un microcontrolador PIC16F876A. Se lograron 3 grados de libertad y los elementos para la realización se obtuvieron de una ferretería a muy bajo costo.

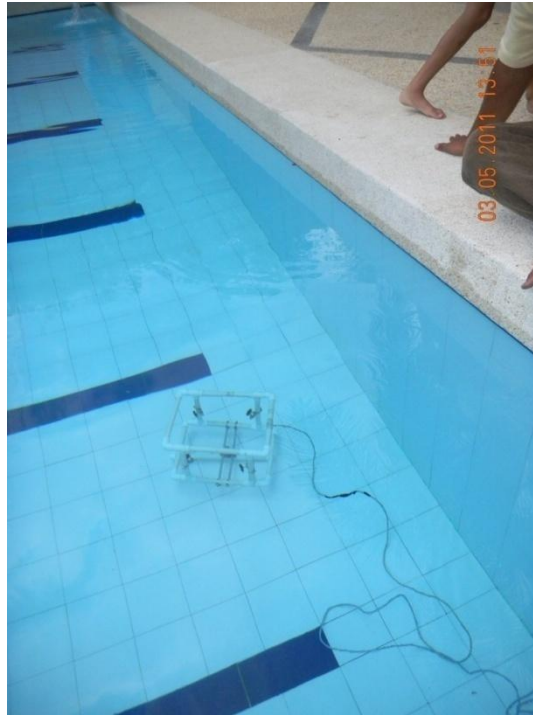
En la figura se aprecia los autores realizando primera prueba de control.

Figura 111. ROV Marco en tubo de PVC.



Fuente: Autores

Figura 112. ROV con tubos de PVC, prueba de inmersión.



Fuente: Autores

La flotabilidad del equipo siempre fue positiva y el impulsor vertical no brindaba la fuerza suficiente para sumergir el equipo. El equipo mostró inestabilidad y poca hermeticidad, básicamente se realizó una prueba de control.

Comentarios y resultados de la Prueba:

- Los motores de 5V no tienen el torque y las RPM's necesarias.
- El método de control ON-OFF fue sencillo, simple y funcional.
- Se apreció la velocidad de respuesta del equipo, la cual fue en tiempo real.
- Los motores no necesitaron ser encapsulados para su funcionamiento.

8.2. MODELO DE PRUEBA 2

ROV marco de acrílico: Este tipo de marco es un acercamiento un poco más real, ya que mecanizar este material brinda una sensibilización para trabajar con

polipropileno. Además los motores un poco más robustos exigen un tratamiento con voltajes y corrientes mayores.

Figura 113. ROV Marco de acrílico.



Fuente: Autores

La figura 96 muestra un pequeño prototipo, el cual es otra fuente base como parte de la experiencia, construido con materiales de una ferretería.

Comentarios y resultados de la prueba:

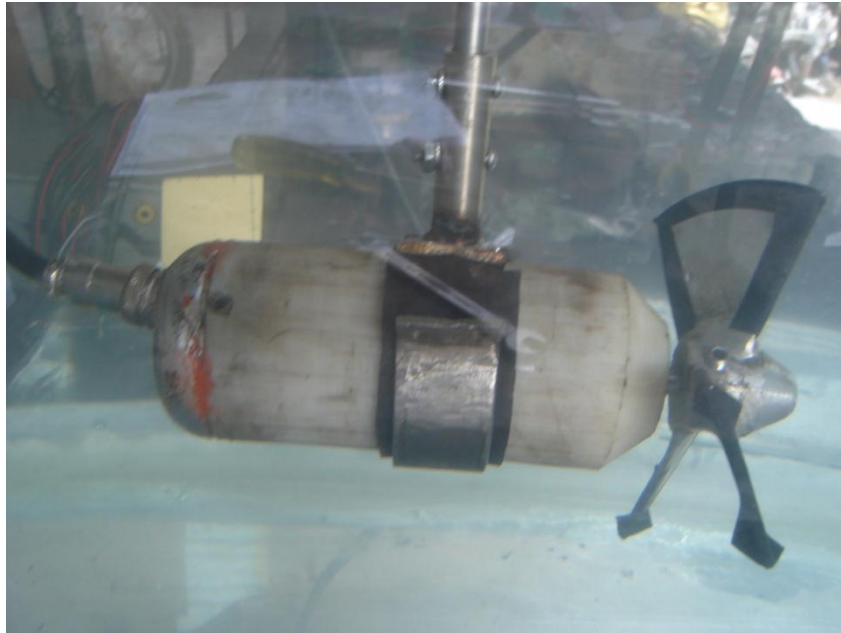
- Para obtener el modulo de flotabilidad se debe calcular el peso del vehículo dentro del agua.
- El espesor de lámina no es el adecuado para la resistencia y durabilidad del equipo.
- El método de acople entre el motor y la hélice no es seguro para la fiabilidad del mismo.

8.3. PRUEBAS SUBSISTEMAS

Prueba del primer propulsor (encapsulado polietileno): Se lleva a cabo la prueba inicial del propulsor planteado como solución en la etapa de diseño, con una configuración moto-reductor 4:1, hélice 90mm de diámetro y 140 de paso. Un encapsulado de polietileno y la obtención de sellado mediante oring en el eje de

salida y mediante un conector modificado para impedir el ingreso de agua en el motor.

Figura 114. Pruebas sobre el primer impulsor.

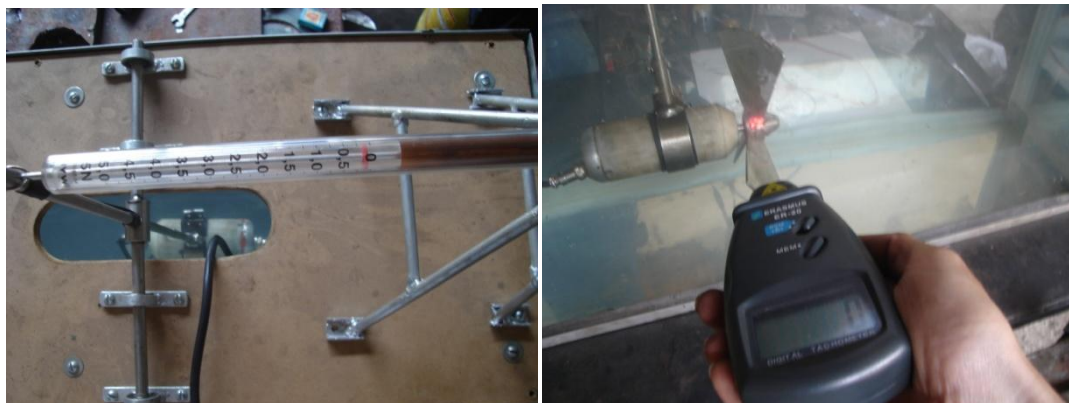


Fuente: Autores

En la figura 98 se observa un dinamómetro el cual se empleo para saber el empuje del impulsor, posteriormente el dinamómetro se reemplazo con una celda de carga para obtener datos más precisos. También con el Tacómetro generador de RPM's se pudo medir la velocidad del impulsor.

Con la primera experiencia se obtuvo la necesidad de manejar corrientes desde los 2 a los 9 amperios aproximadamente, se re-selecciono el conjunto motor-reductor-hélice después de dicha experiencia, ya que el comportamiento del impulsor no arrojó las condiciones de propulsión requeridas y el consumo de corriente era muy alto.

Figura 115. Dinamómetro y Tacómetro generador de RPM's



Fuente: Autores

PRUEBA No. 1

PRUEBAS EN AIRE

A través de control PWM, se hace variar la velocidad angular del propulsor.

Especificaciones de la prueba: *Motor de 4800 RPM a 12V*

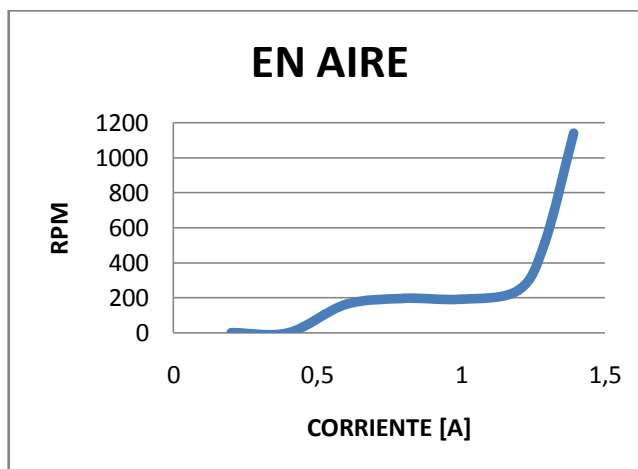
Fuente de poder de 12V [3A – 5A]

Reductor 4:1

Diámetro de la hélice: 18 Cm.

Figura 116. Primera prueba condiciones impulsor.

Corriente [A]	RPM
0,2	0
0,4	0
0,6	161,7
0,8	197
1	192
1,2	244,8



Fuente: Autores

Después de realizar esta prueba al impulsor en aire, se procede a introducirlo en el agua, y se obtiene: 2,63 [A] y 155 RPM.

Por lo tanto el deslizamiento D es:

$$D = 1141 \text{ RPM} - 155 \text{ RPM} = 986 \text{ RPM}$$

Este deslizamiento es debido al bajo torque que presenta el impulsor en la hélice.

PRUEBA No. 2

Especificaciones de la prueba: *Motor de 19300 RPM a 12V*

Fuente de poder de 12V [3A – 5A]

Reductor 20:1

Diámetro de la hélice: 18 Cm.

PRUEBA EN AIRE	PRUEBA EN AGUA
776 RPM	177 RPM
2,55 [A]	4,36 [A]

Por lo tanto el Deslizamiento D es:

$$D = 776 \text{ RPM} - 177 \text{ RPM} = 599 \text{ RPM}$$

PRUEBA No. 3

Variación de la fuente de poder e influencia del Voltímetro.

- FUENTE 12 [V]

	EN AIRE		EN AGUA		
	RPM	CORRIENTE [A]	RPM	CORRIENTE [A]	EMPUJE [Kgf]
Con tester	826	2,7	248	5,3	1,5
Sin tester	980		186		1,25

- BATERIA DE AUTOMOVIL 12 [V]

	EN AIRE		EN AGUA		
	RPM	CORRIENTE [A]	RPM	CORRIENTE [A]	EMPUJE [Kgf]
Con tester	723	2,20	321	6,11	1,5
Sin tester	921		408		4,5

- FUENTE 15 [V]

	EN AIRE		EN AGUA		
	RPM	CORRIENTE [A]	RPM	CORRIENTE [A]	EMPUJE [Kgf]
Con tester	780	2,24	385	5,15	1,5
Sin tester	910		484		2,5

PRUEBA No. 4

Variación del diámetro de la hélice.

Especificaciones de la prueba: *Motor de 19300 RPM a 12V*

Fuente de poder de 12V [3A – 5A]

Reductor 20:1

Diámetro de la hélice: 18 Cm.

