

Universidad San Francisco de Quito

Submarino USFQ

Daniel Cabrera

Nicolás Soria

Tesis de grado presentada como requisito para la obtención del título de Ingeniero Mecánico

Quito, Mayo 2011

Universidad San Francisco de Quito

Colegio de pregrado

HOJA DE APROBACION DE TESIS

Submarino USFQ

Daniel Cabrera y Nicolás Soria

Laurent Sass,

Nombre y firma del director de la tesis

Pedro Meneses

Omar Aguirre

Nombre y firma de los miembros del comité de tesis

Fernando Romo

Nombre y firma del decano del colegio escuela o programa

Lugar y fecha

©Derechos de Autor

Daniel Cabrera

Nicolás Soria

2011

Agradecimientos

Daniel Cabrera:

Un gran agradecimiento a toda mi familia y amigos que me apoyaron durante todo el transcurso del diseño y construcción del submarino, y un agradecimiento muy especial a Nicolás Soria, mi compañero de tesis, que gracias a su constante ayuda y dedicación hizo que el proyecto salga adelante.

Nicolás Soria:

Quiero expresar mi agradecimiento a la USFQ, especialmente a Paulo Guerra, Laurent Sass, Bill Ross, Fabián Morales, Bernard Herrera, Diego Araujo, Lorena Bejarano, Alicia Rivera.

A los submarinistas David Bracho, Rafael Campusano, Carmen Rodríguez y Maferita Holguín.

Quiero agradecer a mi padre y mi madre por el brindarme todo el apoyo la motivación para cumplir este proyecto. A Carmen un agradecimiento muy especial por la paciencia y el apoyo durante esta etapa universitaria.

Finalmente a todos mis amigos que me preguntaron Que fue ese submarino!!!

Resumen

El proyecto consiste en desarrollar una plataforma motorizada operada a control remoto. La plataforma poseerá sistemas de control y visión, y sensores de navegación

El objetivo final es diseñar y construir un vehículo submarino operado a control remoto que permita tomar datos del entorno, grabar audio y video. Con el objetivo de ser utilizada como herramienta para la exploración y documentación de la vida marina.

Como primera etapa del proyecto, se realizará una investigación sobre los robots submarinos existentes. Con esta información y en base a los requerimientos de la zona se procederá a desarrollar un diseño mecánico detallado del vehículo. El diseño definirá las dimensiones del vehículo, la instalación de los diferentes componentes electrónicos, y los planos de construcción para el vehículo.

La segunda etapa del proyecto será la compra de los materiales de construcción y componentes electrónicos para iniciar el proceso de construcción. Esta etapa se realizará en las instalaciones y con las herramientas del taller mecánico de la USFQ. Después de comprobar el funcionamiento mecánico del submarino y la hermeticidad de los compartimientos se procederá a instalar los componentes eléctricos de control, motores, sensores, cámara de video e hidrófono.

Finalmente se procederá a realizar pruebas en piscina de hermeticidad, flotabilidad y movilidad para el submarino. Para posteriormente a realizar varias pruebas en aguas abiertas en la costa ecuatoriana para finalmente llevar el submarino a la estación de GAIAS en San Cristóbal.

Abstract

The project is about developing a motorized platform operated by remote control. The platform will have vision and control systems, and navigation sensors.

The ultimate goal is to design and build an underwater vehicle operated by remote control which allows the gathering of data from the environment, and the recording of audio and video. In order to be used as a tool for exploration and documentation of marine life.

As a first stage of the project, research will be conducted on existing remote operated vehicles. With this information and based on the requirements of the area will proceed to develop a detailed mechanical design of the vehicle. The design will define the dimensions of the vehicle, the connection of various electronic components, and the construction plans for the vehicle.

The second stage of the project is the purchase of building materials and electronic components to start the construction process. This stage will be held at the facilities of the USFQ mechanical workshop. After checking the mechanical operation of the submarine and the tightness of the chambers, we will proceed to install the electrical control components, motors, sensors, video camera and hydrophone.

Finally tests in the pool will be preceded for checking leaks, buoyancy and mobility of the submarine. To later perform several tests in open waters on the Ecuadorian coast to finally bring the submarine to GAIAS station in San Cristobal.

Tabla de contenido

1.	Antecedentes y Marco Teórico	2
	<i>Antecedentes ROV's</i>	2
	<i>Universidad San Francisco de Quito y GAIAS</i>	7
	<i>Exploración en Galápagos</i>	7
	<i>Justificación</i>	8
2.	Marco Teórico.....	9
2.1	El Medio Acuático	9
	<i>Flotabilidad</i>	9
	<i>Presión del agua</i>	10
	<i>Hidrodinámica</i>	12
2.2	Ubicación Geográfica: Las Islas Galápagos	13
	<i>Condiciones ambientales:</i>	15
	<i>Biodiversidad</i>	15
	<i>Clima y corrientes marinas</i>	16
2.3	Condiciones del Vehículo	19
	<i>Estanqueidad</i>	19
	<i>Movilidad</i>	21
	<i>Elementos de protección</i>	23
	<i>Materiales</i>	23
	<i>Estabilidad</i>	25
3.	Alcance y limitaciones	28
3.1	<i>Características esperadas del sumergible</i>	28
3.2	<i>Manipulación y Transporte del sumergible</i>	29
3.3	<i>Resumen de características deseadas</i>	31
3.4	<i>Planificación y presupuesto</i>	32
4.	Componentes Electrónicos.....	34
4.1	<i>Video</i>	34
4.2.	<i>Audio</i>	34
4.3.	<i>Sensores</i>	35
4.4.	<i>Motores y Controladores</i>	35
4.5	<i>Procesador</i>	36
4.6	<i>Cable Umbilical</i>	38
5	Diseño Mecánico	43

5.1	<i>Alineación motores para maniobrabilidad</i>	43
5.2	<i>Diseño de Compartimiento Seco</i>	52
	<i>Tapas</i>	55
	<i>Cables y conexiones herméticas</i>	58
	<i>Análisis de esfuerzos</i>	66
5.3	<i>Chasis</i>	72
	<i>Base Motor</i>	72
	<i>Compartimiento Seco</i>	74
	<i>Laterales</i>	75
	<i>Bloque de potencia</i>	78
5.4	<i>Flotabilidad</i>	81
6	<i>Programación</i>	87
6.1	<i>Control de movimiento</i>	87
6.2	<i>Adquisición de datos (sensores)</i>	91
6.3	<i>Adquisición de audio y video</i>	94
6.4	<i>HMI (Human Machine Interface)</i>	94
7	<i>Pruebas</i>	96
7.1	<i>Pruebas piscina</i>	96
7.2	<i>Diseño Final</i>	104
7.3	<i>Pruebas Finales</i>	106
8	<i>Conclusiones y recomendaciones</i>	112
8.1	<i>Conclusiones</i>	112
8.2	<i>Recomendaciones</i>	114
9	<i>Bibliografía</i>	116
10	<i>Anexos</i>	119
	Anexo A: Presupuesto	119
	Anexo B: Programación	121
	Anexo C: Equipos Electrónicos	131
	Anexo D: Simulación Inventor	149
	Anexo E: Documentación Proyecto Submarino	171
	Anexo F: Planos	172

Lista de Figuras

Ilustración 1 Derrame de petróleo Plataforma Deepwater Horizon	4
Ilustración 2 ROV utilizado en las Operaciones de reparación de derrame	4
Ilustración 3 ROV realizando operaciones de reparación de tubería	5
Ilustración 4 ROV y AUV.....	6
Ilustración 5 Flujo Laminar Y Flujo Turbulento	12
Ilustración 6 El archipiélago de Galápagos	13
Ilustración 7 Hot spot.....	14
Ilustración 8 Placas tectónicas en el Archipiélago de Galápagos.....	15
Ilustración 9 Black Smoker en el Archipiélago de Galapagos	16
Ilustración 10 Corrientes marinas en el Archipiélago de Galápagos.	17
Ilustración 11 Diferentes Equipos en un ROV	19
Ilustración 12 Conectores Acuáticos.....	21
Ilustración 13 Fuerzas resultantes en un cuerpo sumergido.....	26
Ilustración 14 Cuerpo sumergido desplazado un ángulo θ de su posición de equilibrio	26
Ilustración 15 Filtro PWM	37
Ilustración 16 Esquema del Procesador.....	38
Ilustración 17 Esquema de la comunicación del Submarino	39
Ilustración 18 Comunicación de los elementos de control.....	40
Ilustración 19 Comunicación de elementos de potencia.....	41
Ilustración 20 Circuito de Relay	42
Ilustración 21 Coeficientes de fricción según la geometría	44
Ilustración 22 Angulo de separación entre los motores superiores	46
Ilustración 23 Angulo de separación entre el motor inferior y la placa del módulo.	47
Ilustración 24 Base de motores vista frontal	48
Ilustración 25 Ejes de referencia para calcular la fuerza del motor.	49
Ilustración 26 Cilindro Compartimiento Seco	53
Ilustración 27 Diseño Plancha Elementos de control	54
Ilustración 28 Plancha Elementos de control	54
Ilustración 29 Diseño tapa Duralon	56
Ilustración 30 Diseño de tapa duralon con dos O ring y Empaque.....	56
Ilustración 31 Compartimiento Modulo Control	57
Ilustración 32 Compartimiento Modulo Control vista lateral.....	58
Ilustración 33 Probeta de Abro 600 látex acrílico con silicona	60
Ilustración 34 Probeta de Espuma de Poliuretano	60
Ilustración 35 Probeta de Resina Polyester	61
Ilustración 36 Prensa estopa o Cable Gland	63
Ilustración 37 Despiece Prensa estopa	64
Ilustración 38 Pruebas de hermeticidad	65
Ilustración 39 Base de Motores	73
Ilustración 40 Bloque de control.....	74
Ilustración 41 Perfil Lateral	75
Ilustración 42 Módulos ensamblados	76
Ilustración 43 Modelación Submarino USFQ.....	77

Ilustración 44 Submarino USFQ Ensamblado	78
Ilustración 45 Diagrama baterías	79
Ilustración 46 Submarino USFQ en piscina	82
Ilustración 47 Submarino sumergido con pesos	83
Ilustración 48 Submarino USFQ con flotabilidad neutra	85
Ilustración 49 Ejes del Joystick.....	88
Ilustración 50 Programa para Inicialización del Joystick.....	88
Ilustración 51 Programa para motores	89
Ilustración 52 Movimientos de motores con movimientos del eje X del joystick	90
Ilustración 53 Movimientos de motores con rotación del joystick en eje Z.....	90
Ilustración 54 Movimientos de motores con movimientos del eje U del joystick.....	91
Ilustración 55 Presión vs Voltaje	92
Ilustración 56 Profundidad vs presión	93
Ilustración 57 Temperatura vs Voltaje.....	93
Ilustración 58 Programa para tomar fotografías	94
Ilustración 59 Interfaz para usuario	95
Ilustración 60 Pruebas de flotabilidad en Piscina	97
Ilustración 61 Pruebas de Hermeticidad en piscina.....	97
Ilustración 62 Pruebas de Flotabilidad Neutra	98
Ilustración 63 Estación de control para las pruebas del Submarino.....	99
Ilustración 64 Pruebas maniobrabilidad Submarino.....	103
Ilustración 65 Submarino USFQ	103
Ilustración 66 Isla de Salango.....	107
Ilustración 67 Buzos preparándose para la Inmersión	107
Ilustración 68 Primera Inmersión Submarino USFQ.....	108
Ilustración 69 Submarino USFQ inmersión operada a distancia.....	109
Ilustración 70 Línea de programa para el Joystick.....	121
Ilustración 71 Línea de programa para video 1	122
Ilustración 72 Línea de programa para video 2	123
Ilustración 73 Línea de programa para video 3	124
Ilustración 74 Línea de programa para video 4	125
Ilustración 75 Línea de programa para sensores.....	126
Ilustración 76 Línea de programa para fotografía parte 1.....	127
Ilustración 77 Línea de programa para fotografía parte 2.....	127
Ilustración 78 Línea de programa para motores parte 1	128
Ilustración 79 Línea de programa para motores parte 2	129
Ilustración 80 Programa en cRIO	130
Ilustración 81 Delta vision - Under Water Video camera	131
Ilustración 82 Hydrophone H2.....	132
Ilustración 83 UPA -1 Amplificador	133
Ilustración 84 Manual Transductor de Presión 1	134
Ilustración 85 Transductor de Presión 2	135
Ilustración 86 Seabotix BTD-150.....	136
Ilustración 87 Empuje vs Voltaje motores	137
Ilustración 88 Driver Sabertooth 2x10.....	138

Ilustración 89 NI cRIO-9012	139
Ilustración 90 NI cRIO-9112	140
Ilustración 91 NI 9401	141
Ilustración 92 NI- 9205	142
Ilustración 93 Llave de torsión	143
Ilustración 94 12 VDC Relay	144
Ilustración 95 Joystick Thrustmaster	145

Lista de Tablas

Tabla 1 Requerimientos generales	31
Tabla 2 Diagrama de Gantt	33
Tabla 3 Esfuerzos de acuerdo a la profundidad	69
Tabla 4 Factor de Seguridad.....	71
Tabla 5 Consumo máximo de componentes.....	79
Tabla 6 Velocidad movimiento horizontal	101
Tabla 7 Velocidad movimiento vertical.....	101
Tabla 8 Rotación respecto al eje vertical	101
Tabla 9 Presupuesto.....	119
Tabla 10 Especificaciones técnicas Tubería PVC	146

1. Antecedentes y Marco Teórico

El Centro de Vehículos Autónomos USFQ tiene como objetivo desarrollar diferentes proyectos de plataformas móviles para investigación científica, tareas de exploración, y trabajos en áreas peligrosas. El Centro de Vehículos Autónomos USFQ actualmente consta de dos proyectos, el proyecto avión USFQ, y el proyecto plataforma móvil de exploración terrestre.

Con el objetivo de complementar el Centro de Vehículos Autónomos de la USFQ con un vehículo submarino, se propone desarrollar una estructura motorizada, diseñada para desempeñarse bajo el agua, con la capacidad de documentar la vida submarina. Con el desarrollo del presente proyecto, el Colegio de Ciencias Biológicas y Ambientales tendrá una nueva herramienta de investigación a un costo asequible, comparado con equipos similares existentes en el mercado. El proyecto permitirá el trabajo en conjunto de varias facultades, incluyendo GAIAS (Galápagos Academic Institute for Arts and Science) y el Politécnico, permitiendo la cooperación de diferentes maestros y estudiantes, y dando origen a nuevos proyectos que involucren a más áreas de estudio de la Universidad San Francisco de Quito.

Antecedentes ROV's

El interés para conocer y explorar lo que hay en las profundidades de los mares, océanos, y lagos ha existido desde hace mucho tiempo. Gracias a los avances tecnológicos la investigación en submarinos no militares ha aumentado significativamente en las últimas dos décadas, ha permitido al hombre explorar estos lugares desconocidos y conocer nuevas especies de flora y fauna marina. En la actualidad se intenta, no sólo descubrir ecosistemas nuevos sino también preservar los ya conocidos.

Para lograr este avance fue necesaria la investigación y el desarrollo de vehículos submarinos no tripulados, los cuales son capaces de llegar a lugares remotos que pueden ser muy peligrosos para el ser humano, o incluso inasequibles.

Los robots submarinos son una nueva herramienta que facilita la exploración e investigación de la vida marina, pero también se los utiliza para trabajos peligrosos como para búsqueda y rescate en profundidades submarinas. La gran mayoría de robots submarinos son controlados remotamente desde la superficie y se los conoce como ROV's. El acrónimo **ROV** proviene del inglés: **Remote Operated Vehicle**, **traducido al castellano en vehículo operado a la distancia.**

El 20 de abril del 2010 la plataforma petrolera Deepwater Horizon de British Petroleum BP ubicada en el Golfo de México, se hundió debido a una explosión en la tubería de la torre principal provocando uno de los derrames de petróleo más importante de la historia (BLEICHER). La tubería averiada se encontraba a una profundidad de 1500 m por debajo de la superficie del mar.

A una profundidad de 1500 metros es imposible que un ser humano pueda realizar las tareas de reparación de la tubería, los ROV's se encargaron de todas las tareas de reparación.

Para contener el derrame de petróleo se utilizó una docena de ROV's que permitieron ser los ojos y utilizar las herramientas necesarias para sellar la fuga de petróleo de las tuberías averiadas por la explosión(Schilling Robotics). Los ROV's transmitieron video en tiempo real las operaciones para sellar el derrame. La Ilustración 1 es una fotografía captada por un ROV sobre la tubería averiada. Gracias a la transmisión de video de los ROV's todo el mundo fue testigo de todas las operaciones reparación y mitigación en el Golfo de México.



Ilustración 1 Derrame de petróleo Plataforma Deepwater Horizon

La Ilustración 2 presenta uno de los ROV's utilizado en las operaciones de reparación y la Ilustración 3 presenta dos ROV's trabajando en la reparación de la tubería de la plataforma petrolera Deepwater Horizon de BP.

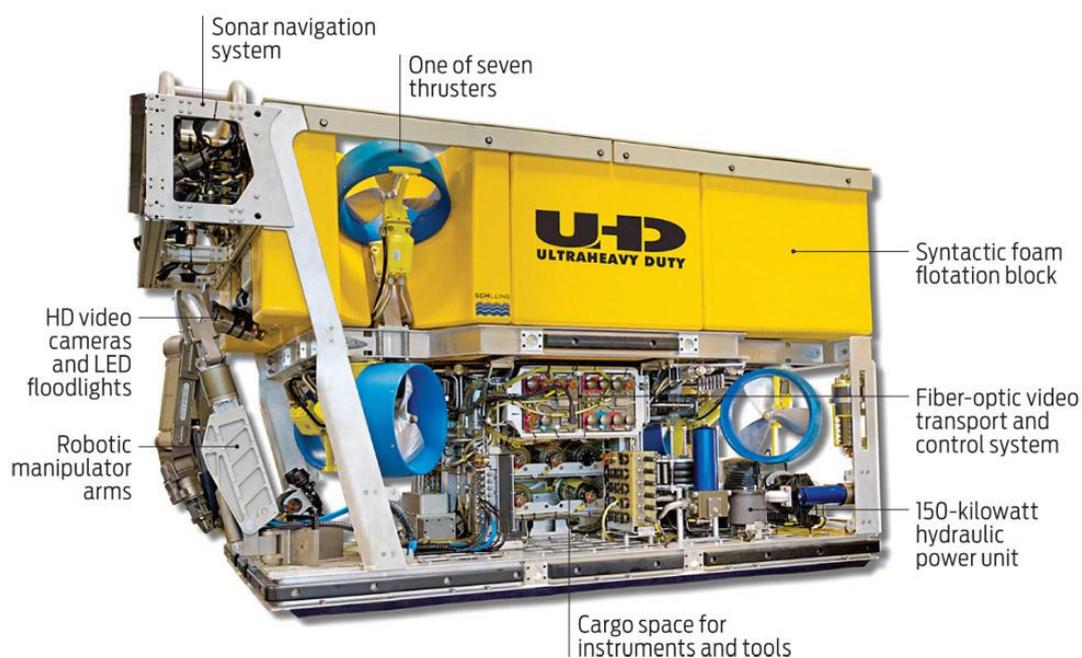


Ilustración 2 ROV utilizado en las Operaciones de reparación de derrame



Ilustración 3 ROV realizando operaciones de reparación de tubería

Las comunicaciones vía ultrasonido o por medio de ondas electromagnéticas debajo del mar son muy difíciles y tienen muchas limitaciones en su ancho de banda, por lo que es necesario el uso de control remoto vía cable. El ROV de la ilustración 2 se mantiene conectado a la superficie mediante un cable llamado cable o cordón umbilical. El cable umbilical está compuesto por un grupo de diferentes cables que transmiten diferentes tipos de señales eléctricas de forma simultánea entre el operador y el vehículo. Además la mayoría de ROV's están equipados con cámaras de video, sistemas de iluminación, y de acuerdo a su objetivo están equipados con diferentes tipos de herramientas como brazos robóticos, sonares, magnetómetros, entre otros.

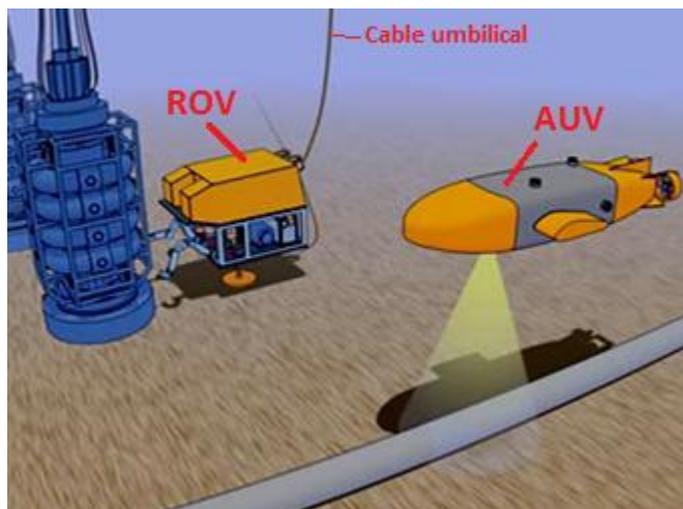


Ilustración 4 ROV y AUV

También existen los robots submarinos autónomos como el submarino en la ilustración 4, los cuales como su nombre lo dice, son autónomos y no son guiados por un cable ni por un operador. A estos robots se les conoce como AUV (Autonomous Underwater Vehicles), y generalmente se los puede programar con una orden específica y al finalizar el programa retornan a un sitio específico, señalado previamente. En este caso la comunicación entre el submarino y el centro de control queda suspendida durante toda la operación. El principal elemento que interviene en su diseño es la inteligencia, porque el robot debe ser capaz de tomar decisiones en un ambiente desconocido.

El desarrollo de los vehículos submarinos autónomos comenzó en la década de los 60 con vehículos como el *Rebikoff Sea Spook* construido por la Universidad de Washington. A éste le siguieron otros como el *Skat* del Shirshov Institute of Oceanology en Rusia, o el *OSR-V Japonés* (Wernli) (Arocha, Rodríguez y Pazmiño). Hoy en día existe una gran diversidad de robots submarinos.

Universidad San Francisco de Quito y GAIAS

La universidad San Francisco de Quito tiene un campus de investigación en las islas Galápagos llamado GAIAS. Este fue fundado en el 2002 con el apoyo del Parque Nacional Galápagos, la municipalidad de San Cristóbal, el gobierno central y el gobierno de la provincia de Galápagos.

GAIAS fue creado como parte de un esfuerzo para la conservación mientras se generaba un desarrollo sustentable en las Islas. Durante los últimos años GAIAS se ha convertido en la entidad educativa más importante dedicada a la investigación en Galápagos, y está enfocado principalmente al estudio de la vida marina de las Islas.

Exploración en Galápagos

La exploración submarina en Galápagos es muy común, debido a su inusual origen y la existencia de animales y vegetación únicos en el mundo. La gran mayoría de expediciones se han enfocado en investigar el origen de las islas como tal. Por ejemplo se sabe que las islas son de origen volcánico y una expedición en 1977 descubrió la existencia de los “Black Smokers” que son fumarolas de origen volcánico, en donde se pensaba que las condiciones no dejaban que exista vida marina, pero las investigaciones realizadas mostraron que sí hay vida a pesar de las altas temperaturas y las condiciones inhóspitas (NOAA Ocean Explorer).

La exploración e investigación en Galápagos por lo general la hacen científicos extranjeros que disponen de submarinos de exploración subacuática. Sin embargo, al terminar la investigación se llevan todos los equipos. En este sentido, la investigación desarrollada por científicos locales en las Islas se ve muy limitada.

Justificación

Galápagos y más concretamente GAIAS no tiene herramientas necesarias para la exploración, como son los robots submarinos, lo que limita su capacidad y campo de investigación.

El submarino es una herramienta de investigación destinada a GAIAS, que facilitará el estudio e investigación de la flora y fauna submarina en las Islas, al igual que la exploración de lugares desconocidos, así como también el descubrimiento de nuevas especies de animales o plantas marinas.

2. Marco Teórico

2.1 El Medio Acuático

El vehículo submarino funcionará en un medio acuático. Por lo tanto estará sometido a diferentes fenómenos físicos, como son la flotabilidad, la presión y la hidrodinámica de los cuales dependerá su desempeño. Cabe recalcar que gran parte de estos fenómenos varían en función de las características del agua y entonces de la temperatura y profundidad.

Flotabilidad

El correcto y eficaz funcionamiento y control del submarino va a depender del entendimiento de cómo afecta la flotabilidad a un cuerpo introducido en agua y de cómo controlar esta flotabilidad. Si un objeto es introducido totalmente o parcialmente en el agua, según el Principio de Arquímedes, este flotará cuando el peso del volumen de agua desplazada iguala su propio peso. Esto significa que un objeto va a flotar siempre y cuando el peso del volumen de agua desplazada sea mayor a su propio peso. Cuando un objeto flota se dice que tiene flotabilidad positiva. Así mismo, si un objeto desplaza un volumen de agua que pesa menos que el peso del objeto, este se hundirá, y se dice que tiene flotabilidad negativa. Si el peso del volumen desplazado es igual al mismo peso del objeto, éste no flota ni se hunde; a este estado se lo llama flotabilidad neutra.

La flotabilidad neutra es el estado ideal para el funcionamiento del submarino. Con esta flotabilidad el vehículo podrá moverse con más libertad en todas las direcciones y con menos esfuerzo para los motores. A pesar de ello, por razones de seguridad con el submarino se buscará una flotabilidad ligeramente positiva. Así se

evitará que el vehículo no tripulado se hunda hasta al fondo del mar en donde puede dañar vida marina, y también se permitirá recuperar el submarino en la superficie en caso de una falla en su funcionamiento.

Debido a que la flotabilidad depende de la densidad del agua, mientras más densa sea el agua, mayor será la fuerza de empuje para un cierto desplazamiento de agua. El agua salada tiene una densidad aproximada de 1,028 Kg/L, y es más densa que el agua dulce (0,958 Kg/L) debido a las sales minerales disueltas en su composición, por lo tanto cualquier cuerpo flotara más en agua salada que en agua dulce.

Presión del agua

En la tierra un objeto soporta la presión de la cantidad de aire que hay sobre este. Esta presión recibe el nombre de presión atmosférica, la misma que varía de acuerdo al clima, y disminuye conforme se aumenta la altitud.

El agua es un fluido que pesa y ejerce una presión en todos los cuerpos sumergidos en ella, esta presión no es nada más que el peso del agua sobre el cuerpo sumergido, pero debido a que el agua es más densa y pesada que el aire, los cambios en presión debajo del mar son mucho más significativos.

La presión ejercida por el agua depende de la densidad del líquido y de la profundidad a la que esté sumergido el objeto. Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$P = \rho gh$$

Dónde:

- ρ = Densidad del fluido = 1028 kg /m³ para el agua salada.
- g = Gravedad = 9.81 m / s².
- h = Profundidad.

Tomando en cuenta la presión atmosférica en la superficie se calcula la presión absoluta como:

$$P = P_o + \rho gh$$

Dónde:

- P_o = Presión atmosférica.

A nivel del mar la presión atmosférica se mantiene relativamente constante, y se usa una referencia estándar llamada 1 atmosfera (atm) porque es el peso o presión por la atmosfera. Diez metros de agua salada ejercen la misma presión que 1 atmosfera o 1atm, por lo tanto cada 10 m de profundidad la presión aumenta en 1 atm.

Un buzo durante una inmersión está expuesto a diferentes riesgos generados por la presión del agua. Después de los 30 metros de profundidad un buzo está expuesto a lesiones debido a los cambios volumétricos en las cavidades que contienen aire en el cuerpo como los pulmones, senos nasales y canales auditivos; el buzo puede sufrir efectos bioquímicos por la compresión del oxígeno en el tanque. Sin embargo, existen personas calificadas para realizar inmersiones de buceo a grandes profundidades que utilizan equipo más especializado, pero el tiempo de inmersión es limitado a pocos minutos.

Herramientas de exploración marina como los vehículos robotizados, son diseñadas para operar a una profundidad mayor a 30 m. Estas herramientas sumergibles permiten explorar las profundidades sin exponer a riesgos a los exploradores.

Hidrodinámica

El flujo de un fluido puede ser muy complejo, pero la hidrodinámica nos ayuda a entender en cierta medida los fenómenos asociados. La hidrodinámica no es nada más que la ciencia de un fluido en movimiento, en este caso el agua. Para el estudio de la hidrodinámica se realizan dos aproximaciones:

- La densidad del agua no varía con el cambio de presión, a diferencia de lo que pasa con los gases.
- El agua es un fluido incompresible y no tiene fricción interna o viscosidad; en otras palabras no se toma en cuenta los esfuerzos cortantes producidos por fuerzas de fricción internas.

El flujo del agua puede ser laminar o turbulento. Un flujo es laminar cuando las partículas del fluido se mueven de manera ordenada, con trayectorias en línea recta, y se mueve formando líneas paralelas unas con otras como la figura izquierda de la ilustración 5. Por otro lado, un flujo es turbulento cuando el movimiento del fluido es de manera desordenada, es decir, cuando las partículas del fluido se mueven en círculos formando remolinos aleatorios en el fluido como se muestra en la figura derecha de la ilustración 5.



Ilustración 5 Flujo Laminar Y Flujo Turbulento

Las corrientes marinas crearan flujos turbulentos que afectaran la estabilidad de un cuerpo durante una inmersión. Un ROV tiene que operar y desplazarse en

A diferencia de la mayoría de volcanes, los volcanes de las Galápagos no se encuentran ubicados en el choque de dos placas tectónicas; el archipiélago se encuentra en un punto caliente, o también llamado hot spot. Un punto caliente es un evento geológico que sucede cuando magma es inyectado constantemente a través de la corteza terrestre hacia la superficie creando volcanes, la Ilustración 7 presenta la evolución de los volcanes en un hot spot(Toulkeridis (Ph.D.)).

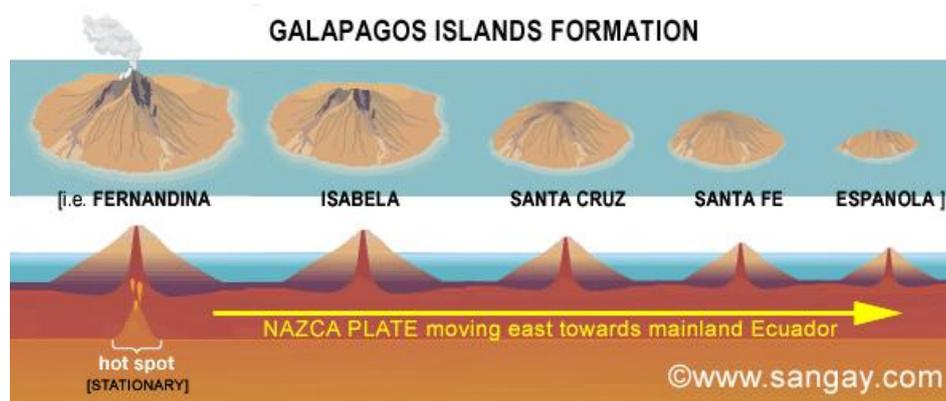


Ilustración 7 Hot spot

Otra peculiaridad que presenta el archipiélago es el desplazamiento de las islas hacia el continente. El archipiélago se encuentra disperso entre las placas tectónicas de Nazca y Cocos que se desplazan desde el noreste hacia el continente con una velocidad de 7 centímetros por año. Esta peculiaridad permite que se encuentren islas tan distantes unas de otras. La ilustración 8 presenta la dirección en la que se desplazan las diferentes placas tectónicas. La combinación del movimiento de placas con el punto caliente creó una cordillera marina llamada Carnegie. La cordillera se extiende hasta el continente con cumbres tan altas que llegan a superar el nivel del mar con más de 1700 metros en las nuevas islas llamadas Nuevas Galápagos, y con 300 metros en las islas más antiguas y lejanas del centro del archipiélago. (Gallardo y Toulkeridis)

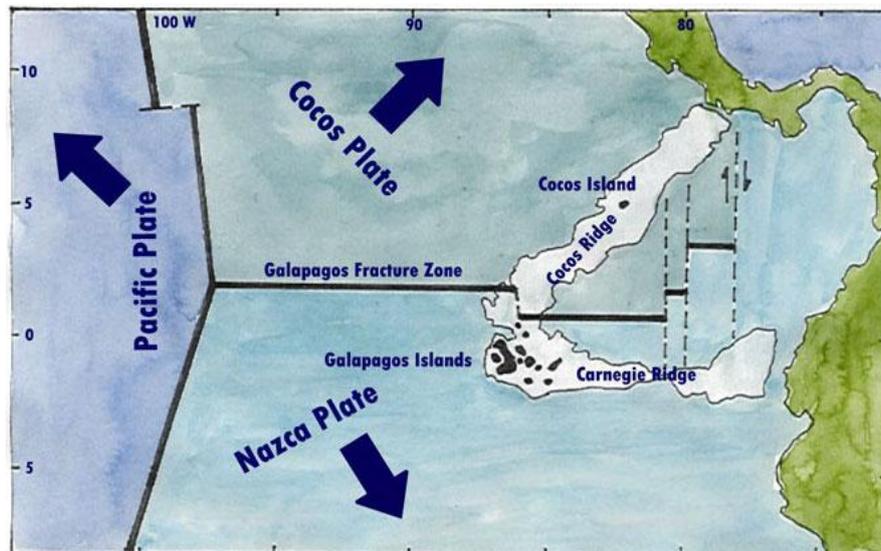


Ilustración 8 Placas tectónicas en el Archipiélago de Galápagos.

Condiciones ambientales:

Biodiversidad

La vida marina en las islas Galápagos es muy rica gracias a la combinación de corrientes frías y cálidas que permiten la aglomeración de diversas criaturas marinas. Se puede encontrar más de 1300 especies marinas, de las cuales más del 28% son especies endémicas de las islas Galápagos. Gracias a los nutrientes que llegan a las islas por las corrientes marinas, la concentración de vida marina se extiende desde las costas de roca volcánica hasta las aguas más profundas y poco exploradas del archipiélago. La vida marina en el archipiélago se extiende en una gran variedad de hábitats entre los que podemos destacar a lo largo de la línea costera: playas de arena, acantilados rocosos, manglares y pequeños arrecifes de coral (Anhalzer).

Las profundidades del archipiélago están llenas de misterios. Debajo de los 1200 metros de profundidad donde aparentemente no existe vida, se pueden encontrar hábitats llenos de vida. La fumarola negra o Black Smoker es un manantial de vida en el lugar más inhóspito del planeta. La fumarola negra es una grieta volcánica que

expulsa agua marina llena de minerales a una temperatura mayor a 400° Celsius. Cuando el fluido caliente se enfría por contacto con el océano se producen las largas columnas de vapor negro. La Ilustración 9 presenta el brazo de un ROV acercándose a tomar muestras en una Black Smoker en el archipiélago de Galápagos (Marine Geoscience Data System).



Ilustración 9 Black Smoker en el Archipiélago de Galapos

En este hábitat altamente toxico, existen bacterias capaces de obtener energía de la fuente termal, y no del sol como lo hacen todas las bacterias conocidas. Este hecho permite a los científicos formular hipótesis sobre el origen de la vida en el planeta. Existen diversos organismos que se alimentan de estas bacterias creando un complejo hábitat, sin embargo, el problema que representa encontrar y explorar estos puntos de vida dificulta su exploración.

Clima y corrientes marinas

El archipiélago de Galápagos experimenta dos cambios de estación en el año y estos ocurren por la influencia de corrientes marinas. El archipiélago se encuentra rodeado de diferentes corrientes marinas y el clima en las islas cambia de acuerdo a

cuál de ellas es la corriente dominante. Las principales corrientes marinas en el archipiélago están representadas en la Ilustración 10 y son: la corriente fría de Cromwell desde el oeste, la corriente fría de Humboldt desde el sureste, la corriente cálida de Panamá desde el noreste.

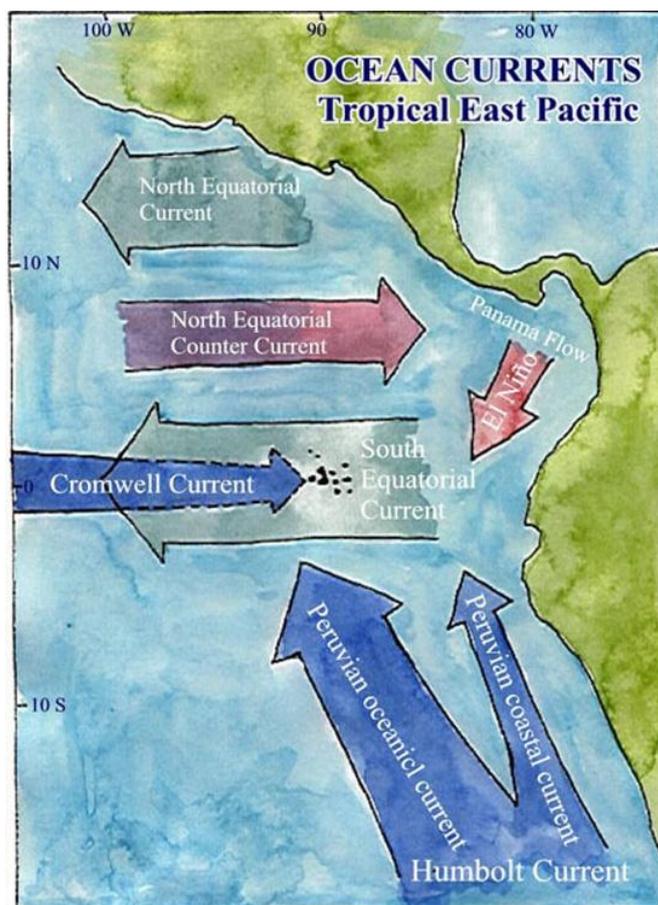


Ilustración 10 Corrientes marinas en el Archipiélago de Galápagos.

La estación fría ocurre entre los meses de junio a diciembre; la corriente fría de Humboldt proveniente de la Antártida y es la responsable del cambio de temperatura. La corriente de Humboldt se dirige al Norte desde la Antártida a lo largo de la costa de Sur América y gira hacia el oeste a través del archipiélago de Galápagos. Además, la corriente de Humboldt está llena de ricos nutrientes que alimentan la vida marina del archipiélago. Fuertes corrientes marinas permiten distribuir los nutrientes entre las islas; a su vez estas corrientes son utilizadas por la fauna marina para desplazarse de

forma fácil y rápida a través del archipiélago. La temperatura del agua durante esta estación oscila entre los 20° y 23° Celsius y presenta poca visibilidad, estos valores cambian dependiendo de la ubicación de cada isla(Jackson y H.).

La estación cálida y húmeda ocurre entre los meses de enero a mayo; la temperatura alrededor de las islas aumenta por la influencia de la corriente marina cálida de Panamá que se dirige desde Panamá hacia el sur. Durante este periodo la vegetación en las tierras bajas se expande gracias a las fuertes lluvias y a los vientos cálidos provenientes del este. La temperatura del agua durante esta estación oscila entre los 22° y 25° Celsius, y al poseer menos nutrientes esta corriente permite una mejor visibilidad(Jackson y H.).

El fenómeno del Niño tiene una gran influencia sobre el clima en las islas Galápagos. El fenómeno del Niño ocurre entre periodos de cada 2 a 7 años, y consiste en una gran corriente de agua cálida que llega al archipiélago utilizando la corriente de Panamá. La corriente de Panamá durante este proceso bloquea el ingreso de nutrientes desde la corriente de Humboldt, y se expande por toda la costa del continente sudamericano causando estragos en la cadena alimenticia; además la temperatura del mar aumenta considerablemente aumentando proporcionalmente el nivel de precipitaciones sobre las islas.(Jackson y H.)

Como conclusión, el medio acuático del archipiélago de Galápagos tiene un fondo marino rocoso como resultado de la constante actividad geológica, y una variable influencia de diferentes corrientes marinas que afectan la visibilidad y la temperatura en el agua. Estas características del medio serán consideradas en los parámetros de diseño del submarino USFQ.

2.3 Condiciones del Vehículo

En esta sección se plantean las características y propiedades que todo sumergible debe considerar y garantizar para un correcto desempeño de acuerdo a su respectiva aplicación. Para el diseño del submarino USFQ, se partió de las condiciones y requerimientos que debe cumplir el sumergible para desempeñar actividades de exploración. La Ilustración 11 presenta un ROV equipado con una cámara de video, luces y otros equipos de monitoreo. También se puede apreciar los diferentes motores y compartimientos en la estructura del sumergible. Estos son algunos de los componentes que se debe instalar en el Submarino USFQ.



Ilustración 11 Diferentes Equipos en un ROV

Estanqueidad

Todo sumergible debe mantener uno o varios compartimientos estancos, es decir, que estos compartimientos deben mantener su espacio interior aislado del exterior y secos para proteger los componentes electrónicos. Para la construcción de submarinos, la estanqueidad se relaciona directamente con la presión a la cual el compartimiento estará sometido durante una inmersión. Esta presión aumenta de

forma lineal con la profundidad que el cuerpo alcance. Gracias a esta proporcionalidad es fácil determinar la presión a la cual un sumergible estará expuesto, y así diseñar y elegir él o los materiales con los que se podrá construir el compartimiento seco.

Todo ROV está diseñado con al menos un compartimiento que protege del exterior a los elementos de control del sumergible. Sin embargo, los elementos de control tienen que comunicarse con los motores, los accesorios y la superficie. Estas conexiones se pueden implementar garantizando que no existan filtraciones de agua que pongan en riesgo la integridad de los equipos. El diseño y construcción del compartimiento puede llegar a ser la parte más compleja y crítica de todo sumergible.

El primer inconveniente se presenta al diseñar un compartimiento que permita un fácil acceso a los componentes en su interior y que los mantenga aislados del exterior. El compartimiento debe estar formado por un mínimo de dos partes que permitan un fácil ensamblado y mantengan una barrera impermeable. Las partes deben ensamblarse utilizando técnicas y elementos de sellado que soporten altas presiones.

El segundo inconveniente se presenta el momento de comunicar y alimentar los motores con su respectivo control y fuente de potencia. De igual forma el compartimiento de un ROV debe mantener una conexión directa con la superficie para la transmisión de datos. La comunicación y alimentación entre dispositivos se realiza por medio de cables, y es necesario realizar una conexión hermética que proteja la integridad de los equipos y compartimientos. Existen empresas que se dedican a la producción de conectores acuáticos para todo tipo de transmisión de datos y potencia. Un ejemplo de estos conectores se puede apreciar en la Ilustración 12. Sin embargo, el

precio de cada conector oscila entre los \$100 a \$300 USD y es necesaria su importación.



Ilustración 12 Conectores Acuáticos.

Por el elevado costo y falta de disponibilidad de conectores acuáticos, muchos proyectos ROV's universitarios alrededor del mundo innovan diversos tipos de conectores con materiales disponibles y económicos.

Para comprobar el correcto desempeño y estanqueidad de los conectores para el compartimiento, siempre es necesario realizar pruebas de hermeticidad y presión. Sólo si las pruebas de presión y hermeticidad cumplen las condiciones esperadas, se puede garantizar la estanqueidad del compartimiento.

Movilidad

Los sumergibles deben ser capaces de desplazarse fácilmente en el medio acuático. Para lograr movilidad en un sumergible, es necesario instalar uno o varios motores dependiendo del grado de movilidad y agilidad deseado. Los sumergibles ROV's utilizan diversas combinaciones de motores para lograr movilidad en diferentes ejes. El objetivo es encontrar la correcta combinación y alineación de motores que permita al sumergible movilizarse para completar una tarea.

El submarino estará en un espacio tridimensional y tendrá seis grados de libertad, es decir, el submarino tendrá tres movimientos de traslación y tres rotaciones independientes e individuales en cada eje del espacio. Los movimientos básicos que un sumergible debe tener son: *desplazamiento en el eje vertical, desplazamiento en los dos ejes horizontales y al menos dos rotaciones*. Con la combinación de estos movimientos básicos, un ROV es capaz de moverse sin problemas en el medio acuático.

La movilidad de un ROV estará limitada por varios factores de funcionalidad, diseño y del medio acuático. De acuerdo a la función que vaya a cumplir cada ROV se debe determinar la movilidad; se debe definir si el ROV necesita agilidad, potencia o precisión en sus movimientos.

Otro factor que limita la movilidad de un sumergible es la resistencia del agua. El agua es un fluido que presentará resistencia al cuerpo que trate de desplazarse en ella. Esta resistencia reducirá la velocidad de avance o de rotación del cuerpo. Mientras más grande sea el cuerpo a desplazarse mayor será la resistencia que se genere. Para compensar esta pérdida de movilidad es necesario que el sumergible presente una geometría hidrodinámica. La clave del diseño se encuentra en reducir el área de contacto del cuerpo con el fluido; cada geometría presenta un coeficiente de fricción de acuerdo a su área.

Las corrientes marinas son impredecibles, y definirán la estabilidad y movilidad de un ROV. La dirección e intensidad de una corriente marina puede aumentar o disminuir la velocidad de avance de un sumergible. El sumergible debe tener la fuerza necesaria en sus motores para evitar ser arrastrado por la corriente marina.

Elementos de protección

Para el diseño de ROV's es muy importante considerar la protección del sumergible y de los componentes que lo conforman. Dependiendo de la función que cada ROV cumpla, estará equipado con diversos equipos, y cada uno de los equipos debe estar protegido. El ROV debe diseñarse con un chasis o estructura rígida que proteja los equipos, compartimientos y motores.

El Archipiélago de Galápagos está formado por roca volcánica y rodeada por fuertes corrientes marinas. El ROV debe estar construido con un chasis fuerte que proteja los equipos del sumergible contra cualquier impacto.

La flotabilidad también es un parámetro de protección muy importante. Los ROV's deben mantener una flotabilidad positiva, para que en el caso de una emergencia o falla de los equipos el sumergible sea capaz de llegar a superficie sin inconvenientes. Al mantener una flotabilidad positiva en el ROV se asegura que el equipo no se va a perder en el fondo del mar.

Adicionalmente, es necesario diseñar una línea de seguridad que conecte al ROV a una embarcación o muelle. La línea de seguridad permitirá recuperar el sumergible en cualquier tipo de emergencia.

Materiales

Para la construcción de un ROV se debe elegir materiales que sean resistentes, y livianos. Como se mencionó en la sección anterior, es importante que el ROV tenga una flotabilidad positiva. Para que el sumergible pueda mantenerse a flote el peso del fluido desplazado debe ser mayor al peso del sumergible.

Es importante que los materiales para el sumergible sean livianos y tengan propiedades mecánicas como:

- *Tenacidad*: es la resistencia que presenta un material a la ruptura.
- *Elasticidad*: es la facilidad de recuperar la forma original de un material después de ser sometido a una fuerza y deformación.
- *Dureza*: es la resistencia que presenta un material a ser penetrado.

Es muy importante utilizar materiales que no sean susceptibles a la corrosión ya que la salinidad del agua provocará la oxidación de diferentes materiales metálicos.

La corrosión es el deterioro de un material por un efecto electroquímico causado por el entorno. La salinidad del mar genera el efecto electroquímico en los metales; y existen microorganismos llamados ferro bacterias que son capaces de acelerar el proceso de oxidación en los metales. Muchos ROV's son diseñados con materiales no metálicos para sobrellevar los problemas de la corrosión. Sin embargo existen aleaciones metálicas como el acero inoxidable que permiten contrarrestar los efectos nocivos de la corrosión.

Para la construcción del compartimiento estanco deben elegirse materiales que soporten altas presiones, tengan propiedades elásticas y que impidan el paso de agua. Para el ensamble de partes en el compartimiento, se deberá utilizar elementos elásticos combinados con métodos y técnicas de sellado para garantizar una barrera hermética.

