



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y REDES**  
**INDUSTRIALES**

**“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE ROBOT**  
**SUBACUÁTICO AUTÓNOMO DOTADO DE UN SISTEMA DE**  
**NAVEGACIÓN INERCIAL”**

**Trabajo de titulación**

**Tipo:** DISPOSITIVO TECNOLÓGICO

Presentado para optar el grado académico de:

**INGENIERO EN ELECTRÓNICA EN CONTROL Y REDES**  
**INDUSTRIALES**

**AUTORES:** BYRON ISRAEL ROSERO GALEANO

THAYRON SAÚL MAZÓN OLIVO

**TUTOR:** ING. FAUSTO CABRERA MSC.

Riobamba – Ecuador

2019

**©2019, Byron Israel Rosero Galeano, Thayron Saúl Mazón Olivo**

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de los Autores.

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y REDES**  
**INDUSTRIALES**

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El trabajo de investigación: Tipo Dispositivo Tecnológico **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE ROBOT SUBACUÁTICO AUTÓNOMO DOTADO DE UN SISTEMA DE NAVEGACIÓN INERCIAL”**, de responsabilidad de los señores **BYRON ISRAEL ROSERO GALEANO** y **THAYRON SAÚL MAZÓN OLIVO**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Titulación, con lo cual queda autorizada su presentación.

<b>NOMBRE</b>	<b>FIRMA</b>	<b>FECHA</b>
<b>DR. WASHINGTON LUNA</b> <b>DECANO DE LA FACULTAD DE</b> <b>INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA</b>	_____	_____
<b>ING. FREDDY CHÁVEZ</b> <b>DIRECTOR DE LA ESCUELA DE</b> <b>INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN</b> <b>CONTROL Y REDES INDUSTRIALES</b>	_____	_____
<b>ING. FAUSTO CABRERA</b> <b>DIRECTOR DEL TRABAJO DE</b> <b>TITULACIÓN</b>	_____	_____
<b>ING. JOSE LUIS MORALES</b> <b>MIEMBRO DEL TRABAJO DE</b> <b>TITULACIÓN</b>	_____	_____

**Nosotros**, Byron Israel Rosero Galeano y Thayron Saúl Mazón Olivo, somos responsables de las ideas, criterios, doctrinas y resultados expuestos en esta Tesis y el patrimonio intelectual de la Tesis de Grado pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Byron Israel Rosero Galeano  
Thayron Saúl Mazón Olivo

## **DEDICATORIA**

Este trabajo se lo dedico primeramente a mi madre, por todo apoyo incondicional, emocional y consejos, siendo un pilar fundamental para mi formación personal y profesional, a mis hermanos que día a día me supieron dar ánimos y fuerzas, a todos mis amigos y familiares que de una manera u otra estuvieron presentes durante esta etapa de mi vida.

THAYRON

El trabajo realizado en el presente documento se lo dedico a mi padre Byron Rosero, quien ha sido un pilar fundamental en mi vida ya que con su guía, amor, cuidado y consejos ha hecho de mí un hombre de bien. Agradecido con el amor de vida María Tapia y a mis fieles compañeros Mingy y Mandy Rosero que me ha enseñado tantas cosas que me han llevado a crecer como persona, este logro no es solo mío sino también de ellos.

ISRAEL

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a mi madre que ha sido el pilar fundamental durante mi toda mi vida, inculcándome valores y principios, alentándome a seguir adelante y ayudándome a levantarme en esos momentos difíciles. A mi hermana Elizabeth por todos los momentos que compartimos. A mis amigos y familiares que estuvieron presentes durante mi formación brindándome su apoyo incondicional. A los docentes de la escuela que con su sabiduría lograron que yo esté en esta posición. Al ingeniero Fausto Cabrera por el apoyo brindado durante el trabajo de titulación.

THAYRON

Primeramente, agradecido con el Eterno que me ha permitido terminar esta etapa que es muy importante en mi formación académica y profesional. Agradezco a mi padre y a su esposa que siempre ha estado con su ayuda y amor incondicional en todo momento, a mi hermana y mi cuñado le doy las gracias por los cuidados, el cariño y por todo lo que ha sabido compartir conmigo, a mis hermanos que pese a las adversidades siempre supieron brindarme su compañía, a mis abuelitos les doy las gracias por inculcarme valores muy importantes que me han enseñado a valorar las pequeñas y grandes cosas que nos da la vida.

ISRAEL

## TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xiv
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xv
ÍNDICE DE ABREVIATURAS.....	xvi
RESUMEN.....	xviii
ABSTRACT.....	xix
INTRODUCCIÓN.....	1

### CAPÍTULO I

<b>1. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>4</b>
<b>1.1. Robótica .....</b>	<b>4</b>
<b>1.2. Robot .....</b>	<b>4</b>
<i>1.2.1. Clasificación de los robots .....</i>	<i>5</i>
<i>1.2.2. Aplicaciones de la robótica .....</i>	<i>6</i>
<b>1.3. Robots móviles.....</b>	<b>6</b>
<i>1.3.1. Métodos de posicionamiento para robot móviles .....</i>	<i>7</i>
<b>1.4. Robótica submarina .....</b>	<b>7</b>
<i>1.4.1. Clasificación de los robots submarinos.....</i>	<i>8</i>
<i>1.4.2. Aplicaciones de los robots submarinos.....</i>	<i>8</i>
<i>1.4.3. Elementos de los robots submarinos. ....</i>	<i>9</i>
<i>1.4.3.1. Cabina o casco.....</i>	<i>9</i>
<i>1.4.3.2. Sensores .....</i>	<i>9</i>
<i>1.4.3.3. Sistemas de propulsión y navegación .....</i>	<i>10</i>
<i>1.4.3.4. Brazos robóticos .....</i>	<i>10</i>
<i>1.4.3.5. Fuentes de energía.....</i>	<i>10</i>
<i>1.4.4. Materiales utilizados en la construcción de robots submarinos.....</i>	<i>10</i>
<i>1.4.5. Modelado de robots submarinos.....</i>	<i>11</i>
<i>1.4.5.1. Modelado Cinemático de robots submarinos.....</i>	<i>11</i>
<i>1.4.5.2. Modelado dinámico de robots submarinos.....</i>	<i>13</i>
<i>1.4.6. Control de robots submarinos.....</i>	<i>15</i>
<i>1.4.6.1. Sistema de Guiado .....</i>	<i>15</i>
<i>1.4.6.2. Sistema de Control.....</i>	<i>15</i>

1.4.6.3.	<i>Sistema de Navegación</i> .....	15
<b>1.4.</b>	<b>Vehículos Submarinos Autónomos (AUV)</b> .....	<b>16</b>
<b>1.5.</b>	<b>Métodos de Navegación</b> .....	<b>17</b>
<b>1.6.</b>	<b>Navegación Inercial</b> .....	<b>18</b>
1.6.1.1.	<i>Sistemas de Plataforma estable</i> .....	19
1.6.1.2.	<i>Sistemas Strapdown</i> .....	20
<b>1.6.2.</b>	<b>Sensores Inerciales</b> .....	<b>21</b>
1.6.2.1.	<i>Acelerómetros</i> .....	21
1.6.2.2.	<i>Giroskopios MEMS</i> .....	22
1.6.2.3.	<i>Unidades de medición inercial</i> .....	23
<b>1.7.</b>	<b>Planificación de trayectorias</b> .....	<b>24</b>
<b>1.8.</b>	<b>Diseño asistido por computador (CAD)</b> .....	<b>25</b>
<b>1.9.</b>	<b>Tarjetas de desarrollo</b> .....	<b>26</b>
1.9.1.	<i>Arduino</i> .....	27
1.9.2.	<i>Rapsberry PI</i> .....	27
<b>1.10.</b>	<b>Motores de corriente continua</b> .....	<b>27</b>
1.10.1.	<i>Motores brushless</i> .....	28
<b>1.11.</b>	<b>Baterías</b> .....	<b>29</b>
1.11.1.	<i>Baterías de polímero de litio (LiPo)</i> .....	30
<b>1.12.</b>	<b>Impresión 3D</b> .....	<b>31</b>

## CAPITULO II

<b>2.</b>	<b>MARCO METODOLÓGICO</b> .....	<b>33</b>
<b>2.1.</b>	<b>Requerimientos del sistema</b> .....	<b>33</b>
<b>2.2.</b>	<b>Concepción general de la arquitectura del sistema</b> .....	<b>34</b>
<b>2.3.</b>	<b>Diseño del prototipo AUV</b> .....	<b>34</b>
<b>2.4.</b>	<b>Selección de los componentes del prototipo</b> .....	<b>37</b>
2.4.1.	<i>Dispositivos de procesamiento</i> .....	37
2.4.1.1.	<i>Arduino Mega 2560</i> .....	37
2.4.2.	<i>Dispositivos de adquisición de datos</i> .....	38
2.4.2.1.	<i>Unidad de medición inercial BNO055</i> .....	38
2.4.2.2.	<i>Sensor ultrasónico MB 7389-100</i> .....	40
2.4.3.	<i>Dispositivos de propulsión</i> .....	41
2.4.3.1.	<i>Propulsores – ROVMAKER underwater DC motor brushless thruster</i> .....	41
2.4.4.	<i>Fuentes de energía</i> .....	43
2.4.4.1.	<i>Batería LiPo Turnigy 4S 30-40C 4000 mAh</i> .....	43



2.4.4.2.	<i>Tarjeta de distribución de energía Mini Power HUB</i> .....	45
2.5.	<b>Equipos empleados para la construcción de la estructura</b> .....	46
2.5.1.	<i>Impresora 3D Creality modelo Ender 3 Pro</i> .....	46
2.6.	<b>Diseño electrónico y mecánico del prototipo</b> .....	47
2.6.1.	<i>Análisis de la resistencia a la presión externa</i> .....	47
2.6.2.	<i>Análisis de la potencia de los propulsores</i> .....	48
2.7.	<b>Construcción y ensamble de la estructura del prototipo</b> .....	51
2.7.1.	<i>Casco (cuerpo)</i> .....	51
2.7.2.	<i>Domo</i> .....	52
2.7.3.	<i>Construcción de partes adicionales</i> .....	52
2.7.4.	<i>Ensamble de la estructura</i> .....	54
2.8.	<b>Análisis de flotabilidad</b> .....	54
2.8.1.	<i>Medición del volumen del prototipo</i> .....	55
2.8.2.	<i>Medición del peso del prototipo</i> .....	55
2.8.3.	<i>Cálculo de la flotabilidad del prototipo</i> .....	56
2.9.	<b>Esquema de conexiones del prototipo</b> .....	56
2.9.1.	<i>Conexiones del circuito de encendido</i> .....	56
2.9.2.	<i>Conexiones de los propulsores</i> .....	57
2.9.3.	<i>Conexiones de los sensores ultrasónicos</i> .....	57
2.9.4.	<i>Conexiones de la IMU BNO055</i> .....	58
2.9.5.	<i>Esquema general de conexiones del sistema</i> .....	58
2.10.	<b>Implementación de las conexiones del prototipo</b> .....	59
2.11.	<b>Algoritmo del INS</b> .....	60
2.12.	<b>Planificación de trayectoria</b> .....	61
2.13.	<b>Control del sistema de navegación</b> .....	61
2.13.1.	<i>Sintonización de los controladores</i> .....	62

### CAPÍTULO III

3.	<b>PRUEBAS Y RESULTADOS</b> .....	65
3.1.	<b>Pruebas de los componentes del AUV</b> .....	65
3.1.1.	<i>Prueba de la batería LiPo Turnigy 4S 30-40C 4000 mAh</i> .....	65
3.1.2.	<i>Prueba de la tarjeta de distribución de energía Mini POWER HUB</i> .....	66
3.1.3.	<i>Prueba de los propulsores</i> .....	67
3.1.4.	<i>Prueba de la IMU BNO055</i> .....	68
3.1.5.	<i>Prueba del sensor ultrasónico</i> .....	69
3.1.6.	<i>Prueba de la tarjeta de desarrollo Arduino</i> .....	70

<b>3.2.</b>	<b>Pruebas de impermeabilidad e integridad del prototipo.....</b>	<b>70</b>
<b>3.3.</b>	<b>Pruebas de estabilidad .....</b>	<b>72</b>
<b>3.4.</b>	<b>Pruebas de las conexiones del prototipo.....</b>	<b>72</b>
<b>3.4.1.</b>	<i>Prueba de las conexiones del circuito de encendido.....</i>	<i>73</i>
<b>3.4.2.</b>	<i>Prueba de las conexiones de los propulsores .....</i>	<i>73</i>
<b>3.4.3.</b>	<i>Prueba de las conexiones del sensor ultrasónico MB 7389-100. ....</i>	<i>74</i>
<b>3.5.</b>	<b>Pruebas de navegación.....</b>	<b>75</b>
<b>3.5.1.</b>	<i>Pruebas de desplazamiento .....</i>	<i>75</i>
<b>3.5.2.</b>	<i>Pruebas de trayectoria.....</i>	<i>76</i>
<b>3.6.</b>	<b>Análisis de costos .....</b>	<b>81</b>
	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>82</b>
	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>83</b>
	<b>GLOSARIO</b>	
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	
	<b>ANEXOS</b>	

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-1:</b> Materiales para cascos de robots submarinos.....	10
<b>Tabla 2-1:</b> Notación del movimiento de vehículos marinos (SNAME, 1950).....	12
<b>Tabla 3-1:</b> Métodos de Navegación. ....	17
<b>Tabla 4-1:</b> Ventajas y desventajas de las baterías LiPo. ....	30
<b>Tabla 5-1:</b> Características de las baterías Lipo. ....	30
<b>Tabla 1-2:</b> Características Arduino Mega 2560. ....	37
<b>Tabla 2-2:</b> Características de la IMU BNO055 de Adafruit.....	38
<b>Tabla 3-2:</b> Distribución de los pines de la IMU BNO055. ....	39
<b>Tabla 4-2:</b> Características del sensor ultrasónico MB 7389-100. ....	40
<b>Tabla 5-2:</b> Especificaciones del propulsor ROVMAKER. ....	41
<b>Tabla 6-2:</b> Características de la batería LiPo Turnigy 4S 30-40C 4000 mAh. ....	43
<b>Tabla 7-2:</b> Consumo de corriente de los elementos del AUV.....	44
<b>Tabla 8-2:</b> Especificaciones de la tarjeta distribidora de energía Mini Power HUB. ....	45
<b>Tabla 9-2:</b> Características de la impresora 3D Creality modelo Ender 3 Pro. ....	46
<b>Tabla 1-3:</b> Prueba de voltaje de la batería.....	65
<b>Tabla 2-3</b> Prueba de funcionamiento de la tarjeta de distribución de energía.....	66
<b>Tabla 3-3:</b> Resultados de la prueba de los propulsores. ....	67
<b>Tabla 4-3:</b> Resultados de la prueba de la IMU.....	68
<b>Tabla 5-3:</b> Prueba del sensor ultrasónico MB 7389-100.....	69
<b>Tabla 6-3:</b> Resultados de la prueba de funcionamiento de la tarjeta Arduino 2560. ....	70
<b>Tabla 7-3:</b> Resultados de la prueba de impermeabilidad e integridad del prototipo.....	71
<b>Tabla 8-3:</b> Resultados de la prueba conexiones del circuito de encendido.....	73
<b>Tabla 9-3:</b> Prueba de las conexiones de los propulsores.....	73
<b>Tabla 10-3:</b> Prueba de las conexiones del sensor óptico SHARP.....	74
<b>Tabla 11-3:</b> Pruebas de navegación a 1 m de desplazamiento. ....	75
<b>Tabla 12-3:</b> Pruebas de navegación a 3 m de desplazamiento. ....	75
<b>Tabla 13-2:</b> Pruebas de navegación a 5 m de desplazamiento. ....	76
<b>Tabla 14-3:</b> Recorrido del prototipo con 20° y 5 m. ....	76
<b>Tabla 15-3:</b> Recorrido del prototipo con 40° y 5 m. ....	77
<b>Tabla 16-3:</b> Recorrido del prototipo con 60° y 5 m. ....	78
<b>Tabla 17-3:</b> Recorrido del prototipo con 80° y 5 m. ....	79

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1-1:</b>	Clasificación de los robots.....	5
<b>Figura 2-1:</b>	Clasificación de los robots submarinos.....	8
<b>Figura 3-1:</b>	Notación en robótica submarina. ....	11
<b>Figura 4-1:</b>	Ley de control de un controlador PID.....	15
<b>Figura 5-1:</b>	Clasificación de los métodos de navegación para los AUV. ....	17
<b>Figura 6-1:</b>	Esquema básico de un Sistema de Navegación Inercial .....	18
<b>Figura 7-1:</b>	IMU de plataforma estable.....	19
<b>Figura 8-1:</b>	Algoritmo de navegación inercial de plataforma estable.....	20
<b>Figura 9-1:</b>	Algoritmo de navegación inercial Strapdown.....	20
<b>Figura 10-1:</b>	IMU con configuración Strapdown.....	21
<b>Figura 11-1:</b>	Acelerómetro simple.....	21
<b>Figura 12-1:</b>	Fuerza Coriolis.....	23
<b>Figura 13-1:</b>	Esquema de una unidad de navegación inercial.....	23
<b>Figura 15-1:</b>	Proceso de Diseño.....	26
<b>Figura 16-1:</b>	Placas de desarrollo. Arduino y Raspberry PI. ....	27
<b>Figura 17-1:</b>	Representación simplificada de un motor DC. ....	28
<b>Figura 18-1:</b>	Representación simplificada de un motor DC sin escobillas. ....	29
<b>Figura 19-1:</b>	Tipos de baterías. No recargables (izquierda) y recargables (derecha).....	29
<b>Figura 20-1:</b>	Diferentes baterías Lipo.....	31
<b>Figura 21-1:</b>	Impresora 3D con modelado por deposición fundida. ....	32
<b>Figura 1-2:</b>	Arquitectura general del prototipo. ....	34
<b>Figura 2-2:</b>	Diseño del casco en SolidWorks.....	35
<b>Figura 3-2:</b>	Diseño de la agarradera en SolidWorks.....	35
<b>Figura 4-2:</b>	Diseño de las placas rectangulares en SolidWorks. ....	36
<b>Figura 5-2:</b>	Diseño de la tubería tipo T en SolidWorks. ....	36
<b>Figura 6-2:</b>	Diseño de los flotadores en SolidWorks. ....	36
<b>Figura 7-2:</b>	Diseño del prototipo ensamblado en SolidWorks.....	37
<b>Figura 8-2:</b>	Arduino Mega 2560 .....	38
<b>Figura 9-2:</b>	IMU BNO055 de Adafruit.....	39
<b>Figura 10-2:</b>	Sensor ultrasónico MB 7389-100. ....	41
<b>Figura 11-2:</b>	Propulsor ROVMAKER underwater DC motor brushless thruster. ....	42
<b>Figura 12-2:</b>	Comportamiento de la fuerza de empuje, corriente, eficiencia y potencia. ....	43
<b>Figura 13-2:</b>	Batería LiPo Turnigy 4S 30-40C 4000 mAh. ....	44
<b>Figura 14-2:</b>	Tarjeta de distribución de energía Mini Power HUB.....	45
<b>Figura 15-2:</b>	Impresora 3D Creality modelo Ender 3 Pro.....	46

<b>Figura 16-2:</b>	Estudio de tensiones del casco en SolidWorks. ....	47
<b>Figura 17-2:</b>	Estudio de desplazamientos del casco en SolidWorks.....	47
<b>Figura 18-2:</b>	Estudio de tensiones del domo en SolidWorks.....	48
<b>Figura 19-2:</b>	Estudio de desplazamientos del domo en SolidWorks. ....	48
<b>Figura 20-2:</b>	Comportamiento de la resistencia de avance y sus componentes. ....	50
<b>Figura 21-2:</b>	Impresión 3D del casco.....	51
<b>Figura 22-2:</b>	Casco recubierto de resina. ....	51
<b>Figura 23-2:</b>	Apariencia final del casco.....	52
<b>Figura 24-2:</b>	Domo de acrílico.....	52
<b>Figura 25-2:</b>	Placas rectangulares.....	53
<b>Figura 26-2:</b>	Agarradera.....	53
<b>Figura 27-2:</b>	Frasco con tapa rosca.....	53
<b>Figura 28-2:</b>	Tapa interna de soporte.....	54
<b>Figura 29-2:</b>	Ensamble de la estructura del prototipo.....	54
<b>Figura 30-2:</b>	Medición de volumen del prototipo.....	55
<b>Figura 31-2:</b>	Medición del peso del prototipo.....	55
<b>Figura 32-2:</b>	Esquema del circuito de encendido.....	56
<b>Figura 33-2:</b>	Esquema de conexiones de los propulsores. ....	57
<b>Figura 34-2:</b>	Esquema de conexiones de los sensores ultrasónicos.....	58
<b>Figura 35-2:</b>	Esquema de conexiones de la IMU.....	58
<b>Figura 36-2:</b>	Esquema general de conexiones del prototipo.....	59
<b>Figura 37-2:</b>	Implementación de las conexiones del prototipo.....	59
<b>Figura 38-2:</b>	Diagrama de flujo del INS.....	60
<b>Figura 39-2:</b>	Trayectoria a seguir del prototipo.....	61
<b>Figura 40-2:</b>	Diagrama de bloques del control de desplazamiento lineal.....	62
<b>Figura 41-2:</b>	Diagrama de bloques del control de desplazamiento angular.....	62
<b>Figure 42-2:</b>	Simulación para la sintonización del controlador en Simulink.....	63
<b>Figure 43-2:</b>	Gráfica del sistema donde se presenta la oscilación sostenida.....	63
<b>Figure 44-2:</b>	Comportamiento del sistema aplicando un controlador PI.....	64
<b>Figura 1-3:</b>	Prueba de voltaje de la batería utilizando el comprobador de celdas.....	65
<b>Figura 2-3:</b>	Prueba de voltaje de la batería utilizando el multímetro.....	66
<b>Figura 3-3:</b>	Prueba de funcionamiento de la tarjeta de distribución de energía.....	67
<b>Figura 4-3:</b>	Prueba de funcionamiento de la IMU. Superior izquierda: posición de origen, derecha: Yaw, inferior izquierda: Pitch, inferior derecha: Roll.....	68
<b>Figura 5-3:</b>	Prueba de funcionamiento del sensor ultrasónico MB 7389-100.....	69
<b>Figura 6-3:</b>	Prueba de funcionamiento de la tarjeta Arduino 2560.....	70
<b>Figura 7-3:</b>	Prueba de impermeabilidad e integridad del prototipo.....	71
<b>Figura 8-3:</b>	Prueba de estabilidad del prototipo.....	72

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1-3:</b>	Trayectoria del prototipo con parámetros de 5 m y 20°.....	77
<b>Gráfico 2-3:</b>	Trayectoria del prototipo con parámetros de 5 m y 40°.....	78
<b>Gráfico 3-3:</b>	Trayectoria del prototipo con parámetros de 5 m y 60°.....	79
<b>Gráfico 4-3:</b>	Trayectoria del prototipo con parámetros de 5 m y 60°.....	80

## ÍNDICE DE ANEXOS

- Anexo A:** Datos técnicos de Arduino Mega 2560
- Anexo B:** Datos técnicos de la IMU BNO055.
- Anexo C:** Datos técnicos del sensor ultrasónico MB 7389-100.
- Anexo D:** Datos técnicos de los propulsores ROVMAKER underwater DC motor brushless thruster.
- Anexo E:** Datos técnicos de la tarjeta de distribución de energía Mini Power HUB
- Anexo F:** Datos técnicos de la impresora 3D Ender PRO.
- Anexo G:** Programación del Sistema de Navegación Inercial.