Kt = 5,7 mN-m/A (Dato suministrado por fabricante de motor)

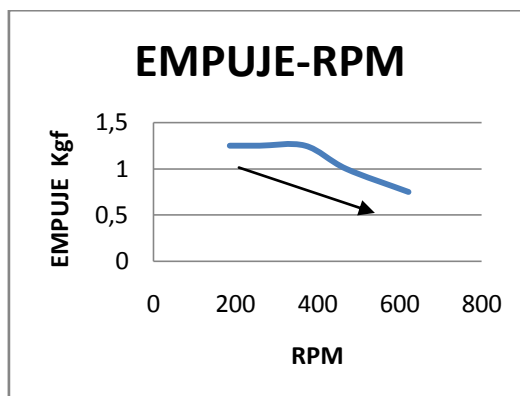
Tabla 16. Variación del diámetro de la hélice.

DIAMETRO [Cm.]	RPM EN AGUA	DESLIZAMIENTO [RPM]	EMPUJE [Kgf]	CORRIENTE [A]	POTENCIA EN EL MOTOR [W]	TORQUE EN LA HELICE [N-m]	POTENCIA EN LA HELICE [W]
18	186	779	1,25	5,3	68,9	0,604	11,77
16	259	706	1,25	4,8	62,4	0,547	14,84
14	370	595	1,25	4,8	62,4	0,547	21,20
12	470	495	1	4,4	57,2	0,502	24,69
10	622	343	0,75	4	52	0,456	29,7
8	706	258	0,725	3,8	49,4	0,433	32,04
6	814	150	0,6	3,52	45,76	0,401	34,23
4	922	42	0,475	3,24	42,12	0,369	35,70

Fuente: Autores

Se seleccionó la hélice de 10cm por brindar los mejores requerimientos de empuje y consumo de corriente.

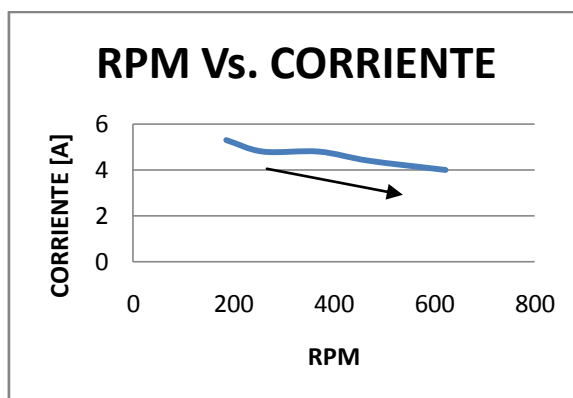
Figura 117. Según variación diámetro de hélice.



Fuente: Autores

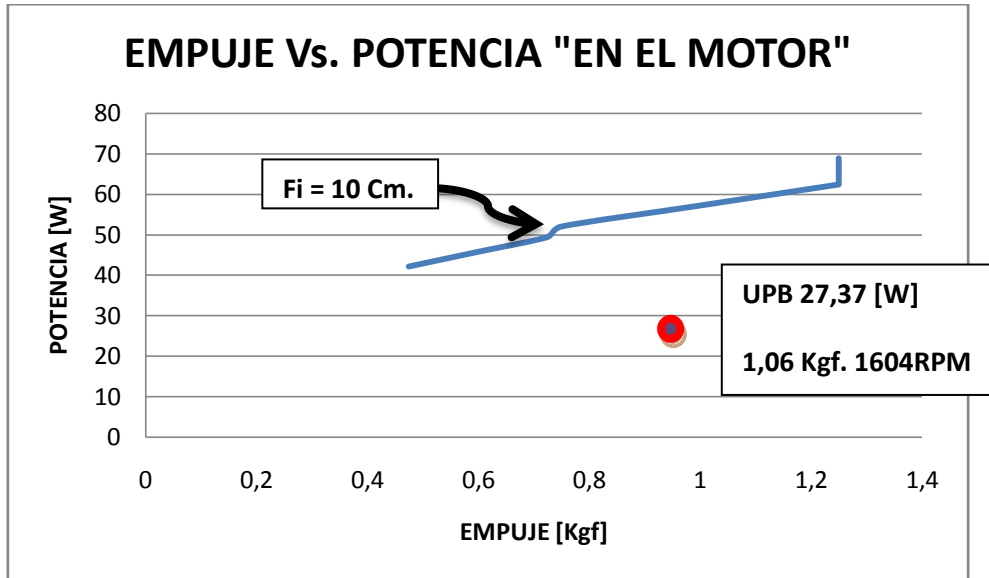
La flecha indica el sentido de la disminución del diámetro de la hélice.

Figura 118. En función del diámetro de la hélice.



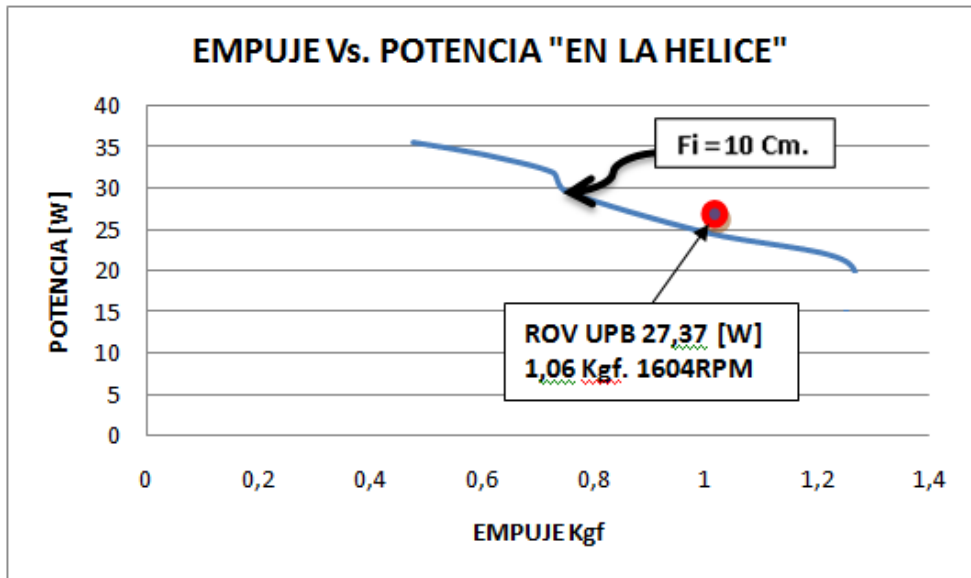
Fuente: Autores

Figura 119. Comparado con propulsor de UPB



Fuente: Autores

Figura 120. Pérdida de potencia entregada por el motor.



Fuente: Autores

Comentarios y resultados de la prueba:

- Después de la verificación visual de la condición de estanqueidad del propulsor se encontró que el mecanismo de sellado era ineficiente en la sección posterior del propulsor debido a que el material presentaba grandes deformaciones que propiciaban penetración de agua al motor, deteriorando la función del o-ring principal.
- El conector implementado para acoplar la línea de alimentación fue insuficiente para cumplir con el objetivo de sellar las líneas de alimentación y a la vez proveer al dispositivo de un mecanismo de conexión-desconexión práctico.
- Se apreció la necesidad de añadir la boquilla kort para ganar un poco de velocidad en el equipo.
- El encapsulado del conjunto moto-reductor no fue el conveniente, debido a que no permitía disipar el calor.
- Se realizaron curvas de Empuje Vs RPM, se hizo la respectiva comparación con otros trabajos y se decidió realizar el cambio del conjunto moto-reductor.

Prueba del segundo propulsor (encapsulado en aluminio): Después de hacer una buena selección en base a las experiencias precedentes se puso a punto el impulsor a utilizar, con condiciones de hermeticidad, corriente, velocidad y torque deseado.

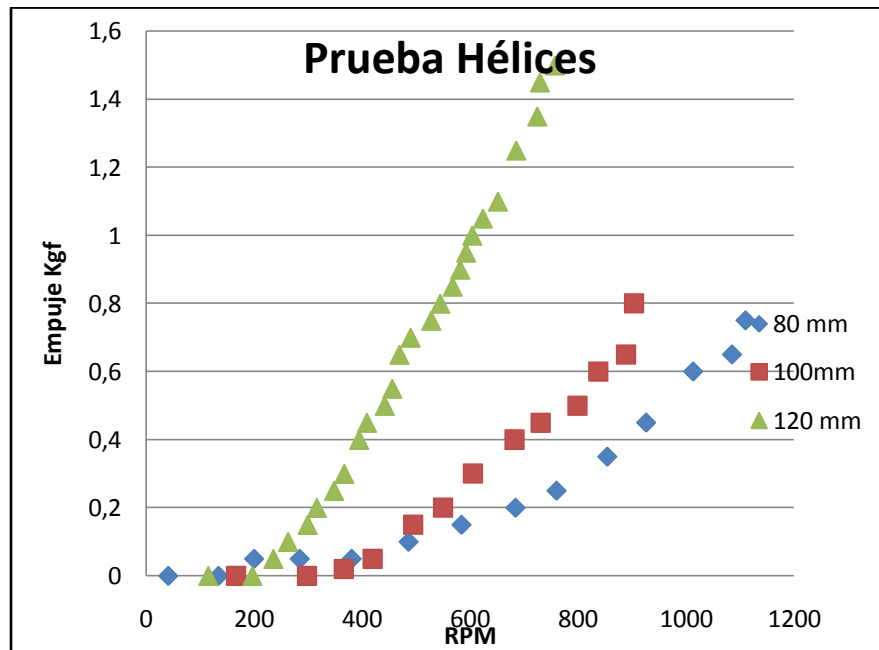
Figura 121. Impulsor optimo.



Fuente: Autores

Se realizaron pruebas con hélices de diámetros diferentes 80, 100 y 120 mm. Para cada caso se evaluó la corriente consumida, el empuje obtenido y las RPM's máximas. Con la ayuda de un control proporcional, se evaluaron las condiciones cada 200RPM's. El control proporcional permitió variar la velocidad del propulsor, la sensibilidad dada por un potenciómetro fue suficiente para llevar a cabo esta prueba final sobre el propulsor, las conclusiones se pueden apreciar en la siguiente figura:

Figura 122. Hélices de 80, 100 y 120 mm



Fuente: Autores

- Ecuación para curva, cuya hélice es de 80mm:

$$y = 8E-07x^2 - 0,0001x + 0,044$$

$$R^2 = 0,99$$

- Ecuación para curva, cuya hélice es de 100mm:

$$y = 1E-06x^2 - 0,0001x - 0,003$$

$$R^2 = 0,983$$

- Ecuación para curva, cuya hélice es de 120mm:

$$y = 2E-06x^2 + 0,0001x - 0,176$$

$$R^2 = 0,994$$

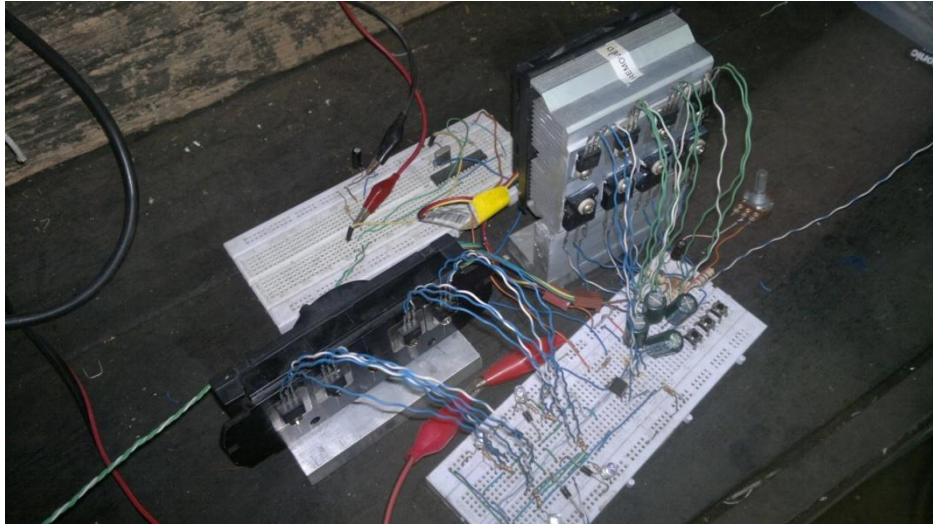
Comentarios y resultados de la prueba:

- La hélice de 100 mm de diámetro se ajusta mejor a los requerimientos, considerando también el consumo de corriente.
- El encapsulado del motor totalmente en aluminio permite disipar el calor, además de proporcionar mejor hermeticidad.
- La corriente que requiere cada motor es de 7 [A], el equipo utiliza 5 motores, lo cual requiere 35[A] para obtener los 4 grados de libertad. La fuente de poder tiene disponibilidad para más de 35 [A].
- Las características de este propulsor, propiciaron la puesta a punto la hélice del propulsor del proyecto, debido a que diseños precedentes de este elemento, presentaban inconvenientes como: exceso de masa, de volumen.