Estabilidad

Un sumergible debe mantener una posición estable durante toda la inmersión para lograr un control eficiente. Una posición estable permite mantener el control del sumergible durante cualquier flujo turbulento que podría desestabilizar al sumergible.

Para lograr una estabilidad en el sumergible es necesario ubicar el centro de masa del cuerpo lo más bajo posible. De esta forma, cuando el submarino se dé la vuelta podrá regresar a la posición estable sin ninguna dificultad. Si los pesos están mal distribuidos en el sumergible durante una inmersión, el sumergible perderá maniobrabilidad y será difícil controlar la inmersión.

Cuando un sumergible está en equilibrio, el centro de gravedad y el centro de flotabilidad se encuentran alineados en el mismo eje vertical. El centro de gravedad CG es el punto donde se considera concentrada la masa de un cuerpo. El centro de flotabilidad CB es el centro de gravedad de la masa de fluido desplazado, y se encuentra ubicado en el centro geométrico del volumen desplazado (San Francisco Maritime National Historical Park).

La ilustración 13 presenta las fuerzas resultantes de un cuerpo totalmente sumergido en el agua. El empuje y el peso mantienen la estabilidad del cuerpo.

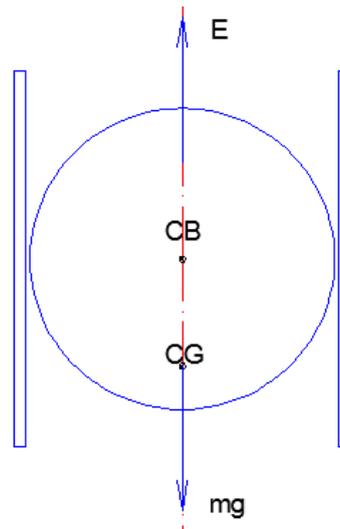


Ilustración 13 Fuerzas resultantes en un cuerpo sumergido

Para entender el comportamiento del submarino bajo el agua, se puede comparar con un péndulo físico. El péndulo físico, a diferencia de un péndulo simple, no tiene concentrada toda su masa en punto y permitirá aproximar el comportamiento de un cuerpo sumergido a la oscilación de un péndulo (Zemansky y Sears).

La Ilustración 14 presenta un cuerpo sumergido desplazado un ángulo θ de su posición de equilibrio.

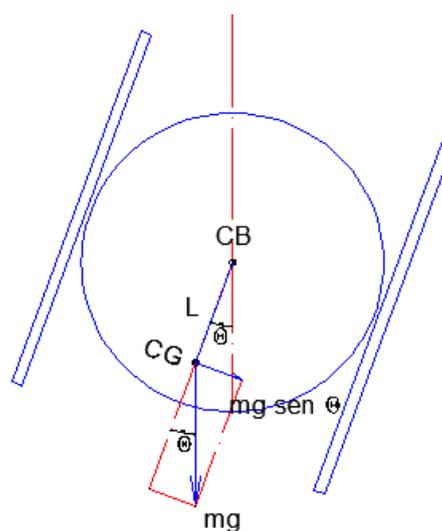


Ilustración 14 Cuerpo sumergido desplazado un ángulo θ de su posición de equilibrio

El eje de rotación será el centro de flotabilidad CB por que estará centrado en la estructura cuando el cuerpo este sumergido. El centro de gravedad CG se desplazara con un ángulo θ cuando el cuerpo sea perturbado. La distancia L entre el CG y CB y por la acción de la gravedad mg crearan un momento M sobre el cuerpo sumergido.

$$M = mgl \sin \theta$$

Si θ es muy pequeño, se puede remplazar $\sin \theta$ por θ . El Momento será:

$$M = mgl\theta$$

Por tanto el cuerpo está sometido a un momento elástico con una constante de elasticidad k :

$$k = mgl$$

El Momento elástico M permitirá que el cuerpo después de ser perturbado, regrese a su posición natural de equilibrio.

El submarino durante una inmersión estará bajo la influencia de corrientes marinas que perturbaran la estabilidad. Si el cuerpo mantiene un bajo centro de gravedad, el momento elástico generado por las oscilaciones permitirá que el cuerpo regrese paulatinamente a un estado estable.

3. Alcance y limitaciones

3.1 *Características esperadas del sumergible*

El Submarino USFQ se utilizará para realizar tareas de investigación y exploración de la vida marina en el archipiélago de Galápagos. A partir de las necesidades de exploración de GAIAS se definió el alcance del proyecto submarino USFQ.

La mayor concentración de peces alrededor de las islas e islotes se encuentra entre los 30 a 40 metros de profundidad. Un buzo con licencia "open water" puede realizar inmersiones a una profundidad máxima de 18 metros. Un investigador tendrá que realizar diversos cursos que lo certifiquen como un buzo profesional para poder realizar inmersiones sobre los 30 a 40 metros.

La profundidad de operación para el sumergible se limitó a 50 metros de profundidad. Un sumergible que pueda realizar inmersiones hasta 50 metros de profundidad, tendrá la oportunidad de realizar la observación y exploración deseada sin poner en peligro a los investigadores.

Un buzo profesional puede bucear a 40 metros de profundidad por un tiempo menor de 10 minutos; permanecer por mayor tiempo a tal profundidad puede causar severos daños físicos. Si un investigador desea realizar observaciones a 40 metros de profundidad necesitaría realizar varias inmersiones, ampliando el riesgo al que está expuesto. Un buzo que realiza inmersiones bajo los 30 metros de profundidad podría sufrir una narcosis por hidrogeno. La narcosis por hidrogeno es una intoxicación que sufren los buzos por influencia del nitrógeno y la presión del agua; la intoxicación altera la coordinación y personalidad de un buzo de forma similar a los efectos del

alcohol y drogas. A mayor profundidad mayor será el efecto de la narcosis por nitrógeno.

Para realizar una investigación es necesaria la recopilación de información. El submarino USFQ será una herramienta valiosa para los investigadores, debido que puede equiparse con diferentes tipos de equipos e instrumentos. La observación será el principal método de investigación durante cualquier inmersión en el archipiélago. El sumergible estará equipado con equipos que permitan grabar audio y video del entorno marino durante toda inmersión.

El Submarino USFQ evitará que el investigador esté expuesto a cualquier riesgo. Además, el Submarino USFQ podrá trabajar por mayor tiempo y a una mayor profundidad. El investigador podrá trabajar a salvo y por varias horas desde la superficie. El Submarino USFQ tendrá una autonomía de 2 horas de trabajo.

Las corrientes marinas en el archipiélago de Galápagos varían mucho a lo largo de las islas e islotes y de la época del año. Como se explicó en el capítulo dos, existen varias corrientes que aumentan su intensidad varias veces en el año. De acuerdo a los biólogos marinos que trabajan en GAIAS la corriente máxima a una profundidad de 50 metros oscila entre 4 a 5 nudos. El Submarino USFQ deberá mantener la estabilidad, maniobrabilidad, y agilidad durante una inmersión en presencia de estas corrientes marinas.

3.2 Manipulación y Transporte del sumergible

Como *manipulación y transporte* del sumergible, se define a qué tan fácil va a ser cargar al submarino y manipularlo tanto dentro como fuera del agua.

El submarino debe ser transportado en tierra o hacia alguna embarcación, desde la cual va a ser transportado a algún lugar específico en donde se pretende realizar la investigación. Por esta razón el submarino debe ser relativamente liviano, para que pueda ser cargado y transportado por dos personas con facilidad. Además, las dimensiones del submarino deben permitir su fácil manipulación y transporte en vehículos en tierra y en agua.

El submarino tendrá como limitaciones:

- 40 kg de masa.
- 1.0 x 0.5 x 0.5 m de dimensión.

El submarino debe ser construido en diferentes módulos que permitan al usuario armar y desarmar en casos de necesidad; también, los módulos de construcción permitirán el acceso a componentes y facilitaran el mantenimiento del Submarino.

El bloque de control y potencia que estará en superficie durante toda inmersión, está conformado por un conjunto de baterías y un computador portátil. El bloque de potencia y control debe ser pequeño, y debe mantener a los equipos alejados de contacto con el agua.

El conjunto de cuatro baterías representa un peso próximo a 15 kg. El conjunto de baterías no se instaló dentro del submarino por que ocuparía demasiado espacio, y aumentaría considerablemente el peso del vehículo. Existe la probabilidad de que sea necesario aumentar el peso de la estructura para lograr una estabilidad y flotabilidad adecuada, pero este aumento de masa se realizará con elementos pequeños que permitan distribuir la masa a lo largo de toda la estructura garantizando

la estabilidad y flotabilidad adecuada. Las baterías cumplirían el requisito de masa pero no permitirán ajustar la estabilidad del vehículo en el agua.

3.3 *Resumen de características deseadas*

A continuación se presentaran los requerimientos generales del proyecto Submarino USFQ. La tabla 1 Requerimientos generales resume las características que el proyecto Submarino USFQ debe presentar.

Tabla 1 Requerimientos generales

Requerimientos Generales	
Profundidad de Inmersión	50 metros
Autonomía	2 horas
Peso	40 kilogramos
Dimensiones	Largo 1,0 m Ancho 0.50 m Alto 0.50 m
Flotabilidad	Positiva
Velocidad	5 nudos
Maniobrabilidad	mínimo 5 DoF
Materiales	No corrosibles
Equipos	Cámara de video Hidrófono Sensor de Presión y Temperatura
Diseño	Ensamblaje Modular

Las características presentadas en la tabla 1 serán los parámetros de diseño con los que se desarrollara el proyecto. Sin embargo, algunos de ellos podrían variar de acuerdo a la evolución del proyecto.

3.4 Planificación y presupuesto

El primer paso para la elaboración del proyecto submarino USFQ fue la investigación sobre sumergibles ROV's. Se encontró información sobre sumergibles ROV's en Universidades en Estados Unidos y en diferentes fabricantes en todo el mundo. Los proyectos realizados por varias personas e instituciones en todo el mundo, nos presentaron los numerosos equipos y componentes que son necesarios para la construcción de un sumergible. Además, presentaron reseñas de industrias especializadas en la construcción de ROV's y sus diferentes equipos.

Se contactó a cada una de las empresas especializadas en ROV's para formular un primer presupuesto tentativo para la construcción de un sumergible. Lamentablemente no existen en Ecuador industrias que importen o manufacturen equipos especializados para sumergibles. Todos los elementos electrónicos para la construcción del Submarino USFQ tenían que ser comprados en el exterior. Sin embargo, existieron Industrias locales que disponían de los materiales para la construcción de la estructura del submarino.

Una vez formulado el presupuesto, se desarrolló la propuesta del proyecto Submarino USFQ.

Se presentó el proyecto Submarino USFQ con un costo de \$14.000, (catorce mil dólares americanos) a las autoridades de la USFQ.

Una vez aprobado el presupuesto, se procedió a realizar la compra en el exterior de los diferentes componentes electrónicos: motores, controladores, cámara de video, hidrófono, joystick, USB grabber, y procesador. Los componentes electrónicos representaron el 75% del costo.

Para la planificación del proyecto se tomó en cuenta los tiempos de entrega de materiales e importación de equipos. El tiempo de entrega en la importación de equipos podía variar entre semanas y meses. Para evitar atrasos con el cronograma del proyecto, se realizó una distribución de tareas de acuerdo a la disponibilidad de equipos y materiales. Se dividieron tareas entre: investigación, compra de materiales, programación, diseño, construcción, ensamblaje y pruebas. La tabla 2 es un diagrama de Gantt donde se presenta el tiempo requerido para completar cada tarea del proyecto.

Tabla 2 Diagrama de Gantt

Tareas	2010					2011			
	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril
investigación	█	█	█	█	█				
Compra de materiales			█	█	█	█	█		
Programación		█	█	█	█	█			
Diseño		█	█	█	█	█	█		
Construcción						█	█	█	
Ensamblaje								█	█
Pruebas								█	█

Las tareas de programación y diseño se realizaron antes de la compra de equipos; con la llegada de los equipos se procedió a realizar la construcción, ensamble y pruebas del submarino USFQ.

La programación y diseño del submarino se realizó en la USFQ. Se utilizó el software de programación *LabView* y el software de diseño *Autodesk Inventor*, disponibles en los laboratorios del politécnico, para desarrollar el proyecto submarino. Las tareas restantes se realizaron en el taller de Ingeniería Mecánica de la USFQ.

4. Componentes Electrónicos

4.1 Video

Debido a la necesidad de investigación de vida marina, el sistema de visión fue de alta prioridad para la construcción del sumergible, por lo que se necesitó utilizar una cámara submarina. Esta cámara se situará en el frente del mismo, para permitir al operario visualizar en tiempo real lo que está en frente del submarino y así poder controlarlo y evitar colisiones no deseadas. Además, se requería que el submarino tenga la capacidad de grabar videos y tomar fotos de la flora y fauna submarina en Galápagos.

La cámara seleccionada es a prueba de agua y puede resistir profundidades de hasta 250 m. Tiene un lente de gran apertura, de alta sensibilidad a la luz y pose un control de luz con 12 LED's, que nos permite obtener muy buenas imágenes submarinas. Además la cámara puede operar a temperaturas entre -10 a 50 grados centígrados. Los datos técnicos de la cámara de video Delta visión se encuentran en el Anexo C.

4.2. Audio

El audio también es un elemento muy importante del submarino, ya que para la investigación de animales es necesario asociar los videos a los sonidos. Se colocó un hidrófono en la parte frontal del submarino para poder escuchar ruidos de animales o como estos se comunican bajo el agua.

El hidrófono tiene un cable largo de 50 m por lo que es necesario un amplificador de señal. El amplificador está ubicado en superficie y nos permite recibir la señal de audio fuerte y claramente. Las hojas técnicas del micrófono y del amplificador están documentadas en el Anexo C.

4.3. Sensores

Los sensores nos dan una mejor información del entorno subacuático y específicamente de la presión y temperatura a la que el submarino está expuesto. El submarino necesita un sensor de presión para que el operario pueda conocer la profundidad a la que se encuentra el vehículo. Debido a la profundidad máxima de 50 metros a la que se espera trabajar con el submarino, este sensor debe tener un rango que cubra esta profundidad. Para el proyecto se utilizará un transductor de presión AST4000 con un rango de operación de 0 a 20 atm. El Anexo C presenta las hojas técnicas del transductor de presión.

El submarino también debe tener un sensor de temperatura, en este caso una termocupla, para conocer la temperatura del agua en la que se encuentra sumergido. Para el proyecto se utilizará una termocupla tipo K con rango de operación de 0° a 250° Celsius.

4.4. Motores y Controladores

El Submarino debe tener muy buena maniobrabilidad, y como se presentó en los requerimientos básicos del proyecto se necesita por lo menos tener 5 grados de libertad. La mayor parte de la investigación del proyecto se realizó sobre el tema de maniobrabilidad de sumergibles y ROV's. De acuerdo a la investigación, cada grado de libertad está vinculado a una combinación de motores. Existen ROV's que funcionan con combinaciones de 4 hasta 8 motores. Al aumentar el número de motores, aumentan los grados de libertad de un sumergible. Para el proyecto Submarino USFQ se eligió utilizar una combinación de 6 motores; esta combinación permitirá realizar traslaciones verticales, horizontales, laterales y rotaciones en diferentes planos.

El Submarino USFQ está equipado con 6 motores (Thrusters) Seabotix BDT-150. Seabotix es una empresa estadounidense dedicada a la construcción de mini ROV's, y equipos para sumergibles. Se eligió los thrusters Seabotix por ser económicos, resistentes y de simple integración.

Un thruster Seabotix BTD 150 puede generar 2.2 kgf de empuje; tiene un consumo de 4.25 amperios y trabaja con 19 Voltios dc. El thruster Seabotix BTD 150 puede trabajar a una profundidad máxima de 150 metros, tiene un peso de 754 gramos, y tiene 17 cm de largo y 9 cm de altura.

El submarino USFQ está equipado con 3 controladores Sabertooth 2x10. Un controlador Sabertooth 2x10 puede suministrar hasta 10 amperios a dos motores dc sin escobillas. El controlador está provisto de disipadores de calor y protectores de sobrecarga para proteger la integridad del controlador. Además, el controlador tiene varios modos de operación: *Analog Input*, *R/C Input*, *Simplified Serial*, y *Packetized Serial*. Para el Submarino USFQ se utilizó el modo *Analog Input*

El modo Analog Input o modo entrada análoga traducido al castellano, permite al controlador usar una o dos entradas análogas para controlar la velocidad y giro de cada motor. El rango de voltaje de entrada es de 0 a 5 Voltios.

4.5 Procesador

Para una fácil y eficiente comunicación entre la computadora y el submarino se utilizó un sistema de control y adquisición de datos muy preciso, de alto rendimiento y fiabilidad llamado CompactRIO (cRIO) de National Instruments.

El cRIO es un pequeño procesador que tiene un módulo análogo y otro digital para recibir y procesar la señal proveniente de sensores. El módulo análogo nos permite recibir

la información de los sensores de presión y temperatura y mediante una diferencia de voltajes obtienen la información de la presión externa del vehículo y de la temperatura del agua.

El procesador cRIO usa una salida digital para crear una “PWM”. La modulación de ancho de banda o PWM (Pulse Wide Modulation) es una técnica de control para regular la cantidad de energía que se envía a una carga. Es necesario utilizar un filtro de PWM para conectar la señal al controlador Sabertooth. El filtro PWM genera una salida de voltaje análoga a partir del PWM. El filtro PWM presentado en la ilustración 15 es recomendado por el fabricante. Está compuesto por una resistencia de 10k ohmios y un capacitor de 0.1n faradios.

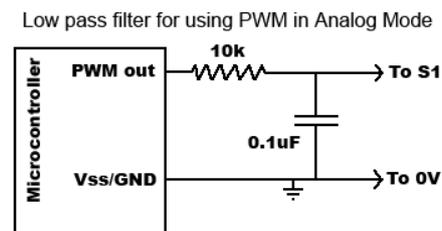


Ilustración 15 Filtro PWM

Para el proyecto submarino el procesador cRIO creara la señal PWM que entrara al filtro, la señal filtrada se conectara a una entrada del controlador Sabertooth 2x10. Cada motor Seabotix BDT-150 será controlado gracias a una señal análoga generada por el filtro PWM.

Toda la información es transferida mediante comunicación de red local entre el cRIO y un computador mediante un cable de Ethernet.

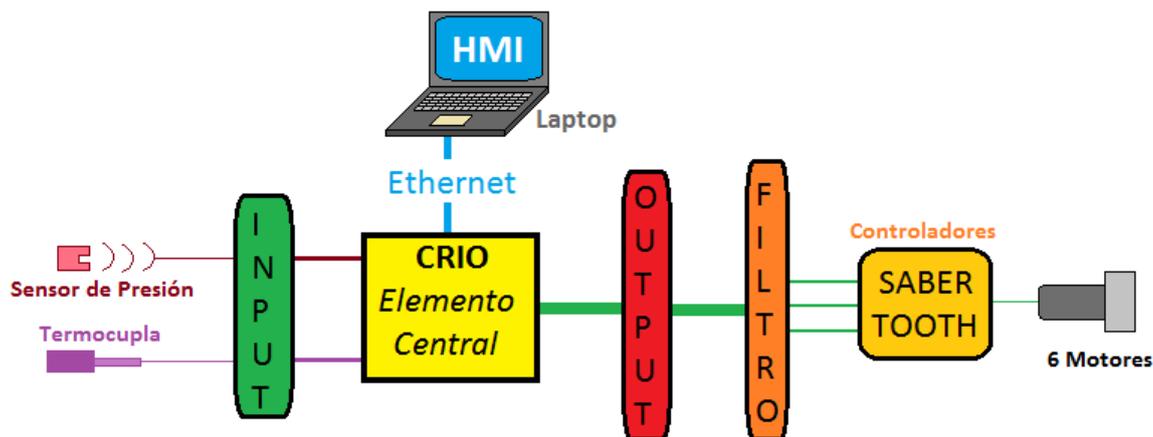


Ilustración 16 Esquema del Procesador

En la ilustración 16 se puede observar un esquema del cRIO como elemento principal de comunicación entre todos los elementos del submarino. EL cRIO tiene tanto entradas como salidas. Recibe las entradas de señales análogas de los sensores de presión y de temperatura y se comunica con el usuario con el HMI (Human Machine Interface) mediante un cable Ethernet.

Todos los manuales del controlador y de los módulos digital y análogo, están presentados en detalle en el Anexo C.

4.6 *Cable Umbilical*

La transferencia de señales y de potencia entre la superficie y el submarino se realiza mediante un cable umbilical de 50 m que tiene agrupado cuatro cables independientes más pequeños.

- El primero es el cable del audio que recibe la señal del hidrófono y se conecta directamente al computador.
- El segundo es el cable de video que recibe imágenes de la cámara y también se conecta directamente al computador.
- El tercer cable es el de potencia que se conecta al banco de baterías y alimenta a todos los componentes electrónicos del submarino.
- El cuarto es el cable de Ethernet que se conecta entre el cRIO y el computador y permite la comunicación entre el usuario y el submarino.

En la Ilustración 17 se muestra un esquema completo de estos cables.

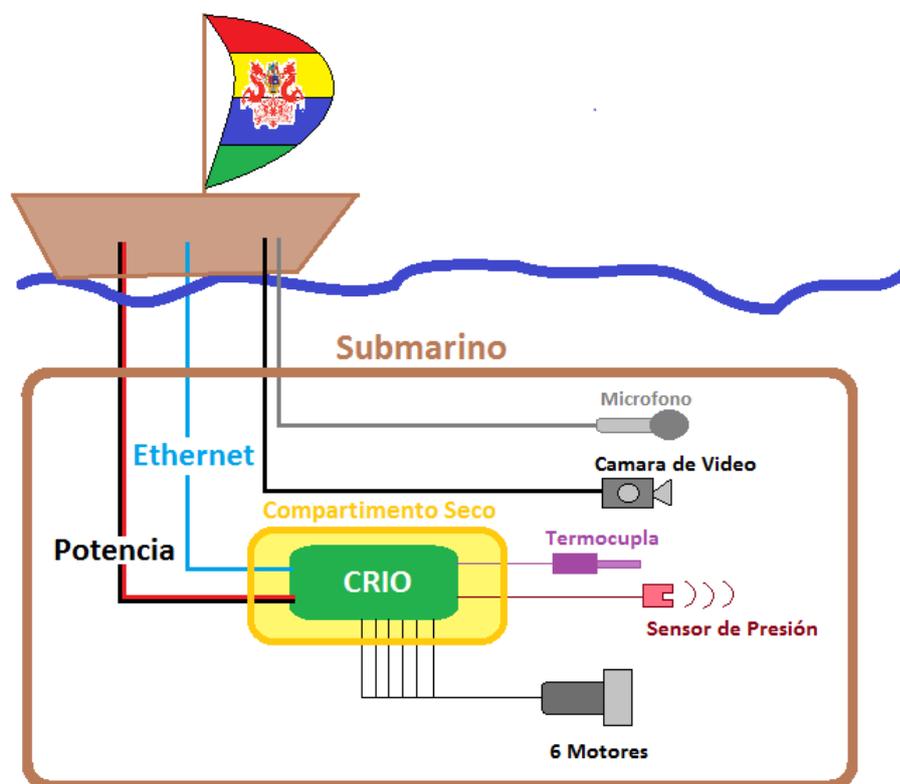


Ilustración 17 Esquema de la comunicación del Submarino

El cable de Ethernet conecta directamente al computador en superficie con el procesado cRIO. El joystick se conecta al computador y transmite las señales por el cable Ethernet hacia el procesador. El procesador está conectado a los controladores y a los sensores. Los controladores están conectados con los motores. La comunicación y control de cada elemento del submarino se realiza gracias al cable de Ethernet.

Para ilustrar la conexión de comunicación entre los elementos de control se presenta la ilustración 18.



Ilustración 18 Comunicación de los elementos de control

El cable de potencia transmite energía desde las baterías a todos los componentes electrónicos dentro del submarino. Dentro del compartimento seco el cable principal se divide para alimentar por separado a cada componente: controladores, motores y sensores.

Como elemento de seguridad se instaló un RELAY entre la conexión del procesador y los controladores de los motores. El RELAY impide que la alimentación llegue directamente hacia los motores; el RELAY solo es activado cuando el cRIO se ha conectado con el computador en superficie y el programa de control del submarino esté funcionando. Una vez que el RELAY es activado desde la interfaz del usuario, la alimentación se completa hacia a los controladores y los motores.

Para ilustrar la conexión de potencia entre los elementos de control y seguridad se presenta la ilustración 19.



Ilustración 19 Comunicación de elementos de potencia

Al realizar las pruebas de conexión, antes de probar al submarino en el agua, se presentó la necesidad del RELAY, el cual fue integrado inmediatamente entre el procesador y los controladores. La placa del RELAY se muestra en la Ilustración 20. El problema que se presentaba era que al encender el submarino la corriente pasaba directamente al cRIO al igual que a los controladores y motores. El cRIO enviaba una señal de 0 V a los controladores al no estar conectado con la computadora todavía, lo que significaba que los motores se prendían a toda potencia en reversa. Al implementar el RELAY se puso un botón dentro del programa principal para poder prender y apagar los motores en cualquier momento deseado. Esto le da independencia al cRIO y al programa para poder funcionar sin necesidad de utilizar los motores.

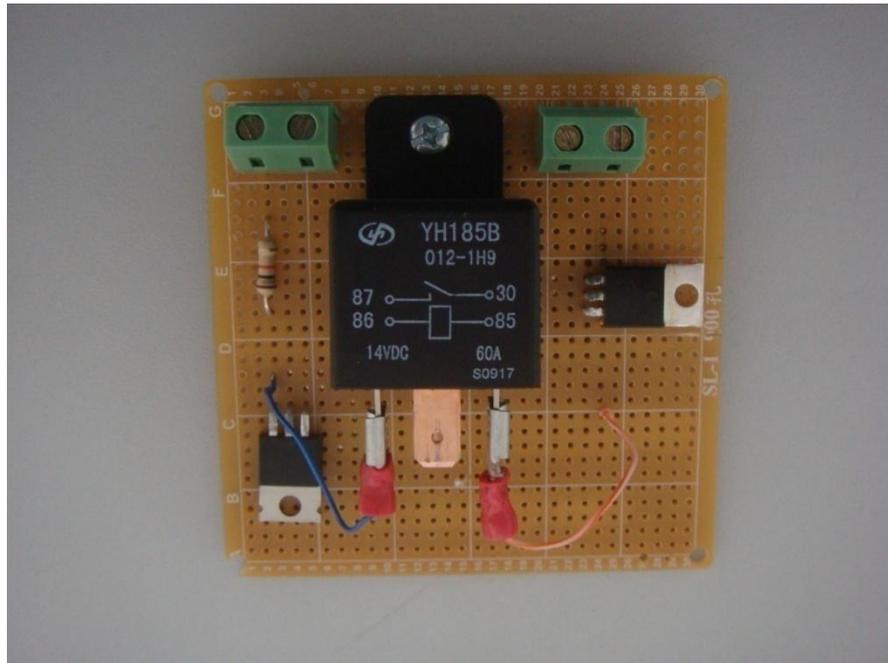


Ilustración 20 Circuito de Relay

Luego de haber realizado varias pruebas en la piscina llegamos a la conclusión que dentro del programa era necesario tener un botón para invertir el sentido de los motores. Se implementó este botón en la interfaz en la pantalla principal para todos los motores, lo que permite invertir cada motor independiente de los demás en caso de que sea necesario.

5 Diseño Mecánico

5.1 Alineación motores para maniobrabilidad

El submarino USFQ se desplazara en el agua; como todo fluido, el agua presentara una resistencia al movimiento. La resistencia del fluido es una fuerza que se genera cuando un objeto se mueve atreves del fluido. La resistencia del fluido depende principalmente de la velocidad con la que el cuerpo atraviesa el fluido, y actúa en sentido opuesto al del movimiento del cuerpo.

La ecuación de la fuerza de resistencia para fluidos F_D es:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho v^2 A$$

Dónde:

- ρ = Densidad del fluido
- v = Velocidad del cuerpo
- A = Área nominal del cuerpo
- C_D = Coeficiente de fricción.

Para el Submarino USFQ, el fluido será agua salada con una densidad de 1.028 kg/L, y el área nominal dependerá de la geometría del cuerpo. La velocidad estará dada por el fluido en movimiento y se usará una velocidad de 5 nudos como corriente de referencia.

El coeficiente de fricción C_D es una medida adimensional que se usa para cuantificar la resistencia que un cuerpo genera al desplazarse en un fluido. El valor del coeficiente de fricción cambia de acuerdo a la superficie que se encuentre en contacto con el fluido. Un cuerpo tendrá menor coeficiente de fricción si su geometría es más aerodinámica o hidrodinámica, de acuerdo al fluido en el que se encuentre el cuerpo (White).

Shape	Drag Coefficient
Sphere	0.47
Half-sphere	0.42
Cone	0.50
Cube	1.05
Angled Cube	0.80
Long Cylinder	0.82
Short Cylinder	1.15
Streamlined Body	0.04
Streamlined Half-body	0.09

Measured Drag Coefficients

Ilustración 21 Coeficientes de fricción según la geometría

Para determinar la fuerza necesaria con la que el Submarino USFQ debe desempeñarse, se procedió a calcular la fuerza de fricción generada por el submarino en presencia de una corriente marina con una velocidad de 5 nudos. Se eligió una velocidad de corriente de 5 nudos, porque es la velocidad de corriente máxima que investigadores han estimado sobre los 50 metros de profundidad en el archipiélago de Galápagos. Se utilizó un coeficiente de fricción de 0.82 por la geometría cilíndrica de acuerdo a la ilustración 21 y se utilizó un diámetro de 30 centímetros para el compartimiento seco del Submarino USFQ.

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho v^2 A \quad v = 5 \text{ nudos} = 2.57 \frac{m}{s}$$

$$F_D = \frac{1}{2} 0.82 * 1.03 \frac{kg}{L} * \left(2.57 \frac{m}{s}\right)^2 * \pi * (0.15m)^2$$

$$F_D = 197,16 N$$

Un motor Seabotix BTD-150 tiene una fuerza de 2.2 kgf, que es equivalente a 21,57 Newton. Utilizando los 6 motores Seabotix BTD-150 en una misma dirección generarían una fuerza equivalente a 129.42 Newton.

Para este caso la fuerza de fricción generada por el fluido es mayor que la fuerza de avance generada para los motores. Para reducir la fuerza de fricción generada por el fluido, es necesario reducir el área nominal y el coeficiente de fricción en contacto del cuerpo.

Por ejemplo:

Si se reduce el área de contacto a la mitad a 15 cm de diámetro, la fuerza de fricción del fluido será:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho v^2 A \quad v = 5 \text{ nudos} = 2.57 \frac{m}{s}$$

$$F_D = \frac{1}{2} 0.82 * 1.03 \frac{kg}{L} * \left(2.57 \frac{m}{s}\right)^2 * \pi * (0.075m)^2$$

$$F_D = 47.99 N$$

Una geometría cónica reduciría el coeficiente de fricción a 0.50, reduciendo significativamente la fuerza de fricción del fluido.

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho v^2 A \quad v = 5 \text{ nudos} = 2.57 \frac{m}{s}$$

$$F_D = \frac{1}{2} 0.50 * 1.03 \frac{kg}{L} * \left(2.57 \frac{m}{s}\right)^2 * \pi * (0.15m)^2$$

$$F_D = 120.22 N$$

Los 6 motores Seabotix BDT-150 alineados en una dirección generan una fuerza mayor a las fuerzas de fricción calculadas. Sin embargo, si se alinea los 6 motores en una misma dirección el vehículo perderá maniobrabilidad.

Para reducir la fuerza de fricción, se diseñó una alineación de 6 motores que permita reducir el área de contacto y el coeficiente de fricción del submarino, sin perder la maniobrabilidad y los grados de libertad.

Se configuro al Submarino USFQ en dos bases de tres motores alineados en forma cónica distribuidos en la parte delantera y trasera del vehículo. Al alinear los motores en forma cónica se reducirá el área frontal de contacto del cuerpo del submarino y el coeficiente de fricción disminuirá. El coeficiente de fricción real de esta configuración es desconocido, pero para el modelo de las ecuaciones utilizaremos el coeficiente de fricción de 0,82 para una geometría cilíndrica de la Ilustración 16.

Cada base de motores está integrada por tres motores Seabotix BTD-150. Los motores se encuentran alineados en forma cónica, es decir, los ejes de los motores se encuentran elevados 30° sobre eje del cono y mantienen 60° de separación entre ejes.

Dos motores se instalaron en la parte superior de la base con 60° de separación entre motores igual que en la Ilustración 22; los motores se encuentran elevados a 30° de separación de la base estructural. Dos motores en la parte superior optimizaran los movimientos verticales.

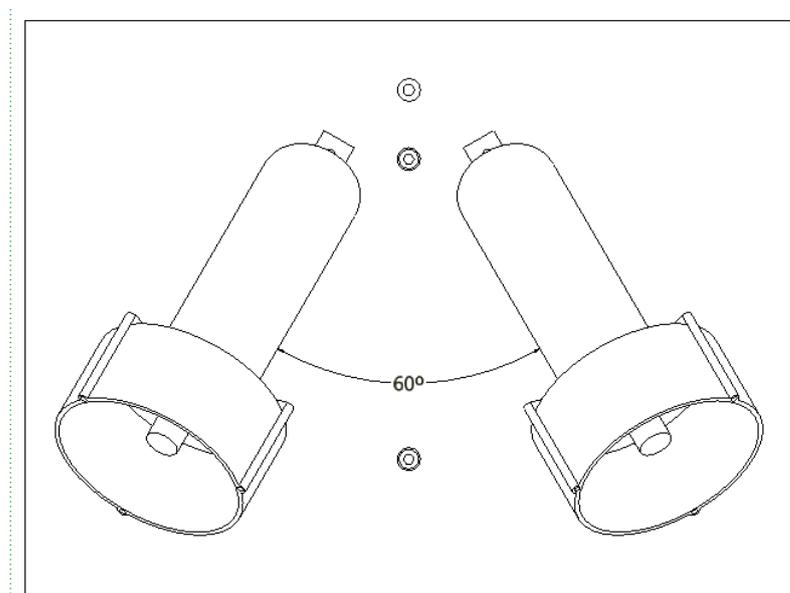


Ilustración 22 Ángulo de separación entre los motores superiores

En la parte inferior de la base se instaló solo un motor en el medio de la placa con una elevación de 30° por debajo de la base como se presenta en la Ilustración 23.

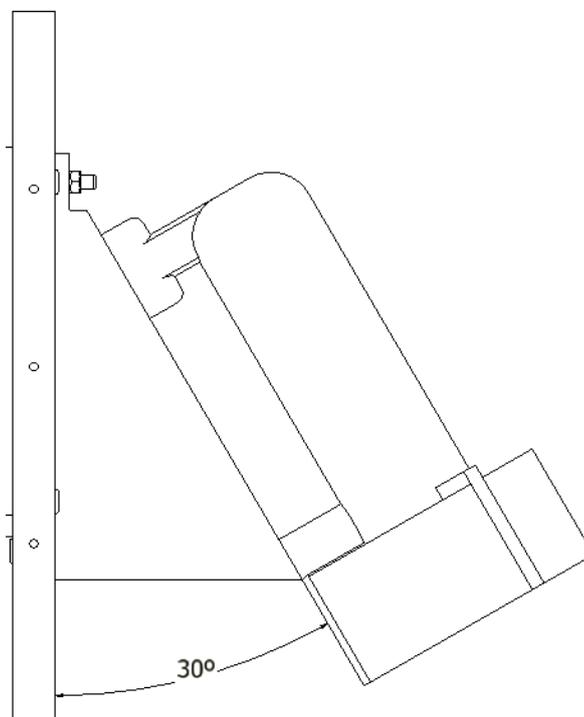


Ilustración 23 Ángulo de separación entre el motor inferior y la placa del módulo.

El área frontal de contacto del vehículo se reducirá en comparación del área nominal del compartimiento seco. La Ilustración 24 presenta la base de motores ensamblados y en ella se resaltó el área frontal de contacto del vehículo. El diámetro del círculo que cubre los tres motores es aproximada 100 mm que representa un área de 0.00785 m^2 . Sin embargo, se utilizará un diámetro de 200 mm donde el conjunto de motores se puede aproximar a un área de contacto A de 0.0314 m^2 .

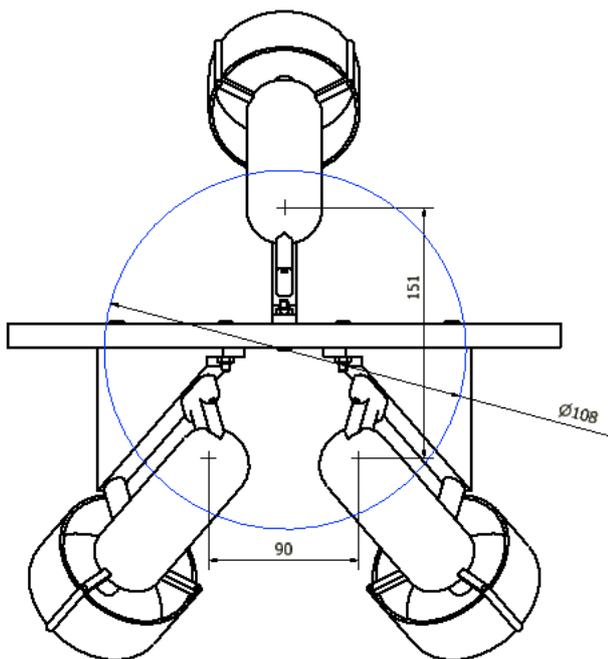


Ilustración 24 Base de motores vista frontal

La alineación de motores utilizando un área circular de 0.0314 m^2 de tendrá una fuerza de fricción F_D aproximada de:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho v^2 A \quad v = 5 \text{ nudos} = 2.57 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$F_D = \frac{1}{2} 0.82 * 1.03 \frac{\text{kg}}{\text{L}} * \left(2.57 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 * 0.0314 \text{ m}^2$$

$$F_D = 87.88 \text{ N}$$

Gracias a la configuración cónica de motores, el submarino tendrá diferentes componentes de fuerza a lo largo de los ejes del Submarino USFQ. Se definió el eje x longitudinal del submarino para movimientos de avance y retroceso, el eje y para movimientos verticales (véase Ilustración 25 como referencia). Los dos motores ubicados en la parte superior serán llamados Motor A y Motor B; el motor ubicado en la parte inferior será llamado Motor C.

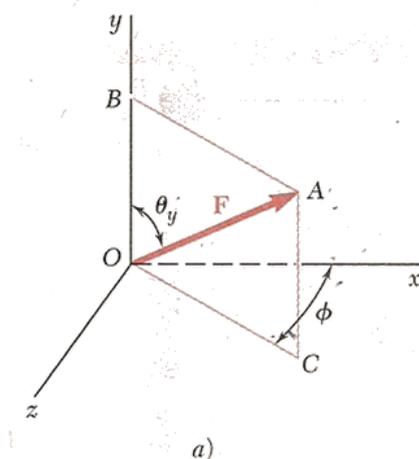


Ilustración 25 Ejes de referencia para calcular la fuerza del motor.

Para el motor A y B, $\theta_y = 60^\circ, \phi = 30^\circ$

$$F_y = F \cos \theta_y = 21,57 \text{ N} \cos 60^\circ = 10.755 \text{ N}$$

$$F_x = F \operatorname{sen} \theta_y \cos \phi = 21,57 \text{ N} \operatorname{sen} 60^\circ \cos 30^\circ = 16.1325 \text{ N}$$

$$F_z = F \operatorname{sen} \theta_y \operatorname{sen} \phi = 21,57 \text{ N} \operatorname{sen} 60^\circ \operatorname{sen} 30^\circ = 9.314 \text{ N}$$

Para el motor C, $\theta_y = 60^\circ, \phi = 0^\circ$

$$F_y = F \cos \theta_y = 21,57 \text{ N} \cos 60^\circ = 10.755 \text{ N}$$

$$F_x = F \operatorname{sen} \theta_y \cos \phi = 21,57 \text{ N} \operatorname{sen} 60^\circ \cos(0^\circ) = 18.62 \text{ N}$$

$$F_z = F \operatorname{sen} \theta_y \operatorname{sen} \phi = 21,57 \text{ N} \operatorname{sen} 60^\circ \operatorname{sen}(0^\circ) = 0 \text{ N}$$

Utilizando las dos bases de motores el submarino puede alcanzar una fuerza de empuje F_{Ex} en sentido horizontal de:

$$F_{Ex} = 2 * (F_{xA} + F_{xB} + F_{xC})$$

$$F_{Ex} = 101.76 \text{ N}$$

Y una fuerza de empuje en sentido vertical de:

$$F_{Ey} = 2 * (F_{yA} + F_{yB} + F_{yC})$$

$$F_{Ey} = 64.53 \text{ N}$$

La configuración y alineación cónica de motores Seabotix BTD-150 permitirá al Submarino USFQ, tener una fuerza de empuje horizontal equivalente 5 motores y una fuerza de empuje vertical equivalente a 3 motores. Suficiente para sumergir al ROV y vencer corrientes marinas de hasta 5 nudos.

El submarino USFQ tiene que realizar movimientos de rotación que permita maniobrar el submarino en el entorno marino. El submarino USFQ podrá realizar rotaciones en su propio eje a través de la configuración cónica de motores.

Para realizar una rotación con el eje vertical, la configuración de motores cónica utilizara solo cuatro motores ubicados en la parte superior de la base de motores del submarino. La distancia entre las dos bases de motores es de un metro.

Utilizando la fuerza de empuje F_{EZ} que actúa en dirección perpendicular a la distancia entre los ejes, se puede calcular el momento generado por los motores.

$$F_{EZ} = 2 * (F_{zA} + F_{zB})$$

$$F_{EZ} = 37.25 \text{ N}$$

Para calcular el momento M que permitirá rotar al submarino, se multiplico la componente F_{EZ} por la distancia d que existe entre los motores y el centro del submarino.

$$M = d \times F_{EZ}$$

$$M = 0.5m * 37.25 \text{ N}$$

$$M = 18.63 \text{ Nm}$$

El momento M generado por el sistema de fuerzas F_{EZ} con respecto al centro del submarino, permite medir la capacidad del submarino para rotar alrededor de su propio eje.

Los bloques de motores con configuración cónica aumentaran la maniobrabilidad y agilidad del Submarino USFQ. Gracias a la programación de control, el Submarino USFQ podrá realizar combinación de movimientos horizontales, verticales y rotacionales con 5 grados de libertad como se planteó en los requisitos del proyecto.

5.2 *Diseño de Compartimiento Seco*

Para el funcionamiento del Submarino USFQ fue necesario el diseño de un compartimiento seco. Este compartimiento debe garantizar la integridad de los equipos de control embarcados al impedir el ingreso de agua. El compartimiento debe soportar la presión del agua a hasta 50 metros y debe impedir el ingreso de agua al interior del compartimiento.

Los equipos de control embarcados son el procesador cRIO y tres controladores Sabertooth 2x10. Para el diseño del compartimiento se consideró las dimensiones de estos componentes. El procesador cRIO es el elemento de mayor dimensión 274 x 93.1 x 88.1 mm y es el que determinó las dimensiones mínimas que necesita el compartimiento estanco. El compartimiento debía ser mayor a 30 x 10 x 10 cm para que el procesador pueda instalarse sin inconvenientes. Adicionalmente, era necesario instalar los tres controladores Sabertooth 2x10 y las diferentes placas de circuitos necesarias para controlar el submarino; las dimensiones mínimas del compartimiento deberían oscilar entre 35 x 15 x 15 cm a 40 x 20 x 20 cm.

Fue necesario elegir entre diferentes geometrías para el compartimiento seco, tomando en cuenta la facilidad de construcción y la resistencia al agua.

En la *Ilustración 21 Coeficientes de fricción según la geometría* se presenta el coeficiente de resistencia de diferentes geometrías. Una geometría esférica y aerodinámica presentan la menor coeficiente de fricción; pero su construcción tiene mayor dificultad y el espacio interior para instalar los componentes es reducido.

Finalmente se eligió la geometría cilíndrica porque permite instalar los elementos de control en su interior fácilmente y es de fácil ensamblaje.

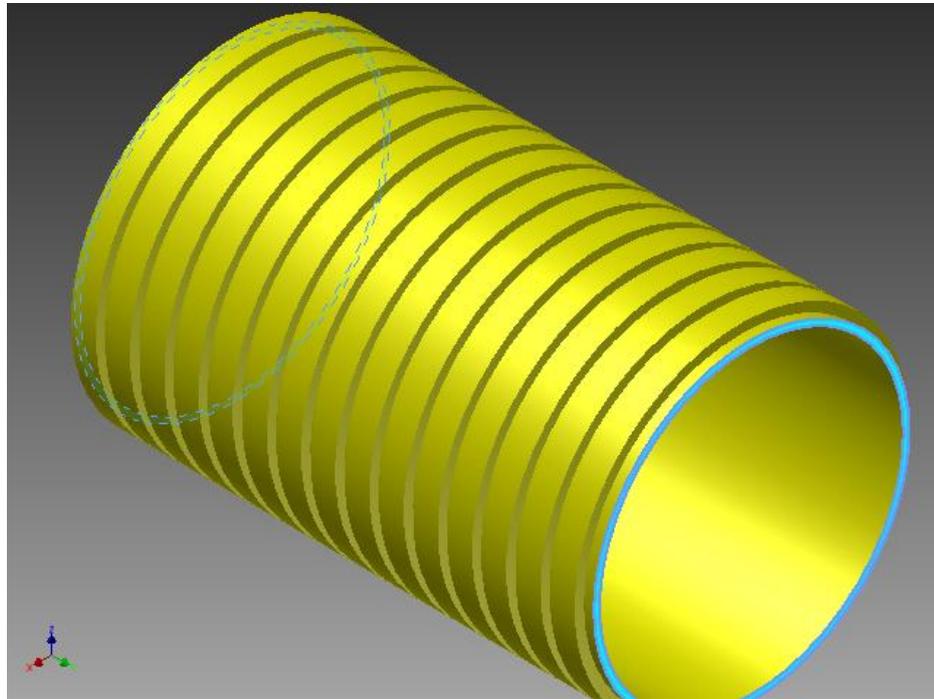


Ilustración 26 Cilindro Compartimiento Seco

La Ilustración 26 presenta un cilindro largo de 385 mm con un diámetro interior de 226 mm y diámetro exterior de 234 mm; el cilindro será la estructura del compartimiento seco que permitirá embarcar los elementos de control. Se instaló los elementos de control en una plancha de acrílico de 350 x 200 x 4mm, la Ilustración 27 y 28 presentan los elementos y conexiones que se embarcaran en el compartimiento. Los controladores Sabertooth se instalaron alineados verticalmente sobre el lado derecho de la placa de control, y en el lado izquierdo se instalaron las diferentes placas de circuitos.