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

<b>ROV:</b>	Vehículo Submarino Operado Remotamente
<b>AUV:</b>	Vehículo Submarino Autónomo
<b>IAUV:</b>	Vehículo Submarino Autónomo para Intervención
<b>GPS:</b>	Sistema de Posicionamiento Global
<b>IMU:</b>	Unidad de Medición Inercial
<b>Ph:</b>	Grado de acidez
<b>Kg:</b>	Kilogramo
<b>N:</b>	Newton
<b>m:</b>	metro
<b>dm<sup>3</sup>:</b>	Decímetro cúbico
<b>Pa:</b>	Pascal
<b>CFRP:</b>	Plástico reforzado por fibra de carbono
<b>GFRP:</b>	Plástico reforzado por fibra de vidrio
<b>PVC:</b>	Material termoplástico obtenido del Cloruro de vinilo
<b>NED:</b>	Norte-Este-Abajo
<b>SNAME:</b>	Society of Naval Architects and Marine Engineers
<b>PID:</b>	Proporcional-Integral-Derivativo
<b>TOF:</b>	Tiempo de vuelo
<b>INS:</b>	Sistema de navegación Inercial
<b>INU:</b>	Unidad de navegación inercial
<b>MEMS:</b>	Sistemas micro-electromecánicos
<b>CAD:</b>	Diseño Asistido por Computador
<b>SD:</b>	Seguridad digital
<b>CC o DC:</b>	Corriente continua o corriente directa
<b>CA:</b>	Corriente alterna
<b>Li-Ion:</b>	Ion de litio
<b>LiPo:</b>	Polímero de litio
<b>V:</b>	Voltios
<b>mAh:</b>	miliamperios/hora
<b>ABS:</b>	Acilonitrilo butadieno estireno
<b>PLA:</b>	Ácido poliláctico
<b>Hz:</b>	Hertz
<b>UV:</b>	Ultravioleta
<b>m/s<sup>2</sup>:</b>	metros por segundos cuadrados



<b><math>\mu\text{T}</math>:</b>	Microteslas
<b><math>^{\circ}\text{C}</math>:</b>	Grados centígrados
<b>I<math>^2</math>C:</b>	Circuito inter-integrado
<b>PSD:</b>	Detector sensitivo de posición
<b>IRE<math>D</math>:</b>	Diodo emisor infrarrojo
<b>mA:</b>	miliamperio
<b>mm:</b>	milímetro
<b>ESC:</b>	Controlador electrónico de velocidad
<b>W:</b>	Vatios
<b>A:</b>	Amperios
<b>PWM:</b>	Modulación por ancho de pulso

## RESUMEN

En el presente trabajo se diseñó e implementó un prototipo de robot subacuático autónomo (AUV) dotado de un sistema de navegación inercial para orientación, con el uso de una unidad de medición inercial (IMU) que proporciona el desplazamiento angular. Para el posicionamiento se empleó un sensor ultrasónico. A partir del diseño asistido por computador (CAD) realizado con base a los requerimientos se procedió a imprimir el modelo tridimensional con filamento fundido de ácido poliláctico (PLA). Consta de cuatro propulsores, dos para el avance, dos para la sumersión y un domo de acrílico transparente en el frente. Fue necesario realizar un tratamiento de impermeabilización del casco, se adaptó una tapa rosca en la parte posterior del prototipo con el fin de tener un acceso al interior de manera ágil. En función a los requerimientos se seleccionaron los diversos componentes para posteriormente diseñar e implementar las conexiones de los circuitos. Se utilizó la teoría de control clásico en lazo cerrado para desarrollar el controlador del prototipo, el cual consta de dos etapas, un controlador proporcional para la orientación y otro controlador proporcional-integral para el posicionamiento, siendo estos implementados con un Arduino Mega 2560. Las variables a controlar son posición angular y posición lineal, por esta razón se predefine el punto objetivo. Mediante las pruebas a las cuales fue sometido al prototipo se evidenció una fiabilidad aceptable (superior al 87%) para alcanzar el objetivo, la trayectoria tiene una ligera desviación causado por las variaciones de la orientación, pero que no afecta significativamente el posicionamiento del prototipo. En conclusión, el prototipo implementado cumple con los requerimientos plateados.

**Palabras Claves:** <NAVEGACIÓN INERCIAL>, <CONTROLADOR>, <ORIENTACIÓN>, <POSICIONAMIENTO>, <PUNTO OBJETIVO>, <VEHÍCULO SUBACUÁTICO AUTÓNOMO (AUV)>, <UNIDAD DE MEDICIÓN INERCIAL (IMU)>, <CIRCUITO>.



## ABSTRACT

In the present work, a prototype of autonomous underwater robot or vehicle (AUV) was designed and implemented, equipped with an inertial navigation system for orientation, with the use of an inertial measurement unit (IMU) that provides angular displacement, for positioning an ultrasonic sensor was used. Based on the computer-aided design (CAD) based on the requirements, the three-dimensional model with molten filament of polylactic acid (PLA) is printed. It consists of four propellers, two for the advance, two for submersion and a transparent acrylic dome in the front. It was necessary to perform a waterproofing treatment of the hull; a screw cap was adapted on the back of the prototype with the fin of having an access to the interior in an agile way. Depending on the requirements, the various components will be selected to later design and implement circuit connections. The classic closed-loop control theory will be considered to develop the prototype controller, which consists of two stages, a proportional controller for orientation and another proportional-integral controller for positioning, these being implemented with an Arduino Mega 2560. Variables to control are angular position and linear position, for this reason the target point is predefined. By means of the tests to which it was some type of prototype an acceptable precision (superior to 87%) is evidenced to reach the objective, the trajectory has a slight deviation affected by the variations of the orientation, but that does not affect the positioning of the prototype. In conclusion, the prototype implemented meets the silver requirements.

**Key words:** INERCIAL NAVIGATION>, <CONTROLLER>, <ORIENTATION>  
<POSITIONING>, <OBJECTIVE POINT>, <AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE (AUV)>, <INERCIAL MEASUREMENT UNIT (IMU)>, <CIRCUIT>



## INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se realizó el diseño e implementación de un robot subacuático autónomo dotado de un sistema de navegación inercial, cuenta con la capacidad de alcanzar un punto objetivo gracias a una IMU empleada para el posicionamiento angular y sensor de proximidad utilizado para el desplazamiento. Se aplicó un controlador basado en la teoría de control clásico tanto para el posicionamiento angular como para el avance. La estructura se diseñó por un software CAD para su implementación posterior, los circuitos se diseñaron en base a los requerimientos planteados.

## ANTECEDENTES

La superficie del planeta cubierta por agua corresponde a aproximadamente dos terceras partes, por lo tanto, los mares, océanos, ríos, etc., están presentes en las actividades del hombre como en el comercio (transporte), proveyendo fuentes de alimento, estudios de fenómenos naturales y biodiversidad, por solo mencionar algunas.

La tecnología y sus avances han permitido al hombre adentrarse en las profundidades de los mares y océanos, permitiendo ampliar el conocimiento científico. Las primeras expediciones se llevaron mediante submarinos ocupados por humanos. A principios de 1950 inicia la robótica submarina con el robot POODLE. Los robots submarinos ofrecen mejor información a un costo reducido, además de suprimir los riesgos por intervención humana en tareas peligrosas. (Álvarez, Saltaren, Aracil, & García, 2009; Moreno et al., 2014)

En el país, el Instituto Antártico Ecuatoriano utilizó un robot submarino autónomo cuyo desarrollo tuvo un costo de alrededor de \$15 000, para explorar la Antártida entre 2010 y 2013, logrando fotografiar, grabar videos, medir parámetros oceanográficos y recolectar muestras biológicas con el fin de analizar los efectos del cambio climático. (El Universo 2016)

El Instituto Oceanográfico de la Armada (INOCAR) emplea robots submarinos autónomos desde el 2013, enfocados al monitoreo de las condiciones oceanográficas en las costas ecuatorianas, con el propósito principal de evaluar la información adquirida por los robots y prever eventos como el fenómeno de El Niño, agujajes, etc. (INOCAR 2013)

Existen muy pocos proyectos de robótica submarina en Ecuador, entre los que podemos mencionar:

- El Diseño y Construcción de un ROV en la Universidad San Francisco de Quito.
- Construcción de un prototipo de robot submarino para la inspección de cascos de buques desarrollado en la Universidad de la Fuerzas Armadas ESPE.
- En la Universidad Nacional de Chimborazo se desarrolló un robot submarino para la exploración y recolección de la biodiversidad.
- En la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo se implementó un robot para la exploración de estanques de agua dulce.

De los trabajos mencionados, la mayoría de los robots poseen la limitación del cordón umbilical para ser operados remotamente. La investigación busca desarrollar un prototipo sin dicha limitante para misiones de exploración de propósito general, una solución posible es la de dotar al robot de autonomía, es decir un robot capaz de generar trayectorias.

## **FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

¿Cómo realizar el diseño e implementación de un prototipo de robot subacuático autónomo dotado de un sistema de navegación inercial?

## **SISTEMATIZACIÓN DEL PROBLEMA**

- ¿Qué investigaciones se han desarrollado acerca del tema?
- ¿Cuáles son los requerimientos del prototipo a implementar?
- ¿Cuáles son las características de diseño del prototipo?
- ¿Cuál es el diseño y los elementos electrónicos que permitan cumplir con los requerimientos?
- ¿Cuáles son los requerimientos hardware y software necesarios para cumplir con el diseño?
- ¿El prototipo implementado llegará hacia su objetivo?

## **OBJETIVOS**

### **General:**

- Diseñar e implementar un prototipo de robot subacuático autónomo dotado de un sistema de navegación inercial.

### **Específicos:**

- Investigar información referente a los sistemas de navegación inercial y AUV.
- Analizar los requerimientos del prototipo a implementar.
- Definir las características de diseño del prototipo.
- Determinar el diseño y los elementos electrónicos que permitan cumplir con los requerimientos.
- Determinar los requerimientos hardware y software necesarios para cumplir con el diseño.
- Evaluar que el prototipo de robot subacuático alcance su destino predefinido.

# CAPÍTULO I

## 1. MARCO TEÓRICO

### 1.1. Robótica

Es una ciencia interdisciplinaria, la cual trata acerca del análisis, diseño, implementación y usos o aplicaciones de los robots.

El origen de la robótica se produce por la fascinación e interés de la humanidad para crear maquinas o dispositivos que puedan emular los movimientos y capacidades físicas de los organismos vivos. En la antigua Grecia, tenían un término específico para referirse a estos sistemas. Registros históricos sitúan a los mecanismos animados de Herón que datan a finales del primer siglo. Durante los siglos del VIII y XV, los árabes dieron una aplicación práctica a estas máquinas. Con el paso del tiempo aparecieron autómatas como el Gallo de Estrasburgo en el año 1352, el León Mecánico desarrollado por Da Vinci en 1459, El Hombre de palo en 1525, entre muchos otros.

Después de la revolución industrial, muchas fábricas se vieron obligadas a automatizar algunos de sus procesos constantes o repetitivos para los operarios en las líneas de ensamble, la automatización conlleva al diseño e implementación de sistemas siendo capaces de realizar tareas repetitivas, sin la supervisión humana. Esto dio paso a la aparición de los robots en los años cuarenta para ser aplicados en los diferentes procesos industriales. (Barrientos et al. 1996)

### 1.2. Robot

Un robot por lo general es un sistema electromecánico capaz de realizar tareas desagradables, aburridas, incesantes y peligrosas de manera rápida y precisa. (Kumar 2010). Etimológicamente la palabra robot proviene de la palabra checa robota, la cual tiene el significado de “trabajo forzado u obligatorio”.

A partir de los años 40's los robots forman parte de varios procesos de automatización gracias a la creación del computador personal, estos sistemas estaban dotados de microprocesadores capaces de ejecutar instrucciones con el fin de realizar una tarea determinada, trabajando conjuntamente con sensores y actuadores ayudan a generar una retroalimentación para lograr un mayor rendimiento en la ejecución de tareas. (Galarza Oscar 2010)

Generalmente un robot está compuesto por 6 elementos, los cuales se detallan a continuación:

**Estructura mecánica**, esta puede ser de cualquier material depende la aplicación.

**Transmisiones**, una serie de sistemas que pueden ayudar al movimiento o desplazamiento del robot.

**Sistemas de accionamiento**, conformadas por actuadores trabajan conjuntamente con los sensores con el fin de accionar dispositivos que activan o generan movimientos en un manipulador.

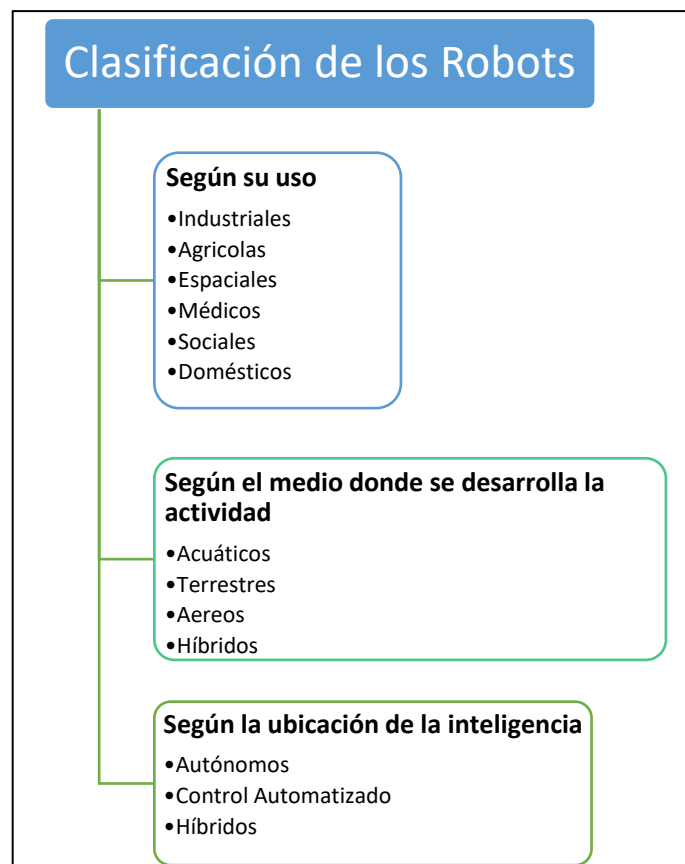
**Sistema sensorial**, usa sensores de cualquier tipo dependiendo la aplicación para poder llevar un control en lazo cerrado del sistema, así como para monitorear diferentes variables involucradas.

**Sistema de control**, determina la eficiencia y rendimiento del robot y es el sistema más importante de un robot ya que de este depende la confiabilidad del sistema.

**Elementos terminales**, son una serie de dispositivos que de igual manera tienden a variar dependiendo la aplicación como por ejemplo pueden ser pinzas, ventosas, bocinas, alarmas, etc. (Dobra 2015)

### 1.2.1. Clasificación de los robots

Los sistemas robóticos pueden ser clasificados de varias formas y de acuerdo a diversos criterios, una de ellas se observa en la figura 1-1.



**Figura 1-1:** Clasificación de los robots.

Fuente: (Zavala 2007)



Otra clasificación más general considera tres clases de robots: industriales, médicos y móviles. Los robots industriales por lo general están formados por estructuras mecánicas articuladas que recibe órdenes de un microprocesador. Los robots médicos son desarrollados para realizar tareas tales como cirugías, rehabilitación física, entre otras. Los robots móviles son mecanismos con la capacidad de trasladarse de un punto, dentro de los robots móviles se encuentra amplia gama de robots de acuerdo a diversos criterios tales como: entorno (terrestres, aéreos, acuáticos e híbridos), uso (agrícolas, espaciales, militares, etc.).

### **1.2.2. Aplicaciones de la robótica**

La robótica posee una amplia gama de aplicaciones encaminadas a satisfacer las necesidades del hombre. El campo con mayor empleo de robots corresponde al sector manufacturero con la utilización de brazos robóticos en series de producción tales como en el sector automotriz en el cual realizan trabajos repetitivos en ambientes controlados. En la medicina aún hay mucho camino por recorrer, pero destacan las cirugías que pueden ser realizadas desde lugares remotos, la presencia de los robots proporciona una mejor precisión de las incisiones y toma de muestras. La construcción es uno de los sectores económicos más importantes, para ello se han desarrollado sistemas robóticos con el fin de automatizar múltiples actividades como la mezcla de concreto, construcción de muros, trabajos a grandes alturas, etc.

La robótica submarina es un campo relativamente poco explorado, existe una gran variedad de actividades que se realizan en mares, océanos, ríos, etc. lo que propicia la aplicación de los sistemas robóticos. Las actividades que pueden realizar los robots van desde exploración científica marina, intervención en plataformas petroleras, inspección de embarcaciones, patrullaje y seguridad de las costas, mapeo del lecho marino, etc. (Barrientos et al. 1996)

### **1.3. Robots móviles**

Son robots que poseen la facultad de trasladarse de un lugar a otro de manera autónoma dentro de un entorno no determinado o determinado parcialmente. La autonomía se refiere a la habilidad de percibir, modelar, planificar y ejecutar acciones para lograr los objetivos con la mínima intervención humana. Los robots móviles son sistemas, los cuales contienen diversos subsistemas perceptivos, de planificación y de locomoción que se interrelacionan entre sí. El subsistema perceptivo provee de la información del entorno que permita al robot calcular su posición, orientación y evadir obstáculos. (Bambino 2008)

### **1.3.1. *Métodos de posicionamiento para robot móviles***

Existen varios métodos de posicionamiento de robots móviles, los cuales se agrupan en posicionamiento relativo y posicionamiento absoluto. El primero se emplea para determinar la posición y orientación del sistema tomando en cuenta una localización inicial conocida, así como también procesando los datos de los sensores propioceptivos del robot, dentro de este grupo se encuentran la odometría y la navegación inercial. Los métodos de posicionamiento absoluto estiman la localización (posición y orientación) del robot gracias a la percepción de diversas características (naturales y artificiales) del entorno; presentan un alto grado de fiabilidad a cambio de un tiempo de respuesta alto.

### **1.4. Robótica submarina**

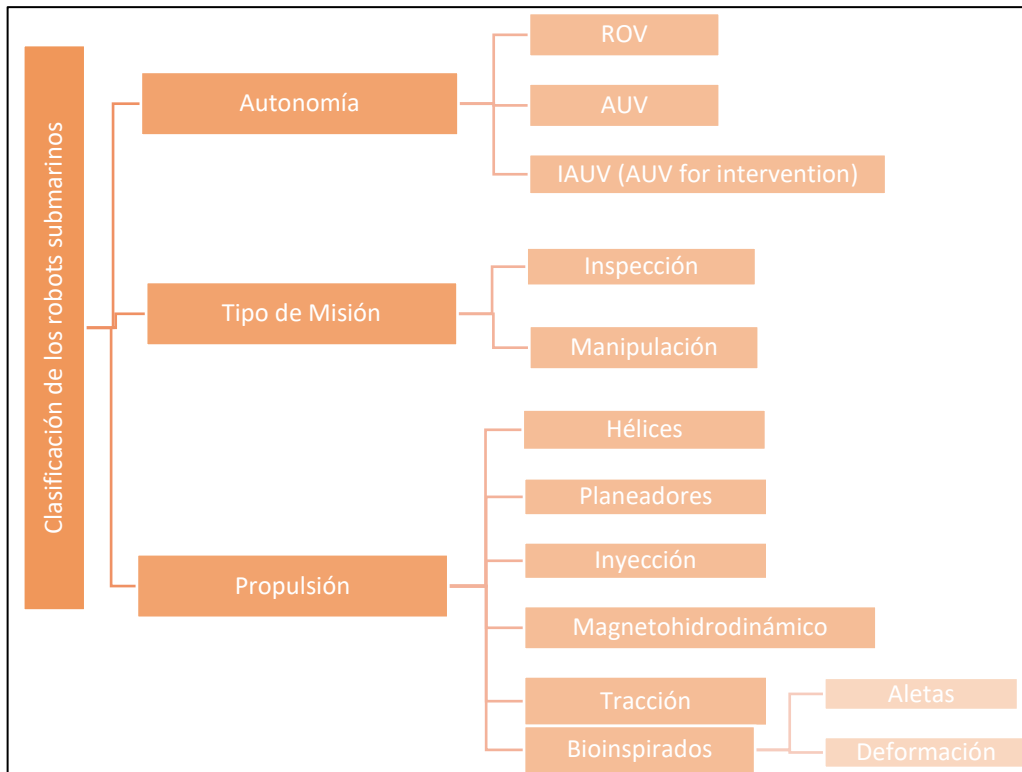
La superficie del planeta cubierta por agua corresponde a aproximadamente dos terceras partes, por lo tanto, los mares, océanos, ríos, etc., están presentes en las actividades del hombre como en el comercio (transporte), proveyendo fuentes de alimento, estudios de fenómenos naturales y biodiversidad, por solo mencionar algunas. La tecnología y sus avances han permitido al hombre adentrarse en las profundidades de los mares y océanos, permitiendo ampliar el conocimiento científico.

Las primeras expediciones se llevaron mediante submarinos ocupados por humanos. A principios de 1950 inicia la robótica submarina con el robot "POODLE" construido por Dimitri Rebikoff, el cual era un Vehículo Operado Remotamente (ROV). Posteriormente aparecieron el SEA POOK de Rebikoff y el SPURV desarrollado por la Universidad de Washington que eran Vehículos Submarinos Autónomos y muchos otros. En la década de 1980, los AUV perdieron terreno frente a los ROV debido a la ineficiencia, el tamaño y el elevado costo que presentaban, pero en los 90s se volvió a poner interés gracias al surgimiento de tecnologías electrónicas compactas, baterías recargables con mayor autonomía y motores pequeños con una gran eficiencia.

La robótica submarina posee un gran rango de aplicación que va desde la exploración y monitoreo hasta la supervisión y manipulación en diversas áreas como en la exploración científica, en la seguridad mediante el patrullaje de las costas, en la industria petrolera realizando tareas en plataformas oceánicas, etc. Los robots submarinos ofrecen mejor información a un costo reducido, y suprimen los riesgos por intervención humana en tareas peligrosas. Además, ofrece una mayor eficiencia a un costo menor comparado con otros sistemas no robotizados. (Moreno, Héctor et al. 2014; Álvarez et al. 2009)

### 1.4.1. Clasificación de los robots submarinos

En la figura 2-1 se observa la clasificación de los robots submarinos.



**Figura 2-1:** Clasificación de los robots submarinos.

Fuente: (Moreno, Héctor et al. 2014)

### 1.4.2. Aplicaciones de los robots submarinos

Desde el contexto de la tarea o misión a realizar, un robot submarino puede realizar dos tipos de misiones:

#### a) Misiones de inspección

Básicamente consiste en la adquisición de datos; tales datos pueden ser imágenes captadas mediante cámaras y obtenidas durante su trayectoria, la observación del lecho marino por medio de cartografía acústica, calidad del agua mediante sensores de acidez, entre otros.

#### b) Misiones de Manipulación

Para cumplir con este tipo de misiones el robot debe contar con manipuladores o herramientas para la intervención en el medio. Además de poseer un sistema de visión en tiempo real, proporcionando imágenes ya sea si el robot es operado remotamente para poder realizar la tarea de manipulación o si es autónomo para supervisión. (Moreno, Héctor et al. 2014)

### **1.4.3. Elementos de los robots submarinos.**

Un robot submarino posee diversos componentes encargados de mantenerlo en un óptimo funcionamiento para lograr concretar las misiones para las que fue creado, estos componentes poseen diversas funciones tales como mantener la integridad del mismo, propulsar el vehículo, adquisición de datos, etc. A continuación, se describen estos elementos.

#### *1.4.3.1. Cabina o casco*

Comprende el material y la estructura del robot. Aquí se encuentran contenidos y/o montados el sistema eléctrico y electrónico (actuadores, sensores, tarjetas electrónicas, etc.) y los componentes mecánicos del robot. El diseño de la cabina está determinado por factores como la profundidad, temperatura, corrosión, volumen de componentes, factibilidad de construcción, facilidad de ensamblaje y costo.

#### *1.4.3.2. Sensores*

Son dispositivos encargados de proveer la información tanto del entorno como del robot mismo. De acuerdo a la función desempeñada se clasifican en:

- Sensores de posicionamiento
- Sensores de estado interno
- Sensores de medición del ambiente
  
- ***Sensores de Posicionamiento:*** Permiten conocer el valor de múltiples variables propias del sistema como posición, velocidad, aceleración, y orientación, por su amplia variedad de variables que se pueden medir los más comunes en robots submarinos son: GPS, IMU, Brújula, Velocímetro, Profundidad, etc.
  
- ***Sensores de Estado interno:*** Poseen la capacidad de medir el consumo energético del robot, temperatura interna, posibles fisuras, etc. Existen de varios tipos entre los que se pueden mencionar los de Medición de Consumo Energético y Detectores de Inundación.
  
- ***Sensores de Medición del Ambiente:*** Proporcionan información del entorno en el que se desenvuelve el robot submarino, en otras palabras, tienen la capacidad de medir diferentes características del agua encargándose principalmente de la medición de variables tales como PH, densidad, turbidez, presencia de sólidos y metales, oxígeno, etc.

#### 1.4.3.3. *Sistemas de propulsión y navegación*

Sistemas encargados del desplazamiento del robot submarino, se toma en cuenta a los diferentes tipos de elementos, por ejemplo, tanto en la generación fuerzas y direccionamiento de dichas fuerzas (turbinas, aletas, etc.); así como también los elementos de navegación como por ejemplo las luces, bombas para inmersión.

#### 1.4.3.4. *Brazos robóticos*

Los robots submarinos, generalmente para llevar a cabo misiones de manipulación deben emplear brazos robóticos los cuales son teleoperados mediante un sistema Maestro-Esclavo en los ROV.

#### 1.4.3.5. *Fuentes de energía*

Componente encargado de proveer la energía al sistema, además define el tiempo de operación del robot, dimensionada de acuerdo a varios requerimientos como potencia, tiempo de autonomía, volumen y peso. Las más comunes son las baterías y las celdas de combustible.

