

**Instituto Tecnológico de Costa Rica**  
Área Académica de Ingeniería Mecatrónica

“Vehículo Acuático Autónomo de Superficie para el Laboratorio de Visión, Gráfica y Robótica  
(VGR-Lab)”

**Informe de proyecto de graduación para optar por el título de Ingeniero en Mecatrónica  
con el grado académico de Licenciatura**

**Autor:**

**Allison Mariel Mendoza Manzanares**

**2014057895**

**Cartago, marzo de 2019**

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios. En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas. En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Cartago, 12 de Abril de 2019



Firma del Autor

Allison Mariel Mendoza Manzanares

Cédula: 1-1635-0344

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**  
**PROYECTO DE GRADUACIÓN**  
**ACTA DE APROBACIÓN**

Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Mecatrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal



---

Ing. Parla Monge Chanto

Profesora lectora



---

Ing. Johanna Muñoz Pérez

Profesora lectora



---

Ing. Juan Diego Zamora Bolaños

Profesor asesor

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Carrera de Ingeniería Mecatrónica

Cartago, 12 de abril de 2019

## **Dedicatoria**

Quiero dedicar este trabajo a mi mamá, mi hermano y mis abuelos; por todo el apoyo, paciencia, colaboración y soporte emocional que me brindaron durante el desarrollo de este proyecto.

## **Agradecimiento**

Agradezco a mis familiares, amistades y compañeros que me apoyaron de una u otra forma durante la realización de este proyecto. Especialmente, doy las gracias al profesor Michael Jenkin, y a todo el equipo de compañeros del laboratorio, por permitirme ser parte del VGR-Lab, por brindarme su apoyo y consejos para desarrollar este trabajo con éxito.

## Resumen

El presente documento describe el diseño de la estructura, diseño electrónico y programación de un vehículo acuático autónomo de superficie para el laboratorio de Visión, Gráfica y Robótica ubicado en el edificio *Sherman Health Sciences* en el Campus de la Universidad de York, Toronto, Canadá. El Proyecto surge debido al interés en investigación en robótica marina en oceanografía, batimetría, control de aguas, mediciones de salinidad. Surge también debido a la necesidad de contar con un vehículo de superficie autónomo propio el cual sea capaz de navegar a distintas velocidades, brindar datos sobre su ubicación y orientación y además poder realizar mapeos de profundidad. Mediante el uso de un vehículo de superficie autónomo, se puede aumentar la productividad en investigaciones y reducir los accidentes marinos y equivocaciones en muestreos por errores humanos. El Proyecto toma en cuenta el diseño mecánico de la estructura, tomando en cuenta la selección del tipo de casco y se realiza el análisis en los componentes críticos de la estructura de acuerdo con la carga a la que se encuentran sometidos. Para el diseño eléctrico y la programación se mencionan los componentes necesarios para un correcto desempeño de este, tales como sensores y motores y las pruebas de validación realizadas para la programación.

*Palabras Clave: Robótica marina, batimetría, ROS, GPS, tele operación*

## **Abstract**

This document describes the design of the structure, electronics design and programming of an autonomous aquatic surface vessel for the Laboratory of Vision, Graphics and Robotics located in the Sherman Health Sciences building on the campus of the University of York, Toronto, Canada. The project arises due to the interest on research in marine robotics in oceanography, bathymetry, water control, salinity measurements. It arises also due to the need to have a surface vehicle owned by the Lab, capable of navigating at different speeds, providing information about its location, orientation and being able to make depth maps. By using an autonomous surface vehicle, you can increase productivity in researches and reduce marine accidents and mistakes in sampling due to human errors. The project considers the mechanical design of the structure, taking into account the selection of the hull and the analysis of the critical components in the structure according to the load they undergo. For the electrical design and the programming, the necessary components for a correct performance are mentioned, such as sensors and motors and the validation tests carried out for the programming.

*Key words: Marine robotics, bathymetry, ROS, GPS, teleoperation*

# ÍNDICE GENERAL

## Contenidos

Capítulo 1	Introducción .....	1
1.1	Entorno del proyecto .....	1
1.2	Definición del problema.....	2
1.2.1	Generalidades.....	2
1.2.2	Justificación .....	2
1.3	Enfoque de la solución.....	3
1.4	Objetivo general.....	4
1.4.1	Objetivos específicos .....	5
1.5	Metodología .....	5
1.6	Organización de los capítulos .....	6
Capítulo 2	Estado del Arte .....	8
Capítulo 3	Marco teórico .....	12
3.1	Introducción .....	12
3.3	Flotación .....	12
3.4	Estabilidad.....	13
3.5	Fuerza de arrastre.....	15
3.6	Tipos de embarcaciones .....	16
3.6.1	Catamarán .....	16
3.6.2	Mono casco .....	17
3.7	Tipos de casco.....	18
3.7.1	Casco de Desplazamiento .....	18
3.7.2	Casco de planeo .....	19
3.8	Accionamiento diferencial .....	19
3.8.1	Accionamiento diferencial en ambientes acuáticos .....	21
3.9	Viga doblemente empotrada .....	22
3.10	Esfuerzo en vigas .....	23
3.10.1	Esfuerzo normal .....	23
3.10.2	Esfuerzo cortante.....	25
3.11	Deflexión de elementos.....	27
3.12	Teoría de falla materiales.....	28



3.12.1	Teoría de energía de distorsión para materiales dúctiles.....	28
3.12.2	Teoría de Morh-Coulomb Frágil.....	29
3.13	Turbina.....	30
3.13.1	Motor DC.....	30
3.13.2	Motor DC sin escobillas.....	30
3.14	PWM.....	31
3.15	Controlador electrónico de velocidad.....	31
3.16	Sistema de posicionamiento global (GPS).....	32
3.17	Sensores de profundidad.....	32
3.18	Relé.....	32
3.19	Convertidor DC-DC Buck.....	33
3.20	Tele operación.....	33
3.21	ROS.....	33
Capítulo 4	Diseño de la estructura.....	36
4.1	Introducción.....	36
4.2	Consideraciones de diseño.....	36
4.3	Estructura del vehículo autónomo.....	39
4.3.2	Conexión al motor.....	41
4.3.2	Unión de las turbinas a la estructura.....	42
4.3.3	Uniones tipo T y tubos pasantes.....	43
4.3.4	Tapas de retención.....	44
4.3.5	Tubos de la estructura.....	45
4.3.6	Plataforma para el sensor de profundidad.....	46
4.3.7	Plataforma para la caja de componentes.....	47
4.3.8	Sujetadores para la caja de componentes.....	48
4.3.9	Caja para componentes.....	49
4.3.10	Balsas Expandacraft.....	49
4.4	Cálculos de Diseño.....	51
4.4.11	Cálculo de flotabilidad.....	51
4.4.12	Velocidad máxima debida al arrastre.....	52
4.4.13	Esfuerzos en la estructura.....	53
Capítulo 5	Selección de sensores y componentes electrónicos.....	59
5.1	Introducción.....	59
5.2	Sensores y actuadores.....	59
5.2.1	GPS.....	59

5.2.2	Sensor magnético .....	60
5.2.3	Sensor de profundidad .....	61
5.2.4	Turbinas .....	62
5.3	Procesamiento y comunicación.....	64
5.3.1	Control Remoto.....	64
5.3.2	Selección del controlador.....	65
5.3.3	Arduino UNO.....	66
5.4	Componentes electrónicos .....	67
5.4.1	Alimentación.....	67
5.4.2	Tarjeta de distribución de potencia .....	67
5.4.3	Arquitectura del sistema eléctrico.....	67
Capítulo 6	Software .....	69
6.1	Tipo de control.....	69
6.2	Paquetes de ROS utilizados .....	70
7	Resultados y análisis .....	72
7.1	Diseño Mecánico .....	72
7.2	Lectura de sensores .....	74
7.3	Resultados de la programación .....	76
8	Conclusiones y recomendaciones .....	83
8.1	Conclusiones .....	83
8.2	Recomendaciones .....	83
Bibliografía	.....	85
Apéndices.....	.....	91
Apéndice A.1	Glosario, abreviaturas y simbología .....	91
Apéndice A.2	Simulación de esfuerzos en piezas.....	91
Loads and Fixtures	.....	94
Reaction Moments	.....	96
Apendice A.3	Planos de piezas diseñadas .....	102
Apéndice A.4	Código utilizado para el Arduino.....	109
Apéndice A.5	Memoria de cálculos .....	112

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b>	Radio de giro en configuración de turbinas gemelas.....	3
<b>Figura 2.1</b>	Vehículo de superficie autónomo MARE para la Universidad de McGill.....	9
<b>Figura 2.2</b>	Vehículo de superficie autónomo Lizbeth.....	9
<b>Figura 2.3</b>	Seaswarm Vehículo autónomo del MIT.....	10
<b>Figura 2.4</b>	ERON.....	11
<b>Figura 3.1</b>	Flotación.....	13
<b>Figura 3.2</b>	Estabilidad de cuerpos flotantes.....	14
<b>Figura 3.3</b>	Momento de restitución en un cuerpo flotante.....	14
<b>Figura 3.4</b>	Metacentro y momento de volcadura.....	15
<b>Figura 3.5</b>	Catamarán y estabilidad.....	17
<b>Figura 3.6</b>	Monocasco y su estabilidad.....	18
<b>Figura 3.7</b>	Casco de desplazamiento.....	18
<b>Figura 3.8</b>	Casco de planeo.....	19
<b>Figura 3.9</b>	Elevación en un casco de planeo.....	19
<b>Figura 3.10</b>	Variables involucradas en el accionamiento diferencial.....	20
<b>Figura 3.11</b>	Línea de separación entre el agua y aire en un VSA.....	22
<b>Figura 3.12</b>	Viga doblemente empotrada con carga intermedia.....	22
<b>Figura 3.13</b>	Distribución de esfuerzo normal en una viga, vista lateral.....	23
<b>Figura 3.14</b>	Barra circular hueca con agujero pasante.....	24
<b>Figura 3.15</b>	Valores del factor A y $K_t$ para una viga redonda hueca con un agujero transversal .....	25
<b>Figura 3.16</b>	Esfuerzos cortantes en una barra.....	26
<b>Figura 3.17</b>	Barra circular hueca con agujero pasante.....	26
<b>Figura 3.18</b>	Tabla para el cálculo de A y $K_{ts}$ para una barra hueca con agujero transversal.....	27
<b>Figura 3.19</b>	Vista lateral de una viga sometida a una carga .....	27
<b>Figura 3.20</b>	Principio de funcionamiento del motor DC .....	30
<b>Figura 3.21</b>	Diagrama general de un Motor DC sin escobillas.....	30

<b>Figura 3.22</b>	Modulación por ancho de pulso, señal cuadrada .....	31
<b>Figura 3.23</b>	Diagrama básico de un relé .....	33
<b>Figura 3.24</b>	Ejemplo de comunicación entre los nodos de ROS.....	34
<b>Figura 3.25</b>	Comunicación de los nodos de ROS.....	35
<b>Figura 3.26</b>	Simulador <i>turtlesim</i> .....	35
<b>Figura 4.1</b>	Vista trasera del VAAS .....	40
<b>Figura 4.2</b>	Vista isométrica VAAS .....	41
<b>Figura 4.3</b>	Conexión del motor. ....	42
<b>Figura 4.4</b>	Unión entre la pieza de conexión al motor .....	42
<b>Figura 4.5</b>	Unión de las turbinas a la estructura .....	43
<b>Figura 4.6</b>	Conexión tipo T .....	43
<b>Figura 4.7</b>	Tubo pasantes .....	44
<b>Figura 4.8</b>	Tapa de retención 1.....	44
<b>Figura 4.9</b>	Tapa de retención 2. ....	44
<b>Figura 4.10</b>	Tubo estructural.....	45
<b>Figura 4.11</b>	Ensamble de los tubos pasantes (2) y la conexión al motor (1) en el tubo estructural.....	45
<b>Figura 4.12</b>	Tubo estructural 2 .....	46
<b>Figura 4.13</b>	Plataforma para el sensor de Profundidad .....	46
<b>Figura 4.14</b>	Ensamble de la plataforma para el sensor de profundidad con los tubos estructurales 2 .....	47

<b>Figura 4.15</b>	Plataforma para la caja de componentes .....	47
<b>Figura 4.16</b>	Ensamble entre la plataforma para la caja de componentes, tubos estructurales 2 y sujetadores para la caja de componentes .....	48
<b>Figura 4.17</b>	Inserción roscada para tornillo. ....	48
<b>Figura 4.18</b>	Sujetador para la caja de componentes.....	49
<b>Figura 4.19</b>	Caja para componentes, imagen ilustrativa .....	49
<b>Figura 4.20</b>	Balsas Expandacraft.....	50
<b>Figura 4.21</b>	DCL Conexión al motor .....	53
<b>Figura 4.22</b>	Diagramas de esfuerzo cortante y momento flector de la conexión al motor.....	54
<b>Figura 4.23</b>	DCL Tubo estructural.....	56
<b>Figura 4.24</b>	Diagramas de esfuerzo cortante, momento flector y torque del tubo estructural...	56
<b>Figura 5.1</b>	Módulo GPS u-blox 6 EVK .....	59
<b>Figura 5.2</b>	Módulo Módulo SparkFun GPS-RTK Board-NEO- M8P 2.....	60
<b>Figura 5.3</b>	Sensor magnético. ....	61
<b>Figura 5.4</b>	Sensor de profundidad .....	61
<b>Figura 5.5</b>	Turbinas T200 <i>BlueRobotics</i> .....	62
<b>Figura 5.6</b>	Gráfica de Potencia en función del ancho de pulso .....	63
<b>Figura 5.7</b>	Control remoto a utilizar.....	64
<b>Figura 5.8</b>	Hardware Raspberry Pi.....	65
<b>Figura 5.9</b>	Diagrama de Bloques de entradas y salidas Raspberry Pi.....	65
<b>Figura 5.10</b>	Arduino UNO.....	66
<b>Figura 5.11</b>	Diagrama de bloques de entradas y salidas del Arduino. Elaboración propia.....	66
<b>Figura 5.12</b>	Diagrama de alimentación.....	68

<b>Figura 5.13</b>	Diagrama de comunicación.....	68
<b>Figura 6.1</b>	Diagrama de flujo del código de control.....	69
<b>Figura 7.1</b>	Prueba número uno.....	78
<b>Figura 7.2</b>	Fotografía estanque Stong.....	79
<b>Figura 7.3</b>	Datos de profundidad obtenidos de la prueba número uno.....	79
<b>Figura 7.4</b>	Prueba número dos.....	80
<b>Figura 7.5</b>	Prueba número tres.....	81
<b>Figura 7.6</b>	VAAS construido.....	82



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 4.1</b>	Escogencia del tipo de embarcación.....	36
<b>Tabla 4.2</b>	Densidad, Esfuerzo a fluencia y costo de los materiales.....	37
<b>Tabla 4.3</b>	Componentes para conformar el catamarán.....	38
<b>Tabla 4.4</b>	Características de las balsas a utilizar.....	50
<b>Tabla 5.1</b>	Características de los módulos GPS.....	60
<b>Tabla 5.2</b>	Características de sensor de profundidad.....	62
<b>Tabla 5.3</b>	Características de las turbinas T200 y T100 BlueRobotics.....	63
<b>Tabla 6.1</b>	Paquetes de ROS utilizados.....	70
<b>Tabla 7.1</b>	Resultados obtenidos en flotabilidad y velocidad del VAAS.....	72
<b>Tabla 7.2</b>	Factores de seguridad obtenidos.....	73
<b>Tabla 7.3</b>	Lecturas del sensor Magnético.....	74
<b>Tabla 7.4</b>	Lectura de coordenadas medidas por el GPS.....	75
<b>Tabla 7.5</b>	Mediciones sensor de profundidad.....	76
<b>Tabla 7.6</b>	Tiempo de reacción de los motores del VAAS en tele operación, movimiento hacia adelante.....	76
<b>Tabla 7.7</b>	Tiempo de reacción de los motores del VAAS en tele operación, movimiento hacia la derecha.....	77
<b>Tabla 7.8</b>	Tiempo de reacción de los motores del VAAS en tele operación, movimiento hacia la izquierda.....	77



# Capítulo 1 Introducción

## 1.1 Entorno del proyecto

La Universidad de York, ubicada en Ontario, Canadá, cuenta con la Escuela de Ingeniería Lassonde, dicha escuela cuenta con diversos laboratorios de investigación asociados en diversas áreas, entre ellos el Laboratorio de Visión, Gráfica y Robótica. El VGR-Lab se encuentra en el edificio Sherman en el Campus de la Universidad de York, este laboratorio se encuentra asociado al departamento de Ingeniería Eléctrica y Ciencias de la computación, además el laboratorio cuenta con todo el equipo necesario para el desarrollo de sus proyectos, el presupuesto para estos es asignado por el departamento al que se encuentra adjunto (“VGR Lab”, 2008).

Además, el VGR-Lab es también el hogar del Centro Canadiense para Robótica de campo, el cual es un centro que brinda entornos de prueba para proyectos de investigación al aire libre para la robótica, las áreas de prueba incluyen simulación de superficies planetarias, entornos acuáticos interiores (piscina) o exteriores y una instalación de pruebas terrestres a gran escala con áreas boscosas (Canadian Centre for Field Robotics, 2013).

Entre los proyectos actuales se encuentra el desarrollo de un vehículo autónomo de superficie acuática. La pesca desmedida, el aumento de la contaminación de plástico en los mares y demás residuos y las altas temperaturas en el planeta han ido erosionando poco a poco el fondo marino y alterando la vida marina presente en distintas partes del mundo (Heisler, et al., 2018).

Dado que los métodos de muestreo actuales para fondo marino y mediciones de profundidad toman demasiado tiempo, y son hasta en algunos casos peligrosos, surge la necesidad de investigar en el desarrollo de vehículos de superficie autónomos, los cuales pueden cumplir con diversas tareas de muestreo sin necesidad de gente maniobrándolos y además pueden ser utilizados en colaboración multi robot para el muestreo de fondos marinos, reducen los costos al ser más

pequeños que los vehículos de investigación convencionales, se reduce el riesgo para vidas humanas en investigación en el océano y son más versátiles que las boyas meteorológicas .

Este vehículo debe ser capaz de brindar datos de su ubicación GPS y su orientación respecto al norte y realizar mediciones de profundidad. Además, debe ser capaz de contar con un modo de operación autónomo, uno de tele operación y con un interruptor que indique que debe permanecer sin moverse. En el diseño del vehículo influye la resistencia del agua y del viento, los materiales disponibles y los componentes que se encuentren al alcance.

## **1.2 Definición del problema**

### **1.2.1 Generalidades**

La robótica se caracteriza por contar con una gran cantidad de áreas de especialización, las cuales abarcan diferentes aplicaciones u objetivos. El interés por desarrollar un vehículo que pueda navegar por su cuenta radica en sus posibles aplicaciones, tales como: realización de trabajos peligrosos, desempeño en sitios donde un humano no puede laborar, etc. Mediante el uso de Vehículos acuáticos autónomos de superficie(VAAS) se reducen los costos asociados a la compra de grandes buques de investigación, se aumenta la eficiencia en las tareas relacionadas con recolección de datos y se mejora la seguridad en las investigaciones.

Los costos relacionados con la compra de un vehículo autónomo comercial y las limitaciones en las especificaciones de este hacen necesario el desarrollo de tecnología propia en el VGR-Lab, con el fin de enfocar la tecnología desarrollada al objetivo de investigación deseado. Siempre y cuando las condiciones climáticas lo permitan, se cuenta con un campo de prueba específico para el vehículo en las instalaciones de la Universidad de York, el cual es el estanque Stong.

### **1.2.2 Justificación**

La búsqueda de una alternativa para la investigación de mares u otros cuerpos acuáticos hace necesario el diseño de un vehículo acuático de superficie autónomo que sea capaz de imitar las

capacidades humanas de manejo, control y orientación de manera que el vehículo pueda detectar el medio que lo rodea, la profundidad del lugar en el que se encuentra y su ubicación y navegar de acuerdo con la orden enviada al vehículo, ya sea seguir una ruta, monitorear alguna zona específica, entre otros. Mediante el desarrollo de un ASV, se espera aumentar la productividad en investigaciones y reducir los accidentes marinos por errores humanos.

### 1.3 Enfoque de la solución

Se propone primero hacer un análisis del ambiente en el cual se moverá el vehículo, esto con el fin de comprender hacia dónde debe ir enfocada la construcción de este, dicho vehículo debe ser capaz de moverse de forma estable sobre aguas sin movimiento, es decir, que no haya volcamientos. Inicialmente se definirán las características de su estructura.

Se utilizará un propulsor de turbinas gemelas, es decir, un propulsor de proa y popa con 2 turbinas iguales con el fin de poner el vehículo en movimiento y garantizar mejor maniobrabilidad y seguridad en comparación con utilizar una sola turbina, además esta turbina cuenta con un diseño que permite su instalación en espacios limitados. La diferencia entre utilizar turbinas gemelas y una sola turbina radica en el movimiento de giro, ya que con turbinas gemelas surge la facilidad de que para girar sólo se necesita apagar una y poner la otra en funcionamiento, dónde el radio de giro se encuentra entre las 2 turbinas, como se muestra en la Figura 1.1, dónde  $R$  es el radio de giro,  $V_l$  la velocidad de la turbina izquierda,  $V_r$  la velocidad de la turbina derecha,  $\omega$  la velocidad angular e ICC el centro instantáneo de rotación .

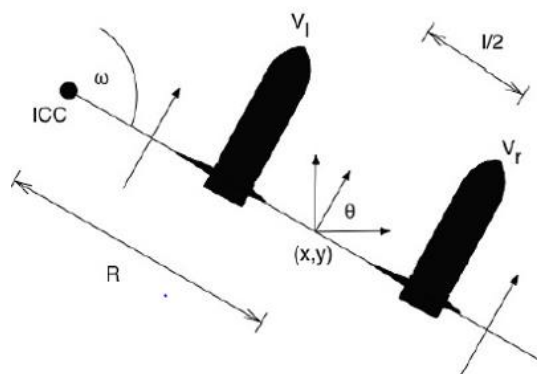


Figura 1.1 Radio de giro en configuración de turbinas gemelas. (Codd-Downey, 2017)

Se realizarán las pruebas de mediciones de profundidad, ubicación GPS y orientación espacial bajo las condiciones de temperatura mayor a 5°C, sin olas en el estanque Stong ubicado en el campus de la Universidad. La estructura del vehículo debe ser rígida y estable con el fin de que se puedan realizar con éxito las mediciones de profundidad.

El vehículo debe contar con los elementos mecánicos que permitan un correcto desempeño a lo largo de la tarea asignada. Se deben realizar pruebas de la turbina, tomando en cuenta el peso del vehículo y el desempeño de la turbina en el estanque. El vehículo debe contar con sensores de profundidad, capaces de monitorear constantemente el fondo del estanque o del medio en el cual se encuentra, un GPS con el fin de determinar la ubicación del vehículo. Debe contar con una cámara omnidireccional con el fin de obtener información del medio que rodea al vehículo sobre la superficie.

Otro aspecto para considerar es que el vehículo debe contar con fuente de energía para el motor de la turbina, para los sensores y el sistema de control que tendrá el vehículo. Se realizará el diseño para las conexiones entre sensores y el control del vehículo. Respecto a la programación, se utilizará de referencia las librerías y la documentación ya implementadas en Sistema Operativo Robótico (ROS) sobre vehículos autónomos (Open Source Robotics Foundation, 2007). Se deberán llevar a cabo las mejoras y agregados que se consideren necesarios con el fin de que la programación se adapte a la estructura y escenario que se propone para el vehículo, como se mencionó anteriormente, aguas sin movimiento.

## **1.4 Objetivo general**

- Desarrollar un vehículo autónomo acuático de superficie que realice mediciones de profundidad, brinde su ubicación y orientación espacial al moverse a través de aguas sin movimiento.

### 1.4.1 Objetivos específicos

- Diseñar la estructura del vehículo para la navegación en aguas sin movimiento.
- Desarrollar un sistema de sensores que permita al vehículo ubicarse en el espacio con un error menor a 5 m de la posición deseada.
- Comprobar el funcionamiento de los sensores mediante la verificación de sus salidas.
- Desarrollar un programa para controlar el vehículo tanto en tele operación como en navegación autónoma.
- Verificar el funcionamiento del VAAS mediante pruebas de seguimiento de ruta.

## 1.5 Metodología

Las principales tareas que se llevarán a cabo en la ejecución del proyecto son las siguientes:

### 1. Familiarización con el equipo y herramientas existentes en el VGR-Lab

En este proceso se conocerá y entenderá la dinámica del laboratorio, las normas de seguridad del equipo del laboratorio y el uso del software con el que se cuenta.

### 2. Boceto del vehículo.

En esta actividad se realizará un boceto preliminar de vehículo, con el fin de determinar la cantidad de piezas, las uniones, la posición de cada sensor, la geometría preliminar, la posición de los actuadores y del controlador.

### 3. Cálculos de diseño mecánico.

En esta actividad se realizarán los cálculos para las uniones mecánicas y la estructura del vehículo, con el fin de verificar que las medidas sean funcionales. Además, para el caso de elementos estandarizados, de acuerdo con los cálculos se realizará la búsqueda en catálogos. Se utilizará para los cálculos estáticos el criterio de Von Mises para materiales dúctiles y Morh-Coloumb frágil para materiales frágiles.

### 4. Planos mecánicos y simulación de esfuerzos.

Se realizará un modelo 3D de cada pieza utilizando el programa SolidWorks®, posteriormente se unirán en un ensamble, en el mismo software se realizará un análisis de esfuerzo con el método de Von Mises o Morh-Coloumb en las piezas críticas para finalmente generar los planos de construcción.

#### 5. Caracterización de los sensores y los actuadores.

Se estudiará el rango de operación de cada sensor y de los actuadores, se realizarán pruebas de funcionamiento, y se verificarán las salidas. Se analizarán los modelos matemáticos para transformar las mediciones del sensor en las señales de interés. Además, se verificará que el controlador sea capaz de medir las entradas, las cuales serán los datos de salida de los sensores, posteriormente se realizará el diseño eléctrico del sistema.

#### 6. Diagrama de flujo del software

En esta actividad se planteará el algoritmo a seguir para la programación del vehículo, las rutinas y subrutinas requeridas.

#### 7. Diseño del programa de control

Con la plataforma ROS, se realizará el programa de control para el vehículo, tomando en cuenta los protocolos de comunicación entre los distintos sensores que sean necesarios.

#### 8. Validación del programa de control

Se procederá a unir las 3 partes del diseño (estructura del vehículo, programación y circuito), se realizarán las pruebas de ubicación, mediciones de profundidad, muestreo de los alrededores y se documentará cada dato.

#### 9. Análisis de resultados y correcciones.

Se procesará la información obtenida de las pruebas realizadas con el fin de definir si es necesario llevar a cabo modificaciones o si se valida el proyecto.

## **1.6 Organización de los capítulos**

El presente documento se divide en diferentes capítulos, con el fin de abarcar las áreas de desarrollo del proceso de diseño de la estructura y del software del vehículo de superficie

autónoma. En el primer capítulo se presenta la introducción, en el segundo los fundamentos teóricos necesarios para el trabajo realizado, mientras que en el tercer, cuarto y quinto capítulo tratan sobre la labor de diseño de la estructura y del software; y finalmente se presentan las conclusiones y el trabajo futuro.

En el primer capítulo se habla sobre las motivaciones del proyecto, y lo que se busca lograr con el diseño elaborado, además de que describe el enfoque de la solución de forma general y los pasos que se llevarán a cabo. El segundo capítulo, describe los trabajos realizados anteriormente sobre vehículos acuáticos autónomos de superficie y se mencionan las características de cada vehículo.

El tercer capítulo trata sobre los fundamentos implementados a lo largo del documento y durante la realización del proyecto. En esta sección se explican las diferencias entre los tipos de embarcaciones, tipos de cascos para embarcaciones, además del principio de flotación y la fuerza de arrastre provocada por el agua y el viento. También se incluyen temas utilizados en el diseño de la estructura, tales como esfuerzos provocados en vigas, tipos de vigas, escogencia de sensores y navegación punto a punto.

En el capítulo 4 se presenta el desarrollo de los cálculos para la flotación, velocidad máxima debido al arrastre y diseño de la estructura mecánica. En él se explican las consideraciones y requerimientos del diseño, así como los materiales disponibles.

En el capítulo 5 se presentan las consideraciones para el diseño eléctrico y la descripción de los elementos utilizados, se muestran los gráficos de potencia de las turbinas presentes en el barco y además del diagrama eléctrico.

Posteriormente el capítulo 6 se explica el software de control utilizado para el funcionamiento del robot, se muestra el diagrama de flujo correspondiente, la arquitectura y la lógica del software.

En el capítulo 7 se muestran los resultados obtenidos a través de la solución implementada y su validación.

Finalmente, en el capítulo 8 se muestran las conclusiones. Se verifican los objetivos con los resultados obtenidos. De esta forma, el documento consta de 7 capítulos, que describen al detalle los procesos llevados a cabo para concluir este proyecto. Se concluirá el documento anexando planos, datos y figuras.

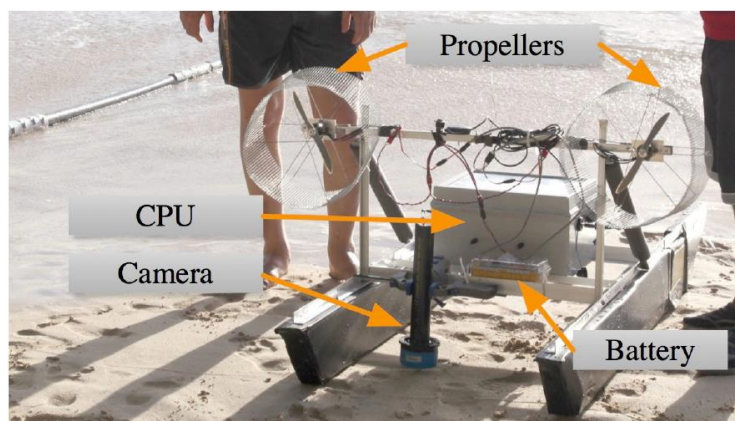
## Capítulo 2 Estado del Arte

En el campo de la robótica autónoma se ha generado interés en investigar en los vehículos de superficie autónomos, debido a que estos sistemas tienen una amplia gama de aplicaciones. Son utilizados en oceanografía, batimetría, control de aguas, mediciones de salinidad. Son más versátiles que las boyas meteorológicas y poseen un costo más accesible que el de un barco de investigación.

Las 4 áreas más importantes para aplicación de estos son: aplicaciones militares, inspección de estructuras en la industria de petróleo, estudios de naufragios y estudios ecológicos (Dunbabin, Grinham & Udy, 2009 ). Estos vehículos, constan principalmente de pequeños buques, cuya construcción y arreglo de sensores depende de la tarea a realizar. La arquitectura básica de un VAAS está conformada por la estructura mecánica, la propulsión, un sistema de navegación GPS y sensores para recolección de datos (Demetiou, et al., 2016).

Entre los VAAS que se han desarrollado se encuentra MARE, mostrado en la Figura 2.1, el cual fue desarrollado por la Universidad de McGill. Este VAAS se desarrolló con el fin de realizar inspección de arrecifes de coral y fondos marinos poco profundos en una región determinada mediante exploración visual autónoma. El chasis para la estructura de MARE cuenta con un diseño de catamarán con el fin de que sea más hidrodinámicamente estable, dicho chasis es plegable lo cual hace más fácil el transporte del vehículo. Cada propela es independiente y son impulsadas con aire, esto con el fin de poder explorar ambientes marinos con la menor perturbación posible para la vida marina (Girdhar, et al.,2011).





*Figura 2.1* Vehículo de superficie autónomo MARE para la Universidad de McGill. (Girdhar, et al.,2011)

La posición de la cámara mostrada en la Figura 2.1, permite tomar constantemente fotografías del fondo marino.

Cuando se trata de monitorear recursos marinos que enfrentan la amenaza de Cianobacterias, con el fin de entender la evolución de estas en dichos recursos hídricos se requiere tomar muestras de forma repetida en el mismo lugar a lo largo del tiempo. Lizbeth es un vehículo de superficie autónomo el cual fue diseñado y fabricado para dicha tarea, su estructura tiene el diseño de un catamarán, cuenta con la capacidad de tomar muestras dentro de un rango de profundidades entre 0 m y 100 m y brinda su posición mediante el uso de GPS, lo cual hace que sea capaz de realizar navegación de forma autónoma. El diseño de catamarán de este VAAS mostró estabilidad en aguas tranquilas y, además, al ser los cascos de doble desplazamiento puede ser manejado hacia adelante y en reversa (Hitz, et al., 2012).



*Figura 2.2* Vehículo de superficie autónomo Lizbeth. (Hitz, et al., 2012)

*Seaswarm* es un vehículo de superficie autónomo desarrollado por un equipo de estudiantes y profesorado a través del *Senseable City Lab* del MIT. Este vehículo fue diseñado para viajar sobre la superficie del agua y trabajar con una flota de otros vehículos idénticos con el fin de remover aceite del agua en sitios en los cuales ha sido derramado. Aunque solo se ha realizado un prototipo, los barcos están diseñados para trabajar en formaciones en forma de enjambre durante la eliminación de aceite para maximizar la eficiencia. *Seaswarm* tiene la capacidad para comunicarse con sus iguales mediante un corto alcance mediante enlaces de comunicaciones Wifi con el fin de optimizar la ruta de limpieza. El vehículo *Seaswarm* se muestra en la Figura 2.3.