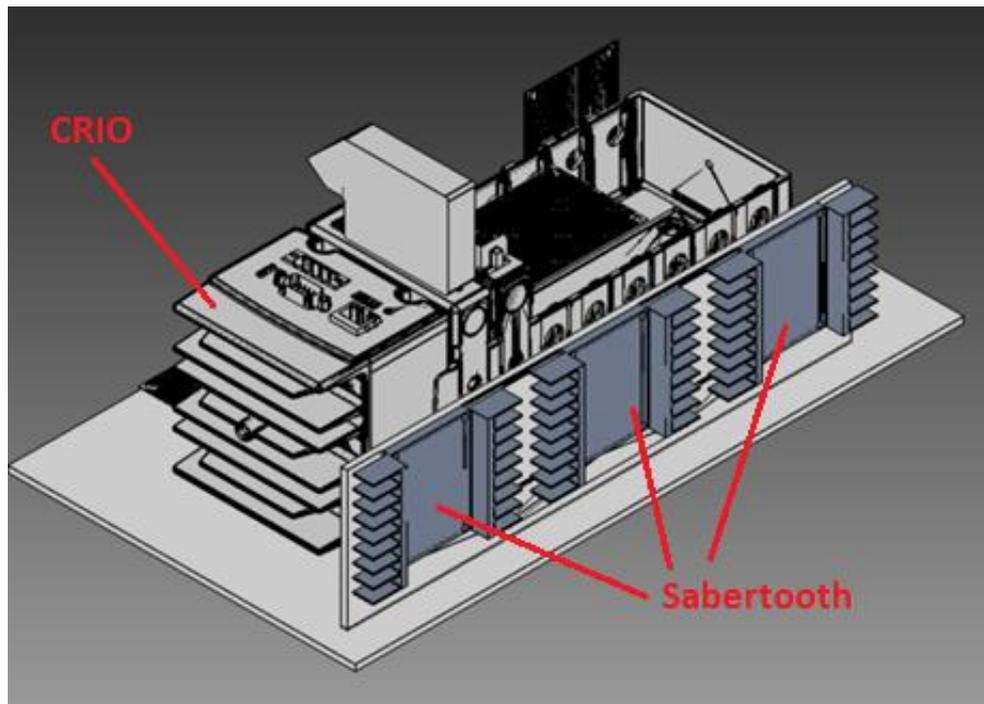


Ilustración 27 Diseño Plancha Elementos de control

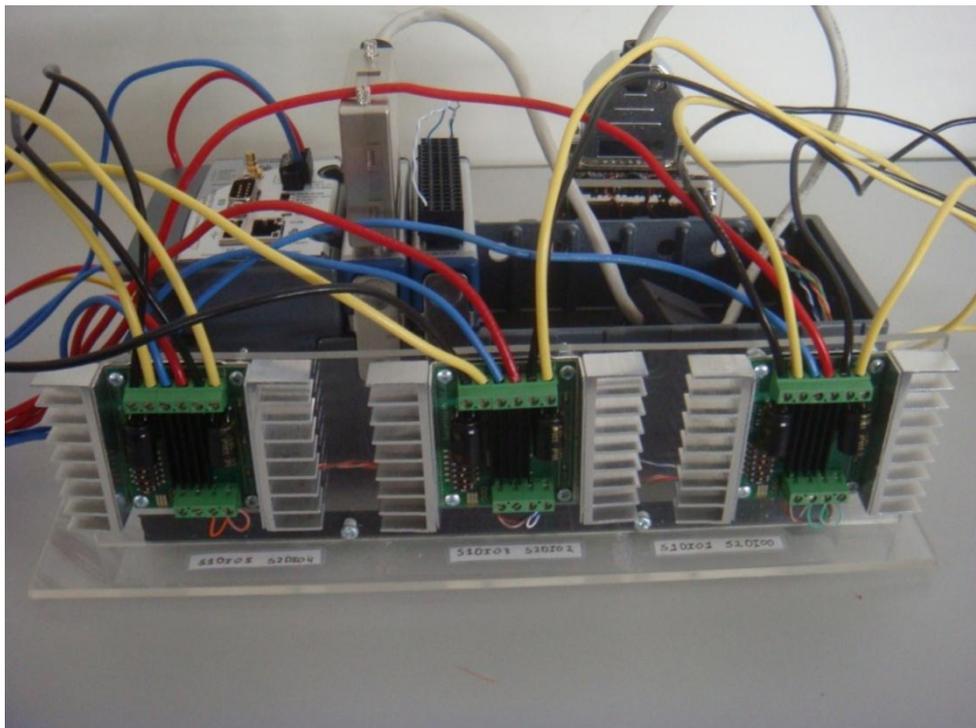


Ilustración 28 Plancha Elementos de control

Dentro del cilindro se instalara dos perfiles metálicos tipo C para sujetar la placa de control; los perfiles se pegaron dentro del cilindro utilizando masilla epóxica. Los

perfiles limitaran los movimientos de la placa dentro del submarino durante una inmersión; y permitirán una fácil manipulación de la placa al momento de realizar las conexiones internas del módulo de control.

Tapas

Para completar el compartimiento es necesario sellar las entradas del cilindro para garantizar la estanqueidad. Se diseñó un sistema de apriete de dos tapas para sellar el compartimiento.

Las tapas para el cilindro fueron construidas en duralon y su diseño mantiene el diámetro interior del cilindro para lograr el sellado. El duralon es una poliamida de alto peso molecular; la Poliamida es un polímero con enlaces tipo amida, presenta una alta durabilidad y gran resistencia al impacto.

La Ilustración 29 exhibe la tapa diseñada con dos canales en el diámetro de contacto con el cilindro. Los canales están diseñados para que un O ring pueda entrar en cada canal y aumentar el contacto entre las paredes internas del cilindro y la superficie de la tapa. El O ring elegido para la construcción del compartimiento fue el USA 171 de nitrilo con un espesor de 2.62 mm y un diámetro aproximado de 203mm. El nitrilo presente en la estructura del O ring lo protege de la salinidad del mar y del desgaste de derivados de petróleo. La Ilustración 30 presenta la tapa de duralon con los dos O ring y empaque instalados.

Para lubricar el contacto entre el O ring y la pared interna del cilindro se utilizó petrolato jalea de petróleo. El petrolato permite que el contacto entre las superficies sea suave eliminando esfuerzos que puedan romper al O ring; el petrolato también creara una película sobre el O ring que ayudara a mantener la hermeticidad del compartimiento.



Ilustración 29 Diseño tapa Duralon

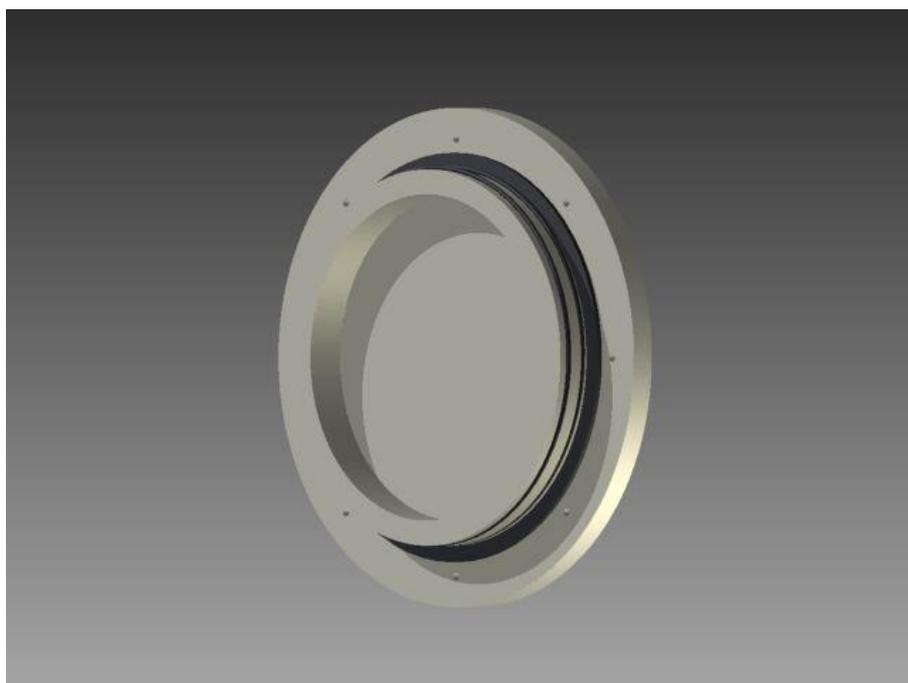


Ilustración 30 Diseño de tapa duralon con dos O ring y Empaque

Además, la tapa presenta un anillo exterior de un diámetro de 300 mm en el cual está presente un arreglo circular de ocho agujeros de 6 mm de diámetro con separación de 45° entre agujeros. Estos agujeros se utilizaran para alinear las dos

tapas en los extremos del cilindro mediante barras roscadas de acero inoxidable; cuatro barras de acero inoxidable se usaran como pasadores para apretar las dos tapas del cilindro y asegurar la estanqueidad del compartimento. Dos tuercas y arandelas de acero inoxidable se usaran para comprimir las dos tapas del cilindro. El ajuste de los pasadores en el compartimento se los realizará en cruz para distribuir el ajuste de los componentes.

Para garantizar el apriete entre las tapas y el cilindro se colocó un empaque de nitrilo 2 mm de espesor sobre cada tapa. El empaque mantendrá uniforme el contacto de superficies entre la tapa y el cilindro; el empaque optimizara el sello del compartimento al distribuir la presión ejercida entre las dos tapas con el cilindro.

Las ilustraciones 31 y 32 presentan el diseño final del compartimento hermético para el módulo de control. La sección *Construcción del Submarino* presentara los detalles finales del módulo de control.

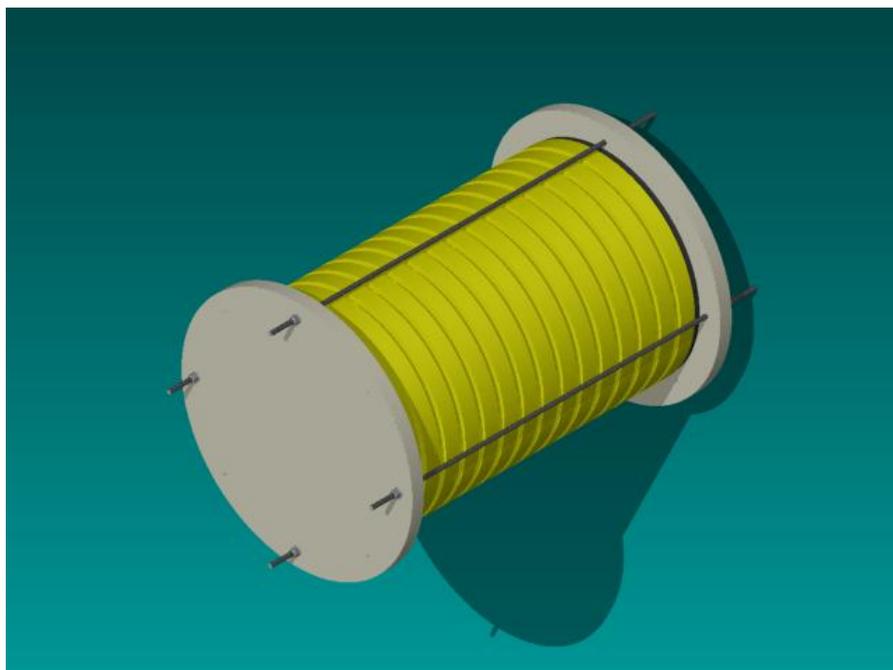


Ilustración 31 Compartimento Modulo Control

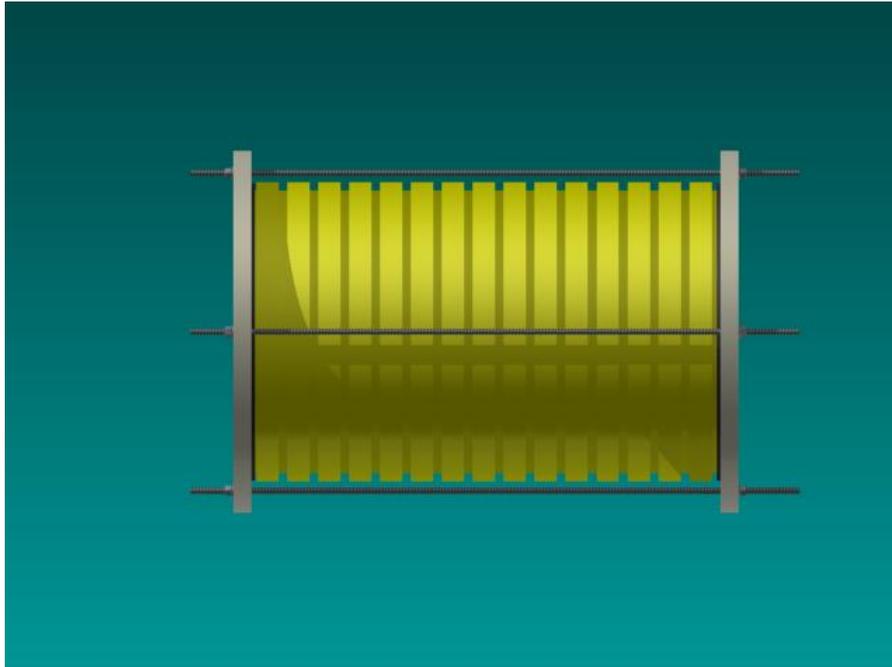


Ilustración 32 Compartimiento Modulo Control vista lateral

Cables y conexiones herméticas

Para el correcto funcionamiento del Submarino USFQ es necesario garantizar la completa hermeticidad del módulo de control explicado en la sección *Estanqueidad en el capítulo 2.3*. El módulo de control debe estar conectado en la superficie con los motores, para transmitir datos y para recibir energía. Estas conexiones tienen que realizarse de forma correcta para garantizar la hermeticidad e integridad del compartimiento. En esta sección se presentara las diferentes técnicas de sellado que se probaron para sellar las conexiones de los diferentes elementos hacia el compartimiento.

El primer paso fue determinar el número de conexiones que eran necesarias entre el compartimiento y el exterior:

- 1 conexión de potencia entre superficie y el submarino (Cables de potencia).
- 1 conexión de datos entre superficie y el procesador (Cable de Ethernet).

- 6 conexiones entre los motores y los controladores.
- 2 conexiones entre los sensores y el procesador.

Para el funcionamiento del submarino era necesario realizar 8 perforaciones en un compartimento que ya se encontraba estanco. Al aumentar el número de perforaciones en las tapas aumenta el riesgo de filtración de agua hacia el compartimento. Por esto, la primera idea que surgió fue tratar de realizar la menor cantidad de perforaciones e investigar los diferentes métodos que existen en el mercado para completar las conexiones.

Los grandes proyectos de ROV's a nivel industrial utilizan conectores acuáticos diseñados para garantizar la hermeticidad y flexibilidad de las conexiones en los sumergibles. Sin embargo el precio de cada conector oscila entre los \$100.0 a \$300.0; para el proyecto Submarino USFQ era necesario comprar 10 conectores macho y 10 conectores hembra de diferentes características. Esta compra estaba fuera del actual presupuesto del proyecto, por lo que se descartó la compra de conectores.

Diferentes proyectos ROV's universitarios utilizaban diferentes combinaciones entre resinas, siliconas y espumas para lograr sellar las filtraciones de agua; sellar las filtraciones de agua constituía una de las mayores dificultades del proyecto.

Las primeras pruebas de hermeticidad se realizaron utilizando probetas de tubería de PVC de ½ pulgada para comparar los diferentes materiales de sellado. Los materiales de sellado utilizados fueron:

- Abro 600 látex acrílico con silicona (véase Ilustración 33).



Ilustración 33 Probeta de Abro 600 látex acrílico con silicona

- Espuma de poliuretano (véase Ilustración 34).

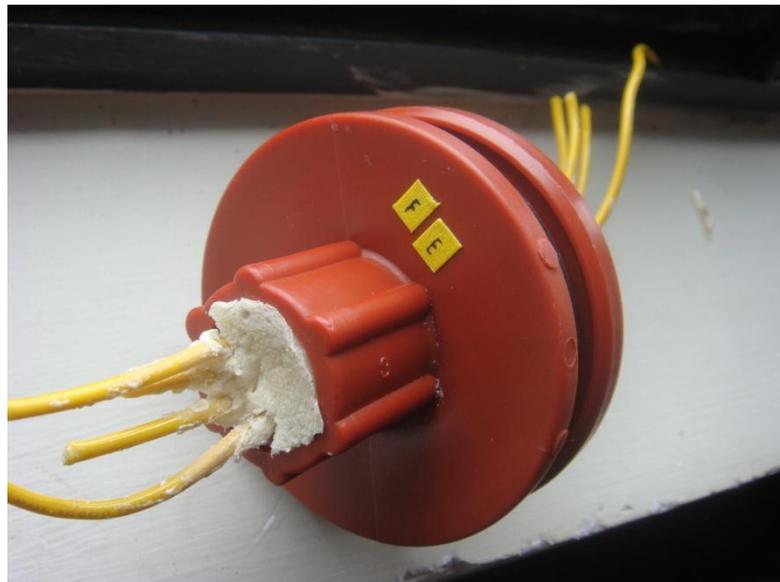


Ilustración 34 Probeta de Espuma de Poliuretano

- Resina polyester (véase Ilustración 35).



Ilustración 35 Probeta de Resina Polyester

Cada probeta fue construida colocando en su interior cables 18 AWG de 2.5 mm de espesor y llenando el volumen interior de la probeta con los diferentes materiales sellantes. Se crearon probetas utilizando cada material de forma individual y con combinaciones de los distintos materiales. Cada método de sellado fue sometido a dos pruebas para comprobar la funcionalidad del sellado: una prueba de porosidad y una prueba de presión.

La prueba de porosidad consistía en dejar a las probetas en un cilindro con un litro de agua durante 24 horas. El objetivo de la prueba era determinar si el agua traspasaba el material sellante dentro de la probeta. El problema de la prueba de porosidad fue que no garantizaba la calidad del sello a una profundidad significativa. De acuerdo a los resultados de esta prueba todos los materiales impedían el paso de agua excepto por la espuma de poliuretano. La espuma de poliuretano al expandirse dentro de la probeta no cubría todo el volumen creando espacios de aire dentro de la probeta, los espacios de aire permitían el paso del agua dentro de la probeta.

La prueba de presión presentó resultados más significativos. Cada probeta era conectada a un compresor de aire, utilizando un regulador de presión y un manómetro se controló la presión a la que el material estaba sometido dentro de la probeta. Para comprobar la existencia de fugas la probeta era colocada en un recipiente con agua; la probeta pasaba la prueba de forma satisfactoria si no se observaba la presencia de burbujas de aire en el fluido. Las pruebas de presión se realizaron con una presión de 6 bares por 5 minutos

El látex acrílico con silicona fue descartado de la lista de materiales por que no logro solidificarse dentro de la probeta; al momento de la prueba de presión todo el látex dentro de la probeta fue expulsado de la probeta.

Para las pruebas de resina polyester se realizaron mezclas con diferentes porcentajes de acelerante y activador alterando los tiempos de solidificación de la resina. Durante las pruebas de presión para la resina se presentaron varios problemas. La resina polyester no lograba fijarse a las paredes lisas de la probetas de ½ pulgada de PVC, ni a los cables de 18 AWG. Al aplicar 6 bares de presión después de dos minutos de pruebas el material se desprendía de la probeta permitiendo el paso de aire. Se aumentó los tiempos de solidificación de la resina disminuyendo el porcentaje de acelerante, pero los resultados eran los iguales la resina no lograba adherirse a la superficie del cable o de la probeta.

Debido a que los resultados de las pruebas de porosidad y presión no fueron los esperados, se procedió a realizar una nueva investigación sobre el tema de conectores y materiales sellantes.

El principal problema que se presentó en la búsqueda de conectores, fue la diferencia entre los diámetros de los cables a conectar. La diferencia de diámetros

entre los cables impedía la normalización de un método de sellado para todos los conectores.

La solución al problema de conectores llegó con la implementación de la prensa estopa o cable gland (Ilustración 36). La prensa estopa es un dispositivo diseñado para conectar y ajustar el cable a un equipo. La prensa estopa es utilizada a nivel industrial porque garantiza que el interior del equipo se encuentre asilado del exterior.



Ilustración 36 Prensa estopa o Cable Gland

La prensa estopa está compuesto por una rosca fija en la parte trasera y una rosca flexible en la parte superior. La rosca fija sujeta la prensa estopa a la estructura y utilizando un empaque asegura el sello entre la estructura y el cuerpo de la prensa estopa. La rosca flexible presenta un sello de caucho que permite el ajuste del cable al momento de ajustar la rosca superior en la prensa estopa, asegurando el sello entre la prensa estopa y el cable. El despiece detallado se presenta en la ilustración 37. En el mercado se pueden encontrar prensa estopas de diferentes diámetros y materiales.

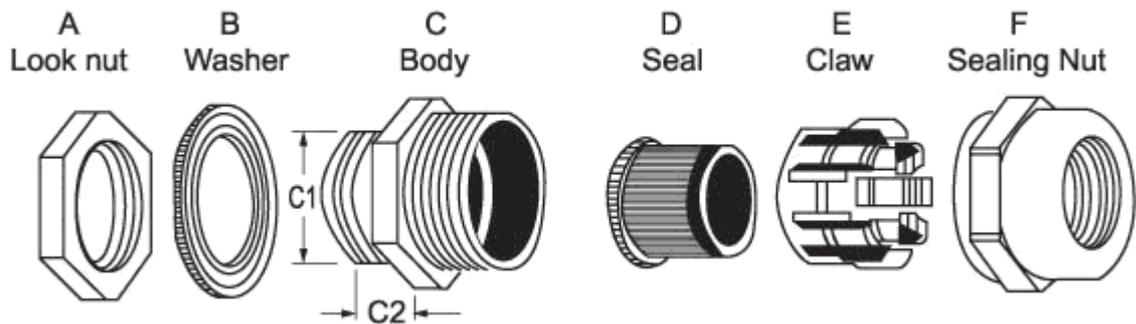


Ilustración 37 Despiece Prensa estopa

Para realizar las pruebas de sellado de la prensa estopa con el módulo de control se procedió a instalar una prensa estopa de nylon PG-09. El código PG-09 se refiere al diámetro interior máximo en milímetros que permite una prensa estopa. La prensa estopa PG-09 ajustó el cable de un motor Seabotix BDT-150 al interior del compartimiento hermético. Para la prueba de hermeticidad se ajustó a la rosca fija del cuerpo de la prensa estopa con la tapa del cilindro del compartimiento. Para asegurar la hermeticidad entre las dos superficies se aplicó Loctite 515 entre la rosca de la prensa estopa. Loctite 515 es un sellante anaeróbico que cubre los espacios entre los hilos de la rosca y la superficie de contacto. A continuación, se procedió a pasar el cable del motor Seabotix BTD-150 entre la prensa estopa y ajustar la tuerca de ajuste sobre él la rosca flexible.

El compartimiento se sometió a una prueba de estanqueidad en una piscina de 2 metros de profundidad por 6 horas. Al comprobar que la prensa estopa impidió el ingreso de agua durante la prueba, se procedió a instalar 8 prensa estopas PG-09 para los 6 motores Seabotix BTD-150, el cable flexible Ethernet categoría 5, y para la termocupla; y una prensa estopa PG-21 para el cable de potencia AWG 8 superflex.

La prensa estopa permitió realizar conexiones herméticas individuales para cada cable garantizando la estanquidad del módulo de control en el submarino. Las

conexiones permiten un fácil reemplazo y mantenimiento; y representan una simple solución al problema de conectividad de proyecto.

El sensor de presión se instaló utilizando la rosca provista en la estructura del sensor. Se ubicó un empaque de nitrilo entre la superficie interior de la tapa del cilindro y el sensor. Adicionalmente, se aplicó Loctite 515 en los hilos de la rosca del sensor para garantizar el sello entre el sensor y la tapa del cilindro.

Una vez instalados los sensores y conexiones se procedió a realizar una prueba con toda la estructura del submarino. Usando dos llaves de tuercas 10 se procedió a ajustar las tapas de duralon del cilindro, el ajuste entre los pasadores se realizó en cruz para asegurar el apriete en el compartimiento. Se sumergió la estructura del submarino a 2 metros con 30 kilos de masa durante 6 horas Ilustración 38.

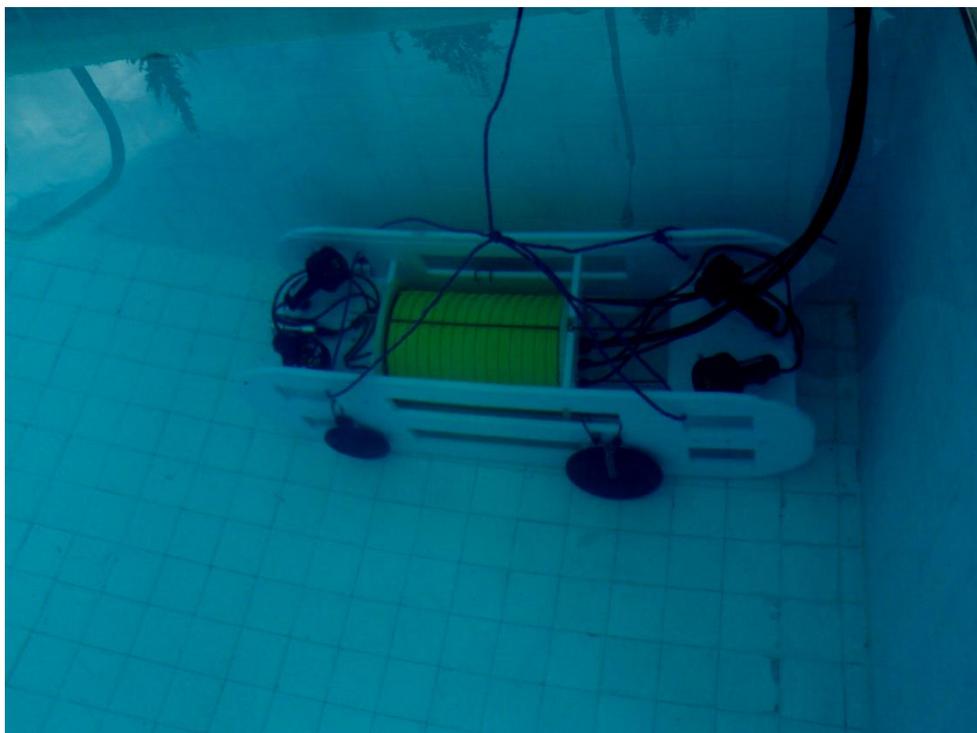


Ilustración 38 Pruebas de hermeticidad

La prueba resulto satisfactoria al comprobar la ausencia de agua dentro del compartimiento después de seis horas de inmersión. Sin embargo, el ajuste realizado a los pasadores entre las tapas se realizó de forma manual, y si el ajuste se realiza incorrectamente o algún pasador más que otro pondrá en riesgo la hermeticidad del compartimiento.

Para garantizar que el ajuste de los pasadores sea el correcto y el adecuado se implementó el uso de una llave de torsión. Para el proyecto Submarino USFQ se compró una llave de torsión Genius 280030N con un rango de 6 – 30 Nm de torque, los datos técnicos de la llave de torsión están adjuntos en el Anexo C. Para el ajuste del compartimiento del módulo de control se procedió a calibrar en la llave de torsión 6 Nm de torque para ajustar en cruz los pasadores del compartimiento. Se utilizó solo 6 Nm de torque para el ajuste del pasador para no deformar la rosca del pasador. Al estandarizar el método de ajuste de los pasadores con el uso de la llave de torsión, se garantiza que cualquier operador mantenga la hermeticidad del módulo de control.

Análisis de esfuerzos

Una geometría cilíndrica distribuye la carga a la que se encuentra sometida a lo largo de todo el cuerpo; los esfuerzos resultantes por la carga dependen del radio del elemento. Cilindros sometidos a presión experimentan esfuerzos radiales σ_r y tangenciales σ_t que dependen del radio del cilindro; para el cálculo de los esfuerzos radiales y tangenciales se asume que la elongación longitudinal es constante alrededor de la circunferencia del cilindro (Shigley) y entonces:

$$\sigma_r = \frac{P_i r_i^2 - P_o r_o^2 + r_i^2 r_o^2 (P_o - P_i) / r^2}{r_o^2 - r_i^2}$$

$$\sigma_t = \frac{P_i r_i^2 - P_o r_o^2 - r_i^2 r_o^2 (P_o - P_i) / r^2}{r_o^2 - r_i^2}$$

Dónde:

- P_i = Presión interna
- P_o = Presión externa
- r_i = Radio interno del cilindro
- r_o = Radio externo del cilindro

El cilindro utilizado es un cilindro de PVC fabricado por Plastigama de Amanco. Tiene un diámetro exterior de 250 mm y un diámetro interior de 226.2 mm. De acuerdo al manual del fabricante el cilindro soporta una presión máxima de trabajo de 1.25 MPa que es equivalente a 12.33 atm de presión o 113 metros de profundidad. Utilizando la presión interna de 1.25 MPa se calculó el esfuerzo máximo radial y el esfuerzo máximo tangencial que el cilindro puede soportar de acuerdo al fabricante.

Esfuerzo radial máximo:

$$\sigma_{r \text{ maximo}} = \frac{P_i r_i^2 - P_o r_o^2 + r_i^2 r_o^2 (P_o - P_i) / r^2}{r_o^2 - r_i^2}$$

La presión externa del cilindro será la presión atmosférica P_o o su equivalencia en 0.101 MPa, el radio medio r para el análisis será 0,115 m

$\sigma_{r \text{ maximo}}$

$$= \frac{(1.25 \text{ MPa})(0.113 \text{ m})^2 - (0.101 \text{ MPa})(0.117 \text{ m})^2 + (0.113 \text{ m})^2 (0.117 \text{ m})^2 (0.101 \text{ MPa} - 1.25 \text{ MPa}) / (0.115 \text{ m})^2}{(0.117 \text{ m})^2 - (0.113 \text{ m})^2}$$

$$\sigma_{r \text{ maximo}} = \frac{0.01596 \text{ N} - 0.00138 \text{ N} + (-0.01518) \text{ N}}{0.00092 \text{ m}^2}$$

$$\sigma_{r \text{ maximo}} = -0.659 \text{ MPa}$$

El signo negativo en los resultados de esfuerzos máximos indica compresión en segmentos material.

Esfuerzo tangencial máximo:

$$\sigma_{t \text{ maximo}} = \frac{P_i r_i^2 - P_o r_o^2 - r_i^2 r_o^2 (P_o - P_i) / r^2}{r_o^2 - r_i^2}$$

$\sigma_{t \text{ maximo}}$

$$= \frac{(1.25 \text{ MPa})(0.113 \text{ m})^2 - (0.101 \text{ MPa})(0.117 \text{ m})^2 - (0.113 \text{ m})^2 (0.117 \text{ m})^2 (0.101 \text{ MPa} - 1.25 \text{ MPa}) / (0.115 \text{ m})^2}{(0.117 \text{ m})^2 - (0.113 \text{ m})^2}$$

$$\sigma_{t \text{ maximo}} = \frac{0.01596 \text{ N} - 0.00138 \text{ N} - (-0.01518) \text{ N}}{0.00092 \text{ m}^2}$$

$$\sigma_{t \text{ maximo}} = 32.3547 \text{ MPa}$$

Los esfuerzos máximos calculados son los valores máximos que el cilindro puede soportar antes de fallar al aplicar una presión. Con los esfuerzos máximos podemos calcular la presión externa máxima que el cilindro puede soportar antes de fallar. La presión interna del cilindro será la presión atmosférica o su equivalencia en 0.101 MPa, el radio medio para el análisis será 0,115 m. El cilindro estará bajo una compresión si la presión exterior es mayor a la interior, el esfuerzo tangencial tendrá signo negativo:

$$\sigma_{t \text{ maximo}} = \frac{P_i r_i^2 - P_o r_o^2 - r_i^2 r_o^2 (P_o - P_i) / r^2}{r_o^2 - r_i^2} = -32.3547 \text{ MPa}$$

-32.3547 MPa

$$= \frac{(0.101 \text{ MPa})(0.113 \text{ m})^2 - P_o (0.117 \text{ m})^2 - (0.113 \text{ m})^2 (0.117 \text{ m})^2 (P_o - 1.101 \text{ MPa}) / (0.115 \text{ m})^2}{(0.117 \text{ m})^2 - (0.113 \text{ m})^2}$$

$$P_o = 1.20 \text{ MPa}$$

La presión externa máxima que el cilindro soportara antes de fallar es de 1.20 MPa que es equivalente a sumergir el cilindro a una profundidad cercana a los 110 metros. La profundidad de 110 metros será la profundidad máxima que el cilindro soportará antes de presentar una falla mecánica.

A partir de la fórmula matemática se creó una tabla Excel de esfuerzos de acuerdo a la profundidad a la que se encuentre el cilindro. La tabla 3 *Esfuerzos de acuerdo a la profundidad* presenta la profundidad de inmersión a la que se someterá la prueba con su presión equivalente y el esfuerzo resultante.

Tabla 3 Esfuerzos de acuerdo a la profundidad

Profundidad metros	Presión (atm)	R (m)	Presión Externa MPa	Presión Interna MPa	Radio Interior (m)	Radio Exterior (m)	Esfuerzo radial σ_r kPa	Esfuerzo tangencial σ_t MPa
110,0	11,80	0,115	1,2	0,101325	0,113	0,117	-0,664991	-32,2327933
100	11,000	0,115	1,11	0,10133	0,113	0,117	-0,618818	-29,6006845
80	9	0,115	0,911	0,10133	0,113	0,117	-0,516722	-23,7807995
60	7	0,115	0,709	0,10133	0,113	0,117	-0,413088	-17,8731775
50	6	0,115	0,607	0,10133	0,113	0,117	-0,360758	-14,8901208
40	5	0,115	0,506	0,10133	0,113	0,117	-0,30894	-11,9363098
20	3	0,115	0,303	0,10133	0,113	0,117	-0,204793	-5,99944217

En la Tabla 3 se puede comparar los esfuerzos a diferentes profundidades. Los esfuerzos máximos calculados previamente serán los limitantes para definir la profundidad máxima de inmersión para el cilindro.

El Submarino USFQ trabajará a una profundidad de 50 metros con una presión externa equivalente a 0.60795 MPa; el cilindro estará sometido a un esfuerzo radial $\sigma_r = -0,360758$ y un esfuerzo tangencial $\sigma_t = -14,8901208$. Comparando los

esfuerzos máximos del material con los esfuerzos permisibles a los que se someterá al material se puede obtener un factor de seguridad de la estructura. El factor de seguridad $F.S$ es un coeficiente que garantiza que bajo desviaciones no previstas exista una prevención mínima sobre el diseño del material.

$$\sigma_t \text{ maximo} = 32.3547 \text{ MPa}$$

$$F.S = \frac{\text{esfuerzo maximo}}{\text{esfuerzo permisible}} > 1$$

Se analizara el factor de seguridad para los esfuerzos generados a una profundidad de 50 y 100 metros. 50 metros es la profundidad de operación del submarino para este proyecto. Sin embargo, un análisis de esfuerzos a una profundidad mayor a 50 metros determinará la profundidad máxima que la estructura diseñada podrá soportar.

Factor de seguridad a 50 metros de profundidad

$$F.S = \frac{\sigma_t \text{ maximo}}{\sigma_t \text{ 50 m}} = \frac{32,3547}{14,8901208}$$

$$F.S = 2.17$$

Factor de seguridad a 100 metros de profundidad

$$F.S = \frac{\sigma_t \text{ maximo}}{\sigma_t \text{ 100 m}} = \frac{32,3547}{29,60}$$

$$F.S = 1.09$$

La Tabla 4 calculo el factor de seguridad del cilindro a diferentes profundidades de inmersión.

Tabla 4 Factor de Seguridad

Profundidad metros	Presión Externa MPa	Esfuerzo radial σ_r kPa	Esfuerzo tangencial σ_t MPa	Factor de Seguridad Fs.
110,0	1,2	-0,664992	-32,2327933	1,004
100	1,11	-0,618818	-29,6006845	1,093
80	0,911	-0,516722	-23,7807995	1,361
60	0,709	-0,413088	-17,8731775	1,810
50	0,607	-0,360758	-14,8901208	2,173
40	0,506	-0,30894	-11,9363098	2,711
20	0,303	-0,204793	-5,99944217	5,393

El factor de seguridad y el análisis de esfuerzos justifican que el cilindro para el compartimiento de control permitirá al submarino operar a una profundidad de 50 metros de profundidad. El análisis permitió determinar la profundidad máxima a la cual el submarino podrá llegar utilizando el cilindro. El cilindro permitirá al submarino alcanzar una profundidad de 100 metros sin poner en riesgo los componentes de control instalados en el compartimiento.

Análisis de Esfuerzos en Autodesk Inventor.

El Software de diseño Autodesk Inventor 2011 permitió realizar un análisis de esfuerzos del cilindro para el compartimiento estanco. Las simulaciones realizadas con el software nos permitieron demostrar la validez de los cálculos presentados en la sección previa. El software presenta en sus resultados graficas demostrativas en las que se presenta en escala de colores la intensidad del esfuerzo a lo largo de la geometría. Todos los analices de esfuerzos realizados en el cilindro a diferentes presiones externas se presentan en el Anexo D.

5.3 *Chasis*

El diseño de todos los elementos estructurales del submarino USFQ se realizó en el programa de diseño Autodesk Inventor 2011 y AutoCAD Mechanical 2011. Con la aprobación del diseño por los profesores involucrados en el proyecto, se procedió a la construcción de los elementos.

Para la construcción de la estructura del Submarino USFQ se utilizó planchas solidas de polietileno de alta densidad. El polietileno de alta densidad HDPE (*High Density Polyethylen*) es un polímero de estructura lineal, y se caracteriza por tener muy buena resistencia al impacto, flexibilidad, excelente resistencia térmica y química. Además el HDPE tiene una densidad de 0.95 g/cm^3 y es fácil de maquinar. Para la construcción del Submarino USFQ se compró una plancha de HDPE con una dimensión de 2150 x 1000 x 15 milímetros.

Se diseñó una estructura sólida de HDPE que proteja los componentes del submarino del exterior. La estructura presenta una configuración modular que permite un fácil ensamble del submarino. Para el submarino USFQ se diseñaron dos módulos; uno llamado base motor y el otro llamado compartimento seco. Cada elemento que conforma la estructura y cada módulo del submarino fueron manufacturado en el taller mecánico de la USFQ.

Base Motor

El bloque de motores está compuesto por 3 motores Seabotix BDT-150, permite la alineación de 60° de los motores, e integra al módulo con la estructura del submarino. El submarino USFQ está compuesto por dos bases de motores y se encuentran opuestos uno del otro en los extremos de la estructura.

Como se presentó en la sección *Alineación motores* los motores deben presentar una disposición cónica. Para lograr los 60° de separación entre motores se diseñó un perfil triangular de HDPE con 30° de inclinación. Cada motor estará sujeto sobre un perfil triangular con tornillos de acero inoxidable provistos por Seabotix en cada motor. Los perfiles triangulares están alineados en una plancha de HDPE de 15 x 250 x 330 milímetros. La base de motores como se muestra en la Ilustración 39, está constituida por 3 motores Seabotix BTD-150, tres perfiles triangulares y una plancha de HDPE. Las piezas se ensamblaron entre sí utilizando pernos Allen de acero inoxidable de 5 mm de espesor y 30 mm de largo.

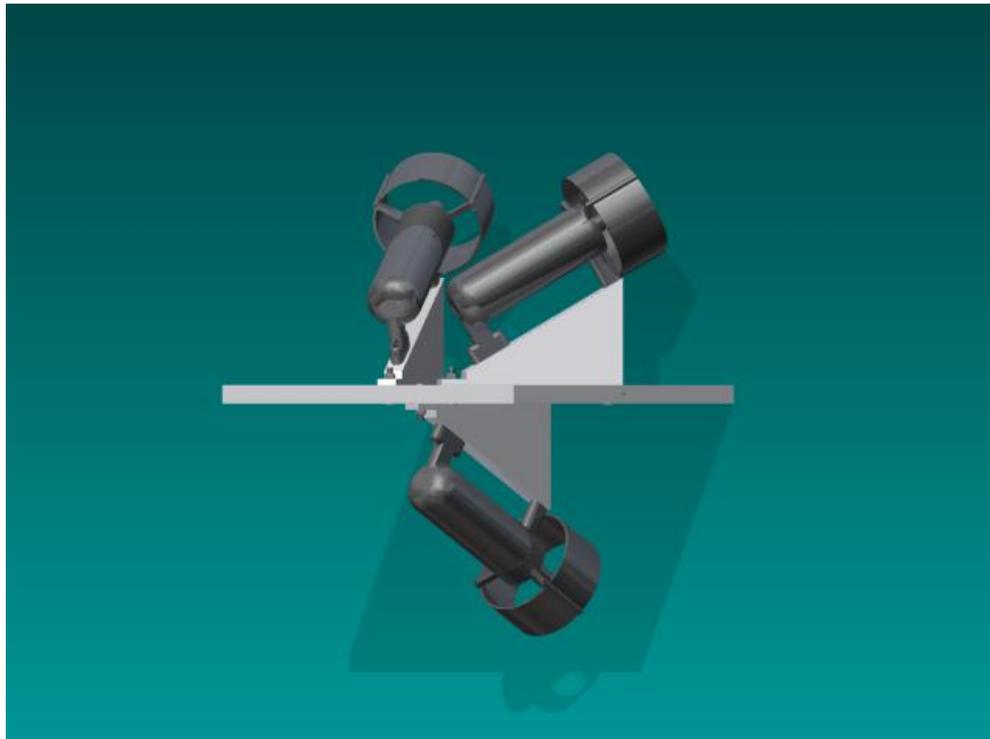


Ilustración 39 Base de Motores

La base de motores también fue diseñada tomando en consideración la instalación de la cámara de video e hidrófono. La cámara de video y el hidrófono están instalados en el bloque de motores delantero. La cámara de video se encuentra alineada en el centro de la plancha del módulo de motores, esto permitirá al operador

controlar los movimientos del submarino utilizando la transmisión de video desde la cámara.

Compartimiento Seco

El Bloque de control está formado por el compartimiento seco y todos los elementos de control embarcados, considerando los elementos diseñados para ensamblarlo con el chasis del Submarino. En esta sección se presentara como se encuentra ensamblado el bloque de control con la estructura del submarino. Se utilizó dos barras de HDPE con una dimensión de 320 x 15 x15 mm para sujetar el modulo en la parte delantera y dos barras en forma de T con una dimensión de 320 x 70 x 15 mm para sujetar el modulo en la parte trasera del submarino. Las barras alinean al compartimiento en el centro de la estructura para mantener la estabilidad y flotabilidad del submarino. La Ilustración 40 presenta el Bloque de Control listo para ensamblarse con la estructura del Submarino USFQ.

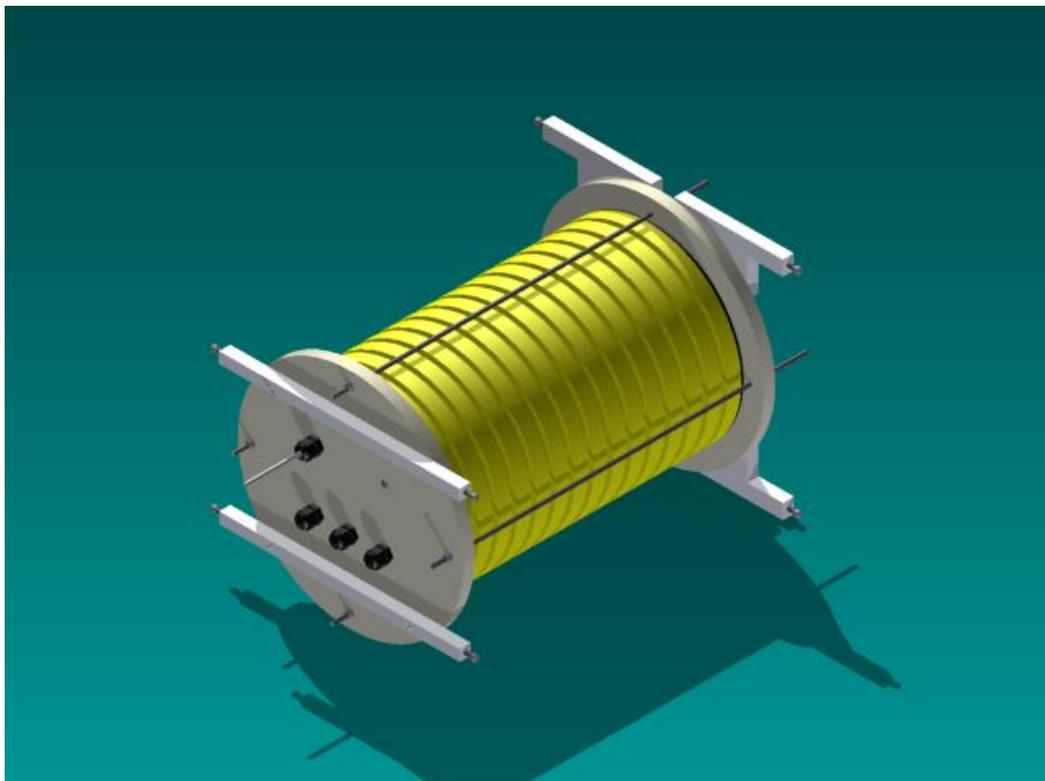


Ilustración 40 Bloque de control

Laterales

La estructura que protege a los módulos del submarino está compuesta por dos perfiles laterales de HDPE y por ejes de acero inoxidable.

Se diseñó la geometría del perfil para reducir la resistencia del agua, se construyó utilizando una plancha de HDPE con una dimensión de 1200 x 420 x 15 milímetros. Los extremos del perfil presentan bordes circulares para reducir la resistencia del agua al movimiento de la estructura; en el área interior de la plancha se removió material en forma de rectángulos para reducir el peso del submarino y reducir el área de contacto del submarino con el agua. La Ilustración 41 presenta la forma final de los perfiles laterales.

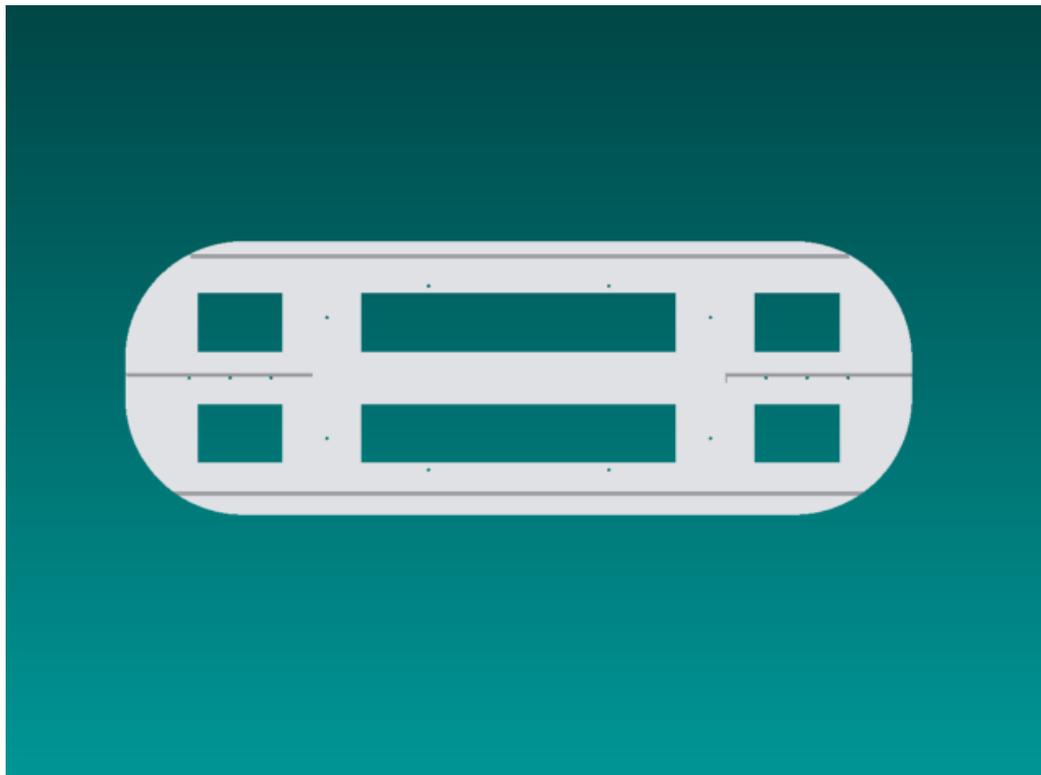


Ilustración 41 Perfil Lateral

El perfil presenta 4 canales internos de 5 mm de profundidad; los canales son utilizados para alinear las bases de motores y los ejes de acero inoxidable con el perfil

para armar la estructura. Los perfiles laterales presentan orificios de 6 mm de diámetro a lo largo de los canales y alrededor de los rectángulos interiores que permiten el ensamble del compartimiento seco y las barras de acero con la estructura.