#### 1.4.4. *Materiales utilizados en la construcción de robots submarinos*

Los materiales constituyen un aspecto importante robots en el diseño de los robots submarinos (esencialmente en el casco). La principal característica requerida de los materiales es que deben poseer una alta resistencia y un bajo peso. Los materiales más utilizados son principalmente metálicos, compuestos y plásticos. La tabla 1-1 muestra las propiedades de diversos materiales empleados para la construcción de los cascos de los robots submarinos.

**Tabla 1-1:** Materiales para cascos de robots submarinos.

Material	Densidad (Kg/dm <sup>3</sup> )	Resistencia a la fluencia (MPa)	Módulo de tensión (GPa)	Resistencia específica (kNm/Kg)
Acero de alta resistencia (HY80)	7.86	550	207	70
Aleación de Aluminio (7075)	2.9	503	70	173
Aleación de Titanio (6-4 STOA)	4.5	830	120	184
CFRP (Epoxy/S-Iass)	2.1	1200	65	571
GFRP (Epoxy/HS)	1.7	1200	210	706
Acrílico	1.2	103	3.1	86
PVC	1.4	48	35	34

Fuente: (Wang et al. 2009)

Realizado por: (Rosero y Mazón, 2019)

Los materiales que presentan las mejores propiedades son los compuestos, los que se utilizan son los plásticos reforzados con fibra de carbono (CFRP) y los con fibra de vidrio (GFRP); siendo este último el más utilizado debido a su bajo costo.

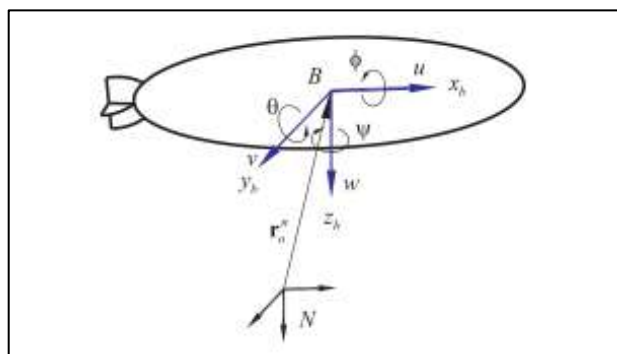
El acrílico es un material transparente y de alta resistencia, lo cual lo hace ideal para dotar al robot submarino de ventanillas para que las cámaras capten los objetos de interés. EL PVC es muy económico y es utilizado para construir vehículos submarinos que navegarán a bajas profundidades.(Moreno, Héctor A. et al. 2014)

### 1.4.5. Modelado de robots submarinos

#### 1.4.5.1. Modelado Cinemático de robots submarinos

El modelado cinemático utiliza ecuaciones, relacionando las diversas coordenadas para definir la posición y orientación del robot. Para describir el movimiento de un robot submarino es necesario definir dos marcos de referencia, estos son:

- **Marco de referencia inercial NED.** este marco permite determinar la posición del robot con respecto al origen de éste como se observa en la figura 1.3. Sus siglas significan Norte-Este-Abajo (North-East-Down), el eje x se dirige al norte, el eje y al este y el eje z hacia abajo, este último es normal a la superficie de la Tierra. El plano x-y es tangente al plano z.
- **Marco de referencia del cuerpo B.** se encuentra fijo al cuerpo del robot, el centro de gravedad del cuerpo coincide con el origen O del marco de referencia. Los ejes de este marco coinciden con los ejes principales de inercia:  $x_b$  el eje longitudinal (atrás hacia adelante),  $y_b$  el eje transversal (de un lado al otro) y  $z_b$  con dirección hacia abajo.(Moreno, Héctor et al. 2014)



**Figura 3-1:** Notación en robótica submarina.

**Fuente:** (Moreno, Héctor et al. 2014)

En robótica submarina existe la convención de SNAME para expresar la posición y orientación de los vehículos y las fuerzas ejercidas sobre él.

**Tabla 2-1:** Notación del movimiento de vehículos marinos (SNAME, 1950)

Movimiento	Nombre		Posición	Velocidad	Fuerza
	Español	Inglés			
Traslación en x	Avance	Surge	x	u	X
Traslación en y	Desvío	Sway	y	v	Y
Traslación en z	M. vertical	Heave	z	w	Z
Rotación en x	Alabeo	Roll	$\phi$	p	K
Rotación en y	Cabeceo	Pitch	$\theta$	q	M
Rotación en z	Guiñada	Yaw	$\psi$	r	N

**Fuente:** (Antonelli, Fossen y Yoerger 2008)

**Realizado por:** (Rosero y Mazón, 2019)

La posición del vehículo con respecto al marco inercial N puede representarse:

$$\eta = \begin{bmatrix} r_0^n \\ \Theta \end{bmatrix} \quad \text{Ecu. 1.1.}$$

Donde  $r_0^n = [x \ y \ z]^T$  representa la posición del marco de referencia del cuerpo B con respecto al marco N,  $\Theta$  es un vector de parámetros que definen la orientación relativa entre los marcos de referencia, estos pueden ser ángulos de Euler o el cuaternio de los parámetros de Euler,  $P_b$ .

La velocidad:

$$v = \begin{bmatrix} v_0^b \\ \omega_b^b \end{bmatrix} \quad \text{Ecu. 2.1.}$$

Donde  $v_0^b = [u \ v \ w]^T$  es la velocidad lineal medida en coordenadas del marco del cuerpo B,  $\omega_b^b = [p \ q \ r]^T$  es la velocidad angular del cuerpo con respecto al marco inercial medido en el marco de referencia del cuerpo B.

Las fuerzas a las que se encuentra sujeto el robot:

$$\tau = \begin{bmatrix} f_0^b \\ n_0^b \end{bmatrix} \quad \text{Ecu. 3.1.}$$

Donde  $f_0^b = [X \ Y \ Z]^T$  y  $n_0^b = [K \ M \ N]^T$  son los vectores de fuerza y momento a los que se encuentra sometido el cuerpo y medidos en el marco de referencia del cuerpo B. (Moreno, Héctor et al. 2014)

#### 1.4.5.2. Modelado dinámico de robots submarinos

Describe la relación entre los movimientos del vehículo y las fuerzas ejercidas sobre él y de esta manera se puedan estimar las fuerzas externas para que el robot se desplace de una determinada forma, o contrariamente calcular el desplazamiento producido por fuerzas externas. Todo cuerpo sumergido en el agua generalmente está sometido a fuerzas inerciales, hidrodinámicas y de restitución.

El modelo dinámico puede definirse mediante las ecuaciones de movimiento de Newton-Euler, las cuales se detallan a continuación:

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\tau} + \mathbf{g}_0 + \mathbf{w} \quad \text{Ecu. 4.1.}$$

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{B}_t \mathbf{u}_t \quad \text{Ecu. 5.1.}$$

Donde:

M es la matriz conformada por los elementos de la matriz inercial y de la matriz de masa añadida.

C comprende la matriz de fuerzas centrífugas y de Coriolis y de masa añadida.

D representa la matriz de fuerzas de viscosidad.

$\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})$  es un vector compuesto por las fuerzas restitutivas (gravedad y flotación).

$\boldsymbol{\tau}$  es el vector de fuerzas ejercidas por los propulsores.

$\mathbf{B}_t$  es una matriz de control dependiente de la configuración de cada vehículo.

$\mathbf{u}_t$  es un vector conformado por las fuerzas producidas en cada propulsor.

$\mathbf{g}_0$  vector que contiene la fuerza generada por el control de lastre.

w son las perturbaciones del entorno.

#### **Fuerzas inerciales**

Para un cuerpo rígido, Newton-Euler define las siguientes ecuaciones:

$$f_c^b = \frac{d}{dt}(mv_c^b) \quad \text{Ecu. 6.1.}$$



$$n_c^b = \frac{d}{dt}(I_c \omega_b^b) \quad \text{Ecu. 7.1.}$$

Donde:

$f_c^b$  y  $n_c^b$  son la fuerza y el torque respectivamente en el centro de masa del robot.

$I_c$  y  $m$  representa la matriz de inercia y la masa respectivamente.

$v_c^b$  y  $\omega_b^b$  son vectores conformados por la velocidad lineal y angular del robot respectivamente.

### ***Fuerzas hidrodinámicas***

Son aquellas fuerzas que inciden en un cuerpo sumergido, son altamente complejas debido a su dependencia de muchas variables como la temperatura, la forma del cuerpo, la presión, entre otras. Comprenden las fuerzas de viscosidad y de masa añadida.

#### ***Masa añadida***

Esta fuerza depende de la aceleración y de la velocidad del cuerpo, oponiéndose al movimiento. La masa añadida se relaciona directamente con la cantidad de fluido que se encuentra interactuando alrededor del individuo y no siempre es constante y simétrica.

Para medir la masa añadida, se lo realiza acelerando el cuerpo en dirección a los ejes, midiendo las alteraciones producidas en la fuerza requerida.

#### ***Fuerzas viscosas***

Resultan de la fricción ejercida por la viscosidad del fluido sobre el robot. De acuerdo al efecto sobre los cuerpos existen dos fuerzas: de arrastre que se oponen al movimiento en dirección opuesta y de sustentación se relacionan al movimiento relativo del cuerpo en el fluido siendo perpendiculares a dicho movimiento.

### ***Fuerzas de restitución***

Los robots submarinos también son afectados por las fuerzas de restitución comprendidas por la gravedad y la flotación. Las ecuaciones que definen el peso de un cuerpo sumergido y su fuerza de flotación son las siguientes:

$$W = mg \quad \text{Ecu. 8.1.}$$

$$B = \rho_a g V \quad \text{Ecu. 9.1.}$$

Donde:  $m$  es la masa del cuerpo,  $g$  es la gravedad,  $\rho_a$  densidad absoluta del cuerpo y  $V$  el volumen del cuerpo. (Moreno, Héctor et al. 2014)

### 1.4.6. Control de robots submarinos

Se ha desarrollado un concepto denominado Sistema de Control de Misión (MCS - Misión Control System) por (Antonelli, Fossen y Yoerger 2008). Este sistema es el encargado de ejecutar la misión requerida y contiene los componentes de control, navegación y guiado. El MCS está conformado por: Sistema de Guiado, Sistema de Navegación, Sistema de Control.

#### 1.4.6.1. Sistema de Guiado

Es el encargado de generar las trayectorias que seguirá el robot. Las variables de aceleración, velocidad y posición son enviadas al Sistema de control para lograr las referencias deseadas. El sistema de guiado necesita puntos de guía dados por el usuario, también recibe información del Sistema de Navegación y del entorno.

#### 1.4.6.2. Sistema de Control

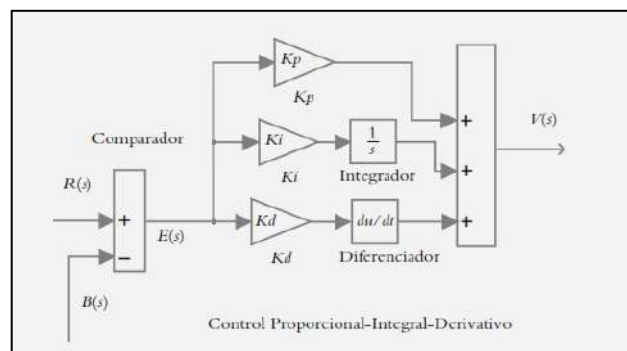
Se encarga de estimar las fuerzas que se deben producir para lograr el desplazamiento necesario para que el robot alcance los objetivos deseados. Este sistema recibe información de las referencias deseadas de la posición, velocidad y aceleración y a través de los sensores del robot se capta el estado actual de dichas variables. El sistema de control puede crearse en base al control clásico, control inteligente, control no lineal, entre otros.

#### 1.4.6.3. Sistema de Navegación

Es el encargado de procesar la información recibida de los sensores mediante algoritmos para posteriormente enviarlas al Sistema de control y al sistema de guiado. (Moreno, Héctor A. et al. 2014)

#### 1.4.6.4. Control PID

Generalmente son controladores en lazo cerrado, realimentando las señales medidas por los sensores del robot. En un controlador PID, la ley de control se muestra en la figura 4-1:



**Figura 4-1:** Ley de control de un controlador PID.

Fuente:(Hernández 2010)

$$v(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad \text{Ecu. 10.1.}$$

Donde:

$v(t)$  es la salida del controlador

$e(t)$  es el error

$K_p$ ,  $K_i = \frac{K_p}{T_i}$ ,  $K_d = K_p T_d$  son las ganancias proporcional, integral y derivativa del controlador respectivamente.

La función de transferencia del controlador en el dominio de  $s$  es:

$$G_c(s) = \frac{V(s)}{E(s)} = K_p \left[ 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right] \quad \text{Ecu. 8.1.}$$

(Hernández 2010)

#### 1.4. Vehículos Submarinos Autónomos (AUV)

Estos vehículos cuentan con una arquitectura de control, con el fin de llevar a cabo misiones sin la necesidad de un operador. Generalmente no existe comunicación entre el vehículo y la superficie; al no tener limitaciones de rango de acción por la ausencia de un cordón umbilical puede navegar grandes distancias que van hasta los cientos de kilómetros. Los AUV cuentan con su propia fuente de energía (baterías o celdas de combustible) y se comunican por medio de la acústica y tal vez de la óptica en un futuro.

Los AUV generalmente son utilizados para misiones de inspección y exploración, entre las aplicaciones más comunes están la adquisición de información de las condiciones oceanográficas, la investigación de la biodiversidad marina, inspección de cableado submarino, el patrullaje de las costas, monitoreo de grandes embalses de agua, en la acuicultura para medir las propiedades del agua como salinidad, temperatura, acidez, presencia de contaminantes, etc., actualmente existe un interés en lograr que éstos sean capaces de realizar tareas de manipulación lo cual conlleva a dotar de actuadores tales como brazos mecánicos u otros de acuerdo a la actividad que se vaya a realizar. (Álvarez et al. 2009; Moreno, Héctor et al. 2014; Antonelli, Fossen y Yoerger 2008)

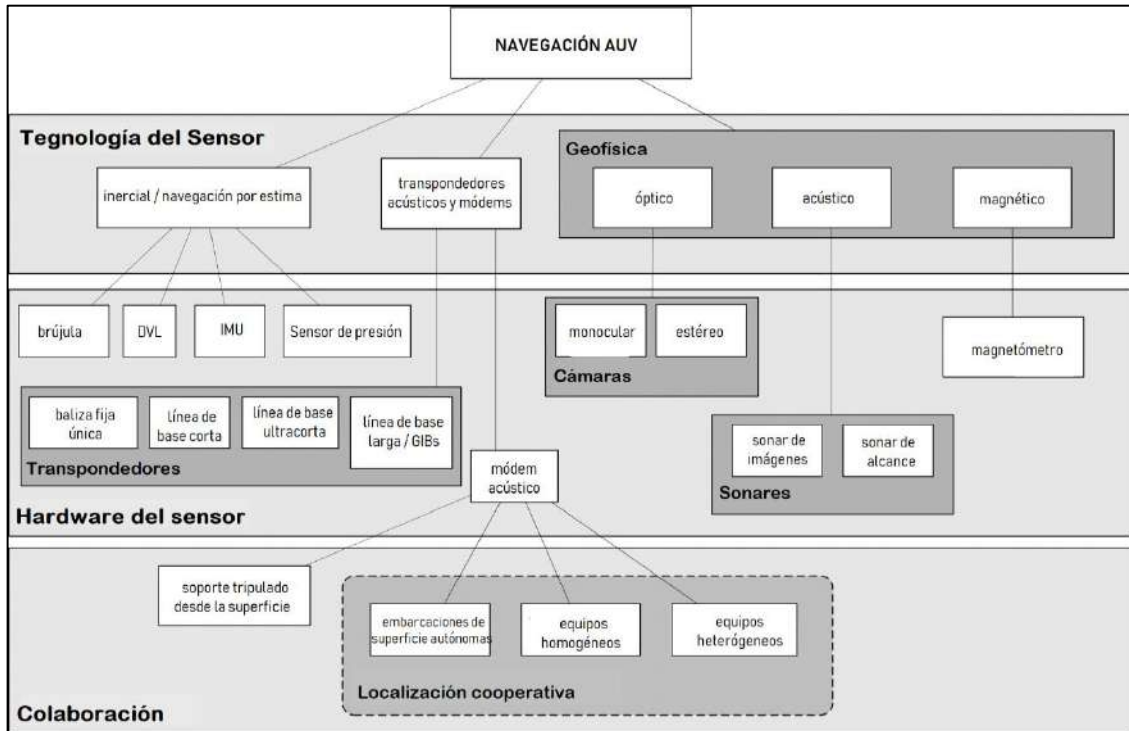
Recientemente, varias compañías ahora ofrecen servicios comerciales con AUVs. Como ejemplo, para la industria del petróleo y el gas, la disminución de costos con un AUV en lugar de un vehículo remolcado es de aproximadamente un 30% con una mayor calidad en los datos obtenidos. Del mismo modo, los fabricantes comerciales en varios países ahora ofrecen sistemas AUV para tareas específicas y bien definidas. (Antonelli, Fossen y Yoerger 2008)

Los robots submarinos AUV necesitan ser programados en base a métodos de planificación de trayectorias que básicamente permite llevar al robot de una posición inicial a una final en el

espacio evitando colisiones. Existe una variedad de métodos de planificación tales como campos potenciales, grafos de visibilidad, diagramas de Veroni, etc. Sin embargo, cuanto mayor sea la complejidad del entorno, mayor dificultad presenta resolver este problema. (López, Cuesta y Ollero 2006)

### 1.5. Métodos de Navegación

En la figura 5-1 se aprecia la clasificación de los métodos o técnicas de la navegación de AUV.



**Figura 5-1:** Clasificación de los métodos de navegación para los AUV.

Fuente: (Paull et al. 2014)

En base a la figura 5-1, la clasificación de los métodos de navegación para los AUV se describe brevemente en la tabla 3-1 que se muestra a continuación.

**Tabla 3-1:** Métodos de Navegación.

MÉTODO DE NAVEGACIÓN	DESCRIPCIÓN
<b>Navegación inercial</b>	Trabaja con el desplazamiento lineal y rotacional y sus magnitudes derivadas, cuyas medidas son proporcionadas por acelerómetros y giroscopios. Sin embargo, todos los métodos en esta categoría tienen un crecimiento de error de posición que es ilimitado.

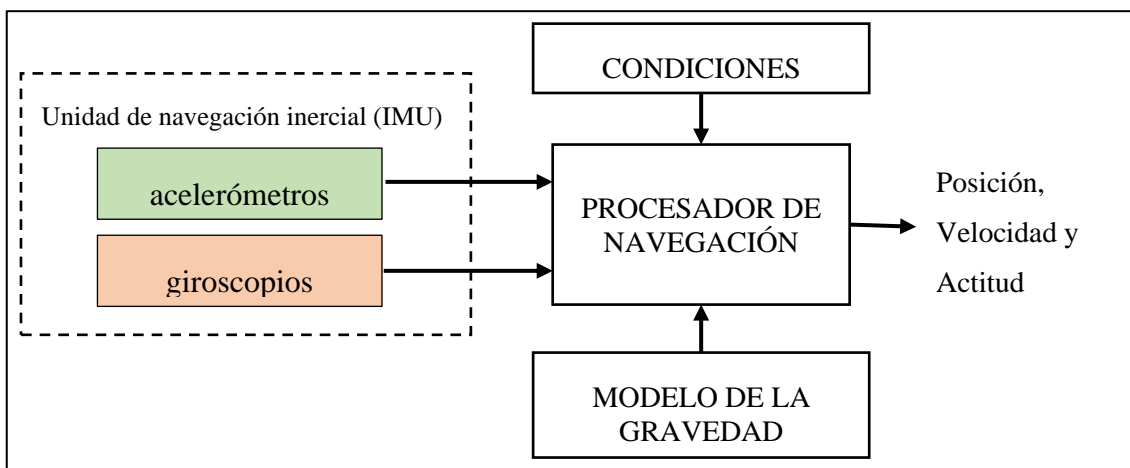
<b>Navegación acústica</b>	Las técnicas en esta categoría se basan en la medición del tiempo de vuelo (TOF) de las señales provenientes de balizas acústicas o módems para realizar la navegación.
<b>Navegación geofísica</b>	Técnicas que utilizan información ambiental externa como referencia para la navegación. Este tipo de navegación se realiza con sensores capaces de detectar, identificar y clasificar algunas características ambientales.

Fuente: (Paull et al. 2014)

## 1.6. Navegación Inercial

Es una técnica de navegación la cual utiliza las mediciones proporcionadas por giroscopios y acelerómetros para determinar la posición y la orientación de un individuo u objeto a partir de un punto inicial, orientación y velocidad conocidos. Los avances de los sistemas electromecánicos micro-mecanizados (MEMS), han hecho posible la construcción de sistemas inerciales pequeños y ligeros. La navegación inercial posee una gran variedad de aplicaciones tales como la navegación de aeronaves, naves espaciales, misiles tácticos y estratégicos, embarcaciones y submarinos, además de la captura de movimiento. (Woodman 2007)

Un sistema de navegación inercial (INS), conocido también como unidad de navegación inercial (INU), es un sistema de navegación tridimensional de reconocimiento de cuentas. Este comprende un conjunto de sensores inerciales, conocido como unidad de medición inercial (IMU), junto con un procesador de navegación. Los sensores de inercia generalmente comprenden tres acelerómetros ortogonales y tres giroscopios alineados con los acelerómetros. El procesador de navegación integra las salidas IMU para proporcionar la posición, la velocidad y la actitud, en la figura 6-1 se describe esto. (Groves 2007)



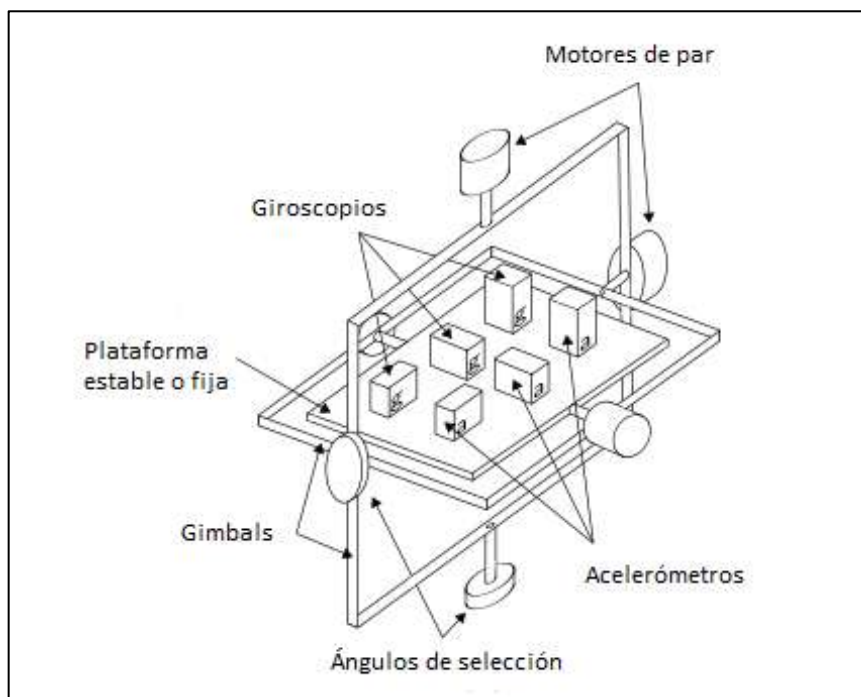
**Figura 6-1:** Esquema básico de un Sistema de Navegación Inercial

Fuente: (Groves 2007)

### 1.6.1.1. Sistemas de Plataforma estable

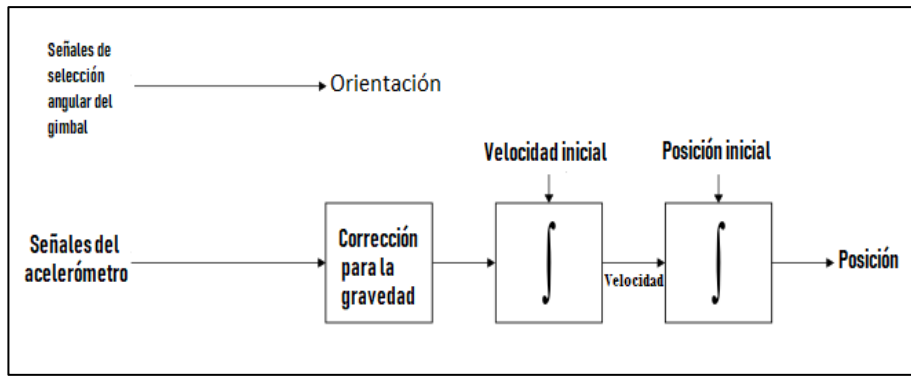
En esta configuración los sensores inerciales se montan en una plataforma que está aislada de cualquier movimiento de rotación externo. En otras palabras, la plataforma se mantiene alineada con el marco global. Esto se logra montando la plataforma utilizando cardanes (marcos) que permiten la libertad de la plataforma en los tres ejes, como se muestra en la Figura 1.5. Los giroscopios montados en la plataforma detectan cualquier rotación de la plataforma. Estas señales se devuelven a los motores de par que giran los cardanes (conocidos también como gimbals) para cancelar tales rotaciones, de ahí que se mantenga la plataforma alineada con el marco global.