Figura 2.3 Seaswarm Vehículo autónomo del MIT. (MIT, s.f.)

En la Figura 2.3, se aprecia que en la cabeza del robot se encuentran paneles fotovoltaicos los cuales son capaces de brindar energía durante varias semanas para poner al vehículo en movimiento. A medida que el vehículo se mueve, la cinta transportada gira constantemente y absorbe las partículas de aceite en el agua. Este proceso se encuentra más simplificado que las tecnologías actuales para recolección de aceite porque los robots pueden operar de forma autónoma y no deben regresar a la costa para su mantenimiento constante. Las pruebas realizadas con *Seaswarm* mostraron que la cinta transportadora se adaptó fácilmente a las ondas superficiales y se propulsó con éxito a través del agua.

Otro VAAS que se ha desarrollado es ERON , el cual se muestra en la Figura 2.4, fue desarrollado por el laboratorio de robótica y sistemas automatizados de la Universidad de Frederick en Chipre (Demetiou, et al., 2016). Fue desarrollado como la base para futuras aplicaciones específicas de VAAS. Es un vehículo totalmente autónomo que sigue un camino con una precisión de menos de un metro. Su casco es de 2,86 m de largo y 0,7 m de ancho, la propulsión

y la dirección se realizan mediante cuatro propulsores los cuales se colocan dos a la izquierda y dos en el lado derecho del barco. Los propulsores son las turbinas T100 y T200 de *BlueRobotics*, son físicamente idénticas, la diferencia está en que las turbinas T200 son recomendadas para VAAS de mayor tamaño (BlueRobotics Inc, 2017), las características de estas turbinas se pueden revisar en la sección 5.2.4 de este documento.



*Figura 2.4* ERON. (Demetiou, et al., 2016)

Como se aprecia en la Figura 2.4, el diseño de la estructura de ERON es mono casco y es un diseño completamente sellado.

## Capítulo 3 Marco teórico

### 3.1 Introducción

El presente capítulo trata los conceptos utilizados para el diseño propuesto en este documento, los cuales se deben tener claros para su correcta comprensión. Con base en las necesidades del proyecto se mostrará el concepto de tipos de embarcaciones, conceptos de diseño mecánico, concluyendo con ciertas herramientas a utilizar en el desarrollo de la solución.

### 3.3 Flotación

Es común que cuando un observador levanta un objeto tiene la sensación de que este es más ligero y pesa menos en un líquido que en el aire. Esto se puede demostrar con facilidad si se pesa un objeto denso en el agua, con una balanza de resorte impermeable y se compara con su peso en el aire. De igual modo, los objetos hechos de madera o de otros materiales ligeros como el plástico y estereofón flotan en el agua (Cengel, Cimbala, Olguín, Skarina., 2006). Éstas y otras observaciones indican que un fluido ejerce una fuerza hacia arriba sobre un cuerpo sumergido en él, esta fuerza que tiende a levantar el cuerpo se le llama fuerza de flotación. El peso y la fuerza de flotación deben tener la misma línea de acción para crear un momento cero (Cengel, et al., 2006).

Esto se conoce como principio de Arquímedes el cual establece que la fuerza de flotación que actúa sobre un cuerpo sumergido en un fluido es igual al peso del fluido desplazado por el cuerpo y actúa hacia arriba pasando por el centroide del volumen desplazado. Según Cengel, et al. (2006) la fuerza de flotación se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$F_b = \rho_f g V_{sum} \quad (3.1)$$

Donde  $F_b$  es la fuerza de flotación,  $\rho_f$  la densidad del fluido,  $g$  la gravedad del planeta y  $V_{sum}$  el volumen sumergido. La ecuación 3.1 se utiliza en el caso de la sumatoria de las fuerzas en el eje vertical de un cuerpo, por lo tanto, se llega a la conclusión de que la fuerza de flotación que actúa sobre el cuerpo es igual al peso del líquido desplazado por la porción del cuerpo que se encuentra sumergida, esta fórmula es determinante para saber si un objeto flota o se hunde. En el diseño de un VAAS es necesario verificar la flotabilidad de este. De acuerdo con la Figura 3.1 se sabe que:

- 1- Un cuerpo permanece en reposo en cualquier punto en el fluido, cuando su densidad es igual a la densidad del fluido.
- 2- Se hunde hasta el fondo, cuando su densidad es mayor que la del fluido
- 3- Ascende hasta la superficie del fluido y flota cuando la densidad del cuerpo es menor que la del fluido.

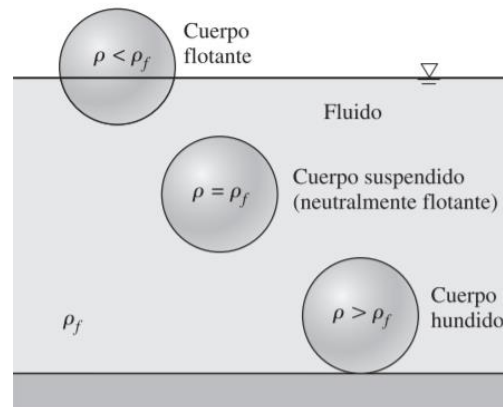


Figura 3.1 Flotación. (Cengel, et al., 2006)

### 3.4 Estabilidad

Se puede realizar la evaluación de la estabilidad de los cuerpos sumergidos y de los flotantes. Para un cuerpo sumergido o flotante en equilibrio estático, el peso y la fuerza de flotación que actúan sobre él se equilibran entre sí y, por lo tanto, esos cuerpos son estables en la dirección vertical. Si un cuerpo flotante se asciende o desciende mediante una fuerza vertical, el cuerpo regresará a su posición original tan pronto como se elimine el efecto externo (Cengel, et al., 2006). Por lo tanto, un cuerpo flotante posee estabilidad vertical.

En el caso de estabilidad rotacional para un cuerpo neutralmente flotante, si el cuerpo neutralmente flotante tiene fondo pesado y el centro de gravedad  $G$  está directamente abajo del centro de flotabilidad  $B$ , el cuerpo es estable, como se muestra en la Figura 3.2. La diferencia entre el centro de gravedad y el centro de flotabilidad es que el centro de gravedad es el punto en el cual se concentra el peso de un objeto (Young, Freedman, & Ford, 2009), mientras que el centro de flotabilidad es el punto en el cual actúa la fuerza de flotación (Cengel, et al., 2006).

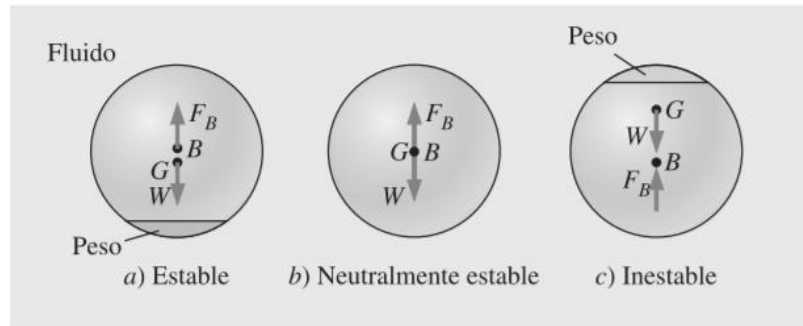


Figura 3.2 Estabilidad de cuerpos flotantes. (Cengel, et al., 2006)

A diferencia de un cuerpo sumergido, un cuerpo flotante inclusive puede ser estable cuando  $G$  está directamente arriba del  $B$ , como en el caso de los barcos, esto debido al centroide del volumen desplazado se mueve hacia uno de los lados hasta un punto  $B'$ , como se muestra en la Figura 3.4, durante una perturbación rotacional, mientras que el centro de gravedad  $G$ , del cuerpo permanece inalterado. Si el punto  $B'$  está suficientemente lejos, estas dos fuerzas crean un momento de restitución y regresan el cuerpo a la posición original, el momento de restitución trata de devolver el cuerpo a la posición de estabilidad, como se muestra en la Figura 3.3.

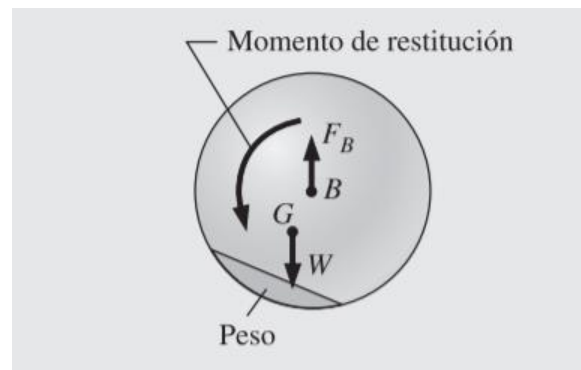


Figura 3.3 Momento de restitución en un cuerpo flotante. (Cengel, et al., 2006)

Una medida de la estabilidad para los cuerpos flotantes es la altura metacéntrica  $GM$ , mostrada en la Figura 3.4, la cual es la distancia entre el centro de gravedad  $G$ , y el metacentro  $M$ . El metacentro se define como el punto de intersección de las líneas de acción de la fuerza de flotación que pasa por el cuerpo antes y después de la rotación. El ángulo de escora se define como el ángulo de inclinación de un buque.

El metacentro se considera como un punto fijo para la mayor parte de las formas de los cascos comerciales, para ángulos pequeños de escora, hasta de más o menos  $20^\circ$ , debido a que la posición

de este se toma en cuenta previamente en el diseño del casco (Food and Agriculture organization of the United Nations, 2009). Un cuerpo flotante se considera estable si el punto M se encuentra arriba del G y, por consiguiente, GM es positiva e inestable si el punto M está debajo del G y, en consecuencia, GM es negativa.

En el último caso, el peso y la fuerza de flotación que actúan sobre el cuerpo inclinado generan un momento de volcadura, en lugar de uno de restitución, haciendo que el cuerpo se vuelque. La longitud de la altura metacéntrica GM por encima de G es una medida de la estabilidad: entre mayor sea, más estable es el cuerpo flotante (Cengel, et al., 2006).

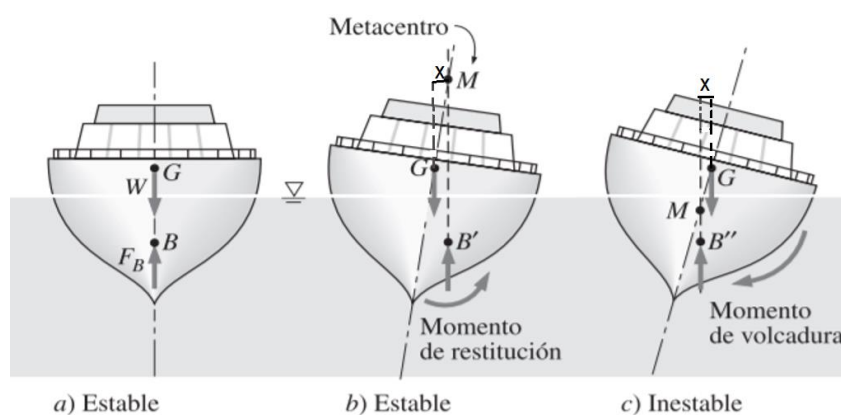


Figura 3.4 Metacentro y momento de volcadura. (Cengel, et al., 2006)

Tanto en el caso b y en el caso c mostrados en la Figura 3.4 el momento de restitución y el momento de volcadura se miden desde el punto M, tomando como fuerza de restitución o volcadura el centro de gravedad del barco de la siguiente forma:

$$\text{Momento de restitución o de volcadura} = G \cdot x \quad (3.2)$$

Donde para el caso b mostrado en la Figura 3.4, G es negativa y el resultado de la ecuación es positivo y para el caso c G es negativa y el resultado de la ecuación negativa.

### 3.5 Fuerza de arrastre

Cuando un objeto se mueve a través de un fluido, dicho fluido debido a su viscosidad presenta una resistencia, a dicha fuerza que el fluido ejerce en dirección del flujo se le conoce como fuerza

de arrastre. Usualmente, al igual que la fricción, en algunos casos es deseado eliminar el arrastre y así incrementar la velocidad del cuerpo que se mueve a través del fluido. La fuerza de arrastre depende de la densidad del fluido, del área proyectada por el cuerpo en movimiento, del coeficiente de arrastre y de la velocidad del cuerpo. Según Cengel, et al. (2006) la fuerza de arrastre está dada por la siguiente ecuación:

$$F_d = \frac{1}{2} * \rho_f * v^2 * A_t * C_d \quad (3.3)$$

Donde  $F_d$ , es la fuerza de arrastre,  $A_t$  es el área transversal del cuerpo que se mueve a través del fluido,  $v$  es la velocidad a la que se mueve el cuerpo y  $C_d$  es el coeficiente de arrastre, el cual es una función del número de Reynolds. A valores bajos de  $Re$ , los  $C_d$  con frecuencia se estabilizan para  $Re$  mayores de cierto valor, esta ecuación es necesaria para calcular la velocidad del VAAS, el cual se mueve entre 2 fluidos: agua y aire. De acuerdo con Cengel, et al. (2006), el número de Reynolds para un barco se calcula con la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{\rho_f * v * L_s}{\mu} \quad (3.4)$$

Donde  $L_s$  es la longitud que se encuentra en contacto con el fluido mientras el barco se encuentra en movimiento y  $\mu$  la viscosidad dinámica del fluido. La relación entre el número de Reynolds y el coeficiente de arrastre según Hussein (s.f.) para un fluido en transición, es decir con perturbaciones, es la siguiente:

$$C_d = \frac{24}{Re} + \frac{3}{Re^{0.5}} + 0.34 \quad (3.5)$$

Como se puede observar en la ecuación 3.4, para valores de  $Re < 1$  el primer término domina y para valores grandes del número de Reynolds (mayor a 4000)  $C_d$  se mantiene constante en 3.4.

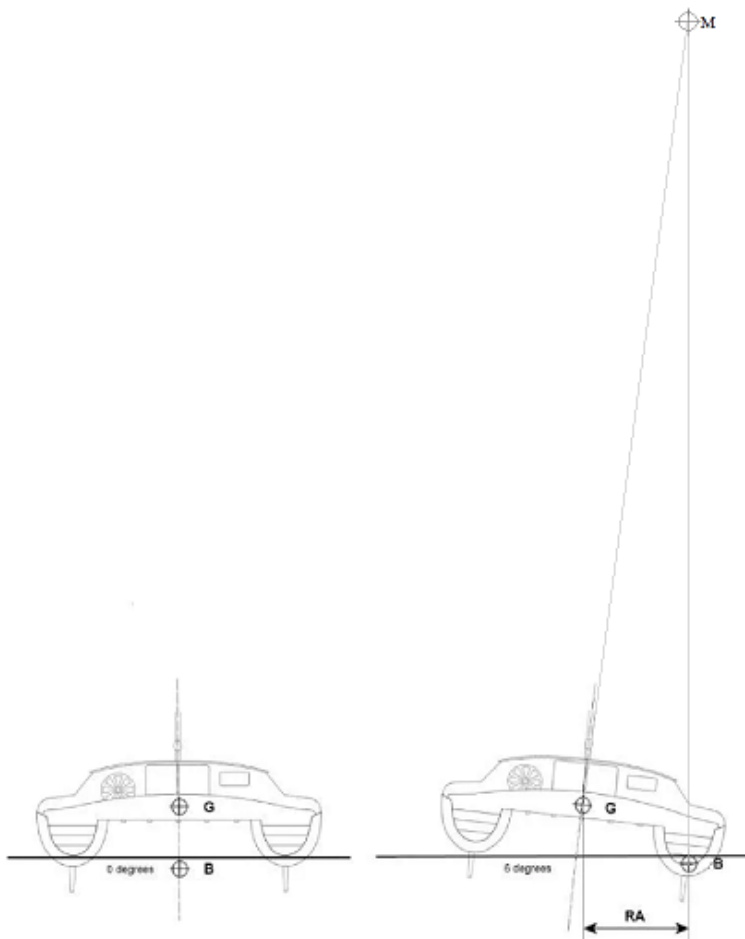
## 3.6 Tipos de embarcaciones

### 3.6.1 Catamarán

Un catamarán es una embarcación multicasco con dos cascos paralelos de igual tamaño. Se caracteriza por ser de las más ligeras y tener una fricción menor con la superficie marina, por lo



que alcanza mayores velocidades. Asimismo, tienen una mayor estabilidad transversal en aguas con poco oleaje, aunque esta es menor cuando se presentan olas en el agua que en una embarcación monocasco convencional (Busto, 2008). Los catamaranes, en relación con un barco monocasco suelen tener más capacidad de carga ya que esta se encuentra situada entre los 2 cascos del catamarán. En la Figura 3.5, se puede observar la estabilidad del Catamarán ante una perturbación y el ángulo de escora.



*Figura 3.5* Catamarán y estabilidad. (Tarjan, 2017)

### 3.6.2 Mono casco

Como su nombre lo dice este tipo de embarcación cuenta con un solo casco, es decir, su estructura está conformada por una sola pieza. Tienen mayor resistencia hidrodinámica debido a su construcción, ya que su casco suele ser ancho. Generalmente el centro de gravedad se encuentra

cerca del centro de flotación y tienen menor estabilidad ante balanceo respecto a las embarcaciones multi casco debido a que cuando se presenta una perturbación y el barco se balancea su altura metacéntrica es menor que en un barco multi casco, como se aprecia en la Figura 3.5 si se compara la distancia GM con la de la Figura 3.6.

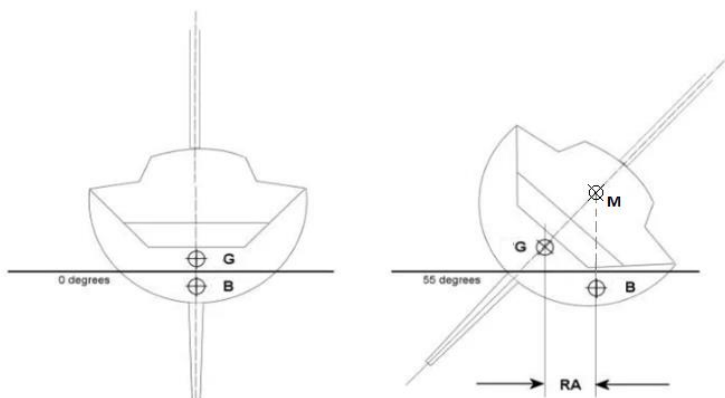


Figura 3.6 Monocasco y su estabilidad. (Tarjan, 2017)

## 3.7 Tipos de casco

El casco en náutica es la armazón o estructura externa de un bote cuya parte inferior se encuentra en contacto con el agua. La línea donde el casco se encuentra con la superficie del agua se llama línea de flotación. La forma del casco depende del diseño y su aplicación, y en algunos casos cuentan con añadidos extra como rompehielos.

### 3.7.1 Casco de Desplazamiento

Los barcos con cascos de desplazamiento, como el mostrado en la Figura 3.7, se mueven a través del agua empujando el agua a un lado debido a la curvatura en su diseño y están diseñados para cortar el agua con muy poca propulsión debido a la curvatura en la parte delantera del barco la cual proporciona un arrastre mínimo.

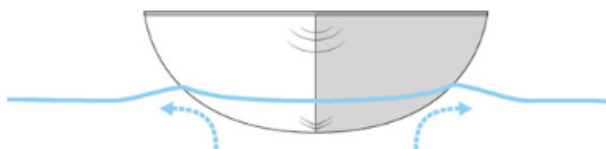


Figura 3.7 Casco de desplazamiento. (BOATsmart, 2017)

### 3.7.2 Casco de planeo

En la Figura 3.8 se muestra un casco de planeo. Los cascos de planeo están diseñados para elevarse y deslizarse sobre el agua cuando se suministra suficiente energía gracias a que cuenta con realces longitudinales llamados redanes. Estos redanes no aumentan la superficie de contacto con el agua, sino que la disminuyen al levantar la parte delantera del barco, lo cual disminuye el arrastre debido al contacto entre la parte frontal del barco y el agua; lo que permite al barco alcanzar mayores velocidades (Masmarr, s.f.). Estos botes pueden operar como cascos de desplazamiento cuando están en reposo o a velocidades lentas, pero escalan hacia la superficie del agua a medida que se mueven más rápido, como se muestra en la Figura 3.9, la desventaja de este tipo de casco es que son los menos estables en el mar.

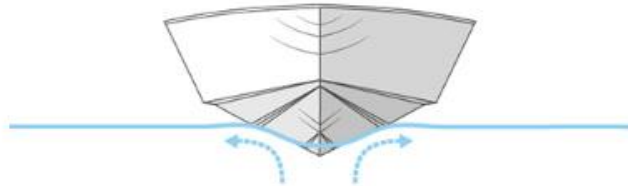


Figura 3.8 Casco de planeo. (BOATsmart, 2017)



Figura 3.9 Elevación en un casco de planeo. (Nautica y Deportes Tenerife, 2014)

## 3.8 Accionamiento diferencial

Existe una amplia literatura sobre la cinemática y la dinámica de los vehículos autónomos. Dados los problemas asociados con los sistemas de contacto con el suelo (o agua), tales modelos

generalmente se implementan dentro de un marco probabilístico que proporciona un movimiento esperado dada una entrada de control y alguna medida de la varianza en esta estimación (Codd-Downey, 2017). Los robots terrestres suelen utilizar *encoders* en las ruedas para brindar información sobre la posición de las ruedas. Dichos sensores proporcionan una estimación precisa de la rotación de la rueda, pero el modelo resultante del movimiento del vehículo está sujeto a errores debido al giro de la rueda causado por una pérdida de tracción. Dado el error en dichos modelos la tarea de mapear el entorno circundante se convierte en un problema de la estimación independiente de la posición de cada punto de referencia (Dudek y Jenkin, 2010).

Un mecanismo de accionamiento común utilizado por los robots móviles terrestres es un accionamiento diferencial que consta de dos motores controlados independientemente montados en el mismo eje, utilizan estos motores para girar las ruedas que mantienen la fricción con el suelo permitiendo que el robot se conduzca a lo largo de un arco curvo (Codd-Downey, 2017). La Figura 3.10 muestra todas las variables involucradas en un sistema de accionamiento diferencial. Las entradas a este sistema son las Velocidades de los motores izquierdo y derecho, al variar estas velocidades, la velocidad de rotación y la velocidad del robot puede ser manipuladas matemáticamente.

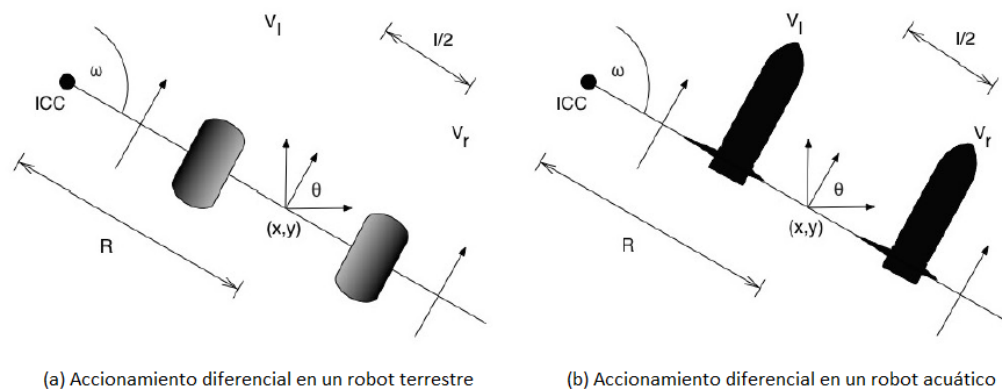


Figura 3.10 Variables involucradas en el accionamiento diferencial. (Codd-Downey, 2017)

El movimiento de un vehículo terrestre se puede describir en términos de su ICC. El ICC es el centro instantáneo de rotación, el cual representa el punto en el que se encuentra actualmente el

robot girando alrededor y  $\omega$  representa la tasa de rotación alrededor del ICC. Suponiendo que las ruedas permanezcan en contacto con el suelo, según Codd-Downey (2017) se tiene lo siguiente:

$$V_r = \omega(R + l/2) \quad (3.6)$$

$$V_l = \omega(R - l/2) \quad (3.7)$$

Dónde  $l$  es la distancia de separación entre cada turbina. De la ecuación 3.6, se obtienen las siguientes ecuaciones para la velocidad angular  $\omega$  y el radio de giro  $R$ :

$$\omega = \frac{V_r - V_l}{l} \quad (3.8)$$

$$R = \frac{lV_l - V_r}{2V_r - lV_l} \quad (3.9)$$

Dadas las ecuaciones 3.8 y 3.9, se cumple con lo siguiente:

- Cuando  $V_r = V_l$ : el vehículo se mueve en línea recta
- Cuando  $V_r = -V_l$ : El punto de rotación del vehículo se encuentra en un punto intermedio en la distancia entre los 2 motores.
- Cuando  $V_r = 0$  o  $V_l = 0$ : El centro instantáneo de rotación se localiza en la posición del motor opuesto.

### 3.8.1 Accionamiento diferencial en ambientes acuáticos

En el caso de un VAAS, como se muestra en la Figura 3.11, la velocidad se ve afectada por la fuerza de arrastre tanto del aire como del agua, a pesar de eso el modelo del mecanismo de accionamiento diferencial puede aproximarse al de un vehículo terrestre, tomando en cuenta que la distancia de frenado de un VAAS se verá afectada por el arrastre debido a los componentes de que se encuentran en contacto con el agua y los que se encuentran en contacto con el aire (Codd-Downey, 2017).

Utilizar un mecanismo de accionamiento diferencial en un VAAS brinda la facilidad de que el giro se produce al apagar un motor y poner el otro en funcionamiento. Para realizar una aproximación, en el caso de un análisis de fuerza de arrastre en un VAAS se considera el área transversal sumergida de los cascos, sensores y cajas de componentes situadas en el VAAS.

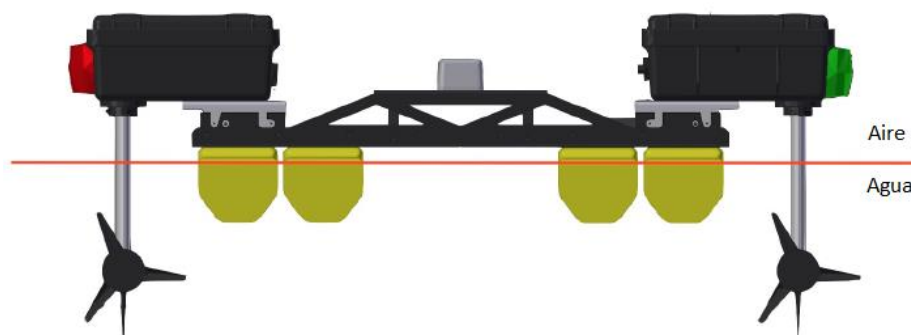


Figura 3.11 Línea de separación entre el agua y aire en un VAAS. (Codd-Downey, 2017)

### 3.9 Viga doblemente empotrada

Los ejes fijos y los rotatorios, las palancas, las ménsulas y las ruedas, así como muchos otros elementos, comúnmente se deben considerar como vigas para el diseño y análisis de estructuras y sistemas mecánicos.

Un elemento estructural diseñado para soportar cargas que sean aplicadas en varios puntos a lo largo del elemento se conoce como viga. En la mayoría de los casos, las cargas son perpendiculares al eje de la viga y únicamente ocasionarán corte y flexión sobre esta (Budynas & Nisbett, 2011). Cuando las cargas no formen ángulo recto con la viga, también producirán fuerzas axiales en ella.

Una viga puede verse sometida a varias cargas concentradas en distintos puntos a lo largo de su longitud, cuando las vigas restringen movimiento se le conocen como vigas doblemente empotradas, en la Figura 3.12 se muestra una viga doblemente empotrada y las reacciones que se presentan en los apoyos cuando se someten a una carga intermedia.

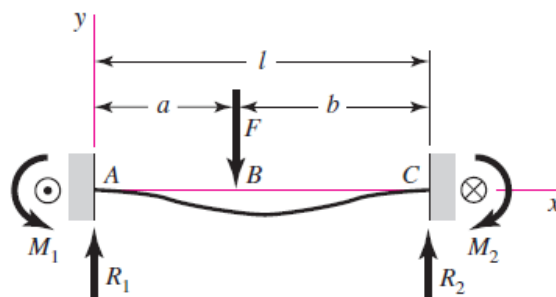


Figura 3.12 Viga doblemente empotrada con carga intermedia. (Budynas & Nisbett, 2011)

En el caso de las vigas doblemente empotradas, cuando están sometidas a una carga intermedia, según Budynas & Nisbett (2011) el cálculo de sus reacciones se puede realizar con las siguientes ecuaciones:

$$R_1 = \frac{Fb^2}{l^3}(3a + b) \quad (3.10)$$

$$R_2 = \frac{Fa^2}{l^3}(3b + a) \quad (3.11)$$

$$M_1 = \frac{Fab^2}{l^2} \quad (3.12)$$

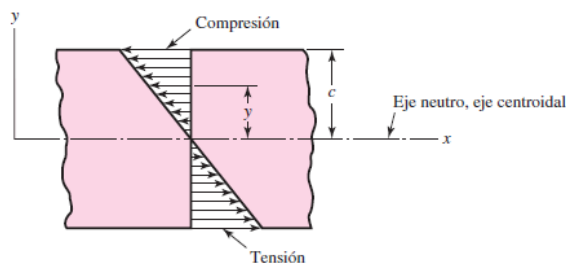
$$M_2 = \frac{Fba^2}{l^2} \quad (3.13)$$

A partir de las ecuaciones anteriores, se obtienen las reacciones de fuerza  $R_1$  y  $R_2$  y los momentos  $M_1$  y  $M_2$ . En caso de que la viga empotrada esté sometida a más de una carga puntual, el cálculo de las reacciones debe realizarse por superposición de fuerzas. Para el presente documento, en el capítulo 5 se realizó el cálculo de los esfuerzos en las piezas críticas del VAAS, en dónde para las reacciones mostradas en la Figura 4.23 fue necesario utilizar superposición de fuerzas debido a la condición de carga del elemento.

## 3.10 Esfuerzo en vigas

### 3.10.1 Esfuerzo normal

En el caso de una viga, el esfuerzo normal se ve causado debido a la flexión causada por un momento flector. Como se aprecia en la Figura 3.13 los esfuerzos varían dependiendo de la distancia y del eje neutro, donde el momento máximo estaría dado en el punto c de la viga.



*Figura 3.13* Distribución de esfuerzo normal en una viga, vista lateral. (Budynas & Nisbett, 2011)

Para vigas sometidas a flexión, según Budynas & Nisbett (2011) el esfuerzo máximo está dado por la siguiente fórmula:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}K_t}{Z} \quad (3.14)$$

De la ecuación 3.14,  $M_{max}$  es el momento flector máximo,  $Z$  el módulo de sección y  $K_t$  el factor del concentrador de esfuerzo, donde este es igual a 1 si el elemento no presenta alguna discontinuidad. Generalmente el módulo de sección  $Z$  se define como  $\frac{I}{c}$ , donde  $I$  es el momento de inercia de la sección transversal del elemento y  $c$  la distancia desde el centro hasta el punto máximo de la sección transversal. Cuando el elemento sometido momento flector es redondo, hueco y contiene discontinuidades como agujeros pasantes, como en el caso mostrado en la Figura 3.14, el esfuerzo se ve aumentado en dicha sección de la viga.

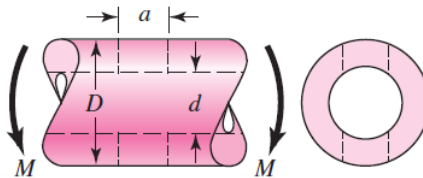


Figura 3.14 Barra circular hueca con agujero pasante.

Para estos casos aplica el factor multiplicativo  $K_t$  de concentración de esfuerzo, y el módulo de sección  $Z$  se calcula de forma diferente. Según Budynas & Nisbett (2011), para una viga redonda  $Z$  se calcula con la siguiente ecuación:

$$Z = \frac{\pi A}{32D} (D^4 - d^4) \quad (3.15)$$

En la ecuación 3.15, los factores  $A$  y  $K_t$  y deben calcularse de acuerdo a las relaciones dimensionales  $d/D$  y  $a/D$  presentes en la viga, los valores se muestran en la Figura 3.15.



a/D	d/D					
	0.9		0.6		0	
	A	K <sub>t</sub>	A	K <sub>t</sub>	A	K <sub>t</sub>
0.050	0.92	2.63	0.91	2.55	0.88	2.42
0.075	0.89	2.55	0.88	2.43	0.86	2.35
0.10	0.86	2.49	0.85	2.36	0.83	2.27
0.125	0.82	2.41	0.82	2.32	0.80	2.20
0.15	0.79	2.39	0.79	2.29	0.76	2.15
0.175	0.76	2.38	0.75	2.26	0.72	2.10
0.20	0.73	2.39	0.72	2.23	0.68	2.07
0.225	0.69	2.40	0.68	2.21	0.65	2.04
0.25	0.67	2.42	0.64	2.18	0.61	2.00
0.275	0.66	2.48	0.61	2.16	0.58	1.97
0.30	0.64	2.52	0.58	2.14	0.54	1.94

*Figura 3.15* Valores del factor A y K<sub>t</sub> para una viga redonda hueca con un agujero transversal.  
(Budynas & Nisbett,2011)

En caso de que la viga sea sometida a esfuerzo producido por carga transversal, según Budynas & Nisbett (2011), el esfuerzo normal se calcula con la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{F}{A_t} \quad (3.16)$$

Donde F es la fuerza ejercida y A<sub>t</sub> es el área transversal del elemento. Entre las uniones no permanentes se encuentran los pernos, cuando estos soportan carga axial se ven sometidos a un esfuerzo normal (Beer, et al. ,2010). Generalmente, para pernos de acero se utiliza una carga de prueba, aunque también es aceptable utilizar la ecuación 3.16, la cual en el apéndice A5 se utilizó para comprobar la resistencia de los pernos.