Los ejes de acero inoxidable cumplen varias funciones. Al variar el diámetro de los ejes también varía su peso y con esto se puede controlar la flotabilidad del submarino aumentando o reduciendo el número de ejes y de distintos tamaños en la estructura, también determinan la posición del centro de gravedad del submarino y mantienen la rigidez de la estructura.

Al ensamblar las bases de motores, el compartimiento seco con los perfiles de la estructura se completa el ensamblaje del Submarino USFQ. La Ilustración 42 presenta al perfil lateral ensamblado con las dos bases de motor y con el compartimiento seco.

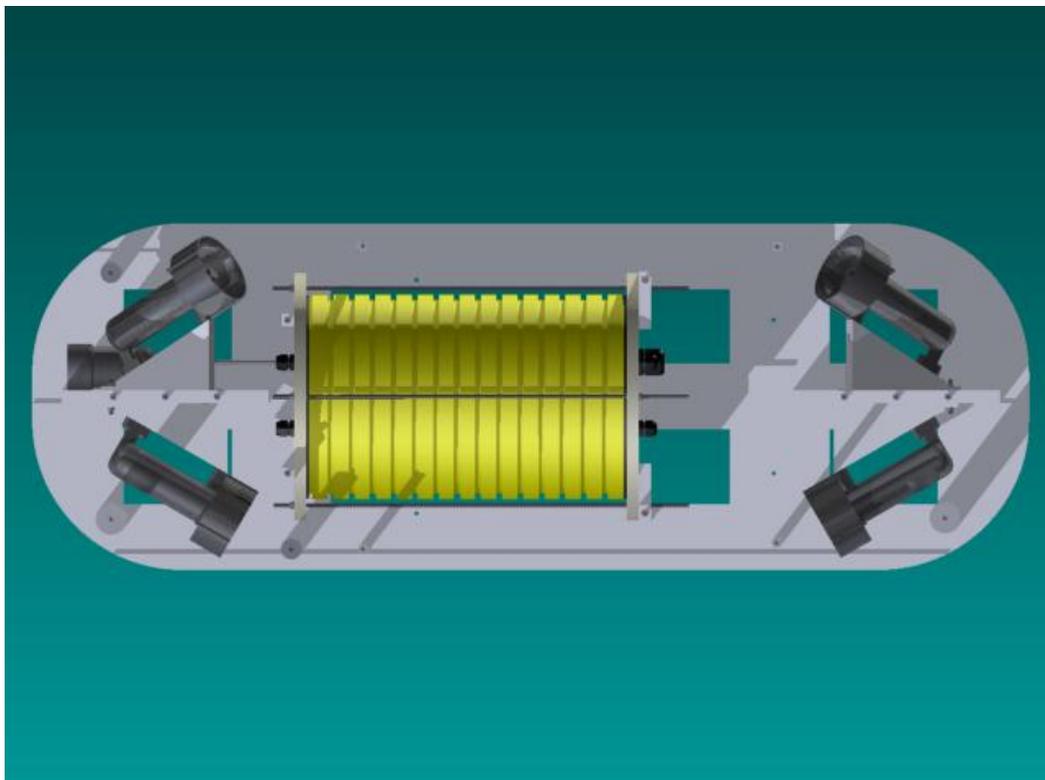


Ilustración 42 Módulos ensamblados

La Ilustración 43 presenta el ensamblaje final del Submarino USFQ utilizando el software de diseño Autodesk Inventor 2011; y la Ilustración 44 presenta el ensamblaje final del modelo real del Submarino USFQ. Todos los planos de las piezas diseñadas para este proyecto al igual que un plano del conjunto de la estructura del Submarino USFQ se encuentran en detalle en el Anexo F.

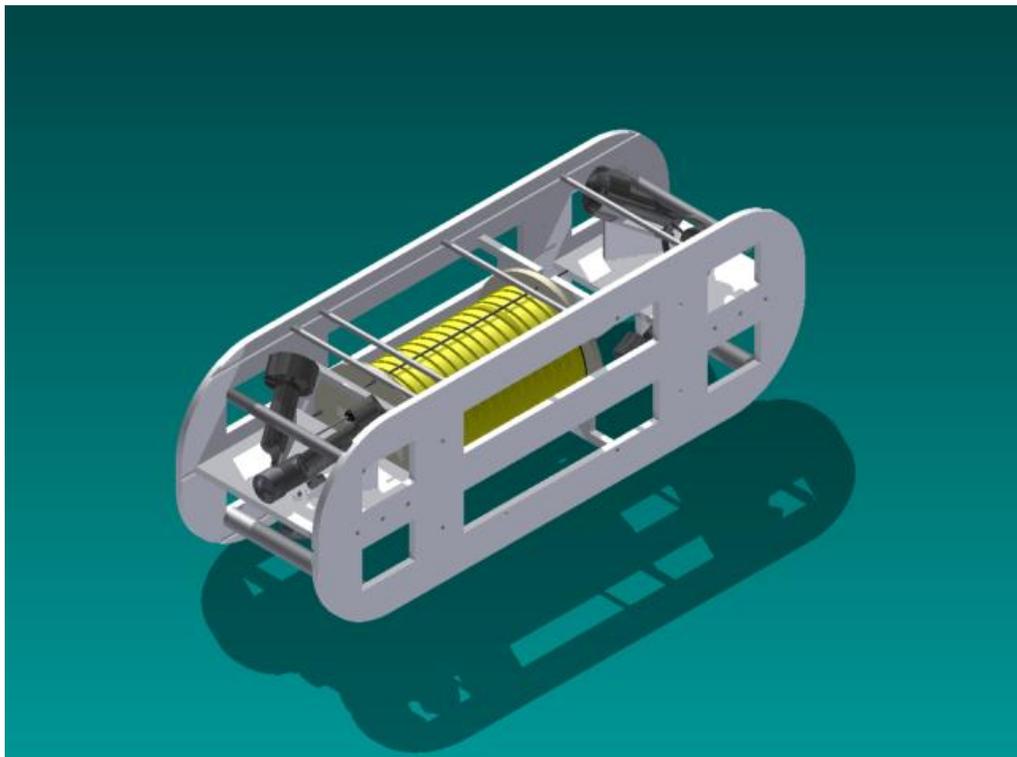


Ilustración 43 Modelación Submarino USFQ

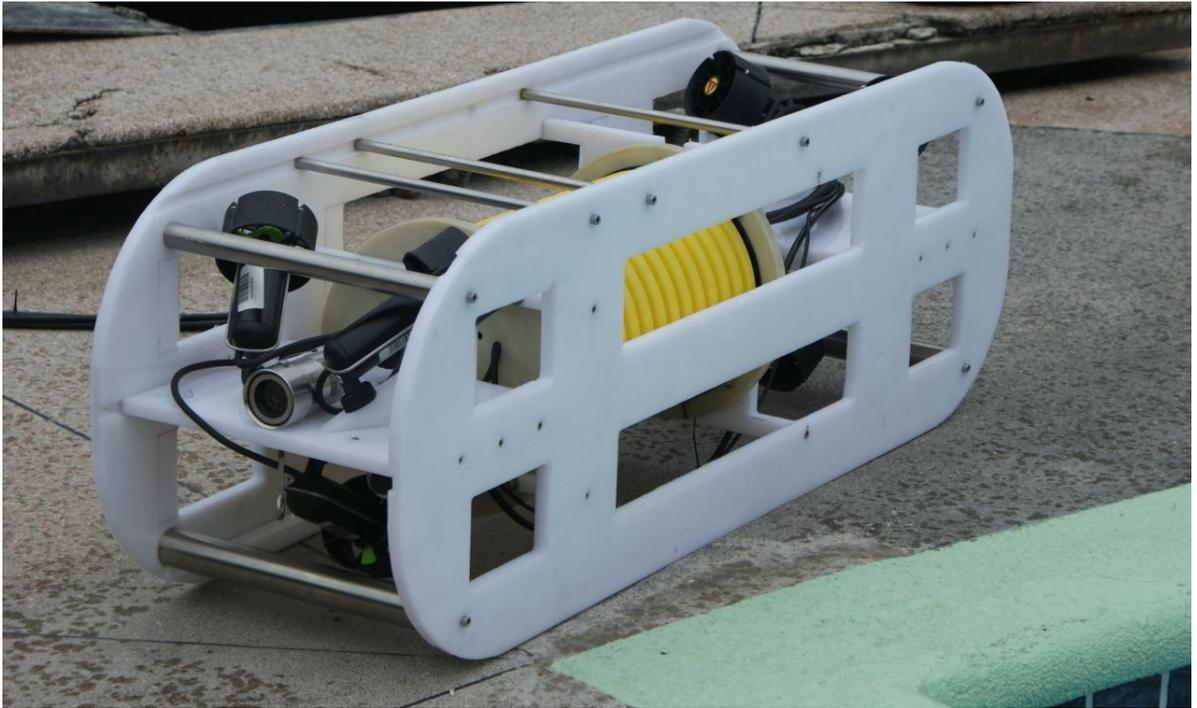


Ilustración 44 Submarino USFQ Ensamblado

Bloque de potencia

El llamado bloque de potencia consta de un banco de baterías para generar la energía que el submarino requiere, y de los cables de potencia, los cuales son necesarios para transmitir la energía al submarino. El bloque de potencia no es un elemento sumergible, este estará en superficie todo el tiempo.

El banco de baterías consta de 4 baterías recargables. Dos de ellas son de 12 V y 12 Ah, y las otras dos son de 6 V y 12 Ah. Para alimentar los motores, controladores y cRIO del submarino requeríamos una alimentación continua de 18 V, que era el voltaje necesario para que los motores funcionen correctamente. Las baterías están conectadas en una configuración tal que nos permita obtener esos 18 V. Según las leyes de Kirchhoff los voltajes conectados en serie se suman, así como también las corrientes conectadas en paralelo también se suman. La una batería de 6 V está conectada en serie con la batería de 12 V, por lo que con esta conexión obtuvimos los

18 V. De igual manera la otra batería de 6 V y 12 V están en serie, pero entre estas dos están conectadas en paralelo, como se muestra en la ilustración 45, para así obtener mayor corriente 24 Ah, lo cual nos da más tiempo de duración de las baterías para que el submarino pueda trabajar por más tiempo.

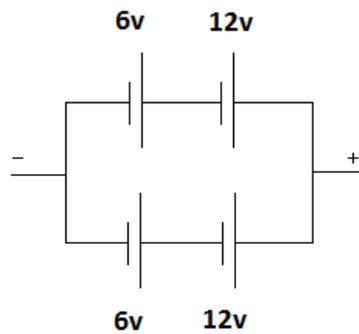


Ilustración 45 Diagrama baterías

El bloque de baterías tiene un interruptor ON/OFF el cual permite pasar la corriente al cRIO, controladores y motores, es decir, nos permite encender o apagar el submarino. Inmediatamente después del interruptor se puso un conector para que el cable, que conecta al submarino, pueda ser de más fácil manipulación.

Para la transmisión de potencia al submarino se requería cables de conducción eléctrica que puedan aguantar alrededor de 26 Amperios, como se muestra en la tabla 5, como máximo debido a la cantidad de elementos que necesitan energía dentro del compartimento del submarino.

Tabla 5 Consumo máximo de componentes

Elementos	Consumo Máximo(Amps)
Motores (6)	25.26
cRIO	0.33

Con base al amperaje de diseño del submarino, 33 Ah, se escogió un cable que cumple con la norma AWG 8; en este caso el cable sufre 2x8 AWG. Adicionalmente, el cable seleccionado presenta la ventaja de tener un recubrimiento robusto que permite que éste sea sumergido sin comprometer la integridad del cable.

Este cable tiene 50 m de largo, sirve para conectar el bloque de baterías con el cRIO y demás componentes del submarino. Se colocó un conector en el compartimento seco del submarino, con el fin de facilitar la conexión y desconexión del cRIO para facilidad de manipulación.

5.4 Flotabilidad

La flotabilidad del Submarino USFQ depende del volumen de todos los componentes del submarino, y de la densidad del agua. Para el diseño del submarino USFQ el objetivo fue alcanzar una flotabilidad ligeramente positiva.

Debido a que el objetivo es alcanzar la flotabilidad ligeramente positiva, se busca la flotabilidad neutra como punto de partida, posteriormente se aligerará el peso del submarino para aumentar la flotabilidad ligeramente en el submarino.

Para lograr la flotabilidad neutra es necesario que el submarino desplace un volumen de agua que pese igual que el peso de la estructura. Si la cantidad de agua desplazada pesa menos que la estructura el submarino se hundirá; y si la cantidad de agua desplazada pesa más que la estructura el submarino flotará. La fuerza producida por el desplazamiento del volumen de agua recibe el nombre de empuje hidrostático.

El empuje hidrostático es una fuerza vertical ascendente con igual magnitud al peso del volumen del fluido desplazado por el cuerpo sumergido en el fluido (Principio de Arquímedes).

$$E = mg = \rho_f gV$$

Dónde:

- ρ_f = Densidad del fluido.
- g = gravedad.
- V = volumen del cuerpo sumergido.

Una vez ensamblado el Submarino USFQ se obtuvo la masa de la estructura. El Submarino USFQ tiene una masa de 28 kg sin incluir los ejes de acero inoxidable. Todavía no se consideran a los ejes de acero inoxidable hasta no definir el peso necesario para sumergir la estructura. Cuando se completó la estructura se procedió a

colocar el submarino en una piscina por primera vez. Los resultados fueron los esperados, gracias a la elección de materiales y al compartimiento seco el submarino tiene flotabilidad positiva. Además, el submarino mantuvo una estabilidad natural después de ser estremecido en el agua. La Ilustración 46 presenta la estructura del submarino con flotabilidad positiva.

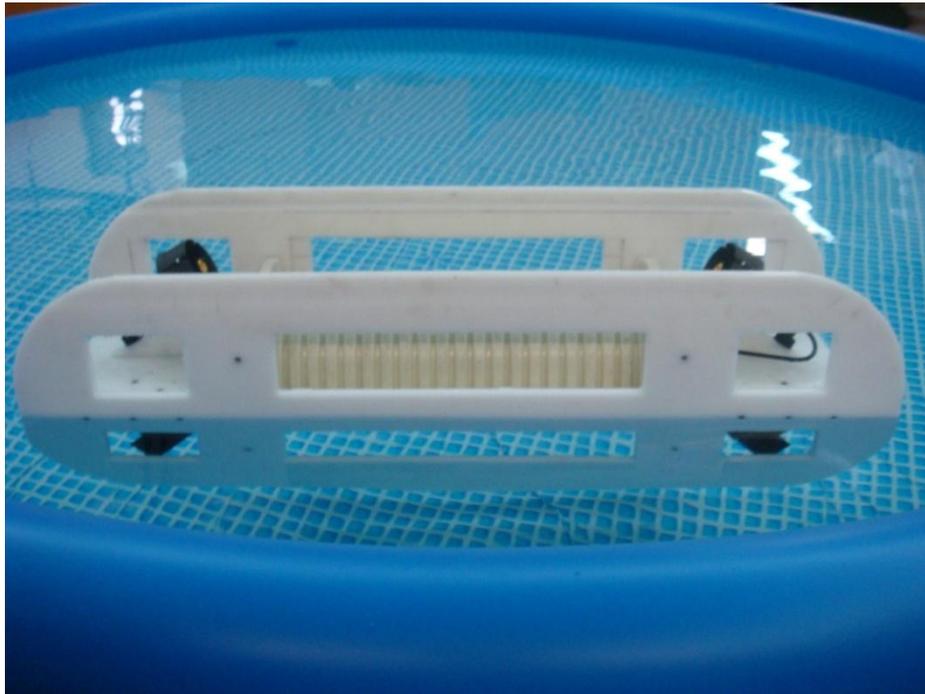


Ilustración 46 Submarino USFQ en piscina

Para lograr una flotabilidad neutra el peso del sumergible debe ser igual al empuje del agua contra la estructura. El empuje depende directamente de la gravedad, densidad del fluido y el volumen del cuerpo sumergido. La gravedad y densidad del fluido son datos conocidos, solo el volumen del cuerpo es el dato desconocido de la ecuación. Gracias al software Autodesk Inventor se puede obtener una aproximación de la masa y volumen final del Submarino después de completar el ensamble de cada elemento utilizado en el proyecto. Autodesk Inventor presentó una masa aproximada

de 33 kg y un volumen de 0.0229 m^3 ; sin embargo, los valores presentados por el software pueden no ser los valores reales.

Para comprobar el resultado de volumen presentado por el software se procedió a realizar un cálculo del volumen de agua que desplaza el Submarino USFQ al sumergirse. En la piscina se procedió a sumergir el submarino utilizando una serie de discos de pesa para gimnasio. El objetivo de la prueba fue determinar el peso necesario que debe tener el submarino para mantener una flotabilidad neutra. Los pesos se sujetaron en el centro de la estructura para mantener la estabilidad del submarino durante la inmersión, como se puede apreciar en la Ilustración 47. Para lograr la flotabilidad neutra fue necesario aumentar aproximadamente 9.3 kg a la masa de la estructura.

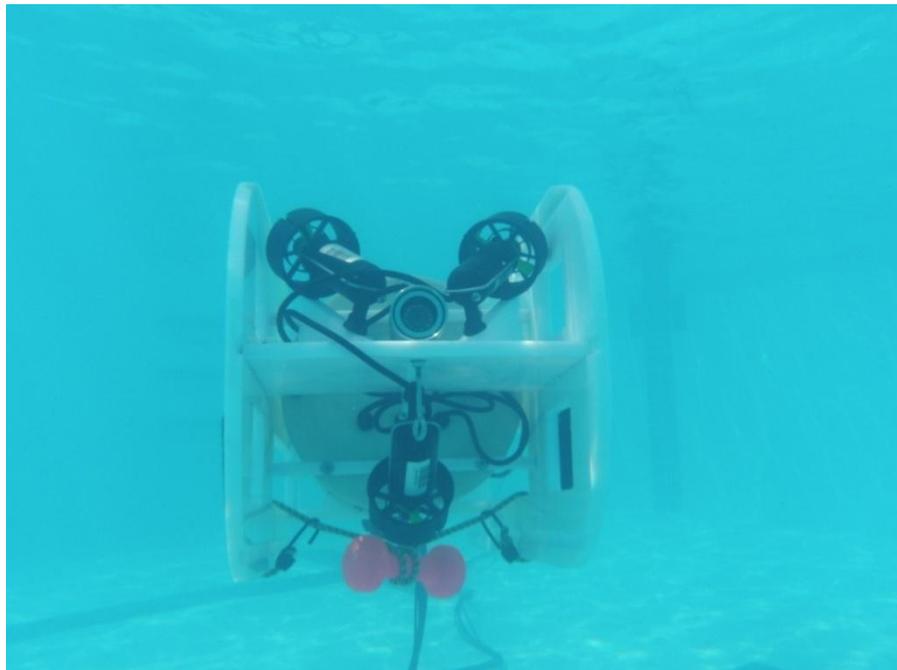


Ilustración 47 Submarino sumergido con pesos

Utilizando los datos de las pruebas se procedió a calcular el volumen de la estructura del submarino.

$$E = mg = \rho_f gV$$

$$m = \rho_f V$$

$$(28 + 9.3)kg = 1000 \frac{kg}{m^3} * V$$

$$V = 0.03731 m^3$$

El volumen de la estructura del submarino es de $0.0373 m^3$ equivalente 37.3 litros.

Para lograr una flotabilidad neutra con el submarino fue necesario aumentar el peso de la estructura en 9.3 kg. Se agregaron varios ejes de acero inoxidable que en conjunto pesan aproximadamente 9.3 kilogramos para lograr una flotabilidad neutra en agua dulce. Se aumentó tres ejes de $\frac{1}{2}$ pulgada, dos ejes de 1 pulgada y dos ejes de 1 $\frac{1}{2}$ pulgada. Se distribuyeron los diferentes ejes entre los perfiles laterales de la estructura para balancear el peso de la estructura y mantener la estabilidad del submarino. Al mantener una simetría al distribuir los pesos se logró posicionar el centro de gravedad del submarino en la parte inferior de la estructura; de esta manera, el submarino mantendrá una posición de equilibrio después de cualquier perturbación o agitación del entorno. La Ilustración 48 presenta al Submarino USFQ con una flotabilidad neutra.

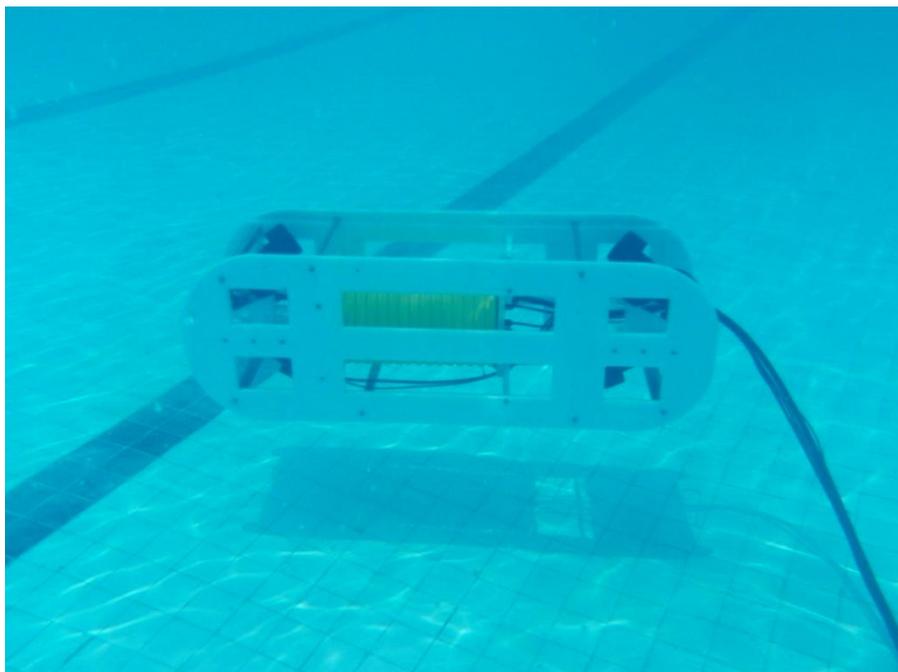


Ilustración 48 Submarino USFQ con flotabilidad neutra

El agua salada es más densa que el agua dulce, la densidad del agua salada es de $\rho_f = 1027 \frac{kg}{m^3}$; el submarino USFQ necesitaría de un mayor peso para lograr una flotabilidad neutra en el mar. Para calcular la masa que necesita el submarino en mar abierto, se utilizó nuevamente el concepto de empuje hidrostático.

$$E = mg = \rho_f gV$$

$$m = \rho_f V$$

$$m = 1027 \frac{kg}{m^3} * 0.03731 m^3$$

$$m = 38.317 kg$$

La masa del submarino es de 28 kilogramos, para llegar a los 38.32 kilogramos es necesario aumentar 10.32 kilogramos de masa. Se preparó una combinación de ejes de acero inoxidable de diferentes diámetros para aumentar en 10 kilogramos la masa del submarino. Se preparó cuatro ejes de ½ pulgada, dos ejes de 1 pulgada y dos ejes de 1 ½ pulgada para las pruebas del submarino en agua salada.

Finalmente, la flotabilidad ligeramente positiva se consigue aumentando 10 kg de masa a la estructura de submarino, lo que significa 320 gr más ligera que la masa del diseño.

6 Programación

El software utilizado para la programación fue LabView, el cual permite realizar programaciones gráficas para una fácil comunicación entre la computadora y el procesador cRIO. El programa realizado consta de 4 partes importantes que interactúan entre sí:

1. Control de movimiento.
2. Adquisición de datos (sensores).
3. Adquisición de Audio y Video.
4. HMI (Human Machine Interface).

6.1 Control de movimiento

Para el control de movimiento es necesaria la utilización de un control remoto para maniobrar al submarino. Como medio de control remoto se utilizó un Joystick modelo Thrustmaster con conexión USB al computador. El Joystick escogido tiene 5 ejes y 12 botones que son totalmente programables. Información más detallada, especificaciones técnicas, y una imagen del Joystick escogido se encuentran en la hoja del fabricante en el Anexo C. Un esquema de los ejes utilizados se muestra en la ilustración 49.

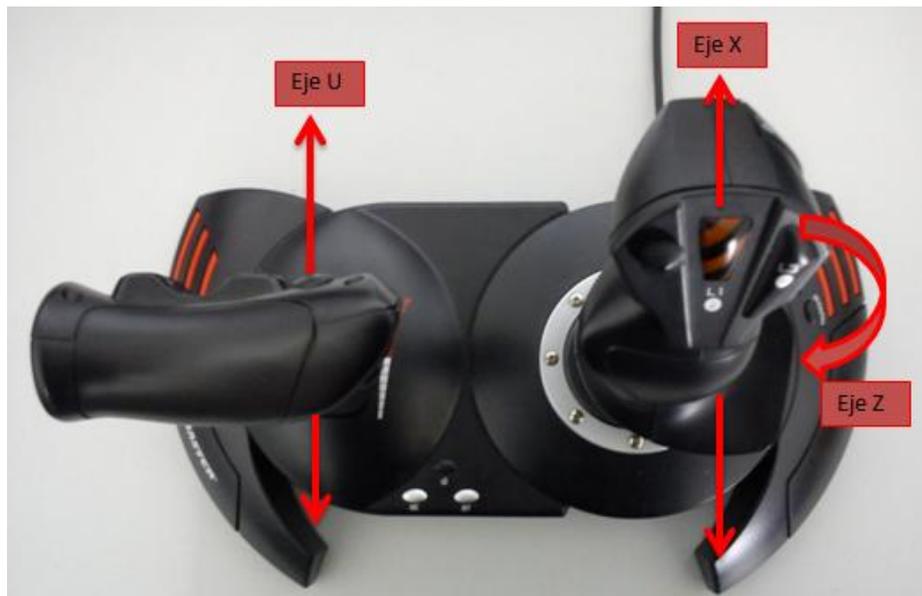


Ilustración 49 Ejes del Joystick

La parte del programa encargada del control de movimiento realiza una inicialización del joystick y hace un reconocimiento de todos los botones y posibles movimientos de ejes del joystick (véase Ilustración 50).

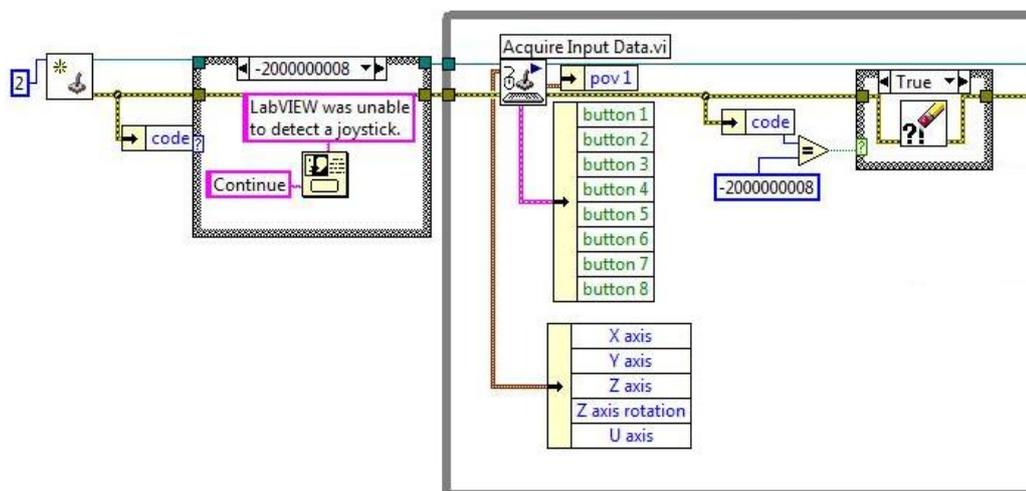


Ilustración 50 Programa para Inicialización del Joystick

Dentro del programa se utilizó 4 de los 12 botones; uno para capturar fotografías, otro para grabar el video, y también se utilizó los otros dos para subir o bajar la cola, lo que nos ayuda al control y posicionamiento del vehículo submarino. Se utilizó 3 de

los 5 ejes, para moverse adelante y atrás, para subir y bajar, y el último para girar en el propio eje. (Véase ilustración 49, 51, 52, 53 y 54)

Para controlar el movimiento del submarino, el programa relaciona las señales emitidas por el movimiento de los ejes del joystick y las señales de salidas del Crio enviadas a los controladores de motores. A cada movimiento del joystick según la dirección y eje corresponde una señal enviada al controlador de cada motor permitiendo obtener un movimiento determinado. (Véase Ilustración 49, 52, 53 y 54).

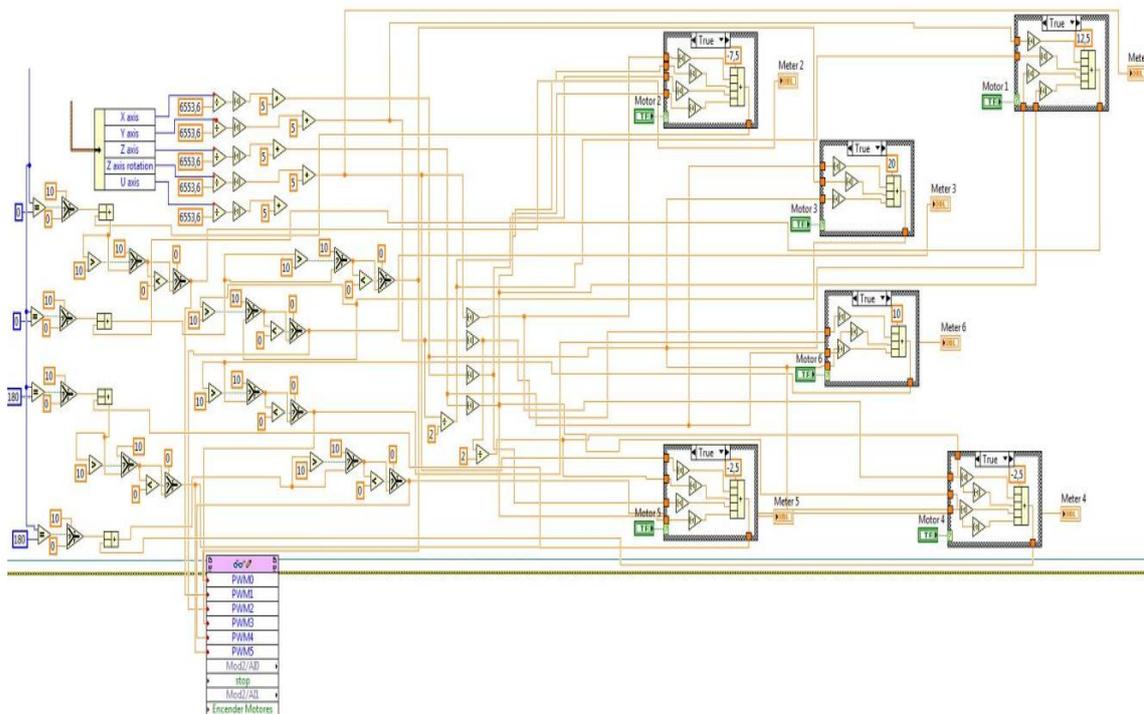


Ilustración 51 Programa para motores

Al mover el joystick hacia adelante o hacia atrás en el eje x se prenderán todos los motores hacia la dirección horizontal deseada, como se muestra en el esquema de la Ilustración 52.



Ilustración 52 Movimientos de motores con movimientos del eje X del joystick

Por otro lado rotar el eje z del joystick permite que el submarino gire sobre el eje vertical. Los motores trabajarán en direcciones opuestas así como se presenta en la Ilustración 53, los motores inferiores no trabajan durante este movimiento.



Ilustración 53 Movimientos de motores con rotación del joystick en eje Z

De igual manera mover el eje u del joystick permite que el submarino se traslade en el eje vertical. El movimiento es resultado del trabajo en direcciones opuestas de los 2 motores superiores y del motor inferior de cada base. Así como se muestra en la Ilustración 54 con una vista lateral de la base de motores.

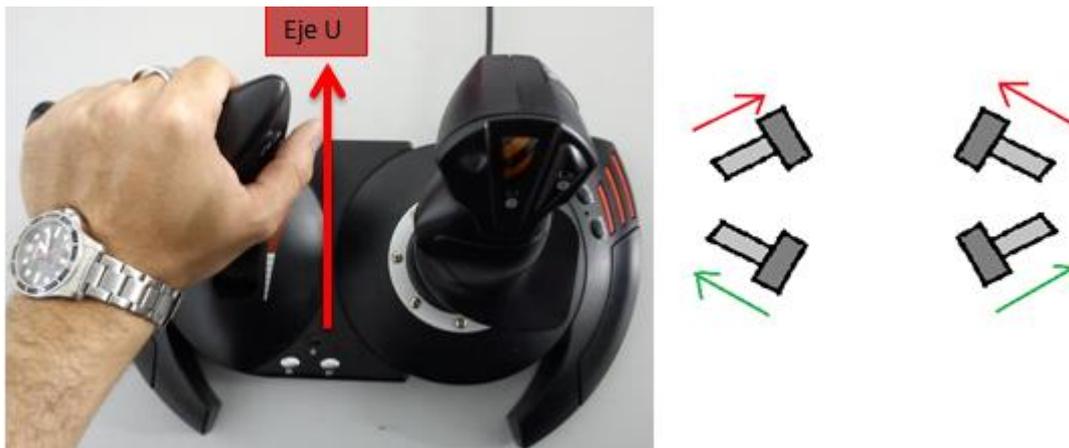


Ilustración 54 Movimientos de motores con movimientos del eje U del joystick

Dada la programación realizada el submarino puede realizar movimientos horizontales, verticales, y rotaciones sobre dos 3 ejes, y cualquier combinación de los movimientos mencionados anteriormente. (El programa completo se encuentra en el anexo B)

6.2 Adquisición de datos (sensores)

La parte del programa encargada del procesamiento de datos y sensores realiza un reconocimiento de los módulos análogo y digital para después poder recibir las señales de los sensores y transformarlas a valores conocidos en unidades estándares como son grados centígrados en el caso de la termocupla, y PSI y profundidad en el caso del sensor de presión.

Calibración de Sensores:

Para poder convertir las señales de los sensores en valores interpretables fue necesario hacer pruebas de calibración de los mismos.

Para el sensor de presión se realizó una prueba utilizando un compresor de aire. Se conectó al sensor al compresor, con el cual se ajustaba valores de presión en Bares o PSI. El sensor de presión detectaba la presión y enviaba una señal analógica en mili voltios (mV). Con los datos obtenidos a diferentes presiones se obtuvo una gráfica Presión vs Señal de Sensor (véase Ilustración 55). La grafica permitió sacar la ecuación de la recta de regresión lineal la misma que fue programada para obtener la presión en PSI en la interfaz del usuario.

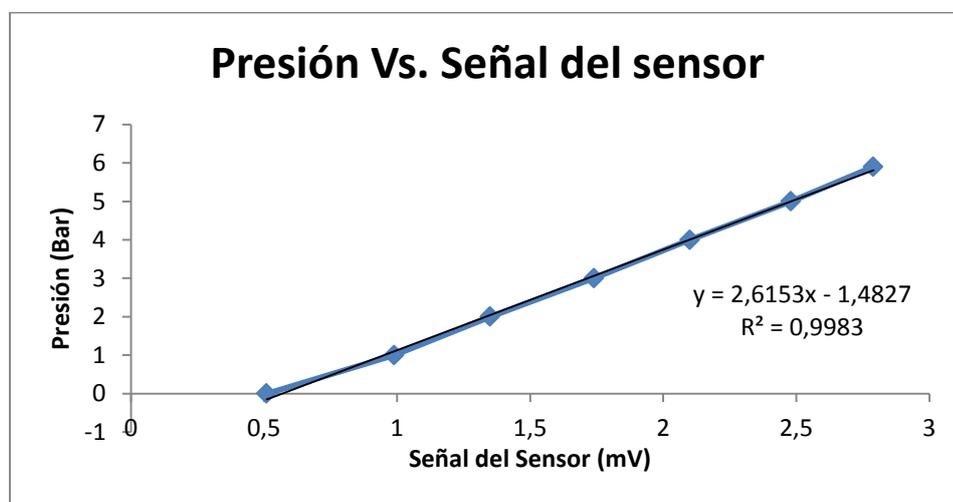


Ilustración 55 Presión vs Voltaje

Con los valores de presión se procedió a relacionar cada valor a su equivalente en profundidad gracias a la linealidad entre presión y profundidad. La Ilustración 56 presenta los valores de Profundidad vs Presión; la Ilustración presento una ecuación que permitió al programa presentar en la interfaz del usuario la profundidad a la que se encuentra el submarino.

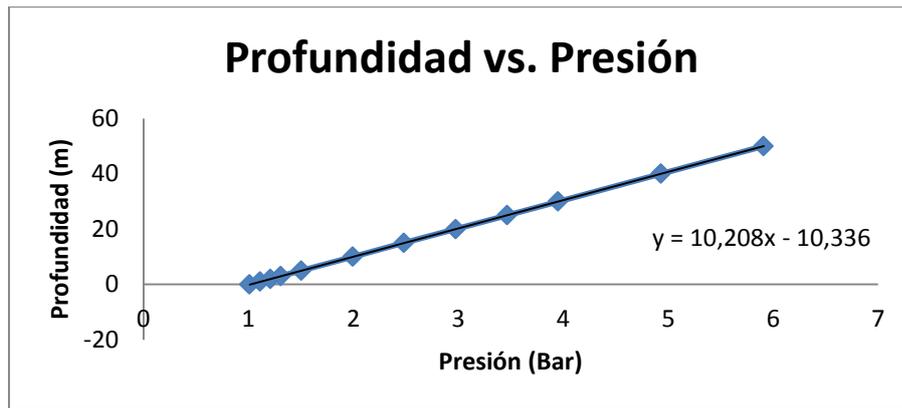


Ilustración 56 Profundidad vs presión

Pruebas similares fueron necesarias para calibrar el sensor de temperatura. Se hicieron pruebas calentando agua a diferentes temperaturas. Se midió la temperatura con un termómetro, y se tomó la señal análoga en mV del sensor. Al tabular los datos se obtuvo la Ilustración 57 Temperatura vs Señal del Sensor que permitió obtener la ecuación de la recta de regresión lineal. La ecuación permitió ajustar el programa a la señal del sensor; la interfaz de usuario presenta la temperatura del agua durante la inmersión.

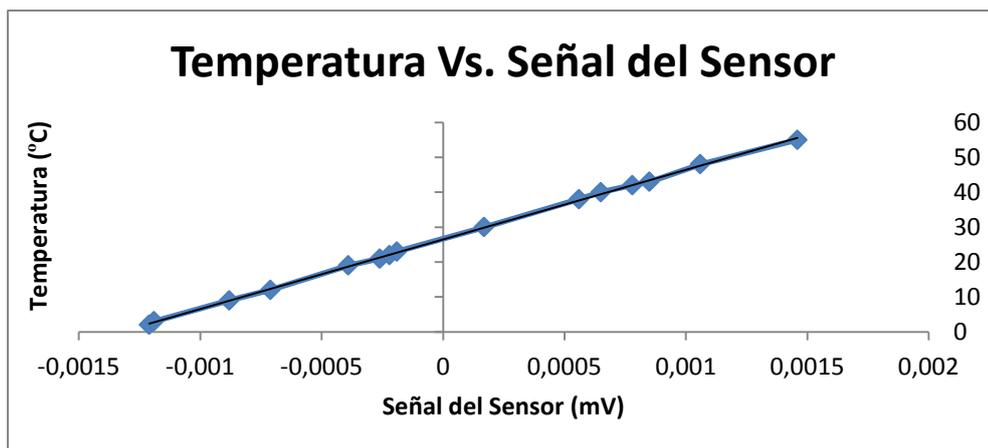


Ilustración 57 Temperatura vs Voltaje

6.3 Adquisición de audio y video

La parte del programa encargada de la adquisición de video y sonido realiza una inicialización de la cámara y recibe las imágenes de la misma. Así como también recibe el audio del micrófono (véase Ilustración 58). El programa sincroniza las dos actividades, y puede grabar un video en formato avi o tomar fotografías en formato jpg. Además, reproduce el video en tiempo real en la interfaz para poder ver lo que está sucediendo al frente del submarino. El programa tiene un filtro para los códec de video y está definido para que el tamaño y calidad del video no sea muy exigente en términos de memoria del computador.

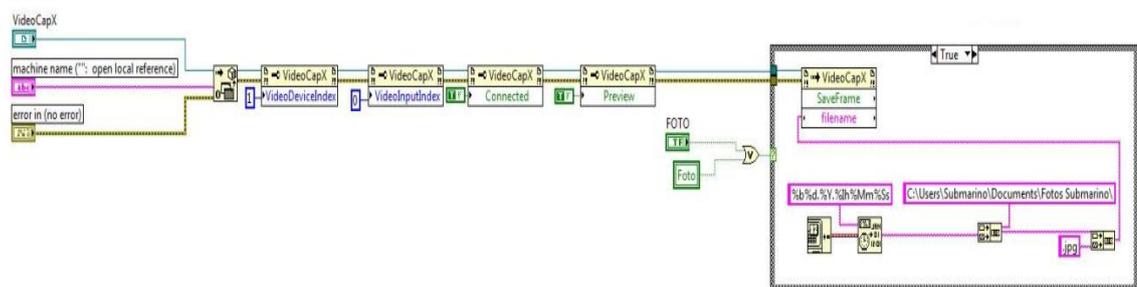


Ilustración 58 Programa para tomar fotografías

6.4 HMI (Human Machine Interface)

La interfaz gráfica permite la interacción entre el operario en superficie y el submarino que se encuentra bajo el agua. Se espera que esta interfaz sea simple, de fácil comprensión para el usuario y que al mismo tiempo presente información relevante del entorno del submarino para que el operario pueda maniobrar el submarino y a la vez poder tener información de datos adquiridos por el mismo sin complicaciones.

El vehículo submarino necesita un programa para que pueda ser controlado con eficiencia desde la superficie. Con ayuda de la interfaz gráfica en el computador el usuario podrá controlar y maniobrar al submarino con un dispositivo de control remoto. La ilustración 59 presenta la Interfaz del programa que el usuario maneja para controlar al Submarino USFQ.

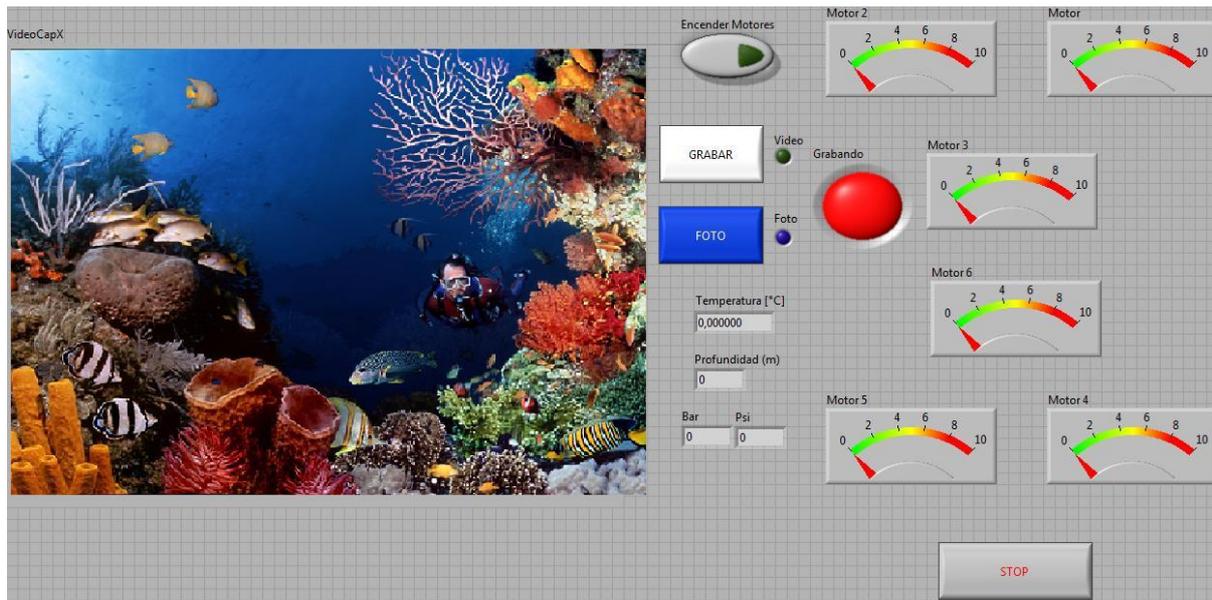


Ilustración 59 Interfaz para usuario

7 Pruebas

7.1 Pruebas piscina

Inicialmente, se realizaron varias pruebas en una piscina. Estas pruebas fueron de mucha importancia para el desarrollo del submarino, ya que proporcionaron mucha información sobre fallas o mejoras en el vehículo submarino, antes de hacer las verdaderas pruebas en aguas abiertas. La piscina tenía una profundidad de 2 m lo que era suficiente para nuestros propósitos en las primeras pruebas.

Para las pruebas en piscina se utilizó un cable de 10 m, que era mucho más corto que el requerido de 50 m, para que sea más fácil de manipular y hacer las pruebas. En la primera inmersión del submarino se observó que flotaba y nos dimos cuenta de cuánto peso era necesario aumentar al vehículo para que logre una flotabilidad neutra. Las pruebas se las realizaron aumentando peso progresivamente, y tratando de que el submarino se mantenga balanceado. Se aumentaron pesos pequeños hasta llegar a un peso aproximado de 9.3 Kg que fue el peso con el que se alcanzó una flotabilidad neutra en la piscina (*véase Ilustraciones 60 y 61*).