Para rastrear la orientación del dispositivo, los ángulos entre cardanes adyacentes se pueden leer usando el ángulo de selección. Para calcular la posición del dispositivo, las señales de los acelerómetros montados en la plataforma están doblemente integradas. El algoritmo de navegación inercial de plataforma estable se muestra en Figura 7-1. (Woodman 2007)



**Figura 7-1:** IMU de plataforma estable

Fuente: (Woodman 2007)



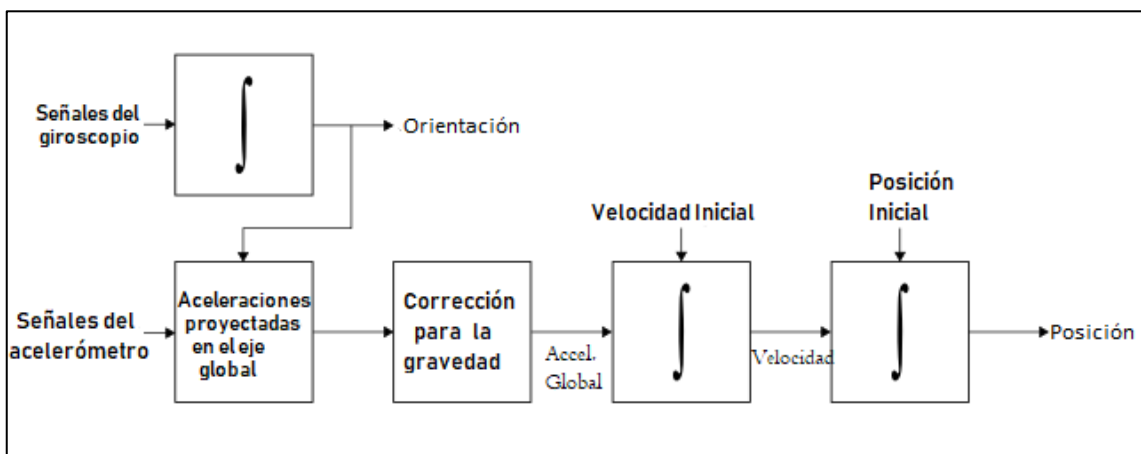
**Figura 8-1:** Algoritmo de navegación inercial de plataforma estable.

Fuente: (Woodman 2007)

### 1.6.1.2. Sistemas Strapdown

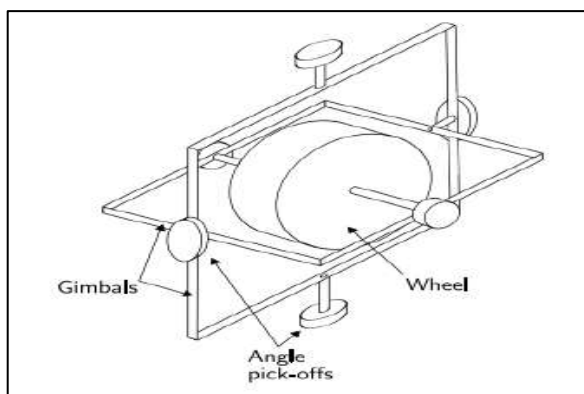
En los sistemas strapdown, los sensores de inercia están montados rígidamente en el dispositivo y, por lo tanto, las cantidades de salida se miden en el marco del cuerpo en lugar del marco global. Para mantener un seguimiento de la orientación, las señales de los giroscopios están "integradas", para determinar la posición, las tres señales del acelerómetro se resuelven en coordenadas globales utilizando la orientación conocida, según lo determinado por la integración de las señales del giroscopio. Las señales de aceleración global se integran entonces como en el algoritmo de plataforma estable, esto se muestra en la Figura 9-1.

Los sistemas Strapdown han reducido la complejidad mecánica y tienden a ser físicamente más pequeños que los sistemas de plataforma estables. Estos beneficios se logran a costa de una mayor complejidad computacional. A medida que el costo de cómputo ha disminuido, los sistemas Strapdown se han convertido en el tipo dominante de INS. (Woodman 2007)



**Figura 9-1:** Algoritmo de navegación inercial Strapdown.

Fuente: (Woodman 2007)

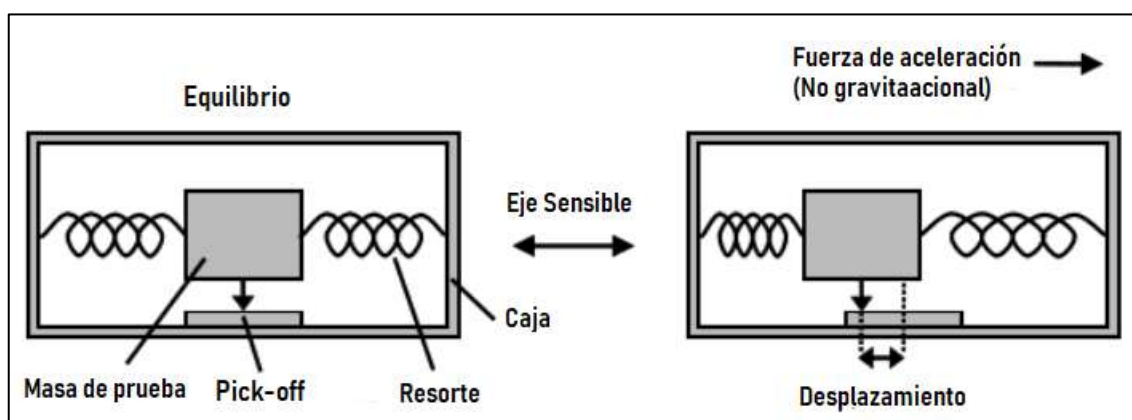


**Figura 10-1:** IMU con configuración Strapdown.

Fuente: (Woodman 2007)

## 1.6.2. Sensores Inerciales

### 1.6.2.1. Acelerómetros



**Figura 11-1:** Acelerómetro simple.

Fuente: (Groves 2013)

La figura 11-1 muestra un acelerómetro simple. Una masa de prueba puede moverse libremente con respecto a la caja del acelerómetro a lo largo del eje sensible del acelerómetro, restringida por resortes, que a veces se conoce como la suspensión. Un pickoff mide la posición de la masa con respecto al caso. Cuando se aplica una fuerza de aceleración a lo largo del eje sensible a la caja, la masa de prueba inicialmente continuará a su velocidad anterior, por lo que la caja se moverá con respecto a la masa, comprimiendo un resorte y estirando el otro. Estirar y comprimir los resortes altera las fuerzas que transmiten a la masa de prueba del estuche. En consecuencia, el caso se moverá con respecto a la masa hasta que la aceleración de la masa debido a las fuerzas asimétricas ejercidas por los resortes coincida con la aceleración del caso debido a la fuerza aplicada externamente. La posición resultante de la masa con respecto al caso es proporcional a



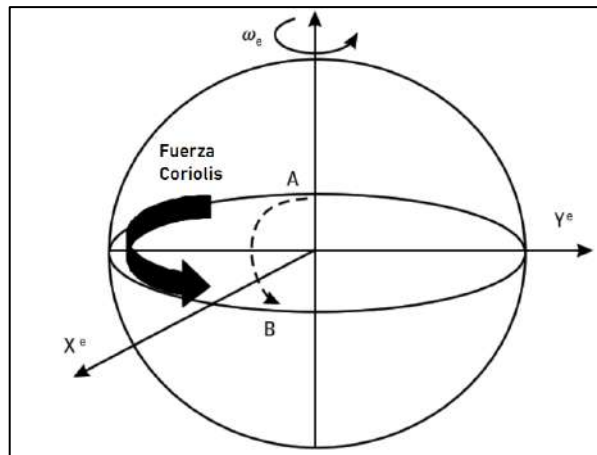
la aceleración aplicada al caso. Al medir esto con un pickoff, se obtiene una medición de aceleración. La excepción a esto es la aceleración debido a la fuerza gravitacional. La gravedad actúa directamente sobre la masa de prueba, no a través de los resortes y aplica la misma aceleración a todos los componentes del acelerómetro, por lo que no hay movimiento relativo de la masa con respecto al caso. Por lo tanto, todos los acelerómetros perciben la fuerza específica, la aceleración no gravitacional, no la aceleración total. (Groves 2013)

#### 1.6.2.2. Giroscopios MEMS

Los giroscopios proporcionan el cambio de ángulo con respecto a una orientación inicial conocida. La mayoría de los giroscopios micromaquinados utilizan elementos mecánicos vibrantes, denominados masa de prueba, para monitorear el movimiento de rotación. No poseen ninguna pieza giratoria que requiera cojinetes y, debido a esto, se pueden miniaturizar para reducir el costo del sensor. Estos giroscopios vibratorios se basan en el principio de la transferencia de energía entre dos modos de vibración de una estructura causada por la fuerza de Coriolis mostrada en la figura 1.8. En esta figura,  $X^e$  y  $Y^e$ , representan el eje x y el eje y del marco de referencia de la Tierra. La fuerza de Coriolis es una aceleración aparente necesaria para mantener las leyes de movimiento de Newton en los marcos de referencia giratorios. A veces esta fuerza es llamada fuerza ficticia (o pseudo fuerza), debido a que no aparece cuando el movimiento se expresa en un marco de referencia inercial. Debido al efecto de la fuerza de Coriolis, un cuerpo que se mueve desde el punto A al B en la superficie de la Tierra seguirá una línea curva en lugar de una línea recta como se muestra en la figura 1.8. A una velocidad de rotación dada del observador, la magnitud de la aceleración de Coriolis está relacionada con la velocidad del cuerpo, el ángulo entre la dirección de movimiento del cuerpo y el eje de rotación dado por:

$$\vec{a}_c = -2\vec{\omega} \times \vec{v} \quad \text{Ecu. 9.1.}$$

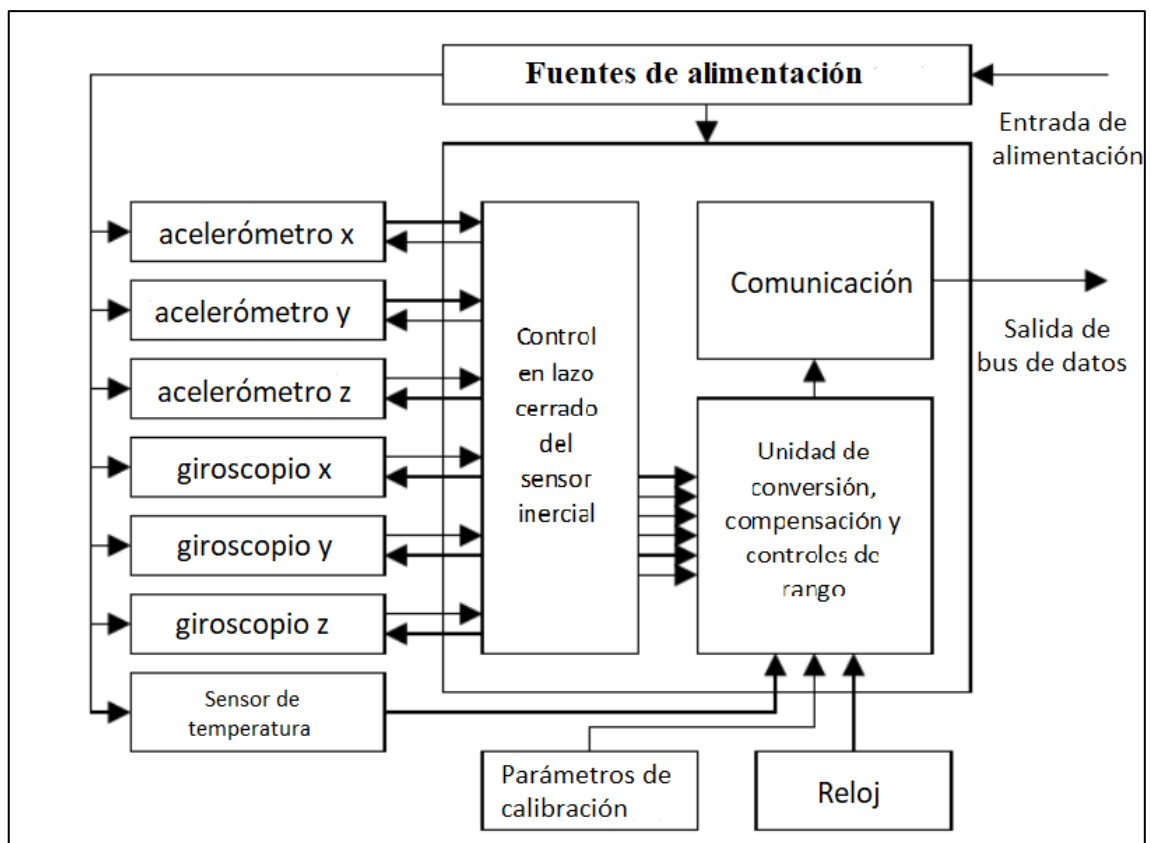
Donde  $\vec{v}$  es la velocidad del cuerpo en el cuadro giratorio y  $\vec{\omega}$  es la velocidad angular del sistema giratorio. La aceleración de Coriolis es perpendicular tanto a la dirección de la velocidad de la masa en movimiento como al eje de rotación. (Aggarwal, Syed y El-Sheimy 2010)



**Figura 12-1:** Fuerza Coriolis.

Fuente: (Aggarwal, Syed y El-Sheimy 2010)

### 1.6.2.3. Unidades de medición inercial



**Figura 13-1:** Esquema de una unidad de navegación inercial.

Fuente: (Groves 2013)

La Figura 13-1 muestra los elementos principales de una unidad de medición inercial típica: acelerómetros y giroscopios, el procesador IMU, un sensor de temperatura, un almacén de parámetros de calibración y las fuentes de alimentación asociadas. La mayoría de las IMU tienen

tres acelerómetros y tres giroscopios de un solo grado de libertad, montados con ejes sensibles ortogonales. Algunas IMU incorporan sensores inerciales adicionales en una configuración sesgada para proteger contra las fallas de un solo sensor. También se pueden usar sensores MEMS adicionales para ayudar a la calibración de polarización. Las IMU con menos de seis sensores se conocen como IMU parciales. El procesador IMU realiza la conversión de la unidad en las salidas del sensor inercial, proporciona compensación por los errores conocidos de los sensores inerciales y realiza verificaciones de rango para detectar fallas en el sensor. También puede incorporar retroalimentación de fuerza de bucle cerrado o control de reequilibrio para los acelerómetros y giroscopios. La unidad de conversión de unidades transforma las salidas del sensor inercial de tensión, corriente o impulsos en unidades de fuerza específica y velocidad angular.

Los sensores inerciales presentan errores constantes que pueden calibrarse en el laboratorio y almacenarse en la memoria, permitiendo al procesador IMU corregir las salidas del sensor. Los parámetros de calibración generalmente incluyen acelerómetro y desviaciones de giro, errores de factor de escala y de acoplamiento cruzado, y desviaciones dependientes de giro. Dichos errores varían con la temperatura, por lo que la calibración se realiza en un rango de temperaturas y la IMU está equipada con un sensor de temperatura. Sin embargo, la temperatura dentro de cada sensor individual no necesariamente coincide con la temperatura ambiente de la IMU, por lo que algunas IMU de alto rendimiento implementan el control de temperatura en su lugar. (Groves 2013)

### **1.7. Planificación de trayectorias**

Se traduce en trasladar a un robot de una posición de partida a una posición objetivo mediante la búsqueda de una serie de posiciones intermedias sucesivas. Por lo general, la planificación arroja tres resultados, los cuales son rutas, caminos y trayectorias. Una ruta es grupo de configuraciones a ser cumplidas por el robot. Un camino es la discretización de una función continua que interpola las configuraciones de las rutas. Una trayectoria es equivalente a un camino con perfil cinemático, en otras palabras, a cada configuración del camino le corresponde una velocidad. Los sistemas de navegación utilizan la planificación de trayectorias, y emplean un controlador que permita al sistema seguir la trayectoria planificada en tiempo real. (Gómez-Bravo, Cuesta y Ollero 2003; Yamashita et al. 2003)

La localización del robot se encuentra referenciada a un sistema absoluto de coordenadas cartesianas. La configuración de la trayectoria está dada de acuerdo a la posición de los obstáculos presentes en el medio de trabajo, la geometría propia del robot y a la capacidad de movimiento. (Yamashita et al. 2003)

La topología del medio de trabajo limita el espacio de trabajo libre de obstáculos por el cual se pueden trazar las posibles trayectorias para lograr el punto objetivo. Por lo general se procede a discretizar la presentación del espacio en el medio de trabajo, extrayendo una representación segura que garantiza que el espacio libre pueda ser ocupado por el robot sin riesgo de colisión, por lo que es necesario que dicha discretización se realice tomando en cuenta las características geométricas del robot como de los obstáculos.

La planificación de trayectorias puede realizarse de una forma dinámica, tomando en cuenta la posición actual del vehículo y los puntos intermedios de paso definidos en la planeación de la trayectoria. Además, se debe considerar las características cinemáticas del vehículo prefiriendo definir trayectorias de curvatura continua que puedan ser ejecutadas en el menor tiempo posible. Después de haber realizado la planificación de la trayectoria, se procede a planificar movimientos concretos y controlados para mantener al vehículo en la trayectoria definida. (Sugar y Kumar 2002)

### **1.8. Diseño asistido por computador (CAD)**

El diseño asistido por computador nace en 1963 producto de una tesis de Iván Sutherland, el tema de la misma fue sobre graficas interactivas por computador.

La aplicación de este tipo de software abarca una serie de técnicas a ser aplicadas, como: cuadros sinópticos, diagramas, gráficos estadísticos, representaciones de sistemas dinámicos, aplicaciones en robótica, entre otros.

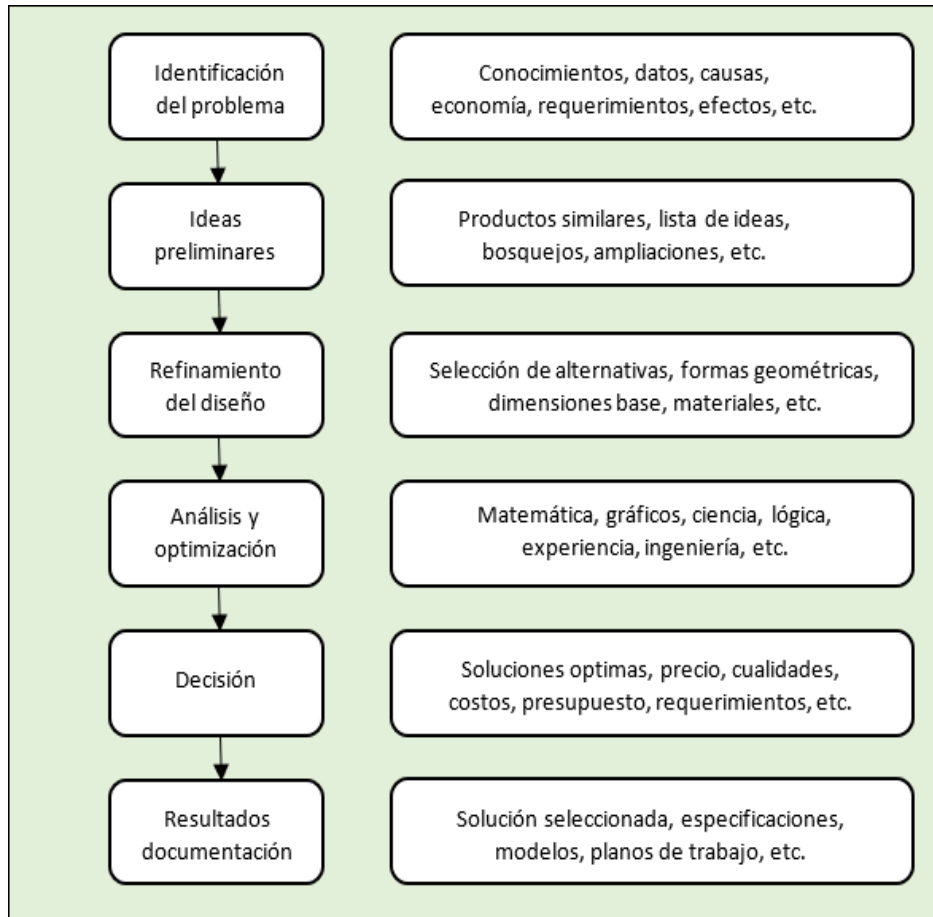
Este tipo de software son usados mediante dos maneras la primera es por medio de lenguajes de programación y la segunda es por paquetes aplicativos, el desarrollo a través de lenguajes de programación requiere un amplio conocimiento dentro del campo del análisis matemático.

Por otro lado, en el desarrollo de paquetes aplicativos gracias a sus constantes mejoras han facilitado su adaptación en varios campos como diferentes ingenierías. El diseño asistido por computador es una herramienta de gran ayuda para crear un análisis técnico de un modelo simulado para estudiar el comportamiento de algún producto antes de ser construido, las diversas características principales de un software CAD son:

- Simulaciones dinámicas enfocadas con características visuales de los procesos, así como también los resultados de los mismos, como tabulaciones, diagramas, sonidos, etc.
- Capacidad del software para encontrar soluciones eficaces y óptimas en diferentes tipos de aplicaciones.
- Desarrollo de sistemas virtuales para crear un entorno y poder eliminar algunos prototipos físicos.
- Ingeniería inversa para obtener el modelado CAD de una pieza real por medio de un escaneado tridimensional.

- Intercambio de formatos para facilitar el trabajo en multiplataforma.

El proceso de diseño en los softwares CAD requiere tomar en cuenta una serie de pasos para su correcta elaboración. (Rojas y Rojas 2006)



**Figura 14-1:** Proceso de Diseño.

Fuente: (Rojas y Rojas 2006)

### 1.9. Tarjetas de desarrollo

Son plataformas de desarrollo basadas en lenguajes de programación para poder ejecutar una serie de comandos o líneas programación con la finalidad de realizar una tarea específica. Estas tarjetas pueden ser de código abierto ayudando a la programación electrónica capaz de enviar y recibir información hacia la mayoría de dispositivos conectados en la misma, incluso valerse de Internet para controlar un dispositivo electrónico específico.

Las tarjetas de desarrollo tienen la capacidad de leer información de diferentes tipos de dispositivos de entradas como, por ejemplo: sensores, antenas, etc. Así como también dispositivos de salida como son leds, parlantes, motores entre otros.

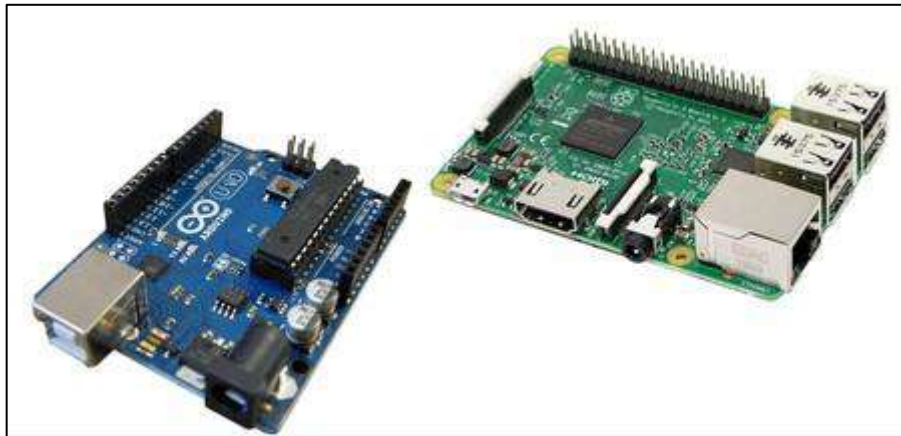
### 1.9.1. *Arduino*

Es una placa para prototipos electrónicos de código abierto, este software y hardware es flexible y fácil al momento de usarlo. Gracias a su entorno se logra la recepción de entradas para poder utilizar estas variables de la mejor manera por parte del usuario, estas variables pueden afectar el estado de diversos dispositivos de salida activándolos o desactivándolo según la necesidad del usuario.