### 3.10.2 Esfuerzo cortante

Cualquier vector momento que sea colineal con un eje de un elemento mecánico se llama vector de par de torsión, porque el momento causa que el elemento se tuerza respecto a ese eje. Cuando una barra se encuentra sometida a ese tipo de momento se dice que la barra está sometida a torsión (Beer, Johnston, Mazurek, Eisenberg,2010). A través de la sección transversal de la barra se desarrollan esfuerzos cortantes, como se aprecia en la Figura 3.16.

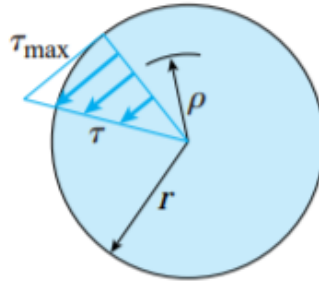


Figura 3.16 Esfuerzos cortantes en una barra. (Beer, Johnston, Mazurek, Eisenberg, 2010)

Dado que el esfuerzo cortante aumenta de acuerdo con la distancia del centro de la barra, según Beer, et al. (2010) el momento cortante máximo tiene la siguiente ecuación, donde  $T$  es el torque y  $K_{ts}$  el factor de concentración de esfuerzo, donde este es igual a 1 cuando no se presenta alguna discontinuidad en el elemento.

$$\tau_{max} = \frac{TK_{ts}}{J} \quad (3.17)$$

Cuando un elemento cilíndrico hueco sometido a torsión contiene discontinuidades como agujeros pasantes, como en el caso mostrado en la Figura 3.17, el esfuerzo se ve aumentado en la sección en la cual se encuentra el agujero pasante.

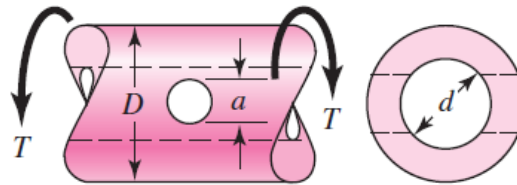


Figura 3.17 Barra circular hueca con agujero pasante.

Para estos casos si la viga está sometida a torsión aplica el factor  $K_{ts}$  de concentración de esfuerzo y el momento polar  $J$  cambia. Para una viga redonda hueca con un agujero transversal, según Budynas & Nisbett (2011), el momento polar  $J$  se calcula con la siguiente ecuación:

$$J = \frac{\pi A(D^4 - d^4)}{32} \quad (3.18)$$

En la ecuación 3.18,  $D$  es el diámetro externo del elemento y  $d$  el diámetro interno. Los factores  $A$  y  $K_{ts}$  deben calcularse de acuerdo con las relaciones dimensionales  $d/D$  y  $a/D$  presentes en la viga. Los valores de  $A$  y  $K_{ts}$  se obtienen de la Figura 3.18.

$a/D$	0.9		0.8		0.6		0.4		0	
	$A$	$K_{ts}$	$A$	$K_{ts}$	$A$	$K_{ts}$	$A$	$K_{ts}$	$A$	$K_{ts}$
0.05	0.96	1.78							0.95	1.77
0.075	0.95	1.82							0.93	1.71
0.10	0.94	1.76	0.93	1.74	0.92	1.72	0.92	1.70	0.92	1.68
0.125	0.91	1.76	0.91	1.74	0.90	1.70	0.90	1.67	0.89	1.64
0.15	0.90	1.77	0.89	1.75	0.87	1.69	0.87	1.65	0.87	1.62
0.175	0.89	1.81	0.88	1.76	0.87	1.69	0.86	1.64	0.85	1.60
0.20	0.88	1.96	0.86	1.79	0.85	1.70	0.84	1.63	0.83	1.58
0.25	0.87	2.00	0.82	1.86	0.81	1.72	0.80	1.63	0.79	1.54
0.30	0.80	2.18	0.78	1.97	0.77	1.76	0.75	1.63	0.74	1.51
0.35	0.77	2.41	0.75	2.09	0.72	1.81	0.69	1.63	0.68	1.47
0.40	0.72	2.67	0.71	2.25	0.68	1.89	0.64	1.63	0.63	1.44

Figura 3.18 Tabla para el cálculo de  $A$  y  $K_{ts}$  para una barra hueca con agujero transversal sometida a tensión. (Budynas & Nisbett, 2011)

### 3.11 Deflexión de elementos

Cuando las vigas se encuentran bajo una carga, como se muestra en la Figura 3.19 dicha carga produce deflexión. La deflexión en la viga depende del material, del tipo de viga y del momento flector en la viga.

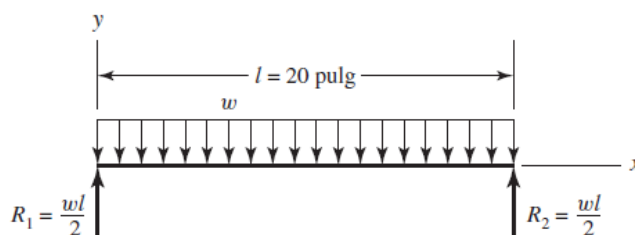


Figura 3.19 Vista lateral de una viga sometida a una carga.

En el caso de una viga doblemente empotrada sometida a una carga puntual como se aprecia en la Figura 3.12, en el caso del VAAS el cálculo de la deflexión para la plataforma para la caja y para el sensor se muestra en el Apéndice A5. Según Budynas & Nisbett (2011) la deflexión se calcula con la siguiente ecuación:

$$y_{ab} = \frac{Fb^2x^2}{6EI^3} [x(3a + b) - 3al] \quad (3.19)$$

## 3.12 Teoría de falla materiales

Cuando un elemento se ve sometido a una carga, eventos como el agrietamiento por el tiempo y la ruptura se encuentran entre las formas en las que un elemento falla. Desafortunadamente, no existe una teoría universal de falla para un caso general de las propiedades del material y el estado de esfuerzo. En su lugar, a través de los años se han formulado y probado varias hipótesis, las cuales han conducido a las prácticas aceptadas en la actualidad. Como han sido aceptadas, estas prácticas se caracterizarán como teorías tal como lo hace la mayoría de los diseñadores (Budynas&Nisbett,2011). Para efectos de diseño, se busca que el factor de seguridad sea siempre mayor a 1. Tener en cuenta las teorías de falla es necesario para comprobar si en el diseño del VAAS alguna pieza es propensa a fallar.

### 3.12.1 Teoría de energía de distorsión para materiales dúctiles

Entre las teorías de falla aceptadas se encuentra la teoría de energía de distorsión, esta teoría indica que cuando la energía de deformación total por unidad de volumen excede la energía de deformación por unidad de volumen correspondiente a la resistencia a la fluencia en compresión o tensión del material, esta falla. Para determinar esto, es necesario calcular el esfuerzo de Von Mises, según Budynas & Nisbett (2011) se calcula con la siguiente ecuación:

$$\sigma' = \left[ \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.20)$$

Dónde  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$  son esfuerzos triaxiales . Una vez calculado el esfuerzo de Von Mises, el factor de seguridad se calcula con la siguiente ecuación:

$$n = \frac{S_y}{\sigma'} \quad (3.21)$$

De la ecuación 3.21,  $S_y$  es el esfuerzo máximo a fluencia del elemento analizado. Dicho esfuerzo es obtenido de la tabla de características mecánicas del material utilizado.

### 3.12.2 Teoría de Morh-Coulomb Frágil

Para el caso de materiales frágiles, como el PVC, la falla se muestra en forma de fractura. Dichos materiales presentan mayor resistencia a compresión. De acuerdo con Budynas & Nisbett (2011) ecuaciones para el factor de seguridad para el caso de materiales frágiles usando la teoría de Morh-Coloumb son las siguientes:

- Caso 1  $\sigma_A > \sigma_B \geq 0$

$$n = \frac{S_{ut}}{\sigma_A} \quad (3.22)$$

- Caso 2  $\sigma_A > 0 \geq \sigma_B$

$$\frac{1}{n} = \frac{\sigma_A}{S_{ut}} - \frac{\sigma_b}{S_{uc}} \quad (3.23)$$

- Caso 3  $0 \geq \sigma_A > \sigma_B$

$$n = -\frac{S_{uc}}{\sigma_b} \quad (3.24)$$

De acuerdo con las ecuaciones anteriores, en el caso 1 el esfuerzo  $\sigma_A$  sea mayor al esfuerzo  $\sigma_b$  el factor de seguridad se calcula utilizando el esfuerzo máximo a tensión y el esfuerzo último a tensión  $S_{ut}$ . En el caso 2, dado que los esfuerzos tienen distinto signo, ambos se toman en cuenta para el cálculo del factor de seguridad debido a que se tienen las condiciones de esfuerzo a tensión en el caso de  $\sigma_A$  y compresión en el caso de  $\sigma_b$ . Por último, para el caso 3 ambos esfuerzos son negativos por lo que el material se encuentra en compresión, en este caso para el cálculo del factor de seguridad se utilizará el esfuerzo último a compresión  $S_{uc}$  y el esfuerzo máximo a compresión.

### 3.13 Turbina

Para poner el VAAS en movimiento, es necesario contar con turbinas que realicen este trabajo. Las turbinas tienen el propósito de convertir la energía mecánica dada por los motores para propulsar el VAAS. En el área de la robótica se suelen utilizar motores DC, con o sin escobillas (*BLDC*) (Gómez, 2015) A continuación se explican brevemente los distintos tipos.

#### 3.13.1 Motor DC

En el Motor DC el estator se encuentra estacionario en la sección externa del motor mientras, el rotor está dentro del motor con devanados conectados a un circuito que se encuentra fuera del motor a través de un conmutador mecánico. Al excitar por medio de una corriente el rotor, se genera una fuerza debido a la interacción de los campos magnéticos del rotor y el estator. El principio de funcionamiento de un motor DC se muestra en la Figura 3.20.

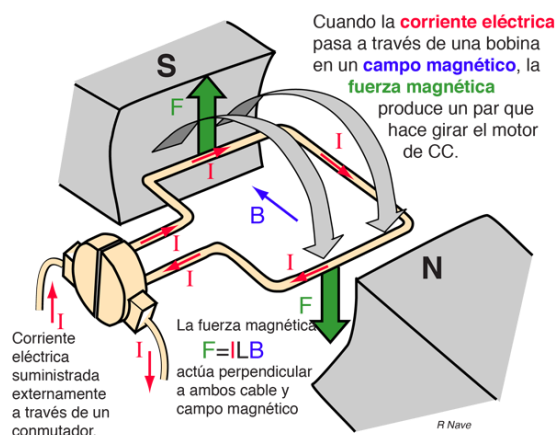


Figura 3.20 Principio de funcionamiento del motor DC. (de Sevilla, 2005)

#### 3.13.2 Motor DC sin escobillas

Este tipo de motor, al no contar con escobillas para realizar el cambio de polaridad en el rotor requiere menos cuidados. Su principal diferencia con el motor DC es que el estator posee los devanados mientras que el rotor es un imán permanente. Al no tener escobillas, no se producen rozamientos que generen desgaste ni ruido, y no es necesario un mantenimiento continuo (Keeping, 2013). En la Figura 3.21 se muestra el diagrama general de un motor DC sin escobillas.

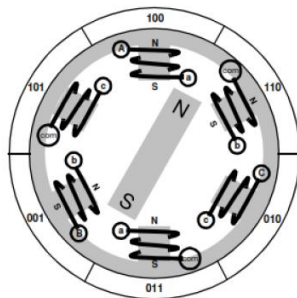


Figura 3.21 Diagrama general de un Motor DC sin escobillas. (Brown & Microchip Technology Inc, 2002)

### 3.14 PWM

La modulación por ancho de pulso es un tipo de señal de voltaje utilizada con el fin de enviar información. Este tipo de señales son de tipo cuadradas, como se muestra en la Figura 3.22, o sinusoidales, las cuales se utilizan cambiando el ancho relativo respecto al período de esta (National Instruments, 2014). Al resultado de dicho cambio se le conoce como ciclo de trabajo. Las aplicaciones típicas para este tipo de señales son: controlar intensidad de un LED, mover servomotores, controlar LED RGB, controlar velocidad de motores de corriente continua.

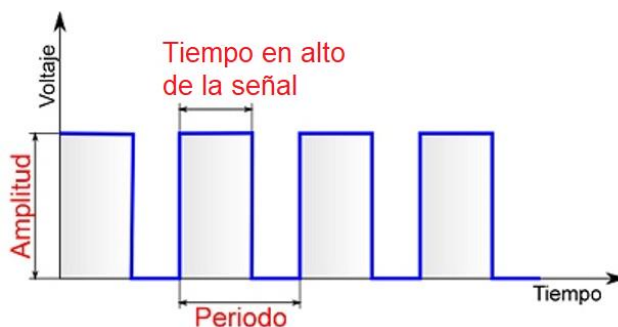


Figura 3.22 Modulación por ancho de pulso, señal cuadrada. (MecanicAPP, 2017)

### 3.15 Controlador electrónico de velocidad

Los controladores electrónicos de velocidad constan de un circuito electrónico que realiza el cambio de polarización de un motor y variar la velocidad. También cumplen la función de actuar como un freno dinámico (RC models Wiz, s.f.). Permite una variación de velocidad de mucho más

fluida y utilizar el motor en reversa. Estos controles son necesarios para utilizar cualquier motor DC sin escobillas de 3 fases.

### **3.16 Sistema de posicionamiento global (GPS)**

Para determinar la posición de cualquier objeto, se utiliza el GPS con una precisión de hasta centímetros, si se usa un GPS diferencial, aunque lo habitual son unos metros de precisión. El sistema fue desarrollado, instalado y empleado por el Departamento de Defensa de los EE. UU. (Gakstatter, 2015) Para determinar las posiciones en el globo, el sistema GPS se sirve de 2 a 4 satélites y utiliza la trilateración. Para el caso de posicionadores GPS existe el formato NMEA el cual consta de una cadena de caracteres que es leída por dichos sensores.

### **3.17 Sensores de profundidad**

Los VAAS suelen utilizar técnicas de medición de profundidad, principalmente para ubicar objetos bajo el agua y tener una noción de la distancia a la que se encuentra el fondo marino. Los sensores de profundidad son básicamente sensores ultrasónicos adaptados para ser utilizados en el agua (Andi, s.f.). El principio consiste en medir el tiempo que tarda en regresar una ráfaga de sonido dirigida hacia el agua después de haberse reflejado en un objeto. Este tiempo de vuelo da una medida de su distancia desde la fuente del sonido, ya que la velocidad del sonido que viaja en el agua es bastante constante.

### **3.18 Relé**

En la Figura 3.23 se muestra el diagrama básico de un relé. Un relé es un dispositivo electromagnético el cual funciona como un interruptor controlado por un circuito eléctrico el cual mediante una bobina y un electroimán se acciona el juego de uno o varios contactos los cuales permiten a la corriente pasar por el circuito. Cuando se aplica voltaje en la bobina el relé cambia la posición de sus contactos, dejando así pasar la corriente entre el contacto normalmente abierto y el com.



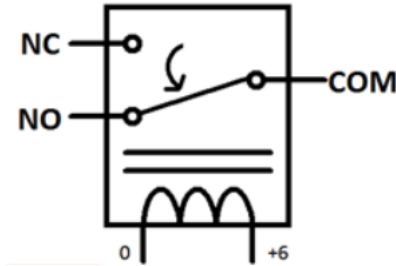


Figura 3.23 Diagrama básico de un relé. (Torres, 2017)

### 3.19 Convertidor DC-DC Buck

El convertidor DC-DC Buck tiene como función entregar un voltaje en la salida constante menor al voltaje de entrada, con una eficiencia mayor a la de un divisor de tensión común, un ejemplo de uso es cuando la fuente de poder de un sistema son baterías de 14 V y se distribuye mediante una tarjeta de distribución de potencia. Si algún elemento electrónico en el sistema requiere una menor alimentación, es conveniente conectar un convertidor DC-DC Buck entre la tarjeta de distribución de potencia y dicho elemento.

### 3.20 Tele operación

La capacidad de controlar un dispositivo desde lejos abre una gran variedad de aplicaciones para el dispositivo. Un sistema de tele operación consta generalmente del sistema controlado y el sistema de control utilizado por un operador (Nuño, 2008). Los dispositivos con control tele operacional han existido durante mucho tiempo, la integración de este control en la aplicación de robótica ha abierto la aplicación de la robótica en varios campos.

### 3.21 ROS

Entre las plataformas abiertas para crear software para robots se encuentra ROS, acrónimo en inglés de Sistema Operativo Robótico. Es un marco flexible para escribir aplicaciones para robótica, básicamente es una colección de herramientas, bibliotecas y convenciones que tienen como objetivo simplificar la tarea de crear un comportamiento robótico complejo y robusto en una amplia variedad de plataformas robóticas. Los conceptos fundamentales de la implementación de ROS son: nodos, mensajes, temas y servicios (Quigley, et al., 2009).

Los nodos son los procesos que realizan la computación, generalmente un sistema se compone de muchos nodos. Los nodos se comunican entre sí enviando mensajes, los cuales constan de estructuras de datos. Un nodo envía un mensaje publicándolo en un tema determinado, cada nodo puede enviar u obtener datos del otro nodo mediante el modelo de publicación / suscripción (Quigley, et al., 2009). El nodo que esté interesado en un cierto tipo de datos se suscribirá al tema apropiado, el nodo publicador será el encargado de enviar repetidamente un mensaje sobre un tema. En la Figura 3.24 se muestra un diagrama de comunicación entre los nodos de ROS.

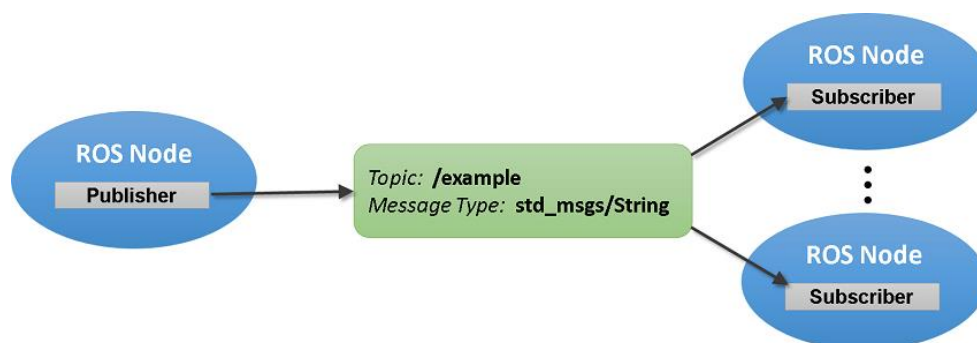


Figura 3.24 Ejemplo de comunicación entre los nodos de ROS. (MathWorks,2017)

Para apoyar el desarrollo colaborativo, el sistema de software ROS está organizado en paquetes. En ROS, paquete es simplemente un directorio que contiene nodos, librerías o bases de datos para aplicaciones. Por ejemplo, se encuentra el paquete *turtlesim* el cual es un simulador de una tortuga que sigue una trayectoria dependiendo de los parámetros iniciales que se brinden. En la Figura 3.25 se muestran los nodos del paquete, donde los mensajes son la velocidad (*velocity*), coordenada (*pose*) y en la Figura 3.26 se muestra el resultado de la interacción de dichos nodos.

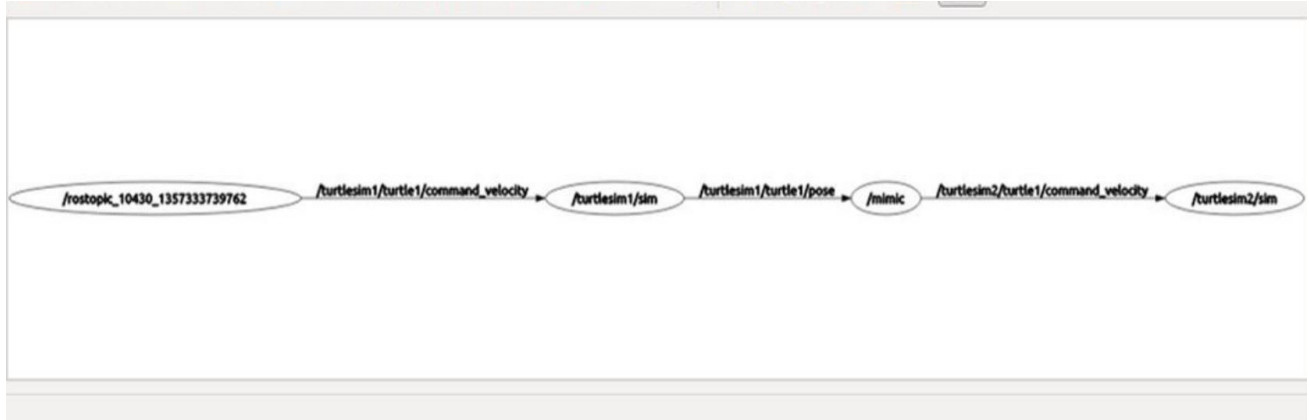


Figura 3.25 Comunicación de los nodos de ROS. (Open Source Robotics Foundation, 2007)

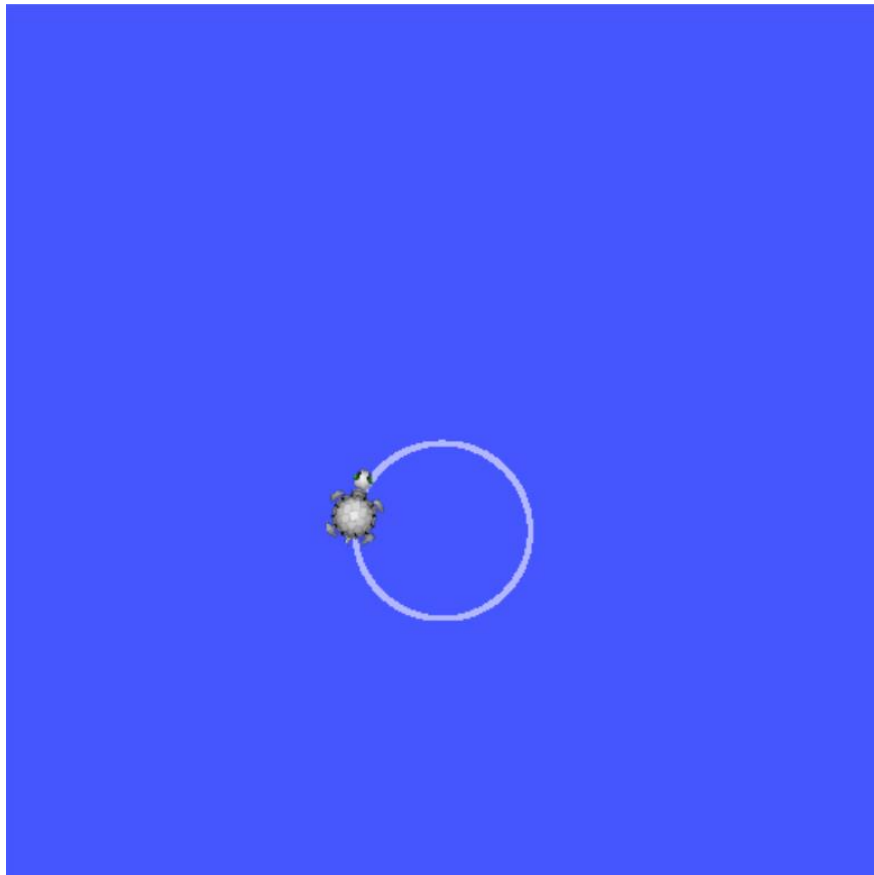


Figura 3.26 Simulador `turtlesim`. (Open Source Robotics Foundation, 2007)

## Capítulo 4 Diseño de la estructura

### 4.1 Introducción

Los VAAS han tomado más presencia en investigación marítima, se busca crear sistemas capaces de navegar por sí solos en rutas previamente dadas en aplicaciones para batimetría o comunicación. Los vehículos de superficie autónoma pueden ser tipo monocasco o catamarán. Este último diseño es el más usado.

### 4.2 Consideraciones de diseño

Se busca obtener el diseño de la estructura del chasis del VAAS y la selección del tipo de embarcación. Durante la selección del tipo de embarcación, primero se seleccionó entre un vehículo monocasco y un catamarán y se realizó una comparación sobre las ventajas de cada uno, una vez escogido el tipo de embarcación se procedió a realizar la escogencia del material de la estructura de soporte. En la Tabla 4.1 se muestra la comparación entre un catamarán y un monocasco. Para esto se consideró la estabilidad de cada uno respecto al balanceo como se mencionó en la sección 3.6.1 el catamarán cuenta con mayor distancia metacéntrica que un monocasco que cuente con el mismo largo, por lo que posee mayor estabilidad, en el caso de esta característica se utilizó un valor de 5 para indicar la menor estabilidad, 8 para estabilidad media y 10 para alta estabilidad.

Para el caso del área útil de transporte, se asignó un valor de 5 al monocasco debido a que en comparación con el catamarán cuenta con menor área útil (Martín Martínez, 2016), por lo tanto, al catamarán se le asignó un valor de 10 debido a que cuenta con mayor área útil.

Tabla 4.1 *Escogencia del tipo de embarcación.*

Tipo de casco	Estabilidad respecto al balanceo	Área útil para transporte de carga	Total
<i>Catamarán</i>	10	10	20
<i>Monocasco</i>	5	8	13

Fuente: Elaboración propia.

De la Tabla 4.1, se obtiene mayor puntaje para el catamarán, por lo que se utilizó este tipo de estructura. Debido a que en el mercado se encuentran disponibles cascos comerciales para la construcción de este tipo de vehículos, se decidió comprarlos en lugar de diseñarlos desde cero.

En cuanto al material para la estructura, se buscó uno cuya densidad asegurara la flotabilidad de la embarcación. Así mismo, se tomó en consideración la resistencia del material, ya que debe cargar con los sensores y componentes electrónicos, la estructura también contará con las conexiones hacia las turbinas, dichas conexiones deben ser lo suficientemente fuertes para soportar la fuerza generada por las turbinas, las cuales ejercen una fuerza de 50 lb cada una. Además, se realizó un diseño cuyo montaje y desmontaje sea simple para el usuario, con el fin de que sea fácil transportarlo. En la Tabla 4.2 se muestran las propiedades de los materiales disponibles para la estructura, dichas propiedades se obtuvieron de la comparación entre tubos de 2 in de diámetro y 6 ft de largo.

Tabla 4.2 *Densidad, Esfuerzo a fluencia y costo de los materiales.*

Material	Densidad	Esfuerzo a fluencia	Precio
Aluminio	0,097 lb/in <sup>3</sup>	34954,10 0 psi	\$50,52
Acero	0,284 lb/in <sup>3</sup>	46000 psi	\$230,60
Plástico PVC	0,050 lb/in <sup>3</sup>	6277 psi	\$20,40

Fuente: MacMaster-Carr Supply Company, 2012

Con base en la tabla 4.2, se escogió plástico PVC, debido a que es el material de menor costo, además, es el menos denso, lo cual asegura la flotabilidad. Se utilizó plástico grado marino HDPE para realizar la plataforma para el sensor de profundidad y la plataforma caja para componentes electrónicos. Respecto a los sensores y microcontroladores y actuadores, se utilizarán los siguientes, con base al criterio de selección del capítulo 5:

- Módulo GPS
- Cámara Omnidireccional
- Sensor magnético
- Sensor de profundidad
- Raspberry Pi

- Relé
- Convertidor Buck
- Arduino 1
- Turbinas T200
- Tarjeta de distribución de potencia

Se procedió a realizar la Tabla 4.3 con el fin de utilizar en valor final del peso en los cálculos de flotación y velocidad máxima del VAAS y el valor del peso de los componentes electrónicos y la caja de componentes para los cálculos de factor de seguridad en elementos críticos. La descripción de cada elemento se encuentra en el capítulo 5.

Tabla 4.3 *Componentes para conformar el catamarán.*

<b>Dispositivo</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Peso (kg)</b>
Raspberry Pi 3	1	0,042
Arduino UNO	1	0,025
Disipadores de Calor	2	0,236
<i>Blue Robotics</i> Turbina T200	2	0,70
Estructura PVC	1	7
Balsas	1	23,587
Modulo GPS Ublox EVK-6T-0-001	1	0,015
Cámara kodak pixpro sp360	1	0,130
Sensor de Temperatura y profundidad	1	3,5
Caja para componentes	1	2,57
Compás	1	0,010
ESC	2	0,033
Tarjeta de distribución de potencia	1	0,023
Baterías	2	1
Convertidor Buck	1	0,001

Total	19	39,023
Total elementos electrónicos y caja	-	4,093

---

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la Tabla 4.3, la masa de los elementos que cargará la estructura es de 39,023 kg. Para los cálculos de resistencia mecánica de la estructura se utilizó un factor de prevención de 1,5 aplicado a la masa del sensor de temperatura, obteniendo así una masa de 5,25 kg, dicho cálculo se encuentra en el apéndice A5, Figura A5.2.

Se utilizó un factor de prevención de 1,2 para la masa de los componentes electrónicos y la caja, con lo que se obtuvo una masa de 4,902 kg. Se decidió usar las unidades del sistema inglés para los cálculos de diseño de la estructura, por lo que se utilizará un factor de conversión de kg a libras de  $1 \text{ kg} = 2,20462 \text{ lb}$  y  $0,0254 \text{ m} = 1 \text{ in}$  (Budynas & Nisbet, 2011). Para los cálculos de arrastre y flotabilidad se utilizarán unidades del sistema internacional. Una vez definido el material para el barco, se procede a realizar el diseño de la estructura del VAAS utilizando el software SolidWorks ® 2018.

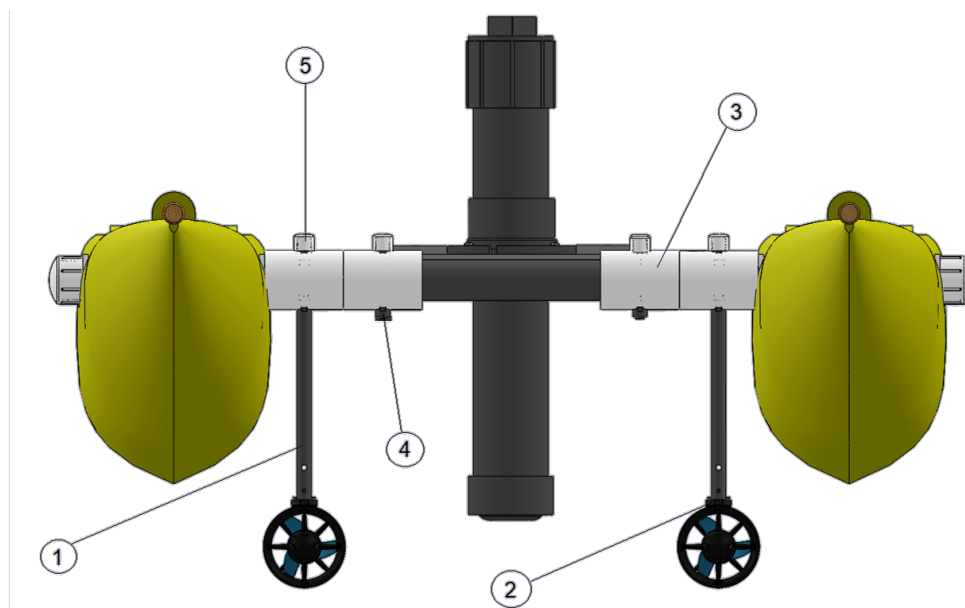
### 4.3 Estructura del vehículo autónomo

A continuación, se muestran los elementos diseñados y escogidos para el chasis del VAAS, además se brinda una descripción de cada elemento y se menciona su función dentro del diseño. En la Figura 4.1 se muestra la vista trasera del diseño propuesto para el VAAS, en la cual se señalan los siguientes elementos de la estructura:

1. Conexión al motor
2. Unión de las turbinas a la estructura
3. Unión tipo T
4. Tubo pasante
5. Tapa de retención 2

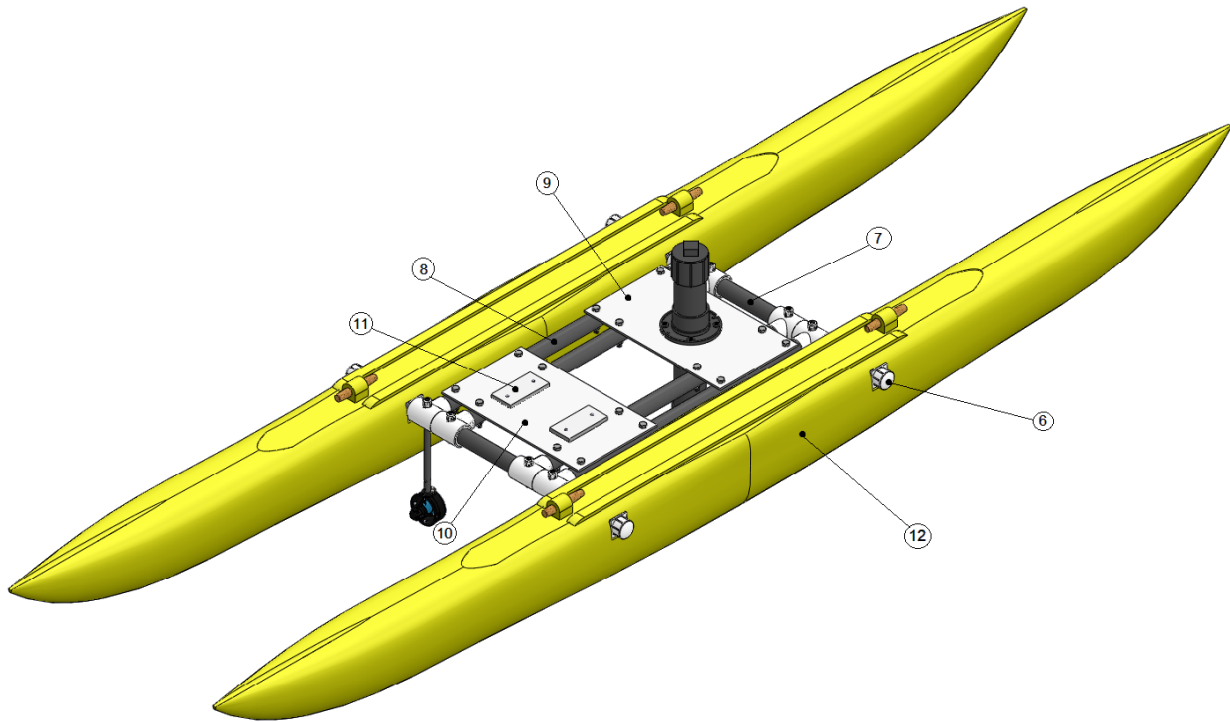
En la Figura 4.2 se muestra la vista isométrica del diseño propuesto para el VAAS, además se señalan los siguientes elementos que conforman la estructura:

6. Tapa de retención 1
7. Tubo estructural
8. Tubo estructural 2
9. Plataforma para sensor de profundidad
10. Plataforma para la caja de componentes
11. Sujetadores para la caja de componentes
12. Balsas Expandacraft



*Figura 4.1* Vista trasera del VAAS. Elaboración propia.