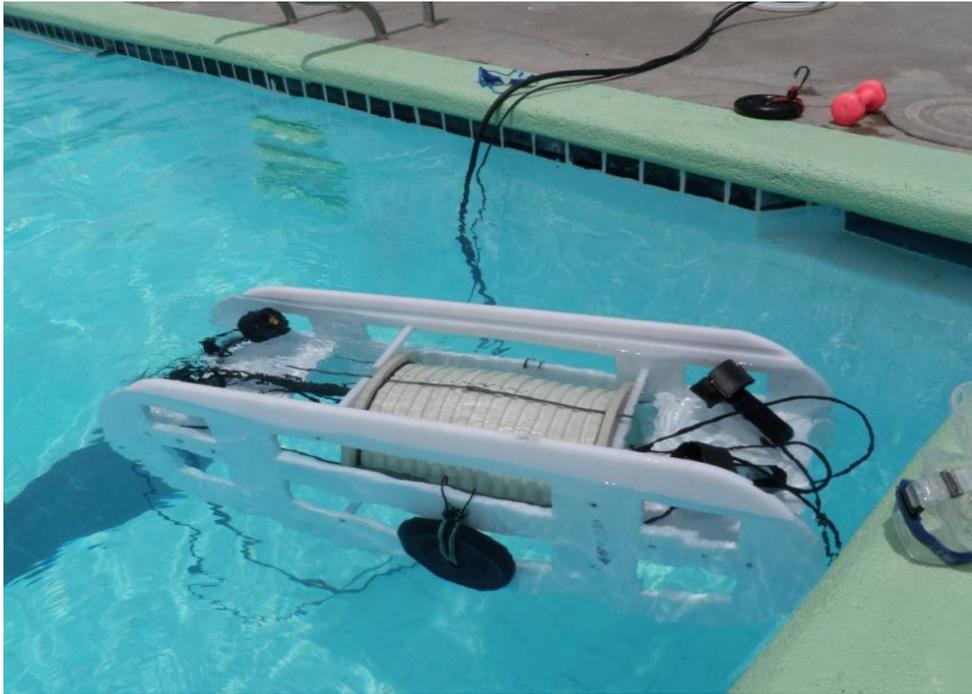


Ilustración 60 Pruebas de flotabilidad en Piscina

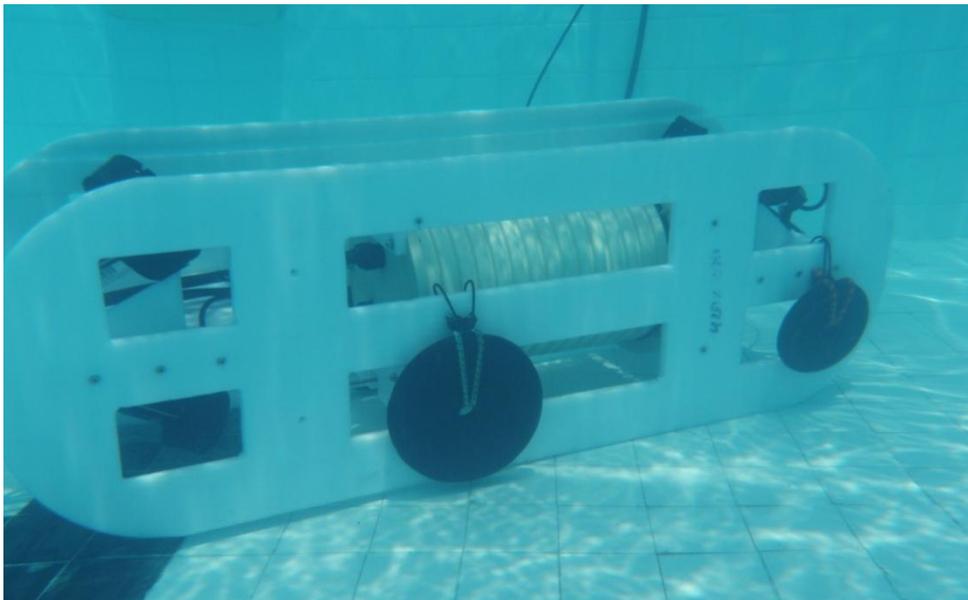


Ilustración 61 Pruebas de Hermeticidad en piscina

Una vez conocido el peso exacto a aumentar, la siguiente prueba fue ver en qué parte del submarino poner los pesos para que el submarino se balancee correctamente y no se incline. El submarino tiene varios orificios en donde colocar las barras de peso, lo que facilita esta tarea. Se logró obtener una flotabilidad neutra en la

mitad de la piscina, permitiendo una gran capacidad de movimientos para el submarino. Además se colocó la mayor cantidad de peso en la parte inferior del submarino, con la intención de que el centro de masa del submarino este por debajo del centro de flotabilidad y con esto se consiguió que el vehículo sea estable y que no tienda a voltearse. En la lustración 62 se puede observar al peso con el que el submarino logro una flotabilidad neutra.

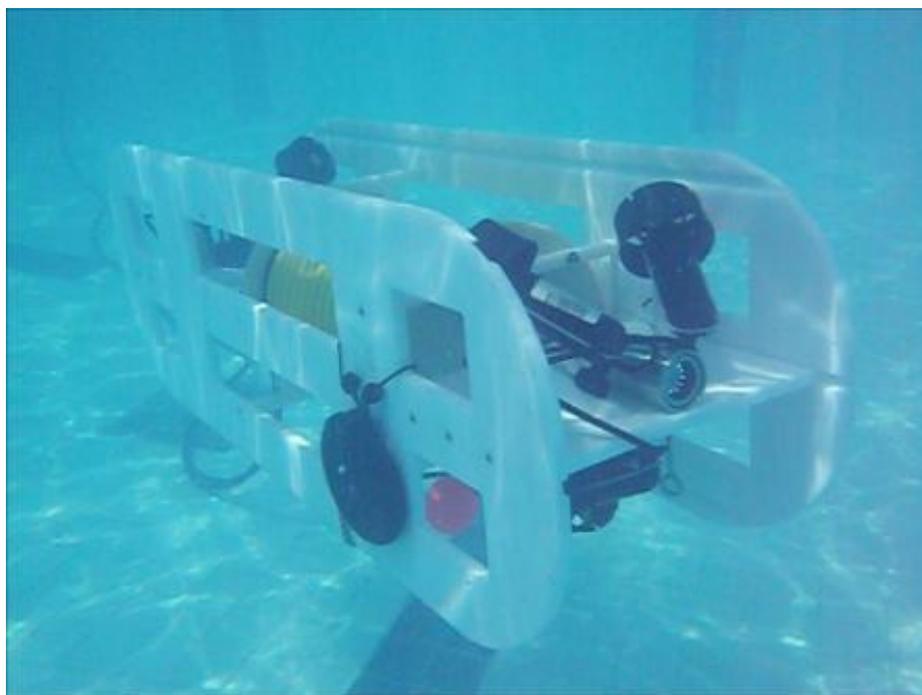


Ilustración 62 Pruebas de Flotabilidad Neutra

En las inmersiones en piscina se comprobó que la cámara funcionaba perfectamente y la interfaz con el computador estaba sincronizada, lo que permitió ver en tiempo real lo que el submarino tenía enfrente de él.

En una de las inmersiones una de las prensa estopas que sellaba el cable de un motor tuvo una falla. Uno de los pequeños dientes que hacen presión con el empaque se rompió. Esto provocó que el empaque no selle correctamente y debido a esta falla filtro un poco de agua por el empaque al compartimento seco del submarino. Se

cambió la prensa estopa y se realizaron nuevas pruebas para ver si el problema se había resuelto. Se comprobó la hermeticidad del submarino y luego se continuó a probar el funcionamiento del joystick y de motores, los cuales no presentaron ningún problema en el funcionamiento.

El programa en el computador funcionaba perfecto, el único inconveniente que se presentó en algunas de las prueba fue que la pantalla del computador no se veía claramente, esto debido a la cantidad de luz que hacía durante el día por el sol, lo que dificultaba bastante la maniobrabilidad del submarino. En la Ilustración 63 se puede apreciar el lugar de donde se controló al submarino durante las pruebas.



Ilustración 63 Estación de control para las pruebas del Submarino

Durante las pruebas en piscina se midió el tiempo en el que la computadora tardaba en encenderse y conectarse con el cRIO, el cual fue alrededor de 10 minutos, lo que quitaba un poco de independencia con el computador. También se probó cual sería el tiempo máximo de utilización del computador y se llegó a la conclusión que la

batería original de la computadora no estaba en tan buen estado por lo que se descargaba en menos de 30 minutos, lo que limitaba nuestro tiempo de pruebas o de utilización del submarino.

Se adquirió una batería nueva, más grande, del doble de capacidad, la cual permitió utilizar la computadora funcionando con los programas por más de 3 horas, esto permitió la independencia que se necesitaba para poder utilizar la computadora y controlar al vehículo submarino a bordo de un bote o cualquier lugar que no tenga una fuente de energía eléctrica.

También se probó la duración del banco de baterías del submarino para saber cuánto tiempo de independencia se tenía para trabajar y utilizar al submarino debajo del agua. Se comprobó que el banco de baterías duraba más de 3 horas de funcionamiento con submarino prendido y moviéndose todo el tiempo. Lo que nos permitía perfectamente trabajar con el submarino en cualquier bote o lugar que no tenga una fuente de energía eléctrica.

Una vez que el submarino funcionaba correctamente en la piscina sin filtraciones, con los pesos y el balance adecuado, se prosiguió a la realización de pruebas de velocidad y de tiempo. Se realizó una prueba con el submarino sumergido a 2 m por una distancia de 25 m en línea recta, otra prueba de 2 m de subida hasta la superficie y otra prueba de cuánto tarda el submarino en girar 360 °. Se calcularon las velocidades promedio que tiene el submarino en los distintos tipos de movimientos, y los resultados se muestran en las Tablas 6 a 8.

Tabla 6 Velocidad movimiento horizontal

Velocidad en Línea Recta				
Distancia [m]	Tiempo [sec]	Tiempo Promedio [sec]	Velocidad [m/s]	Velocidad [nudos]
25	29,39	29,965	0,834306691	1,621762465
25	30,54			

Tabla 7 Velocidad movimiento vertical

Velocidad de Subida				
Distancia [m]	Tiempo [sec]	Tiempo Promedio [sec]	Velocidad [m/s]	Velocidad [nudos]
2	10,36	10,045	0,199104032	0,387027275
2	9,73			

Tabla 8 Rotación respecto al eje vertical

Tiempo de Giro	
Tiempo [sec]	Tiempo Promedio [sec]
28,12	28,695
29,27	

La velocidad obtenida en las pruebas fue menor a la velocidad esperada. El submarino tuvo que cargar el peso del cable y esto hizo que su velocidad disminuya considerablemente. El cable presento una flotabilidad negativa generando una fuerza de fricción que no se consideró en los parámetros iniciales de diseño.

Con los resultados obtenidos también se realizó un cálculo de aceleración del submarino tanto para moverse hacia adelante o atrás como para subir o bajar.

Para el cálculo de la aceleración horizontal se consideró la fuerza total de los motores en el eje x. Con la fuerza de empuje F_{Ex} calculada anteriormente, y un aproximado de la masa total del submarino se procedió a calcular la aceleración horizontal a_x :

$$F_{Ex} = m * a_x$$

$$a_x = \frac{F_{Ex}}{m} = \frac{101,76 \text{ Kg} \cdot \frac{m}{s^2}}{40 \text{ Kg}}$$

$$a_x = 2,54 \text{ m/s}^2$$

Para el cálculo de la aceleración vertical se tomó en cuenta la fuerza total de los motores en el eje y. Con la fuerza de empuje F_{Ey} calculada anteriormente, y un aproximado de la masa total del submarino se procedió a calcular la aceleración horizontal a_y :

$$F_{Ey} = m * a_y$$

$$a_y = \frac{F_{Ey}}{m} = \frac{64,53 \text{ Kg} \cdot \frac{m}{s^2}}{40 \text{ Kg}}$$

$$a_y = 1,61 \text{ m/s}^2$$

Dentro de las pruebas finales realizadas en piscina se logró ver que todo funcionaba correctamente, el submarino grababa videos con audio, tomaba fotos sin problema y se movía sincronizada mente como el usuario lo deseaba. La estructura del submarino fue firme. La flotabilidad lograda con los pesos fue perfecta para la piscina y el submarino lograba todos los movimientos deseados de una manera muy estable. En las Ilustraciones 64 y 65 se puede ver al submarino durante las pruebas en piscina.

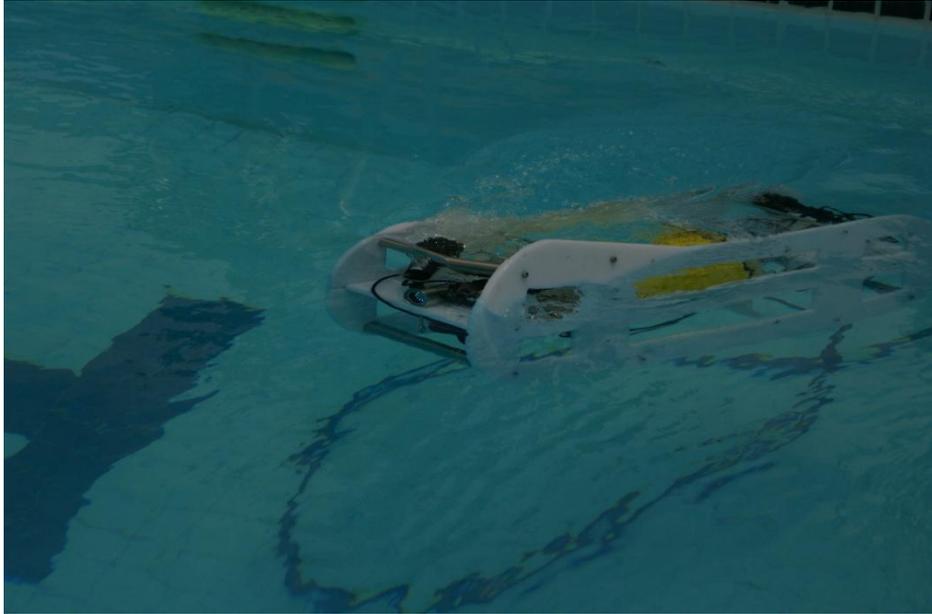


Ilustración 64 Pruebas maniobrabilidad Submarino

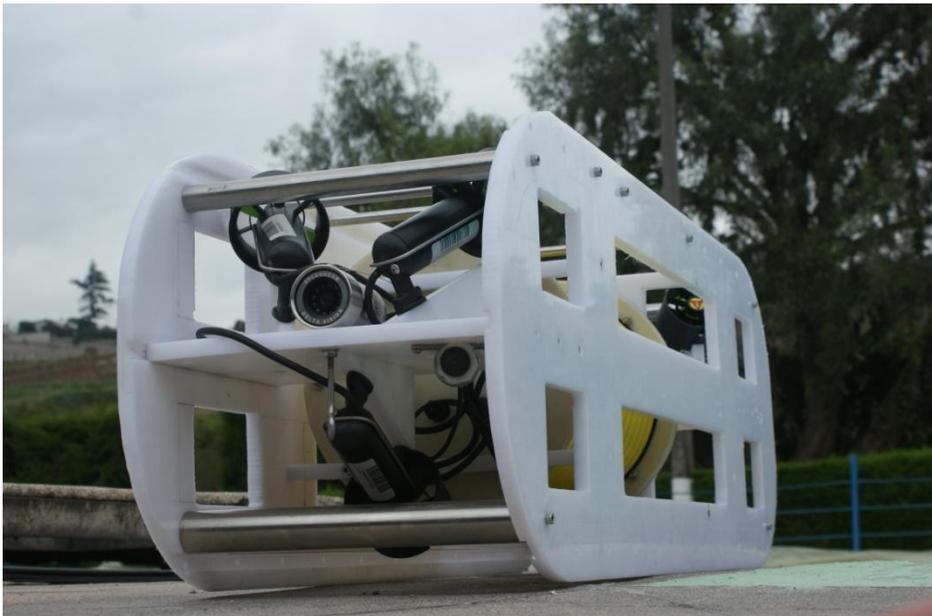


Ilustración 65 Submarino USFQ

7.2 Diseño Final

Los resultados obtenidos en las pruebas de piscina permitieron pulir los últimos detalles del proyecto para las pruebas finales en mar abierto.

La estructura construida para el submarino no necesito ninguna modificación. Las pruebas en piscina demostraron que el submarino es capaz de desplazarse sin mucha resistencia en el agua. Sin embargo, para reducir la resistencia del agua con los componentes estructurales del submarino se procedió a esconder las cabezas de los pernos en la estructura. El primer ensamblaje del submarino para las pruebas en piscina presentaba las cabezas de los pernos por encima de la superficie de los perfiles estructurales. Para mejorar el flujo del agua sobre la superficie del submarino se decidió aumentar el diámetro de los orificios en 4 mm para poder esconder la cabeza de los pernos Allen en la superficie de la estructura.

Para el diseño final del submarino fue necesario instalar 50 metros de cable para la comunicación y control del submarino. La cámara de video y el hidrófono ya poseían el largo de cable necesario para operar a una profundidad de 50 metros. Para la comunicación fue necesario utilizar 50 metros de cable Ethernet flexible categoría 5. Para garantizar la hermeticidad del cable de comunicación fue necesario recubrir el cable Ethernet con un espagueti térmico. El espagueti térmico es una película elástica que se deforma y ajusta sobre el cable cuando se aplica calor. El espagueti protegerá el cable de comunicación de cualquier golpe durante la manipulación u operación del submarino.

La alimentación de energía al módulo de control del submarino se realizó mediante un cable de potencia sucre 2x8 AWG. Al igual que el cable de

comunicación, fue necesario instalar 50 metros de cable de potencia para el funcionamiento del submarino.

El cable de comunicación y potencia tienen una conexión fija en el módulo de control dentro del submarino. Los terminales de conexión de los cables están en superficie y se conectan de forma independiente al bloque de potencia y al computador. Para manipular los diferentes cables como una sola unidad, fue necesario unir los cables utilizando abrazaderas plásticas cada metro a lo largo de los 50 metros de cable. Utilizando un carrete se enrolló de forma manual los 50 metros de cable. Los terminales de conexión permanecen libres para conectarse al bloque de potencia y al computador utilizando extensiones de cable individual para cada conexión. Al mantener las conexiones individuales desde el carrete hacia el computador y bloque de potencia se facilitó la manipulación del cable para la operación del submarino. Además las conexiones individuales permiten una mayor comodidad al operador del submarino al momento de controlar el submarino.

Se instaló 60 metros de cable de acero inoxidable de 1/8 de pulgada como método de seguridad. Si el submarino queda fuera de funcionamiento a una profundidad considerable, es necesario tener un mecanismo o método de rescate. Al instalar el cable de acero inoxidable se creó una línea de seguridad que mantenga siempre conectados al submarino con la embarcación. El cable de acero inoxidable permitirá a los usuarios remolcar al submarino desde las profundidades sin comprometer la integridad de los cables de comunicación y potencia. El cable de acero inoxidable de 1/8 de pulgada puede soportar cargas de 4 toneladas.

Para lograr una flotabilidad neutra se aumentó 10 kilos de masa, adicionales al peso total del submarino, utilizando ejes de acero inoxidable como se presentó en la

sección 3.1.3.4 *Flotabilidad Submarino*. Se instalaron cuatro ejes de ½ pulgada, dos ejes de 1 pulgada y dos ejes de 1 ½ pulgada. Se instaló cada eje de 1 ½ pulgada en los extremos inferiores del submarino. Un eje de 1 pulgada se instaló en el extremo superior delantero, y el segundo eje se instaló en la parte inferior entre los dos ejes de 1 ½ pulgada. Los 4 ejes de ½ pulgada se instalaran durante la prueba del submarino en mar abierto; los ejes de ½ pulgada regularan la estabilidad del submarino distribuyendo el peso a lo largo del submarino. Además, los ejes de ½ pulgada también protegerán el módulo de control de los impactos contra rocas en el fondo marino.

7.3 Pruebas Finales

Las pruebas finales fueron realizadas en la costa ecuatoriana por el sector de Puerto López, ubicada en la provincia de Manabí, y específicamente en la Isla de Salango (véase *Ilustración 66*). Todas las pruebas fueron hechas con la ayuda y colaboración de Explorammar Diving, una empresa de buceo ubicada en Puerto López. Dicha empresa nos rentó el bote para hacer las pruebas y equipos de buceo para supervisar al submarino en las pruebas realizadas.

Antes de realizar las pruebas fue necesario movilizarse en bote al sector de piedra honda en la Isla de Salango, un lugar óptimo para realizar las pruebas. Se preparó al submarino y los buzos que iban a acompañar al submarino durante las pruebas (véase *Ilustración 67*). Se realizaron 3 pruebas en aguas abiertas, para probar diferentes profundidades y así ver como se comportaba el submarino en diferentes presiones. Otro objetivo era probar el funcionamiento de la cámara, hidrófono y los motores, así como también la sincronización del joystick, el programa de LabView y motores.



Ilustración 66 Isla de Salango



Ilustración 67 Buzos preparándose para la Inmersión

Prueba # 1 Hermeticidad del compartimiento Seco

Se llevó al submarino a una profundidad de 30 m por 20 minutos solo con la cámara funcionando pero sin componentes eléctricos dentro del compartimiento seco. El objetivo de esta prueba era probar el funcionamiento de la cámara y el hidrófono, grabar video y tomar fotos, y también saber si el compartimiento podía soportar la presión de 0.4 MPa y asegurar que no existan filtraciones de agua antes de embarcar los componentes eléctricos. La prueba fue supervisada por dos buzos que iban observando si existía filtración de aire entre los conectores o tapas del compartimiento seco (véase Ilustración 68).



Ilustración 68 Primera Inmersión Submarino USFQ

Al finalizar la prueba se subió al submarino a bordo del bote, se confirmó que no entro agua al compartimiento y se procedió a embarcar al procesador cRIO y los demás componentes electrónicos necesarios para el control del Submarino. La prueba también demostró el correcto funcionamiento del programa para la interfaz de video

para el usuario, permitiendo la captura de fotografías y la grabación de videos con audio.

Prueba # 2 Maniobrabilidad, Flotabilidad y Agilidad

Se llevó al submarino a una profundidad de 15 m durante 60 minutos. Esta prueba se la realizo con el cRIO y todos los componentes eléctricos dentro del compartimento y se probó el funcionamiento de los mismos. Había dos buzos que supervisaban al submarino durante la inmersión. En la ilustración 69 se puede observar a un buzo supervisando el submarino.

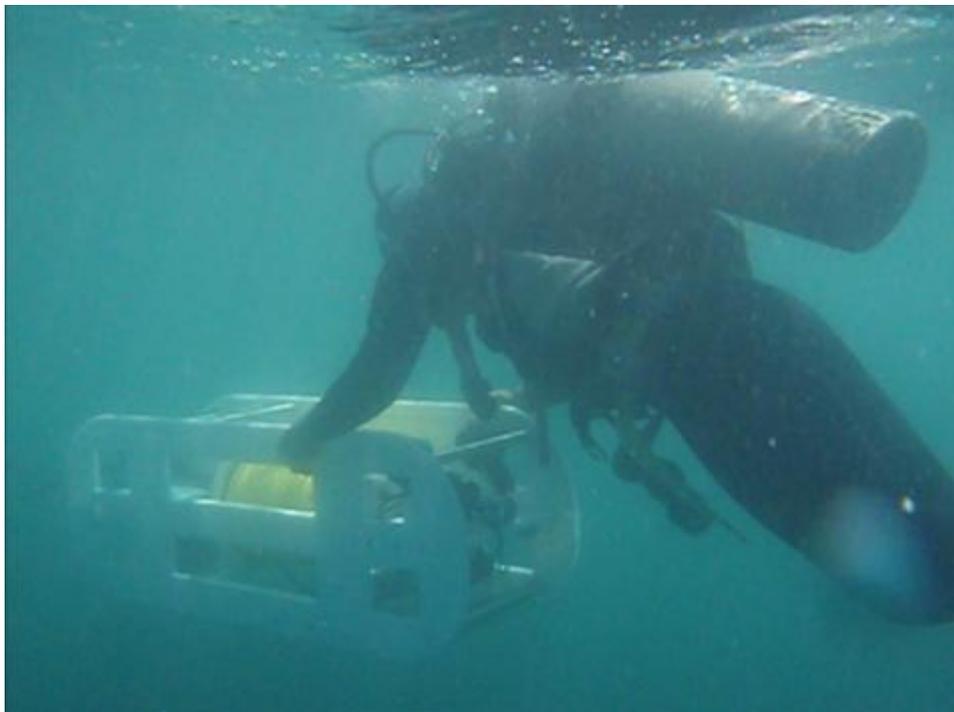


Ilustración 69 Submarino USFQ inmersión operada a distancia

El submarino funciono perfectamente en la segunda inmersión, la sincronización entre el joystick, el programa de LabView y motores no presento ningún problema. El vehículo respondía al mando del operario, la cámara e hidrófono funcionaron bien y permitieron grabar videos con audio y capturar diversas fotografías. Un inconveniente durante la prueba fue el cable de potencia, el cable era pesado y se hundía hasta el fondo, en ocasiones se enredaba con las piedras o el coral

del fondo, lo que genero inconvenientes al momento de maniobrar. El peso del cable afecto también la flotabilidad del submarino, la flotabilidad del submarino era neutra pero con tendencia negativa. Al soltar mayor longitud de cable desde la embarcación el peso del cable hundía el submarino hasta el fondo marino; sin embargo, al soltar desde superficie la longitud de cable estrictamente necesaria para la operación permitía que la flotabilidad del submarino se mantenga neutra.

Los movimientos del Submarino fueron agiles presentando los 5 grados de libertad que el proyecto tiene como requerimiento. Durante la prueba se constató la presencia de corrientes marinas, el submarino pudo contrarrestar el efecto de la corriente manteniendo la estabilidad y maniobrando en contra de la misma; sin embargo los buzos no tenían equipos para registrar la fuerza de la corriente.

Prueba # 3 Inmersión a 50 metros de profundidad

Se llevó al submarino a una profundidad de 50 m durante 20 minutos. Esta vez no tenía componentes eléctricos ni buzos que lo supervisen debido a la profundidad. El propósito de esta prueba era estrictamente probar que el submarino soportaba la presión de 0.6 MPa a esa profundidad. Durante esta prueba la cámara y el hidrófono si estaban en funcionamiento. Al realizar esta prueba tuvimos que soltar todo el cableado del submarino. Se aumentó el peso de la estructura para compensar la falta de componentes electrónicos y para garantizar una flotabilidad negativa durante la inmersión.

El fondo marino es muy irregular y resulta muy complicado para los marineros saber la profundidad exacta de una zona; sin embargo, los marineros conocen muy bien las costas locales y su profundidad aproximada. Para la tercera inmersión el

lugar donde se realizó la prueba presentaba una profundidad mayor a 50 metros, por ello el submarino no llegó al fondo marino y quedó suspendido por el cable desde la embarcación. Esta situación implicó que la concentración de esfuerzos se localice sobre las conexiones, especialmente en el cable que realizaba la mayor tensión. El cable de seguridad tenía que recibir la mayor tensión durante la manipulación del cable; pero al recuperar el submarino del fondo marino se percató que el cable que más tensión presentaba era el cable de potencia. Recolectar los 50 metros de cable en el pequeño corredor de la embarcación presentó un gran reto. Además, la operación tenía que realizarse con bastante cuidado para evitar enredar el cable en superficie y para evitar la tensión en el cable de potencia.

Al recuperar el submarino se procedió a analizar visualmente la estructura en busca de desperfectos o abolladuras, al comprobar la integridad de la estructura se procedió a inspeccionar el interior del compartimiento seco. Dentro del compartimiento se encontró presencia de agua, se inspeccionaron las paredes internas del cilindro y cada conector de forma individual para determinar la causa de la filtración. Se detectó que la prensa estopa utilizada para el cable de potencia contenía agua en sus paredes internas, y se constató que la longitud del cable presente en el compartimiento después de la prueba era menor a la longitud de cable antes de la prueba.

Durante la recolección del Submarino el cable de potencia se había estirado demasiado y la prensa estopa no pudo sujetar el cable con la suficiente fuerza para impedir el movimiento del cable. Es necesario para futuras pruebas evitar que el cable de potencia cargue toda la tensión de fuerzas durante la manipulación del submarino y sujetarlo en algún punto fijo fuera del compartimiento seco.

8 Conclusiones y recomendaciones

8.1 Conclusiones

De acuerdo a los requerimientos generales establecido en el capítulo tres (referencia tabla 1 página 31) y los resultados obtenidos durante las pruebas del Submarino USFQ se puede concluir:

- La estructura de submarino puede sumergirse a 50 metros de profundidad sin poner en riesgo a los componentes internos del submarino. El diseño del compartimiento seco impidió que el agua ingrese al compartimiento durante una inmersión a 50 metros de profundidad.
- El bloque de potencia permitió que el submarino funcione por más de dos horas.
- La masa total del Submarino USFQ es 38,3 kg.
- El Submarino USFQ tiene como dimensiones 120 cm de largo por 35 cm de ancho por 40 cm de alto.
- El Submarino USFQ tiene flotabilidad negativa. El peso del cable no se consideró en los cálculos de flotabilidad. Durante las pruebas en mar abierto el peso del cable afecto la flotabilidad del submarino.
- El Submarino en el agua es inestable. El peso del cable afecto la estabilidad del submarino. La distribución de los pesos a lo largo de la estructura se realizó sin considerar el peso del cable. Durante las pruebas en mar abierto fue necesario redistribuir los ejes de acero inoxidable para estabilizar el submarino.
- El Submarino USFQ no alcanzo una velocidad de 5 nudos. El cable tiene flotabilidad negativa y durante las pruebas de velocidad en piscina causo que el submarino arrastre el cable. Como consecuencia la velocidad del Submarino USFQ es reducida.

- La configuración cónica de motores permitió alcanzar 5 grados de libertad.
- Los materiales elegidos para la construcción del submarino no fueron corroídos por el agua salada.
- La cámara de video y el hidrófono funcionaron al mismo tiempo logrando tomar fotos, grabar audio y video; y permitieron al usuario observar en tiempo real lo que sucedía al frente del submarino durante una inmersión.
- Los sensores de presión y temperatura no funcionaron. Los sensores fueron corroídos por el agua salada durante las pruebas.
- La construcción modular permitió un fácil ensamblado y mantenimiento del submarino.
- El joystick controló al submarino en tiempo real, y permitió el uso de los diferentes botones para capturar fotos, grabar audio y video simultáneamente.
- La programación de control de los motores a través del joystick permitió realizar diferentes combinaciones de movimientos generando una mayor movilidad y agilidad al submarino.
- El diseño de apriete entre las tapas del compartimiento seco impidió que el agua ingrese dentro del compartimiento seco a una profundidad de 50 metros.
- Las prensa estopas utilizadas para hermetizar las diferentes conexiones impidieron el paso de agua al compartimiento seco a una profundidad de 50 metros.
- El cable de seguridad no distribuyó la tensión resultante del peso del Submarino. Por mala manipulación, el cable de potencia soportó toda la carga del peso y como resultado se filtró agua dentro del compartimiento seco a través del cable de potencia.

- El software LabView simplifico el lenguaje de programación y facilito la integración de los diferentes componentes de control en una sola interfaz amigable para cualquier usuario.

8.2 Recomendaciones

De acuerdo a las conclusiones y pruebas realizadas en piscina y en aguas abiertas del Submarino USFQ, se puede recomendar:

- Utilizar cables con flotabilidad positiva para que flote detrás del submarino. Si el cable del submarino tiene flotabilidad positiva disminuye el riesgo que el cable se enrede o atore entre los obstáculos del fondo marino. Además esto liberaría la fricción del cable con el fondo, lo que hace que el submarino haga menos esfuerzo al realizar cualquier movimiento.
- Para manejar longitudes de cables es necesario optimizar un carrete con motor eléctrico que permita enrollar y desenrollar los diferentes cables de forma continua.
- Si es necesario aumentar la velocidad del submarino se recomienda instalar dos motores más a la estructura del sumergible.
- Para que el submarino funcione por más de dos horas se recomienda comprar un computador con una batería de larga duración; también se puede ampliar el bloque de potencia con más baterías para aumentar la autonomía del submarino.
- Para garantizar la hermeticidad del compartimiento seco es necesario comprar conectores acuáticos que permitan la flexibilidad y rotación de los cables. Al usar un conector acuático se puede reducir el número de cables que conectan al submarino con la superficie.
- Es necesario instalar sensores construidos con materiales no corrosibles para que puedan funcionar con la salinidad del mar. Las herramientas de ensamblaje y

mantenimiento del submarino deben ser de acero inoxidable. El medio donde trabajara el submarino corroe fácilmente cualquier herramienta metálica.

- Para realizar inmersiones en la noche es necesario instalar un sistema de iluminación extra en el submarino.
- Para grabar audio sin el ruido generado por los motores, es necesario instalar el hidrófono en el medio de la estructura; debe instalarse en una posición donde el flujo generado por los motores no impacte directamente en el hidrófono.
- Se deberá instalar una segunda cámara con zoom y pan giratorio para mejorar el campo de visión del submarino durante una inmersión.
- Para evitar que el cable de potencia se tense durante la manipulación del submarino, se recomienda fijar el cable con abrazaderas a la estructura del submarino. De esta manera el cable de seguridad soportara la tensión durante la manipulación.
- Se recomienda comprar las licencias de software actualizado y completo de LabView y Autodesk Inventor.

9 Bibliografía

- Marine Geoscience Data System. Black smoker at Galapagos Ridge (2010). Abril de 2010. Enero de 2011 <<http://media.marine-geo.org/image/black-smoker-galapagos-ridge-2010>>.
- McDuff, David y Dominic Paquet. Low cost autonomous robot submarine S.O.N.I.A 2000. Montreal, 2000.
- Schilling Robotics. Schilling Robotics. 2010. 2010 <<http://www.schilling.com/Pages/default.aspx>>.
- Administration, NOAA National Oceanic and Atmospheric. Ocean Explorer. 2006 Febrero 2006. 14 Diciembre 2010 <<http://oceanexplorer.noaa.gov/technology/subs/rov/rov.html>>.
- Altshuler, Robert C. . ORCA-VII: An Autonomous Underwater Vehicle. Cambridge, 2004.
- Anderson, Erin , et al. SEA WOLF II Autonomous Underwater Vehicle. Paper. North Carolina, 2004.
- Anderson, John D. Fundamentals of Aerodynamics. New York: McGraw Hill, 2001.
- Anhalzer, J.J. Galapagos. Quito: Imprenta Mariscal, 1998.
- Arcega, Cristian y Adam Burch. Project Janus. Paper. Carl Hayden, 2006.
- Arocha, Cesar Alvarez, y otros. «Control Teleoperado del Robot Submarino de Estructura REMO.» (2005): 1.
- Bernier, Michel y Ryan T. Foley. Latis II Underwater Remotely Operated Vehicle Technical Report. Maine, 2010.
- BLEICHER, ARIEL. Spectrum IEEE. Agosto de 2010. 2010 <<http://spectrum.ieee.org/robotics/industrial-robots/the-gulf-spills-lessons-for-robotics/0>>.
- CORPORATION, INNERSPACE. Innerspace Corporation. s.f. junio de 2010 <<http://www.innerspacethrusters.com/index.html>>.
- Galapagos Online Tours & Cruises. 1999-2010. 22 de Febrero de 2011 <<http://www.galapagosonline.com/nathistory/Oceanography/Currents.html>>.
- Gallardo, Gilda G y Theofilos Toulkeridis. Cuevas Volcánicas y otras atracciones espeleológicas. Santa Cruz, Galàpagos: CGCG, 2008.
- Gonzalez, Louis Andrew. DESIGN, MODELLING AND CONTROL OF AN AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE. Tesis. Crawley , 2004.
- Homebuilt ROVs. 2003. Junio de 2010 <<http://www.homebuiltrovs.com/>>.
- Indel Partner, Ltd. GNOM Underwater Remotely Operated Vehicle. s.f. Julio de 2010 <<http://www.gnom-rov.com/>>.

- Jackson, Michael H y Jackson Michael H. Galapagos a Natural History. Calgary: University of Calgary Press, 1993.
- K., McMullen Conley. Flowering Plants of the Galápagos. New York: Cornell University Press, 1999.
- KYSTDESIGN. Kystdesign Sub Sea Technology. 2007. Junio de 2010 <<http://www.kystdesign.no/pls/apex/f?p=10213:7120:246726178220870:::p:home>>.
- LLC, Dimension Engineering. Dimension Engineering. 2004. 2010 <<http://www.dimensionengineering.com/Sabertooth2x10.htm>>.
- MIT Project ORCA IV. 2009. Junio de 2010 <http://web.mit.edu/orca/www/2001_orca4.shtml>.
- NOAA Ocean Explorer. Discovery of "Black Smoker" Chimneys. Abril de 2005. Enero de 2011 <<http://oceanexplorer.noaa.gov/explorations/05galapagos/logs/dec14/dec14.html>>.
- Ocean Systems, Inc. Splash Cam Underwater Video Camera. 2008-2010. Junio de 2010 <<http://www.splashcam.com/>>.
- Owens, Dylan . Rex 2: Design, construction, and operation of an unmanned underwater vehicle. Tesis. Cambridge, 2009.
- PADI. Open Water Diver Manual. Rancho Santa Margarita: PADI, 2005.
- ROVs, Ocean Modules. Ocean Modules. s.f. Junio de 2010 <<http://www.ocean-modules.com/>>.
- San Francisco Maritime National Historical Park. The fleet type Submarine Chap 5 BUOYANCY AND STABILITY. Octubre de 2004. Abril de 2011 <<http://www.maritime.org/fleetsub/chap5.htm>>.
- SeaBotix. 2010. 2010 <http://www.seabotix.com/products/auv_thrusters.htm>.
- Shigley, Joseph Edward. Diseño en Ingeniería Mecánica. Mexico D.F.: McGraw-Hill, 2008.
- Society, Marine Technology. Remotely Operated Vehicle Committee of the Marine Technology Society. n.d. 14 Diciembre 2010 <<http://www.rov.org>>.
- Systems, Deep Sea. Deep Sea - Remotely Operated Vehicles (ROVs). s.f. Junio de 2010 <<http://www.deepseasystems.com/>>.
- Thomson Reuters. Pictures from a mile deep: Ground Zero of the BP oil leak. Septiembre de 2010. Octubre de 2010 <<http://blogs.reuters.com/photo/2010/09/20/pictures-from-a-mile-deep-ground-zero-of-the-bp-oil-leak/>>.
- Toulkeridis (Ph.D.), Prof. Dr. Theofilos. Volcanic GALAPAGOS Volcanico. Quito: CGVG- ESPE, 2011.

- Transit Port Autonomous Underwater Vehicles. s.f. Junio de 2010 <<http://www.transit-port.net/Lists/AUVs.html>>.
- University of Maine Mechanical Engineering senior design group. University of Maine Remotely Operated Vehicle (ROV). 2010. <http://www.umaine.edu/MechEng/Peterson/Classes/Design/2009_10/Projects/Website-ROV-Amy/Umaine%20ROV%20TEAM.htm>.
- Wernli, Robert L. . AUV'S THE MATURITY OF THE TECHNOLOGY. Paper. San Diego: Space and Naval Warfare Systems Center, s.f.
- White, Frank M. Fluid Mechanics Sixth Edition. New York: McGraw-Hill, 2008.
- Zemansky, Mark W. y Francis W. Sears. Fisica General. Madrid: Aguilar, 1957.

10 Anexos.

Anexo A: Presupuesto

La Tabla 9 Presupuesto presenta todos los gastos que incurrió el proyecto Submarino USFQ. La tabla incluye el costo de los equipos electrónicos comprados en Estados Unidos y el costo de los materiales de construcción del Submarino.

Tabla 9 Presupuesto

Código	Descripción	Cantidad	Precio Uni.	Sub total	Precio Final
MS0706	Motor Seabotix BTD -150	6	\$495	\$2.970	\$ 3.026,850
CS0703	Controlador Sabertooth 2x10	3	\$ 79,99	\$240	\$ 247,470
JT0701	Joystick Thrustmaster T Flight X	1	\$ 39,99	\$40	\$ 47,930
	<i>Sistema Audio</i>				
HA0701	Hidrófono	1	\$ 129,00	\$129	\$ 140,200
AA0701	Amplificador de Sonido	1	\$ 125,00	\$125	\$ 136,020
CA0799	Cable de Audio	250	\$ 0,20	\$50	\$ 60,740
	<i>Video</i>				
SV01CX	Software de audio y video VideoCapx	1	\$ 99,00	\$99	\$ 99,000
CV0701	Cámara de video	1	\$ 1.195,00	\$1.195	\$ 1.412,750
UG0602	USB grabber	2	\$ 10,45	\$21	\$ 26,880
	<i>Sensores</i>			\$0	
T0901	Termocupla	1	\$ 12	\$12	\$ 12,000
P0901	Transductor de presión	1	\$ 241	\$241	\$ 243,290
	<i>Procesador</i>				
NI9012	Procesados NI cRIO 9012	1	\$1.760,00	\$1.760	
NI9112	Chasis Procesador NI 9112	1	\$ 1.430	\$1.430	
	Módulo Análogo 32 ch NI 9205				
NI9205		1	\$ 880	\$880	
NI9401	Modulo Digital 8 ch NI 9401	1	\$ 295	\$295	
	Factura final National Instruments				\$ 4.132,520
	<i>Baterías</i>				
BF0612	Batería Fama 6 voltios 12 amperios	2	31,25	\$63	
BF1212	Batería Fama 12 voltios 12 amperios	2	58,04	\$116	
	Factura final baterías Fama				\$ 200,000
	<i>Cables</i>				
CE0560	Ethernet Cat 5 Multifilar	60	0,92	\$55	\$ 61,824
CP2860	Superflex 2x8 AWG 60 amperios	60	5,48	\$329	\$ 368,256
PG-09	Prensa estopa PG-09	16	0,8	\$13	\$ 14,336
PG-21	Prensa estopa PG-21	2	1,2	\$2	\$ 2,688
CT160	Espagueti térmico 1/4 pulgada	60	0,94	\$56	\$ 63,168
	<i>Materiales</i>				\$ 0,000

MD02	Tapas de Duralon	2	\$ 211	\$422	\$ 472,640
MP01	Plancha de Polietileno de Alta densidad 15x1000x2150 mm	1	\$ 558,30	\$558	\$ 625,296
	<i>Misceláneos</i>				
	Pernos Allen M05x08x25	32	\$ 0,50	\$ 16,00	\$ 17,920
	Pernos Allen M06x10x30	24	\$ 0,64	\$15	\$ 17,203
	Torquimetro	1	\$ 84,97	\$85	\$ 76,140
	Varilla Roscada				
	Acero Inoxidable 6mm x 1m	6	\$ 4,69	\$28	\$ 31,497
	Ejes acero Inox 1/2 pulgada	1,98	\$ 4,46	\$9	\$ 9,890
	Ejes acero Inox 1 pulgada	1,3	\$ 18,75	\$24	\$ 27,300
	Ejes acero Inox 1 1/2 pulgada	0,65	\$ 41,51	\$27	\$ 30,219
	O ring USA - 171	4	\$ 2,89	\$12	\$ 12,947
	O ring USA - 266	4	\$ 3,15	\$13	\$ 14,112
	Empaques caucho	4	\$ 10,26	\$41	\$ 45,965
	Varios	n/a			\$ 250,000
	<i>Pruebas</i>				
	Explorarmar Diving Inmersiones y embarcación	1			\$ 400,000
	Hospedaje Hotel Villa Colombia	1		\$80	\$ 89,600
TOTAL		\$ 12.416,652			

El presupuesto aprobado para el proyecto Submarino USFQ fue de \$14.000.

Anexo B: Programación

Toda la programación del proyecto Submarino USFQ se escribió utilizando el software National Instruments LabView 2009. Todo el programa está adjunto en el DVD-ROM en una carpeta llamada Programación; El proyecto submarino está compuesto por varios subprogramas. Para correr el programa se debe abrir el archivo *Submarino.lvproj*. El archivo Submarino.lvproj controla todos los comandos en el computador en tierra y los comandos en el procesador cRIO. Los subprogramas dentro del proyecto serán presentados a continuación.

Joystick:

La ilustración 70 muestra la parte del programa de inicialización del joystick. El joystick controlará los movimientos del submarino utilizando los diferentes ejes presentes en el dispositivo. El joystick también permitirá al usuario grabar video y tomar solo al pulsar los botones presentes en el joystick.