Las principales características de esta tarjeta son: fácil accesibilidad, es multiplataforma, entorno de programación simple y claro, código abierto y software extensible. (ARDUINO 2019)

### 1.9.2. *Rapsberry PI*

Es un ordenador pequeño de fácil accesibilidad barato, posee un Microcontrolador, una memoria RAM, y todos los componentes necesarios para poseer la capacidad de ejecutar programas básicos. A esta tarjeta se debe conectar dispositivos de entrada y salida como son: pantalla, teclado, mouse, parlantes, entre otros; y así poder utilizar de las diferentes herramientas de control. Además, posee una tarjeta SD para el almacenamiento del sistema operativo tales como Raspbian, Arch, Linux, entre otros. (RASPBERRY 2015)



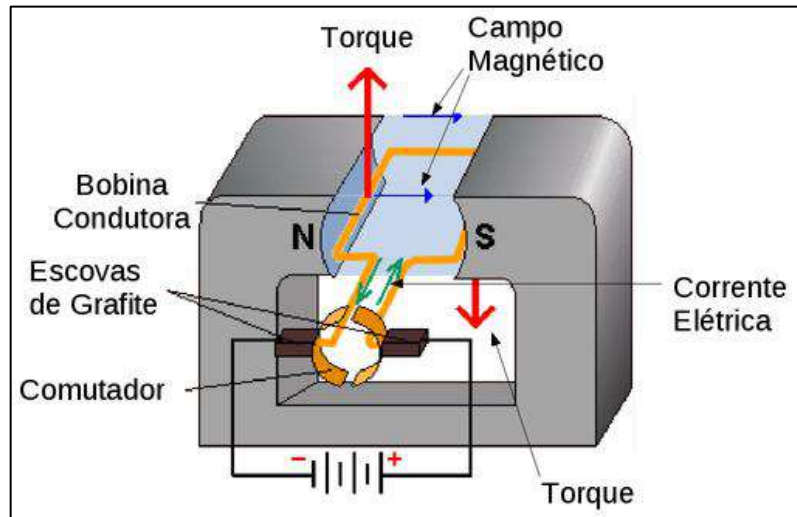
**Figura 15-1:** Placas de desarrollo. Arduino y Raspberry PI.

**Fuente:** <https://www.xataka.com/basics/arduino-raspberry-pi-que-cuales-sus-diferencias>

## 1.10. Motores de corriente continua

Todos los motores transforman la energía eléctrica en energía mecánica, los motores de corriente continua son ampliamente utilizados en la robótica donde se precisa de un control de velocidad o posicionamiento como ocurre con los servomotores. Las principales partes de estos motores son: el estator y el rotor. El estator está compuesto por imanes permanente o por un devanado de cables de cobre. El rotor, está formado de un devanado con núcleo el cual es excitado por la corriente proveniente de la fuente a través de las escobillas.

La base del funcionamiento es la acción de los campos magnéticos opuestos que hacen girar el eje interno (rotor) en dirección contraria al estator (imán externo o bobina), en la figura 17-1 se observa dicho proceso. Para invertir la dirección de giro de esta clase de motor se debe cambiar la polaridad de la alimentación. (Zavala 2007)



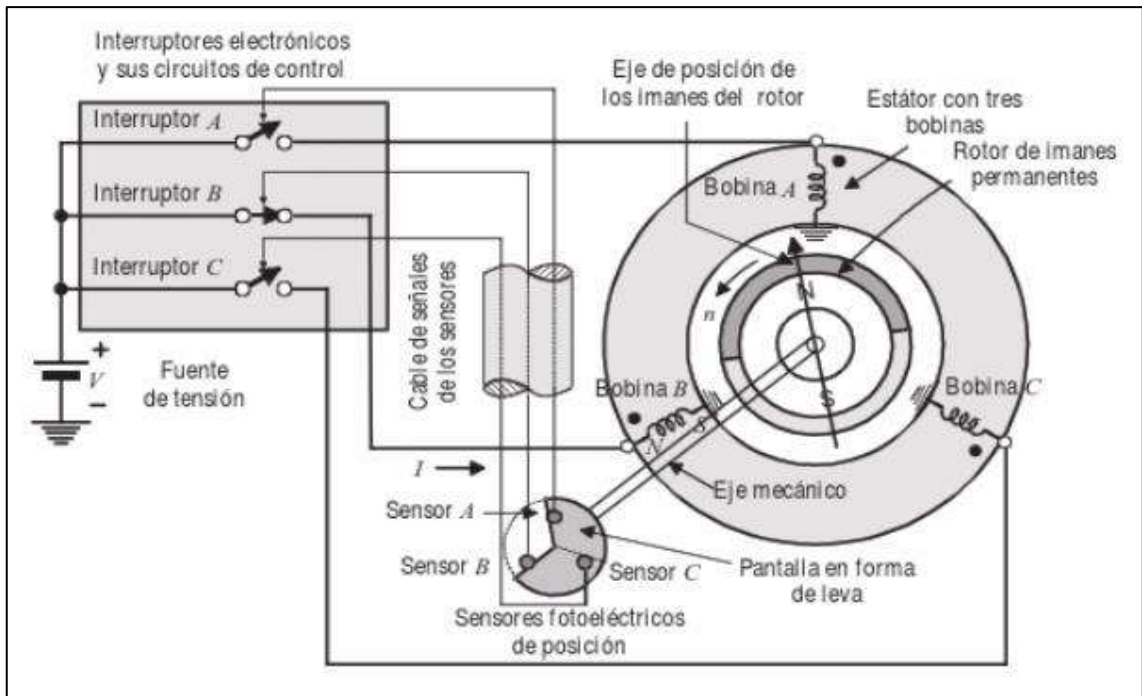
**Figura 16-1:** Representación simplificada de un motor DC.

Fuente: (Zavala 2007)

### 1.10.1. Motores brushless

Estos motores poseen una distribución inversa a la convencional de los motores c.c., esto es que el inductor se encuentra en el rotor y no tienen devanados polares lo cual evita el uso de anillos deslizantes para su excitación. Los polos están formados por imanes permanentes y con una estructura de polos lisos o cilíndricos. El inducido se encuentra en el estator, por consiguiente éste no posee colector de delgas; para las conmutaciones de corriente en las bobinas se usan interruptores electrónicos.

Un motor clásico posee un alto número de bobinas y por consiguiente de delgas, produciéndose un gran número de conmutaciones por cada revolución. Al emplear un gran número de bobinas en los motores brushless se necesitaría el mismo número de interruptores electrónicos, por lo cual para simplificar estos motores el número de bobinas se limita a tres, reduciendo el coste de su control (tres interruptores electrónicos). El motor sin escobillas se destaca por poseer un sistema para detectar la posición del rotor utilizando sensores que ayudan a sincronizar las conmutaciones electrónicas. En la figura 18-1 se presenta el esquema de un motor c.c. sin escobillas. (Fraile Mora 2008)



**Figura 17-1:** Representación simplificada de un motor DC sin escobillas.

Fuente: (Fraile Mora 2008)

### 1.11. Baterías

Convierten la energía química almacenada en energía eléctrica debido a su composición, la cual consta de una o más celdas electroquímicas. Se pueden encontrar dos tipos, las primarias y las secundarias, las primarias no son recargables, pero poseen una mayor densidad de energía con respecto a las secundarias que sí son recargables y son las más utilizadas en AUVs. Dentro de las baterías secundarias, las de Li-Ion (Ion de Litio) poseen la más alta densidad energética, además el desarrollo en la tecnología de éstas la convierten en la elección más común para los AUVs. (Moreno, Héctor A. et al. 2014)



**Figura 18-1:** Tipos de baterías. No recargables (izquierda) y recargables (derecha).

Fuente: <https://elvuolodrone.com/blog-de-drones/uso-cuidado-baterias-para-drones/>



### 1.11.1. Baterías de polímero de litio (LiPo)

Las baterías LiPo, su nombre proviene de la abreviatura de Litio y polímero. Son baterías recargables empleadas en aplicaciones que exigen un gran consumo de corriente, estas ocupan un espacio reducido y son ligeras. En la tabla 10.1 se muestran las ventajas y desventajas de este tipo de baterías.

**Tabla 4-1:** Ventajas y desventajas de las baterías LiPo.

<b>VENTAJAS</b>	<b>DESVENTAJAS</b>
Son fabricadas en diferentes formas y tamaños	Problemas de seguridad (riego de incendio o explosión)
Relación tamaño-eficiencia alta	Requieren gran cuidado durante la carga, descarga y almacenamiento.
Tasa de descarga alta	Se deforman (se abomban) por el aumento de temperatura, debido a demandas de corriente mayor a la corriente máxima de descarga.

**Realizado por:** (Rosero y Mazón, 2019)

**Fuente:** (Andrea 2010)

Estas baterías están conformadas por celdas de 3.7V a 4.2 V cada una denotadas, las cuales se conectan en serie para aumentar su voltaje y corriente. Las principales características de una batería LiPo se detallan en la tabla 5-1. (Andrea 2010)

**Tabla 5-1:** Características de las baterías Lipo.

<b>CARACTERÍSTICA</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
Capacidad	Corriente que puede suministrar la batería, se mide en mAh.
Tasa de descarga	Indica la rapidez con la cual se descarga la batería de forma segura. Se denota por un número entero n acompañado de la letra C, esto se traduce en que la batería puede entregar n veces su capacidad.
Número de celdas	Determinan el voltaje total, se denotan por un número entero (celdas) y la letra S.
Tamaño	Depende directamente de la capacidad y número de celdas de la batería.

**Realizado por:** (Rosero y Mazón, 2019)

**Fuente:** (Andrea 2010)



**Figura 19-1:** Diferentes baterías Lipo.

Realizado por: (Rosero y Mazón, 2019)

### 1.12. Impresión 3D

Es una tecnología para crear objetos tridimensionales utilizando materias primas y modelos informáticos. Una impresora 3D moldea la materia prima (generalmente plástico), calentándola al pasar por un extrusor y dibujando un objeto en tres dimensiones por medio de capas. Los materiales más utilizados son: ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) y PLA (ácido poliláctico). (Baden et al. 2015)

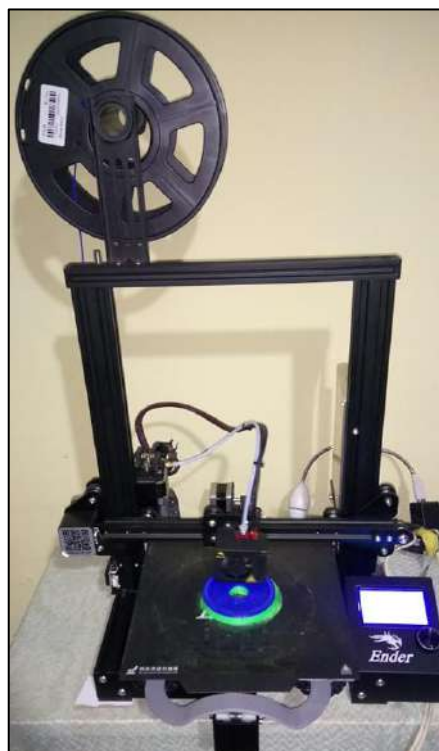
Actualmente las impresoras 3D son relativamente asequibles dependiendo la tecnología con la que cuentan, existen varios tipos de impresoras 3D basadas en diferentes tecnologías y estas son:

- Modelado por deposición fundida (FDM): Es el método más común, consiste en calentar el filamento termoplástico y extruyéndolo en las coordenadas X e Y, desplazándose en el eje Z al finalizar cada capa.
- Estereolitografía (SLA): Es la tecnología más antigua, se basa en exponer una capa de resina líquida fotosensible a un rayo láser UV endureciéndola y solidificándola.
- Procesamiento digital de luz (DLP): Similar a la estereolitografía, esta tecnología utiliza fotopolímeros líquidos endureciéndose al aplicarle luz, para ello utiliza una red de microespejos controlados por computador sobre un chip semiconductor.
- Sinterizado Selectivo por láser (SLS): Parecida a la tecnología SLA, con la diferencia de que esta utiliza un material en polvo en lugar de una resina líquida.
- Fusión selectiva por láser (SLM): Usa un láser de alta potencia para fundir polvos metálicos para convertirlos en objetos sólidos tridimensionales.

- Fusión por haz de electrones (EBM): Utiliza un haz de electrones controlado por computadora, con altas presiones al vacío y altas temperaturas (alrededor de 1000 °C) para fundir el polvo metálico.
- Fabricación mediante laminado de objetos (OBM): Emplea plástico, papel o laminas metálicas recubiertos con adhesivos, que son fundidos por calor y presión, cortados por una cuchilla o laser controlados por computador.
- Inyección de aglutinante (BJ): Es un proceso de fabricación aditiva, utiliza dos materiales, uno a base de polvo (generalmente yeso) y un material adhesivo que une las capas de polvo.
- Inyección de material (MJ): Mejor conocida como moldeo a la cera perdida, la cera fundida se coloca en capas sobre una base de aluminio a través de extrusores que recorren el área de construcción.

De todas estas tecnologías la más común es el modelado por deposición fundida, permitiéndole al usuario crear objetos tridimensionales de forma rápida y barata. (All3DP - La revista líder internacional de impresión 3D 2019)

A continuación, en la figura 11.1 se observa una impresora 3D típica para hogares con tecnología de modelado por deposición fundida.



**Figura 20-1:** Impresora 3D con modelado por deposición fundida.

**Realizado por:** (Rosero y Mazón, 2019)

## **CAPITULO II**

### **2. MARCO METODOLÓGICO**

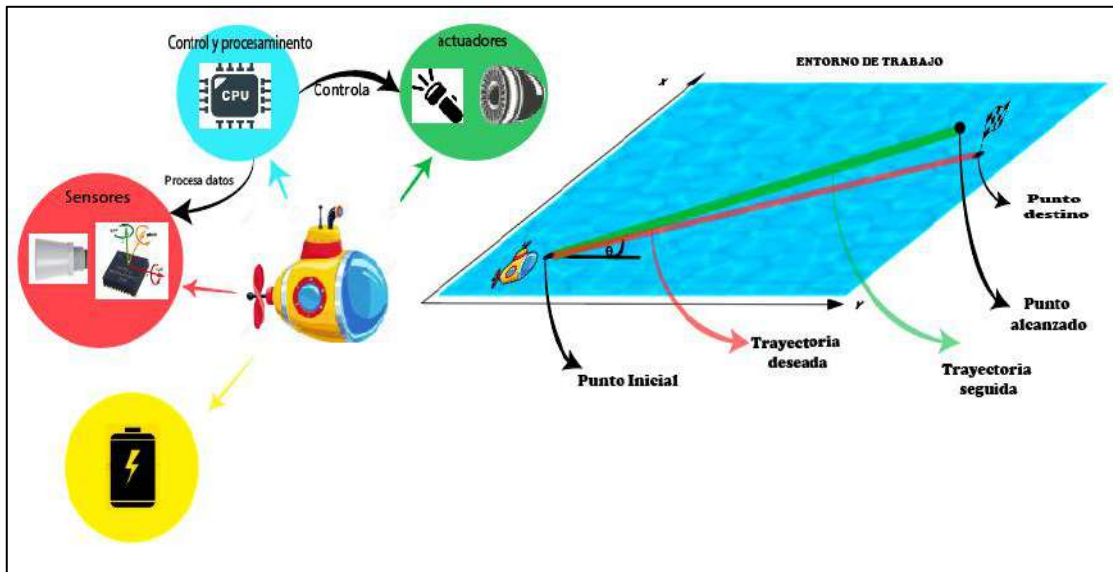
Para el desarrollo del presente capítulo se describe el diseño del prototipo, tanto los componentes, el hardware y el software necesarios. Se detallan cada uno de los elementos utilizados, sus características, también se presentan los diagramas electrónicos del prototipo.

#### **2.1. Requerimientos del sistema**

Los requerimientos a satisfacer se detallan a continuación:

- El prototipo debe incorporar un Sistema de Navegación Inercial.
- Posicionamiento mediante sensor ultrasónico.
- El prototipo de ser autónomo.
- Capacidad de seguir la trayectoria lineal deseada.
- Autonomía energética para completar un recorrido.
- Garantizar la impermeabilidad del casco.
- Transportable.
- Ser de bajo costo.
- Control de encendido y apagado.
- Fácil acceso a los componentes internos del prototipo.
- Estabilidad.
- Resistencia a la presión.

## 2.2. Concepción general de la arquitectura del sistema



**Figura 1-2:** Arquitectura general del prototipo.

**Realizado por:** (Rosero y Mazón, 2019)

En la figura 1-2 se observa la concepción del prototipo, el cual cuenta con un interruptor para el inicio y apagado encargado de iniciar y apagar el sistema. Se aprecian dos etapas, la primera es la adquisición de datos, la cual la constituyen los sensores (IMU y sensor ultrasónico) encargados de proveer los datos de orientación y posicionamiento; la segunda etapa es la de procesamiento y control, la misma que se encarga de procesar los datos predefinidos por el usuario y los datos obtenidos de la etapa anterior, aplicando algoritmos para el control de los actuadores (turbinas). Una batería alimenta a cada uno de los componentes electrónicos del prototipo.

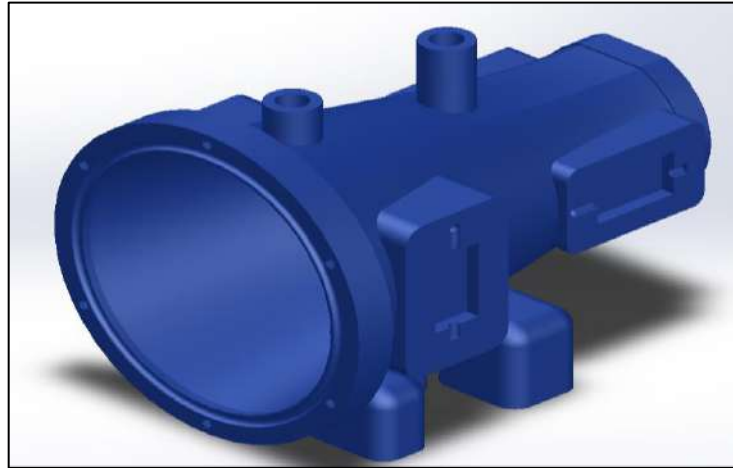
## 2.3. Diseño del prototipo AUV

Se realizó el diseño del AUV utilizando el software CAD SolidWorks, para el diseño se consideraron varios aspectos, tales como: forma del casco, estabilidad, flotabilidad, peso y volumen.

Para el diseño de la cubierta se eligió la forma de un cuerpo similar a una gota de agua en posición horizontal, lo que lo convierte en un cuerpo hidrodinámico. La parte frontal es una semiesfera que corresponde a un domo de acrílico, el cuerpo complementa la forma de gota con soportes para los propulsores (dos para sumersión y emersión, dos para el avance), también posee una agarradera en la parte superior para su fácil transporte. En la parte inferior se acopla un par de flotadores de forma hexagonal para la estabilidad unidos al cuerpo principal por medio de dos placas rectangulares, además contienen a los sensores ultrasónicos. En la parte trasera se le ha provisto

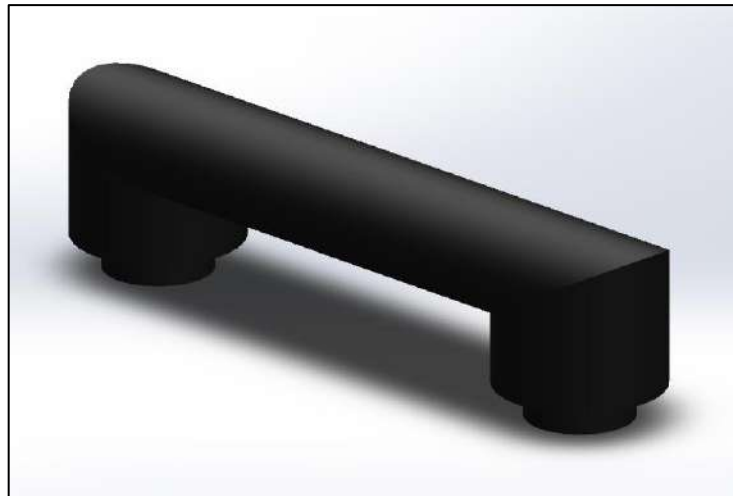
de un acceso al interior del casco, el cual se lo ha construido con un frasco hermético con una tapa tipo rosca.

A continuación, se muestran los diseños de las partes del AUV y posteriormente su ensamble completo.



**Figura 2-2:** Diseño del casco en SolidWorks.

**Realizado por:** (Rosero y Mazón, 2019)



**Figura 3-2:** Diseño de la agarradera en SolidWorks.

**Realizado por:** (Rosero y Mazón, 2019)



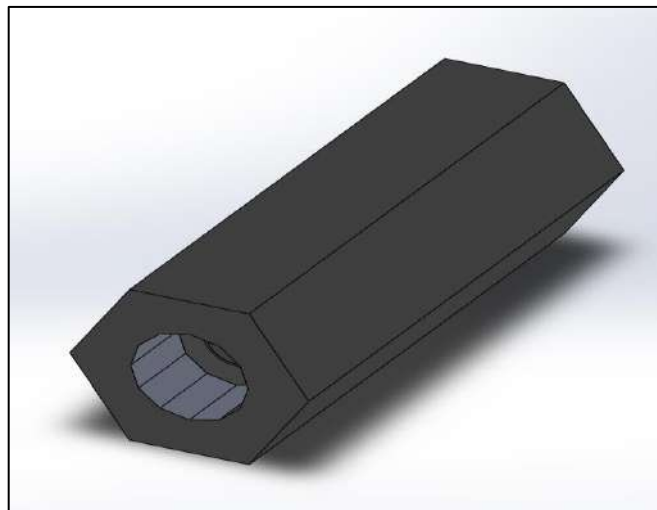
**Figura 4-2:** Diseño de las placas rectangulares en SolidWorks.

**Realizado por:** (Rosero y Mazón, 2019)



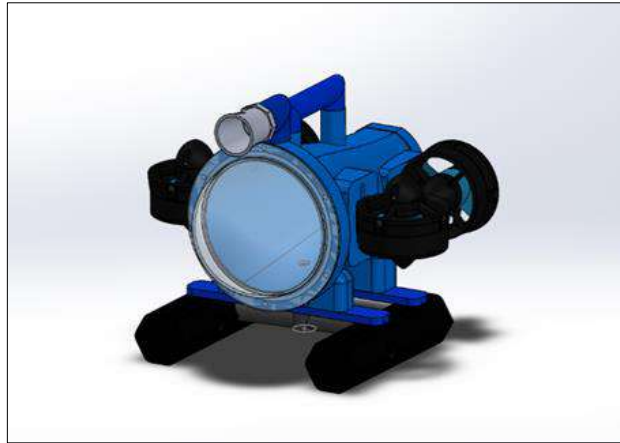
**Figura 5-2:** Diseño de la tubería tipo T en SolidWorks.

**Realizado por:** (Rosero y Mazón, 2019)



**Figura 6-2:** Diseño de los flotadores en SolidWorks.

**Realizado por:** (Rosero y Mazón, 2019)



**Figura 7-2:** Diseño del prototipo ensamblado en SolidWorks.

Realizado por: (Rosero y Mazón, 2019)

## 2.4. Selección de los componentes del prototipo

En base a los requerimientos se procedió a la selección de los componentes que conforman el sistema, detallando sus características que los hacen adecuados para este trabajo.

### 2.4.1. Dispositivos de procesamiento

#### 2.4.1.1. Arduino Mega 2560

Arduino es una plataforma de código libre cuyo software y hardware son de fácil uso y adquisición. En la actualidad este tipo de placas son utilizadas en diversos proyectos académicos y científicos.

El Arduino Mega 2560 se muestra en la figura 1-2, sus características (ver Anexo A) se detallan a continuación en la tabla 1-2:

**Tabla 1-2:** Características Arduino Mega 2560.

Microcontrolador	ATmega2560
Tensión de funcionamiento	5 V
Tensión de entrada	7-12 V
Pines digitales de E/S	54 (15 PWM)
Pines analógicos	16
Corriente DC por pin de E/S	20 mA
Corriente DC para el pin 3.3V	50 mA
Memoria flash	256 KB



SRAM	8 KB
EEPROM	4KB
Velocidad del reloj	16MHz
Dimensiones	10.15x5.33 cm
Peso	37 g

Fuente: (ARDUINO 2019)

Realizado por: (Rosero y Mazón, 2019)

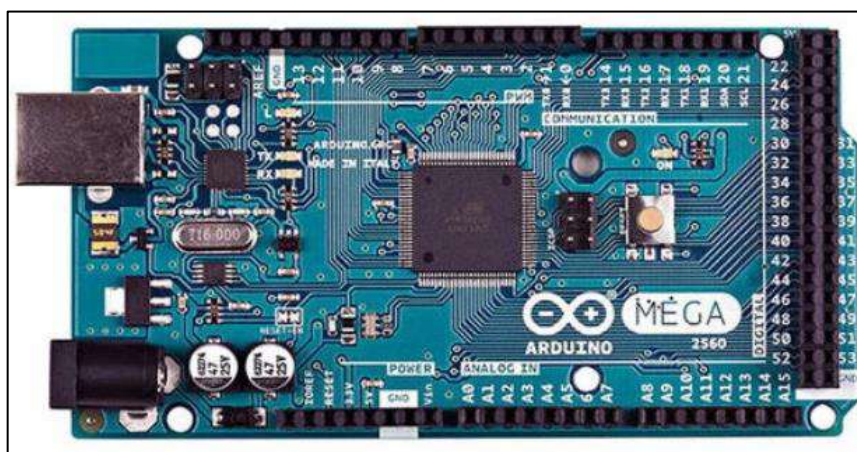


Figura 8-2: Arduino Mega 2560

Realizado por: (Rosero y Mazón, 2019)

## 2.4.2. Dispositivos de adquisición de datos

### 2.4.2.1. Unidad de medición inercial BNO055

La IMU BNO055 diseñada por BOSCH y fabricada por Adafruit, es una placa compacta de 9 DOF. Adafruit ofrece documentación y soporte para este producto facilitando su uso; las características de este sensor inteligente (ver Anexo B) se detallan a continuación en la tabla 2-2.