*Figura 4.2* Vista isométrica VAAS. Elaboración propia.

### 4.3.2 Conexión al motor

En la Figura 4.3 se muestra la conexión al motor, se decidió utilizar tubos PVC con un diámetro exterior de 0,680 in y un diámetro interior de 0,423 in, esto debido a que es necesario que el diámetro interior del tubo sea mayor que el diámetro del cable de la turbina, el cual es de 0,25 in. Se realizó un agujero en el tubo con el fin de que la conexión eléctrica del motor se encuentre dentro del tubo, además, se le agregó un pin de soporte para que encaje en la estructura. El largo del tubo considera que la turbina se encuentre totalmente bajo el agua. Para las dimensiones de esta pieza, revisar el apéndice A3, Figura A3.8. Dado que esta pieza es crítica debido a que se ve sometida a la fuerza que ejerce la turbina, el cálculo para el factor de seguridad de dicha pieza se encuentra en la sección 4.4.13.

La parte 1 de la conexión se encuentra roscada con el fin de roscar una tapa de soporte como la mostrada en la Figura 4.19, el pin en la parte 2 debe encajar en la conexión tipo T mostrada en la Figura 4.8, esto con el fin de que cuando se realice el ensamble las turbinas no presenten alguna desviación respecto a la parte frontal del VAAS. En la parte 3 se utilizará pegamento para plástico

para unir la conexión al motor con la pieza de unión de las turbinas a la estructura, como se muestra en la Figura 4.4.



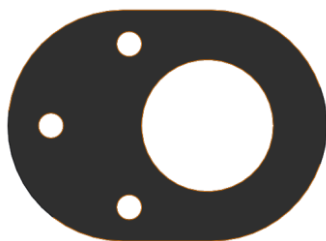
*Figura 4.3* Conexión del motor. Elaboración propia.



*Figura 4.4* Unión entre la pieza de conexión al motor. Elaboración propia.

### 4.3.2 Unión de las turbinas a la estructura

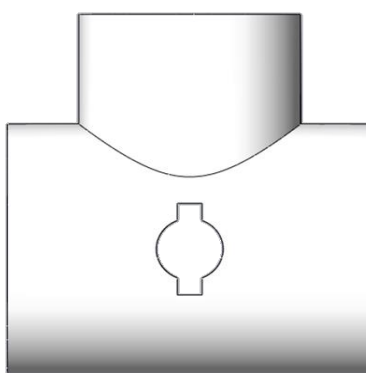
Dado que las turbinas no cuentan con algún tipo de unión a la estructura, se diseñó una unión la cual será ensamblada con tornillos a la parte superior de la turbina, dicha unión se puede observar en la Figura 4.5. Se contaba con disponibilidad de Nylon grado 6 en el laboratorio, por lo que se decidió usar ese material. Según Emco Industrial Plastics, s.f. el esfuerzo último a tensión para el Nylon es de 16000psi y el esfuerzo último a compresión es de 15000psi La posición de dicha unión se puede observar en la Figura 4.4. Para ver las dimensiones de este elemento, revisar el apéndice A3, Figura A3.1., además los cálculos para factor de seguridad para dicho elemento se encuentran en la Figura A5.4 en el apéndice A5.



*Figura 4.5* Unión de las turbinas a la estructura. Elaboración propia.

### **4.3.3 Uniones tipo T y tubos pasantes**

Se utilizaron 8 conexiones tipo T de PVC , la cual se muestra en la Figura 4.6 para unir a los tubos estructurales que unen las balsas y los que sostienen las plataformas. A las conexiones tipo T se les realizó un agujero con el fin de que la unión al motor y los tubos pasantes como el mostrado en la Figura 4.7 las mantengan en su lugar. Las dimensiones para la conexión tipo T se encuentran en la Figura A3.5, en el apéndice 3 y las dimensiones para el tubo pasante se encuentran en el apéndice 3, en la Figura A3.4.



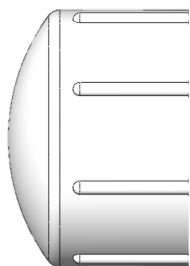
*Figura 4.6* Conexión tipo T. Elaboración propia.



*Figura 4.7* Tubo pasantes. Elaboración propia.

#### **4.3.4 Tapas de retención**

Se seleccionaron 4 tapas de retención roscadas las cuales cumplen con la función de mantener la estructura de PVC unida a las balsas, como es el caso de la tapa mostrada en la Figura 4.8. En el caso de la tapa con rosca mostrada en la Figura 4.9, se seleccionaron 8 de estas con el fin de mantener la conexión al motor y los tubos pasantes unidos a la estructura. La selección de estas tapas se realizó de acuerdo al diámetro de los tubos PVC para los tubos estructurales y la conexión al motor.



*Figura 4.8* Tapa de retención 1. Elaboración propia.



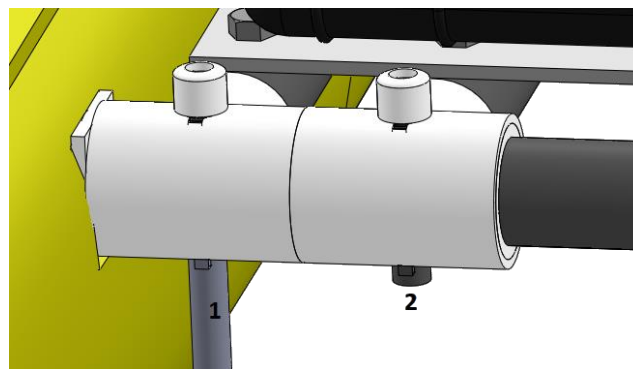
*Figura 4.9* Tapa de retención 2. Elaboración propia.

### 4.3.5 Tubos de la estructura

Dado que es un catamarán, el cual es un vehículo multicasco, se necesita mantener unidas ambas balsas, para esta tarea se utilizaron 2 tubos PVC de un diámetro de 1,90in, como el que se muestra en la Figura 4.10. Dicho diámetro se escogió debido a que es el diámetro presente en los agujeros en las balsas Expandacraft para su ensamble. Los elementos como la conexión al motor, y los tubos pasantes deben encajar en los agujeros del tubo estructural y sostener las piezas tipo T en su lugar como se muestra en la Figura 4.11. El elemento mostrado en la Figura 4.10 es crítico debido a que se encuentra sometido a mayor cantidad de cargas y a cargas combinadas, el cálculo del factor de seguridad para dicho elemento se encuentra en la sección 4.4.13.



*Figura 4.10* Tubo estructural. Elaboración propia.



*Figura 4.11* Ensamble de los tubos pasantes (2) y la conexión al motor (1) en el tubo estructural. Elaboración propia.

Adicionalmente, se utilizaron 4 tubos PVC de un diámetro de 1,90in con el fin de soportar la plataforma. Ambos extremos del tubo se encuentran conectados a uniones tipo T, los agujeros presentes en el modelo de la Figura 4.12 son para los tornillos destinados a mantener las plataformas para el sensor de temperatura y la caja de componentes en su lugar, dichos tornillos poseen un diámetro de 0,5 in, son de cabeza hexagonal y el material es nylon. Para las dimensiones

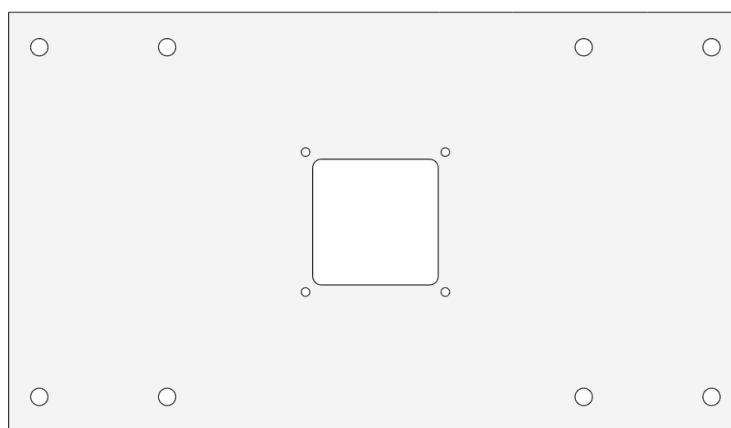
de los modelos mostrados en las Figuras 4.10 y 4.12, revisar las Figuras A3.6 y A3.7 del apéndice A3.



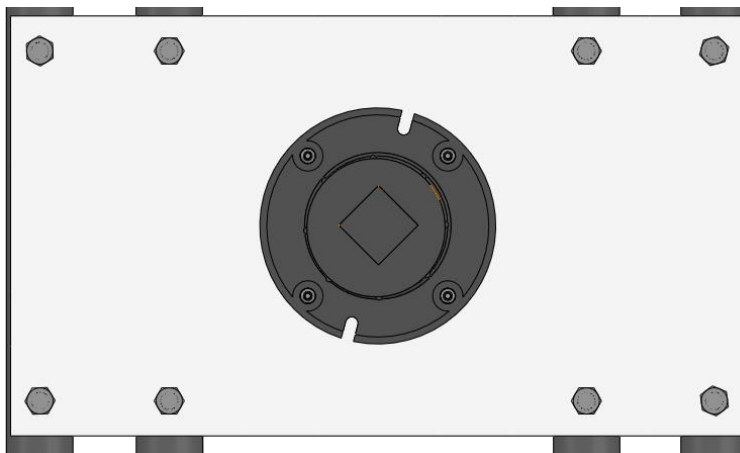
*Figura 4.12* Tubo estructural 2 . Elaboración propia.

### 4.3.6 Plataforma para el sensor de profundidad

Con el fin de posicionar el sensor de profundidad, se diseñó una plataforma, la cual se muestra en la Figura 4.13. El material escogido para la plataforma es Plástico HDPE de grado Marino, el cual está hecho para usarse en cualquier medio ambiente, como sol, lluvia, agua salada, humedad excesiva o continua (Emco Industrial Plastics, Inc, s.f.). Dicho material cuenta con un esfuerzo a fluencia de 4400 psi, un esfuerzo a compresión de 1500 psi y un esfuerzo a tensión de 4000 psi (Alro Plastics, s.f.). En la Figura 4.13, los agujeros de mayor diámetro se realizaron con el fin de colocar los tornillos de nylon y así unir la plataforma a los tubos estructurales 2, los agujeros de menor diámetro se realizaron con el fin de colocar tornillos de metal para sostener el sensor de temperatura en su posición , revisar el apéndice A3, Figura A3.3 para las dimensiones del modelo. El ensamble entre los tubos estructurales 2 y la plataforma para el sensor de profundidad se muestra en la Figura 4.14.



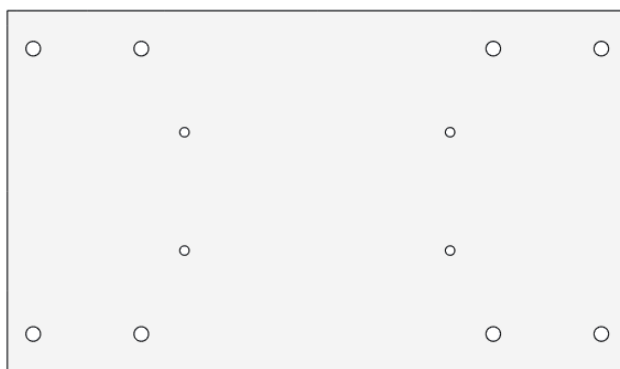
*Figura 4.13* Plataforma para el sensor de profundidad. Elaboración propia.



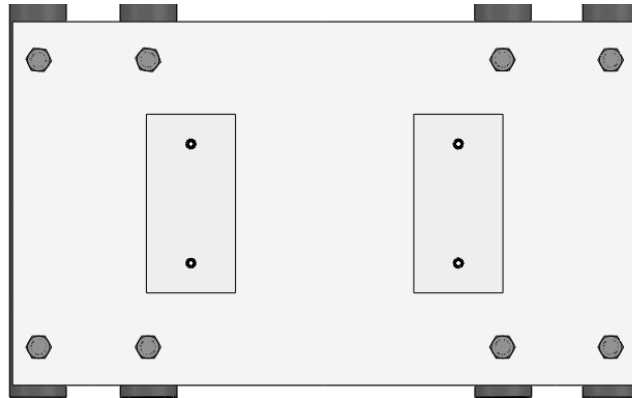
*Figura 4.14* Ensamble de la plataforma para el sensor de profundidad con los tubos estructurales 2. Elaboración propia.

#### **4.3.7 Plataforma para la caja de componentes**

Se diseñó una plataforma para la caja de componentes. El material escogido para la plataforma es Plástico HDPE de grado Marino. Los agujeros de mayor diámetro se realizaron con el fin de colocar tornillos de nylon y así unir la plataforma a los tubos estructurales 2 y los agujeros de menor diámetro se realizaron para colocar tornillos para unir el sujetador de la caja de componentes a la plataforma, como se muestra en la Figura 4.16, en la Figura 4.15 se muestra la plataforma ensamblada con los tubos estructurales 2 y los sujetadores.



*Figura 4.15* Plataforma para la caja de componentes. Elaboración propia.



*Figura 4.16* Ensamble entre la plataforma para la caja de componentes, tubos estructurales 2 y sujetadores para la caja de componentes. Elaboración propia.

### 4.3.8 Sujetadores para la caja de componentes

Debido a que la caja para componentes no cuenta con espacio para ser unida a la plataforma, se diseñaron 2 sujetadores como el mostrado en la Figura 4.18, se seleccionó Nylon como material, debido a que el plástico HDPE no es compatible con el pegamento escogido. Los agujeros presentes en el diseño se realizaron con el fin de insertar inserciones de tornillo como la mostrada en la Figura 4.17, y así al atornillar los sujetadores a la plataforma se logre que los elementos se queden en su lugar. Los sujetadores se mantienen unidos a la caja utilizando pegamento silicón negro de JB Weld, el cual tiene propiedades contra agua (JB Weld, s.f.). Para ver las dimensiones de este elemento, revisar el apéndice A3, Figura A3.8.



*Figura 4.17* Inserción roscada para tornillo. (MacMaster-Carr Supply Company, 2012)





*Figura 4.18* Sujetador para la caja de componentes. Elaboración propia.

### 4.3.9 Caja para componentes

Se utilizó una caja de la compañía *Seahorse* con dimensiones 14.9 x 12.13 x 9.58", como la mostrada en la Figura 4.19, dicha caja al cerrarse es completamente a prueba de agua. Se realizaron los agujeros necesarios para permitir la entrada de los cables de los componentes electrónicos que se encuentran fuera de la caja, y para la colocación de disipadores de calor. Para mantener el estado a prueba de agua de la caja se rellenaron los agujeros con silicón para sellado.



*Figura 4.19* Caja para componentes, imagen ilustrativa. (Fuerte Cases, 2018)

### 4.3.10 Balsas Expandacraft

En la sección 4.2, se mencionó que se escogió comprar cascos de catálogo. Para que el vehículo sea capaz de navegar, se cuenta con las balsas mostradas en la Figura 4.20 de la compañía Expandacraft, las cuales son de tipo de casco de desplazamiento y además el material es plástico. Se prefirió utilizar cascos de desplazamiento debido a que, a diferencia de los cascos de planeo, estos no tienden a elevarse como se mencionó en la sección 3.7.1, es necesario que el VAAS no

se eleve de la forma en la que se muestra en la Figura 3.9, con el fin de que las mediciones de profundidad se realicen de forma perpendicular al fondo marino.



*Figura 4.20* Balsas Expandacraft. (Expandacraft, 2002)

Estas balsas son simétricas, con el fin de que el vehículo puede ir hacia adelante y en reversa. Las características, dadas por el fabricante, de las balsas escogidas se muestran en la Tabla 4.4.

*Tabla 4.4* Características de las balsas a utilizar.

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
Longitud	4 m
Capacidad máxima	113,40 kg
Masa	28 kg
Pines de madera para ensamble	4 unidades
Sección más ancha	0,254 m
Altura máxima	0,265 m

Fuente: Expandacraft

## 4.4 Cálculos de Diseño

En este apartado se presentan los cálculos para verificar la viabilidad de los elementos seleccionados y diseñados, empezando por la velocidad máxima a la que se moverá el barco y terminando con el factor de seguridad de los elementos que soportan mayor carga.

### 4.4.11 Cálculo de flotabilidad

Utilizando el principio de flotación se procedió a calcular el porcentaje del volumen del VAAS que se encuentra bajo el agua. De la Tabla 4.4 se tomaron los datos del peso y se procedió a realizar el cálculo de flotación, según Cengel, et al. (2006) se utilizará como densidad del agua  $1000 \text{ kg/m}^3$ . En la sección 3.3 se mencionó que para objetos que se encuentran inmersos en un fluido, el peso del objeto y la fuerza de empuje se encuentran en el mismo eje por lo que se tiene lo siguiente:

$$W = F_b \quad (4.1)$$

$$mg = \rho_f V' g \quad (4.2)$$

$$\frac{m}{\rho_f} = V' \quad (4.3)$$

$$\frac{39,023 \text{ kg}}{1000 \text{ kg/m}^3} = 0,0390 \text{ m}^3 \quad (4.4)$$

Una vez que se obtuvo el volumen sumergido, se procedió a calcular a cuanto corresponde el resultado obtenido respecto al volumen total del vehículo. El volumen total del vehículo se aproxima utilizando los datos del modelo realizado en SolidWorks®.

$$\frac{0,0390 \text{ m}^3}{0,34 \text{ m}^3} * 100 = 11,47\% \quad (4.5)$$

Con el 11.47% obtenido, se procede a hacer el cálculo de cuantas pulgadas del vehículo se encuentran bajo el agua, sabiéndose con anterioridad que el largo de cada balsa es de 4 m y el ancho máximo 0,254 m, se aproximó el volumen de cada balsa usando la fórmula de volumen de un prisma rectangular.

$$L_t * h * e = V' \quad (4.6)$$

$$4 \text{ m} * h * 0,254 \text{ m} = 0,0390 \text{ m}^3 \quad (4.7)$$

$$h = \frac{0,0390 \text{ m}^3}{1,16 \text{ m}^2} = 0,038 \text{ m} \quad (4.8)$$

El valor de h indica el valor de la altura sumergida del VAAS, dicho valor se utilizó para calcular el área transversal de las balsas Expandacraft que se encuentran en contacto con el agua en la sección 4.4.12.

#### 4.4.12 Velocidad máxima debida al arrastre

Anteriormente se mencionó en la sección 3.5 que cuando un cuerpo se mueve a través de un fluido, el fluido presenta resistencia. En el caso de los barcos los fluidos que se oponen a su movimiento son el agua y el aire, sabiendo esto se procederá a realizar el cálculo de la velocidad máxima de movimiento del barco tomando como fuerza del barco la fuerza máxima otorgada por las turbinas la cual es 50,1 N (Blue Robotics Inc, 2017), la densidad del aire como 1,225 kg/m<sup>3</sup>, la viscosidad dinámica del agua a 20°C 1x10<sup>-3</sup> Pa·s la viscosidad dinámica del aire como 1,825 x10<sup>-5</sup> Pa·s (Cengel, et al., 2006). Primero se realizó el cálculo del número de Reynolds para agua y para aire:

$$Re = \frac{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot v \cdot 3,5 \text{ m}}{1 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}} = 3,5 \cdot 10^6 v \quad (4.9)$$

$$Re = \frac{1,225 \cdot v \cdot 157,480}{1,825 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}} = 2,685 \cdot 10^5 v \quad (4.10)$$

De acuerdo con la ecuación 3.4 para números de Reynolds mayores a 4000 el valor  $C_d$  permanece constante, por lo que se toma  $C_d = 0.34$ . Dado que se toma el caso donde la velocidad es máxima, la aceleración es 0. Previamente, se utilizó como volumen del casco del barco la aproximación a un prisma de base rectangular, para calcular la fuerza de arrastre se utilizó como área proyectada el área de un rectángulo, sabiendo anteriormente las pulgadas sumergidas y el

ancho del casco, se obtiene un área transversal en el agua  $A_{tb}$  de  $9,652 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ , por otra parte el área que se encuentra en la superficie  $A_{tbs}$  es de  $5,766 \times 10^{-2} \text{ m}^2$ .

Realizando lo mismo para el área transversal del sensor de profundidad el cual cuenta con un diámetro de 0,1016 m y una altura sumergida de 0,254 m, el área transversal  $A_{ts}$  obtenida es de  $2,590 \times 10^{-2} \text{ m}^2$ , finalmente dadas las dimensiones de la caja, el área transversal  $A_{caja}$  es de  $9,210 \times 10^{-2} \text{ m}^2$ . Se realizó la sumatoria de fuerzas en el eje X de la siguiente manera:

$$\sum F_x = 0 \quad (4.11)$$

$$2F_{turbina} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{agua} \cdot v^2 \cdot A_{tb} \cdot C_d + \frac{1}{2} \cdot \rho_{aire} \cdot v^2 \cdot A_{tbs} \cdot C_d + \frac{1}{2} \cdot \rho_{agua} \cdot v^2 \cdot A_{ts} \cdot C_d + \frac{1}{2} \cdot \rho_{aire} \cdot v^2 \cdot A_{caja} \quad (4.12)$$

$$100,02 = 1,641v^2 + 0,012v^2 + 8,404v^2 + 1,088 \cdot 10^{-3}v^2 \quad (4.13)$$

$$v = \sqrt{\frac{100,02}{11,672}} = 2,927 \text{ m/s} \quad (4.14)$$

De la ecuación 4.14 se obtuvo el resultado del cálculo de la velocidad máxima del VAAS.

#### 4.4.13 Esfuerzos en la estructura

En relación con la estructura, se evaluaron los elementos críticos. Primero se procedió a realizar el DCL del tubo que une a la turbina con la estructura, mostrado en la Figura 4.21, el cual se encuentra sometido a la fuerza de la turbina y a un momento debido a esta, se utilizará un factor de 1,2 por prevención, por lo que la fuerza que ejerce cada turbina es de 13,440 lb y el momento es de 23,536 lb·in.

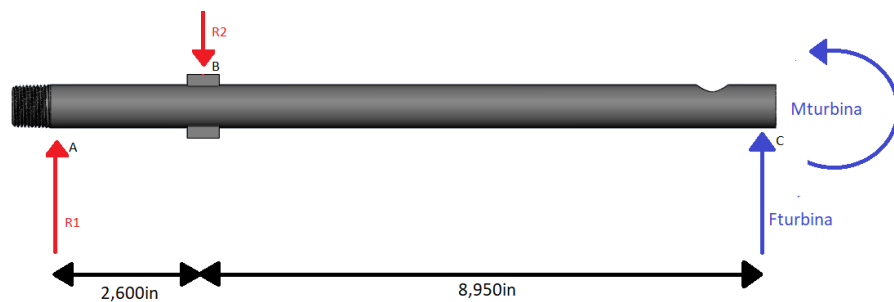


Figura 4.21 DCL Conexión al motor. Elaboración propia.

Se procedió a analizar el DCL de la pieza con el fin de determinar las reacciones R1 y R2. Según Budynas & Nisbett (2011), La sumatoria de momentos en A, tomando como positiva la rotación en contra de las manecillas del reloj, resulta de la siguiente forma:

$$\sum M_A = 0 \quad (4.15)$$

$$M_{motor} + F_{turbina} \cdot 11,55 = R2 \cdot 2,600 \quad (4.16)$$

$$R2 = \frac{25,536 \text{ lb}\cdot\text{in} + 13,440 \text{ lb}\cdot 11,5 \text{ in}}{2,600 \text{ in}} = 69,526 \text{ lb} \quad (4.17)$$

Al realizar la sumatoria de fuerzas en el eje Y, se obtuvo que R1 = 56,086 lb, debido a que el tubo presenta un agujero pasante como concentrador de esfuerzo, se deben realizar los diagramas de esfuerzo cortante y momento flector para determinar el momento provocado en el agujero, los cuales se muestran a en la Figura 4.22.

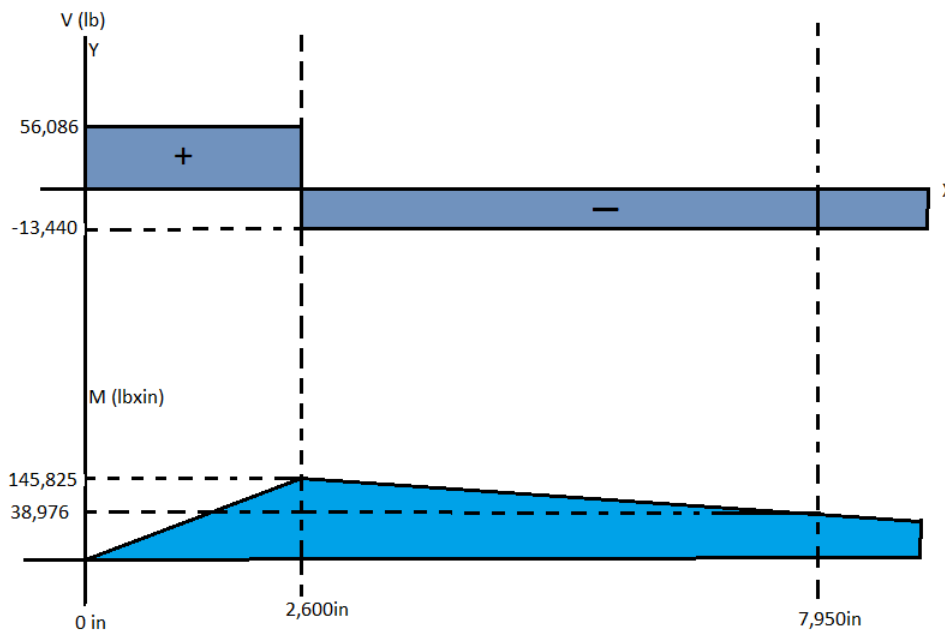


Figura 4.22 Diagramas de esfuerzo cortante y momento flector de la conexión al motor.

Elaboración propia.

Se calculó el concentrador de esfuerzo tomando en cuenta que el diámetro del agujero pasante es de 0,250 in, el diámetro exterior del tubo es de 0,680 in y el diámetro interior es de 0,423 in, se obtiene que la relación  $d/D$  es de 0,6 y la relación  $a/D$  es de 0,368. Dado que la tabla mostrada en la Figura 3.15 no otorga datos para valores  $a/D$  mayores a 0,3 se utilizaron las siguientes ecuaciones de la recta:

$$A = -1,2 \cdot \left(\frac{a}{D}\right) + 0,94 \quad (4.18)$$

$$K_t = -0,8 \cdot \left(\frac{a}{D}\right) + 2,38 \quad (4.19)$$

Al evaluar en  $a/D = 0,234$  se obtiene  $A = 0,498$  y  $K_t = 2,086$ , con esto se procedió a calcular el esfuerzo normal en el tubo:

$$Z = \frac{\pi \cdot 0,234}{32 \cdot 0,68 \text{ in}} \cdot [(0,68 \text{ in})^4 - (0,423 \text{ in})^4] = 0,013 \text{ in}^3 \quad (4.20)$$

$$\sigma_{max} = \frac{38,976 \text{ lb} \cdot \text{in} \cdot 2,086}{0,013 \text{ in}^3} = 6254,149 \text{ psi} \quad (4.21)$$

Dado que el PVC es un material frágil, se utilizó la teoría de falla Morh-Coloumb para materiales frágiles. Sabiendo que el  $S_{ut}$  para el plástico PVC es de 8560 psi ( Plasticbages Industrial, 2012).

$$n = \frac{7822,840 \text{ psi}}{6254,149 \text{ psi}} = 1,25 \quad (4.22)$$

Se procedió a analizar el tubo que se encuentra uniendo ambos cascos. Se analizó como si se tratara de una viga empotrada, sabiendo que las reacciones en los agujeros pasantes son  $R3 = R4 = 5,712 \text{ lb}$ ,  $T3=T4 = 4,284 \text{ lb} \cdot \text{in}$ ,  $T1=T2= 136,080 \text{ lb} \cdot \text{in}$ , de acuerdo con Budynas & Nisbett (2011) se tiene que  $RA= RB= 5,712 \text{ lb}$ ,  $TB=TA = -140,364 \text{ lb} \cdot \text{in}$  Y  $MA=MB= 31,932 \text{ lb} \cdot \text{in}$ , para ver detalladamente el cálculo de estas reacciones, se debe revisar el apéndice A5 . En la Figura 4.23 se muestra el DCL del tubo estructural.

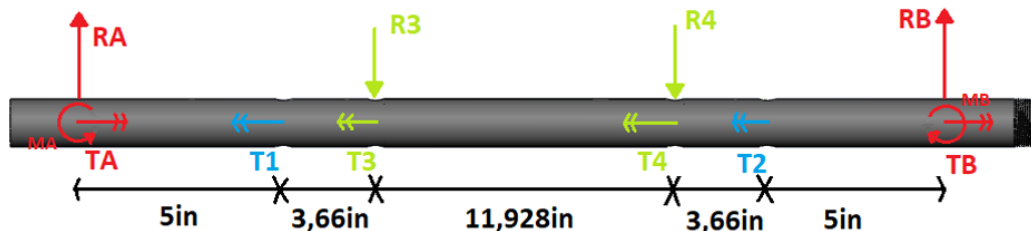


Figura 4.23 DCL Tubo estructural.

Se realizaron los diagramas de esfuerzo cortante, momento flector y torque para determinar el momento y torque provocado en cada agujero y determinar así el punto más crítico de la pieza, dichos diagramas se pueden apreciar en la Figura 4.24.

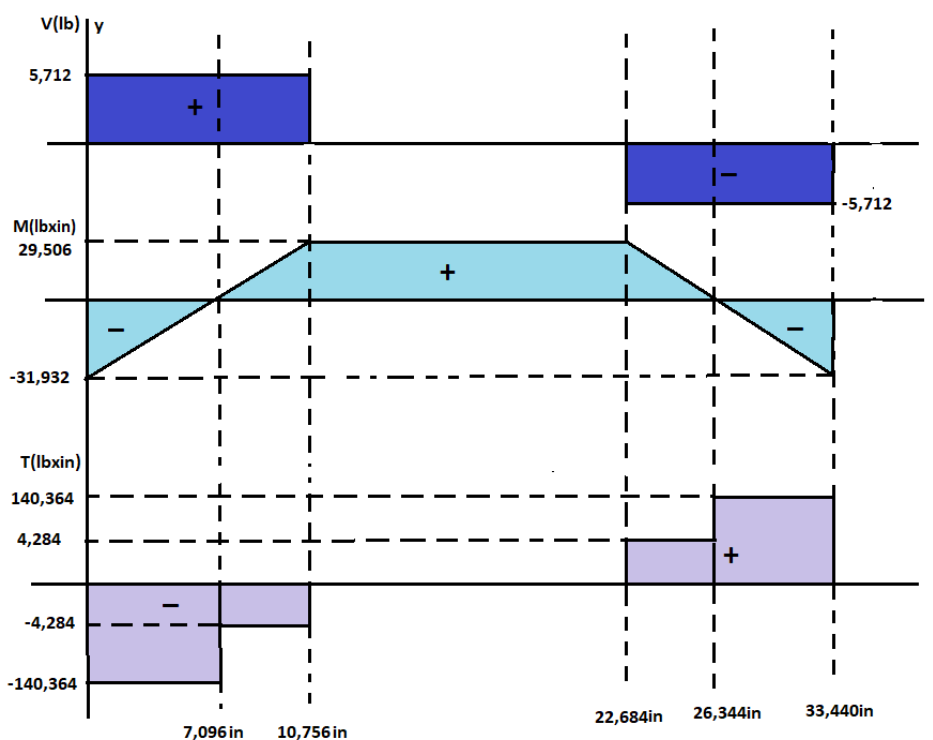


Figura 4.24 Diagramas de esfuerzo cortante, momento flector y torque del tubo estructural.

Elaboración propia.