8.3.1. PRUEBAS AL SISTEMA DE CONTROL EXPERIMENTAL

El sistema de control implementado es comandado por el micro-controlador PIC 16F876 con control proporcional. Adicional a esta etapa de control se implemento una etapa de potencia que entregara las ratas de alimentación y potencia necesarias para obtener las mejores prestaciones del moto-reductor además de un puente H con mosfets para la inversión de giro, todos estos circuitos montados en protoboard.

Figura 123. Sistema de control implementado.



Fuente: Autores

Comentarios y resultados de la prueba:

- Fue necesario una recopilación bibliográfica y de experiencias rescatada por estudiantes de la UIS, para la implementación de los transistores MOSFET en el puente H del equipo.
- El reducido espacio planteado en el diseño conceptual del recinto electrónico, fue una restricción para la selección de los componentes que hacen parte del sistema de control final.
- Fue necesario implementar un método de enfriamiento eficiente para cada uno de los transistores, en especial para aquellos que se encontraban en la etapa de regulación de potencia, los cuales debían soportar la totalidad de la potencia eléctrica demandada por el equipo.

8.3.2. PRUEBA DE SELLADO

Debido a la ausencia de cámara hiperbarica, se utilizó un compresor para llevar a cabo una prueba hidrostática que brindara a nivel cualitativo la efectividad del sellado. Aunque la prueba no es una representación exacta de las condiciones en

su ambiente de operación, fue definitiva en la identificación de errores en el sello implementado para el recinto electrónico.

Procedimiento: Se procedió a instalar las líneas que ingresan al recinto electrónico con sus respectivos o-rings, como son: líneas de alimentación de los propulsores y dispositivos periféricos (cámaras y luces). Se sello el recinto por medio de tornillos a lo largo del perímetro de la figura formada por el recinto. Por la entrada de la línea umbilical se introdujo la línea de aire desde el compresor.

La presión a la cual se llevo el recinto electrónico no supero los 50 psi ya que esta era la presión de diseño a los 20m de profundidad planteados como objetivo, no se contempló un diseño más robusto debido al incremento de peso y al espacio disponible en la estructura del vehículo, ya que esto afecta la dinámica del mismo.

Figura 124. Montaje de prueba hidrostática.



Fuente: Autores

Comentarios y resultados de la prueba:

- Debido a las restricciones de peso que están vinculadas a las características de un ROV tipo observación, el desarrollo del recinto

electrónico del equipo, se diseñó al límite de las necesidades demandadas para la profundidad de diseño, es decir, 50 PSI.

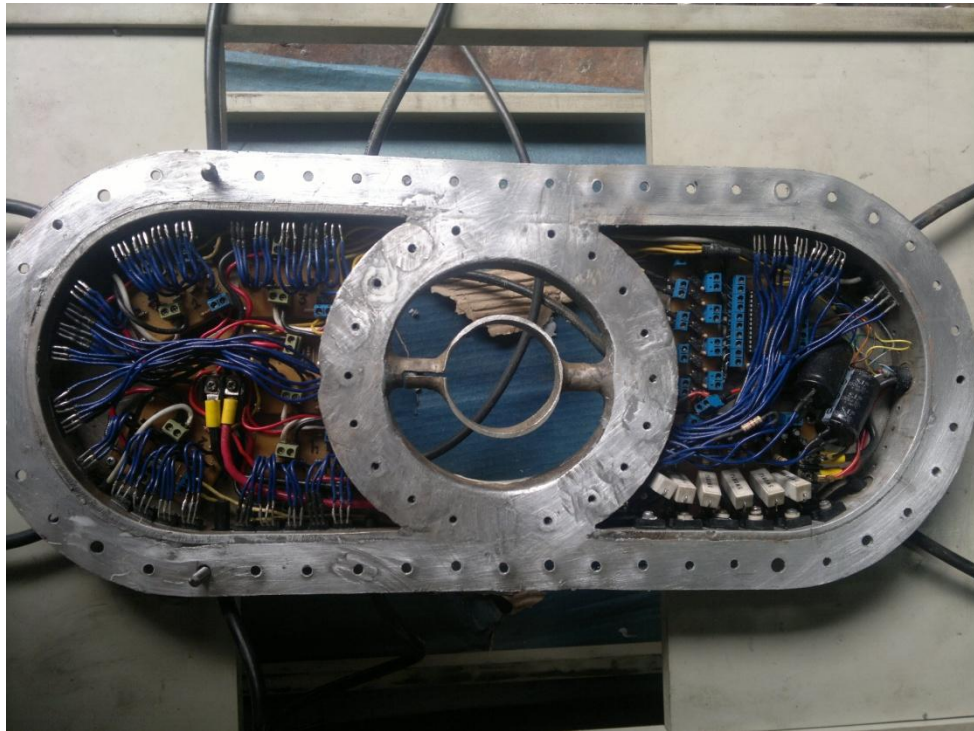
- Debido a la distancia entre pernos, el sello en las condiciones iniciales de la prueba, fue ineficiente, presentando fugas en el punto medio de la distancia entre pernos. Por lo tanto se procedió a duplicar la cantidad de pernos existentes, para un mejor sellado.
- La rigidez del empaque de la primera prueba, impidió el correcto asentamiento entre las dos superficies de sellado, propiciando fugas. Dicho empaque fue reemplazado por uno más flexible, el cual mejoro el sellado.
- Durante la prueba se observo que el sello, por medio de o-rings implementados para las líneas que provienen de los propulsores y se acoplan al recinto electrónico, soporto de manera eficiente la presión de 50 PSI a la cual fue sometido el recinto electrónico.
- La no implementación de un proceso de manufactura acorde con las necesidades de estanqueidad,existentes en un ambiente presurizado como el que representa la inmersión de un cuerpo en un fluido, conducen a la generación de filtraciones que ponen en peligro la integridad del sistema de control.
- Después del desarrollo y puesta a punto del propulsor del proyecto, se pudo corroborar la eficiencia del sellado por medio de o-rings, al inspeccionar la ausencia de filtraciones de agua.

8.3.3. PUESTA A PUNTO DEL SISTEMA DE CONTROL GLOBAL

Después de haberimplementado el sistema de control para un propulsor, se llevó a cabo el acople de los 5 puentes H,a las respectivas señales de salida del microcontrolador, utilizado para los accionamientos necesarios en la ejecución de los grados de libertad. Esta tarea demandó la generación de un nuevo código con el cual se obtuvo, 10 señales de salida para llevar a cabo la inversión de giro de

cada uno de los motores, además de una señal adicional para generar el PWM que dotará al equipo de un control proporcional.

Figura 125. Recinto electrónico.



Fuente: Autores

Para llevar a cabo el control del ROV desde superficie fue necesario armar un joystick con elementos del mercado local, que proporcionaran buena sensibilidad al momento de maniobrar el vehículo.

Para el desarrollo del Joystick se tuvieron en cuenta múltiples opciones, primero la implementación de joystick de computador y segundo, joystick de control de Play Station, que mostraron ser ineficientes debido a la poca sensibilidad que podían entregar al momento de generar una señal proporcional en el equipo, por esta razón, surgió la necesidad de generar un control a base de potenciómetros comunes, aunque tampoco entregan la sensibilidad de un joystick de gama alta, fue un elemento fiable y económico.

Figura 126. Tipos de mandos para el control.



Fuente: Autores

A partir de este punto fue necesario incorporar al esquema de control, la línea umbilical con la longitud final de 50m, para confirmar el correcto funcionamiento y el transporte de cada una de las señales de control y potencia de alimentación del equipo. El cable umbilical está conformado por dos líneas de potencia calibre 10AWG y 11 líneas de cable UTP, estas líneas se introdujeron en manguera de neopreno de 3/8", tal como se muestra en la siguiente figura.

Figura 127. Cable Umbilical.



Fuente: Autores

La caída de voltaje a través de la línea umbilical no fue relevante, lo cual se vio reflejado en el correcto funcionamiento del equipo.

Comentarios y resultados de la prueba:

- Debido a los “voltajes de apertura” de los elementos electrónicos utilizados en la etapa de control, el equipo de trabajo se vio en la necesidad de realizar una búsqueda de los elementos disponibles en el mercado y los posibles dispositivos de acople entre las etapas de control y potencia, que permitieran llevar a cabo el control del equipo, concluyendo que los optoacopladores PC621 son la mejor alternativa para los requerimientos.
- La puesta a punto del sistema de control, demandó un cuidadoso montaje de cada uno de los transistores, ubicados en la superficie del recinto electrónico debido a que voltajes transmitidos hacia el cuerpo del mismo, llevaban a pruebas de control erradas y elementos quemados.

- Debido a las restringidas características de los joystick encontrados en el mercado local, para el equipo se vio en la necesidad de implementar un joystick a base de potenciómetros con una configuración particular.
- Las variaciones de las condiciones de alimentación propias de la longitud de la línea umbilical a implementar, demandaron una etapa adicional de regulación de potencia en el recinto electrónico para asegurar condiciones de alimentación adecuadas en los subsistemas del equipo.

8.4. PRUEBAS PRELIMINARES

Montaje: Después de desarrollar cada uno de los subsistemas primarios como son: sistema de propulsión y sistema de control, se manufactura el marco del equipo junto con los demás elementos de acople para cada uno de los dispositivos involucrados en la integridad del prototipo. Se procede a realizar el montaje de cada una de las piezas.

Teniendo la configuración estructural ensamblada, se llevó a cabo una inmersión del equipo para corroborar hermeticidad y funcionamiento de los motores.

Figura 128. Prueba de hermeticidad y encendido de motores.