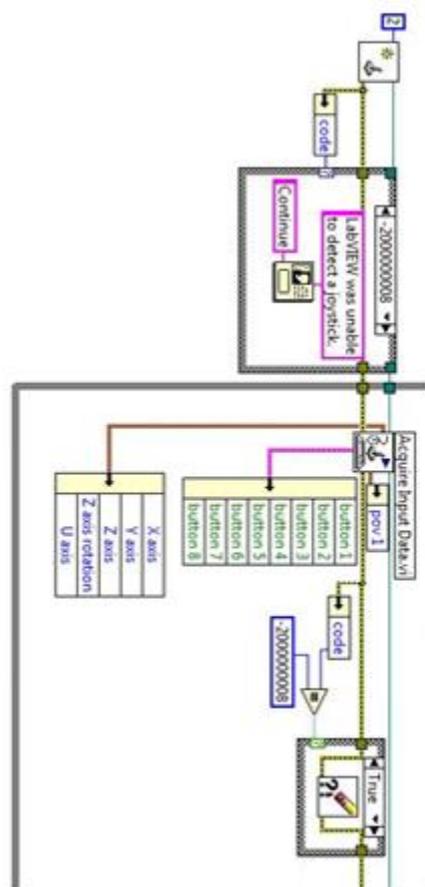


Ilustración 70 Línea de programa para el Joystick

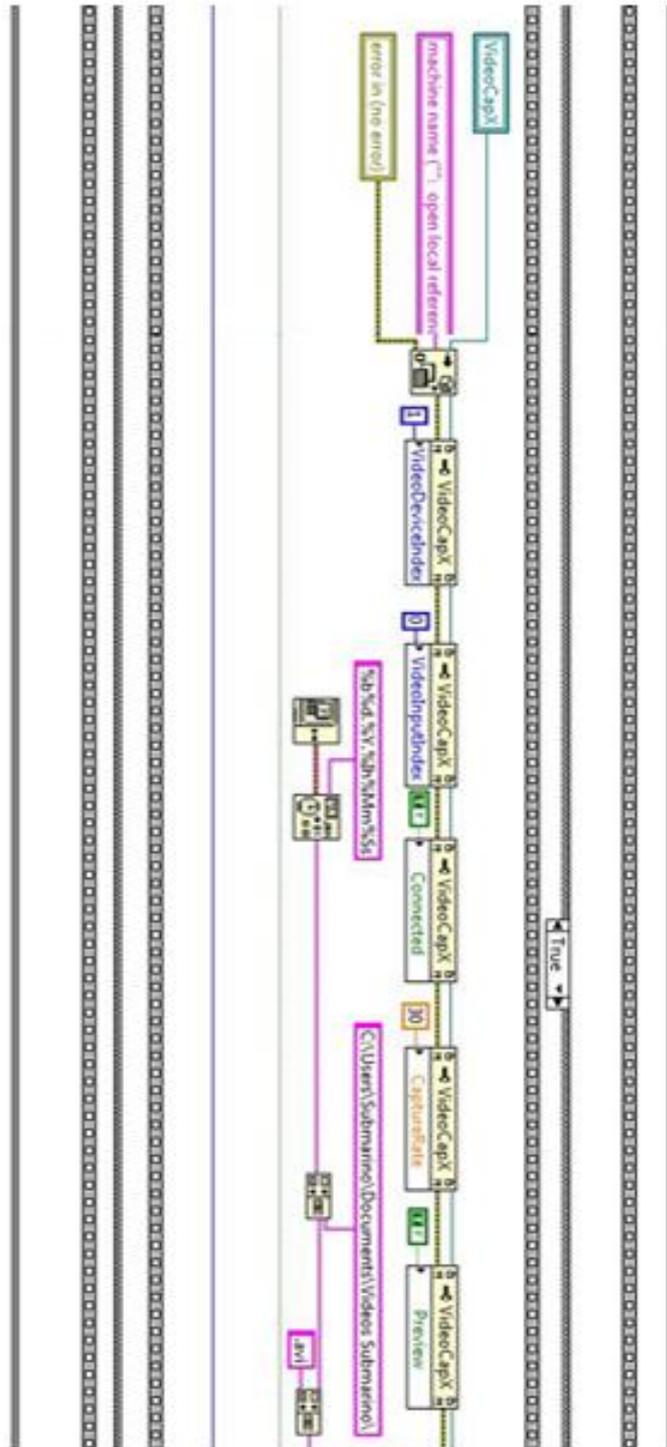


Ilustración 72 Línea de programa para video 2

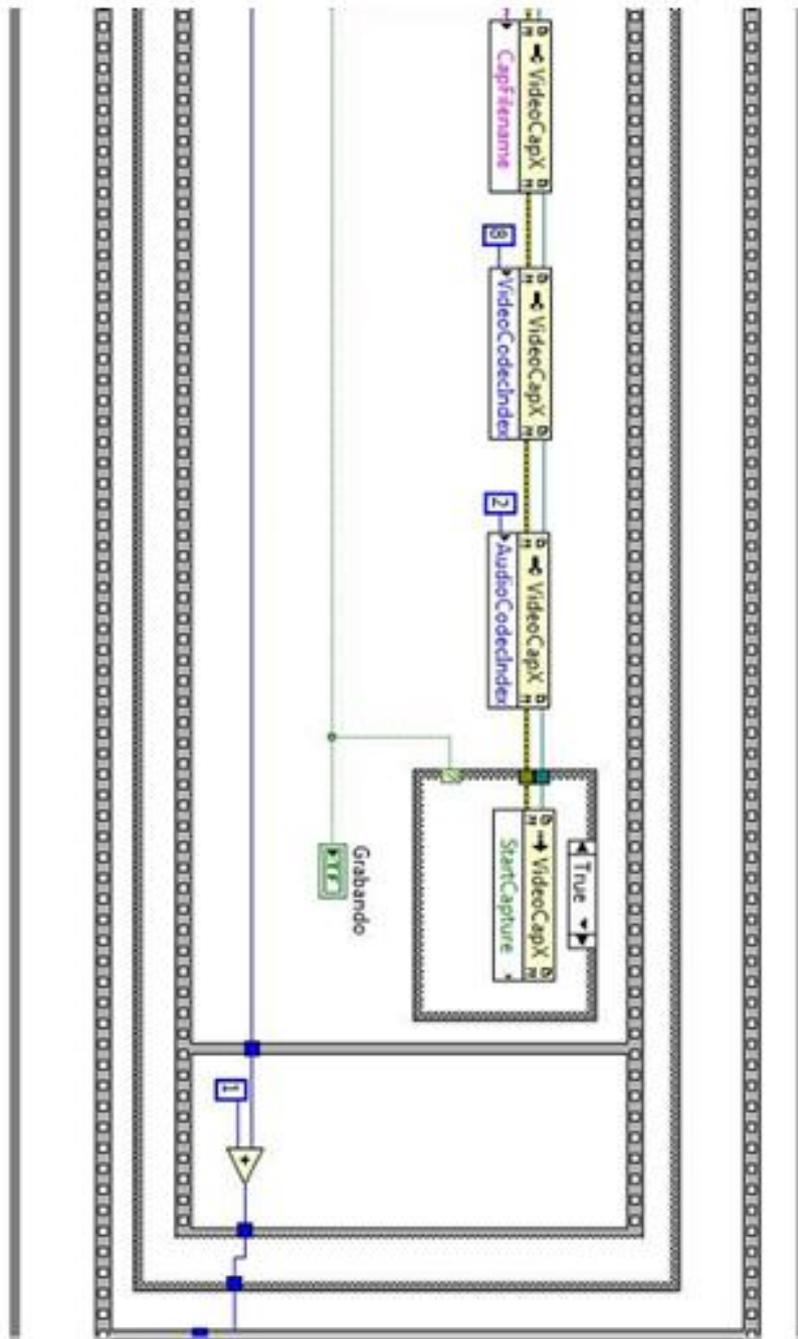


Ilustración 73 Línea de programa para video 3

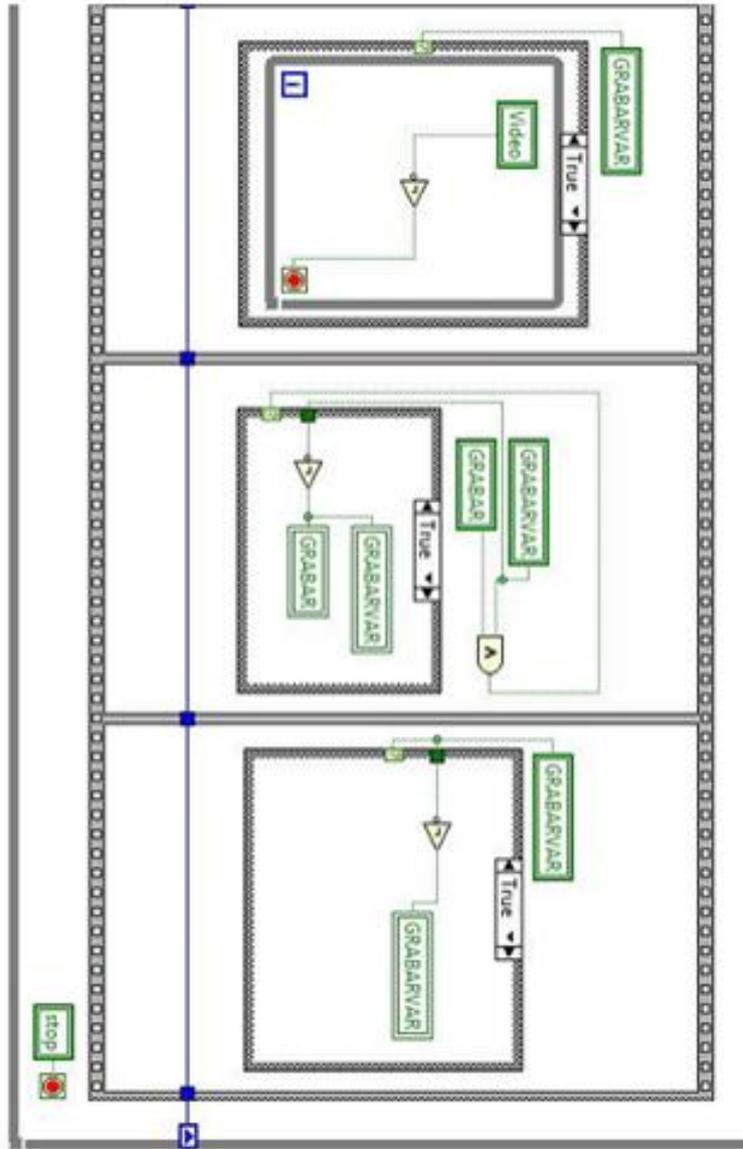


Ilustración 74 Línea de programa para video 4

Fotografía

Las ilustraciones 76 y 77 presentan el programa que permite realizar fotografías utilizando la cámara de video. Este programa también utiliza el software VideoCapX al momento de capturar la imagen.

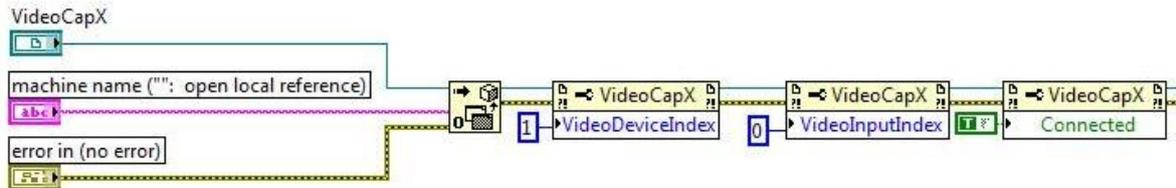


Ilustración 76 Línea de programa para fotografía parte 1

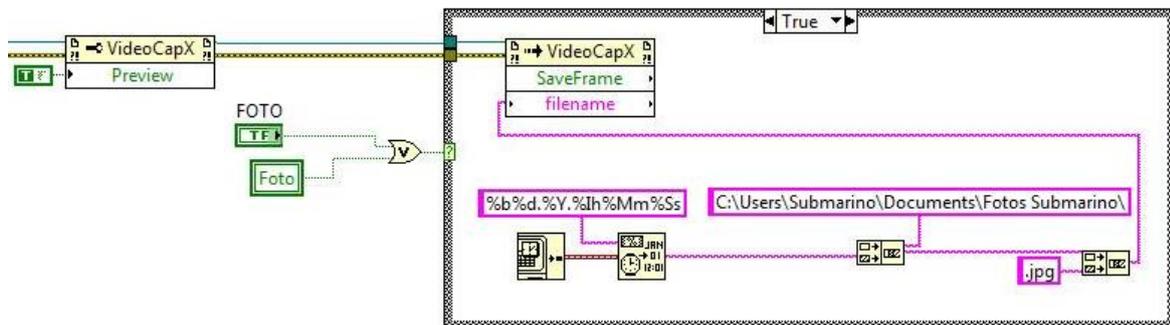


Ilustración 77 Línea de programa para fotografía parte 2

Control Motores

Las ilustraciones 78 y 79 presentan el programa de control de motores. El programa vincula al joystick, procesador, controlador y motores. Al maniobrar con el joystick una señal PWM es enviada desde el procesador hacia los controladores de cada motor.

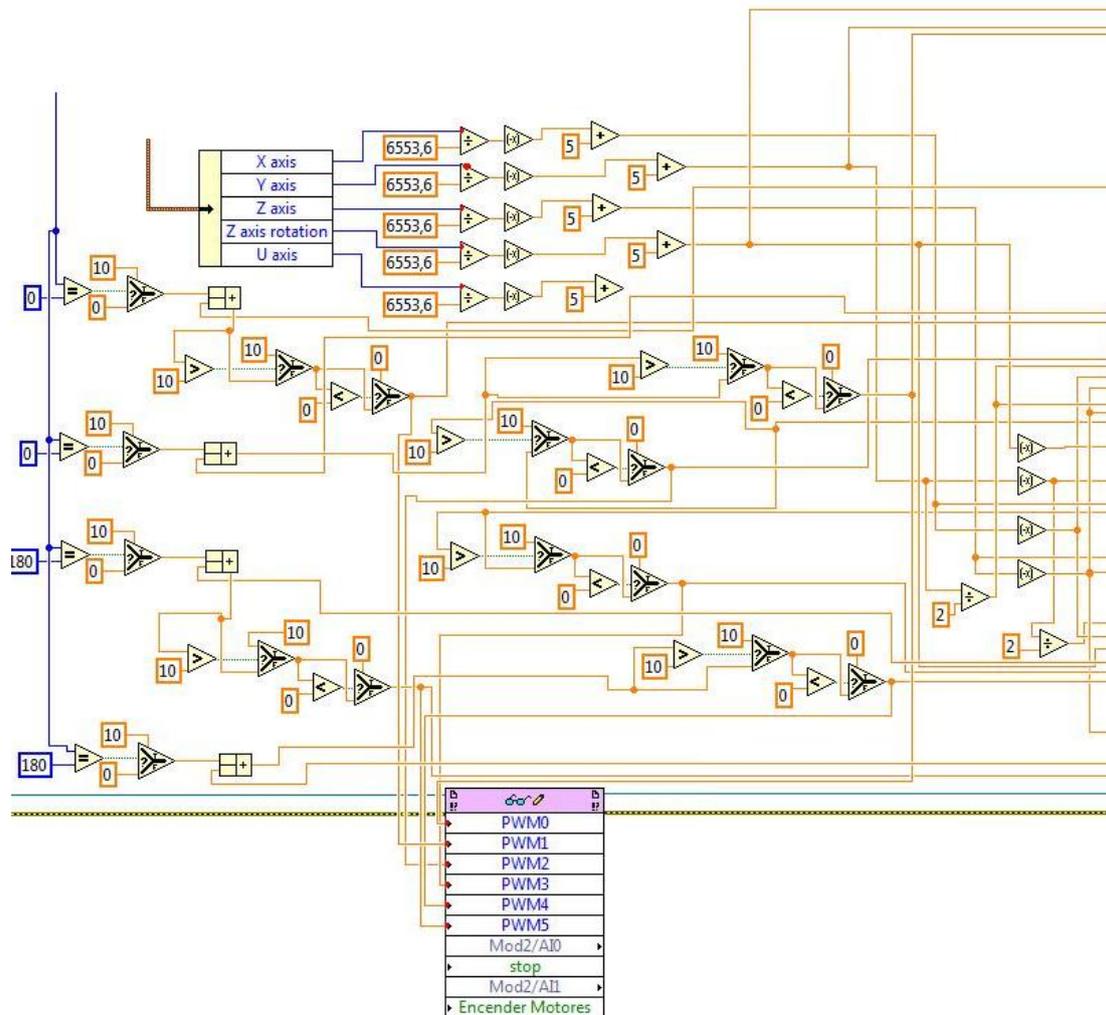


Ilustración 78 Línea de programa para motores parte 1

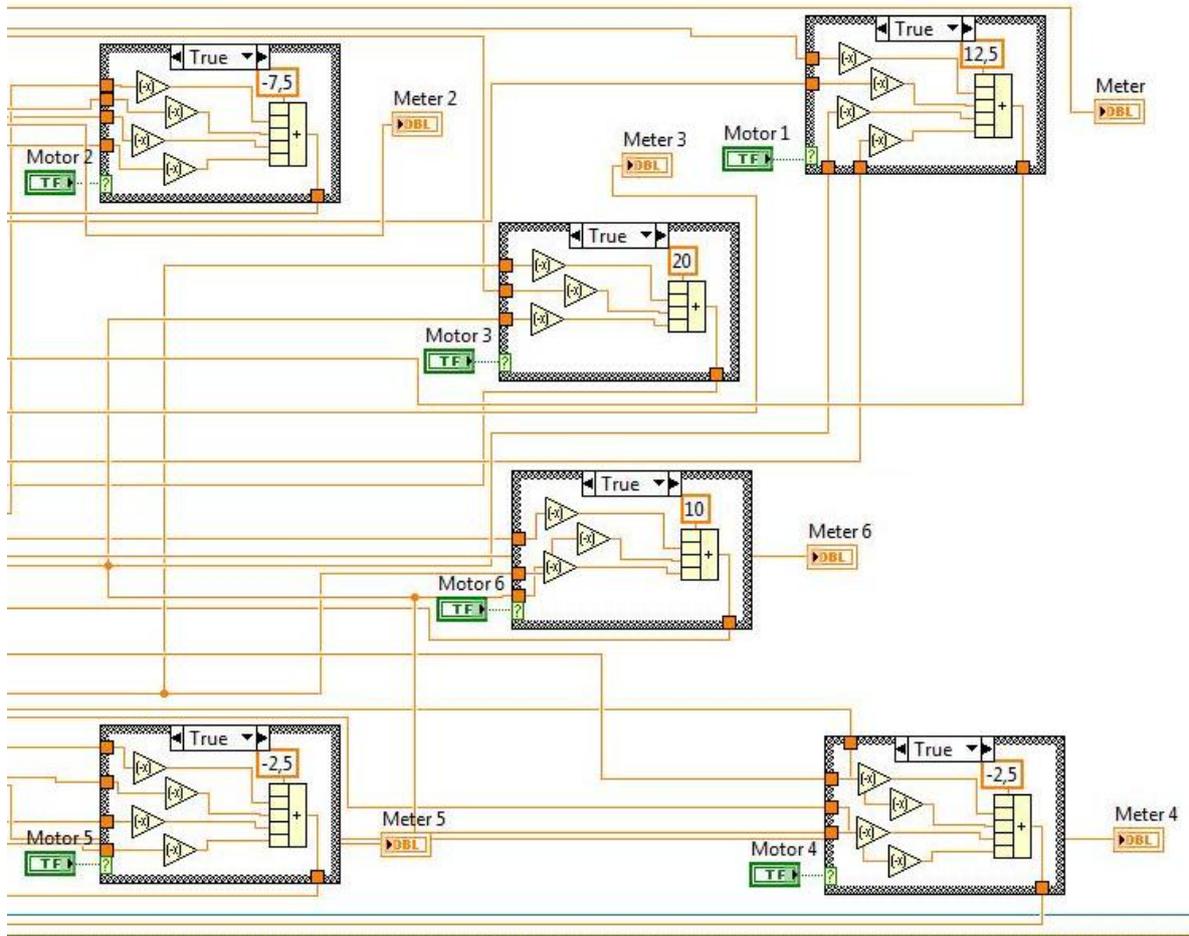


Ilustración 79 Línea de programa para motores parte 2

Procesador cRIO

La Ilustración 80 presenta el programa que se encuentra dentro del procesador. Para el proyecto submarino el procesador cRIO produce una señal PWM que se utilizó para controlar los motores.

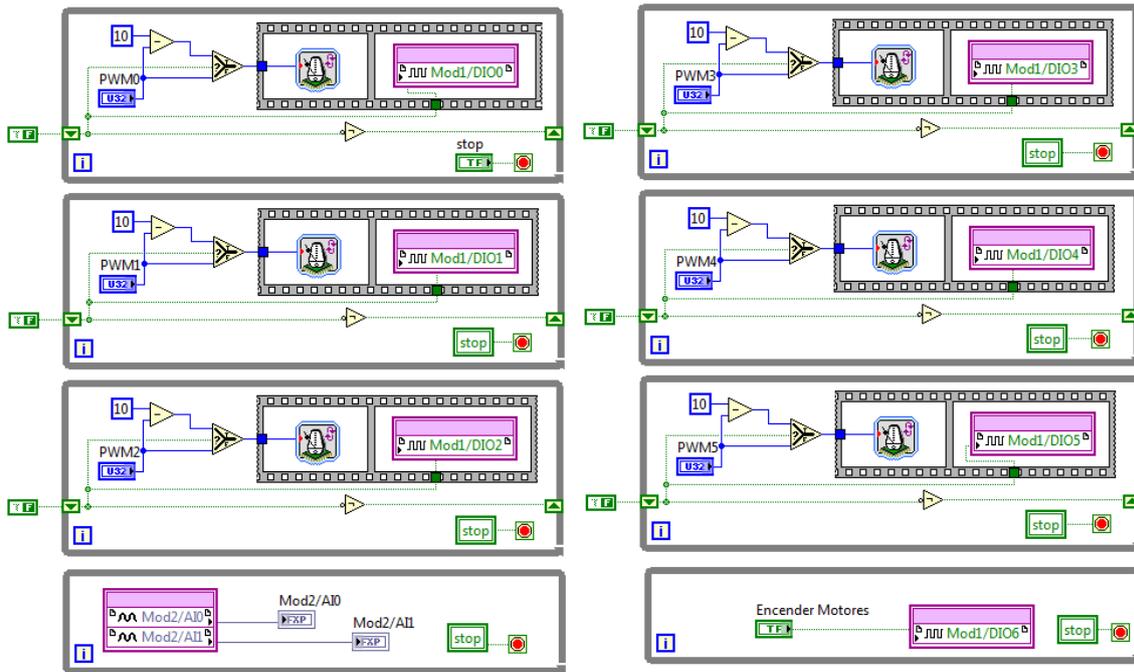


Ilustración 80 Programa en cRIO

Anexo C: Equipos Electrónicos

- *Delta visión – Underwater Video Camera*



Ilustración 81 Delta vision - Under Water Video camera

Camera Specifications	
Video Output:	Composite NTSC (PAL Optional) - works with any video device with RCA video input
Auxiliary Lighting:	Ultra Intense White LED's
Resolution:	500 TV Lines
CCD:	1/3" Sony
Focus:	Fixed 1 inch to focal infinity
Lens:	3.8mm
Iris:	Electronic
Operating Temp:	-10 to 55 C
Light Sensitivity:	0.1 lux
Input Voltage:	12 VCD
Current Consumption:	270 mA
Video Output Jack:	RCA or BNC
Physical Specifications	
Body:	Stainless Steel

Exterior:	Stainless Steel
Camera Head Weight:	2lbs (Dive weight can be added)
Depth Rating:	Standard: 800 feet / Upgrade: 2000 feet
Weight in Water:	2lbs (Dive weight can be added)
Cable Tensile Strength:	700 lbs break / 250 lbs nominal
Available Cable Lengths:	50-1000ft in 50ft. increments
Camera Dimensions:	2.25" diameter / 4.5" length
Weight in air with 50ft Cable:	10lbs

- *H2a Hydrophone:*



Ilustración 82 Hydrophone H2

Sensitivity: -180dB re: 1V/ μ Pa (+/- 4dB 20Hz-4KHz)

Useful range: <10 Hz to >100KHz (not measured above 100KHz, approximate sensitivity @100KHz = -220dB re: 1V/ μ Pa)

Polar Response: Omnidirectional (horizontal)

Operating depth: <80 meters

Output impedance: 2 K Ω (typical)

Power: 0.3 mA (typical)

Physical: (cable and output plug excluded)

Dimensions: 25mm x 46mm

Mass: 105 grams

Specific Gravity: 5.3

- *UPA- 1 Amplificador:*

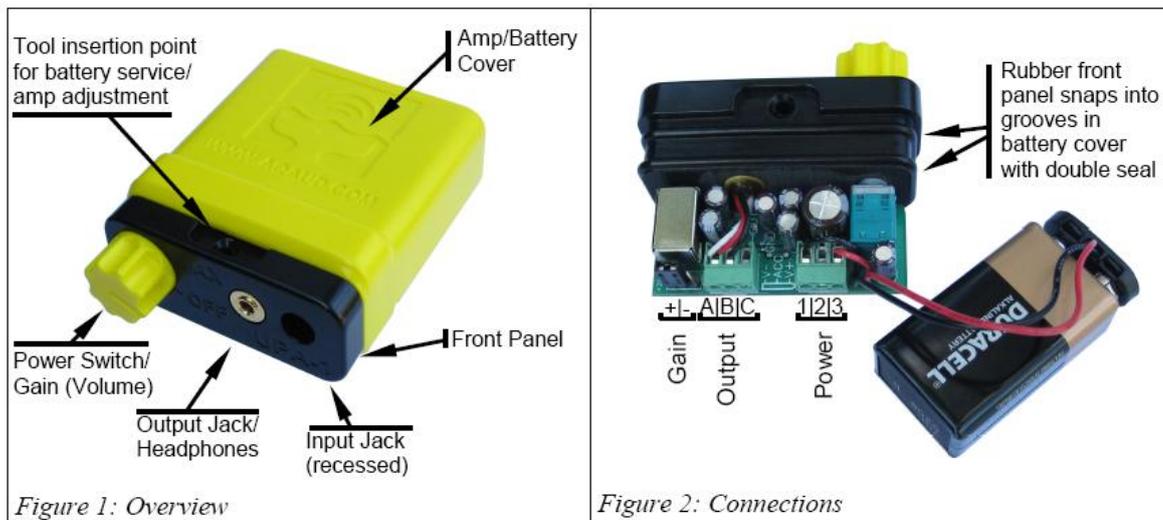


Ilustración 83 UPA -1 Amplificador

Specifications: (all measurements taken with standard 9V battery power)

Operating voltage: 6 ~ 15 Volts DC

Operating Current: 9 mA (typ.)

Physical: 9.6 x 6.3 x 3.0 cm. / 97 gm.

Input connection: 3.5mm TRS

Input impedance: 2.9 Kohms

Max input level: 7 dBu Minimum gain

Output connection: 3.5mm TRS

Output impedance: 42 ohms

Max output level: 12 dBu

Output power: 160mW 30 ohm load

Gain: 52 dB When used with the H2 hydrophone, approximately 8dB

gain is added though the H2 buffer amp, for a total of 60dB.

Plug-in power: 0.5 mA@5V

Frequency Response: 20 Hz – 1 MHz (+0/-3 dB)

45 Hz – 1MHz (+0/-1 dB)

28 Hz – 110 KHz (+0/-3 dB)

45 Hz – 20 KHz (+0/-1 dB)

Unity gain

Max gain

THD + noise <0.01% 1KHz, Unity gain

- *Transductor de Presión:*



American Sensor Technologies
Your sensor business partner...



Krystal Bond
Technology
by AST



ASTTM

AST4000 *Industrial Grade*

Stainless Steel Media Isolated Pressure Sensor



OVERVIEW

Utilizing a one-piece stainless steel sensing element, the AST4000 covers a wide variety of applications that require rugged construction, high cycle life, as well as media compatibility to deliver outstanding and long-term performance. The AST4000 is offered with a variety of threads, pressure ranges, outputs and electrical connections in order to make system integration seamless.

BENEFITS

- ◆ High Strength Stainless Steel Construction
- ◆ No Oil, Welds or Internal O-rings
- ◆ Wide Operating Temperature Range
- ◆ Ranges up to 10,000 PSI
- ◆ Low Static and Thermal Errors
- ◆ Unparalleled Price and Performance
- ◆ Compatible with Wide Range of Liquids and gases
- ◆ EMI/RFI Protection
- ◆ UL/cUL 508 Approved



APPLICATIONS

◆ Industrial OEM Equipment	◆ HVAC/R Equipment
◆ Water Management	◆ Control Panels
◆ Pneumatics	◆ Hydraulic Systems
◆ Hydrogen Storage (316L SS)	◆ Data Loggers

Performance @25°C (77°F)	
Accuracy*	< ±0.5% BFSL
Stability (1 year)	±0.25%FS, typ
Over range Protection	2X Rated Pressure
Burst Pressure	5X or 10,000 psi (whichever is less)
Pressure Cycles	> 100 Million
* Accuracy includes non-linearity, hysteresis & non-repeatability	

Environmental Data	
Temperature	
Operating	-40 to 85°C (-40 to 185°F)
Storage	-40 to 100°C (-40 to 212°F)
Thermal Limits	
Compensated Range	0 to 55°C (30 to 130°F)
TC Zero	<±1.5% of FS
TC Span	<±1.5% of FS
Other	
Shock	100G, 11 msec, 1/2 sine
Vibration	10G peak, 20 to 2000 Hz.
EMI/RFI Protection:	Yes
Rating:	IP-66 (housing only)

Electrical Data				
Output	4-20mA	1-5VDC, 1-6VDC	0-50mV	0.5-4.5V Ratiometric
Excitation	10-28VDC	10-28VDC	5VDC,typ	5VDC,reg
Output Impedance	>10k Ohms	<100 Ohms, Nominal	1100 Ohms, Nominal	<100 Ohms, Nominal
Current Consumption:	20mA, typ.	<10mA	<5mA	<10mA
Bandwidth	(-3dB): DC to 250 Hz	(-3dB): DC to 1kHz	(3dB): DC to 5kHz, min	(3dB): DC to 1kHz
Output Noise:	-	<2mV RMS	-	<2mV RMS
Zero Offset:	<±1% of FS	<±1% of FS	< ±2% of FS	<±1% of FS
Span Tolerance:	<±2% of FS	<±1.5% of FS	< ±2% of FS	<±1.5% of FS
Output Load:	0-800 Ohms@10-28VDC	10k Ohms, Min.	>1M Ohms	10K Ohms, Min.
Reverse Polarity Protection	Yes	Yes	-	No



TTI Instruments
www.ttiglobal.com • 1-800-235-8367

8 Leroy Road, PO Box 1073 Williston, VT 05495
Phone: (802) 863-0085 Fax: (802) 863-1193
Email: sales@ttiglobal.com

Ordering information

AST4000 A 00500 P 4 E 0 000

Series Type

Process Connection

A=1/4" NPT Male
B=1/8" NPT Male
C=1/4" BSPP Male
F=7/16" - 20 UNF Male

Pressure Range

Insert pressure range from chart

Pressure Unit

B= Bar
K= kg/cm²
P= PSI

Outputs

1= 0.5-4.5V ratiometric
3= 1-5V
4= 4-20mA (2 wire loop powered)
6= 1-6V
A= 10mV/V

Electrical

A=2Ft.(0.6m)
B=4Ft.(1.2m)
C=6Ft.(1.8m)
D=10Ft.(3.0m)
E=Mini DIN 43650
F=Packard Metripack 150 3-Pin Conn.

No housing:
G=4-pin Molex Connector
H=Flex Strip 3in.

Wetted Material

0=17-4PH
1=316 L

Options

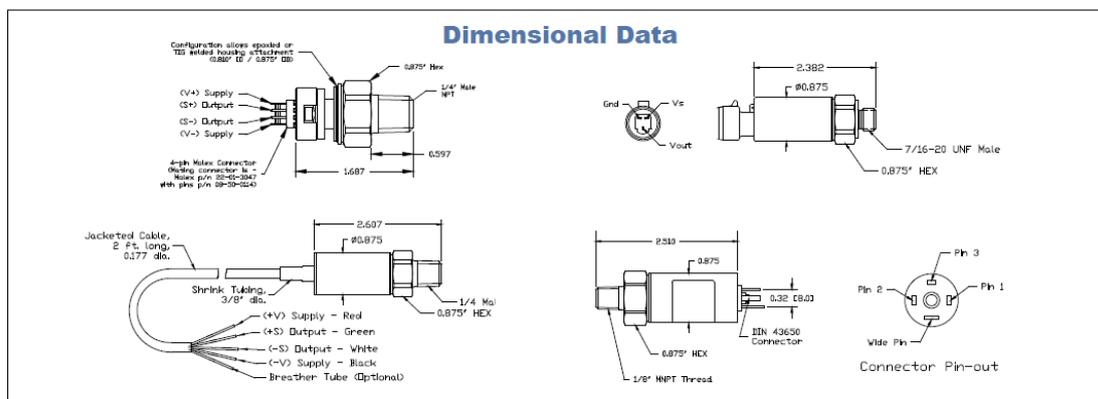
Pressure Ranges*

PSIG Measurement Range	Pressure Range Code	BARG Measurement Range	Pressure Range Code
-14.7 to 25**	V0025**	-1 to 2**	V0002**
0-25	00025	0-2	00002
0-50	00050	0-5	00005
0-100	00100	0-7	00007
0-150	00150	0-10	00010
0-200	00200	0-20	00020
0-250	00250	0-35	00035
0-500	00500	0-50	00050
0-1,000	01000	0-70	00070
0-2,500	02500	0-100	00100
0-5,000	05000	0-250	00250
0-7,500	07500	0-350	00350
0-10,000	10000	0-500	00500
		0-700	00700

*Typical ranges. All ranges between 0-25 PSI and 0-10,000 psi available.

**Compound ranges up to -14.7 to 2500 PSI available. Please consult factory.

Dimensional Data



Warranty

Workmanship - AST, Inc. pressure transmitters have a limited one-year warranty to the original purchaser. AST, Inc. will replace or repair, free of charge, any defective transmitter. This warranty does not apply to any units that have been modified, misused, neglected or installed where the application exceeds published ratings.

Installation/Applications - The purchaser is responsible for media compatibility, functional adequacy, and correct installation of the transmitter. AST's sensors are made with pride in New Jersey, USA. If in the area please feel free to stop by for a visit!

www.ttiglobal.com

© 2007 American Sensor Technologies Inc. All specifications are subject to change without notice. Form data4200, Rev 1/24/07

Ilustración 85 Transductor de Presión 2

- BTD150 DATA SHEET



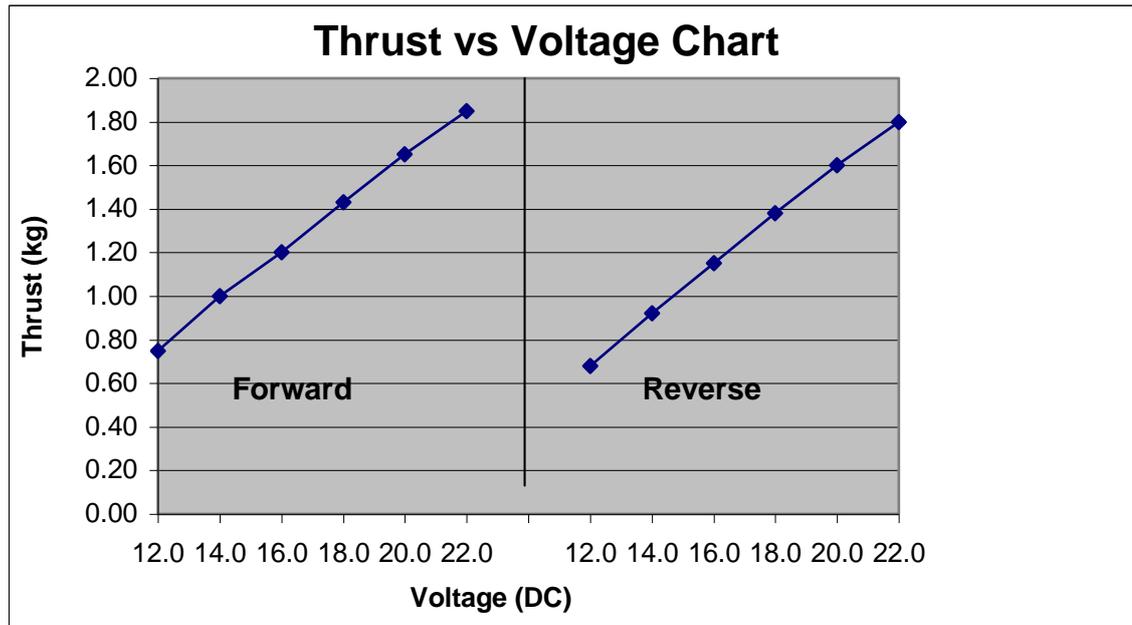
Ilustración 86 Seabotix BTD-150

SPECIFICATIONS:

VOLTAGE NOMINAL.....12VDC
 MAX CURRENT
 OF MOTOR WINDINGS.....*4.0AMPS
 (a current regulator is highly recommended)

WEIGHT:
 Dry 754grams
 Wet.....-124grams (in fresh water)

WIRING CONFIGURATION:
 White..... Positive
 Black Negative



Direction	Voltage(DC)	Current Draw (A)	Thrust (kg)
Forward	12.0	1.91	0.75
	14.0	2.45	1.00
	16.0	2.78	1.20
	18.0	3.32	1.43
	20.0	3.78	1.65
	22.0	4.20	1.85
Reverse	12.0	1.92	0.68
	14.0	2.42	0.92
	16.0	2.89	1.15
	18.0	3.30	1.38
	20.0	3.75	1.60
	22.0	4.23	1.80

Ilustración 87 Empuje vs Voltaje motores

- *Sabertooth dual 10A motor driver*

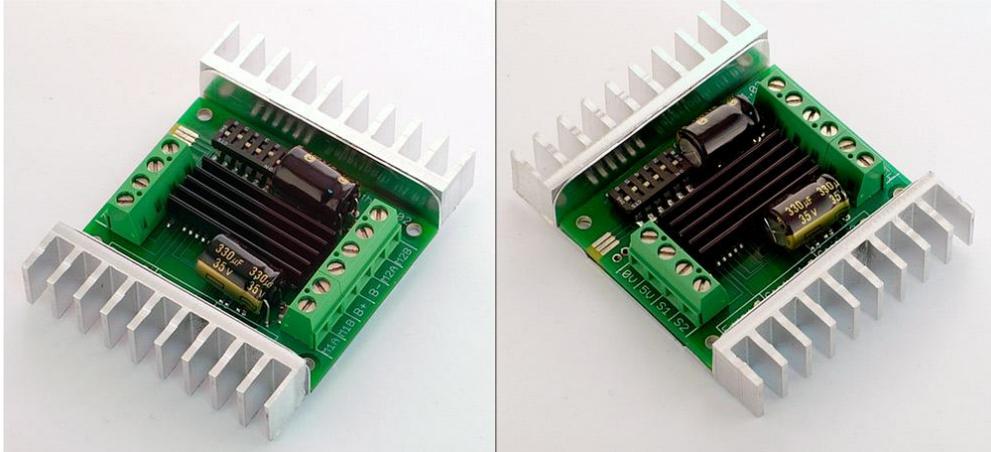


Ilustración 88 Driver Sabertooth 2x10

Model: Sabertooth 2X10

Specifications: Up to 18V in: 12A continuous, 25A peak per channel.
24V in: 12A continuous, 25A peak per channel

Synchronous regenerative drive
Ultra-sonic switching frequency
Thermal and overcurrent protection
Lithium protection mode

Input modes: Analog, R/C, simplified serial, packetized serial

Size: 2.3" x 3" x .7"
59 x 75 x 17 mm

- *NI cRIO-9012*

Controlador en Tiempo Real con 64 MB DRAM, 128 MB de Almacenamiento



Ilustración 89 NI cRIO-9012

- Controlador embebido que ejecuta LabView Real-Time para control, análisis y registro de datos determinísticos
- Procesador de 400 MHz, almacenamiento no volátil de 128 MB, memoria de 64 MB DRAM
- Puerto de Ethernet 10/100BASE-T con servidores embebidos de Web y archivos con interfaz de usuario de panel remoto
- Puerto USB de alta velocidad para conexión a USB flash y dispositivos de memoria
- Puerto serial RS232 para conexión a periféricos; entradas dobles de suministro de 9 a 35 VDC
- Rango de temperatura de operación de -40 a 70 °C

- *NI cRIO-9112*

Chasis Reconfigurable CompactRIO de 8 Ranuras, con LX30 Virtex-5



Ilustración 90 NI cRIO-9112

- Chasis embebido y reconfigurable de 8 ranuras que acepta cualquier módulo de E/S CompactRIO
- Núcleo FPGA de E/S reconfigurable (RIO) Xilinx Virtex-5 para máximo poder de procesamiento
- Habilidad para sintetizar automáticamente circuitos personalizados de control y procesamiento de señales usando LabView
- Opciones de montaje en riel DIN
- Rango de operación de -40 a 70 °C

- NI 9401

Módulo Bidireccional de E/S Digitales de Alta Velocidad de 8 Canales, 5 V/TTL



Ilustración 91 NI 9401

- 8 canales, E/S digital de 100 ns a ultra-alta velocidad
- E/S digital sinking/sourcing de 5 V/TTL
- Bidireccional, configurable por nibble (4 bits)
- Conector D-Sub de 25 pines estándar en la industria
- Operación intercambiable en vivo (hot-swappable)
- Rango de operación de -40 a 70 °C

- NI 9205

Módulo de Entrada Analógica de 32 Canales ± 200 mV a ± 10 V, 16 Bits, 250 kS/s



Ilustración 92 NI- 9205

- Conectividad de terminal de resorte o D-Sub
- Resolución de 16 bits, rango de muestreo acumulado de 250 kS/s
- Rango de operación de -40 a 70 °C
- Certificados de calibración trazable expedidos por el NIST
- 32 entradas analógicas de una sola terminal o 16 diferenciales
- Rangos de entrada programables de ± 200 mV, ± 1 V, ± 5 V y ± 10 V
- Operación intercambiable en vivo; protección de sobre voltaje; aislamiento

- *Llave de Torsión Genius 280030N 1/4"*

Torque Wrenches

1/4" Dr. Torque Wrenches

ITEM NO.	Capacity	Length mm	Weight g	PCS	G.W. KGS	CUFT	CODE
280030N	6 ~ 30 Nm	350	740	20	20.0	1.12	010200
280250L	40 ~ 250 in.lb.	350	740	20	20.0	1.12	010200

3/8" Dr. Torque Wrenches

ITEM NO.	Capacity	Length mm	Weight g	PCS	G.W. KGS	CUFT	CODE
380030N	6 ~ 30 Nm	350	740	20	20.0	1.12	010200
380110N	19 ~ 110 Nm	385	960	12	16.0	1.18	010400
380250L	40 ~ 250 in.lb.	350	740	20	20.0	1.12	010200
380080F	15 ~ 80 ft.lb.	385	960	12	16.0	1.18	010400

1/2" Dr. Torque Wrenches

ITEM NO.	Capacity	Length mm	Weight g	PCS	G.W. KGS	CUFT	CODE
480210N	40 ~ 210 Nm	535	1700	10	21.0	1.31	012900
480350N	70 ~ 350 Nm	645	2540	6	19.0	0.92	016500
480150F	30 ~ 150 ft.lb.	535	1700	10	21.0	1.31	012900
480250F	50 ~ 250 ft.lb.	645	2540	6	19.0	0.92	016500

3/4" Dr. Torque Wrenches

ITEM NO.	Capacity	Length mm	Weight g	PCS	G.W. KGS	CUFT	CODE
680500N	100 ~ 500 Nm	865	3660	4	20.0	1.07	024300
680700N	140 ~ 700 Nm	1092	5940	4	31.0	1.93	069200
680980N	140 ~ 980 Nm	1230	6460	2	17.0	1.13	086500
680300F	50 ~ 300 ft.lb.	865	3660	4	20.0	1.07	024300
680600F	100 ~ 600 ft.lb.	1092	5940	4	31.0	1.93	069200
680700F	100 ~ 700 ft.lb.	1230	6460	2	17.0	1.13	086500



- The desired torque is set before using the torque wrenches.
- When torque is applied, a click can be heard and felt when the desired torque is reached. This feature is more evident in the higher range of the scale.
- Graduated scales in SAE and Metric measurement systems are etched on the shaft. They are horizontal on the shaft and vertical on the handle.
- Continuous-use design offers the user an excellent precision tool for specific torques.
- All parts are made of steel and tempered to prevent wear. Outer parts have a nickel-chromium coating to prevent oxidation.
- The lever on the ratchet head can be positioned for ratchet action to the left, to the right, or fixed.
- Double armature: exclusive internal design minimizes the amount of force required, reduces friction, lengthens tool life and permits precise, long-lasting calibration.
- Meets or exceeds the requirements of ANSI & DIN standards with accuracy of $\pm 4\%$ to the right and $\pm 6\%$ to the left

GENIUS TOOLS 221

Ilustración 93 Llave de torsión

- *12VDC/40A SPST Automotive Relay*



Ilustración 94 12 VDC Relay

TECH SPECS

Dimensions

Product Height	0.9 inches
Product Width	1.1 inches
Product Depth	1.1 inches

General Features

Model	275-001
Product Type	SPST
Enclosure Color	Black

Miscellaneous Features

Min Operating Temperature	-40 Fahrenheit
Max Operating Temperature	257 Fahrenheit
Humidity Range Operating	up to 95%
Supported Languages	English
Mounting Kit	Mounting bracket included
#per pack	1

Power Features

Voltage Required	12VDC
------------------	-------

- *Thrustmaster T-Flight Hotas X Flight Stick*



Ilustración 95 Joystick Thrustmaster

- Programmable: the 12 buttons and 5 axes are entirely programmable
- Detachable, real-size, ergonomically-designed throttle control
- Exclusive "MAPPING" button: all functions may be instantly switched around between each other
- High-precision joystick with adjustable resistance
- Exclusive "PRESET" button": to switch, while playing, instantly from one programme to another

- *Tubería de PVC código 22663*

Tabla 10 Especificaciones técnicas Tubería PVC

Tuberías de PVC para PRESIÓN

Especificaciones Técnicas

Unión por Cementado Solvente (E/C) y Unión por Sellado Elastomérico (U/Z).

Diámetro Nominal	CÓDIGO		Serie	Espesor de Pared	Diámetro Interior	Presión de Trabajo			
	mm	UNIÓN E/C				UNIÓN U/Z	s	mm	mm
225		22110	22654	20.0	5.5	214.0	0.63	5.10	91
		22111	22655	16.0	7.0	211.0	0.80	8.16	116
250	*		22659	25.0	4.9	240.2	0.50 ■	6.43	73
	*		22660	20.0	6.1	237.8	0.63	6.43	91
	*		22661	16.0	7.8	234.4	0.80	8.16	116
	*		22662	12.5	9.6	230.8	1.00	10.20	145
	*		22663	10.0	11.9	226.2	1.25	12.75	181
	*		22664	8.0	15.0	220.0	1.60	16.32	232
315	*		22668	25.0	6.2	302.6	0.50 ■	5.10	73
	*		22669	20.0	7.7	299.6	0.63	6.43	91
	*		22670	16.0	9.8	295.4	0.80	8.16	116
	*		22671	12.5	12.1	290.8	1.00	10.20	145
	*		22672	10.0	15.0	285.0	1.25	12.75	181
	*		22673	8.0	18.9	277.2	1.60	16.32	232
355	*		22675	25.0	7.0	341.0	0.50 ■	5.10	73
	*		22676	20.0	8.7	337.6	0.63	6.43	91
	*		22677	16.0	11.0	333.0	0.80	8.16	116
	*		22678	12.5	13.7	327.6	1.00	10.20	145
	*		22679	10.0	16.9	321.2	1.25	12.75	181
	*		22680	8.0	21.4	312.2	1.60	16.32	232
400	*		22682	25.0	7.9	384.2	0.50 ■	5.10	73
	*		22683	20.0	9.8	380.4	0.63	6.43	91
	*		22684	16.0	12.4	375.2	0.80	8.16	116
	*		22685	12.5	15.4	369.2	1.00	10.20	145
	*		22686	10.0	19.0	362.0	1.25	12.75	181
	*		22687	8.0	24.1	351.8	1.60	16.32	232

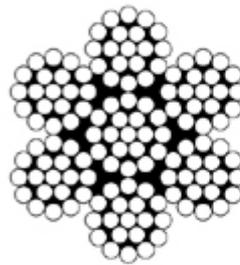
* Producto de fabricación bajo pedido, sujeto a lote mínimo de producción de acuerdo mutuo, cliente - fábrica, en tiempo de entrega.

■ Tubería de fabricación especial, mediante acuerdo entre fabricante y cliente.

- *Cable de acero Inoxidable 1/8" S0704-0003-0*



7X19 WIRE ROPE



7X19 WIRE ROPE

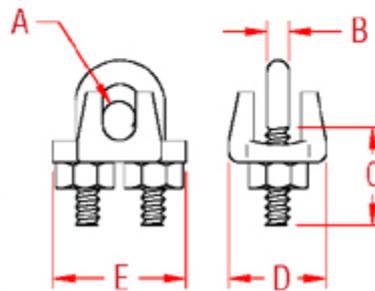
GRADE: 304 STAINLESS STEEL

ITEM	SIZE	SPOOL	WLL (lb)	BL (minimum lb)	WT (lb)
S0704-0002	3/32"	CUTS	180	900	2.00
S0704-0003	1/8"	CUTS	360	1,800	3.00
S0704-0003-5	1/8"	5000 FT.	360	1,800	152.00
S0704-0004	5/32"	CUTS	520	2,600	5.00
S0704-0004-5	5/32"	5000 FT.	520	2,600	235.00
S0704-0005	3/16"	CUTS	760	3,800	7.00
S0704-0005-5	3/16"	5000 FT.	760	3,800	340.00
S0704-0006	7/32"	CUTS	1,000	5,000	9.00
S0704-0007	1/4"	CUTS	1,300	6,500	11.00
S0704-0007-5	1/4"	5000 FT.	1,300	6,500	574.00
S0704-0009	5/16"	CUTS	1,800	9,000	17.00
S0704-0009-1	5/16"	1000 FT.	1,800	9,000	181.00
S0704-0009-5	5/16"	5000 FT.	1,800	9,000	908.00
S0704-0010	3/8"	CUTS	2,500	12,500	24.00
S0704-0010-5	3/8"	5000 FT.	2,500	12,500	1,272.00

- *Grillete de acero Inoxidable S0122-FS07*



WIRE ROPE CLIP



WIRE ROPE CLIP

GRADE: 304 STAINLESS STEEL

ITEM	A (size)	B	C	D	E	WT (lb)
S0122-FS02	1/16"	0.09"	0.40"	0.52"	0.55"	0.02
S0122-FS03	1/8"	0.12"	0.43"	0.55"	0.62"	0.02
S0122-FS04	5/32"	0.15"	0.56"	0.70"	0.73"	0.04
S0122-FS05	3/16"	0.19"	0.67"	0.78"	0.87"	0.08
S0122-FS07	1/4"	0.23"	0.75"	0.84"	1.11"	0.09
S0122-FS08	5/16"	0.31"	0.90"	1.06"	1.34"	0.17
S0122-FS10	3/8"	0.38"	1.00"	1.32"	1.74"	0.36
S0122-FS13	1/2"	0.47"	1.40"	1.48"	1.97"	0.52
S0122-FS14	9/16"	0.47"	1.50"	1.70"	2.05"	0.61
S0122-FS16	5/8"	0.54"	1.87"	1.83"	2.33"	0.89
S0122-FS20	3/4"	0.54"	2.00"	2.05"	2.42"	1.03
S0122-FS22	7/8"	0.61"	2.32"	2.41"	2.81"	1.57
S0122-FS25	1"	0.61"	2.41"	2.40"	2.97"	1.81
S0122-FS32	1-1/4"	0.85"	2.32"	3.16"	4.12"	4.45

Anexo D: Simulación Inventor
Stress Analysis Report Tubo 1.25 mPa pvc

Autodesk®

Analyzed File:	Tubo pvc anillado CORTADO.ipt
Autodesk Inventor Version:	2011 (Build 150239000, 239)
Creation Date:	22/06/2011, 20:49
Simulation Author:	User
Summary:	

Project Info (iProperties)

Summary

Author	Nicolas Soria
--------	---------------

Project

Part Number	Tubo pvc anillado CORTADO
Stock Number	2
Designer	Nicolas Soria
Cost	0,00 €
Date Created	27/01/2011

Status

Design Status	WorkInProgress
---------------	----------------

Physical

Material	PVC-Piping
Density	1,4 g/cm ³
Mass	3,60572 kg

Area	733292 mm ²
Volume	2575520 mm ³
Center of Gravity	x=-439,555 mm y=73,8539 mm z=0 mm

Note: Physical values could be different from Physical values used by FEA reported below.