Dado que los agujeros ubicados a  $10,756\text{ in}$  y a  $22,684\text{ in}$  se ven sometidos a esfuerzos tanto cortantes como normales, se procedió a calcular los concentradores de esfuerzo para esfuerzo normal y esfuerzo cortante. Se realizó primero el cálculo para esfuerzo normal, sabiendo que el



diámetro del agujero pasante es de 0,680 in, el diámetro exterior del tubo es de 1,900 in y el diámetro interior es de 1,520 in, se obtiene que la relación  $d/D$  es de 0,8 y la relación  $a/D$  es de 0,358. Para los valores  $d/D$  se utilizó 0,9, dado que la tabla mostrada en la Figura 3.15 no otorga datos para valores  $a/D$  mayores a 0,3 se procedió a utilizar las siguientes ecuaciones de la recta:

$$A = -0,8 \cdot \left(\frac{a}{D}\right) + 0,88 \quad (4.23)$$

$$K_t = 1,6 \cdot \left(\frac{a}{D}\right) + 2,04 \quad (4.24)$$

Al evaluar en  $a/D = 0,358$  se obtiene  $A = 0,594$  y  $K_t = 2,613$ , con esto se calculó el esfuerzo normal en el tubo:

$$Z = \frac{\pi \cdot 0,595}{32 \cdot 1,90 \text{ in}} \cdot [(1,90 \text{ in})^4 - (1,52 \text{ in})^4] = 0,271 \text{ in}^3 \quad (4.25)$$

$$\sigma_{max} = \frac{29,506 \cdot 2,613}{0,271 \text{ in}^3} = 284,500 \text{ psi} \quad (4.26)$$

Para el cálculo del esfuerzo cortante, se utilizaron los valores dados en la tabla mostrada en la Figura 3.18 , con lo que se obtiene  $A = 0,75$  y  $K_t = 2,09$  , con esto se procedió a calcular el esfuerzo cortante, con lo que se obtuvo lo siguiente:

$$J = \frac{\pi \cdot 0,750}{32 \cdot 1,90 \text{ in}} \cdot [(1,90 \text{ in})^4 - (1,52 \text{ in})^4] = 0,567 \text{ in}^3 \quad (4.27)$$

$$\tau_{max} = \frac{4,284 \cdot 2,09}{0,567} = 15,791 \text{ psi} \quad (4.28)$$

Dado que el PVC es un material frágil, se procede a utilizar la teoría de falla Morh-Coloumb para materiales frágiles. Sabiendo que según Plastibages (2012) el  $S_{ut}$  para el plástico PVC es de 7822,840 psi y el  $S_{uc}$  es de 8676,240 psi se calculan los esfuerzos  $\sigma_a$  y  $\sigma_b$  y posteriormente el factor de seguridad.

$$\sigma_a = \frac{284,500 \text{ psi}}{2} + \sqrt{\left(\frac{284,500 \text{ psi}}{2}\right)^2 + (15,791 \text{ psi})^2} = 285,374 \text{ psi} \quad (4.29)$$

$$\sigma_b = \frac{284,500 \text{ psi}}{2} + \sqrt{\left(\frac{284,500 \text{ psi}}{2}\right)^2 + (15,791 \text{ psi})^2} = -0,874 \text{ psi} \quad (4.30)$$

$$\frac{285,374 \text{ psi}}{7822,840 \text{ psi}} - \frac{-0,874 \text{ psi}}{8676,240 \text{ psi}} = \frac{1}{n} \quad (4.31)$$

$$n = \frac{1}{0,036} = 27,8 \quad (4.32)$$

De las ecuaciones 4.22 y 4.32 se obtuvieron los factores de seguridad para cada elemento, este valor es importante para poder comprobar si el material resiste a los esfuerzos a los que se encuentra sometidos. En el caso de la conexión al motor, la cual se encontraba sometida a esfuerzos normales el resultado fue de un factor de seguridad de 1,25 y en el caso del tubo estructural, el cual se encontraba sometido a esfuerzos cortantes y esfuerzos normales se obtuvo un factor de seguridad de 27,8.

## Capítulo 5 Selección de sensores y componentes electrónicos

### 5.1 Introducción

En este apartado se describen las características de los sensores y actuadores que forman parte de la propuesta de diseño y las consideraciones de selección de componentes electrónicos, además de las entradas y salidas de los controladores escogidos.

### 5.2 Sensores y actuadores

Los robots operan en incertidumbres inherentes. Para los robots móviles, la integración de sensores reduce estas incertidumbres. Incluso un sensor simple, como un sensor ultrasónico, puede brindarle a un robot la capacidad de detectar si hay objetos a su alrededor. La integración adecuada de los sensores internos, los cuales ayudan a brindar información sobre el estado del robot y externos, los cuales brindan información sobre el medio que los rodea es muy importante, la implementación sensores depende de la tarea que el robot vaya a realizar.

#### 5.2.1 GPS

Para aplicaciones de localización y mapeo es importante contar con datos que permitan estimar la posición del sistema, tales como la latitud y la longitud. Para dicha tarea, existen los módulos receptores GPS. Entre los módulos de catálogo disponibles se encuentran el módulo receptor GPS 6 EVK u-blox como el mostrado en la Figura 5.1 y el módulo receptor SparkFun GPS-RTK Board-NEO-M8P 2 cual se muestra en la Figura 5.2.



Figura 5.1 Módulo GPS u-blox 6 EVK. (Mendoza, 2012)



Figura 5.2 Módulo SparkFun GPS-RTK Board-NEO- M8P 2 (Sparkfun Electronics, 2003)

Las características, dadas por los fabricantes, de los módulos receptores GPS mostrados en las figuras anteriores se muestran en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1 Características de los Módulos GPS.

Módulo	Número de satélites	Precisión	Voltaje de entrada	Precio
SparkFun GPS-RTK Board- NEO- M8P	22	2.5 m	5 V	\$199.95
u-blox EVK	11	5 m	5 V	\$90

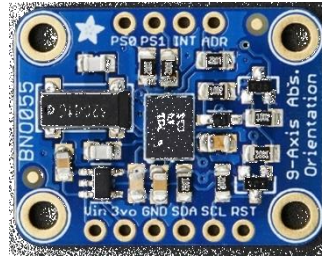
Fuente: Sparkfun Electronics, 2003 & U-blox, s.f.

Debido a que el módulo u-blox cuenta con menor precio y cumple con el objetivo de una precisión de menos de 5 m, se decidió utilizar este para con el fin de que el VAAS brinde datos sobre su ubicación y además para ser utilizado en conjunto con el control externo para que el VAAS sea enviado a puntos específicos.

### 5.2.2 Sensor magnético

Con el fin de obtener la orientación del vehículo, se debe utilizar un sensor magnético el cual mida los grados respecto al norte magnético. Para esta tarea se encuentran disponibles distintos sensores de orientación y sensores magnéticos entre los cuales se encuentran el sensor BNO055 de Adafruit mostrado en la Figura 5.3. La conexión a este sensor se realizará a la Raspberry Pi, para que esta lea los datos directamente sin necesidad de comunicarse con el Arduino. Con el fin de medir el error de este sensor, se marcó en el sensor la referencia al Norte magnético en el sensor,

se utilizó una brújula de guía y se midió el valor otorgado por el sensor, este se comparó con el valor otorgado por la brújula.



*Figura 5.3* Sensor magnético. (Adafruit, s.f.)

### 5.2.3 Sensor de profundidad

Dado que una de las funciones del VAAS es realizar mediciones de profundidad, se requiere un sensor que sea capaz de medir profundidad. Se encuentra en el VGR Lab un sensor de profundidad y temperatura propio mostrado en la Figura 5.4. Fue previamente diseñado por los estudiantes Roberth Codd-Downey y Andrew Speers, 2014, dicho sensor se utilizará para tomar los datos de profundidad y temperatura del agua.

Dentro del sensor se encuentra una Raspberry Pi que procesa los datos, al conectarse a otro controlador que tenga instalada la plataforma ROS, al iniciar las mediciones de temperatura automáticamente realiza los gráficos y los envía al controlador (Codd-Downey, Jenkin & Speers, 2014). En la Tabla 5.2, se muestran algunas características del Sensor de profundidad



*Figura 5.4* Sensor de profundidad. (Codd-Downey, Jenkin & Speers, 2014)

Tabla 5.2 *Características del sensor de profundidad.*

Características	Valor
Voltaje de operación	9.5-16 V <sub>o</sub>
Profundidad máxima de medición	450 ft
Profundidad mínima de operación	3 ft

Fuente: CruzPro, 1997

### 5.2.4 Turbinas

Los robots necesitan ciertos actuadores dependiendo del ambiente en el cual se vayan a desempeñar, sea este acuático o terrestre. En el caso de los VAAS se necesitan turbinas para que estos puedan movilizarse a través del agua. Para esta tarea, se tomaron en cuenta las turbinas T200 y T100 de *BlueRobotics* las cuales cuentan con el mismo diámetro externo de 3.80 in y el mismo diseño, el cual se muestra en la Figura 5.5. Estas turbinas cuentan con motores DC sin escobillas diseñados para funcionar en el agua. En la Tabla 5.3 se muestra la comparación entre el modelo T200 y el modelo T100, dichos datos fueron obtenidos de la hoja del fabricante.



Figura 5.5 Turbinas T200 *BlueRobotics*. (Blue Robotics Inc, 2017)

Tabla 5.3 Características de las turbinas T200 y T100 BlueRobotics.

Característica	Modelo T100	Modelo T200
Fuerza de empuje máximo hacia adelante a 16 V	2.36 kilogramos	5.1 kilogramos
Fuerza de empuje máximo hacia atrás a 16 V	1.85 kilogramos	4.1 kilogramos
Fuerza de empuje máximo hacia adelante a 12 V	1.58 kilogramos	3.55 kilogramos
Fuerza de empuje máximo hacia atrás a 12 V	1.3 kilogramos	3.0 kilogramos
Voltaje de operación	6-16 Voltios	6- 16Voltios
Corriente máxima	12.5 amperios	25 amperios
Potencia	135 watts	350 watts

Fuente: Blue Robotics Inc, 2017

De acuerdo a los datos de la Tabla 5.3, se seleccionó un par de Turbinas T200 *BlueRobotics*, con el fin de asegurar mayor fuerza de empuje para el VAAS y así alcance una mayor velocidad. Son capaces de general movimiento hacia adelante y hacia atrás en el VAAS. Cabe destacar que estas turbinas incluyen su propio controlador de velocidad, el cual también es fabricado por la compañía *Bluerobotics*, estos controladores reciben la señal PWM que envía el Arduino y la traduce a un voltaje de salida. Debido a que estos controladores se calientan a una temperatura entre 80 °C y 140 °C se agregaron disipadores de calor en la caja de componentes, el cálculo de dichos disipadores se encuentra en la Figura A5.6. En la Figura 5.6 se muestra la curva de Potencia en función del ancho de pulso para 12 V y 16 V.

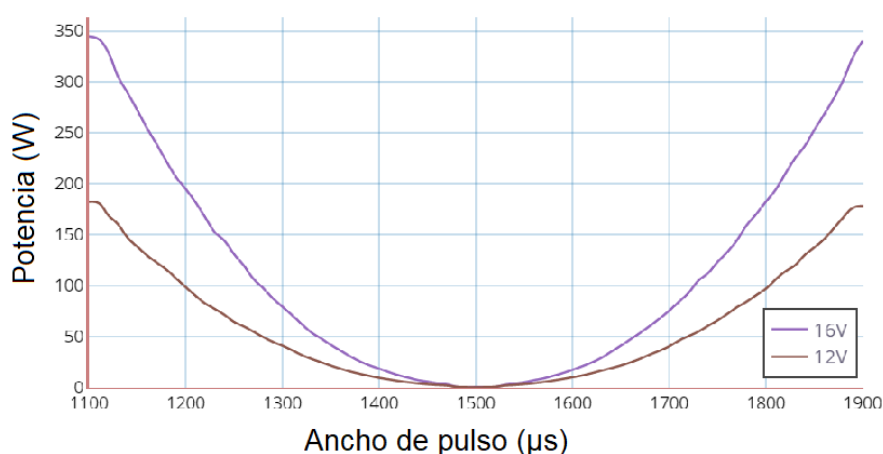


Figura 5.6 Gráfica de potencia en función del ancho de pulso. (Blue Robotics Inc, 2017)

## 5.3 Procesamiento y comunicación

### 5.3.1 Control Remoto

Se seleccionó un control remoto para brindar instrucciones sobre el modo de operación del VAAS, con el joystick izquierdo del mando se seleccionará el modo de operación. En caso de que se seleccione el modo de tele operación el joystick derecho se utilizará para controlar la velocidad y dirección del vehículo, la cual también puede ser en diagonal. El control remoto utilizado se muestra en la Figura 5.7.



Figura 5.7 Control remoto a utilizar. (RC models Wiz, s.f.)

Como se puede apreciar en la Figura 5.7 el control remoto cuenta con 3 opciones, las cuales son:

1. Navegación GPS
2. Apagado de emergencia
3. Tele operación

En el caso de la opción de apagado de emergencia significa que el VAAS no recibirá ninguna orden desde el control remoto, a pesar de que el control remoto siga encendido, además se cuenta con el interruptor de encendido o apagado



### 5.3.2 Selección del controlador

Se propone el uso de Raspberry pi 3 como la unidad de procesamiento del VAAS, específicamente modelo B+ con el fin de que controle la mayoría de los procesos de alto nivel. Este dispositivo más que un controlador es una computadora de bajo posee diversos componentes con los que puede cumplir una gran cantidad de funciones. En la Figura 5.8 se muestran un esquema de las partes que conforman una Raspberry Pi.

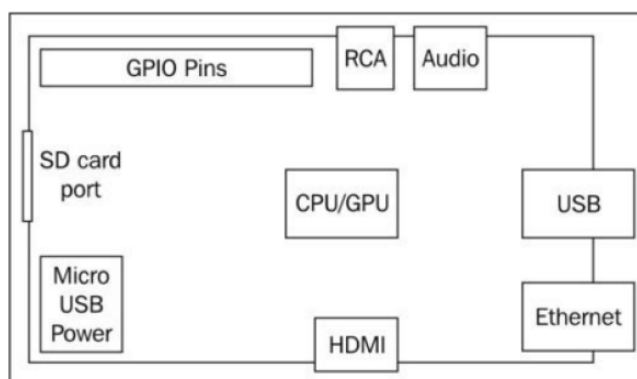


Figura 5.8 Hardware Raspberry Pi. (Dennis, 2013)

Entre las razones de la selección del uso de Raspberry Pi se encuentra que en el VGR-Lab se utilizar software libre para la mayoría de las aplicaciones. Como Raspberry utiliza una distribución de Linux, se adapta a los requerimientos internos solicitados en el laboratorio, además entre los controladores disponibles Raspberry Pi cuenta con menor tamaño ( $3.370 \times 2.125$  in). Todos los datos de los sensores pasan a través de la Raspberry Pi 3 y son leídos por el software principal. En la Figura 5.9 se muestra el diagrama de bloques de las entradas y salidas de la Raspberry Pi.

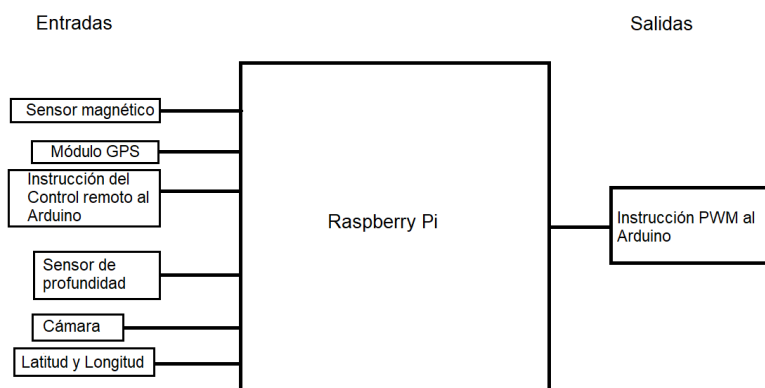


Figura 5.9 Diagrama de Bloques de entradas y salidas Raspberry Pi. Elaboración propia.

### 5.3.3 Arduino UNO

Se decidió utilizar Arduino UNO como el mostrado en la Figura 5.10 para comunicar a la Raspberry Pi con el control remoto. El Arduino está encargado de recibir la señal del control remoto mediante la antena y enviar la instrucción a la Raspberry Pi. Dado que se cuenta con pines PWM, se utilizarán estos pines para brindar la señal a los controladores electrónicos de velocidad de las turbinas, una vez que la Raspberry Pi envíe de vuelta la instrucción para el PWM. Se enviarán señales con distinto ancho de pulso dependiendo de la posición del joystick derecho del control remoto. En la Figura 5.11 se muestra un diagrama de bloques con las entradas y salidas del Arduino.

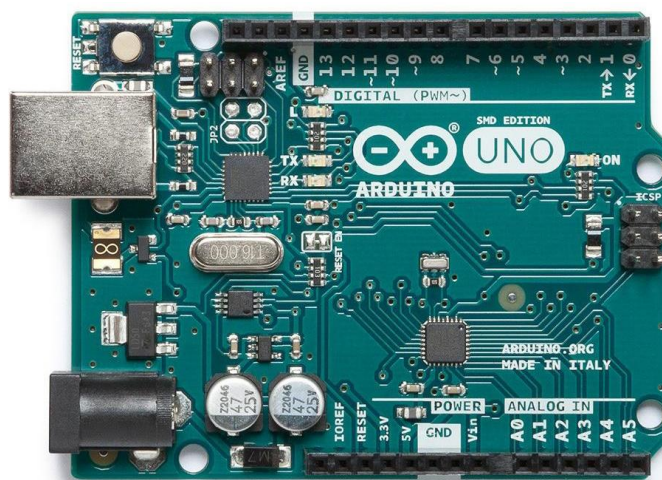


Figura 5.10 Arduino UNO.

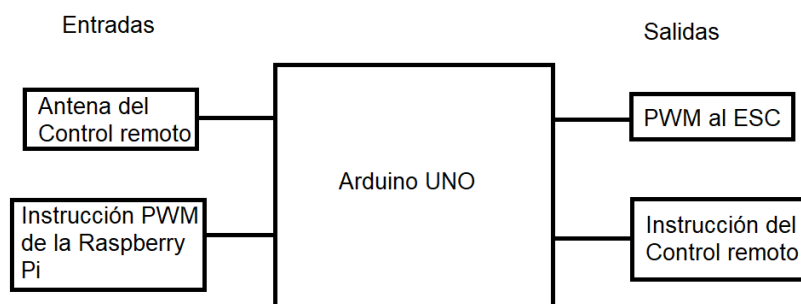


Figura 5.11 Diagrama de bloques de entradas y salidas del Arduino. Elaboración propia.

## 5.4 Componentes electrónicos

### 5.4.1 Alimentación

Se decidió utilizar 2 baterías de 14,8 V, basándose en el voltaje necesario para las turbinas según la Figura 5.6 y 10 000 mAh marca *Multistar*, para así lograr mayor fuerza de empuje. Se escogió esta batería debido a que entre las baterías LiPo el siguiente valor de voltaje es de 18,5 V (PROMETEC, s.f.) y el voltaje máximo para las turbinas es de 16 V. La salida de cada batería pasa por un relé que se activa mediante un botón de encendido o apagado. Debido a que la Raspberry Pi solamente necesita 5V para funcionar, se utilizó un convertidor Buck para reducir el voltaje de 14,8 V a 5V. Es importante tomar en cuenta que estas baterías no deben bajar a menos de 20% de su capacidad máxima para que estas no se dañen, esto significa que de las cuatro celdas ninguna puede bajar de 3.8 V.

### 5.4.2 Tarjeta de distribución de potencia

En muchas aplicaciones de robótica, es indispensable proporcionar una fuente de alimentación continua sin tener que reiniciar el sistema al cambiar las baterías o al cambiar entre la fuente de alimentación de CC y la fuente de la batería, dado que las baterías pueden dañarse si llegan a un nivel crítico de voltaje se optó por utilizar la tarjeta de distribución de potencia de *RoboSavvy*, modelo HotSwap PowerBoard 1.0. Esta tarjeta cuenta con 3 salidas y toma como entrada 2 baterías las cuales pueden ser de un máximo de 18 V cada una (Robosavvy Ltd, 2017), primero se requiere ajustar el voltaje mínimo al cual debe suceder el cambio de batería, una vez hecho toma energía de la batería 1. Se escogió esta tarjeta debido a que cuenta con un interruptor de emergencia en caso de que las baterías se encuentren con un voltaje crítico, es decir menor a 3,8 V, si ninguna de las baterías tiene un voltaje mayor al ajustado en la tarjeta, la salida de la tarjeta es 0 V.

### 5.4.3 Arquitectura del sistema eléctrico

En la Figura 5.12 se puede apreciar el diagrama de alimentación, en él se muestran mediante flechas el voltaje brindado a cada componente del VAAS.

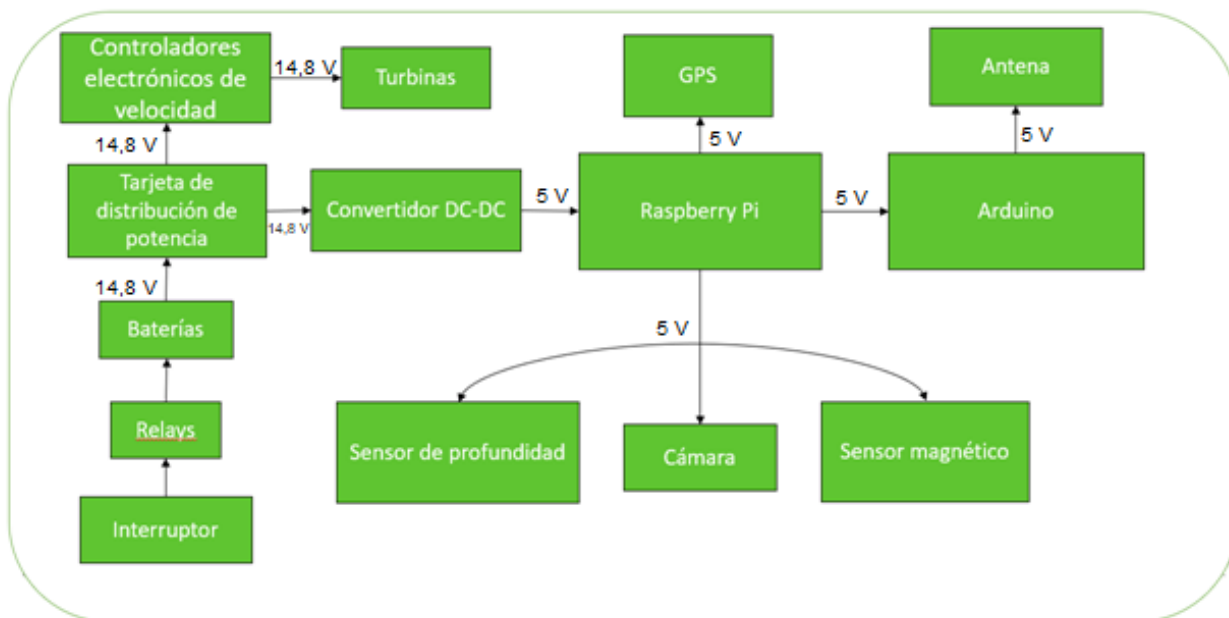


Figura 5.12 Diagrama de alimentación. Elaboración propia

En la Figura 5.13 se muestra el diagrama de comunicación entre el Arduino y la Raspberry Pi, dónde se muestran además las entradas que debe procesar cada uno.

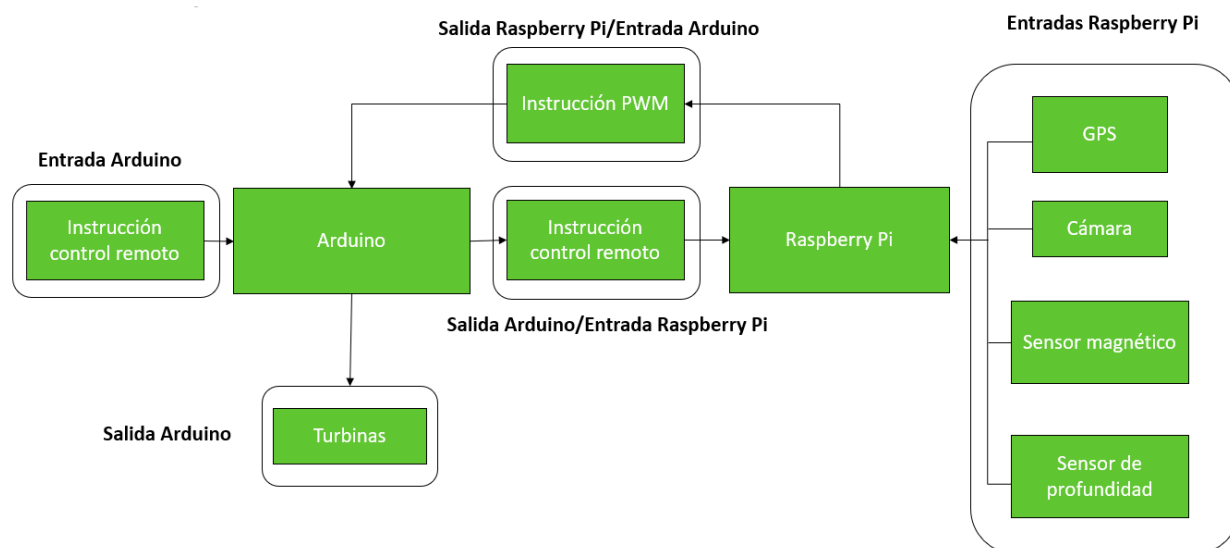


Figura 5.13 Diagrama de. Elaboración propia

## Capítulo 6 Software

El presente capítulo expone el proceso de diseño del Software de control, en el cual se toma como entrada la salida del joystick izquierdo del control remoto.

### 6.1 Tipo de control

Se consideró un control condicional, el cual se muestra en la Figura 6.1, ya que el robot debe contar con 3 condiciones de operación diferentes, es decir, se decidirá qué parte del código ejecutar y dependiendo de lo que indique el Joystick izquierdo del control remoto. Los actuadores operan en condiciones de diseño, no se tienen requisitos de tiempo de respuesta ni de estabilización las opciones se muestran a continuación:

- Tele operación
- Deadman
- Navegación GPS

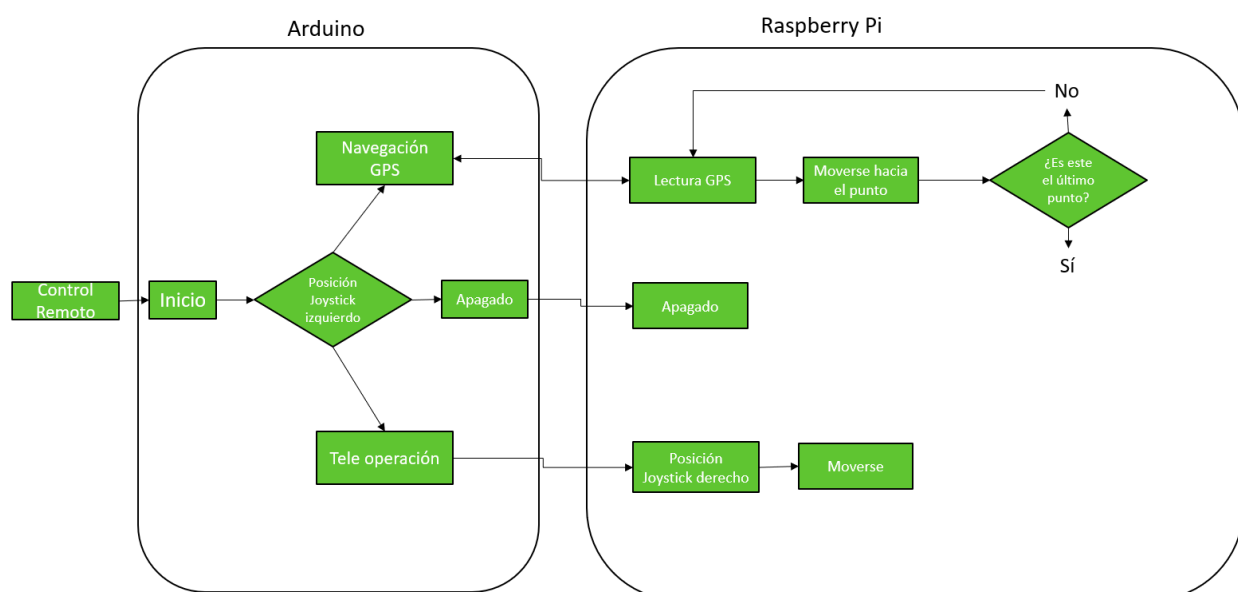


Figura 6.1 Diagrama de flujo del código de control. Elaboración propia

Para las 3 partes, se utilizó comunicación entre la Raspberry Pi y el Arduino, además de que se utilizó la plataforma ROS para crear el software. El Arduino será el encargado de recibir la señal del control remoto, esta señal será enviada a la Raspberry Pi, la cual le enviará devuelta al Arduino lo que se debe ejecutar y la señal PWM que debe enviar a los controladores de velocidad. Como se mencionó en la sección 5.3.2 se escogió Raspberry debido al requerimiento de software libre, es necesario utilizar Arduino debido a que cuenta con mayor cantidad de pines para PWM.

## 6.2 Paquetes de ROS utilizados

Para poder realizar las tareas necesarias, se utilizaron distintos paquetes de navegación de ROS, dichos paquetes contienen nodos subscriptores y publicadores respecto al tema ROS de navegación, los cuales se encuentran publicando y recibiendo información respecto al tema navegación, posición de ruedas en un robot, control y publicación de imágenes. Los paquetes mostrados en la Tabla 6.1 fueron obtenidos de la página de ROS, la cual brinda las guías para obtener el paquete a partir de los repositorios de GitHub.

Tabla 6.1 *Paquetes de ROS utilizados*

Paquete	Descripción
robot_localization	Es una colección de nodos de estimación de estado, cada uno de los cuales es una implementación de un estimador de estado no lineal para robots que se mueven en el espacio 3D. Contiene los nodos <i>ekf_localization</i> y <i>ukf_localization_node</i> para la estimación de la posición utilizando el compás y el nodo <i>navsat_transform</i> para la obtención de los datos GPS a un formato numérico.
follow_waypoints	El nodo <i>follow_waypoints</i> escuchará los <i>waypoints</i> dados como poses y, cuando se le indique, los seguirá uno por uno publicando los objetivos en <i>move_base</i> , lo cual moviliza los motores. El nodo <i>collect_gps_waypoint</i> permite al usuario recopilar sus propios puntos de ruta y el nodo <i>plot_gps_waypoints</i> para guardar datos sin procesar del GPS para fines de trazado.
pixpro	Se conecta a una cámara omnidireccional Kodak PixPro SP360 y publica imágenes en ROS
rosserial_arduino	Este paquete se utiliza para que la raspberry Pi sea capaz de leer el puerto serial del arduino al utilizar ROS
Listener	Este paquete se utilizar para comunicar la raspberry Pi con el control remoto y así definir el modo de operación.

Fuente: (Open Source Robotics Foundation, s.f.)

El paquete `follow_waypoints` se modificó con el fin de que la raspberry Pi le envíe señales al Arduino respecto a la señal PWM que debe utilizar para moverse al siguiente punto.

## 7 Resultados y análisis

### 7.1 Diseño Mecánico

En la Tabla 7.1, se muestran los resultados obtenidos para la flotabilidad y la velocidad del VAAS diseñado y los porcentajes de error de acuerdo a los valores reales medidos. Los porcentajes de error fueron calculados con la siguiente fórmula:

$$\frac{\text{Valor teórico}-\text{Valor experimental}}{\text{Valor teórico}} \times 100 \% \quad (7.1)$$

$$\text{Porcentaje de error altura: } \frac{3,8-3,2}{3,8} \times 100\% = 15,79\% \quad (7.2)$$

$$\text{Porcentaje de error velocidad: } \frac{2,972-2,727}{2,972} \times 100 = 8,24\% \quad (7.3)$$

Tabla 7.1 *Resultados obtenidos en flotabilidad y velocidad del VAAS.*

<b>Dato</b>	<b>Valor</b>
Velocidad obtenida	2,727 ± 0,00008 m/s
Altura sumergida	3,2 ± 0,1 cm
Velocidad calculada	2,972 m/s
Altura sumergida calculada	3,8 cm
Porcentaje de error altura	15,79%
Porcentaje de error velocidad	8,24%

Fuente: Elaboración propia

Para la toma de datos de la velocidad obtenida, se utilizó el control remoto en modo tele operación y con el joystick derecho se envió la instrucción de ir a velocidad máxima con el fin de



que el vehículo recorriera una distancia de 60 m en velocidad máxima y así tomar una medición del tiempo que tomó que el VAAS recorriera 60 m. Se realizaron 6 mediciones utilizando el criterio de dispersión (Posada Chinchilla) y se obtuvo un tiempo promedio de 22 s. Al tener este tiempo se utilizó la ecuación  $v = \frac{d}{t}$ , con lo que se obtuvo una velocidad máxima de 2,727 m/s. Para la medición de altura sumergida se realizó una marca en la línea del agua, posteriormente se posicionó el vehículo en el suelo y se utilizó una regla de 1m para medir la altura desde el suelo hasta la marca realizada, se utilizó el criterio de dispersión y se realizaron 6 mediciones, utilizando el criterio de dispersión.