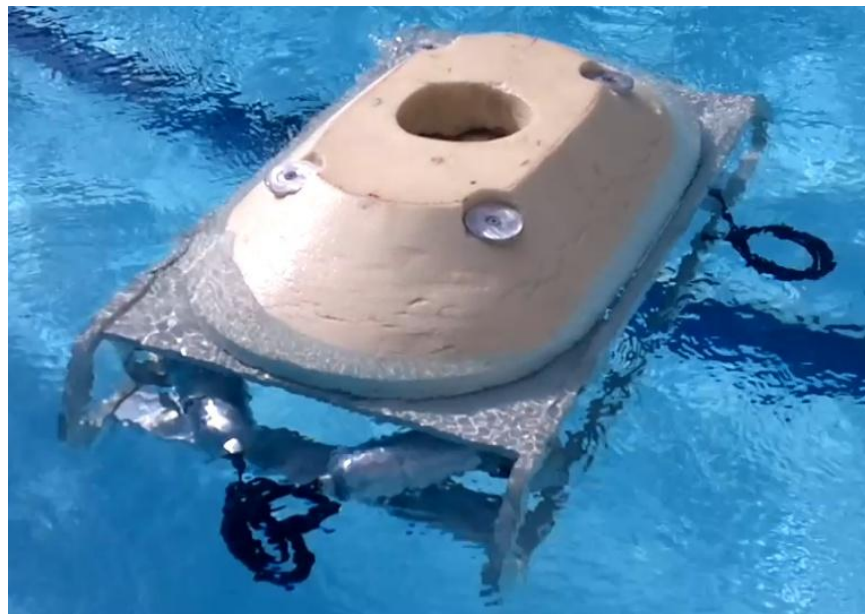


Fuente: Autores

Finalmente se acopla el modulo de flotabilidad para someter al equipo a su primera prueba de estabilidad, la cual consiste en analizar cualitativamente el comportamiento del equipo frente a perturbaciones externas y observar la respuesta del mismo. También se observa el grado de flotabilidad adquirido por el ROV, el cual deberá ser aproximado a la condición de flotabilidad neutra-positiva deseada en el equipo.

Después se incorporó el modulo de flotabilidad cuyo diseño hidrodinámico minimiza la fuerza de arrastre:

Figura 129. Flotabilidad Neutra-positiva.



Fuente: Autores

Comentarios y resultados de la prueba:

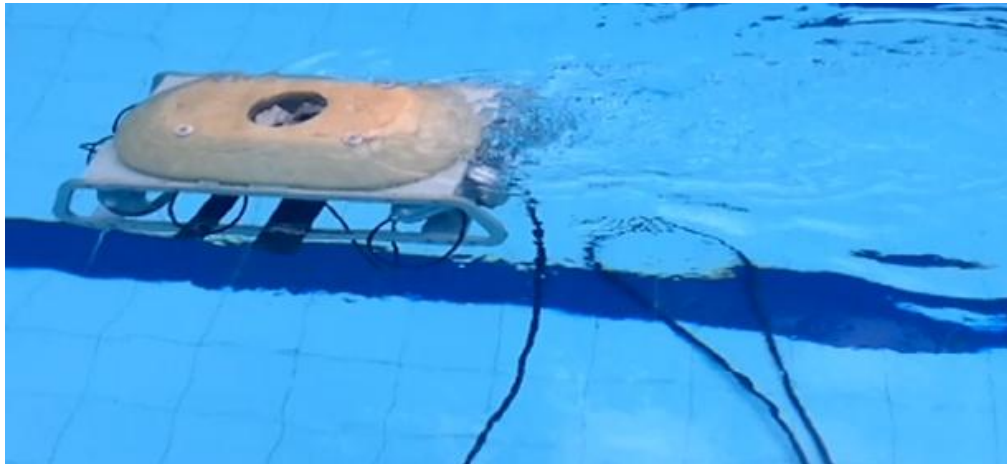
- Los motores funcionaron correctamente. Simplemente se realizó pruebas de encendido y apagado.
- Después de abrir el recinto electrónico, se comprobó que el sello totalmente hermético impidió el ingreso de agua a dicho recinto.
- La simetría de todos los elementos que conforman el equipo, permite que el mismo sea estable. El equilibrio estático es correcto.

- Después de la puesta a punto del modulo de flotabilidad se obtuvo la flotabilidad neutra-positiva deseada en el vehículo, es decir, tiende a ascender a la superficie a una velocidad baja.

8.4.1. PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO 1

Esta prueba se inicio con el funcionamiento ininterrumpido del equipo por más de una hora, con sus funciones habilitadas. Durante este tiempo se buscó detectar los posibles fallos durante un periodo de operación continua. Después de esto se procedió a introducir el equipo en el fluido y cumplir los objetivos que competen a dicha prueba.

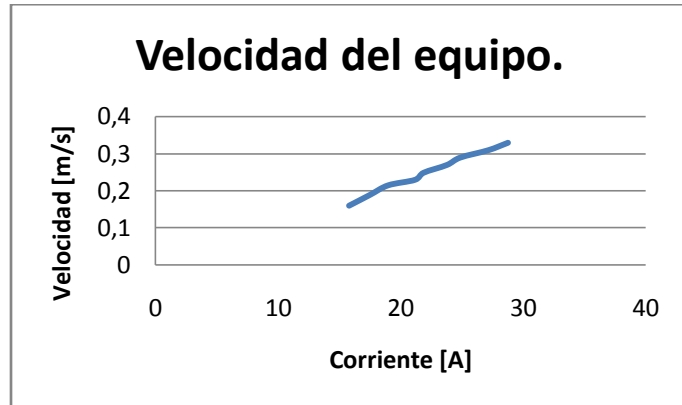
Figura 130. Prueba de control.



Fuente: Autores

Figura 131. Velocidad del equipo.

Corriente [A]	Velocidad [m/s]
15,8	0,16
17,5	0,189
19	0,215
21,2	0,23
21,9	0,249
23,8	0,27
24,9	0,29
27,2	0,31
28,8	0,33



Fuente: Autores

Figura 132. Fuente de poder del ROV



Fuente: Autores

Comentarios y resultados de la prueba:

- Aunque la forma y dimensiones del modulo de flotabilidad corresponden a la extraída del capítulo de diseño hidrodinámico, la condición de flotabilidad positiva observada en el equipo es muy alta, superando notoriamente el 3% del volumen del equipo, planteado como condición ideal en la bibliografía. Se hace necesario modificar el tamaño del modulo flotabilidad, respetando su forma para contrarrestar el exceso de flotabilidad positiva, este

comportamiento es atribuible a la fabricación artesanal de la cual fue objeto la espuma de poliuretano utilizada en el modulo que podría no ser homogenea

- Durante el desplazamiento longitudinal en el equipo se precipito a fondo lentamente lo cual diagnostica la existencia de una componente de sustentación inversa que empuja al prototipo al fondo impidiendo el alcanzar una posición definida. Durante la obtención del movimiento transversal se observo un ligero pivoteo en la línea umbilical que impidió un desplazamiento paralelo a la línea longitudinal que divide al prototipo, además este fenómeno se genero debido a la falta de simetría del perfil del prototipo durante la generación del movimiento. Durante la generación del movimiento de rotación, el prototipo presento un movimiento con el más alto manejo de potencia y control, esto se debe a la simetría de la propulsión y a la obtención de la colinealidad del centro de flotabilidad y gravedad, tal como se planteó durante el análisis de distribución de carga. Durante la generación del movimiento vertical el equipo mostro estabilidad con un desplazamiento vertical limpio.
- Se hace necesario para contrarrestar el efecto de la línea umbilical de la dinámica del equipo, acoplar boyas a lo largo del umbilical para dotarlo de flotabilidad neutra, que interfieran con menor impacto en la dinámica del equipo.

8.5. PRUEBA FINAL

Esta última prueba se llevo a cabo con el equipo completo y a punto con todos los propulsores listos y ubicados, la línea umbilical lista y acoplada, el modulo de flotabilidad con las dimensiones demandadas para la generación de los grados de libertad planteados y el sistema electrónico a salvo de la penetración del agua del medio.

Antes de llevar a cabo la inmersión al fluido se corroboró el perfecto funcionamiento del sistema de control implementado y se confirmó la correcta ejecución de los actuadores para la obtención de los grados de libertad, de forma controlada, es decir, con un control proporcional a la señal entregada por el joystick.

Figura 133. ROV final.



Fuente: Autores

El peso total del vehículo alcanzó los 19 kg y la fuerza de flotabilidad extraída de la medición directa llevada a cabo en el equipo durante las pruebas fue de 0,3 kg valor se encuentra en el rango esperados de 3% de flotabilidad positiva, además los empujes extraídos de la medición directa para cada uno de sus grados de libertad fueron:

Comentarios y resultados de la prueba:

- Al introducir el equipo en la piscina se mantuvo el control y se obtuvieron exitosamente los grados de libertad planteado como objetivo de la tesis es decir el movimiento en los ejes longitudinales transversal vertical y la rotación con respecto al eje vertical.

- El equipo es estable, se observó cualitativamente, y se cumple el principio de estabilidad gracias al centro de gravedad ubicado debajo del centro de flotabilidad, además de ser colineales.

9. CONCLUSIONES

- Se diseño y construyo la configuración mecánico estructural de un equipo operado remotamente subacuático, labor en la que se incluye el diseño y construcción de cada uno de sus subsistemas como son: marco, modulo de flotabilidad, propulsores y recinto electrónico, haciendo uso del software Solidworks y sus paquetes adjuntos cosmosxpress y cosmofloworks como herramientas CAD, CAE y CFD respectivamente, con las cuales se llevaron a cabo análisis de distribución de cargas en la estructura del equipo para poder ubicar el centro de gravedad, resistencia de materiales para obtener una medida de la capacidad de los componentes de resistir la presión de agua a la profundidad de diseño 20m, análisis CFD para obtener el diseño hidrodinámico más eficiente al momento de contrarrestar el arrastre durante un desplazamiento y finalmente para el modelado de la totalidad del equipo que permitió un diseño vistoso y compacto antes de la etapa de construcción.
- La selección de los materiales a utilizar se basó en un minucioso estudio del estado del arte y los equipos construidos alrededor del mundo finalmente las posibilidades encontradas en el mercado local fueron consideraciones relevantes al momento de seleccionar los materiales finales.
- Para la construcción del impulsor, el primer paso fue seleccionar el conjunto moto-reductor, basado en tablas de selección. Posteriormente se encapsuló el conjunto moto-reductor, se diseño y construyo la hélice, la boquilla kort. Se realizaron diversas pruebas sobre el impulsor. Se obtuvieron las condiciones requeridas de velocidad, torque, empuje y consumo de corriente.
- El diseño mecánico-estructural es adecuado para soportar 20m. de profundidad, el marco de polipropileno evita entre otras cosas la oxidación del equipo, su resistencia lo hace durable.