Simulation:1

General objective and settings:

Design Objective	Single Point
Simulation Type	Static Analysis
Last Modification Date	22/06/2011, 20:46
Detect and Eliminate Rigid Body Modes	No

Advanced settings:

Avg. Element Size (fraction of model diameter)	0,1
Min. Element Size (fraction of avg. size)	0,2
Grading Factor	1,5
Max. Turn Angle	60 deg
Create Curved Mesh Elements	Yes

Material(s)

Name	PVC-Piping	
General	Mass Density	1,4 g/cm ³
	Yield Strength	46,53 MPa

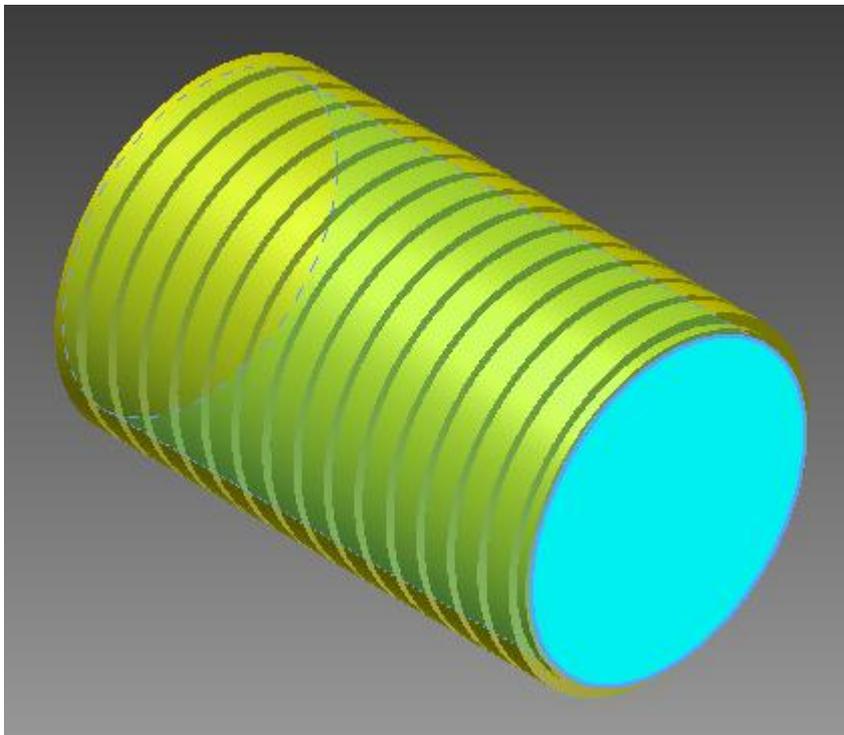
	Ultimate Tensile Strength	52,36 MPa
Stress	Young's Modulus	2,585 GPa
	Poisson's Ratio	0 ul
	Shear Modulus	1,2925 GPa
Stress Thermal	Expansion Coefficient	0,0000054 ul/c
	Thermal Conductivity	1,785 W/(m K)
	Specific Heat	0 J/(kg c)
Part Name(s)	Tubo pvc anillado CORTADO	

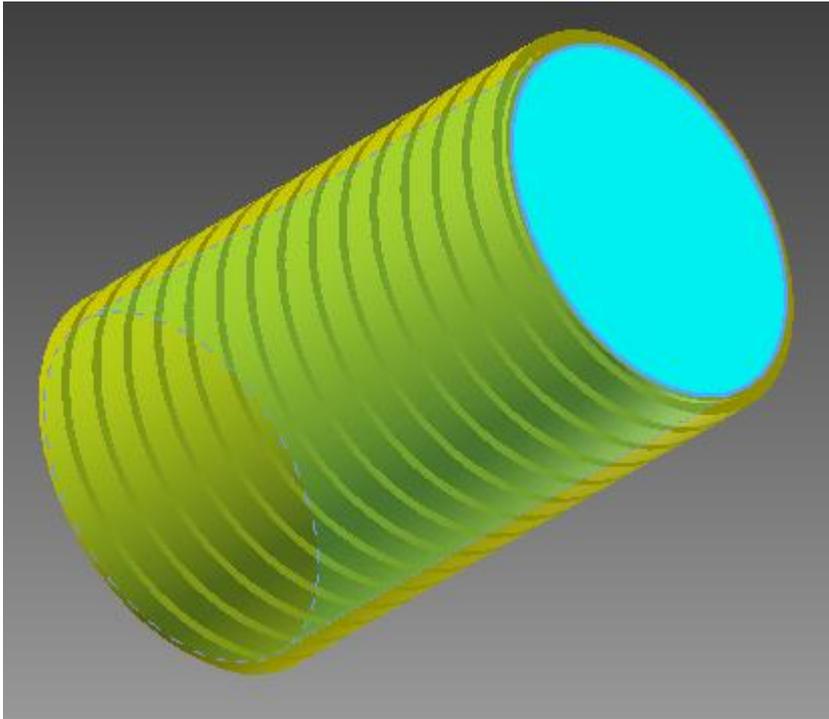
Operating conditions

Pressure:1

Load Type	Pressure
Magnitude	1,250 MPa

Selected Face(s)

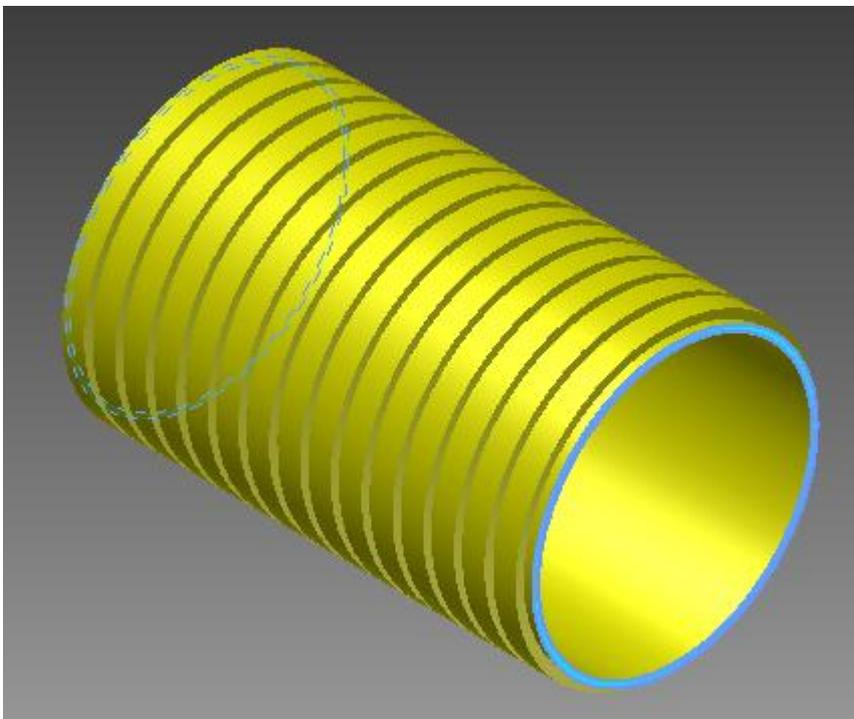


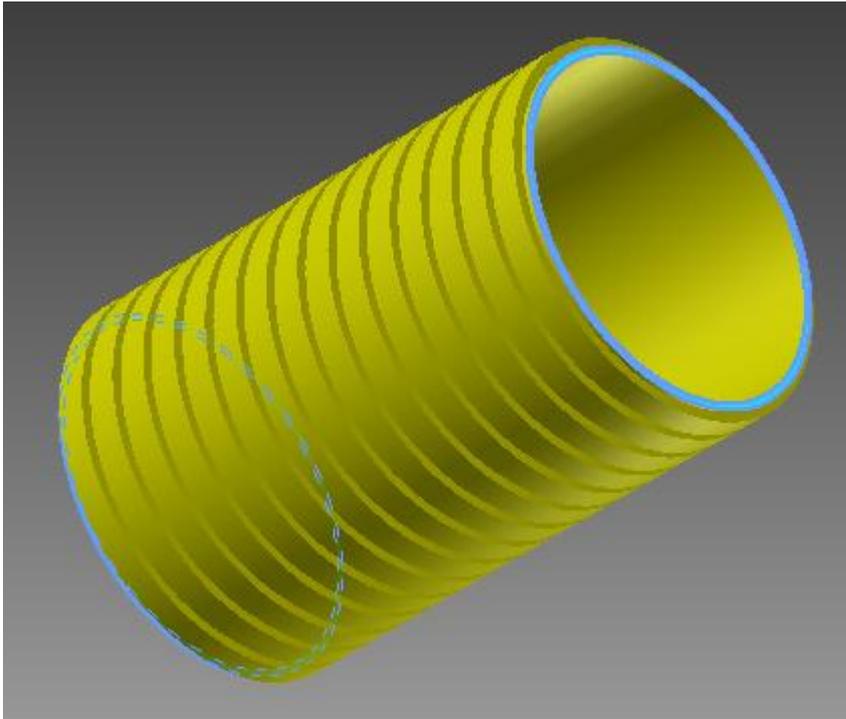


Fixed Constraint:1

Constraint Type	Fixed Constraint
-----------------	------------------

Selected Face(s)





Results

Reaction Force and Moment on Constraints

Constraint Name	Reaction Force		Reaction Moment	
	Magnitude	Component (X,Y,Z)	Magnitude	Component (X,Y,Z)
Fixed Constraint:1	0 N	0 N	0 N m	0 N m
		0 N		0 N m
		0 N		0 N m

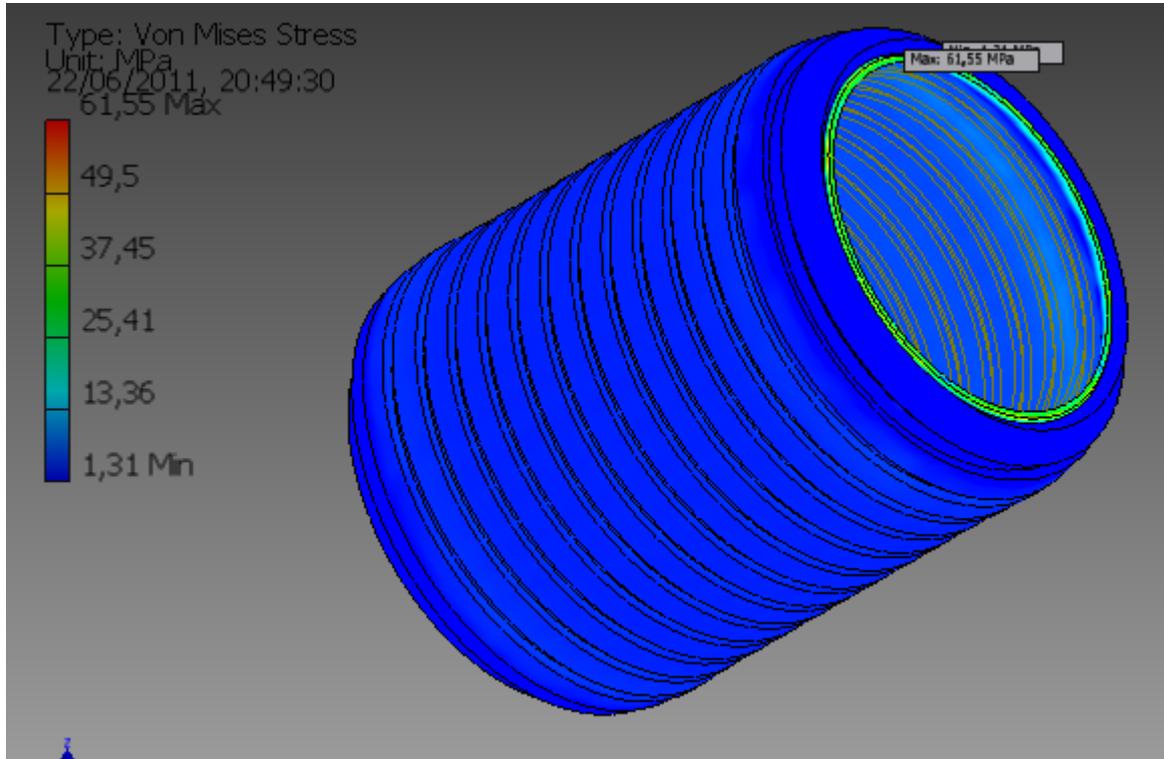
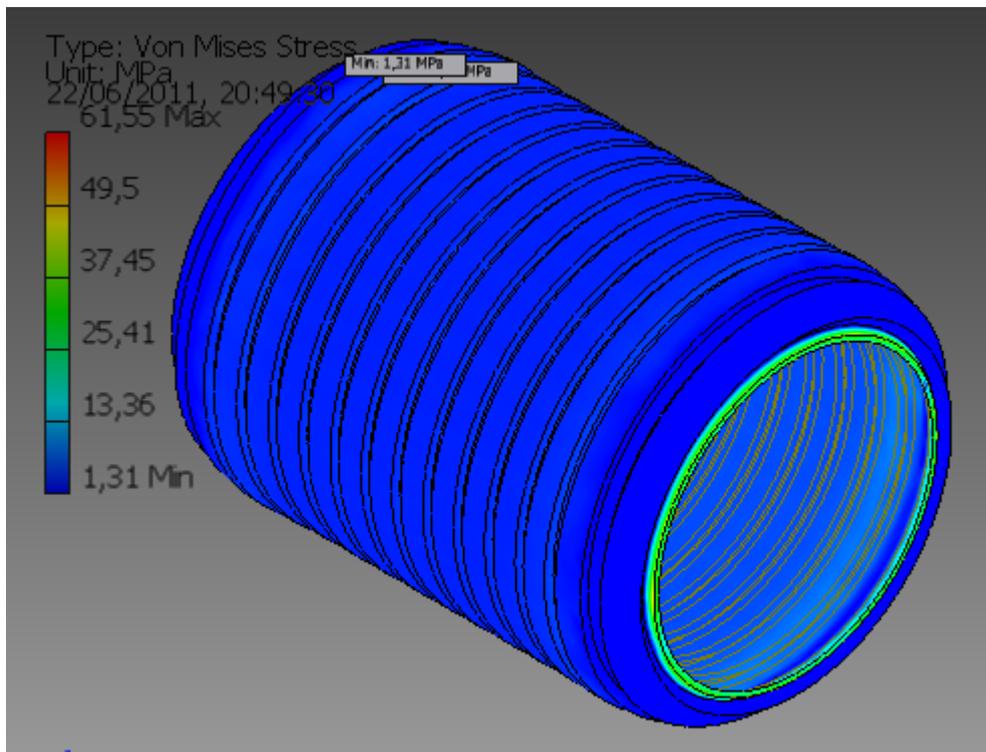
Result Summary

Name	Minimum	Maximum
Volume	2575520 mm ³	
Mass	3,60572 kg	
Von Mises Stress	1,31096 MPa	61,5483 MPa
1st Principal Stress	-0,28209 MPa	30,433 MPa
3rd Principal Stress	-60,5251 MPa	3,62559 MPa
Displacement	0 mm	0,761084 mm

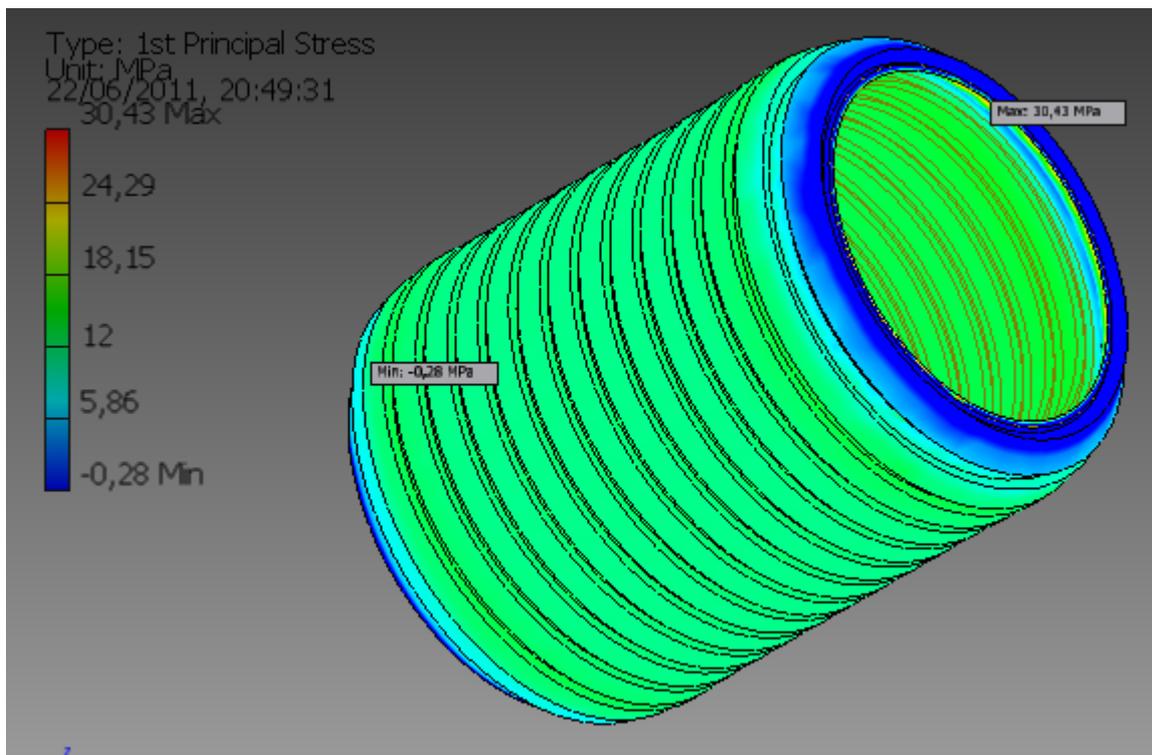
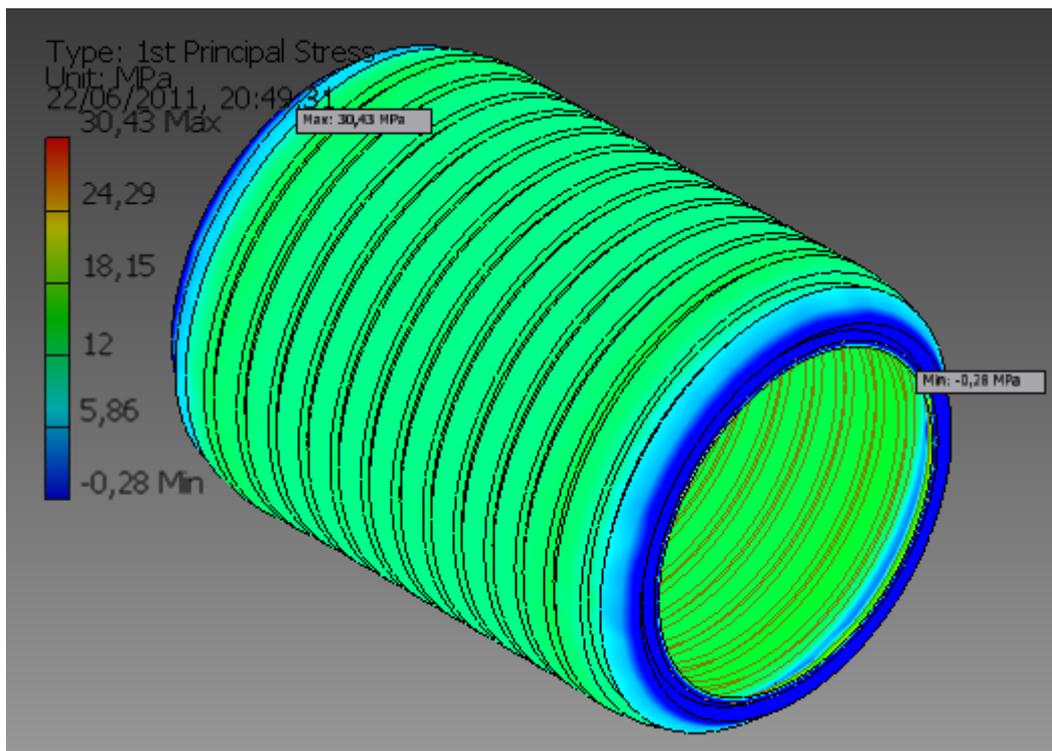
Safety Factor	0,755992 ul	15 ul
Stress XX	-6,32348 MPa	17,2562 MPa
Stress XY	-16,1979 MPa	15,6065 MPa
Stress XZ	-9,75408 MPa	10,3551 MPa
Stress YY	-58,5275 MPa	28,8979 MPa
Stress YZ	-16,1123 MPa	15,2244 MPa
Stress ZZ	-7,68919 MPa	17,3821 MPa
X Displacement	-0,748733 mm	0,745403 mm
Y Displacement	-0,231578 mm	0,229092 mm
Z Displacement	-0,750621 mm	0,758416 mm
Equivalent Strain	0,000338352 ul	0,0191278 ul
1st Principal Strain	-0,000109126 ul	0,0117729 ul
3rd Principal Strain	-0,023414 ul	0,00140255 ul
Strain XX	-0,00244622 ul	0,00667551 ul
Strain XY	-0,00626613 ul	0,00603734 ul
Strain XZ	-0,00377334 ul	0,00400584 ul
Strain YY	-0,0226412 ul	0,0111791 ul
Strain YZ	-0,006233 ul	0,00588951 ul
Strain ZZ	-0,00297454 ul	0,00672422 ul

Figures

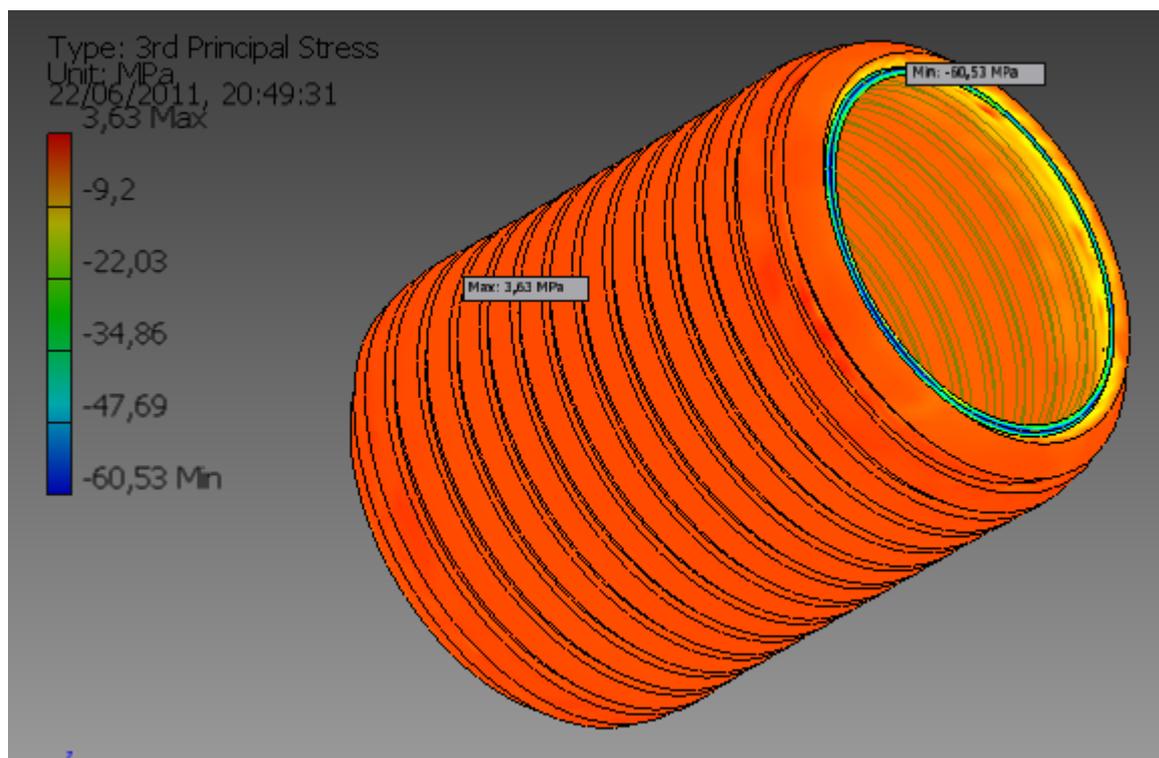
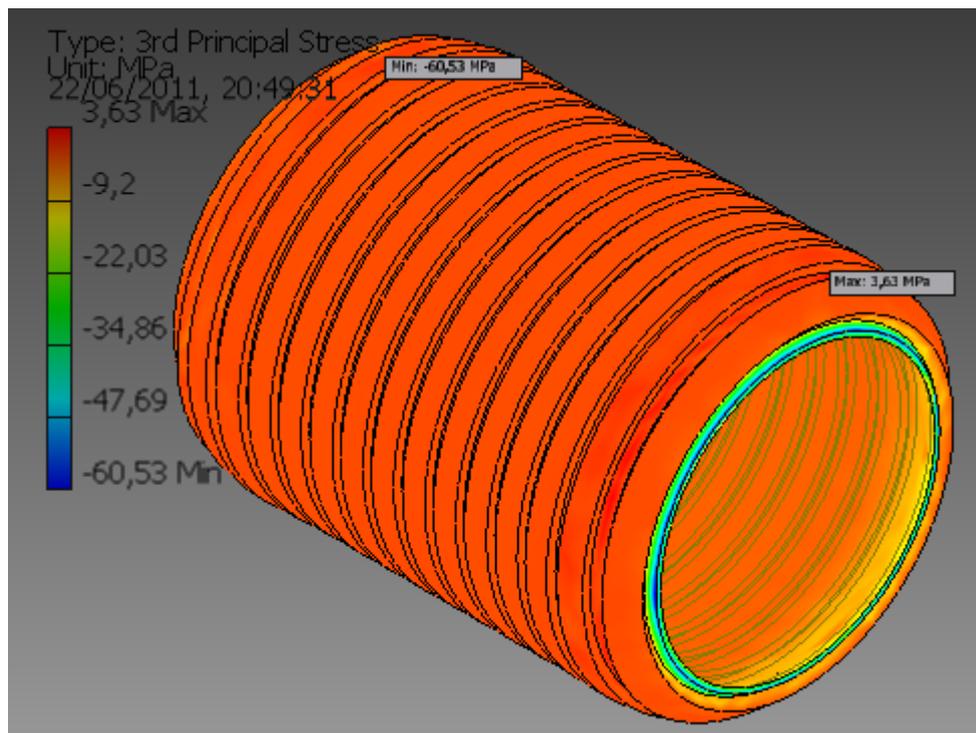
Von Mises Stress



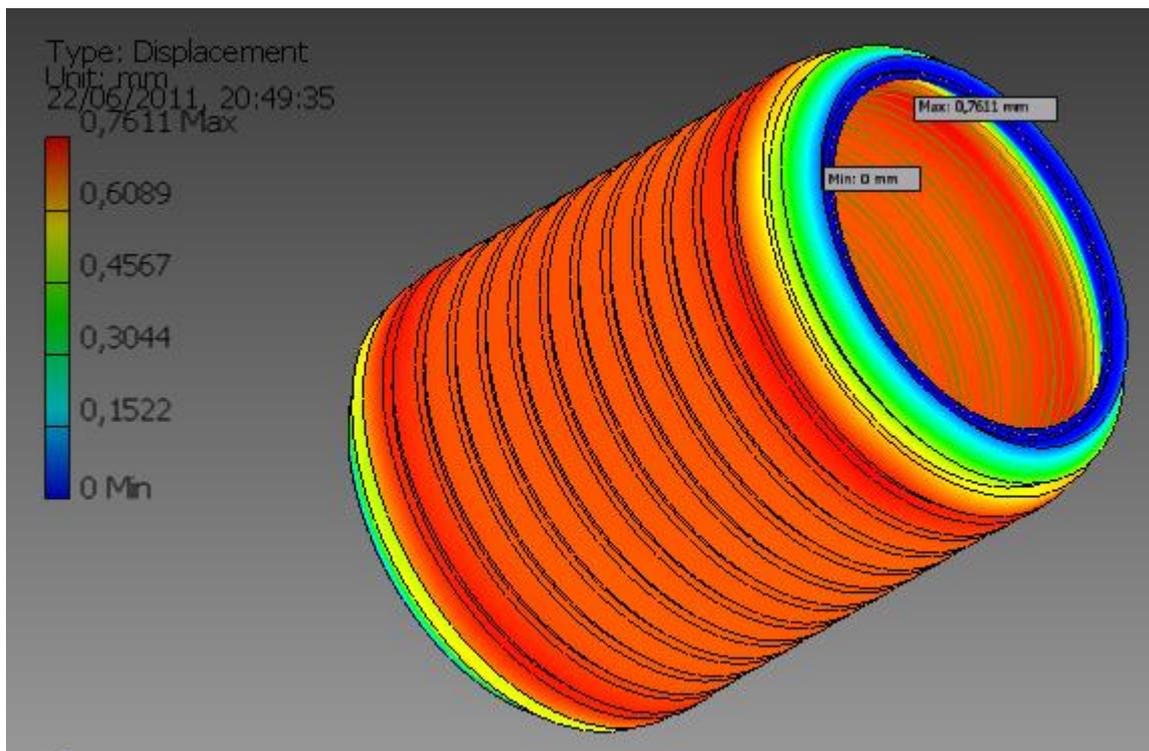
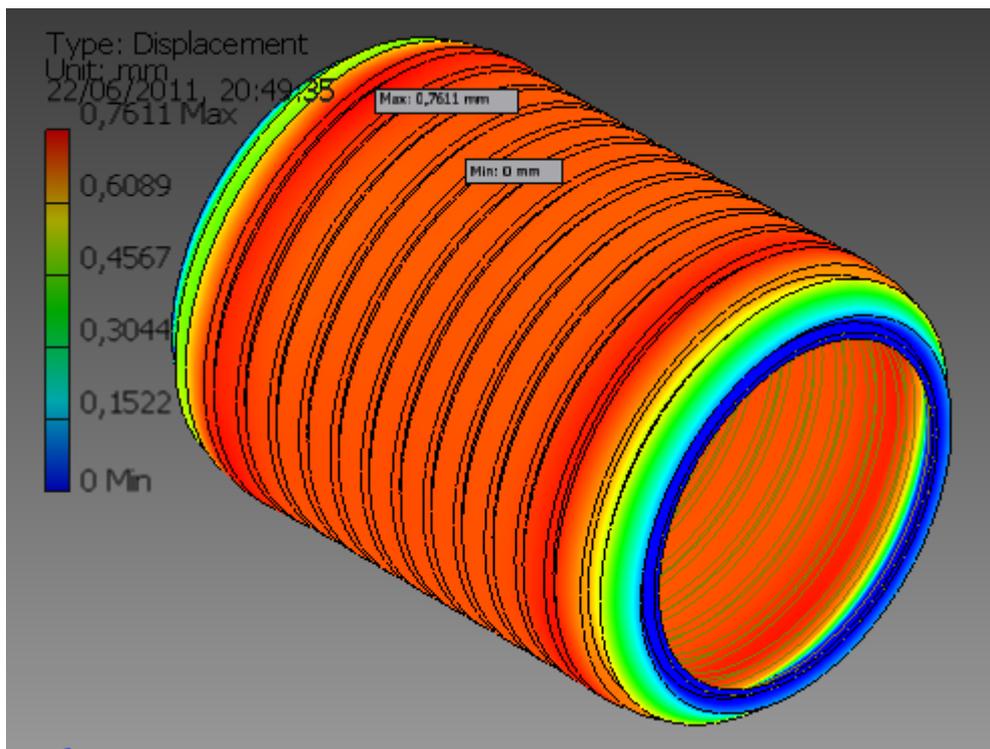
1st Principal Stress



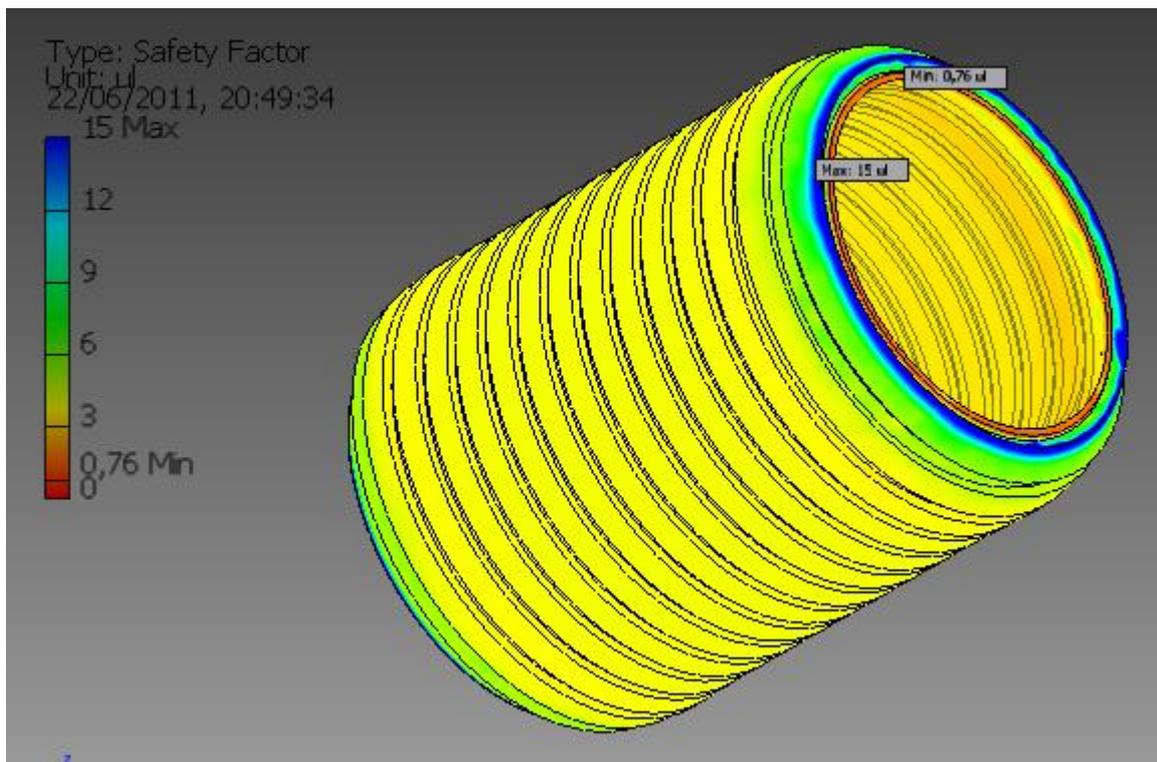
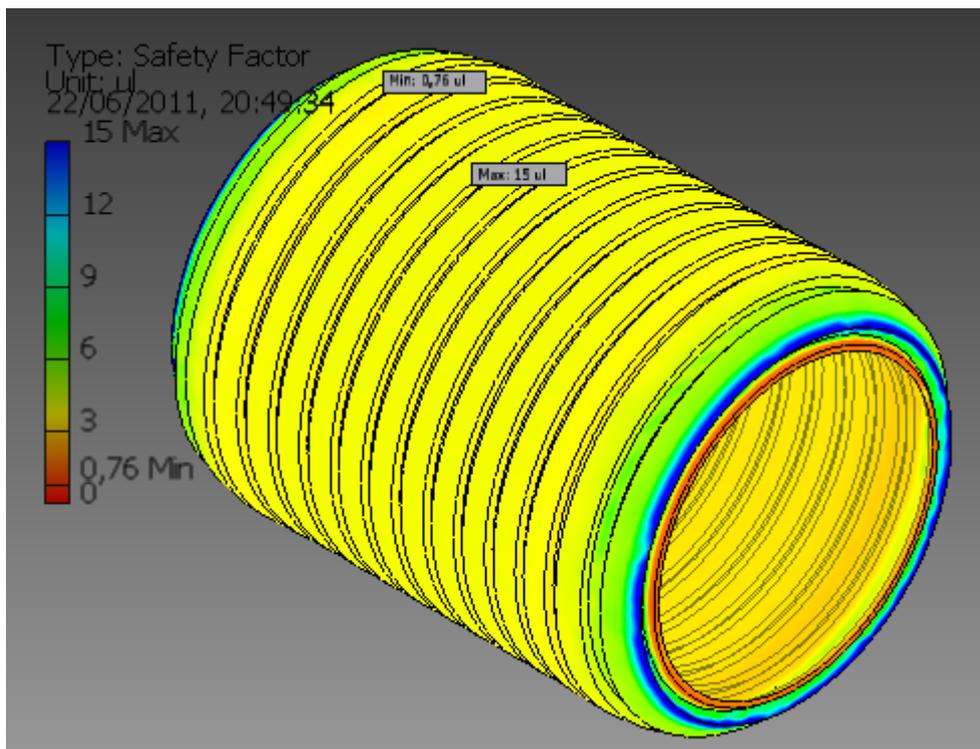
3rd Principal Stress