Como se puede observar en la Tabla 7.1, el porcentaje de error en la velocidad es relativamente bajo si se compara con el porcentaje de error de la altura. Entre los factores que pudieron afectar la altura sumergida se encuentra el volumen del barco, ya que se determinó a partir del modelo en 3D realizado en SolidWorks® y no de alguna hoja de datos. Los valores obtenidos para la altura sumergida confirman que la estructura es capaz de flotar.

Además, se debe recordar que el barco está compuesto de piezas de distintos materiales y además de diversos componentes electrónicos, lo cual también afectó en el valor utilizado de volumen. El valor de velocidad obtenida resultó menor que el de velocidad calculada, como se esperaba, debido a que se utilizaron baterías de 14,8 V y no de 16 V el cual es el voltaje máximo para las turbinas según Blue Robotics, esto debido a que el siguiente valor para baterías LiPo es de 18,7 V.

En el apéndice A2 se muestran los resultados de la simulación de esfuerzos realizada por SolidWorks ®. De este informe, se extraen los datos de simulación para la conexión al motor, que se muestran en la siguiente Tabla:

Tabla 7.2 *Factores de seguridad obtenidos.*

<b>Pieza</b>	<b>Factor de seguridad calculado</b>	<b>Factor de seguridad obtenido de la simulación</b>
Conexión al motor	1,25	1,2
Tubo estructural 2	27,8	No aplica

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 7.2 se observan los resultados de los factores de seguridad obtenidos. Debido al alto factor de seguridad del tubo estructural 2, el cual es 27,8 , se decidió no realizar simulación, por lo que este valor confirma que la estructura de soporte es capaz de llevar la carga. En los cálculos realizados para la conexión se obtuvo un factor de seguridad de 1,25 y en la simulación se obtuvo un valor de 1,2, estos valores confirman que la pieza de conexión al motor es capaz de soportar la carga ejercida por este, ya que se obtuvieron en la condición de carga crítica que puede presentar la pieza de conexión al motor.

## 7.2 Lectura de sensores

En la Tabla 7.3 se muestran los resultados de las mediciones del sensor magnético, mostrados como mediciones en grados, teniendo el origen  $0^\circ$  y el punto máximo en  $360^\circ$  en el norte magnético del planeta.

Tabla 7.3 *Lecturas del sensor magnético.*

Medición	Valor ( $\pm 0,1^\circ$ )
1	358
2	355
3	352
Promedio	355

Fuente: Elaboración propia

De la Tabla 7.3 se obtiene un valor promedio de  $355^\circ$ . Para el cálculo del error se utilizó un valor de  $360^\circ$  para el norte magnético, por lo que se obtuvo un porcentaje de error de 1,39%, lo que indica un error de  $5^\circ$  en las mediciones del sensor magnético.

En la Tabla 7.4 se muestran los resultados de las mediciones del módulo GPS, dichas mediciones se realizaron al aire libre con el fin de que la señal GPS tuviera la menor interferencia posible.

Tabla 7.4 *Lectura de coordenadas medidas por el GPS.*

<b>Latitud, Longitud</b>	<b>Diferencia métrica entre la coordenada medida y la coordenada deseada (<math>\pm 0,001</math> m)</b>
43.77594886505426,-79.51090046404545	5 m
43.776005029108724,-79.51072880365075	6 m
43.775981014163506,-79.51068883883465	3,2 m
43.77597607560745,-79.51073832566465	4,1 m
Promedio	4,575 m

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 7.4 la diferencia métrica entre la coordenada medida y la deseada se obtuvo al fijar un punto de referencia y tomar como valor deseado el primer dato obtenido por el GPS, posteriormente se realizan las mediciones con el GPS. Una vez realizadas las mediciones se procedió a ubicar en Google Maps los puntos coordenados obtenidos y se utilizó una cinta métrica de 6 metros para medir la distancia entre cada punto y el punto inicial. El valor promedio obtenido se encuentra dentro del rango deseado para el VAAS, el cual es de 5m.

La Tabla 7.5 muestra datos de mediciones del sensor de profundidad. Dichos resultados se obtuvieron de realizar mediciones sumergiendo el sensor de profundidad en el estanque Stong, el cual cuenta con una profundidad máxima de 5m , el valor real se obtuvo al utilizar una cinta métrica para medir la profundidad. De la Tabla 7.5 se puede observar que ninguna medición realizada supera el 10% en porcentaje de error.

Tabla 7.5 Mediciones sensor de profundidad.

Medición	Valor medido ( $\pm 0,1$ m)	Valor real ( $\pm 0,001$ m)	Porcentaje de error
1	1,25	1,2	4,16%
2	1,4	1,32	6,06%
3	1,32	1,2	10%
4	1,09	1,15	5,21%
5	1,12	1,2	6,67%
6	1,19	1,25	4,80%
7	1,1	1,2	8,33%
8	1,27	1,33	4,51%

Fuente: Elaboración propia

### 7.3 Resultados de la programación

En la Tabla 7.6 se muestra el tiempo de reacción para el modo tele operación. Para esta prueba se realizó la medición de cuánto tardaban los motores de las turbinas de pasar de la posición de reposo a la velocidad máxima, para las mediciones mostradas en la Tabla 7.6 en el *joystick* se indicó que las turbinas deben moverse hacia adelante, para las mediciones mostradas en la tabla 7.7 se indicó que el VAAS debe moverse hacia la derecha y para las mediciones mostradas en la tabla 7.8 se indicó que debe girar hacia la izquierda.

Tabla 7.6 Tiempo de envío de señal del VAAS en tele operación, movimiento hacia adelante.

Medición	Tiempo
1	0,365 s
2	0,477 s
3	0,465 s
4	0,457 s
5	0,400 s
6	0,370 s
promedio	0,422 s

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7.7 *Tiempo de envío de señal del VAAS en tele operación, movimiento hacia la derecha.*

Medición	Tiempo
1	0,365 s
2	0,370 s
3	0,382 s
4	0,371 s
5	0,360 s
6	0,370 s
promedio	0,370s

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7.8 *Tiempo de envío de señal del VAAS en tele operación, movimiento hacia la izquierda.*

Medición	Tiempo
1	0,396s
2	0,360s
3	0,365s
4	0,380s
5	0,375s
6	0,370
promedio	0,374s

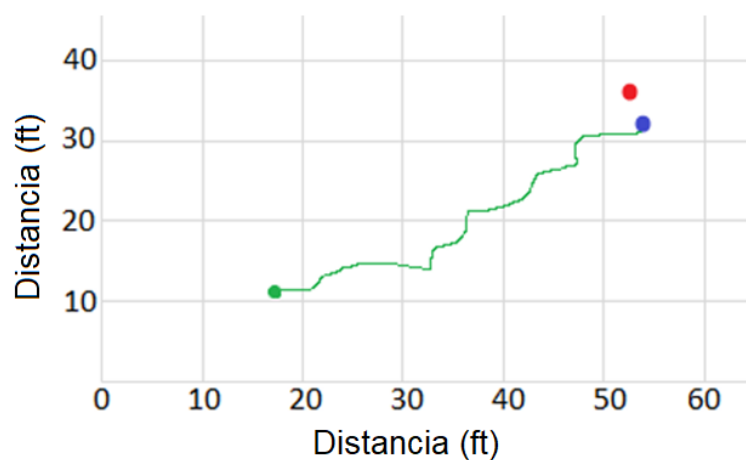
Fuente: Elaboración propia

De las tablas 7.6, 7.7 y 7.8 , se puede observar que el tiempo de envío de la señal a los motores es de menos de medio segundo. Cabe destacar que en las mediciones en las cuales se indica con el joystick que el VAAS debe girar hacia la derecha es el más corto, esto debido a que se debe a que para lograr el giro sólo se utiliza un motor encendido, es decir solamente se envía una señal.

En las Figuras 7.1, 7.2 y 7.3 se muestran los resultados de las pruebas de navegación autónoma del VAAS. La unidad de medida de los números mostrados en la cuadrícula es el metro. Para cada prueba se definió una coordenada inicial y una final, y fueron realizadas en el estanque Stong con una condición de temperatura exterior de 1°C. La coordenada inicial está indicada en cada figura

por un punto de color verde, la coordenada final definida está representada por un punto rojo y la coordenada final alcanzada está indicada con un punto de color azul.

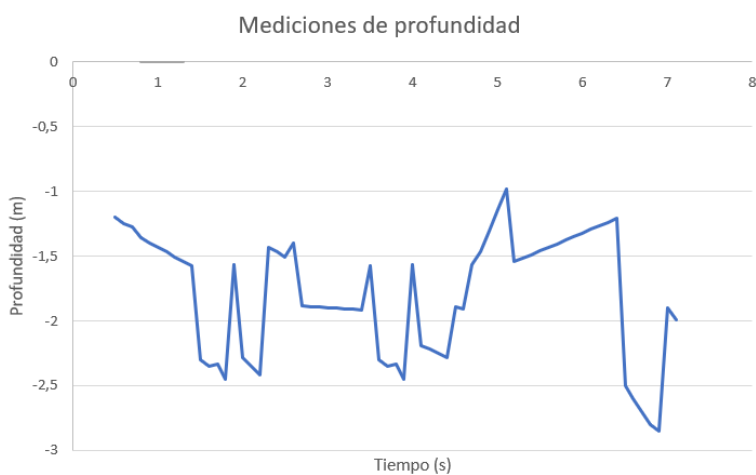
En la Figura 7.2 se observa una imagen tomada por la cámara Kodak Pixpro que posee el VAAS, la imagen fue tomada en el estanque Stong. En la Figura 7.3 se observan los datos recolectados por el sensor de profundidad para la prueba número uno. La recolección de datos de profundidad se realizó solamente para la prueba número uno con el fin de comprobar de que el vehículo puede realizar las mediciones durante la navegación autónoma.



*Figura 7.1* Prueba navegación autónoma número uno. Elaboración propia

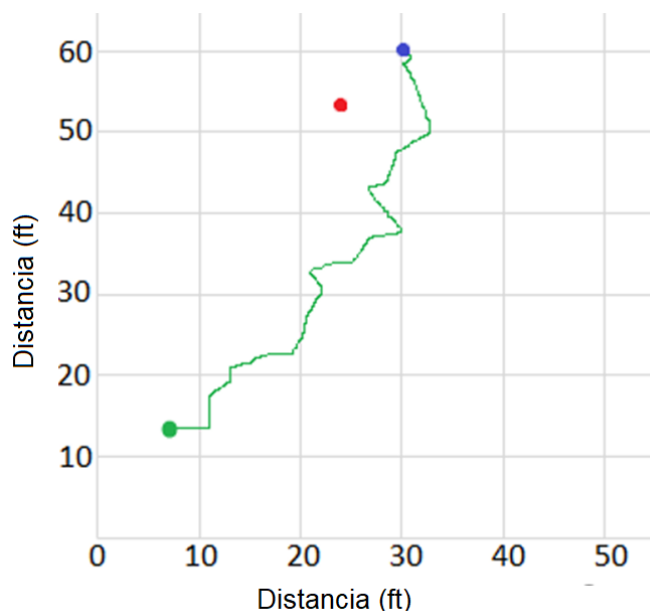


*Figura 7.2* Fotografía estanque Stong. Elaboración Propia



*Figura 7.3* Datos de profundidad obtenidos de la prueba número uno. Elaboración Propia

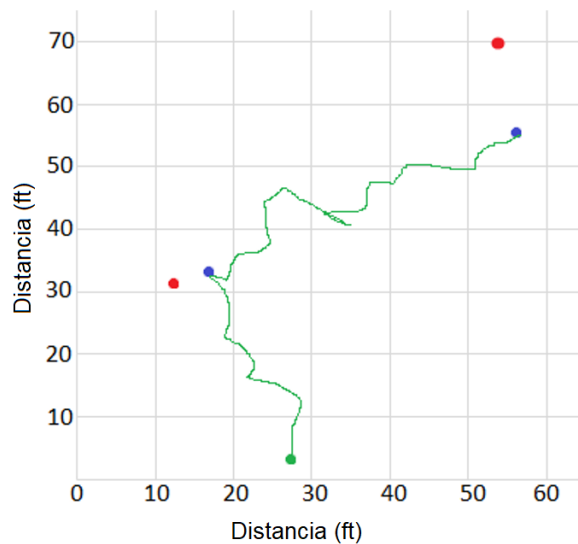
Como se puede observar en la Figura 7.1, el VAAS no alcanzó la coordenada final definida, además de que presenta una trayectoria turbia, a pesar de que se movió en línea recta. Esto se debe al ruido presente en el GPS, a pesar de eso el VAAS llegó a un punto con una distancia menor a 10 ft (3,048 m), menor al valor máximo permitido de 5 m. En la Figura 7.4 se muestra el resultado de la prueba número 2.



*Figura 7.4* Prueba navegación autónoma número dos. Elaboración Propia

De igual forma, en el caso de la Figura 7.4 se observa una trayectoria no uniforme debido al ruido presente en el GPS y tampoco se logró alcanzar la coordenada final deseada, pero la diferencia entre el punto final obtenido y el punto final marcado es menor a 10 ft, es decir menos de 3,048 m, lo cual es menor al valor máximo permitido el cual es de 5 m. En este caso el VAAS finalizó la trayectoria en un punto mucho más lejano de la coordenada deseada, en comparación con el resultado obtenido en la prueba 1. En la Figura 7.5 se muestran los resultados obtenidos para la trayectoria en la prueba número 3.





*Figura 7.5* Prueba navegación autónoma número tres.

Finalmente, en la Figura 7.5 se muestra que se definieron 2 coordenadas deseadas. En este caso el programa le dará prioridad a la primera coordenada ingresada y posteriormente se procederá a realizar la ruta hacia la segunda coordenada ingresada. Como se puede observar en la Figura 7.5, la diferencia entre coordenada alcanzada y coordenada deseada aumenta en la segunda ruta, además se puede observar que esta ruta se muestra menos uniforme, se puede observar que la diferencia entre el punto deseado y el alcanzado es menor a 15 ft, es decir, aproximadamente 4,572 m lo cual sigue siendo menor al valor máximo permitido el cual es de 5 m.

Para concluir, en la Figura 7.6 se muestra una fotografía del VAAS construido.



*Figura 7.6* VAAS construido. Elaboración propia

## **8 Conclusiones y recomendaciones**

### **8.1 Conclusiones**

Se implementó un VAAS que cumple con la funcionalidad de realizar mediciones de profundidad de forma autónoma con una ruta previamente ingresada o utilizando un control remoto para realizar una ruta.

En relación a la estructura mecánica, se logró diseñar un VAAS capaz de mantenerse a flote y de moverse. Además, se logró diseñar una estructura que soporta la carga que transporta el VAAS y la fuerza que ejercen las turbinas cuando se encuentran en máxima velocidad sin fracturarse, donde se obtuvo un factor de seguridad de 1,25 para la pieza crítica.

Se implementó un sistema de sensores que brinda datos sobre la orientación respecto al norte magnético, ubicación GPS con un error menor a 5 m y brinda datos sobre la profundidad de las aguas en las cuales se mueve el VAAS. Es importante considerar la alimentación de los sensores, actuadores y controladores en un VAAS con el fin de mantener al VAAS funcionando.

Se desarrolló un programa para controlar el vehículo utilizando paquetes existentes en la plataforma *ROS*, es importante destacar que, a la hora de realizar un programa con esta plataforma, el usuario escoger entre realizar nodos desde cero, utilizar paquetes existentes o modificar algunos paquetes con el fin de lograr una aplicación que se adapte a las necesidades del usuario.

Se verificó el funcionamiento del programa mediante pruebas de tele operación y pruebas de navegación autónoma.

### **8.2 Recomendaciones**

Con el fin de aumentar la autonomía del VAAS y así lograr misiones con mayor duración, se pueden sustituir las baterías utilizadas de 10000 mAh por baterías Multistar de cuatro celdas y de 12000 mAh, con el fin de aumentar el tiempo de uso del VAAS de 30 min a 36min.

Para lograr una mayor precisión respecto al seguimiento de las rutas y disminuir el ruido en la señal GPS se puede implementar un sistema RTK e instalar una estación terrestre, para obtener una referencia en tierra de las mediciones de localización y así lograr una precisión de centímetros.

Respecto a recomendaciones para el uso del VAAS es importante siempre mantener el control remoto a mano, el cual cuenta con interruptor de emergencia, para intervenir en caso de alguna eventualidad que ponga en peligro el vehículo o en especial la vida de una persona.

## Bibliografía

- [1] Adafruit. (23 de Noviembre de 2018). *Adafruit*. Recuperado el 28 de Noviembre de 2018, de <https://learn.adafruit.com/adafruit-bno055-absolute-orientation-sensor/overview>
- [2] Adafruit. (s.f.). *Adafruit*. Recuperado el 13 de Diciembre de 2018, de <https://www.adafruit.com/product/746>
- [3] Andi. (s.f.). *West Florida Components: What are depth sensors*. Recuperado el 25 de Noviembre de 2018, de West Florida Components: <https://www.westfloridacomponents.com/blog/what-are-depth-sensors/>
- [4] Beer, F. P., Johnston, E. R., Mazurek, D. F., & Eisenberg, E. R. (2010). *Mecánica vectorial para ingenieros* (9 ed.). McGraw-Hill Education.
- [5] Blue Robotics Inc. (2017). *BlueRobotics*. Recuperado el 28 de Noviembre de 2018, de <https://www.bluerobotics.com/store/thrusters/speed-controllers/besc30-r3/>
- [6] BlueRobotics Inc. (2017). *BlueRobotics*. Recuperado el 28 de Noviembre de 2018, de <https://bluerobotics.com/store/thrusters/t200-thruster/>
- [7] BOATsmart. (2017). *Boating Knowledge Base*. Recuperado el 11 de Diciembre de 2018, de <https://www.boatsmartexam.com/knowledge-base/article/boat-hull-types/>
- [8] Brown, W., & Microchip Technology Inc. (2002). Brushless DC Motor Control Made Easy. *Microchip Technology Inc*, 1–48. Recuperado de: <http://ww1.microchip.com/downloads/cn/AppNotes/cn012037.pdf>
- [9] Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2008). *Shigley's mechanical engineering design* (Vol. 8). New York: McGraw-Hill.
- [10] Busto, M. (2008). Diseño del proceso de fabricación de un catamarán de fibra de vidrio en astillero. (*Tesis de licenciatura*). Universidad de Cádiz, Cádiz.
- [11] Celsia. (2018). *Celsia Making hot technology cooler*. Recuperado el 17 de Noviembre de 2018, de <https://celsiainc.com/heat-sink-size-calculator/>
- [12] Çengel, Y. A., Cimbala, J. M., Olguín, V. C., & Skarina, S. F. (2006). *Mecánica de fluidos: fundamentos y aplicaciones* (Vol. 1). São Paulo: McGraw-Hill.

- [13] Codd-Downey, R. (2017). Localization and mapping from shore contours and depth. (*Tesis de Maestría*). York University, Toronto.
- [14] Codd-Downey, R., Jenkin, M., & Speers, A. (2014, September). Building a ROS node for a NMEA depth and temperature sensor. In *Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO), 2014 11th International Conference on* (Vol. 2, pp. 506-512). IEEE.
- [15] Creatronic Inc. (2013). *Creatronic*. Recuperado el 11 de Diciembre de 2017, de <https://www.creatroninc.com/product/15-35v-5a-adjustable-step-down-regulator-with-display/>
- [16] De Sevilla, M. O. (2005). *Hyperphysics*. Recuperado el 12 de Noviembre de 2018, de <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/magnetic/motdc.html>
- [17] Demetiou, G. A., Hadpipieri, A., Panayidou, I. E., Papisavva, A. S., & Ioannou. (2016). ERON: A PID Controlled Autonomous Surface. *18th Mediterranean Electrotechnical Conference*, (pág. 4). Chipre.
- [18] Dudek, G., & Jenkin, M. (2010). *Computational principles of mobile robotics*. Cambridge university press.
- [19] Dunbabin, M., Grinham, A., & Udy, J. (2009, December). An autonomous surface vehicle for water quality monitoring. In *Australasian conference on robotics and automation (ACRA)*(pp. 2-4).
- [20] Emco Industrial Plastics, Inc. (s.f.). *Marine Grade HDPE*. Recuperado el 12 de Noviembre de 2018, de Emco Industrial Plastics: <https://www.emcoplastics.com/hdpe-marine-grade/>
- [21] Expandacraft. (2002). Recuperado el 11 de Diciembre de 2018, de <http://expandacraft.com/product/12-foot-paddlecat/>
- [22] Food and Agriculture organization of the United Nations. (2009). *Prácticas de seguridad relativas a la estabilidad de buques pesqueros pequeños*. Recuperado el 11 de Febrero de 2019, de <http://www.fao.org/3/i0625s/i0625s00.htm>

- [23] Fuerte Cases. (2018). *Seahorse protective equipment cases*. Recuperado el 11 de Diciembre de 2018, de <http://www.seahorsecases.com/Seahorse-SE540-Medium-Waterproof-Protective-Equipment-Storage-Shipping-Case.html>
- [24] Gakstatter, E. (2015). *GPS World*. Recuperado el 11 de Diciembre de 2018, de <https://www.gpsworld.com/what-exactly-is-gps-nmea-data/>
- [25] García, Á. F. (2 de Marzo de 2015). *Curso interactivo de Física en internet*. Recuperado el 28 de Noviembre de 2018, de <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/fluidos/reynolds/reynolds.html>
- [26] Girdhar, Y., Xu, A., Dey, B. B., Meghjani, M., Shkurti, F., Rekleitis, I., & Dudek, G. (2011, September). MARE: Marine autonomous robotic explorer. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011 IEEE/RSJ International Conference on* (pp. 5048-5053). IEEE.
- [27] Gómez, F. (2015). Diseño , construcción y puesta en marcha de una base móvil omnidireccional para el laboratorio ARCOS-lab. Recuperado de: <http://eie.ucr.ac.cr/index.php/investigacion/graduacion/licenciatura/>
- [28] Griffin, J. (1982). DC motors. *Electronics and Power*, 28(i), 109. Recuperado de: <http://doi.org/10.1049/ep.1982.0037>
- [29] Heisler, P. Glibert, D. Burkholder, J. Anderson, W. Cochlan, W. Dennison, Q. Dortch, C. Gobler, C. Heil, E. Humphries, A. Lewitus, R. Magnien, H. Marshall, K. Sellner, D. Stockwell, D. Stoecker, and M. Suddleson, “Eutrophication and harmful algal blooms: A scientific consensus,” *Harmful Algae*, vol. 8, no. 1, pp. 3-13, 2008.
- [30] Hitz, G., Pomerleau, F., Garneau, M. E., Pradalier, C., Posch, T., Pernthaler, J., & Siegwart, R. Y. (2012). Autonomous inland water monitoring: Design and application of a surface vessel. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 19(1), 62-72.
- [31] Hussein, J. (s.f.). *Water Treatment*. Sanitary and Environmental Engineering. Recuperado el

11 de febrero de 2019 de

[http://qu.edu.iq/el/pluginfile.php/86794/mod\\_resource/content/1/Lec%201.9.pdf](http://qu.edu.iq/el/pluginfile.php/86794/mod_resource/content/1/Lec%201.9.pdf)

- [32] JB Weld. (s.f.). *JB Weld products: Black Silicones*. Recuperado el 12 de Diciembre de 2018, de JB Weld: <https://www.jbweld.com/products/black-silicone>
- [33] Kalkomey Enterprises. (2018). *Boat Pennsylvania courses*. Recuperado el 11 de Diciembre de 2018, de [https://www.boat-ed.com/pennsylvania/studyGuide/Hull-Types-and-How-They-Operate/101039\\_101039011/](https://www.boat-ed.com/pennsylvania/studyGuide/Hull-Types-and-How-They-Operate/101039_101039011/)
- [34] Keeping, S. (27 de Marzo de 2013). *Introducción al control del motor CC sin escobillas*. Recuperado el 2019 de Enero de 25, de Digi-Key Electronics: <https://www.digikey.com/es/articles/techzone/2013/mar/an-introduction-to-brushless-dc-motor-control>
- [35] Lawrence, D. A. (1993). Stability and transparency in bilateral teleoperation. *IEEE transactions on robotics and automation*, 9(5), 624-637.
- [36] MacMaster-Carr Supply Company. (2012). *MacMaster-Carr*. Recuperado el 15 de Febrero de 2019, de <https://www.mcmaster.com/threaded-inserts>
- [37] Masmar. (s.f.). *Nautica: Conceptos básicos para la compra de una embarcación a motor*». Recuperado el 25 de Enero de 2019, de Masmar: tu portal náutico en internet: <http://www.masmar.net/esl/N%C3%A1utica/Barcos-a-Motor/Conceptos-b%C3%A1sicos-para-la-compra-de-una-embarcaci%C3%B3n-a-motor/La-Carena.-Los-Redanes>
- [38] MathWorks. (s.f.). *MathWorks*. Recuperado el 11 de Diciembre de 2018, de <https://www.mathworks.com/help/robotics/examples/exchange-data-with-ros-publishers.html;jsessionid=482cade0933dcfd0c98186b75bfe>
- [39] MecanicAPP. *MecanicAPP, Modulación por ancho de pulso*. Recuperado el 11 de Diciembre de 2018, de <http://mecanicappweb.com/modulacion-de-ancho-de-pulso-pwm/>
- [40] Mendoza, S. G. (2012). *Grabcad Community*. Recuperado el 17 de Noviembre de 2018, de <https://grabcad.com/library/gps-u-blox>



- [41] MIT. (s.f.). *Seaswarm*. Recuperado el 15 de Diciembre de 2018, de Senseable City Lab: <http://senseable.mit.edu/seaswarm/>
- [42] Montemerlo, M., Thrun, S., Koller, D., & Wegbreit, B. (2002). FastSLAM: A factored solution to the simultaneous localization and mapping problem. *Aaai/iaai*, 593598.
- [43] Morrison, F. A. (2013). Data correlation for drag coefficient for sphere. *Department of Chemical Engineering, Michigan Technological University, Houghton, MI*.
- [44] National Instruments. (2014). *National Instruments*. Recuperado el 11 de Diciembre de 2018, <http://digital.ni.com/public.nsf/allkb/AA1BDEA4AA224E3E86257CE400707527>
- [45] Nautica y Deportes Tenerife. (2014). *Nautica y Deportes Tenerife: ¿Por qué la forma del casco del barco es importante?* Recuperado el 25 de Enero de 2019, de Nautica y Deportes Tenerife: <https://www.nauticaydeportes.com/fr/nouvelles/espanol-por-que-la-forma-del-casco-del-barco-es-importante/>
- [46] Nuño, E. (15 de septiembre de 2008). La teleoperación de robots y. *La Gaceta UDG*, pág. 16. Recuperado el 25 de noviembre de 2018, de [http://www.gaceta.udg.mx/Hemeroteca/paginas/542/G542\\_COT%2016.pdf](http://www.gaceta.udg.mx/Hemeroteca/paginas/542/G542_COT%2016.pdf)
- [47] Open Source Robotics Foundation. (2007). *ROS.org*. Recuperado el 12 de Diciembre de 2018, de <http://wiki.ros.org/Documentation>
- [48] Open Source Robotics Foundation. (2007). *ROS.org*. Recuperado el 15 de enero de 2019, de ROS tutorials: <http://wiki.ros.org/ROS/Tutorials/UsingRqtconsoleRoslaunch>
- [49] Plasticbages Industrial. (2012). *Fabricación y comercialización de plásticos técnicos*. Recuperado el 1 de Noviembre de 2018
- [50] Quigley, M., Conley, K., Gerkey, B., Faust, J., Foote, T., Leibs, J., & Ng, A. Y. (2009, May). ROS: an open-source Robot Operating System. In *ICRA workshop on open source software*(Vol. 3, No. 3.2, p. 5).
- [51] Shkolnikov, V. M. (2014). *Hybrid Ship Hulls: Engineering Design Rationales*. Butterworth-Heinemann.

- [52] RACSO. (21 de mayo de 2014). *Modulación por ancho de pulso (PWM)*. Recuperado el 25 de enero de 2019, de Arduino UTFSM: <http://www.arduino.utfsm.cl/modulacion-por-ancho-de-pulso-pwm/>
- [53] Robosavvy Ltd. (2017). *RoboSavvy HotSwap PowerBoard 1.0*. Recuperado el 17 de Noviembre de 2018, de <https://robosavvy.com/store/robosavvy-hotswap-powerboard-1-0.html>
- [54] RC models Wiz. (s.f.). *RCmodelsWiz*. Recuperado el 20 de Noviembre de 2018, de <http://www.rcmodelswiz.co.uk/rc-guides/electric-rc-models-guide/electronic-speed-controllers-esc/>
- [55] Rituerto, A., Puig, L., & Guerrero, J. J. (2010, August). Visual slam with an omnidirectional camera. In *2010 International Conference on Pattern Recognition* (pp. 348-351). IEEE.
- [56] Tarjan, G. (2017). *Aeroyacht*. Recuperado el 28 de Noviembre de 2018, de Catamaran Stability: <http://www.aeroyacht.com/catamaran-learning-center-2/catamaran-stability/>
- [57] Torres, H. (09 de Octubre de 2017). *HETPRO*. Recuperado el 11 de Diciembre de 2017, de <https://hetpro-store.com/TUTORIALES/que-es-un-relevador-o-rele/>
- [58] Young, H. D., Freedman, R. A., & Ford, A. L. (2009). *Física Universitaria* (Doceava ed., Vol. 1). Ciudad de Mexico: Pearson Education.