- La hidrodinámica y la simetría hacen del equipo un equipo estable, se puede apreciar su comportamiento en una piscina, las pequeñas olas que perturban el equipo no afectan la estabilidad y sigue siendo maniobrable. Por otro lado, el diseño hidrodinámico redujo considerablemente la fuerza de arrastre y a su vez la potencia requerida.
- Con la ayuda de la herramienta computacional CFD de Solidworks, se analizaron los parámetros físicos y fenómenos que encierran el modelado, de un ROV en dinámica de fluidos con flujo unidimensional, observando los frentes de presión a que está sometido el ROV, en todos los ejes. Se optimizó el diseño hidrodinámico hasta llegar al modelo final.
- Fue posible construir un ROV a escala 1:1, el cual permitió analizar los aspectos de diseño tales como la flotabilidad neutra-positiva del equipo, el equipo presenta estabilidad al tener el centro de gravedad por debajo del centro de flotación. Queda el ROV como plataforma de investigación tanto para la UIS como para el ICP.
- El polipropileno utilizado para el marco del ROV, se mecanizó con la fresadora CNC de la Escuela de Ingeniería Mecánica, se obtuvo un marco preciso, simétrico y resistente, sus partes se unieron mediante tornillos, se adicionaron elementos de aluminio para dar rigidez a la estructura.
- La utilización de espuma de poliuretano para la creación del módulo de flotabilidad, ilustró toda la industria que existe detrás de este compuesto. Se depositaron los líquidos (isocianatos y polioles) en un recipiente hermético de acero de forma rectangular, al ser reacción exotérmica, se dejó enfriar por un día, al cabo del cual se obtuvo la espuma con la densidad requerida para el módulo de flotabilidad.
- El recinto electrónico de aluminio posee un diseño hidrodinámico, en este recinto se encuentra el conjunto de piezas que ayudan a controlar el ROV, el dispositivo principal y cerebro es el microcontrolador PIC16F876A, otros dispositivos como transistores MOSFET ayudan al manejo de potencia. Los

transistores adheridos a las paredes del recinto disipan su calor, por conducción, a través del mismo recinto.

- El sello hermético de los motores y del recinto electrónico garantizan la ausencia de agua dentro de los mismos, dando fiabilidad y durabilidad al ROV.
- El cable umbilical de 50m. permite al equipo una inmersión de 20m. y la posibilidad de navegar a esta profundidad. A través de este cable umbilical se envían líneas de potencia y líneas de control. Los cables están sellados con manguera elástica, la cual impermeabiliza y da flexibilidad al umbilical.
- El estudio cualitativo dentro de la piscina muestra un equipo maniobrable, estable, con capacidad para soportar la presión de diseño, se desplaza a una velocidad considerable

10. RECOMENDACIONES

- En el presente trabajo de grado se presentó el diseño mecánico estructural de un equipo operado remotamente diseñado para una profundidad de 20 m y la construcción del prototipo a escala del diseño planteado como solución, aunque el equipo obtuvo los grados de libertad básicos necesarios para llevar a cabo un desplazamiento subacuático con una electrónica básica se hace necesario un equipo interdisciplinar que integre un profesional en electrónica, para implementar una electrónica sensorial sofisticada completa que mejore su dinámica y control.
- Se recomienda para futuros proyectos el diseño de mecanismo de sellado mucho más práctico que el implementado en este proyecto para el sellado del recinto electrónico ya que lo complejo de su forma hace necesario un procedimiento meticuloso que incrementa la posibilidades de filtraciones de agua.
- Aunque subsistemas como marco, dispositivo de flotabilidad, recinto electrónico y dispositivos de montaje mecánico-estructural y electrónico puede ser manufacturados con base en el mercado local es importante recalcar que la obtención de una dinámica más eficiente ira en la medida que dispositivos como propulsores, línea umbilical o tether y dispositivos de electrónica sensorial sean adquiridos, ya que su alta eficiencia será un factor determinante en la obtención de mejores prestaciones del vehículo.
- Aunque la imagen de video obtenida es buena se recomienda implementar estrategias como cámara de video HD móvil y control de la iluminación para obtener una mejor calidad de video ya que debido a lo complejo del control del equipo este solo debe proporcionar la ubicación de la zona a inspeccionar y el enfoque final debe ser ejecutado desde el sistema de video.

BIBLIOGRAFIA

ANTONELLI Gianluca. Underwater Robots Motion and Force Control of Vehicle-Manipulator Systems, Second edition, Springer 2006, 187p.

CHIRST Robert D, WERNLI SR Robert L. The ROV Manual. Saint Louis, Missouri, U.S.A. Butterworth-Heinemann 2007, 328p.

GEER Dave. Propeller handbook. The complete reference for choosing, installing and understanding boat propellers, 1986, 112p.

GEORGE Last , PAUL Williams. An Introduction to ROV Operations. Oilfield Publications Ltd; Primera Edición (November 1995). 300 p.

MALVINO Albert Paul, Principios de electrónica, sexta edición, McGrawHill 1999.

MOTT Robert L. Diseño de elementos de máquinas, cuarta edición, Prentice Hall 2007, 433p.

MOTT Robert L. Mecánica de fluidos, sexta edición, Prentice Hall 2006, 422p.

ANEXOS

ANEXO A. DATASHEET MICROCONTROLADOR



PIC16F87XA

28/40/44-Pin Enhanced Flash Microcontrollers

Devices Included in this Data Sheet:

- PIC16F873A
- PIC16F874A
- PIC16F876A
- PIC16F877A

High-Performance RISC CPU:

- Only 35 single-word instructions to learn
- All single-cycle instructions except for program branches, which are two-cycle
- Operating speed: DC – 20 MHz clock input
DC – 200 ns instruction cycle
- Up to 8K x 14 words of Flash Program Memory, Up to 368 x 8 bytes of Data Memory (RAM), Up to 256 x 8 bytes of EEPROM Data Memory
- Pinout compatible to other 28-pin or 40/44-pin PIC16CXXX and PIC16FXXX microcontrollers

Peripheral Features:

- Timer0: 8-bit timer/counter with 8-bit prescaler
- Timer1: 16-bit timer/counter with prescaler, can be incremented during Sleep via external crystal/clock
- Timer2: 8-bit timer/counter with 8-bit period register, prescaler and postscaler
- Two Capture, Compare, PWM modules
 - Capture is 16-bit, max. resolution is 12.5 ns
 - Compare is 16-bit, max. resolution is 200 ns
 - PWM max. resolution is 10-bit
- Synchronous Serial Port (SSP) with SPI™ (Master mode) and I²C™ (Master/Slave)
- Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter (USART/SCI) with 9-bit address detection
- Parallel Slave Port (PSP) – 8 bits wide with external RD, WR and CS controls (40/44-pin only)
- Brown-out detection circuitry for Brown-out Reset (BOR)

Analog Features:

- 10-bit, up to 8-channel Analog-to-Digital Converter (A/D)
- Brown-out Reset (BOR)
- Analog Comparator module with:
 - Two analog comparators
 - Programmable on-chip voltage reference (VREF) module
 - Programmable input multiplexing from device inputs and internal voltage reference
 - Comparator outputs are externally accessible

Special Microcontroller Features:

- 100,000 erase/write cycle Enhanced Flash program memory typical
- 1,000,000 erase/write cycle Data EEPROM memory typical
- Data EEPROM Retention > 40 years
- Self-reprogrammable under software control
- In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™) via two pins
- Single-supply 5V In-Circuit Serial Programming
- Watchdog Timer (WDT) with its own on-chip RC oscillator for reliable operation
- Programmable code protection
- Power saving Sleep mode
- Selectable oscillator options
- In-Circuit Debug (ICD) via two pins

CMOS Technology:

- Low-power, high-speed Flash/EEPROM technology
- Fully static design
- Wide operating voltage range (2.0V to 5.5V)
- Commercial and industrial temperature ranges
- Low-power consumption

Device	Program Memory		Data SRAM (Bytes)	EEPROM (Bytes)	I/O	10-bit A/D (ch)	CCP (PWM)	MSSP		USART	Timers 8/16-bit	Comparators
	Bytes	# Single Word Instructions						SPI	Master I ² C			
PIC16F873A	7.2K	4096	192	128	22	5	2	Yes	Yes	Yes	2/1	2
PIC16F874A	7.2K	4096	192	128	33	8	2	Yes	Yes	Yes	2/1	2
PIC16F876A	14.3K	8192	388	258	22	5	2	Yes	Yes	Yes	2/1	2
PIC16F877A	14.3K	8192	388	258	33	8	2	Yes	Yes	Yes	2/1	2

PIC16F87XA

1.0 DEVICE OVERVIEW

This document contains device specific information about the following devices:

- PIC16F873A
- PIC16F874A
- PIC16F876A
- PIC16F877A

PIC16F873A/876A devices are available only in 28-pin packages, while PIC16F874A/877A devices are available in 40-pin and 44-pin packages. All devices in the PIC16F87XA family share common architecture with the following differences:

- The PIC16F873A and PIC16F874A have one-half of the total on-chip memory of the PIC16F876A and PIC16F877A.
- The 28-pin devices have three I/O ports, while the 40/44-pin devices have five.
- The 28-pin devices have fourteen interrupts, while the 40/44-pin devices have fifteen.
- The 28-pin devices have five A/D input channels, while the 40/44-pin devices have eight.
- The Parallel Slave Port is implemented only on the 40/44-pin devices.

The available features are summarized in Table 1-1. Block diagrams of the PIC16F873A/876A and PIC16F874A/877A devices are provided in Figure 1-1 and Figure 1-2, respectively. The pinouts for these device families are listed in Table 1-2 and Table 1-3.