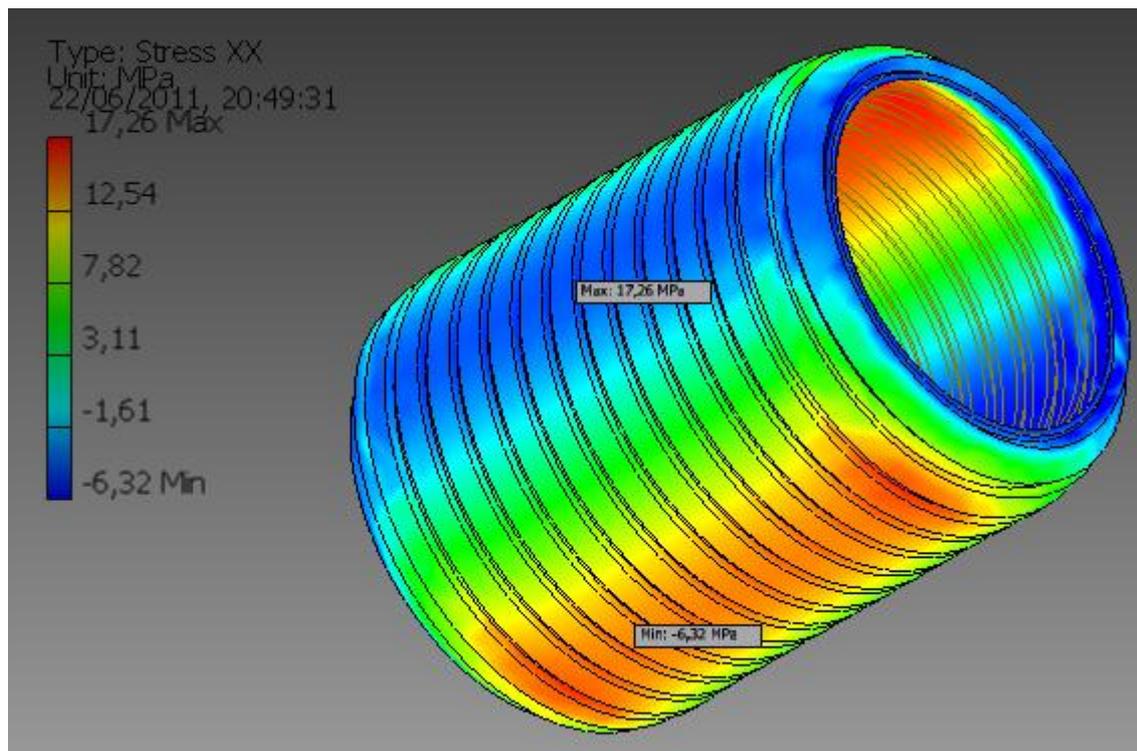
Displacement



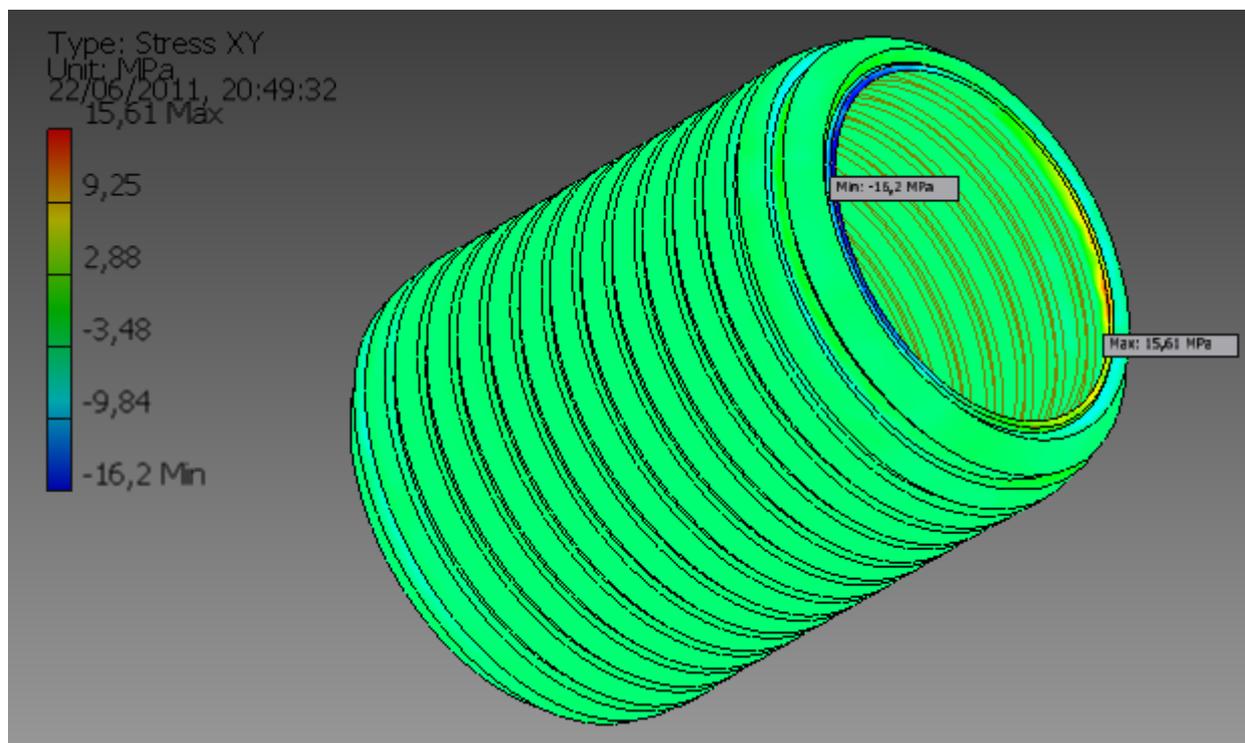
Safety Factor



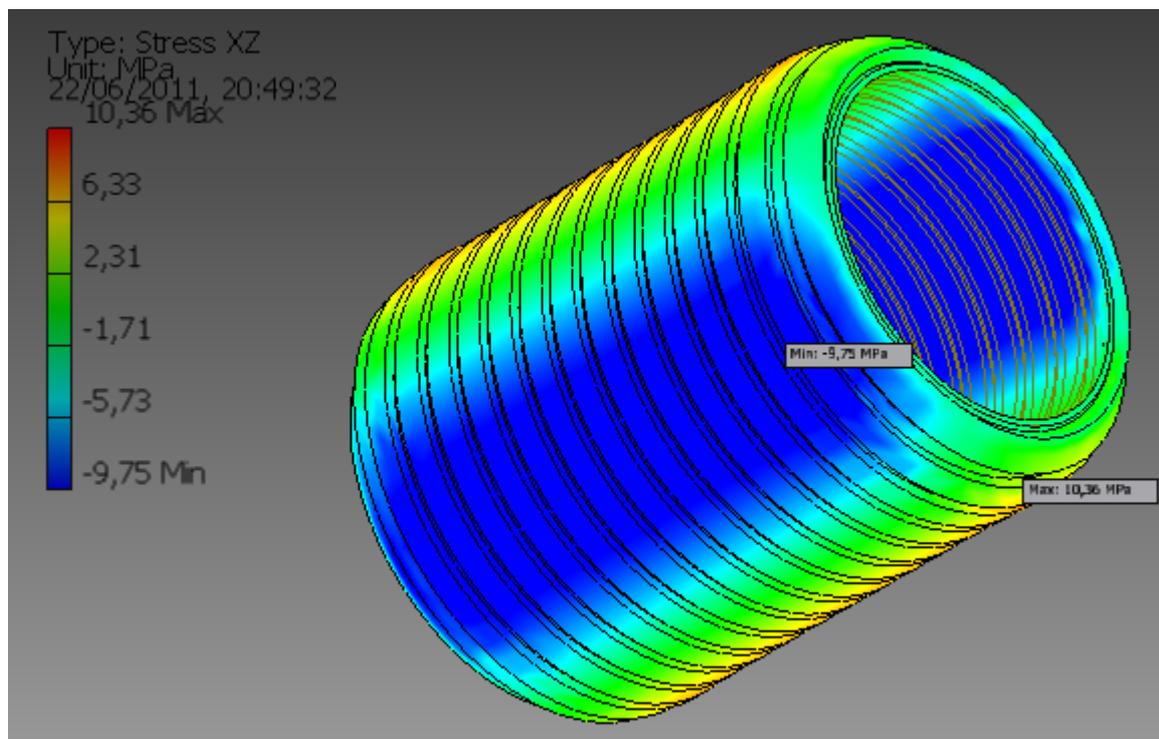
Stress XX



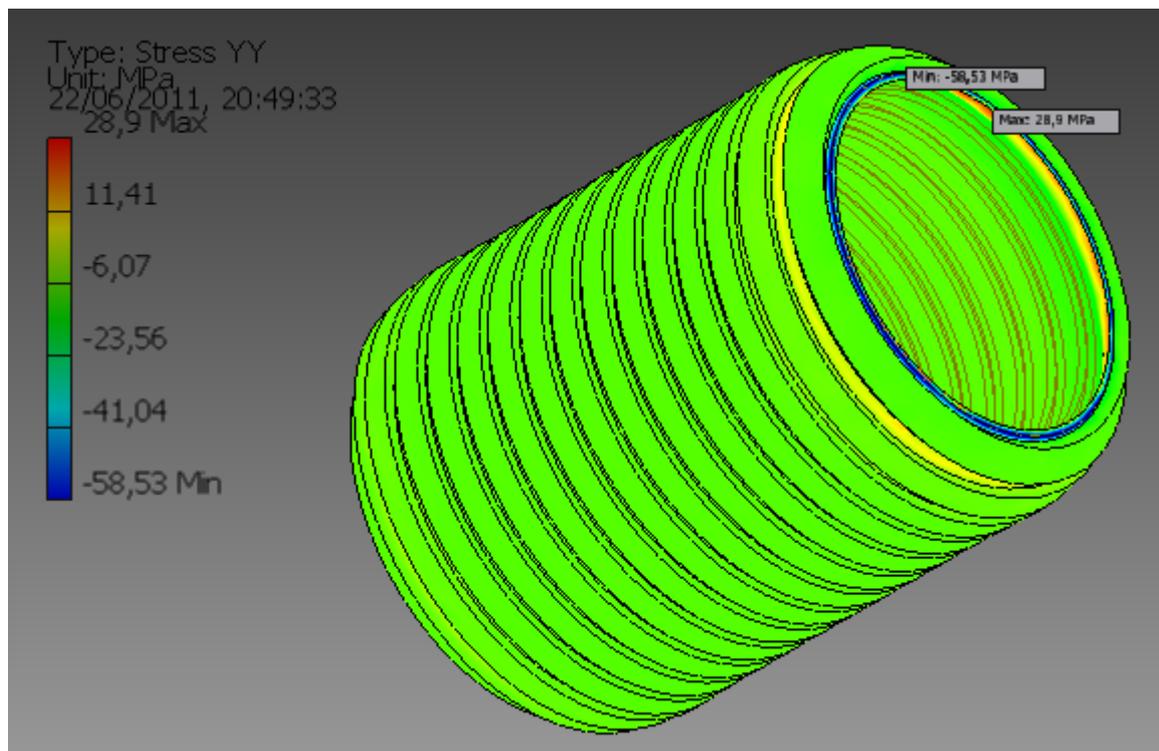
Stress XY



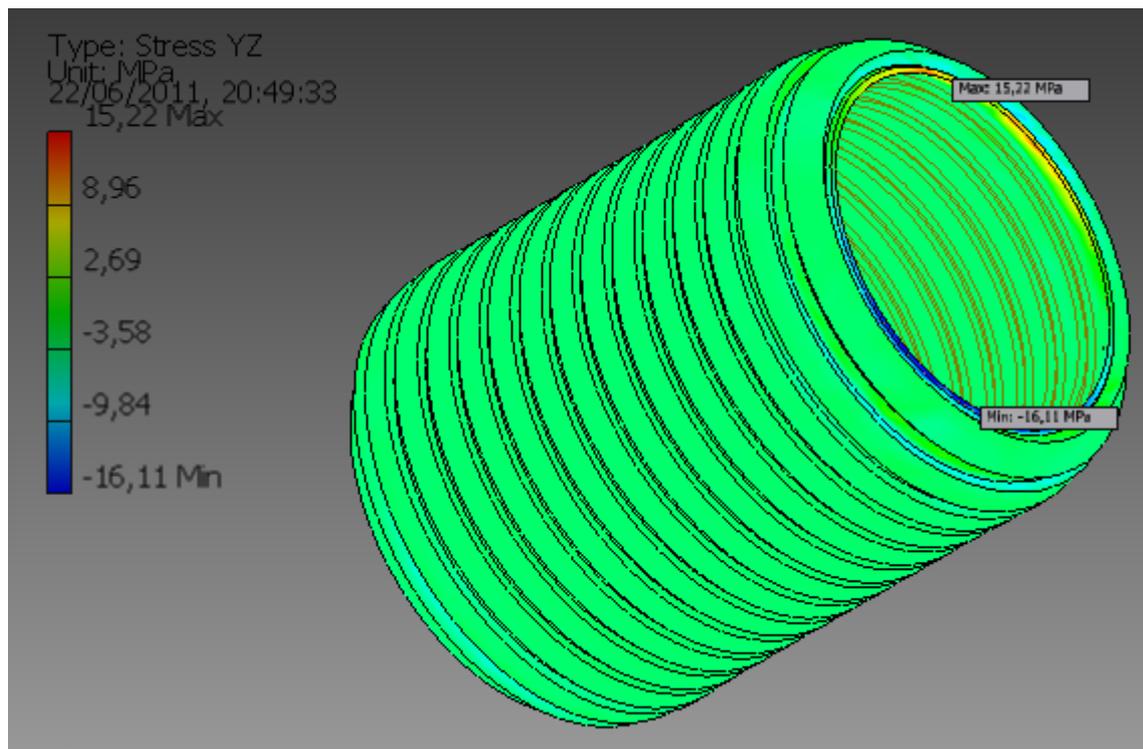
Stress XZ



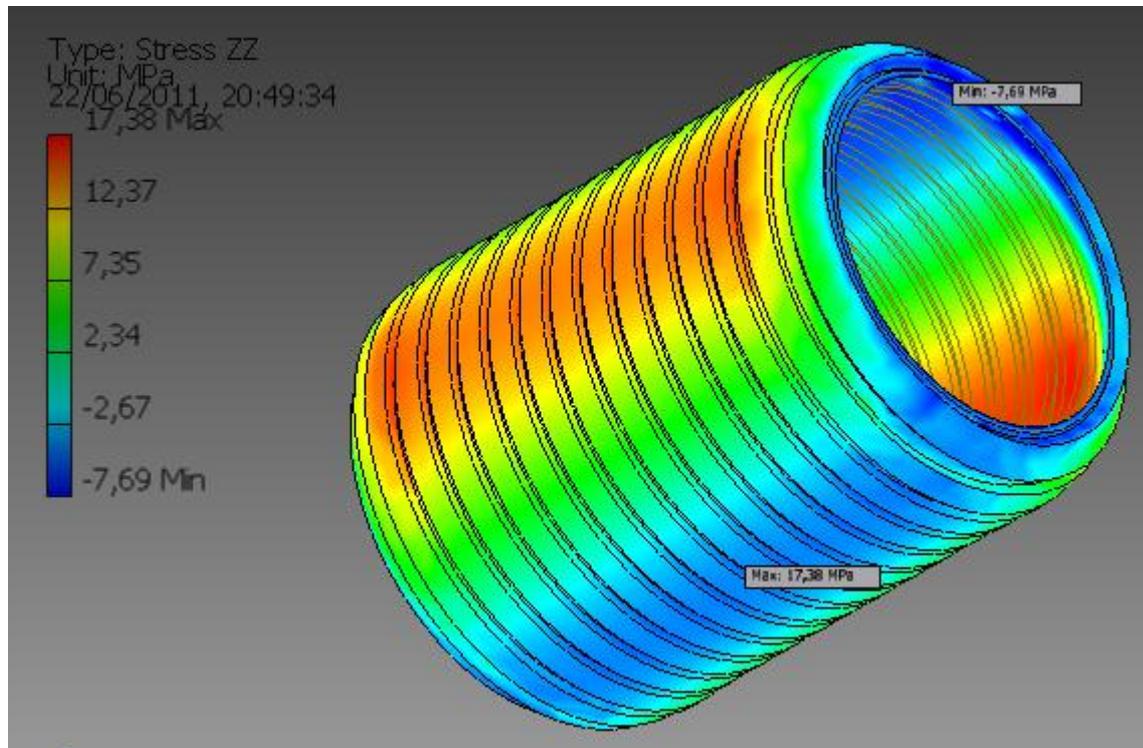
Stress YY



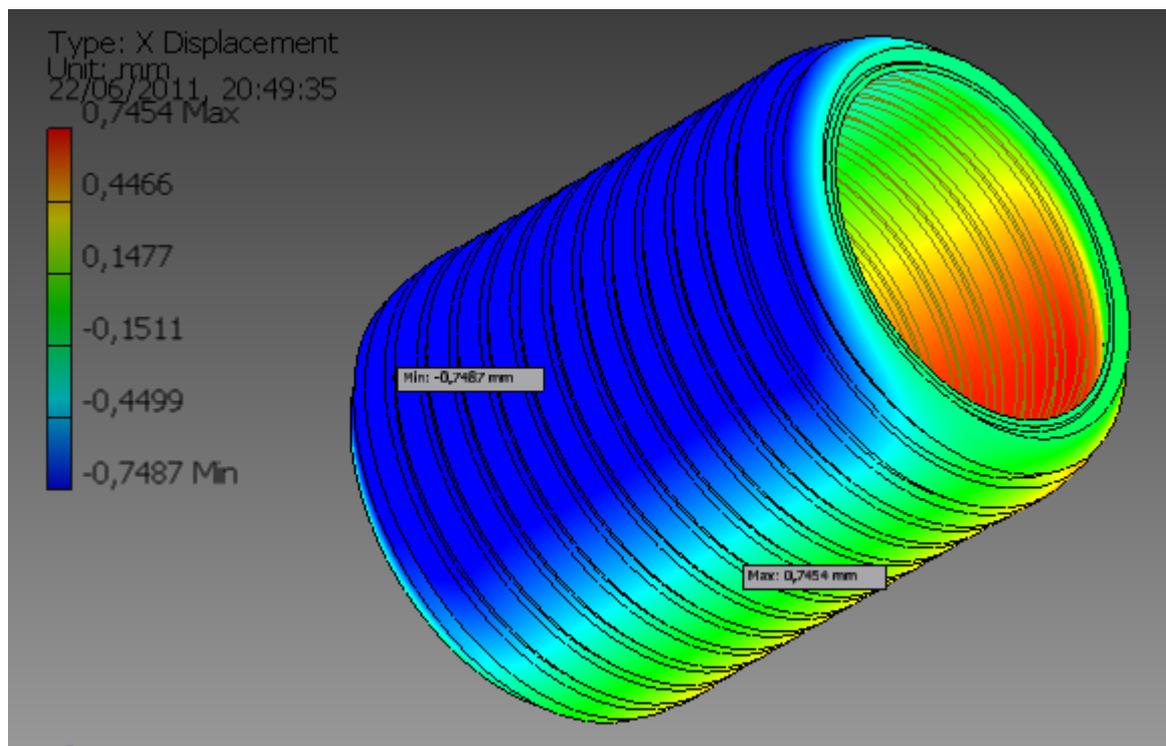
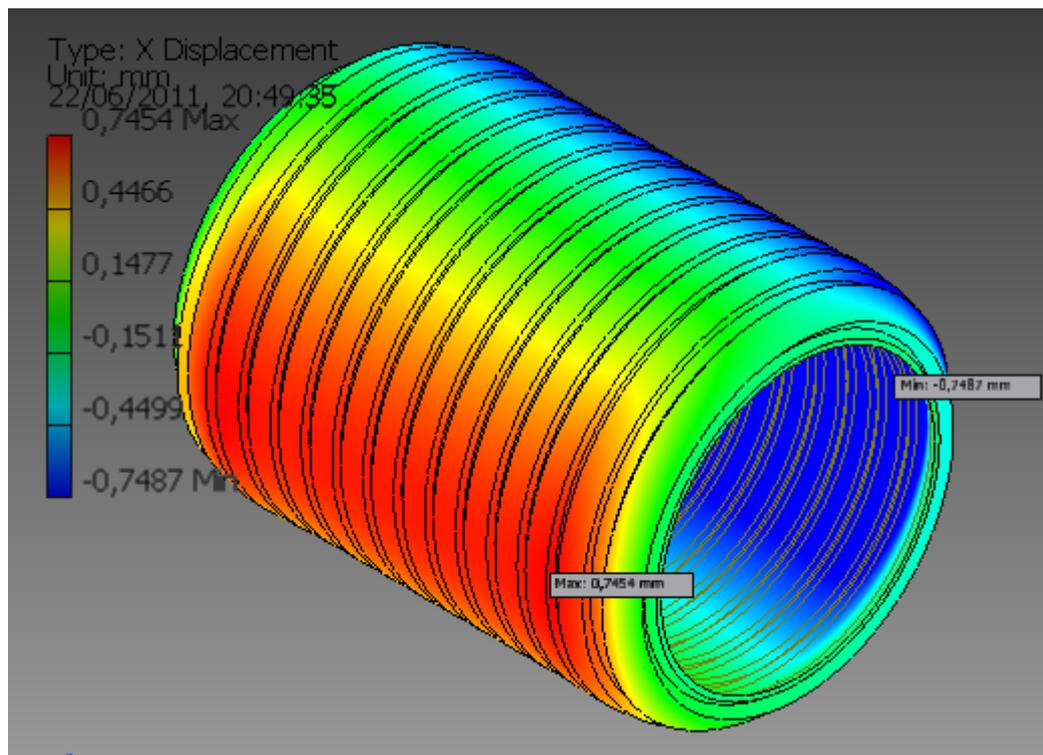
Stress YZ



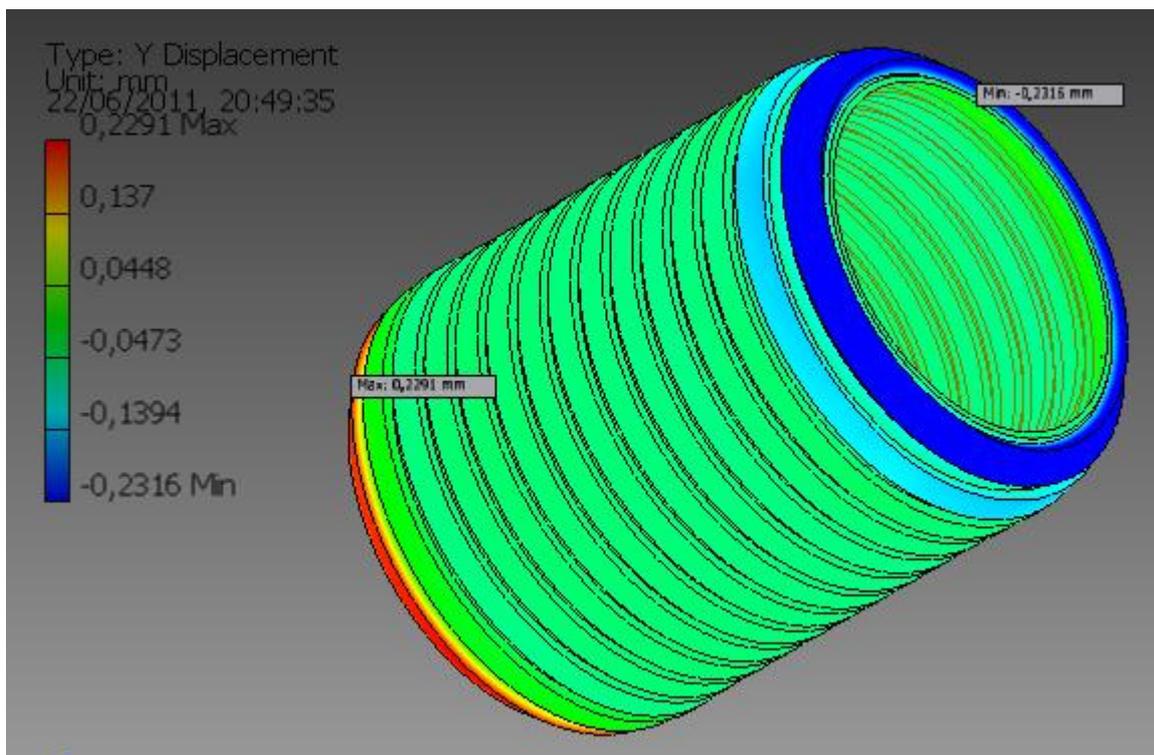
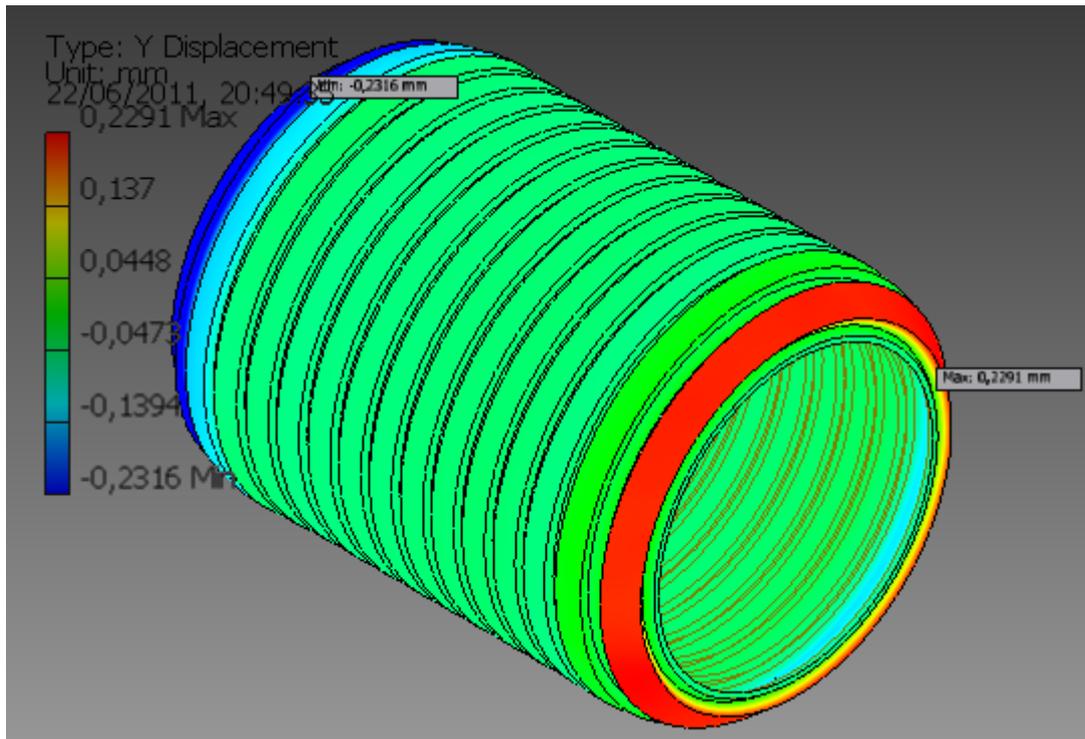
Stress ZZ



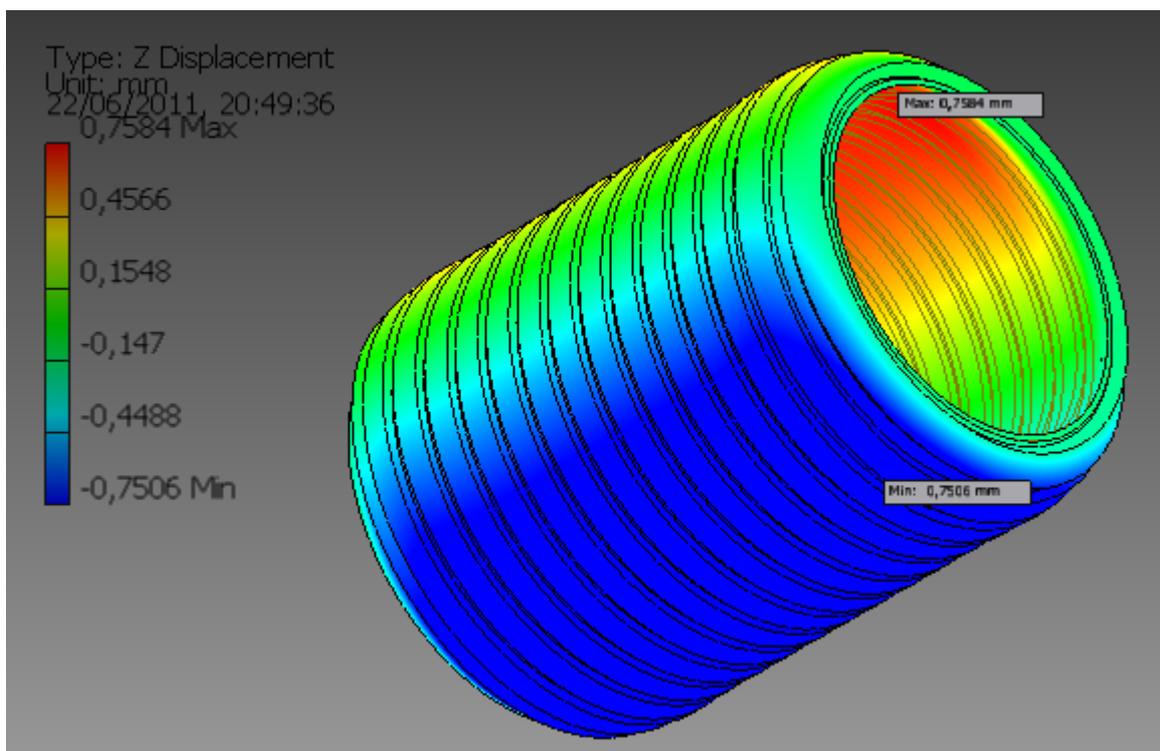
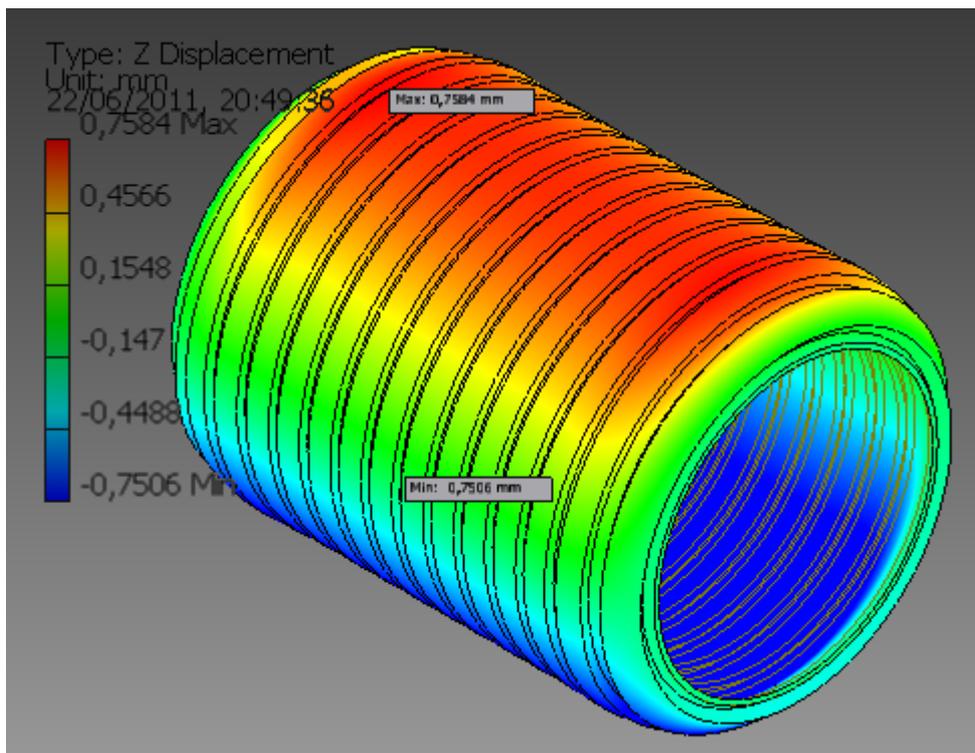
X Displacement



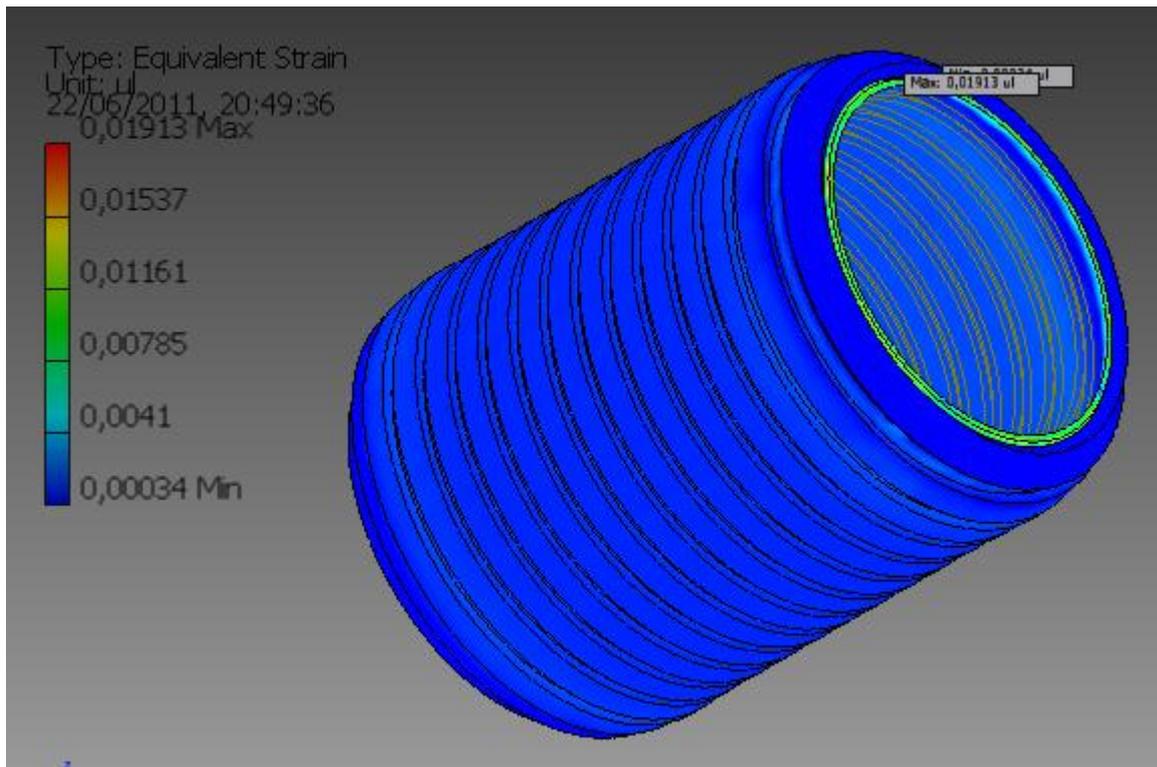
Y Displacement



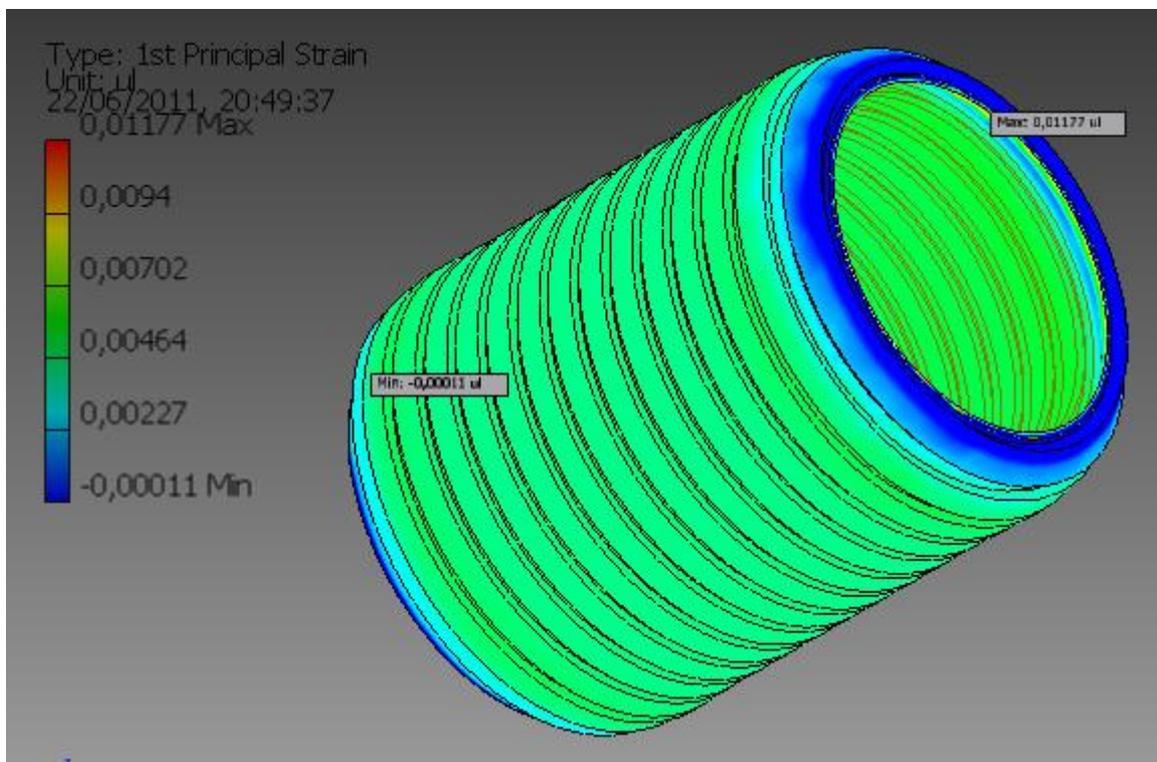
Z Displacement



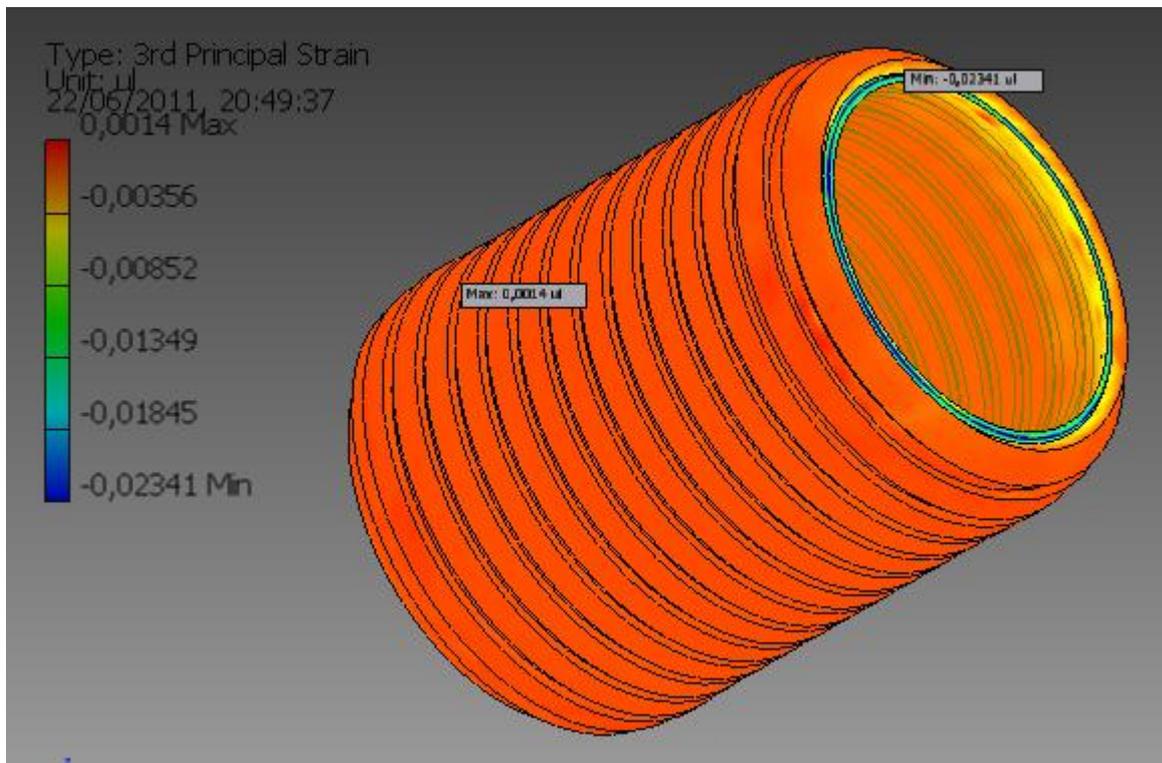
Equivalent Strain



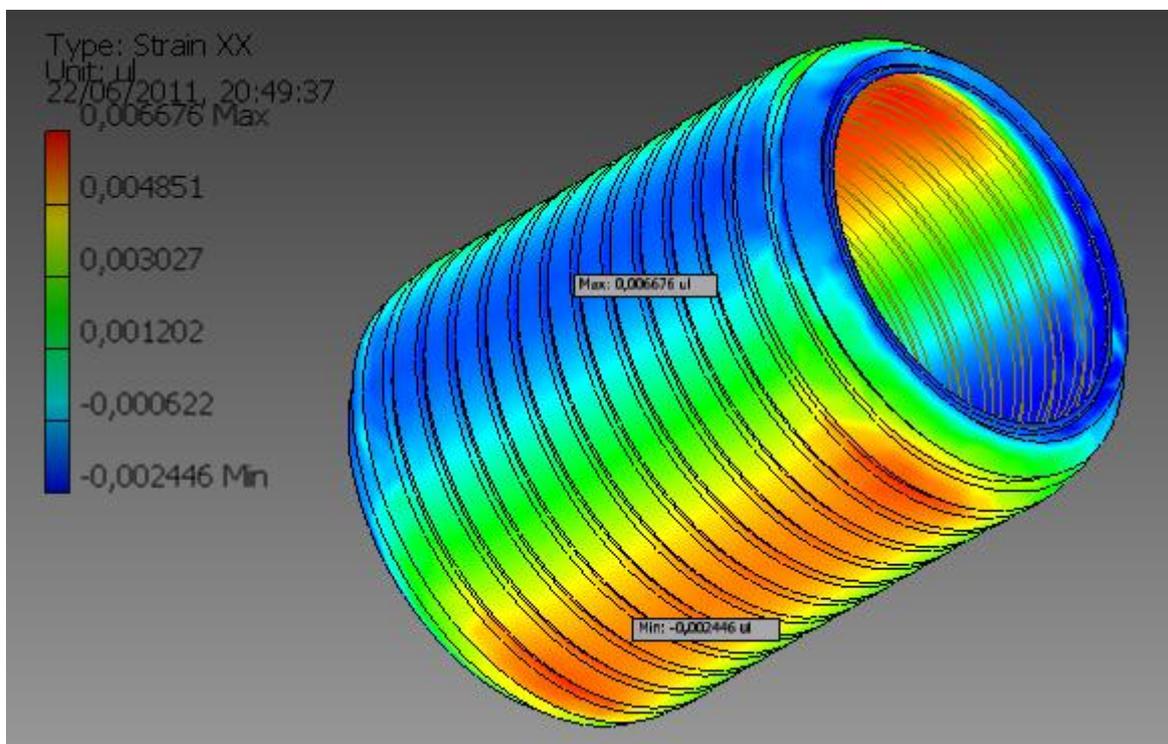
1st Principal Strain



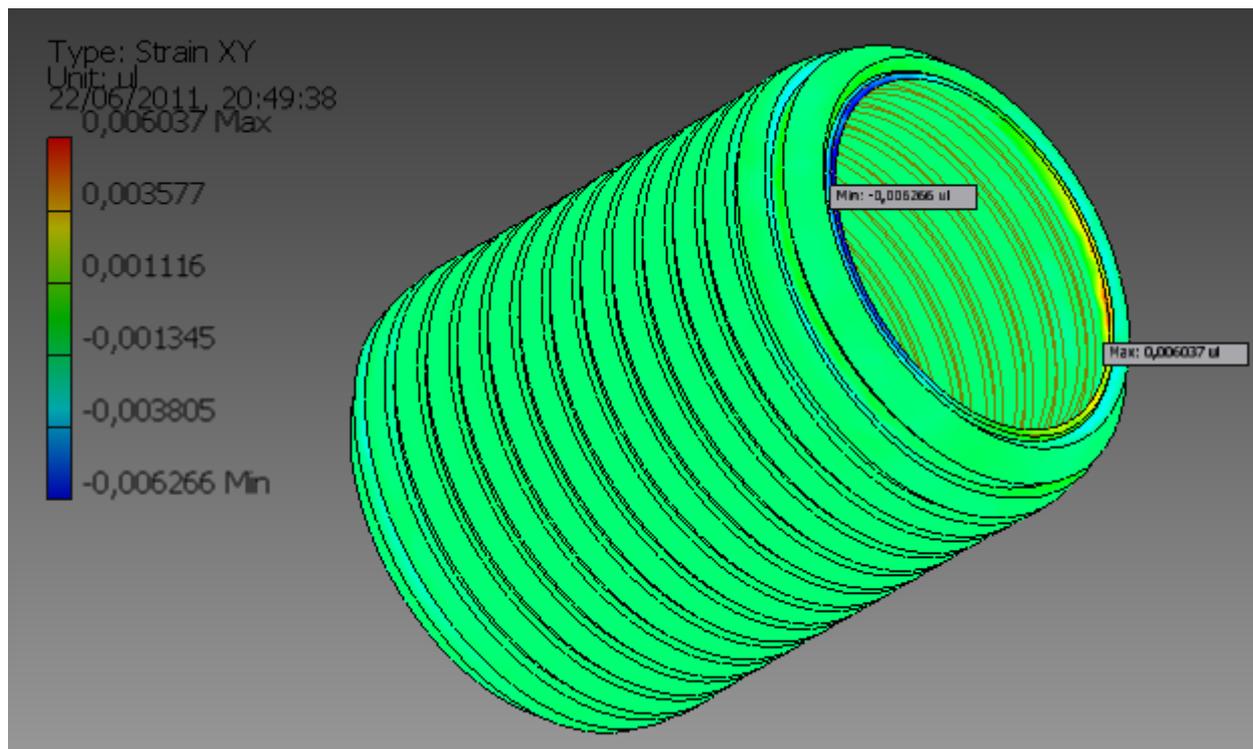
3rd Principal Strain



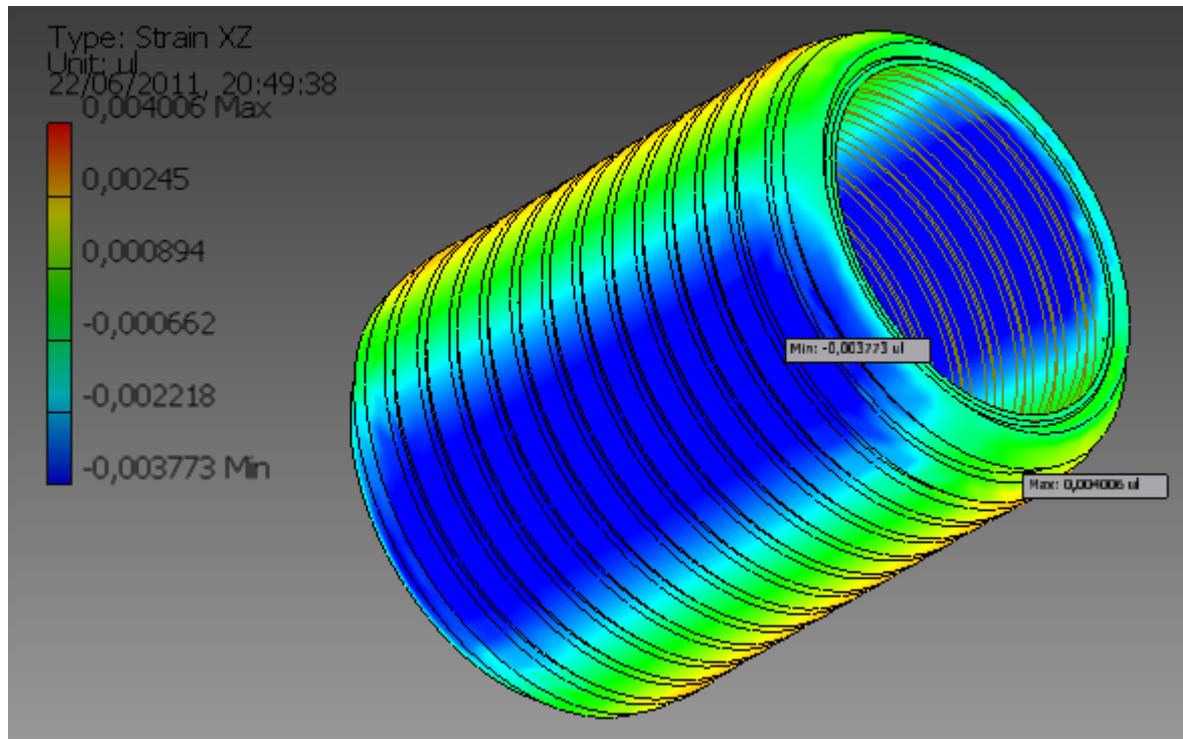
Strain XX



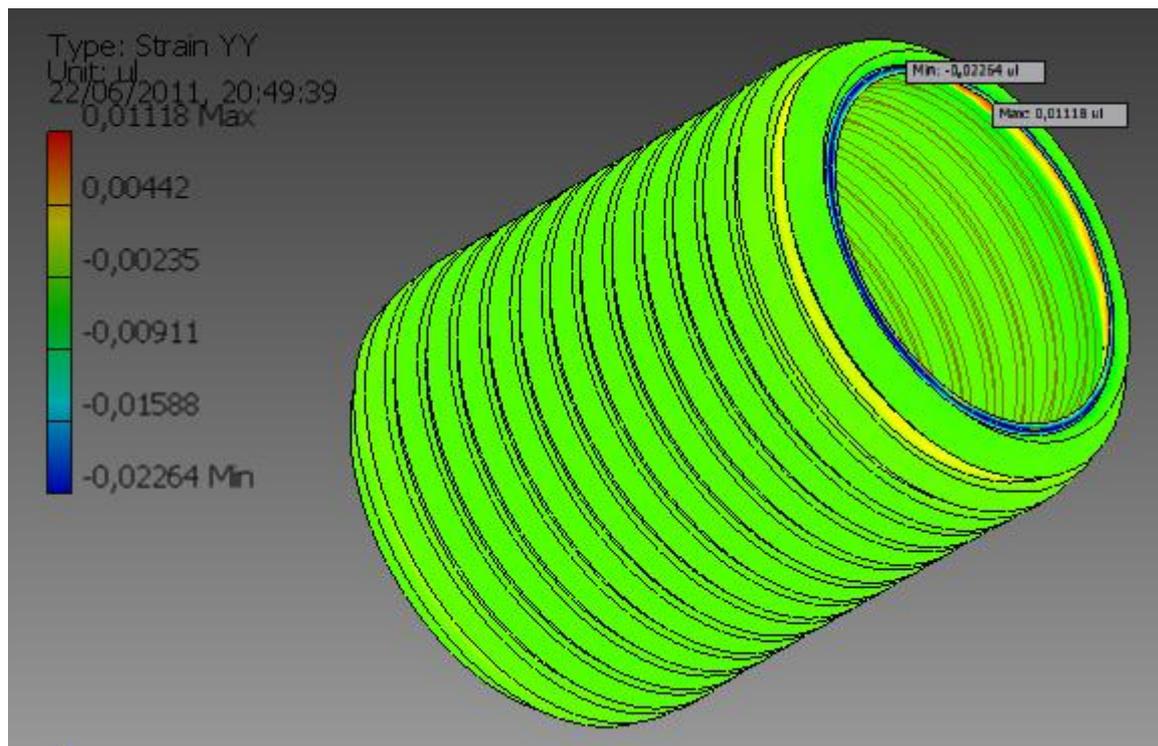
Strain XY



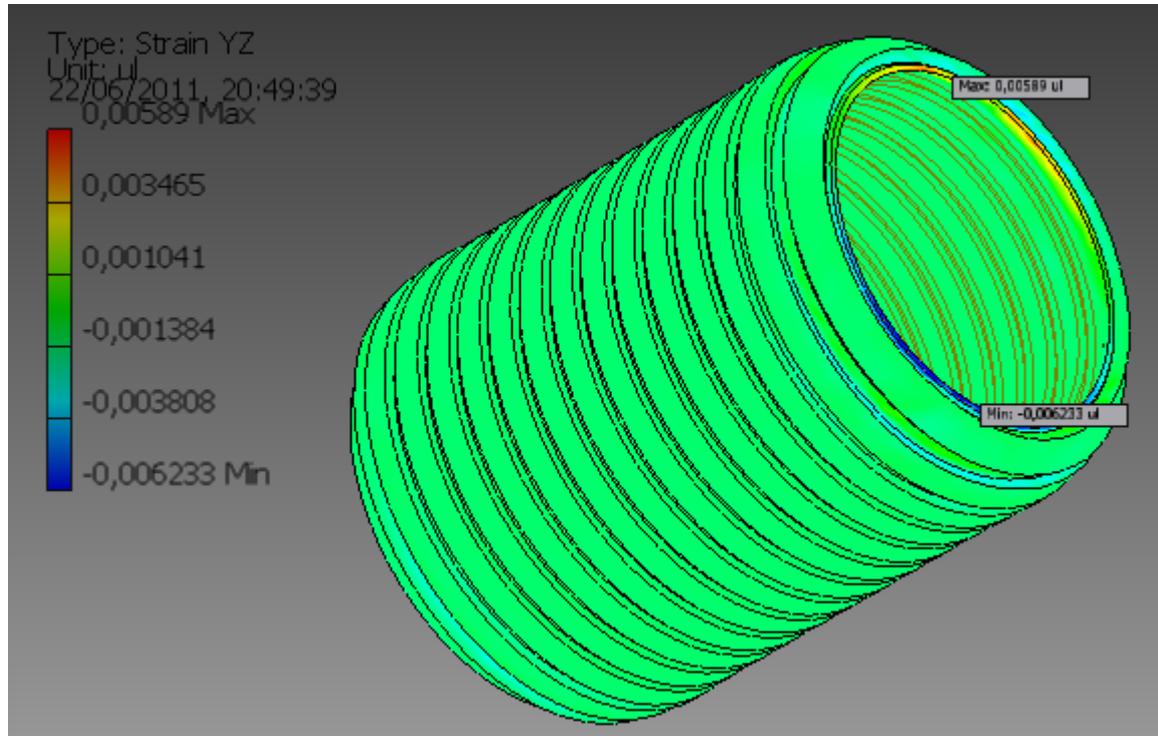
Strain XZ



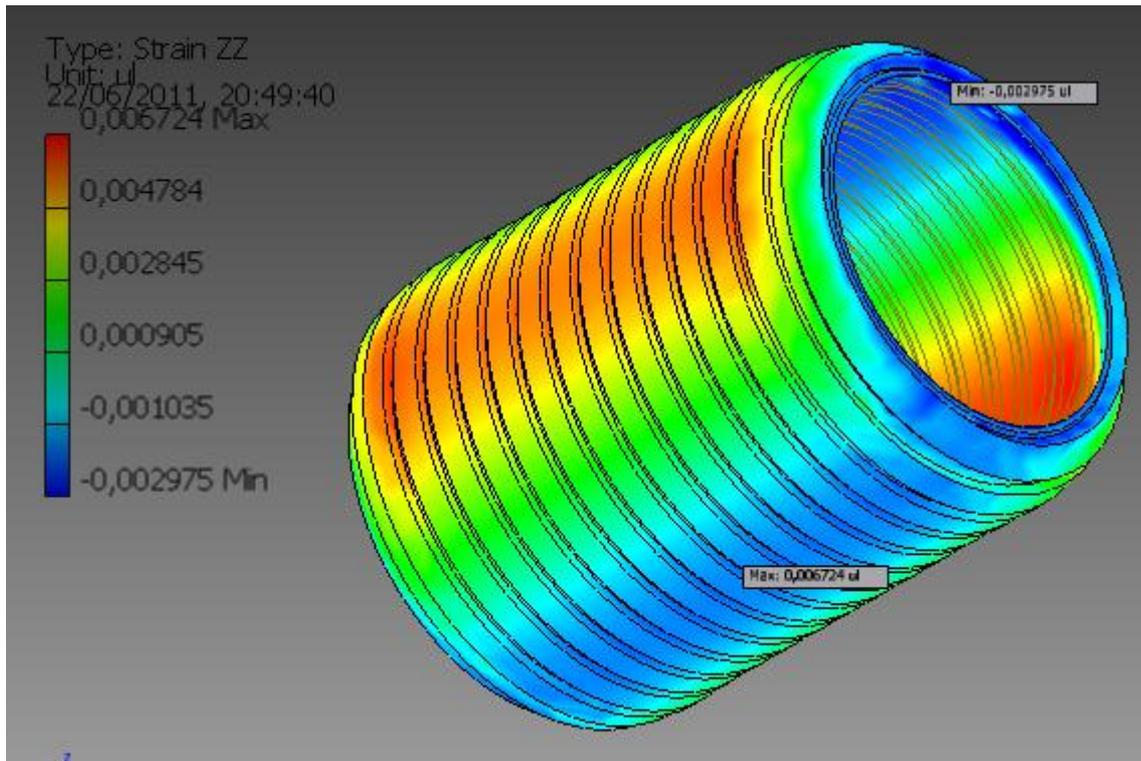
Strain YY



Strain YZ



Strain ZZ



Anexo E: Documentación Proyecto Submarino

A este documento se adjuntó un CD-ROM en el cual se encuentra una carpeta con el Nombre Documentación Proyecto Submarino. En esta carpeta se encontrara todos las fotos y videos tomados durante la realización de todo el proyecto; está documentado los procesos de construcción y ensamblaje del submarino, las diferentes pruebas de hermeticidad, control y movimiento, y las pruebas del submarino en aguas abiertas.

Anexo F: Planos