## Apéndices

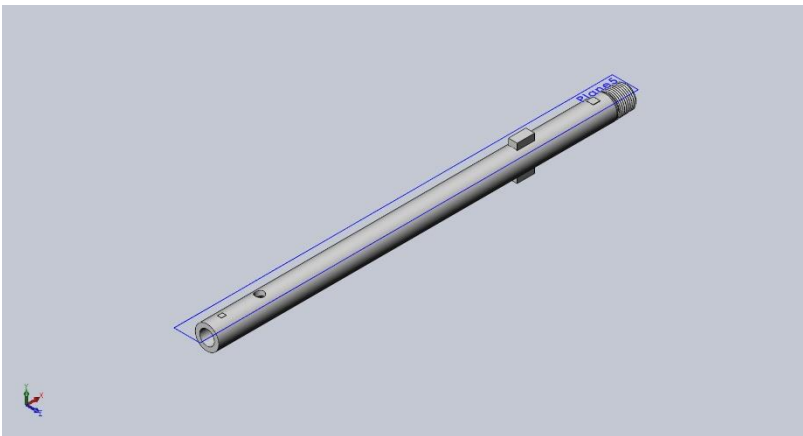
### Apéndice A.1 Glosario, abreviaturas y simbología

GPS: Sistema de posicionamiento global

VAAS: Vehículo acuático autónomo de superficie

VGR-Lab: Vision, Graphics and Robotics Laboratory

### Apéndice A.2 Simulación de esfuerzos en piezas



#### Simulation of Prop Support Pipe

Date: jueves, 2 de noviembre de 2018

Designer: Solidworks

Study name: Static 1

Analysis type: Static

## Description

No Data

## Table of Contents

Description	92
Assumptions	93
Model Information	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Study Properties	93
Units	93
Material Properties	94
Loads and Fixtures	94
Connector Definitions	94
Contact Information	95
Mesh information	95
Sensor Details	95
Resultant Forces	96
Beams	96
Study Results	96
Conclusion	102

# Assumptions

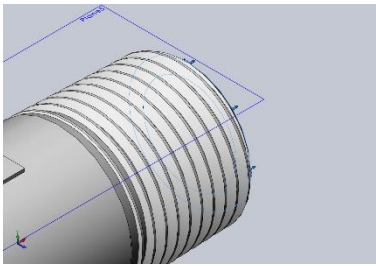
## Study Properties

<b>Study name</b>	Static 1
<b>Analysis type</b>	Static
<b>Mesh type</b>	Solid Mesh
<b>Thermal Effect:</b>	On
<b>Thermal option</b>	Include temperature loads
<b>Zero strain temperature</b>	298 Kelvin
<b>Include fluid pressure effects from SOLIDWORKS Flow Simulation</b>	Off
<b>Solver type</b>	FFEPlus
<b>Inplane Effect:</b>	Off
<b>Soft Spring:</b>	Off
<b>Inertial Relief:</b>	Off
<b>Incompatible bonding options</b>	Automatic
<b>Large displacement</b>	On
<b>Compute free body forces</b>	On
<b>Friction</b>	Off
<b>Use Adaptive Method:</b>	Off
<b>Result folder</b>	SOLIDWORKS document (C:\Users\Ally\Desktop\Allywoow\Proyecto Graduación\Solidworks things)

## Units

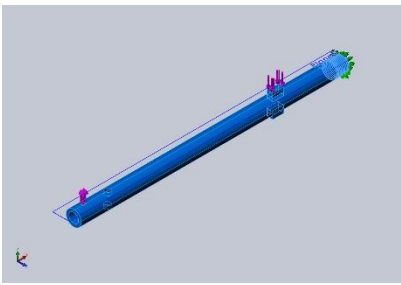
<b>Unit system:</b>	English (IPS)
<b>Length/Displacement</b>	in
<b>Temperature</b>	Fahrenheit
<b>Angular velocity</b>	Hertz
<b>Pressure/Stress</b>	psi

## Loads and Fixtures

Fixture name	Fixture Image	Fixture Details		
Fixed-2		<b>Entities:</b>	<b>1 face(s)</b>	
		<b>Type:</b>	<b>Fixed Geometry</b>	
Components		Resultant Forces		
	X	Y	Z	Resultant
Reaction force(lbf)	-5.57426e-06	56.4554	4.18069e-05	56.4554
Reaction Moment(lbf.in)	0	0	0	0

<L_LdName/>	<Label_LoadImage/>	<Label_LoadDetails/>
<LoadName/>	<Image_Load/>	<Details_Load/>

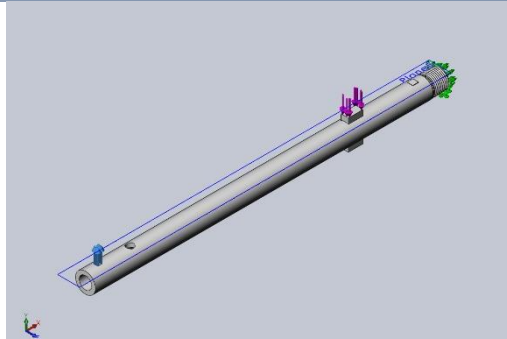
## Material Properties

Model Reference	Properties	Components
	Name: <b>PVC Rigid</b> Model type: <b>Linear Elastic Isotropic</b> Default failure criterion: <b>Unknown</b> Tensile strength: <b>6903.04 psi</b> Elastic modulus: <b>349541 psi</b> Poisson's ratio: <b>0.3825</b> Mass density: <b>0.0469655 lb/in^3</b> Shear modulus: <b>125704 psi</b>	<b>SolidBody 1(Cut-Extrude5[1])(Prop Support Pipe),</b> <b>SolidBody 3(Cut-Extrude5[2])(Prop Support Pipe),</b> <b>SolidBody 5(Boss-Extrude4)(Prop Support Pipe)</b>
Curve Data:N/A		

## Connector Definitions

No Data

## Contact Information

Contact	Contact Image	Contact Properties
Global Contact		<b>Type:</b> Bonded <b>Components:</b> 1 component(s) <b>Options:</b> Compatible mesh

## Mesh information

<b>Mesh type</b>	Solid Mesh
<b>Mesher Used:</b>	Standard mesh
<b>Automatic Transition:</b>	Off
<b>Include Mesh Auto Loops:</b>	Off
<b>Jacobian points</b>	4 Points
<b>Element Size</b>	0.137413 in
<b>Tolerance</b>	0.00687063 in
<b>Mesh Quality Plot</b>	High

## Sensor Details

No Data

## Resultant Forces

### Reaction forces

Selection set	Units	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultant
Entire Model	lbf	-5.57426e-06	56.4554	4.18069e-05	56.4554

### Reaction Moments

Selection set	Units	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultant
Entire Model	lbf.in	0	0	0	0

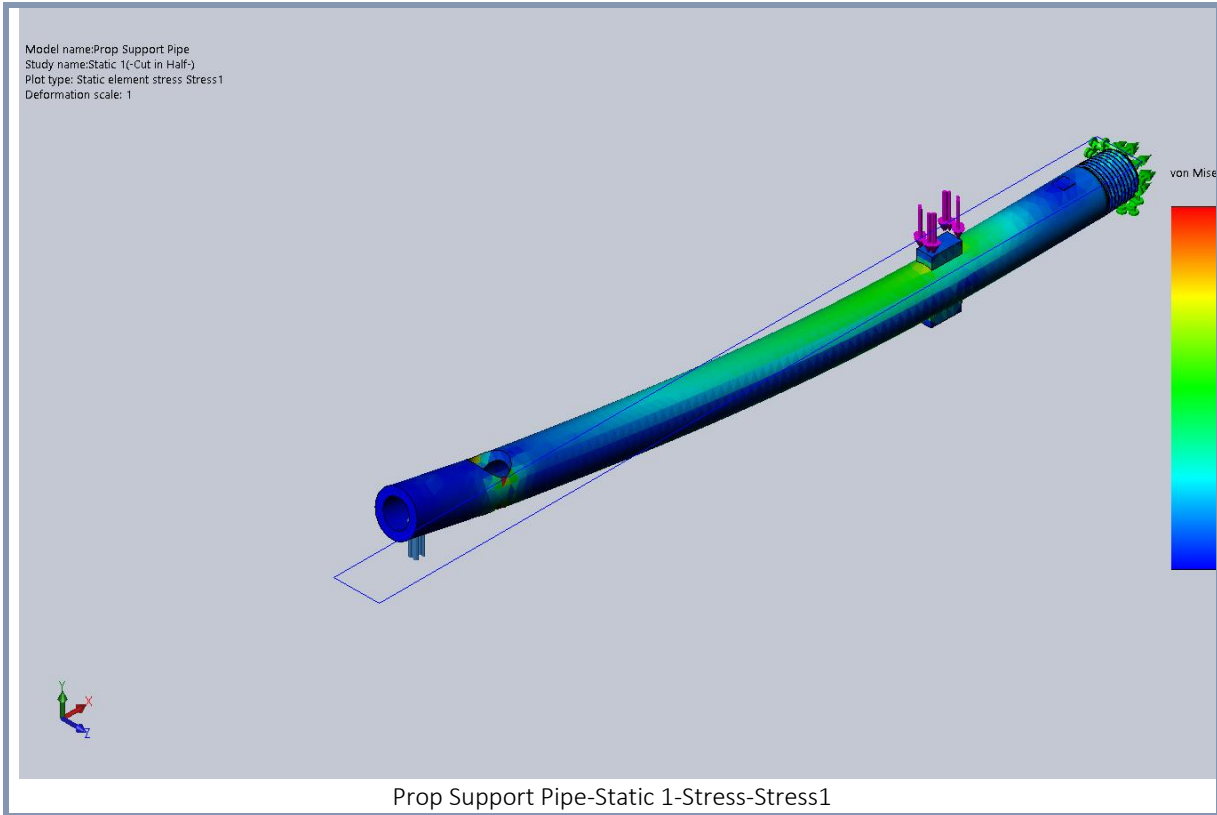
## Beams

No Data

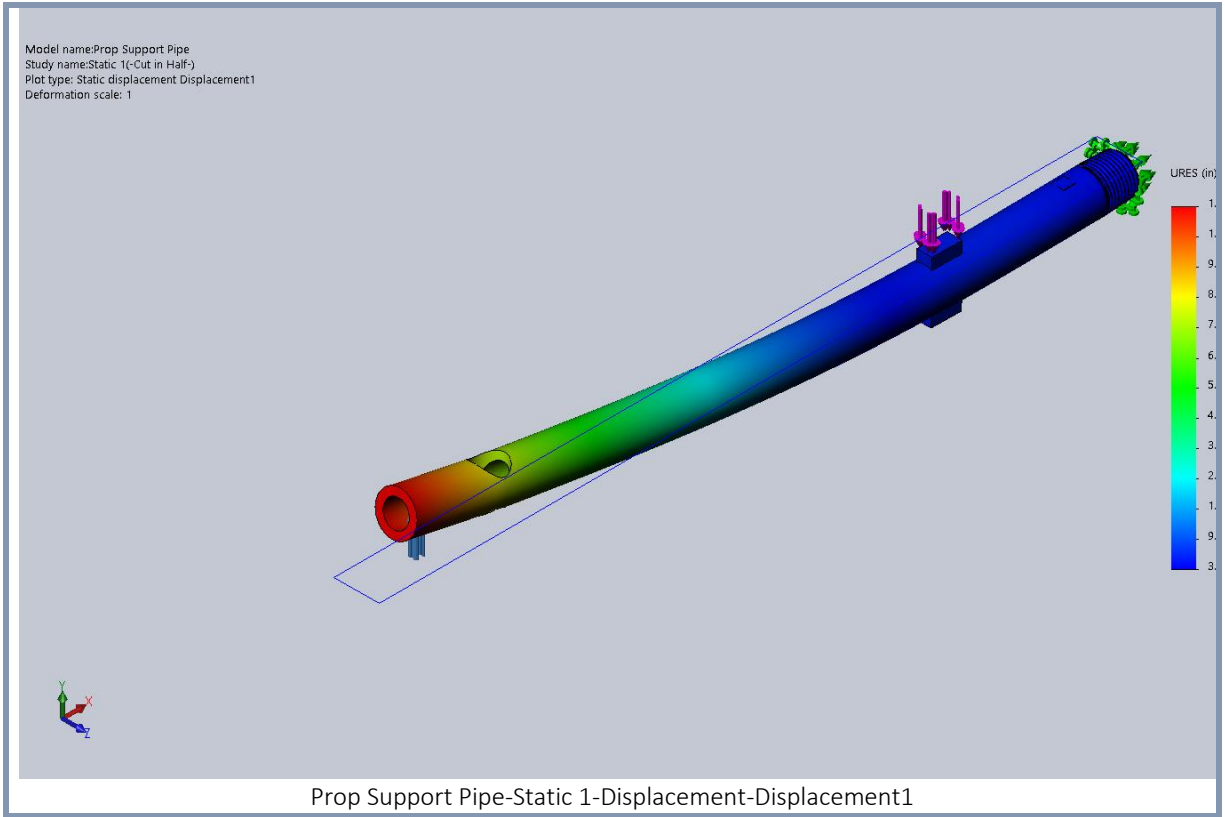
## Study Results

Name	Type	Min	Max
Stress1	VON: von Mises Stress	7.715e+00 psi Element: 8240	6.579e+03 psi Element: 8447

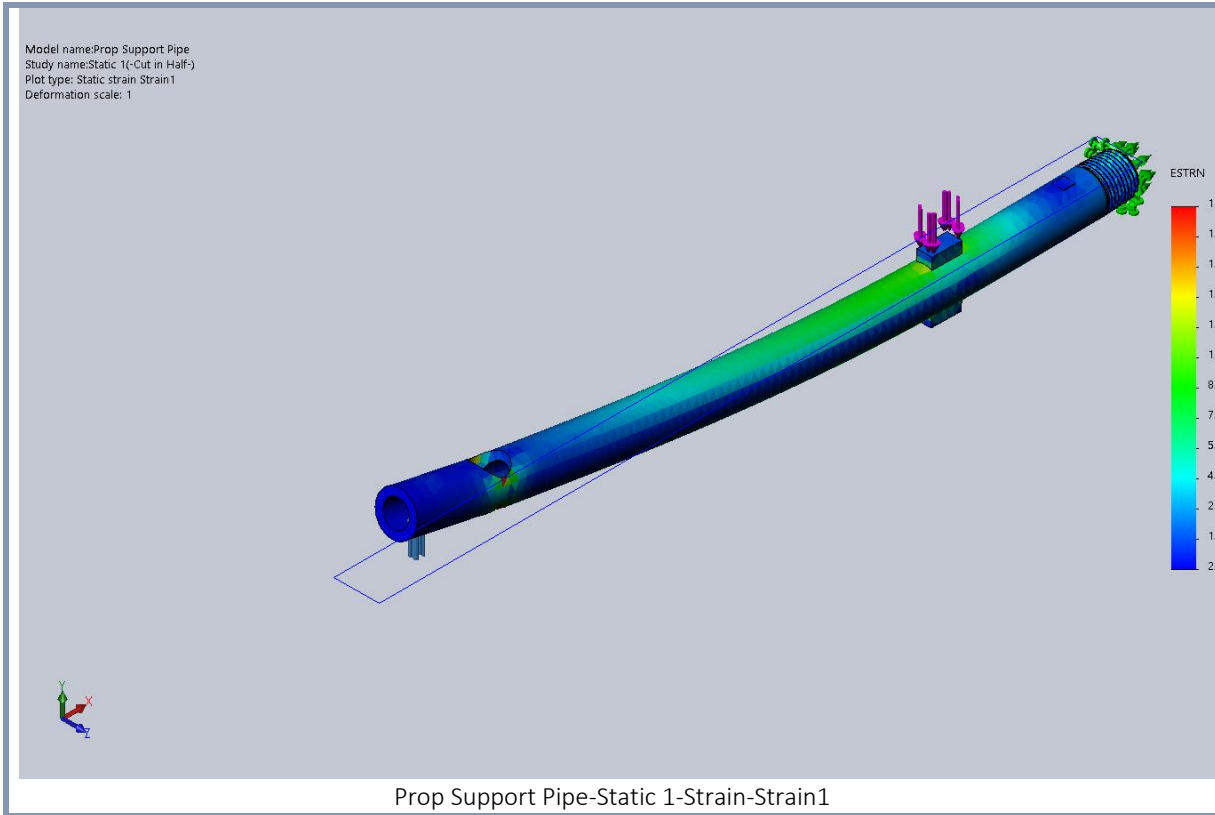




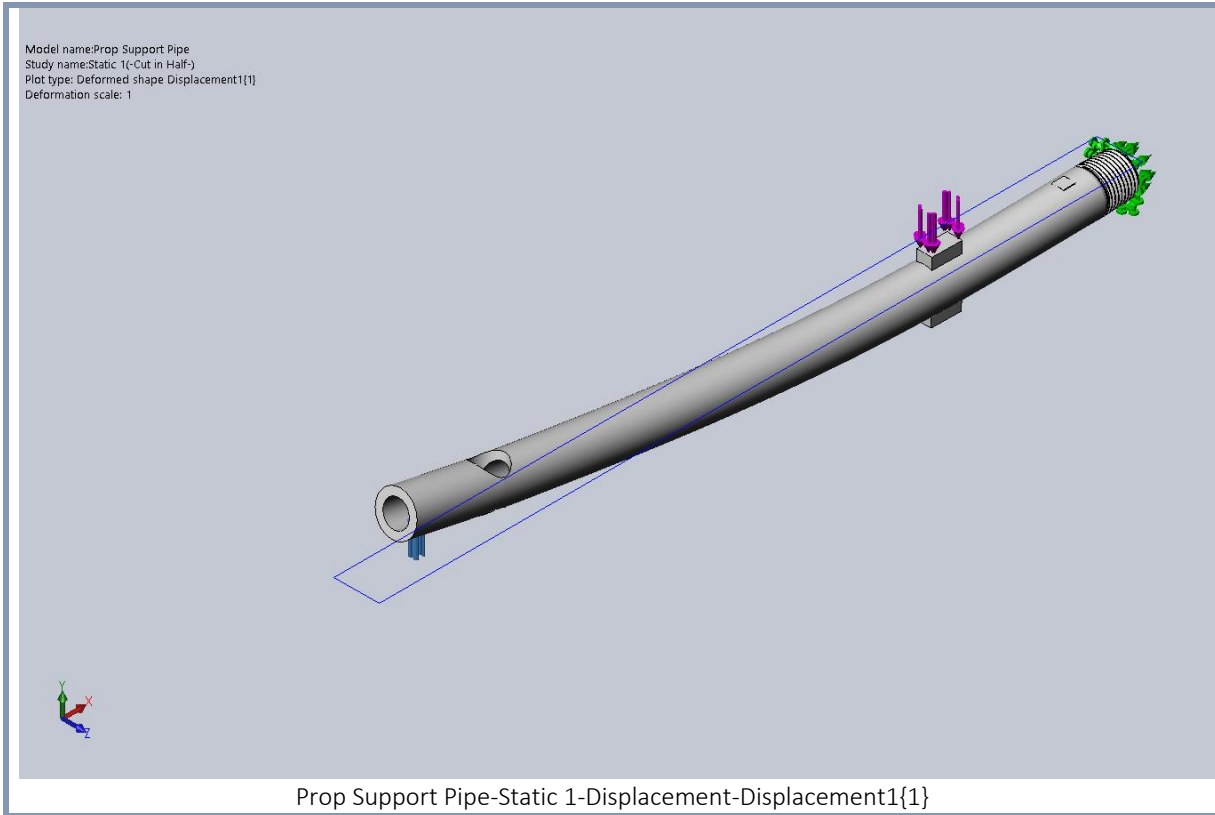
Name	Type	Min	Max
Displacement1	URES: Resultant Displacement	0.000e+00 in Node: 1521	1.111e+00 in Node: 5506



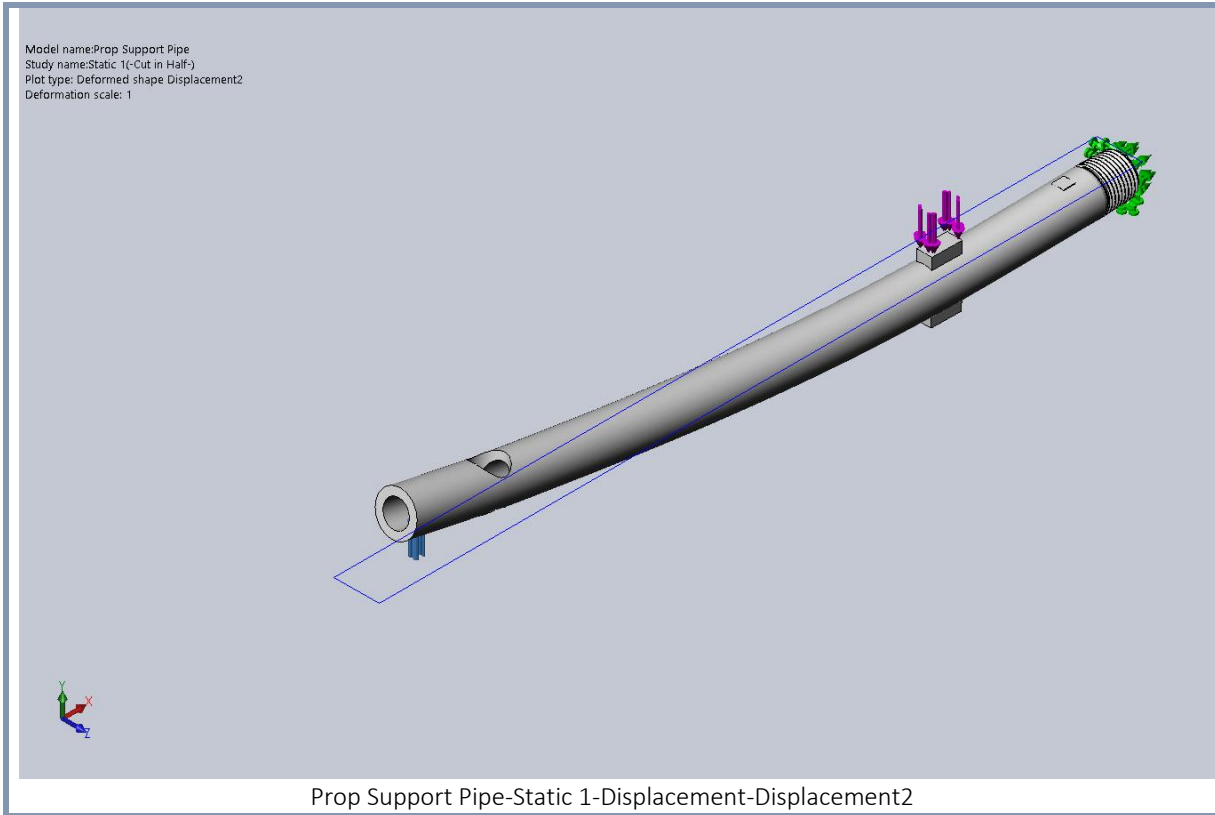
Name	Type	Min	Max
Strain1	ESTRN: Equivalent Strain	2.034e-05 Element: 8240	1.735e-02 Element: 8447



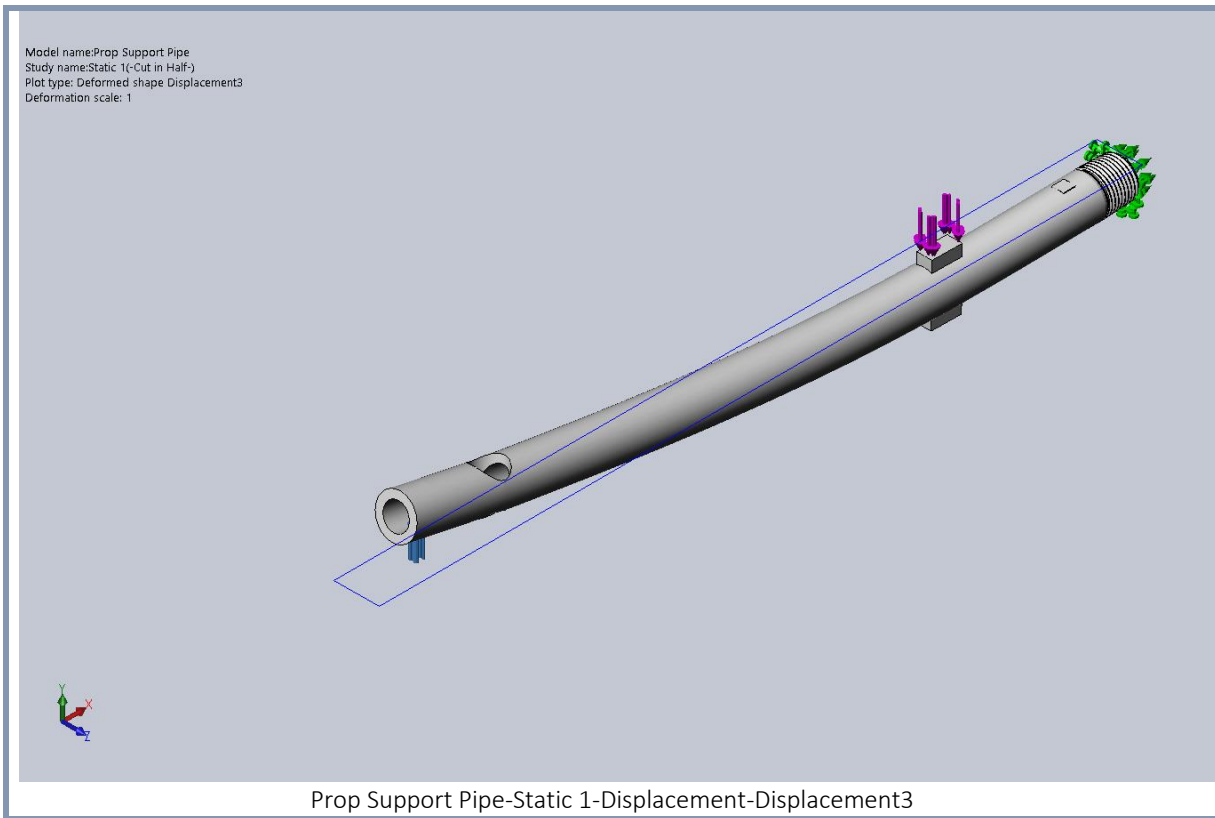
Name	Type
Displacement1{1}	Deformed shape



Name	Type
Displacement2	Deformed shape



Name	Type
Displacement3	Deformed shape



## Conclusion

## Apendice A.3 Planos de piezas diseñadas

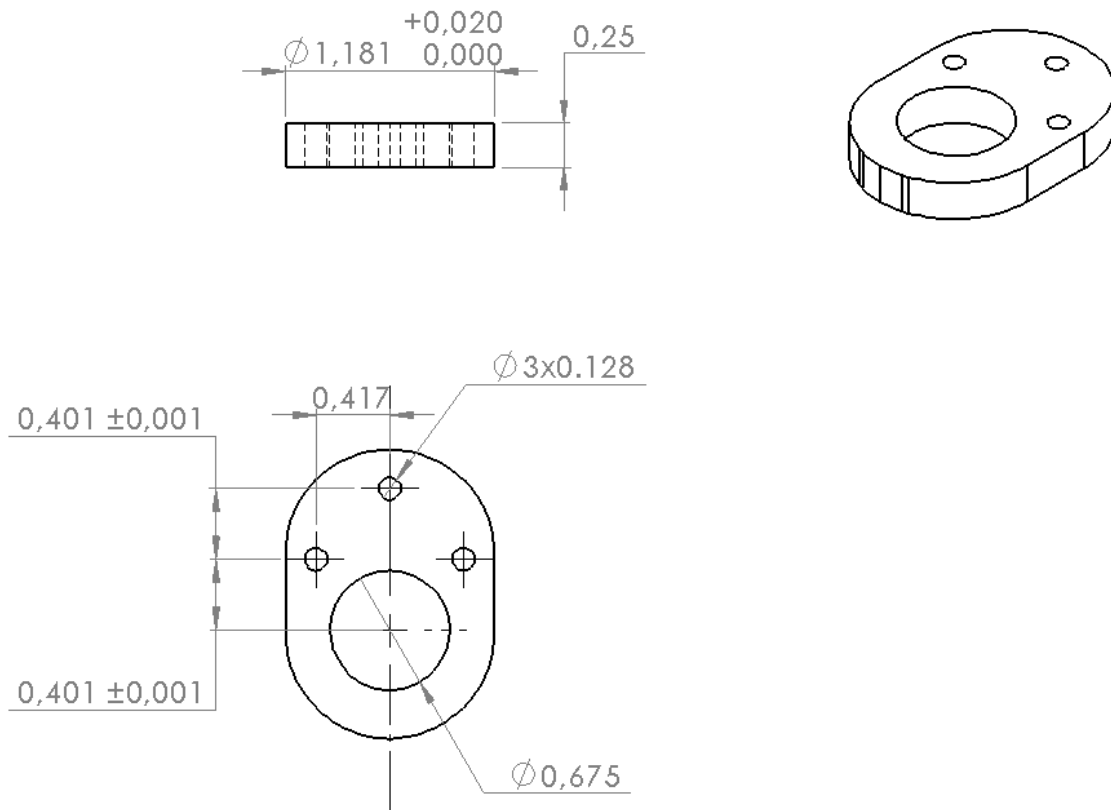
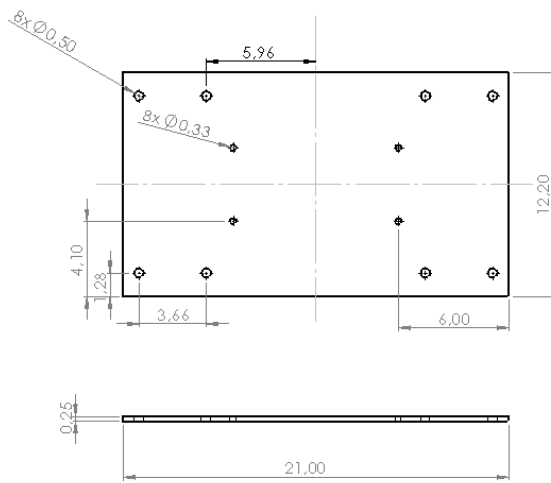


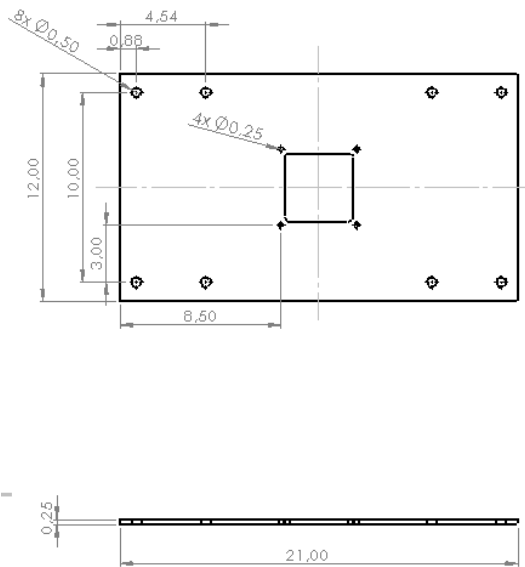
Figura A3.1 Planos de la unión de las turbinas a la estructura, unidades: in



Material: Plástico HDPE grado marino

Tolerancia general: 0.01

*Figura A3.2* Planos de la plataforma para la caja de componentes, unidades: in

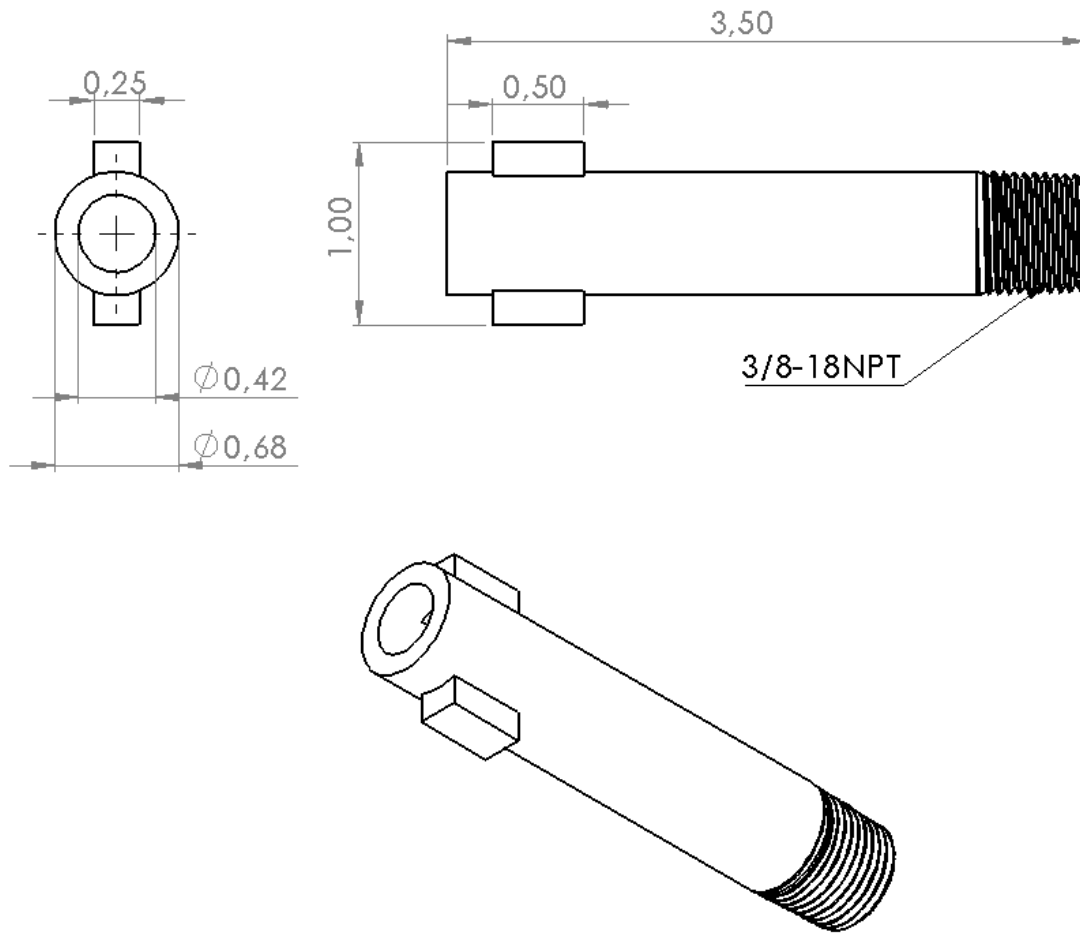


Material: Plástico HDPE

Tolerancia general: 0.01

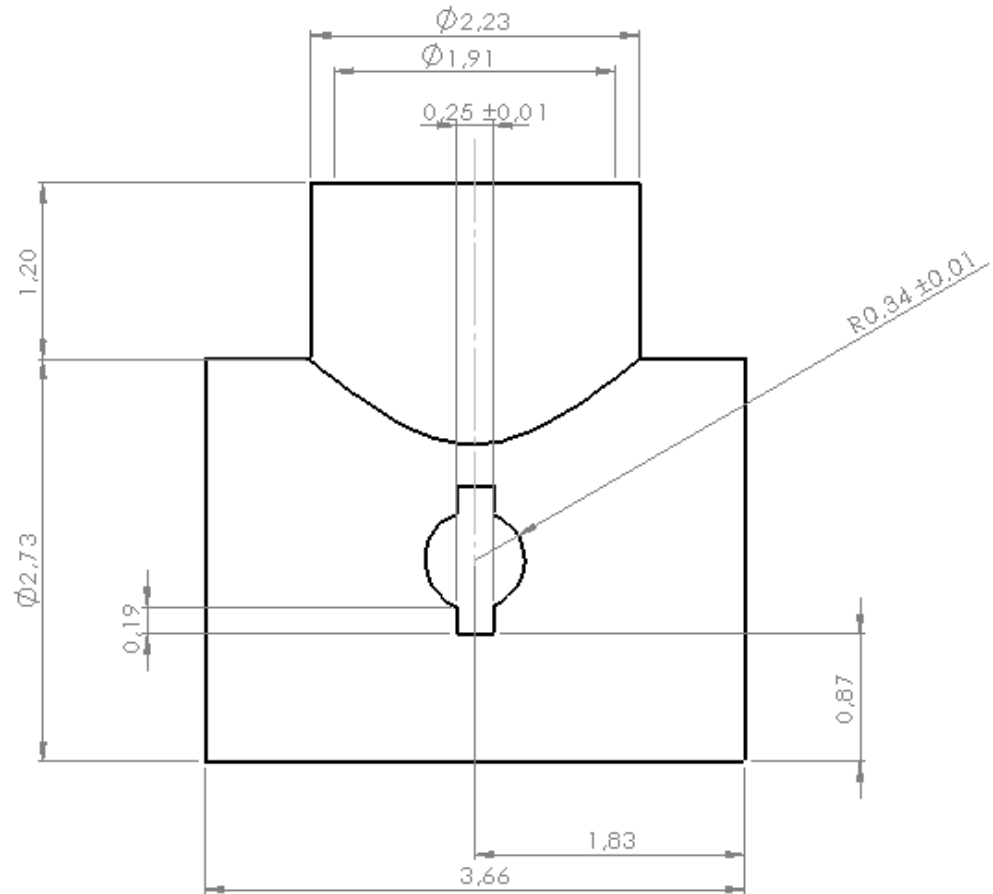
*Figura A3.3* Planos de la plataforma para el sensor de profundidad, unidades: in