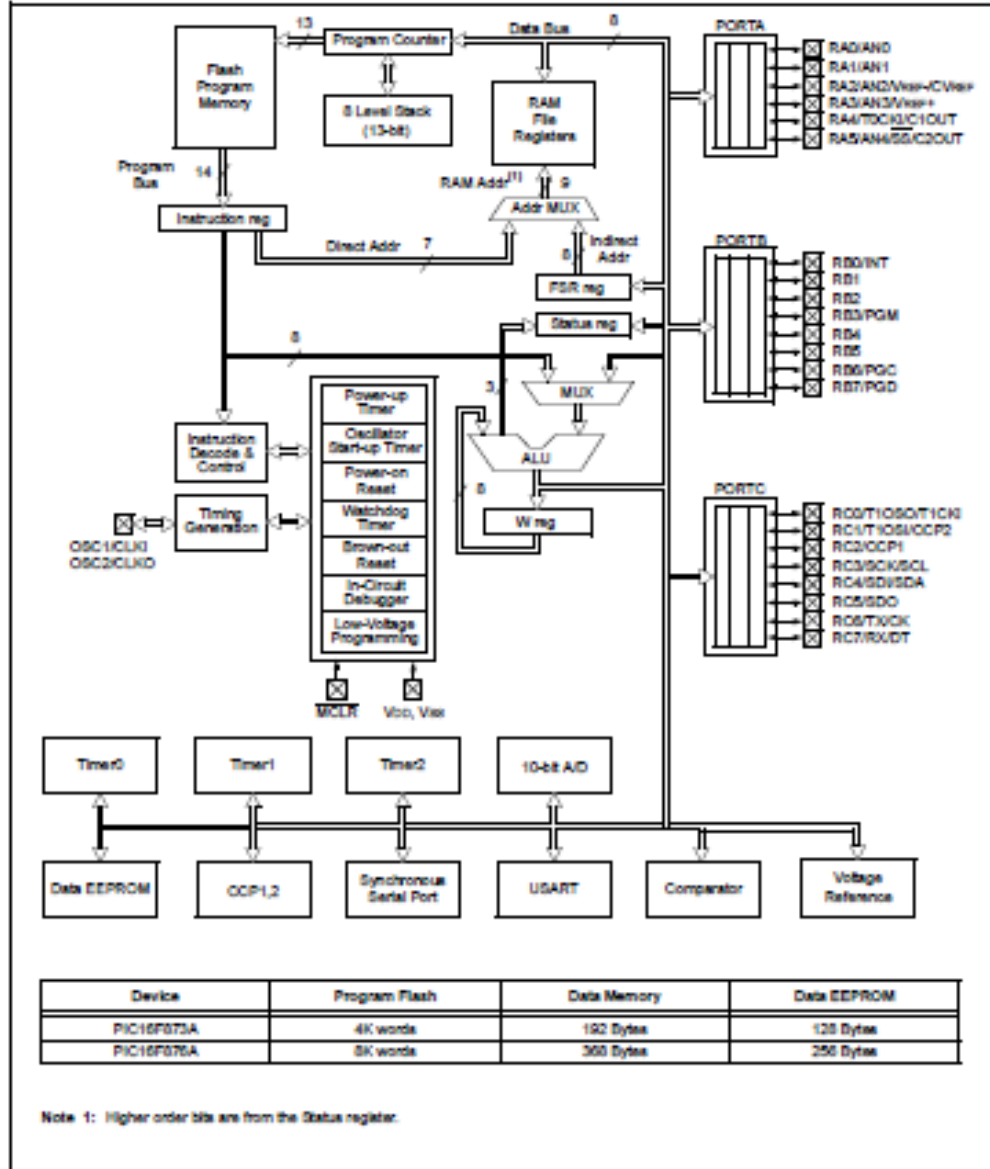
Additional information may be found in the PICmicro[®] Mid-Range Reference Manual (DS33023), which may be obtained from your local Microchip Sales Representative or downloaded from the Microchip web site. The Reference Manual should be considered a complementary document to this data sheet and is highly recommended reading for a better understanding of the device architecture and operation of the peripheral modules.

TABLE 1-1: PIC16F87XA DEVICE FEATURES

Key Features	PIC16F873A	PIC16F874A	PIC16F876A	PIC16F877A
Operating Frequency	DC – 20 MHz	DC – 20 MHz	DC – 20 MHz	DC – 20 MHz
Resets (and Delays)	POR, BOR (PWRT, OST)	POR, BOR (PWRT, OST)	POR, BOR (PWRT, OST)	POR, BOR (PWRT, OST)
Flash Program Memory (14-bit words)	4K	4K	8K	8K
Data Memory (bytes)	192	192	368	368
EEPROM Data Memory (bytes)	128	128	256	256
Interrupts	14	15	14	15
I/O Ports	Ports A, B, C	Ports A, B, C, D, E	Ports A, B, C	Ports A, B, C, D, E
Timers	3	3	3	3
Capture/Compare/PWM modules	2	2	2	2
Serial Communications	MSSP, USART	MSSP, USART	MSSP, USART	MSSP, USART
Parallel Communications	—	PSP	—	PSP
10-bit Analog-to-Digital Module	5 input channels	8 input channels	5 input channels	8 input channels
Analog Comparators	2	2	2	2
Instruction Set	35 instructions	35 instructions	35 instructions	35 instructions
Packages	28-pin PDIP 28-pin SOIC 28-pin SSOP 28-pin QFN	40-pin PDIP 44-pin PLCC 44-pin TQFP 44-pin QFN	28-pin PDIP 28-pin SOIC 28-pin SSOP 28-pin QFN	40-pin PDIP 44-pin PLCC 44-pin TQFP 44-pin QFN

PIC16F87XA

FIGURE 1-1: PIC16F873A/876A BLOCK DIAGRAM



PIC16F87XA

TABLE 1-2: PIC16F873A/876A PINOUT DESCRIPTION

Pin Name	PDIP, SOIC, SSOP Pin#	QFN Pin#	I/O/P Type	Buffer Type	Description
OSC1/CLKI OSC1 CLKI	9	6	I I	ST/CMOS ⁽³⁾	Oscillator crystal or external clock input. Oscillator crystal input or external clock source input. ST buffer when configured in RC mode; otherwise CMOS. External clock source input. Always associated with pin function OSC1 (see OSC1/CLKI, OSC2/CLKO pins).
OSC2/CLKO OSC2 CLKO	10	7	O O	—	Oscillator crystal or clock output. Oscillator crystal output. Connects to crystal or resonator in Crystal Oscillator mode. In RC mode, OSC2 pin outputs CLKO, which has 1/4 the frequency of OSC1 and denotes the instruction cycle rate.
MCLR/Vpp MCLR Vpp	1	26	I P	ST	Master Clear (Input) or programming voltage (output). Master Clear (Reset) input. This pin is an active low Reset to the device. Programming voltage input.
RA0/AN0 RA0 AN0	2	27	I/O I	TTL	PORTA is a bidirectional I/O port. Digital I/O. Analog input 0.
RA1/AN1 RA1 AN1	3	28	I/O I	TTL	
RA2/AN2/Vref- CVref RA2 AN2 Vref- CVref	4	1	I/O I I O	TTL	
RA3/AN3/Vref+ RA3 AN3 Vref+	5	2	I/O I I	TTL	
RA4/T0CKI/C1OUT RA4 T0CKI C1OUT	6	3	I/O I O	ST	
RA5/AN4/SS/C2OUT RA5 AN4 SS C2OUT	7	4	I/O I I O	TTL	
					Digital I/O. Analog input 3. A/D reference voltage (High) input.
					Digital I/O – Open-drain when configured as output. Timer0 external clock input. Comparator 1 output.
					Digital I/O. Analog input 4. SPI slave select input. Comparator 2 output.

Legend: I = input O = output I/O = input/output P = power
— = Not used TTL = TTL Input ST = Schmitt Trigger Input

- Note 1: This buffer is a Schmitt Trigger Input when configured as the external interrupt.
2: This buffer is a Schmitt Trigger Input when used in Serial Programming mode.
3: This buffer is a Schmitt Trigger Input when configured in RC Oscillator mode and a CMOS input otherwise.

ANEXO B. DATASHEET IRF1404

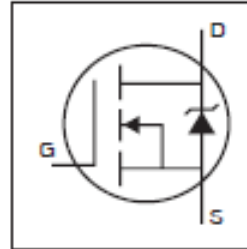
International
IR Rectifier

PD-91896F

IRF1404

HEXFET® Power MOSFET

- Advanced Process Technology
- Ultra Low On-Resistance
- Dynamic dv/dt Rating
- 175°C Operating Temperature
- Fast Switching
- Fully Avalanche Rated
- Automotive Qualified (Q101)

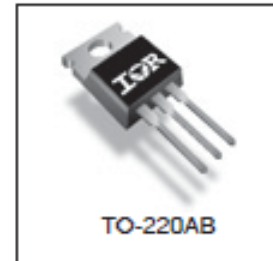


$V_{DS} = 40V$
$R_{DS(on)} = 0.004\Omega$
$I_D = 202A@$

Description

Seventh Generation HEXFET® Power MOSFETs from International Rectifier utilize advanced processing techniques to achieve extremely low on-resistance per silicon area. This benefit, combined with the fast switching speed and ruggedized device design that HEXFET power MOSFETs are well known for, provides the designer with an extremely efficient and reliable device for use in a wide variety of applications including automotive.

The TO-220 package is universally preferred for all automotive-commercial-industrial applications at power dissipation levels to approximately 50 watts. The low thermal resistance and low package cost of the TO-220 contribute to its wide acceptance throughout the industry.



Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
$I_D @ T_C = 25^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10V$	202@	A
$I_D @ T_C = 100^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10V$	143@	
I_{DM}	Pulsed Drain Current @	808	
$P_D @ T_C = 25^\circ C$	Power Dissipation	333	W
	Linear Derating Factor	2.2	W/°C
V_{GS}	Gate-to-Source Voltage	± 20	V
E_{AS}	Single Pulse Avalanche Energy@	620	mJ
I_{AR}	Avalanche Current	See Fig.12a, 12b, 15, 16	A
E_{AR}	Repetitive Avalanche Energy@		mJ
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt @	1.5	V/ns
T_J	Operating Junction and	-55 to +175	°C
T_{STG}	Storage Temperature Range	-55 to +175	
	Soldering Temperature, for 10 seconds	300 (1.6mm from case)	
	Mounting Torque, 6-32 or M3 screw	10 lb-in (1.1N-m)	

Thermal Resistance

	Parameter	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	—	0.45	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	0.50	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	—	62	

www.irf.com

1

11

Electrical Characteristics @ $T_J = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
$V_{(BR)DSS}$	Drain-to-Source Breakdown Voltage	40	—	—	V	$V_{GS} = 0V, I_D = 250\mu A$
$\Delta V_{(BR)DSS}/\Delta T_J$	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.039	—	V/°C	Reference to $25^\circ\text{C}, I_D = 1\text{mA}$
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	0.0035	0.004	Ω	$V_{GS} = 10V, I_D = 121A$ ⓐ
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	2.0	—	4.0	V	$V_{DS} = 10V, I_D = 250\mu A$
g_{fs}	Forward Transconductance	76	—	—	S	$V_{DS} = 25V, I_D = 121A$
I_{DSS}	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	20	μA	$V_{DS} = 40V, V_{GS} = 0V$
		—	—	250		$V_{DS} = 32V, V_{GS} = 0V, T_J = 150^\circ\text{C}$
I_{GSS}	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	200	nA	$V_{DS} = 20V$
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-200		$V_{DS} = -20V$
Q_g	Total Gate Charge	—	131	196	nC	$I_D = 121A$
Q_{gs}	Gate-to-Source Charge	—	36	—		$V_{DS} = 32V$
Q_{gd}	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	37	56		$V_{GS} = 10V$ ⓐ
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	—	17	—	ns	$V_{DS} = 20V$
t_r	Rise Time	—	190	—		$I_D = 121A$
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	46	—		$R_G = 2.5\Omega$
t_f	Fall Time	—	33	—		$R_D = 0.2\Omega$ ⓐ
L_D	Internal Drain Inductance	—	4.5	—	nH	Between lead, 6mm (0.25in.) from package and center of die contact
L_S	Internal Source Inductance	—	7.5	—		
C_{iss}	Input Capacitance	—	5669	—	pF	$V_{GS} = 0V$
C_{oss}	Output Capacitance	—	1659	—		$V_{DS} = 25V$
C_{riss}	Reverse Transfer Capacitance	—	223	—		$f = 1.0\text{MHz}$, See Fig. 5
C_{oss}	Output Capacitance	—	6205	—		$V_{GS} = 0V, V_{DS} = 1.0V, f = 1.0\text{MHz}$
C_{oss}	Output Capacitance	—	1467	—		$V_{GS} = 0V, V_{DS} = 32V, f = 1.0\text{MHz}$
$C_{oss\text{ eff.}}$	Effective Output Capacitance ⓐ	—	2249	—		$V_{GS} = 0V, V_{DS} = 0V$ to $32V$