Tabla 2-2: Características de la IMU BNO055 de Adafruit.

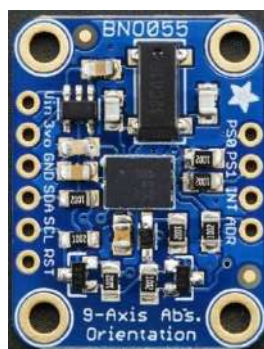
Características	Descripción
<b>Orientación absoluta</b>	Ángulos de Euler, 100 Hz Cuaternios, 100 Hz
<b>Vector de velocidad angular</b>	3 ejes de velocidad de rotación medidos en rad/s, 100 Hz
<b>Vector aceleración</b>	3 ejes de aceleración lineal (incluida la gravedad) medidos en $m/s^2$ , 100 Hz.

<b>Vector de intensidad de campo magnético</b>	3 ejes de campo magnético sensados en microTeslas ( $\mu\text{T}$ ), 20 Hz
<b>Vector aceleración lineal</b>	3 ejes de aceleración lineal (excluida la gravedad) medidos en $m/s^2$ , 100 Hz.
<b>Vector gravedad</b>	3 ejes de aceleración gravitacional medidos en $m/s^2$ , 100 Hz.
<b>Temperatura</b>	Temperatura ambiente en $^{\circ}\text{C}$ , 1 Hz.

Fuente: (Anexo B)

Realizado por: (Rosero y Mazón, 2019)

En la figura 9-2 se aprecia el sensor BNO055, posterior a ello en la tabla 3.2 se detalla la distribución de cada uno de sus pines.



**Figura 9-2:** IMU BNO055 de Adafruit.

Realizado por: (Rosero y Mazón, 2019)

**Tabla 3-2:** Distribución de los pines de la IMU BNO055.

<b>Pines de salida</b>	<b>Descripción</b>
<b>Vin</b>	3.3-5V DC
<b>3vo</b>	Salida de 3.3V
<b>GND</b>	Pin común para alimentación y lógica
<b>SCL</b>	Pin de reloj I2C
<b>SDA</b>	Pin de datos I2C
<b>RST</b>	Pin de reseteo hardware.
<b>INT</b>	Pin de interrupción
<b>ADR</b>	Pin para asignar la dirección I2C (predeterminado 0x28)
<b>PS0 y PS1</b>	Pines para cambiar el protocolo de comunicación del dispositivo

Fuente: (Anexo B)

Realizado por: (Rosero y Mazón, 2019)

#### 2.4.2.2. Sensor ultrasónico MB 7389-100

Posee una carcasa de PVC compacta y robusta que cumple con el estándar IP67 (intrusión de agua). Además, entrega lecturas de distancia virtualmente libres de ruido, calibración automática, análisis de forma de onda y algoritmos de rechazo de ruido.

A continuación, se detallan las características del sensor:

- Resolución de 1 mm.
- Velocidad de lectura 6.7 Hz.
- Posee tres tipos de salida: voltaje analógico, ancho de pulso, Serial TTL.
- Voltaje de alimentación de 2.7-5.5 V.
- Corriente promedio requerida: 2.9 mA.
- Temperatura de funcionamiento de -40 a 65 °C.
- Calibración automática.
- Nivel de protección IP67.
- Combina con las conexiones estándar de PVC de 3/4 pulgada.
- Rango de operación: 300-5000 mm

**Tabla 4-2:** Características del sensor ultrasónico MB 7389-100.

<b>CARACTERÍSTICA</b>	<b>ESPECIFICACIONES</b>
Resolución	1 mm
Frecuencia de lectura de datos	6.7 Hz
Tipos de salida	Voltaje analógico, PWM, Serial TTL.
Consumo de corriente	2.9 mA
Voltaje de alimentación	2.7 - 5.5 V
Temperatura de funcionamiento	-40 °C a 65 °C
Calibración	Automática
Nivel de protección	IP67
Rango de operación	300-5000 mm

**Fuente:** (Anexo C)

**Realizado por:** (Rosero y Mazón, 2019)



**Figura 10-2:** Sensor ultrasónico MB 7389-100.

Realizado por: (Rosero y Mazón, 2019)

### 2.4.3. Dispositivos de propulsión

#### 2.4.3.1. Propulsores – ROVMAKER underwater DC motor brushless thruster

Estos son las encargadas de la propulsión del vehículo, los AUVs precisan de estrictas características tales como impermeabilidad, resistencia a la presión del agua y anticorrosión. El propulsor ROVMAKER está diseñado a partir de plástico moldeado por inyección ABS de gran resistencia. El motor está recubierto por un revestimiento epoxi, lo cual aísla a éste del agua. Además, incluye el ESC, éste viene como parte del propulsor, pudiendo sujetarlo o no al propulsor por medio de tornillos, lo cual lo hace versátil afrente a las diferentes necesidades.

En la tabla 5-2, se detallan las especificaciones de estos propulsores (ver Anexo D).

**Tabla 5-2:** Especificaciones del propulsor ROVMAKER.

Tipo	Motor DC brushless
Máxima corriente continua	15 A
Potencia máxima de salida	300 W
Voltaje	12-24 V (3S-6S)

KV	350
Tamaño	101x55x60 mm
ESC	30 A bidireccional
Señal de control	50 Hz PWM
Rango PWM	1 ms - 1.5 ms; 1.5 ms – 2ms
Fuerza de empuje	2kgf
Profundidad máxima	300 m

**Fuente:** (ROVMAKER)

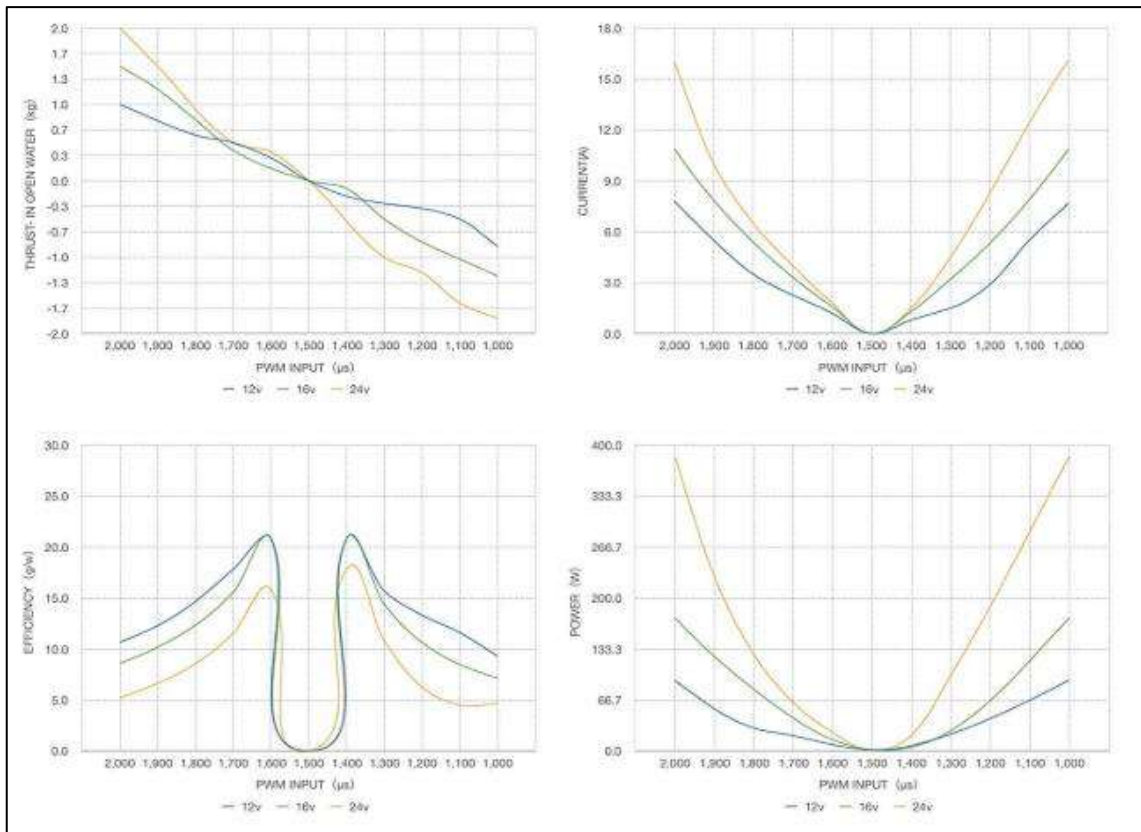
**Realizado por:** (Rosero y Mazón, 2019)



**Figura 11-2:** Propulsor ROVMAKER underwater DC motor brushless thruster.

**Realizado por:** (Rosero y Mazón, 2019)

En la figura 12-2 se observa las gráficas de comportamiento para la fuerza de empuje, corriente, eficiencia y potencia de los propulsores.



**Figura 12-2:** Comportamiento de la fuerza de empuje, corriente, eficiencia y potencia.

Realizado por: (Rosero y Mazón, 2019)

#### 2.4.4. Fuentes de energía

##### 2.4.4.1. Batería LiPo Turnigy 4S 30-40C 4000 mAh

Es la encargada de proveer la energía eléctrica a todo el sistema. Este tipo de baterías están diseñadas específicamente para drones, AUVs, ROVs y afines. Estas baterías están hechas de polímero de litio de alta calidad, ofrecen gran potencia, la velocidad de descarga de 40C le otorga suficiente potencia para una buena aceleración.

Las características de esta batería son las siguientes:

**Tabla 6-2:** Características de la batería LiPo Turnigy 4S 30-40C 4000 mAh.

Material	Li-polímero
Celdas	4
Voltaje	14.8 V
Capacidad	4000 mAh
Velocidad de descarga	30C-40C

Conector de carga	XT-60
Dimensión	148x50x29 mm
Peso	425 g

Fuente: (Turnigy 2016)

Realizado por: (Rosero y Mazón, 2019)



**Figura 13-2:** Batería LiPo Turnigy 4S 30-40C 4000 mAh.

Realizado por: (Rosero y Mazón, 2019)

Para calcular el tiempo de autonomía energética del AUV, se requiere conocer el consumo de corriente del sistema y la capacidad de la batería. En la tabla 7-2 se detalla el consumo de cada elemento del sistema.

**Tabla 7-2:** Consumo de corriente de los elementos del AUV.

Elemento	Corriente
Arduino MEGA 2560	200 mA
Sensor Ultrasónico MB 7389-100	5.8 mA
IMU BNO055	12.3 mA
Propulsores ROVMAKER	32 A (14.8V)
<b>Corriente total</b>	<b>32.219 A</b>

Realizado por: (Rosero y Mazón, 2019)

Obtenida la corriente consumida por el sistema (40.219 A) y conociendo que la capacidad de la batería es de 4000 mA.

$$\frac{\text{Capacidad de la batería}}{\text{Corriente del sistema}} = \text{tiempo en } h$$

Ecu. 1.2.

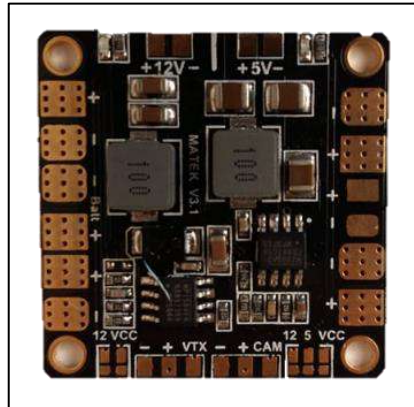
$$\frac{4 A/h}{32.219 A} = 0.125 h \quad \text{Ecu. 2.2.}$$

A continuación, se procede a convertir el tiempo en horas de la ecu. 2.2. a minutos:

$$0.125 h * \frac{60 \text{ min}}{1 h} = 7.5 \text{ min} \quad \text{Ecu. 3.2.}$$

#### 2.4.4.2. Tarjeta de distribución de energía Mini Power HUB

Es una placa compacta de distribución de energía, usada generalmente para alimentar motores brushless de drones. Sus características se ajustan a las necesidades de este proyecto, en la figura 14-2 se observa esta tarjeta.



**Figura 14-2:** Tarjeta de distribución de energía Mini Power HUB

Realizado por: (Rosero y Mazón, 2019)

En la tabla 8-2 se detallan las especificaciones de esta placa (ver Anexo F).

**Tabla 8-2:** Especificaciones de la tarjeta distribuidora de energía Mini Power HUB.

Especificaciones	Descripción
Voltaje de alimentación	9-26VDC 3S-6S.
Salidas de voltaje reguladas	5V y 12V.
Salidas ESC	4 salidas, 20 A por salida.
Salidas BEC 5V	3A, eficiencia 95%.
Salidas BEC 12V	4S-6S, 12V, 2ª.
Dimensiones	36x36mm, 6g.

Realizado por: (Rosero y Mazón, 2019).



## 2.5. Equipos empleados para la construcción de la estructura

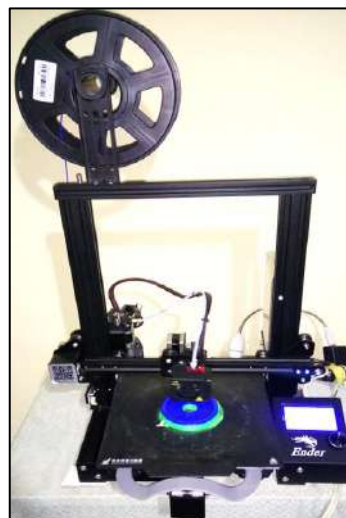
### 2.5.1. Impresora 3D Creality modelo Ender 3 Pro

Es una impresora 3D compacta con una gran robustez debido a su forma de construcción con piezas metálicas fuertes y ligeras. Posee una cama magnética que facilita el retiro del objeto impreso. Gracias a su relación precio-calidad es una gran opción para el hogar. En la tabla 9-2 se adjuntan las características de este equipo (ver Anexo G).

**Tabla 9-2:** Características de la impresora 3D Creality modelo Ender 3 Pro.

CARACTERÍSTICA	ESPECIFICACIONES
Volumen máximo de impresión	220x220x250 mm
Extrusor	Tipo MK-10
Nozzle o punta	0.4 mm y 0.2 mm intercambiables
Máxima velocidad de impresión	180mm/s
Resolución de capa	0.1-0.4 mm
Temperatura cama caliente	110°C
Tipos de filamento	1.75 mm PLA, ABS, madera, TPU, etc.
Cama magnética	Facilita el despegue de piezas
Sistema PAUSE/RESUME	Permite pausar y continuar con la impresión después de parar el proceso.

Realizado por: (Rosero y Mazón, 2019).



**Figura 15-2:** Impresora 3D Creality modelo Ender 3 Pro.

Realizado por: (Rosero y Mazón, 2019).

## 2.6. Diseño electrónico y mecánico del prototipo

### 2.6.1. Análisis de la resistencia a la presión externa

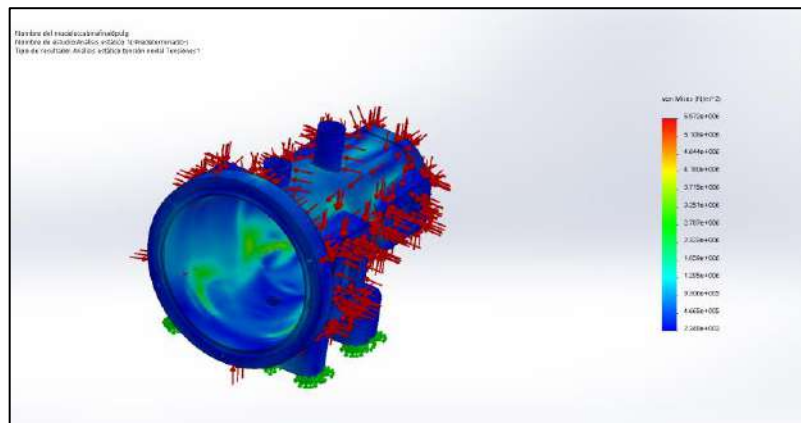
Asumiendo que el prototipo se sumergirá a una profundidad máxima de dos metros, se procede a calcular la presión del agua a dicha profundidad.

$$P = \rho \times g \times h \quad \text{Ecu 4.2.}$$

$$P = 1000 \times 9.8 \times 2$$

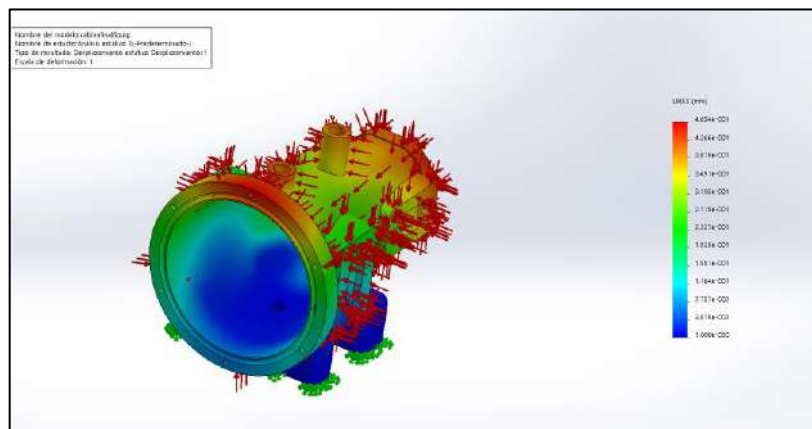
$$P = 19\,600 \text{ Pa}$$

Con la ayuda de SolidWorks se procede a realizar el análisis de presiones sobre el prototipo.



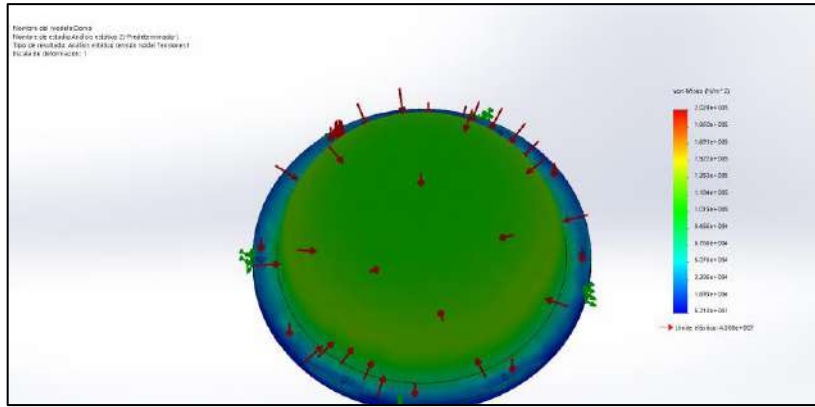
**Figura 16-2:** Estudio de tensiones del casco en SolidWorks.

**Realizado por:** (Rosero y Mazón, 2019).



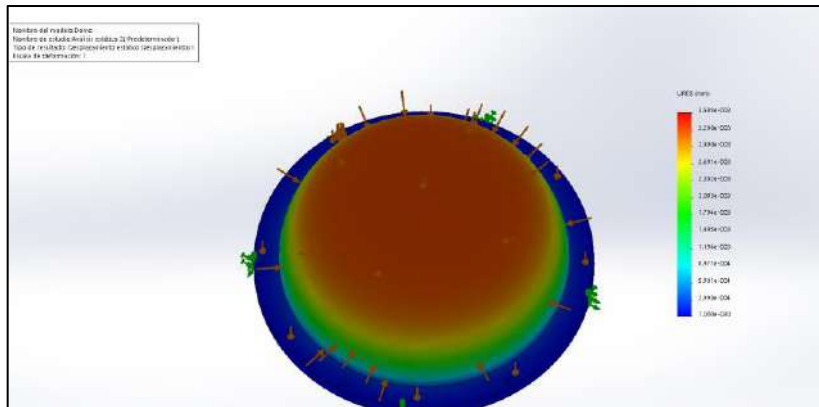
**Figura 17-2:** Estudio de desplazamientos del casco en SolidWorks.

**Realizado por:** (Rosero y Mazón, 2019)



**Figura 18-2:** Estudio de tensiones del domo en SolidWorks.

**Realizado por:** (Rosero y Mazón, 2019)



**Figura 19-2:** Estudio de desplazamientos del domo en SolidWorks.

**Realizado por:** (Rosero y Mazón, 2019)

Gracias a este estudio se determinó que no existen deformaciones, fisuras o indicios de ruptura que afecten la integridad de la estructura. Además, se observó la distribución de la presión ejercida sobre el domo y el casco.

### 2.6.2. *Análisis de la potencia de los propulsores*

Existen dos efectos por resistencia al avance de un cuerpo producidos por la viscosidad del fluido en el cual se encuentra sumergido, estos son: la fricción producida por el rozamiento entre el fluido y la superficie del cuerpo, y la variación de la distribución de la presión.

El primer efecto da lugar a la resistencia de fricción y el segundo a la resistencia de forma, residual o de presión. Para calcular la fuerza de resistencia al avance se utilizan las siguientes fórmulas: (Quispe 2014)

$$F_D = F_{D_{fricción}} + F_{D_{forma}} \quad \text{Ecu. 4.2.}$$

$$F_{D_{fricción}} = \frac{1}{2} \rho C_{D_{fricción}} A_{proy} V^2 \quad \text{Ecu. 5.2.}$$

$$C_{D_{fricción}} = \frac{0.075}{(\log(Re) - 2)^2} \quad \text{Ecu. 6.2.}$$

$$Re = \frac{\rho V l}{\nu} \quad \text{Ecu. 7.2.}$$

$$F_{D_{forma}} = \frac{1}{2} \rho C_{D_{forma}} A_{contacto} V^2 \quad \text{Ecu. 8.2.}$$

$$C_{D_{forma}} = \frac{0.075}{(5.61 + \log(Re) - 2)^2} \left( 2.643 + 1.5 \left( \frac{d}{l} \right)^{1.5} + 7 \left( \frac{d}{l} \right)^3 \right) * \frac{4l}{d} \quad \text{Ecu. 9.2.}$$

Donde:

$F_D$  es la fuerza de resistencia al avance.

$F_{D_{fricción}}$  es la fuerza de resistencia de fricción.

$F_{D_{forma}}$  es la fuerza de resistencia de forma

$\rho$  es la densidad del fluido

$C_{D_{fricción}}$  es el coeficiente de arrastre por fricción

$Re$  es el número de Reynolds.

$A_{proy}$  es el área proyectada

$V$  es la velocidad del cuerpo en el fluido

$l$  es la longitud del cuerpo

$d$  es el diámetro del cuerpo

$C_{D_{forma}}$  es el coeficiente de arrastre de forma

$A_{contacto}$  es el área de contacto

Para el presente proyecto se asumió que el casco del robot es de forma cilíndrica para facilitar el análisis, debido a que el diseño presenta una forma irregular pero similar a la cilíndrica. Para ello se obtuvieron los siguientes datos:

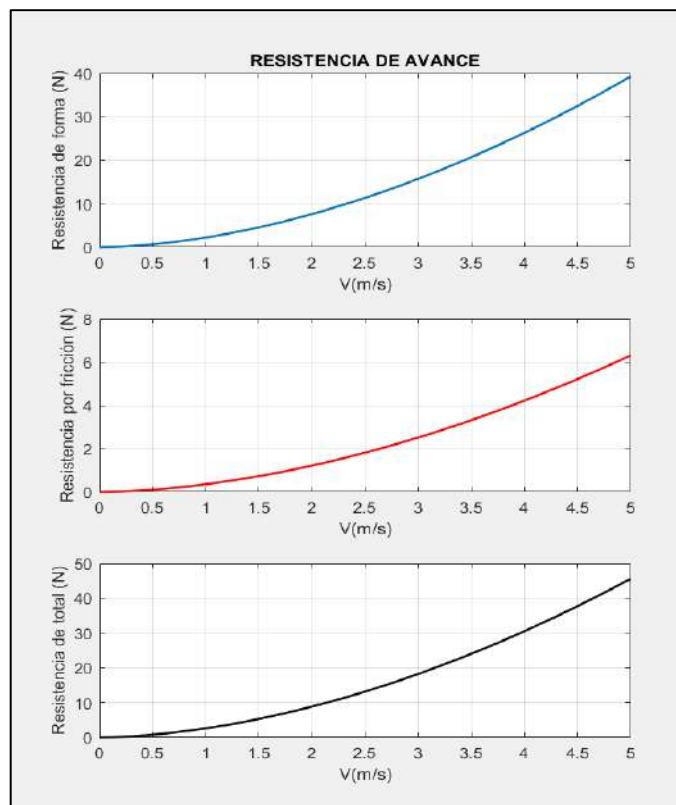
$$L = 0.3m$$

$$D = 0.178m$$

$$A_{proy} = 0.0249m^2$$

$$A_{contacto} = 0.1677m^2$$

Como ya se observó en las ecuaciones anteriores la fuerza de resistencia depende principalmente de la velocidad, para observar el comportamiento para el modelo de este trabajo se utilizó MATLAB. A continuación, se observa dicho comportamiento.