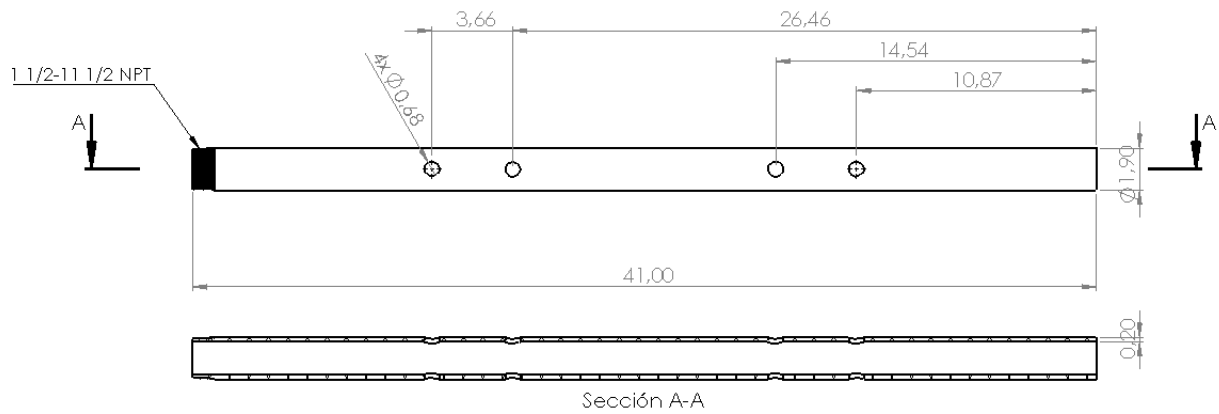
Nota: Realizado a partir de Tubo PVC de 4in roscado sólo en un lado

Figura A3.4 Planos del tubo pasante, unidades: in



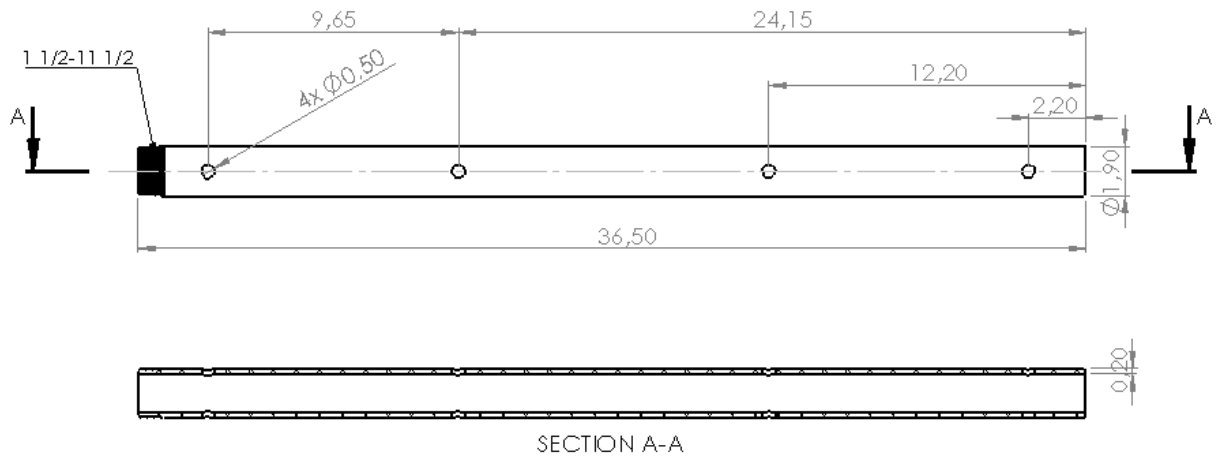
Nota: Realizado a partir de una T de material PVC

Figura A3.5 Planos de la conexión tipo T, unidades: in



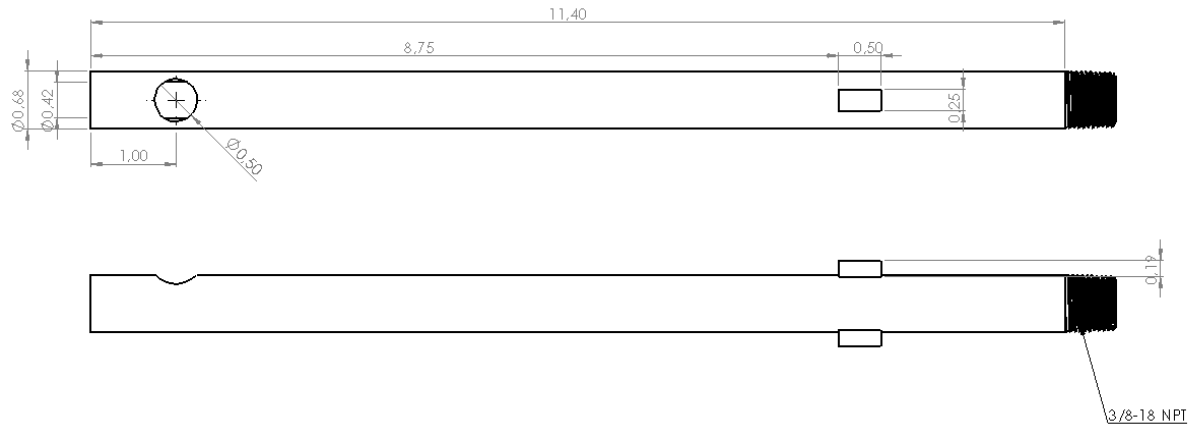
Nota: Realizado a partir de un Tubo PVC de 60in, roscado en ambos lados.

*Figura A3.6 Planos del tubo estructural, unidades: in*



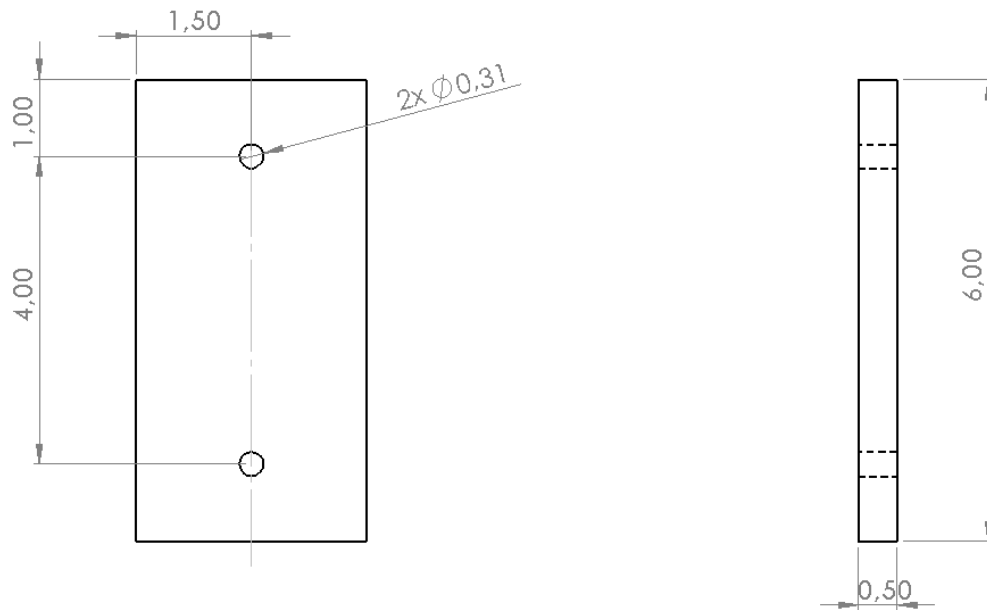
Nota: Realizado a partir de un Tubo PVC de 60in, roscado en ambos lados.

*Figura A3.6 Planos del tubo estructural 2, unidades: in*



Nota: Realizado a partir de un tubo PVC de 12in roscado sólo a un lado.

*Figura A3.7* Planos de la conexión al motor, unidades: in



Material: Nylon

*Figura A3.8* Sujetador para la caja de componentes, unidades: in

## Apéndice A.4 Código utilizado para el Arduino

```

/* *This code is used for controlling the servoes * It receive the instruction about the speed of servo from Raspberry PI *
 * It send back the messages about status of servo to Raspberry PI, including the mode (TELEOP, CONTROLLING, DEADMAN) and the speed. * */
#include <Servo.h>
#include <ros.h>
#include <std_msgs/String.h>
#include <std_msgs/Bool.h>
#include <std_msgs/Int8.h>
#include <std_msgs/UInt8MultiArray.h>
#include <std_srvs/SetBool.h> using std_srvs::SetBool;
#define forwardMax 1100
#define backwardMax 1900
#define Stop 1500
#define TeleMode 1250
#define ControlMode 1700
#define MinOfStop 1350
#define MaxOfStop 1650
/* * Callback functions declaration */
bool EnableCallback(const SetBool::Request &enable_rqst, SetBool::Response &enable_rsp);
void servoStateCallback(const std_msgs::UInt8MultiArray& msg);
/* * There are two messages published and two messages subscribed * driveStatus message is published telling PI about the current mode (TELEOP, CONTROLLING, DEADMAN) *
 * speedStatus message is published telling PI about the current speeds of servos, first is right servo, then left * enable message is subscribed to start Arduino *
**/*servoState message is subscribed to get the speed of the servoes,including two numbers ranging from * 0 to 180:
 * the first number is for the right,and the second number is for the left;
 * -100 means maximal forward speed, 0 means stop, +100 means maximal backward speed
std_msgs::String str_msg;
std_msgs::Int8 servoSpeedR;
std_msgs::Int8 servoSpeedL;
ros::Publisher driveStatus("driveStatus", &str_msg);
ros::Publisher speedStatusR("speedStatusR", &servoSpeedR);
ros::Publisher speedStatusL("speedStatusL", &servoSpeedL);
ros::ServiceServer<SetBool::Request, SetBool::Response> enable("arduinoEnable",&EnableCallback);
ros::Subscriber<std_msgs::UInt8MultiArray> servoState("servoState",&servoStateCallback);
ros::NodeHandle nh;
*/
/*
 * Servo controlling related parameter declaration

```

Figura A4.1 Código utilizado para el Arduino parte uno

```

/*
 * Servo controlling related parameter declaration
 * MyservoR is the servo on the right side, MyservoL is the servo on the left side
 * ServoInR is the pin number of the right servo, ServoInL is the pin number of the left servo
 * pwmvalue1 is used to record the PWM value from right-left control channel
 * pwmvalue2 is used to record the PWM value from forward-backward control channel
 * SpeedR is the PWM value of the right servo, SpeedL is for the left
 * PWMIn_RL is the pin number of right-left control channel, PWMIn_FB is for forward-backward
 * control, PWMIn_MODE is for mode switch channel
 * Startarduino is used to strat the loop()
*/
Servo MyservoR;
Servo MyservoL;
const int ServoInR = 9;
const int ServoInL = 10;
int pwmvalue1 = 0;
int pwmvalue2 = 0;
const int PWMIn_RL = 3;
const int PWMIn_FB = 5;
const int PWMIn_MODE = 6;
int SpeedR = 90;
int SpeedL = 90;
bool Startarduino = false;
/*
 * mode status message
 */
char control[] = "GPSnav";
char deadman[] = "deadman";
char teleop[] = "teleoperation";
/*
 * Callback function
 */
bool EnableCallback(const SetBool::Request &enable_rqst, SetBool::Response &enable_rsp)
{
Startarduino = enable_rqst.data;

```

Figura A4.2 Código utilizado para el Arduino parte dos

```

{
Startarduino = enable_rqst.data;
return true;
}
void servoStateCallback(const std_msgs::UInt8MultiArray& msg)
{
MyservoR.writeMicroseconds(map(msg.data[0],-100,100,forwardMax,backwardMax));
MyservoL.writeMicroseconds(map(msg.data[1],-100,100,forwardMax,backwardMax));
}
void doArduino();
void setup()
{
nh.initNode();
nh.advertise(driveStatus);
nh.advertise(speedStatusR);
nh.advertise(speedStatusL);
nh.advertiseService(enable);
nh.subscribe(servoState);
MyservoR.attach(ServoInR);
MyservoL.attach(ServoInL);
pinMode(PWMIn_RL, INPUT);
pinMode(PWMIn_FB, INPUT);
pinMode(PWMIn_MODE, INPUT);
pinMode(ServoInR, OUTPUT);
pinMode(ServoInL, OUTPUT);
}
void loop()
{
nh.spinOnce();
delay(1000);
if(Startarduino)
doArduino();
}
void doArduino()
{

```

*Figura A4.3* Código utilizado para el Arduino parte tres

```

void doArduino()
{
  /*****remote control Mode*****/
  if( pulseIn(PWMIn_MODE,HIGH) > ControlMode)
  {
    /*****right-left control*****/
    pwmvalue1 = pulseIn(PWMIn_RL,HIGH);
    if(pwmvalue1 < MinOfStop) /*turn right*/
    {
      SpeedR = forwardMax;
      SpeedL = Stop;
      MyservoR.writeMicroseconds(SpeedR);
      MyservoL.writeMicroseconds(SpeedL);
    }else if(pwmvalue1 > MaxOfStop) /*turn left*/
    {
      SpeedL = forwardMax;
      SpeedR = Stop;
      MyservoR.writeMicroseconds(SpeedR);
      MyservoL.writeMicroseconds(SpeedL);
    }
    /*****forward-back control*****/
    pwmvalue2 = pulseIn(PWMIn_FB,HIGH);
    if(pwmvalue2 < MinOfStop) /*forward*/
    {
      SpeedR = pwmvalue2;
      SpeedL = pwmvalue2;
      MyservoR.writeMicroseconds(SpeedR);
      MyservoL.writeMicroseconds(SpeedL);
    }else if(pwmvalue2 > MaxOfStop) /*backward*/
    {
      SpeedR = pwmvalue2;
      SpeedL = pwmvalue2;
      MyservoR.writeMicroseconds(SpeedR);
      MyservoL.writeMicroseconds(SpeedL);
    }else /*stop*/

```

*Figura A4.4* Código utilizado para el Arduino parte cuatro

```

MyservoL.writeMicroseconds(SpeedL);
}else /*stop*/
{
  if(pwmvalue1 > MinOfStop && pwmvalue1 <MaxOfStop)
  {
    SpeedR = Stop;
    SpeedL = Stop;
    MyservoR.writeMicroseconds(SpeedR);
    MyservoL.writeMicroseconds(SpeedL);
  }
  /*****publish driveStatus message*****/
  str_msg.data = teleop;
  driveStatus.publish (&str_msg);
  servoSpeedR.data = map(SpeedR, forwardMax, backwardMax, -100,100);
  speedStatusR.publish (&servoSpeedR);
  servoSpeedL.data = map(SpeedL, forwardMax, backwardMax, -100,100);
  speedStatusL.publish (&servoSpeedL);
  nh.spinOnce();
  delay(1000);
}
/*****teleop Mode*****/
else if( pulseIn(PWMIn_MODE,HIGH) <TeleMode && pulseIn(PWMIn_MODE,HIGH) !=0)
{
  /*****publish driveStatus message*****/
  str_msg.data = control;
  driveStatus.publish (&str_msg);
  servoSpeedR.data = map(SpeedR, forwardMax, backwardMax, -100,100);
  speedStatusR.publish (&servoSpeedR);
  servoSpeedL.data = map(SpeedL, forwardMax, backwardMax, -100,100);
  speedStatusL.publish (&servoSpeedL);
  nh.spinOnce();
  delay(1000);
}
/***** deadmanMode *****/

```

*Figura A4.5* Código utilizado para el Arduino parte cinco

```

/***** deadmanMode *****/
else
{
/*****publish driveStatus message*****/
str_msg.data = deadman;
driveStatus.publish (&str_msg);
nh.spinOnce();
delay(1000);
}
}

```

Figura A4.6 Código utilizado para el Arduino parte seis

## Apéndice A.5 Memoria de cálculos

### Cálculos de duración de uso del VAAS

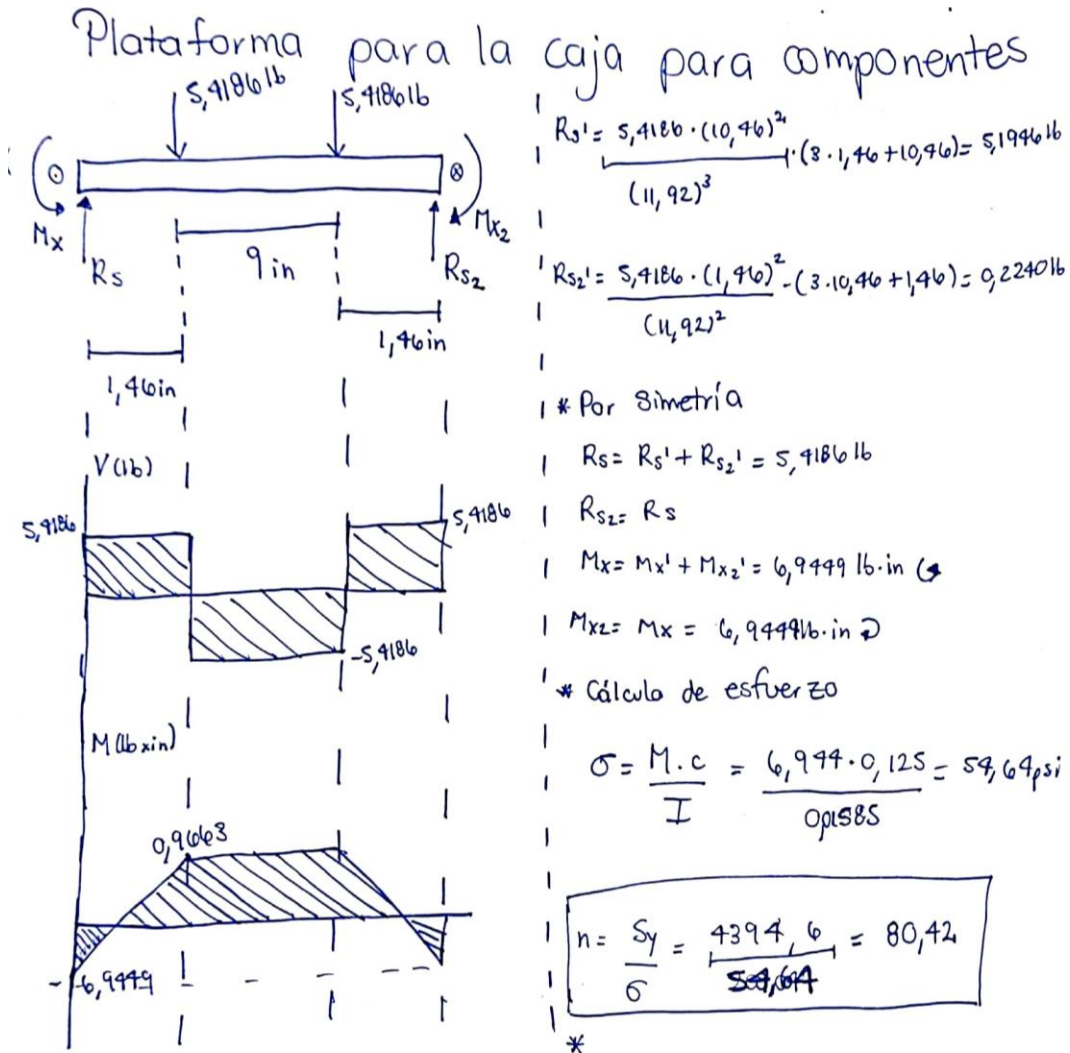
Según *Bluerobotics* el empuje máximo de cada motor es de 5.1 kgf, con consumo de 16 A. Dado que en velocidad máxima se mueve con aceleración igual a cero, el empuje es igual a la carga en cada motor. Suponiendo un comportamiento lineal para la aproximación del consumo de corriente en cada motor, se sabe que cada uno consume 16 amperios, por lo tanto, el consumo del sistema para ambos motores sería de 32 A. Tomando la capacidad de la batería de 10 Ah y la recomendación de no consumir mas del 80% de la carga, se calcula el tiempo aproximado de uso, despreciando el consumo de corriente de los componentes electrónicos:

$$\frac{10 \text{ Ah} * 0,8}{16 \text{ A}} = 0,5 \text{ h} = 30 \text{ min}$$

En el caso en el caso de que se sustituya la batería actual por una batería LiPo de 12000 mA y de 14,8 V se obtiene lo siguiente:

$$\frac{12 \text{ Ah} * 0,8}{16 \text{ A}} = 0,6 \text{ h} = 36 \text{ min}$$





Utilizando superposición y Ec. 3.10

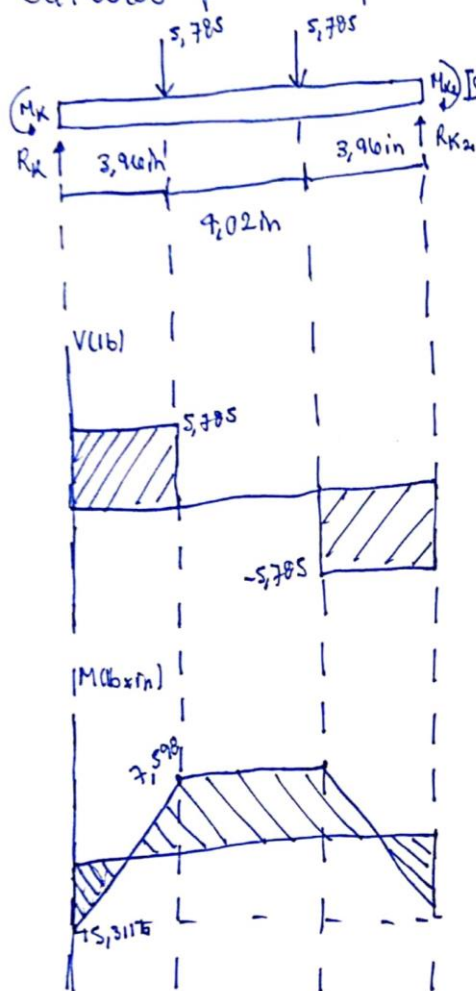
$$M_x' = \frac{5,918 \cdot 1,46 \cdot (9+1,46)^2}{(2 \cdot 1,46 + 9)^2} = 6,891 \text{ lb} \cdot \text{in}$$

$$M_{x2}' = \frac{5,918 \cdot 1,46^2 \cdot (9+1,46)}{(2 \cdot 1,46 + 9)^2} = 0,853 \text{ lb} \cdot \text{in}$$

Figura A5.1 Cálculos para la plataforma para la caja de componentes.

## Cálculos Mecánicos

Cálculos para la plataforma del sensor de Temperatura



$$M_{K2} = \frac{5,785 \cdot 3,96^2 \cdot 7,98}{(11,94)^2} = 5,078 \text{ lb}\cdot\text{m}$$

\* por simetría

$$R_K = R_{K1} + R_{K2} = 5,785 \text{ lb}$$

$$R_{K2} = R_K$$

$$M_K = M_{K1} + M_{K2} = 15,311 \text{ lb}\cdot\text{m}$$

$$M_{K2} = 15,311 \text{ lb}\cdot\text{m}$$

• Cálculo del esfuerzo

$$\sigma = \frac{M \cdot c}{I} = \frac{15,311 \cdot 0,125}{0,0625} = 30,622 \text{ psi}$$

$$h = \frac{S_y}{\sigma} = \frac{4394,6}{30,622} = 143,511$$

$$R_{K1} = \frac{5,785 \cdot (7,98)^2}{(11,94)^3} \cdot (3 \cdot 3,96 + 7,98)$$

$$= 4,298 \text{ lb}$$

$$R_{K2} = \frac{5,785 \cdot (3,96)^2}{(11,94)^3} \cdot (3 \cdot 7,98 + 3,96)$$

$$= 1,487 \text{ lb}$$

$$M_K = \frac{5,785 \cdot 3,96 \cdot 7,98^2}{(11,94)^2} = 10,233 \text{ lb}\cdot\text{m}$$

Figura A5.2 Cálculos para la plataforma para el sensor de temperatura.

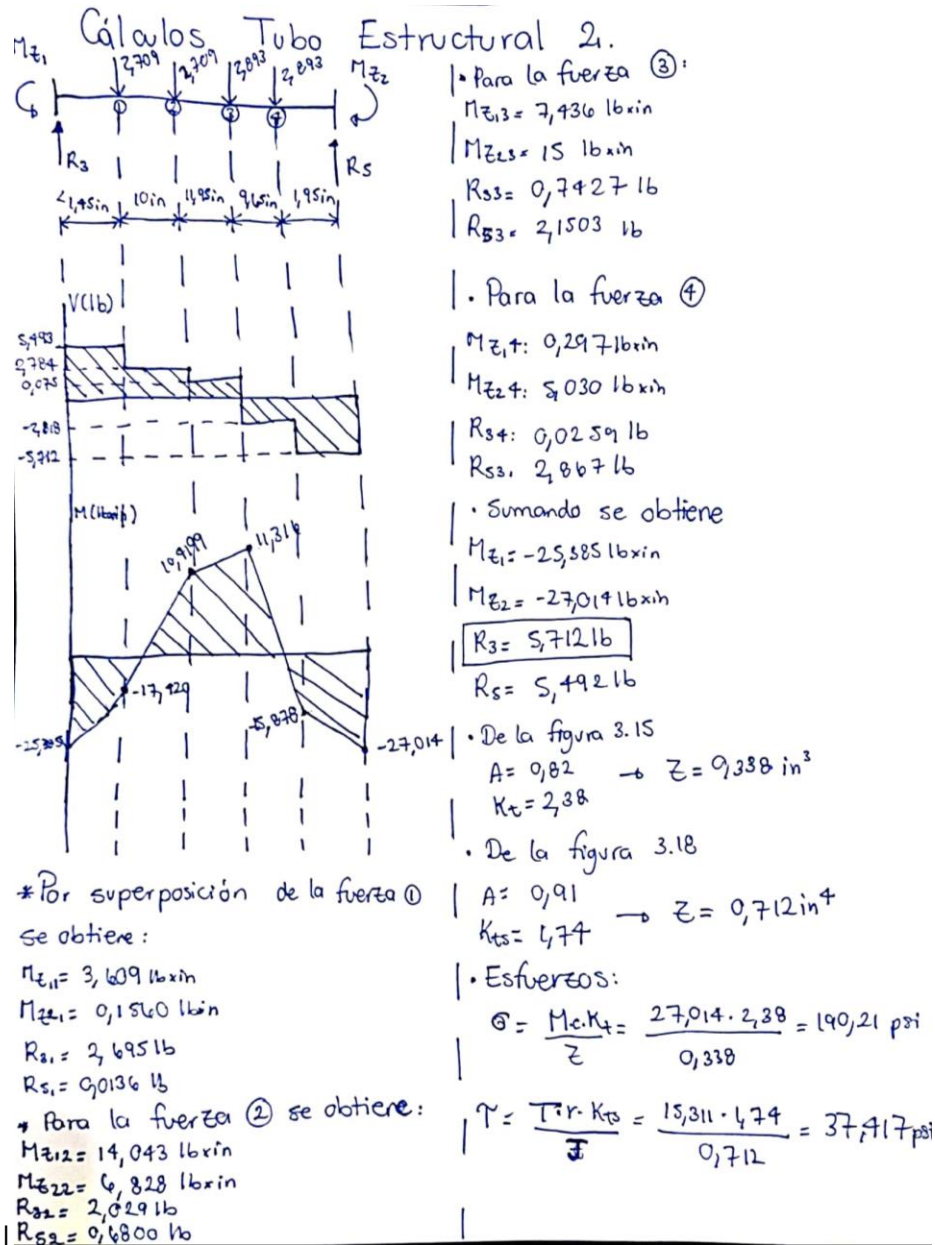


Figura A5.3 Cálculos para la Para el Tubo estructural 2, parte 1.

## Cálculos Tubo Estructural 2.

$$\sigma_a, \sigma_b = \frac{190,21}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{190,21}{2}\right)^2 + (37,917)^2}$$

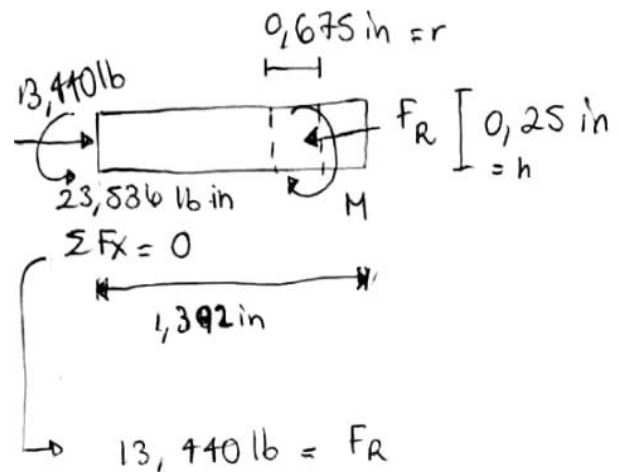
$$\Rightarrow \sigma_a = 207,456 \text{ psi}$$

$$\sigma_b = -6,749 \text{ psi}$$

$$\Rightarrow \frac{\sigma_a}{S_{ut}} - \frac{\sigma_b}{S_{uc}} = \frac{207,456}{701,840} - \frac{-6,749}{8676,158} = \frac{1}{n}$$

$$= \frac{1}{n} = 0,0299 \approx 0,03 \Rightarrow \boxed{n = \frac{1}{0,03} = 33,33}$$

Figura A5.4 Cálculos para la Para el Tubo estructural 2, parte 1.



$$M = 23,536 \text{ lb}\cdot\text{in}$$

\* Cálculo de esfuerzos

1- Esfuerzo de aplastamiento

$$\sigma_c = \frac{F_R}{r \times h} = \frac{13,440}{0,675 \cdot 0,25} = 79,64 \text{ psi}$$

• factor de seguridad

$$n = \frac{\sigma_c}{\sigma_a} = \frac{15000 \text{ psi}}{79,64 \text{ psi}} = 188,34$$

2- Esfuerzo normal

$$I = \frac{1b \cdot h^3}{12} = \frac{0,25^3 \cdot 1,181}{12} = 0,0095 \text{ in}^4$$

$$\sigma = \frac{M \cdot c}{I} = \frac{23,536 \cdot 0,125}{0,0015} = 309,7 \text{ psi}$$

• factor de seguridad

$$n = \frac{\sigma_t}{\sigma} = \frac{16000 \text{ psi}}{309,7 \text{ psi}} = 51,66$$

Figura A5.5 Cálculos para la unión de las turbinas a la estructura.

## Cálculos para la toma de mediciones

Se tomaron 3 muestras iniciales para el tiempo.

Tabla A5.1 *Medición de tiempo de duración en un recorrido de 60m*

Medición	Tiempo ( $\pm 0,01$ s)	Distancia ( $\pm 0,001$ m)
1	22,00	60
2	22,50	60
3	21,50	60
Promedio	22,00	60

Utilizando el criterio de dispersión, se obtiene lo siguiente:

$$D = x_{m\acute{a}x} - x_{m\acute{i}n} = 22,50 - 21,50 = 1$$

Donde se obtiene el siguiente porcentaje de dispersión:

$$T = 100 * \frac{D}{promedio} = 100 * \frac{1}{22} = 4,55\%$$

Dado que el porcentaje de dispersión es mayor que 2%, pero menor que 8%, según Posada Chinchilla, se procede a realizar 3 mediciones.

Tabla A5.2 *Medición de tiempo de duración en un recorrido de 60m 2.*

Medición	Tiempo ( $\pm 0,01$ s)	Distancia ( $\pm 0,001$ m)
1	22,00	60
2	22,50	60
3	21,50	60
4	22,55	60
5	21,75	60
6	21,70	60
Promedio	22,00	60

Se tomaron 3 muestras iniciales para el ángulo respecto al norte magnético.

Tabla A5.3 *Mediciones de tiempo de orientación*

Medición	Ángulo ( $\pm 0,1^\circ$ )
1	358
2	355
3	352
Promedio	355

Utilizando el criterio de dispersión, se obtiene lo siguiente:

$$D = x_{\max} - x_{\min} = 358 - 352 = 4$$

Donde se obtiene el siguiente porcentaje de dispersión:

$$T = 100 * \frac{D}{\text{promedio}} = 100 * \frac{4}{355} = 1,13\%$$

Dado que el porcentaje de dispersión es menor que 2%, se realizan solamente 3 mediciones.

## Cálculos para el disipador de calor



Home Applications Technology ▾ Resources ▾ Tech Blog About ▾

( $T_{junction}$  - maximum ambient temperature)

### Inputs (in yellow)

Heat Source Power (Q)  Watt  
 $T_{case}$  Max (manuf supplied)  Deg. C  
 Max Ambient Temperature  Deg. C  
 Delta - T (Thermal Budget)  Deg. C  
 Volumetric Thermal Resistance (Rv)

(refer to table at right)

**Estimated Heat Sink Volume**   $cm^3$

### Desired Heat Sink

#### Volume

Length  cm  
 Width  cm  
 Height (base plus fin)

**Desired Heat Sink Volume**   $cm^3$

**Your Desired Heat Sink Size is**   $cm^3$  bigger than required

Air Flow	Properties	Volumetric Thermal Resistance
Natural Convection	Little to no air / no noise	$R_v = 500 - 800$
1.0 m/s ~200 fpm	Gentle air, very low noise	$R_v = 150 - 250$
2.5 m/s ~500 fpm	Moderate air	$R_v = 80 - 150$
5.0 m/s ~1,000 fpm	Fast, loud air	$R_v = 50 - 80$

1. Smaller heat sinks of 100-200  $cm^3$  use values in the lower  $R_v$  range.
2. Larger heat sinks of 1,000  $cm^3$  use values in the upper  $R_v$  range.
3. Actual thermal resistance values may vary outside range based on several factors.
4. Model assumes fin design is optimized for a given air flow.

Figura A5.4 Cálculos para el disipador de calor. (Celsia, 2018)