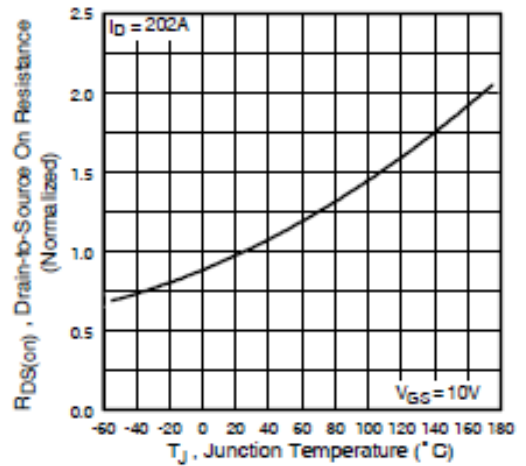
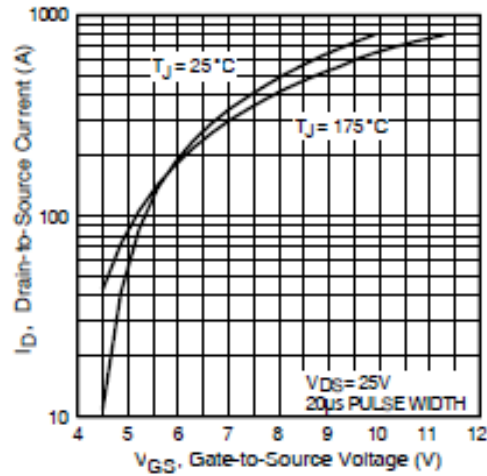
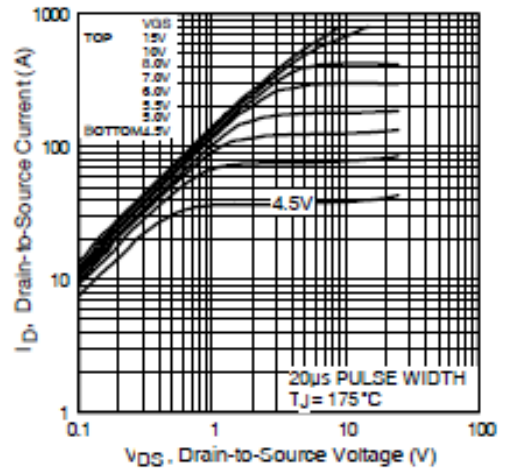
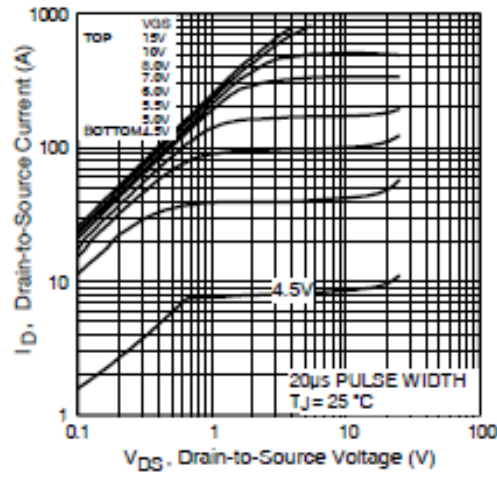
Source-Drain Ratings and Characteristics

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
I_S	Continuous Source Current (Body Diode)	—	—	202ⓑ	A	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode.
I_{SM}	Pulsed Source Current (Body Diode) ⓐ	—	—	808		
V_{SD}	Diode Forward Voltage	—	—	1.5	V	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_S = 121A, V_{GS} = 0V$ ⓐ
t_{rr}	Reverse Recovery Time	—	78	117	ns	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_F = 121A$
Q_{rr}	Reverse Recovery Charge	—	163	245	nC	$di/dt = 100A/\mu s$ ⓐ
t_{on}	Forward Turn-On Time	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by $L_S + L_D$)				

Notes:

- ⓐ Repetitive rating; pulse width limited by max. junction temperature. (See fig. 11)
- ⓑ Starting $T_J = 25^\circ\text{C}$, $L = 85\mu H$
 $R_G = 25\Omega$, $I_{AS} = 121A$. (See Figure 12)

- ⓐ Pulse width $\leq 400\mu s$; duty cycle $\leq 2\%$.
- ⓑ $C_{oss\text{ eff.}}$ is a fixed capacitance that gives the same charging time as C_{oss} while V_{DS} is rising from 0 to 80% V_{DSS}
- ⓐ Calculated continuous current based on maximum allowable



IRF1404

International
IGR Rectifier

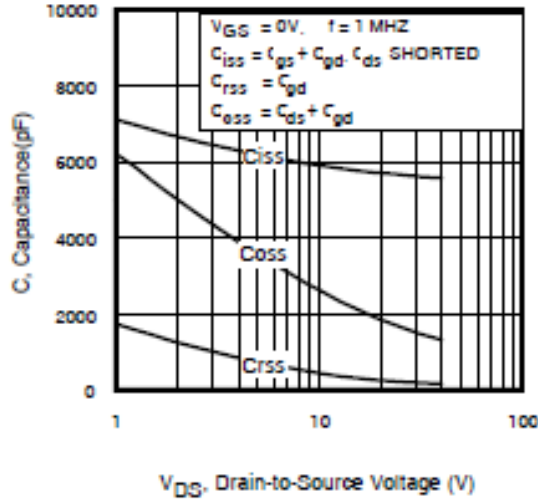


Fig 5. Typical Capacitance Vs. Drain-to-Source Voltage

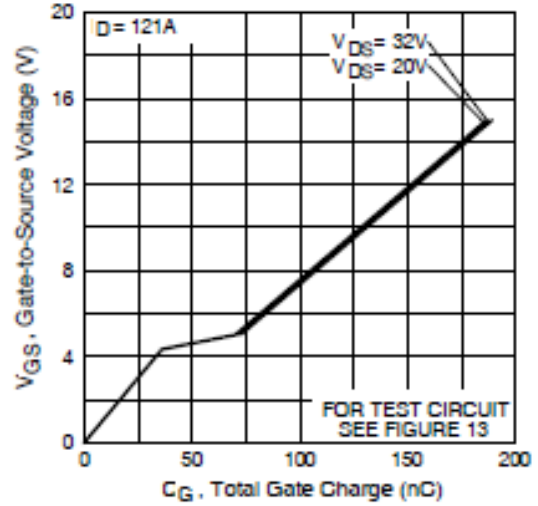


Fig 6. Typical Gate Charge Vs. Gate-to-Source Voltage

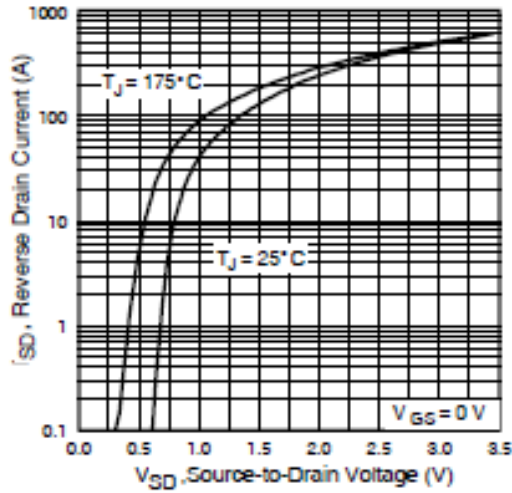


Fig 7. Typical Source-Drain Diode Forward Voltage

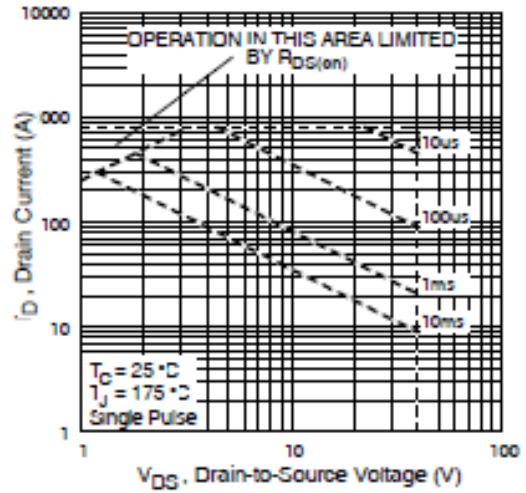


Fig 8. Maximum Safe Operating Area

ANEXO C. DATASHEET TPL 621

Section 1

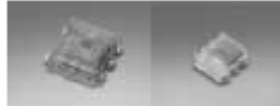
NEW PRODUCT NEWS

This section highlights some of the new products introduced by Toshiba in 2006-2007.

(1) Lead(Pb)-Free/RoHS-Compatible Products

In an effort to support our customers in complying with pending environmental legislation, Toshiba Optoelectronics offers a selection of RoHS-Compatible¹ and Lead(Pb)-Free² products. Such products are designated by the "F" suffix in their part numbers. For example, TLP281(F). For more information about RoHS-Compatible products by Toshiba, please go to www.RoHS.Toshiba.com.

(2) Illuminance Sensor TPS851/TPS852/TPS853/TPS856



TPS851/853 TPS852/856

TPS851/852/853/856 are surface mount illuminance sensors which incorporate a photo-diode and current amp circuit in a single chip. These unique features, when coupled with the internal luminosity efficiency correction (LEC) function, enable engineers to design efficient backlighting control system with similar to human eye response. They also save power consumption.

Features

Product Characteristics	TPS851	TPS852	TPS853	TPS856
Package size (mm)	2.1 x 2.0 x 0.7	1.6 x 1.6 x 0.55	2.1 x 2.0 x 0.7	1.6 x 1.6 x 0.55
Supply Voltage	2.7 - 5.5 V	2.7 - 5.5 V	2.2 - 5.5 V	1.8 - 5.5 V
Light current (1): IL (1) (μA) V _{CC} =3V, E _v =100lx, CIE standard A light source (Note 1)	Min. - Typ. 62 Max. -	Min. - Typ. 48 Max. -	Min. - Typ. 62 Max. -	Min. - Typ. 57 Max. -
Light current (2): IL (2) (μA) V _{CC} =3V, E _v =100lx, Fluorescent light	Min. 37 Typ. 52 Max. 74	Min. 27 Typ. 40 Max. 54	Min. 37 Typ. 52 Max. 74	Min. 40 Typ. 57 Max. 80
Light Current Ratio IL (1) / IL (2)	Typ. 1.2 Max. 1.7	Typ. 1.2 Max. 1.7	Typ. 1.2 Max. 1.7	Typ. 1.0 Max.
Dark Current: I _{DAK} (μA)	Max. 0.1	Max. 0.1	Max. 0.1	Max. 0.1
Remarks			Standby term.	Standby terminal

Note 1: Color temperature = 2856K, approximated incandescence light

(3) High Speed Optical Transceiver TODX2701(F)



The TODX2701(F) optical transceiver module supports APF

NEW PRODUCT NEWS

Features

- Data rate: 20 to 125 Mb/s (NRZ)
- Transmission distance: up to 20 m with APF
up to 100 m with GI-PCF
- Operating temperature: -10 to +70°C
- PECL interface
- Supply voltage: 3.3 +/- 0.3V
- Pb-free

(4) SMA Optical Transmitter and Receiver Modules TOTX1400(F)/TORX1400(F)



The TOTX1400(F) optical transmitter module and TORX1400(F) receiver module support APF (all plastic fiber) cables. The TOTX1400(F) and TORX1400(F) are compatible with SMA connector and well suited for Fast Ethernet (125Mb/s) transmission.