**Figura 20-2:** Comportamiento de la resistencia de avance y sus componentes.

Realizado por: (Rosero y Mazón, 2019)

El prototipo podrá avanzar a una velocidad máxima de 3 m/s presentando una fuerza de resistencia al avance de aproximadamente 18N, lo cual se traduce en 2 Kgf aproximadamente. En consecuencia, cada propulsor debe proveer de 1 Kgf. Con el fin de prolongar la vida útil de los propulsores se decidió sobredimensionar el empuje necesario del sistema, conociendo que cada propulsor provee 2 Kgf de empuje máximo.

## 2.7. Construcción y ensamble de la estructura del prototipo

### 2.7.1. Casco (cuerpo)

La construcción del casco se lo realizó mediante impresión 3D a partir del diseño en SolidWorks. La impresión se realizó con un factor de relleno de 100% (completamente sólido) para evitar grietas que puedan permitir el ingreso de agua al interior. El material utilizado fue PLA (ácido poliláctico) debido a su precio, maleabilidad, durabilidad y sobre todo a su fácil asequeabilidad.



**Figura 21-2:** Impresión 3D del casco.  
Realizado por: (Rosero y Mazón, 2019)

Para garantizar la impermeabilidad de la estructura y lisura del exterior se procedió a recubrir el mismo con resina para carrocería. Una vez cubierta la superficie con la resina (además lijada), lo siguiente fue revestir el casco con una base de poliuretano de secado rápido con el fin de garantizar la adherencia de la pintura (que va a continuación) para conseguir un acabado estético.



**Figura 22-2:** Casco recubierto de resina.

Realizado por: (Rosero y Mazón, 2019)



**Figura 23-2:** Apariencia final del casco.

**Realizado por:** (Rosero y Mazón, 2019)

### **2.7.2. Domo**

Como se aprecia en el diseño realizado en SolidWorks la sección frontal del prototipo consta de un domo de acrílico, la forma de éste es de una semiesfera hueca con un borde plano en el cual se encuentran los orificios para su acoplamiento al cuerpo del prototipo a través de tornillos.



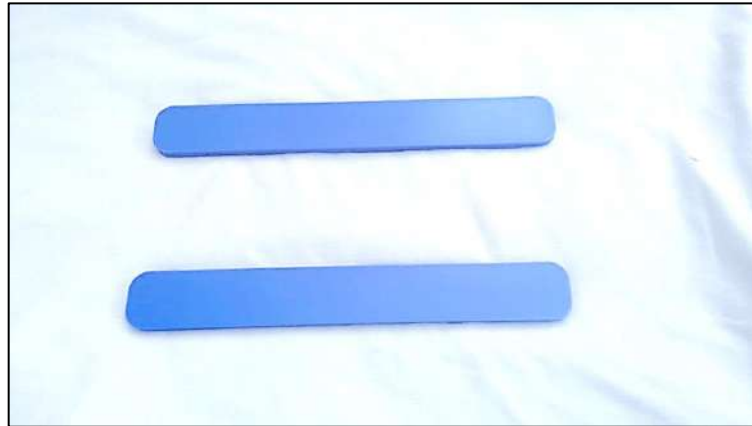
**Figura 24-2:** Domo de acrílico.

**Realizado por:** (Rosero y Mazón, 2019)

### **2.7.3. Construcción de partes adicionales**

Entre las partes adicionales están: los flotadores, la agarradera, la tubería tipo T, frasco hermético con tapa tipo rosca, una tapa interna que sirve como soporte para los botones y las placas

rectangulares que sostienen a los flotadores. Para la construcción de estos (con excepción del frasco hermético) se realizó de la misma manera que el casco, es decir, mediante impresión 3D.



**Figura 25-2:** Placas rectangulares.

**Realizado por:** (Rosero y Mazón, 2019)



**Figura 26-2:** Agarradera.

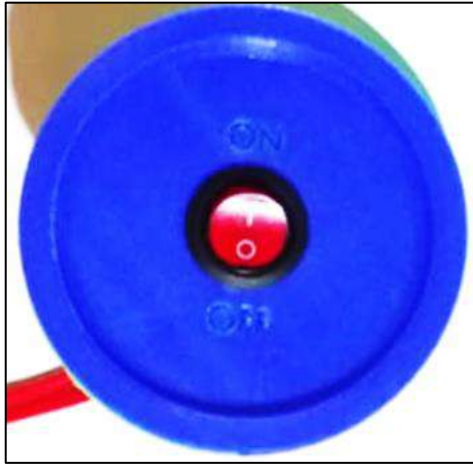
**Realizado por:** (Rosero y Mazón, 2019)



**Figura 27-2:** Frasco con tapa rosca.

**Realizado por:** (Rosero y Mazón, 2019)





**Figura 28-2:** Tapa interna de soporte.

**Realizado por:** (Rosero y Mazón, 2019)

#### **2.7.4. *Ensamble de la estructura***

Con todas las partes listas se procedió a ensamblar la estructura del prototipo. En la figura 29-2 se muestra el ensamble final de la estructura, el cual es similar al diseño realizado en SolidWorks.



**Figura 29-2:** Ensamble de la estructura del prototipo.

**Realizado por:** (Rosero y Mazón, 2019)

#### **2.8. Análisis de flotabilidad**

Todo cuerpo inmerso en un líquido experimenta una fuerza de empuje proporcional al volumen de líquido desplazado por dicho cuerpo. Para este trabajo se precisa determinar peso-volumen, permitiendo encontrar la flotabilidad del prototipo y modificarla (agregando peso) hasta obtener un valor cercano a cero; esto con el objetivo de reducir la demanda de los propulsores para la inmersión, además el valor de la flotabilidad debe ser ligeramente positivo con el fin de que en caso de presentarse algún inconveniente el prototipo tienda a emerger.

En base al diseño, los flotadores que se encuentran en la parte inferior del AUV contribuyen a la estabilidad del prototipo, también sirve como base de apoyo.

### 2.8.1. *Medición del volumen del prototipo*

Utilizando el principio de Arquímedes se procedió a medir el volumen del prototipo, este proceso se realizó sumergiéndolo en un recipiente lleno de agua a rebosar, con otro recipiente se capta el agua desalojada. Finalmente se procede a medir la cantidad de agua desalojada, obteniendo un volumen aproximado de  $6000\text{ cm}^3$ . En la figura 30-2 se observa el procedimiento realizado.



**Figura 30-2:** Medición de volumen del prototipo

Realizado por: (Rosero y Mazón, 2019)

### 2.8.2. *Medición del peso del prototipo*

Con la ayuda de una balanza electrónica se midió el peso del prototipo, obteniendo un peso total de 4.210 Kg. En la figura 31-2 se observa el pesaje.



**Figura 31-2:** Medición del peso del prototipo.

Realizado por: (Rosero y Mazón, 2019)

### 2.8.3. Cálculo de la flotabilidad del prototipo

Con los valores anteriormente obtenidos del peso y volumen del prototipo se procede a calcular la fuerza de empuje del agua. A continuación, se muestra el cálculo de dicha fuerza:

$$F_{empuje} = V_{AUV} * \rho_{agua} * g \quad \text{Ecu 10.2.}$$

$$F_{empuje} = 0.006 * 1000 * 9.8$$

$$F_{empuje} = 58.8 \text{ N}$$

Posteriormente se procedió a calcular la fuerza de flotabilidad:

$$F_{flotabilidad} = F_{empuje} - W \quad \text{Ecu 11.2.}$$

$$F_{flotabilidad} = 58.8 - 41.16$$

$$F_{flotabilidad} = 17.64 \text{ N}$$

Con este resultado es necesario agregar 1.8 Kg de peso adicional para lograr una flotabilidad nula.

## 2.9. Esquema de conexiones del prototipo

### 2.9.1. Conexiones del circuito de encendido

Para el encendido/apagado del sistema del prototipo se ha diseñado un circuito el cual cuenta con un interruptor, permitiendo el paso de energía a la tarjeta distribuidora para que ésta alimente a los demás elementos del sistema.

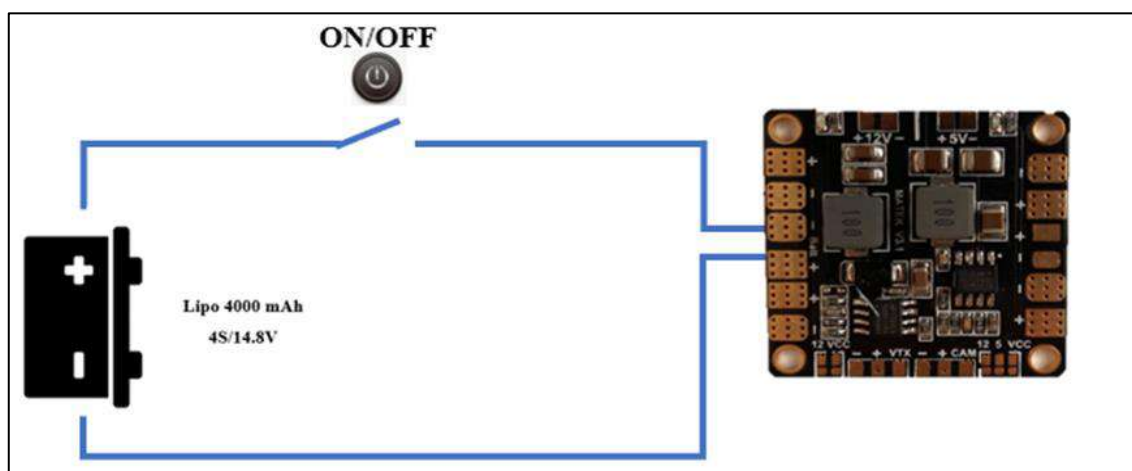
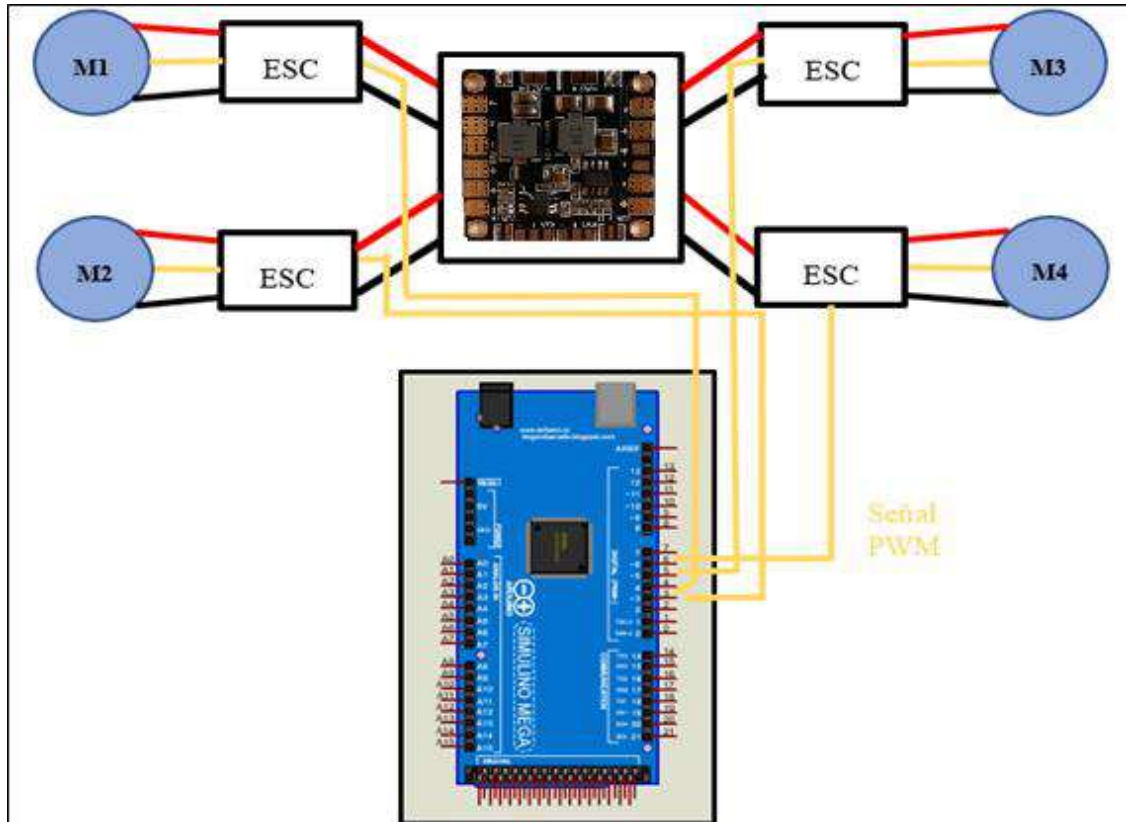


Figura 32-2: Esquema del circuito de encendido.

Realizado por: (Rosero y Mazón, 2019)

### 2.9.2. Conexiones de los propulsores

Como se muestra en la figura 33-2, los propulsores son alimentados a través de una placa de distribución de energía (HUB). Anteriormente se mencionó que cada propulsor incluye su propio ESC. El control de velocidad y giro de los propulsores es realizado por medio de la tarjeta Arduino MEGA alimentada también por el HUB, la cual provee de una señal PWM para cada propulsor.

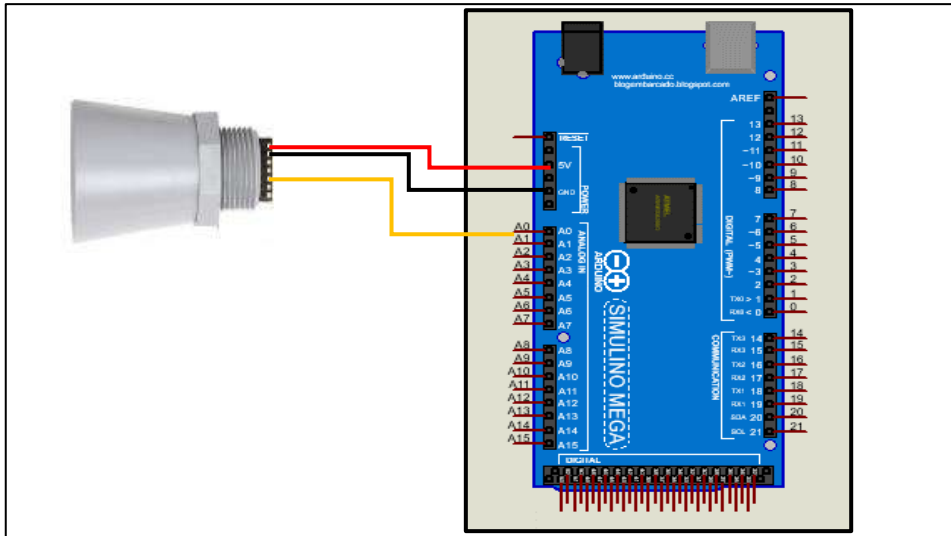


**Figura 33-2:** Esquema de conexiones de los propulsores.

Realizado por: (Rosero y Mazón, 2019)

### 2.9.3. Conexiones de los sensores ultrasónicos

En la figura 34-2, se observa el esquema de conexiones para el sensor. Es alimentado desde la Tarjeta Arduino MEGA con 5V; los sensores proveen de una señal analógica a la tarjeta Arduino para ser procesada.

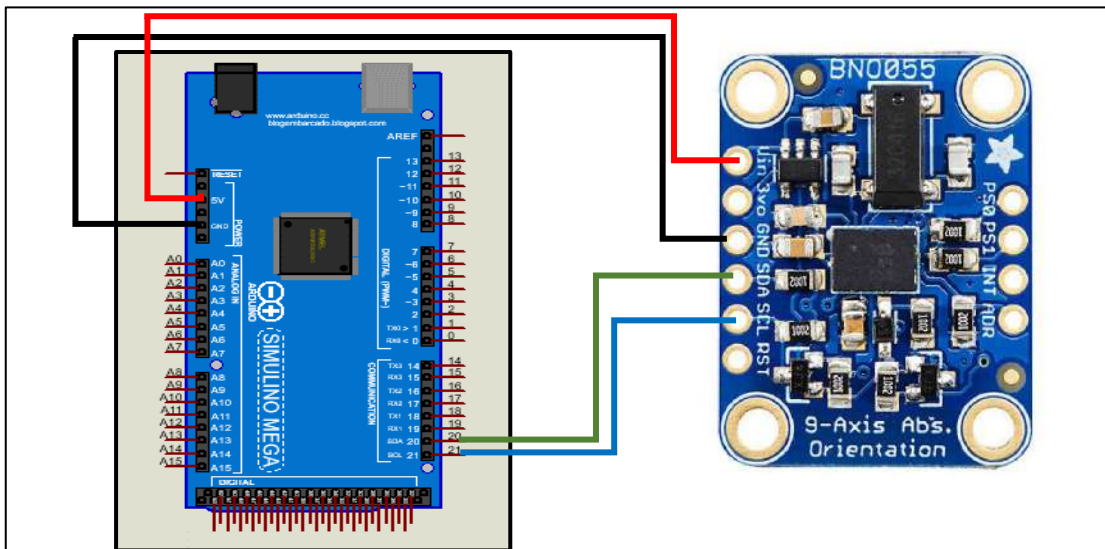


**Figura 34-2:** Esquema de conexiones de los sensores ultrasónicos.

Realizado por: (Rosero y Mazón, 2019)

#### 2.9.4. Conexiones de la IMU BNO055

La IMU trabaja con el protocolo de comunicación I2C, el cual necesita de dos hilos, el hilo SDA es el encargado del envío de datos y el SCL provee de una señal de reloj para la sincronización. En la figura 35-2 se aprecian las conexiones entre la IMU BNO055 y la tarjeta Arduino MEGA.

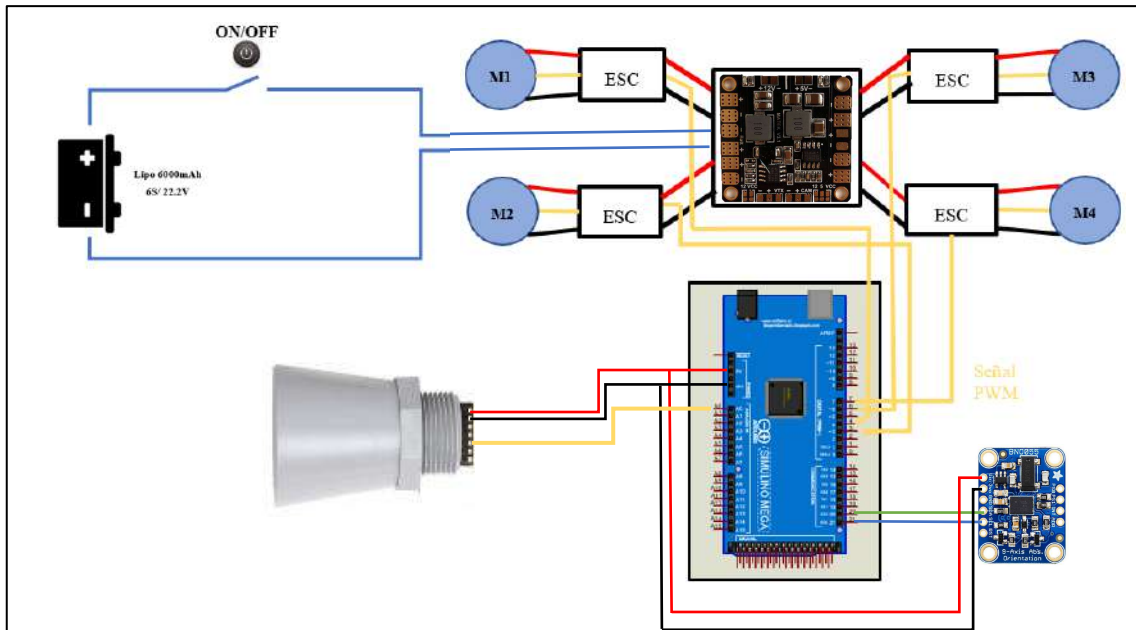


**Figura 35-2:** Esquema de conexiones de la IMU.

Realizado por: (Rosero y Mazón, 2019)

#### 2.9.5. Esquema general de conexiones del sistema

Este abarca las conexiones de encendido, las conexiones de los propulsores, así como las conexiones de los sensores ultrasónicos y de la IMU. En la figura 36-2 se observa este esquema.



**Figura 36-2:** Esquema general de conexiones del prototipo.

Realizado por: (Rosero y Mazón, 2019)

## 2.10. Implementación de las conexiones del prototipo

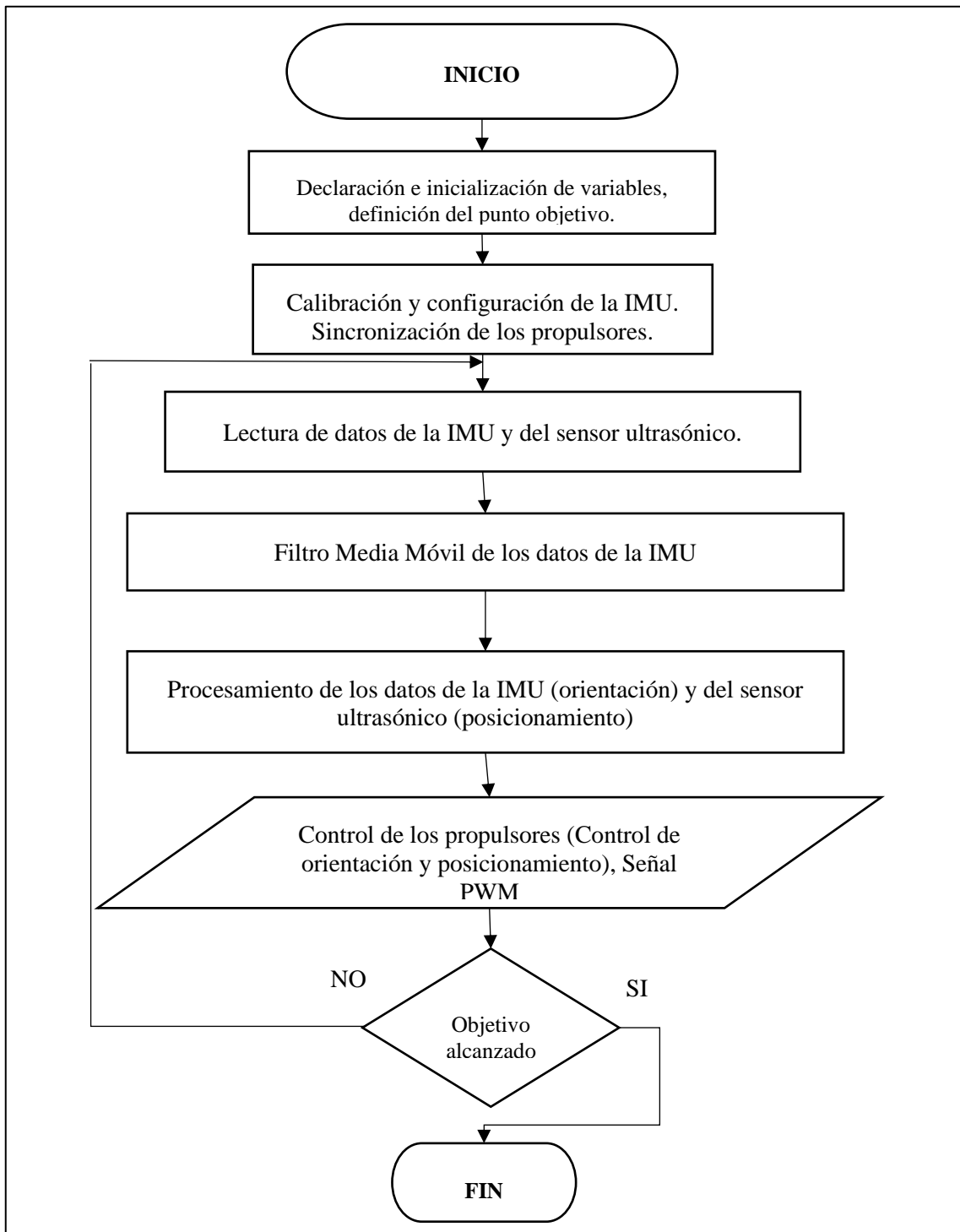
En base a los esquemas de los circuitos del prototipo se procedió a su respectiva implementación, la figura 37-2 se presenta dicha implementación.