Features

- Data rate: 20 to 125 Mb/s (NRZ)
- Transmission distance: up to 50 m with APF
- Operating temperature: -10 to +70°C
- PECL interface
- Pb-free

(5) Low Supply Current IGBT/MOSFET Drive Coupler TLP350 Series



Following the introduction of TLP351, Toshiba continues to strengthen the line-up of low power consumption IGBT/MOSFET drive coupler by introducing TLP350. Like TLP351, TLP350 only requires 2mA supply current, reducing power consumption by 80% compared to the previous generation TLP250. TLP350 features high output current of 2.5A (max) and high CMR of 15kV/ μ s (min).

**(6) Small 4-pin DIP Triac Couplers
TLP360J, TLP361J and TLP363J**



Compared to our conventional 6-pin DIP triac couplers, the TLP360J, TLP361J and TLP363J are housed in 4-pin DIP, resulting in a 35% reduction in size. They have high isolation of 5kVrms and high peak off-state voltage of 600V. TLP361J and TLP363J have the additional feature of zero-cross function. Furthermore, TLP363J has a high impulse noise immunity of 2000V.

Features

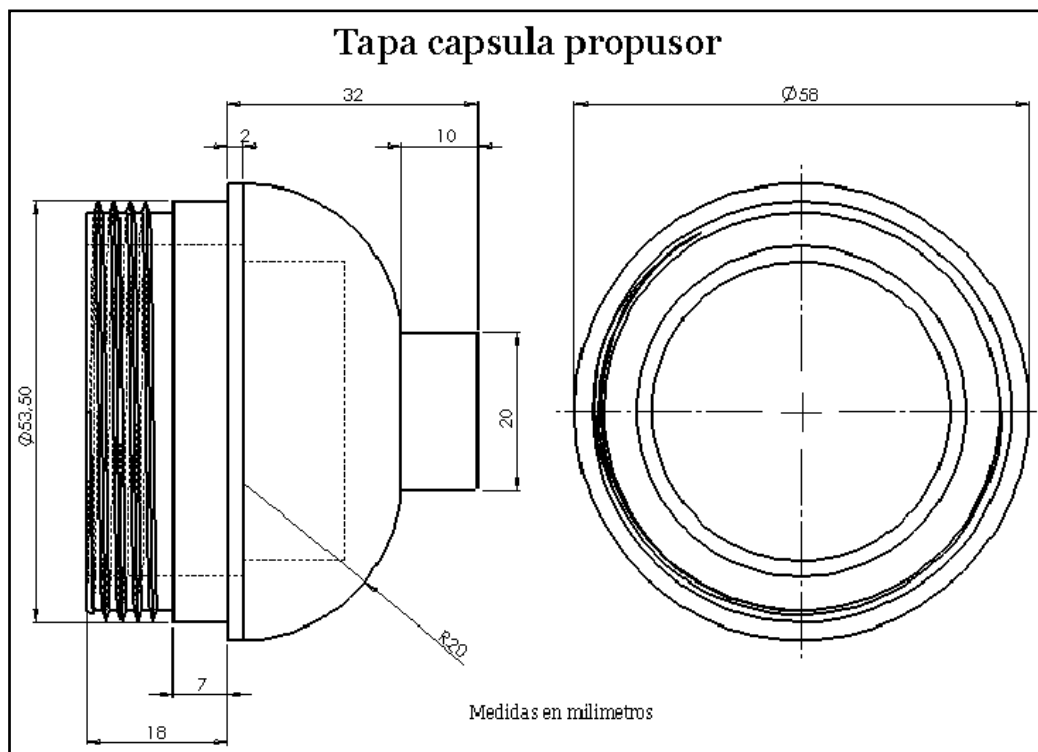
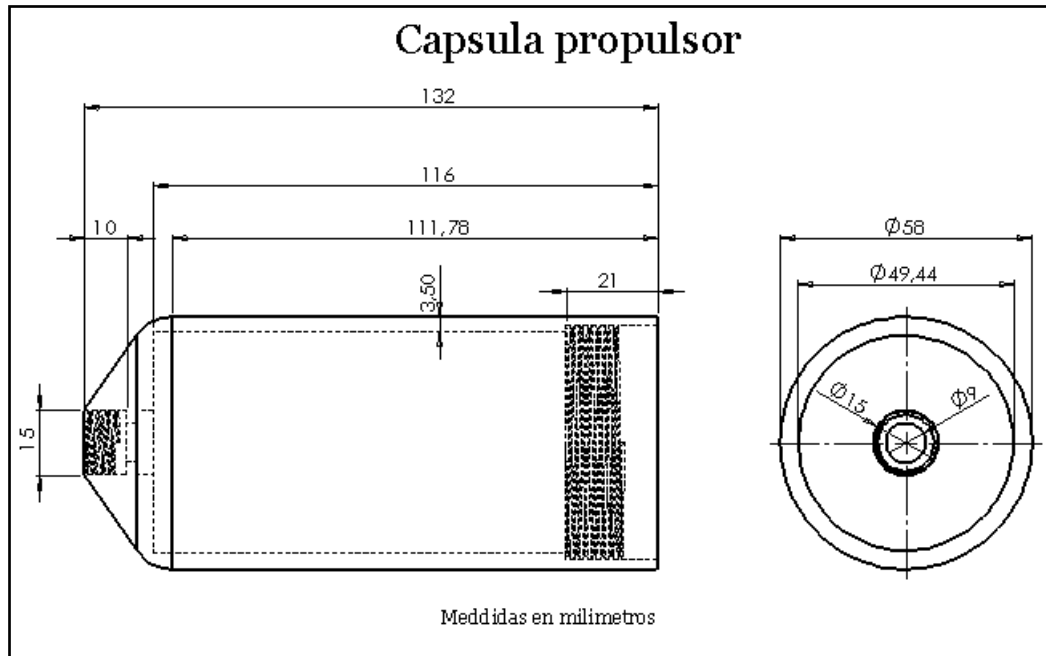
- Peak off-state voltage: 600V (min)
- Isolation voltage: 5kVrms (min)
- Internal isolation gap: > 0.4mm (min)
- Inhibit voltage: 20V (max) (TLP361J & TLP363J)
- Impulse noise immunity: 2000V (typ) (TLP363J)
- UL, VDE (TUV), BSI and SEMKO Recognized

**(7) IC Couplers for IPM Gate Drive
TLP102, TLP106, TLP702 and TLP706**

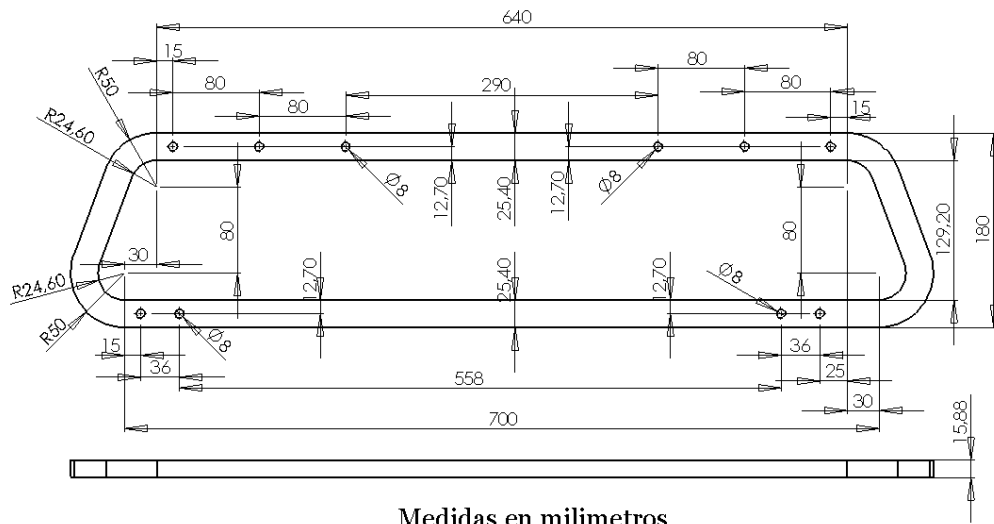
The new IC couplers TLP102, TLP106, TLP702 and TLP706 are optimized for use in IPM gate drivers. The totem-pole output configuration makes bidirectional drive possible for the sink and source. Open-collector output type photo-IC couplers often require a pull-up resistor; however, employing the totem-pole configuration for the TLP102, TLP106, TLP702 and TLP706 eliminates the need for this resistor. Toshiba provides two logic output types: inverter logic, the TLP102 and TLP702, and buffer logic, the TLP106 and TLP706. You can select the photo-IC couplers best suited to your intelligent power modules. In addition, the shielded detectors enable high common-mode transient immunity, and excellent input and output noise characteristics.

Part Number	TLP102 and TLP106	TLP702 and TLP706
Package	MSFOP6	SDIP6
Threshold input current	3mA (max)	5mA (max)
Output current (Ta ≤ 25°C)	± 15mA (max)	± 15mA (max)
Propagation delay time	400 ns (max)	600 ns (max)
Operating temperature	-40 to 85°C	-40 to 100°C
Supply voltage	4.5 V to 20 V	4.5 V to 20 V
Operation voltage	3750 Vrms (min)	5000 Vrms (min)

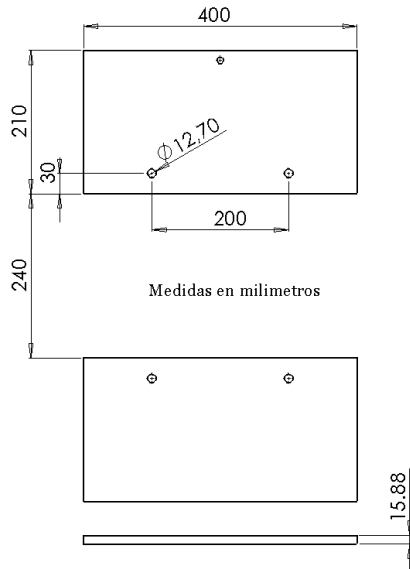
ANEXO C PLANOS GENERALES DEL PROTOTIPO



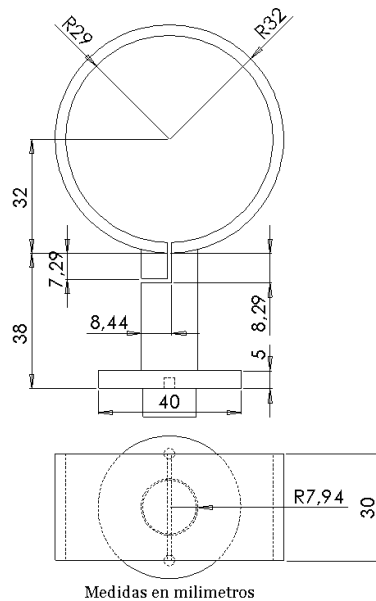
Marco ROV



Soporte del modulo de flotabilidad



Soporte propulsores



Recinto electronico