**Figura 37-2:** Implementación de las conexiones del prototipo.

Realizado por: (Rosero y Mazón, 2019)

## 2.11. Algoritmo del INS



**Figura 38-2:** Diagrama de flujo del INS.

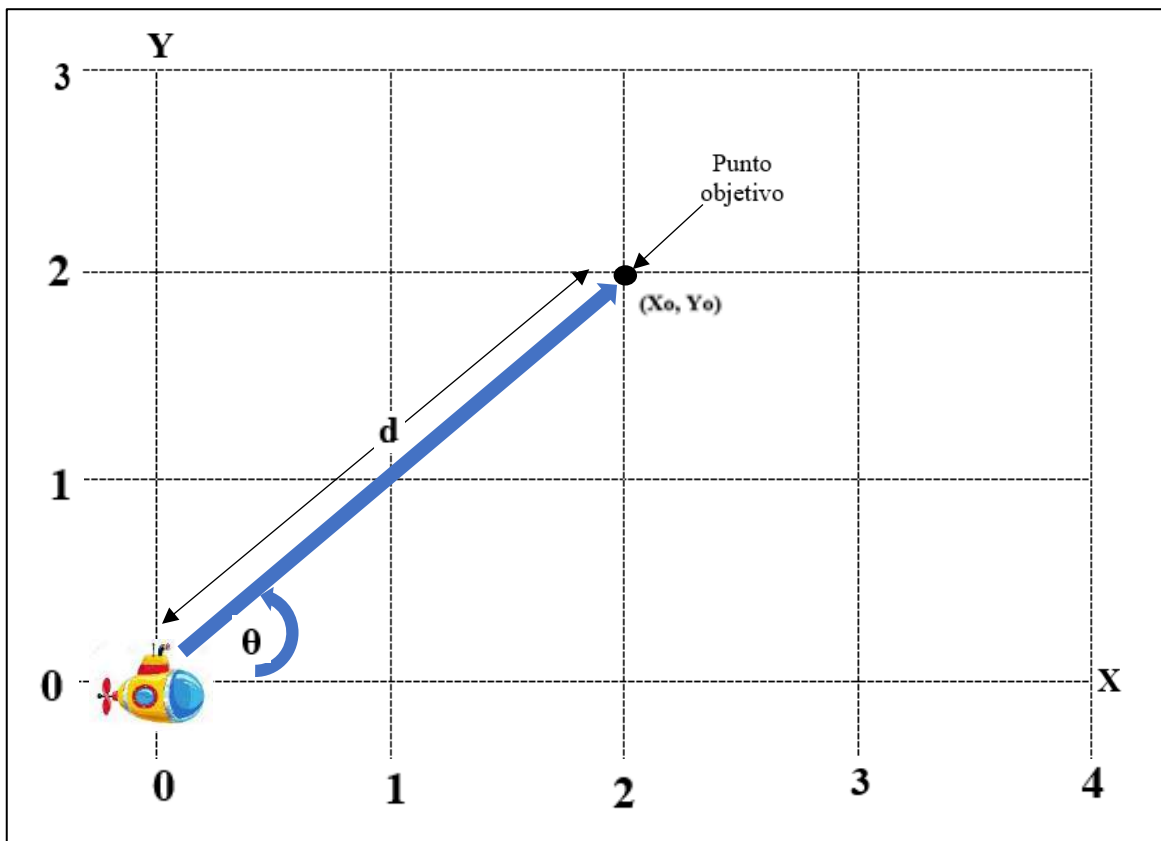
Realizado por: (Rosero y Mazón, 2019)

Basándose en el diagrama de flujo se procedió a realizar la programación (escritura del código), ver anexo F.

## 2.12. Planificación de trayectoria

En base al conocimiento previo del entorno, se desarrolló un planificador de trayectorias utilizando el control clásico (PID). Inicialmente se definen el punto objetivo, posteriormente se procede a calcular el ángulo ( $\theta$ ) al cual deberá girar y la hipotenusa ( $d$ ) la cual será la distancia a recorrer por el prototipo.

Se aplicó un control proporcional para la orientación evitando que el prototipo se desvíe de la trayectoria lineal que debe seguir y un control proporcional-integral para el desplazamiento.



**Figura 39-2:** Trayectoria a seguir del prototipo.

**Realizado por:** (Rosero y Mazón, 2019)

## 2.13. Control del sistema de navegación

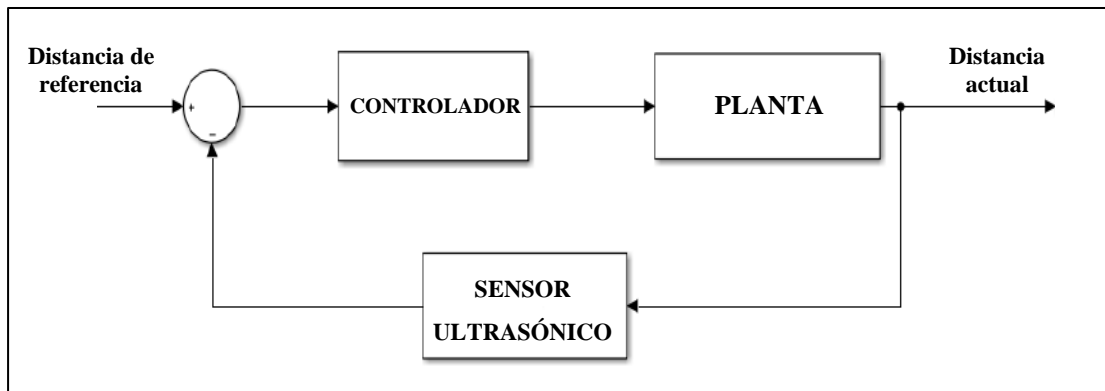
Para realizar el control de navegación se optó por el control clásico (PID), adquiriendo datos tanto de la IMU como del sensor óptico para procesarlos y posteriormente realizar el control del sistema aplicando un PWM a los propulsores.

En base a los datos de la IMU se procedió a realizar un control para el desplazamiento angular del prototipo, en resumen, la IMU únicamente se utiliza para la orientación (giros); mientras que los datos del sensor óptico son utilizados para realizar el control de desplazamiento lineal. Tanto



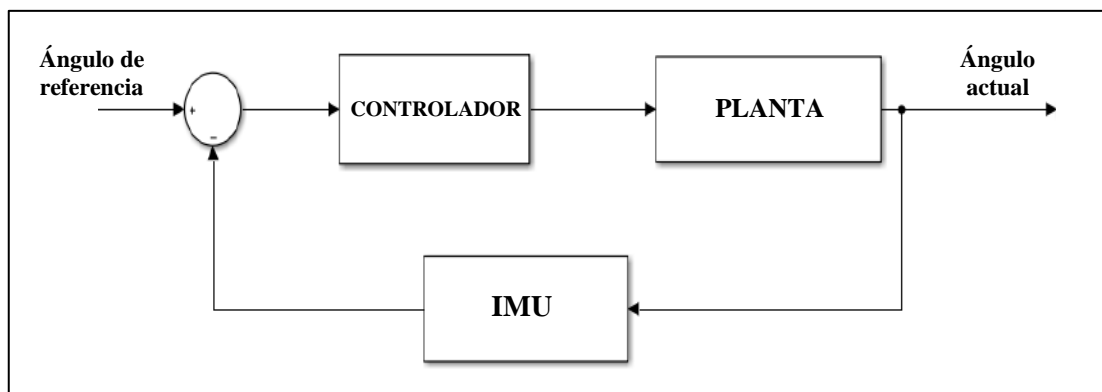
el control de desplazamiento lineal como el angular son dos procesos independientes y consecutivos.

A continuación, en la figura 40-2 se presenta el diagrama de bloques del control del desplazamiento lineal y en la figura 41-2 describe el diagrama de bloques del control de desplazamiento angular.



**Figura 40-2:** Diagrama de bloques del control de desplazamiento lineal.

Realizado por: (Rosero y Mazón, 2019)

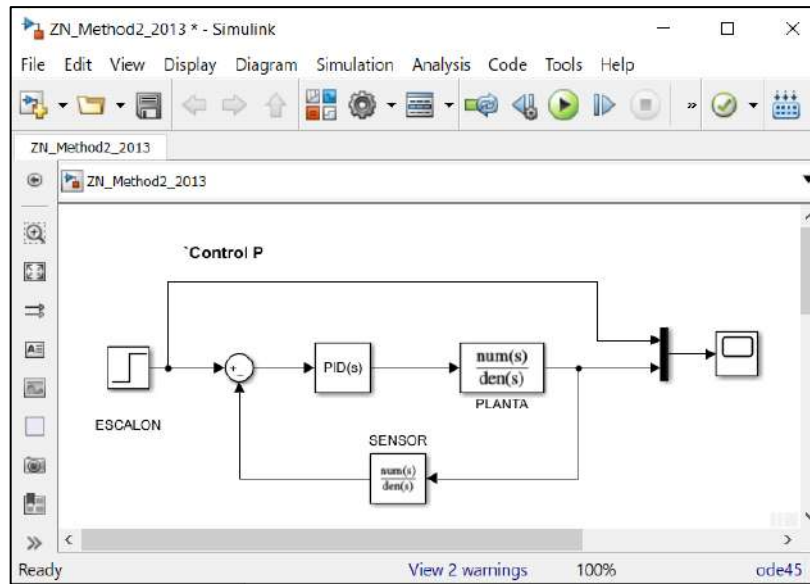


**Figura 41-2:** Diagrama de bloques del control de desplazamiento angular.

Realizado por: (Rosero y Mazón, 2019)

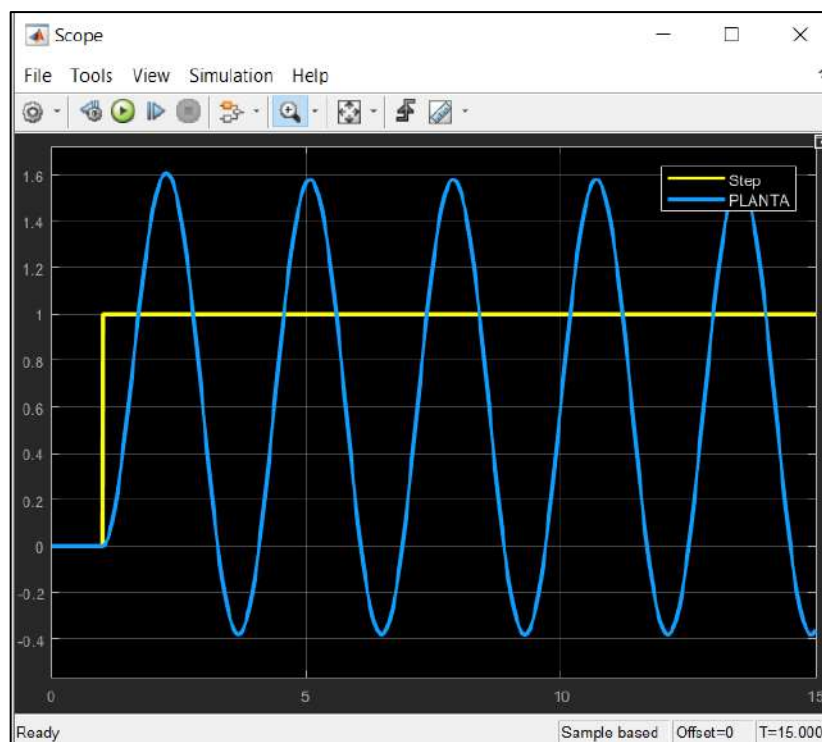
### 2.13.1. Sintonización de los controladores

A causa de no conocer el modelo matemático de la planta, se decidió aplicar la regla de sintonización basada en la ganancia crítica de Ziegler-Nichols (segundo método), la cual consiste en aumentar paulatinamente la ganancia proporcional del controlador y suprimir las acciones integral y derivativa hasta lograr una oscilación sostenida del sistema. Se utilizó el software MATLAB, específicamente su herramienta complementaria Simulink para realizar esta tarea. Con base a la figura 43-2, donde se presenta la gráfica del sistema en oscilación sostenida se presentan los valores de los parámetros de esta sintonización para el controlador.



**Figure 42-2:** Simulación para la sintonización del controlador en Simulink.

Realizado por: (Rosero y Mazón, 2019)



**Figure 43-2:** Gráfica del sistema donde se presenta la oscilación sostenida.

Realizado por: (Rosero y Mazón, 2019)

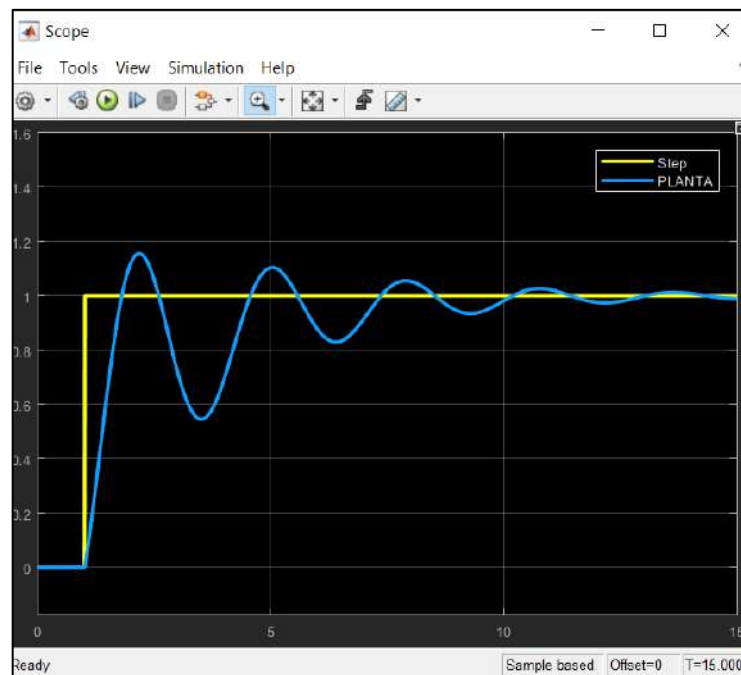
$$K_{cr} = 6$$

$$P_{cr} = 2.9$$

Una vez encontrados los valores  $K_{cr}$  y  $P_{cr}$ , se procede a calcular los valores de  $K_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$  para el controlador. El criterio para seleccionar un controlador es experimentar, primeramente, por un controlador tipo P, después por un controlador PI, y finalmente un controlador PI. Observando la respuesta de cada uno se eligió el controlador PI, sus parámetros y comportamiento se detallan a continuación.

$$K_p = 0.45K_{cr} = 2.7$$

$$T_i = \frac{1}{1.2}P_{cr} = 2.42$$



**Figure 44-2:** Comportamiento del sistema aplicando un controlador PI.

**Realizado por:** (Rosero y Mazón, 2019)

## CAPÍTULO III

### 3. PRUEBAS Y RESULTADOS

En este capítulo se detallan las pruebas realizadas a los componentes utilizados con el fin de comprobar su correcto funcionamiento, además de los algoritmos empleados en la navegación del prototipo y su desempeño.

#### 3.1. Pruebas de los componentes del AUV

##### 3.1.1. Prueba de la batería LiPo Turnigy 4S 30-40C 4000 mAh

Con el objetivo de comprobar el correcto funcionamiento de la batería se utilizó un comprobador de celdas para este tipo de baterías y un multímetro, cada celda en buen estado debe poseer entre 3.4V y 4.2V. En la tabla 1-3 se aprecia los valores de la prueba realizada.

**Tabla 1-3:** Prueba de voltaje de la batería.

Celda	Voltaje Comprobador	Voltaje multímetro	Estado
1	4.2	4.19	Correcto
2	4.2	4.21	Correcto
3	4.2	4.21	Correcto
4	4.2	4.2	Correcto
Total	16.8	16.81	Correcto

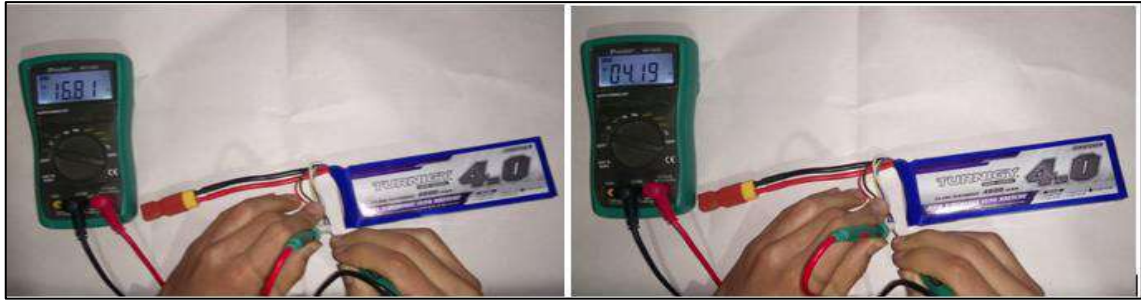
Realizado por: (Rosero y Mazón, 2019)

En las figuras 1-3 y 2-3 se observa la realización de la prueba, obteniendo los valores de voltaje de cada celda utilizando los instrumentos de medición mencionados. Se observa una ligera variación en los valores de voltaje de cada celda, pero que no afecta el resultado de la prueba.



**Figura 1-3:** Prueba de voltaje de la batería utilizando el comprobador de celdas.

Realizado por: (Rosero y Mazón, 2019)



**Figura 2-3:** Prueba de voltaje de la batería utilizando el multímetro.

**Realizado por:** (Rosero y Mazón, 2019)

### 3.1.2. Prueba de la tarjeta de distribución de energía Mini POWER HUB

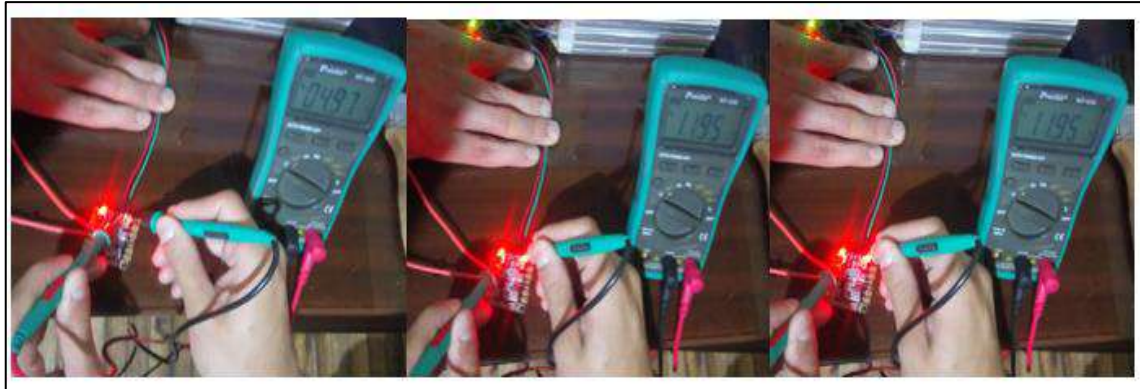
De la misma manera que la batería se realizó la prueba a este elemento, para lo cual el instrumento utilizado fue el multímetro con el fin de verificar el correcto funcionamiento del mismo. La alimentación es proporcionada por la batería (VCC=16.8V) anteriormente mencionada, la cual cumple con el requerimiento para esta tarjeta de distribución. En la tabla 2-3 se observan los datos obtenidos al realizar esta prueba.

**Tabla 2-3:** Prueba de funcionamiento de la tarjeta de distribución de energía.

Salidas de la tarjeta	Valor especificado por el fabricante	Valor Medido	Estado
Salida ESC 1	16.8V	16.8V	Correcto
Salida ESC 2	16.8V	16.8V	Correcto
Salida ESC 3	16.8V	16.79V	Correcto
Salida ESC 4	16.8V	16.78V	Correcto
Salida BEC 5V	5V	4.97 V	Correcto
Salida BEC 12V	12V	11.95 V	Correcto

**Realizado por:** (Rosero y Mazón, 2019)

En las figuras 3-3 se observa la realización de la prueba, con los valores obtenidos se concluye que la tarjeta de distribución energética funciona correctamente.



**Figura 3-3:** Prueba de funcionamiento de la tarjeta de distribución de energía.

**Realizado por:** (Rosero y Mazón, 2019)

### 3.1.3. Prueba de los propulsores

Las pruebas que se realizaron a los propulsores permitieron comprobar los parámetros de aceleración/velocidad y cambio de giro, estos aspectos deben relacionarse con la señal de PWM proporcionada a cada ESC con su respectivo propulsor. En la tabla 3-3 se observan los resultados de esta prueba.

**Tabla 3-3:** Resultados de la prueba de los propulsores.

<b>Propulsores de sumersión</b>		<b>Estado</b>
Izquierdo	Giro	Correcto
	Aceleración	Correcto
Derecho	Giro	Correcto
	Aceleración	Correcto
<b>Propulsores de avance</b>		<b>Estado</b>
Izquierdo	Giro	Correcto
	Aceleración	Correcto
Derecho	Giro	Correcto
	Aceleración	Correcto

**Realizado por:** (Rosero y Mazón, 2019)

### 3.1.4. Prueba de la IMU BNO055

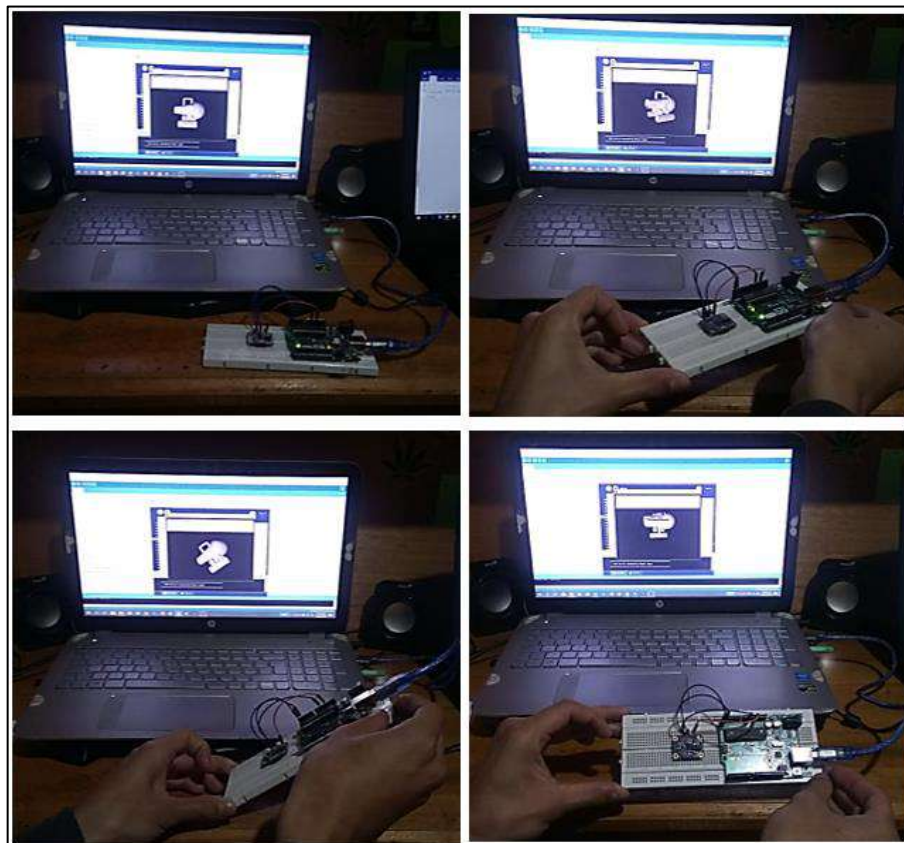
Para la realización de esta prueba se utilizó el material proporcionado por Adafruit, este comprende la visualización de un objeto y su orientación en el espacio, comprobando los ángulos yaw, pitch y roll. Para esto se hizo uso de las plataformas de código libre: Arduino y Processing.(Adafruit 2019). En la tabla 4-3 se observan los resultados del estado de la IMU.

**Tabla 4-3:** Resultados de la prueba de la IMU.

Ángulos de navegación	Estado
Yaw	Aceptable
Pitch	Aceptable
Roll	Aceptable

Realizado por: (Rosero y Mazón, 2019)

En la figura 4-3 se observa el comportamiento de la IMU, en resumen, se realizó desplazamientos en los ángulos de navegación Yaw, Pitch y Roll.



**Figura 4-3:** Prueba de funcionamiento de la IMU. Superior izquierda: posición de origen, superior derecha: Yaw, inferior izquierda: Pitch, inferior derecha: Roll.

Realizado por: (Rosero y Mazón, 2019)

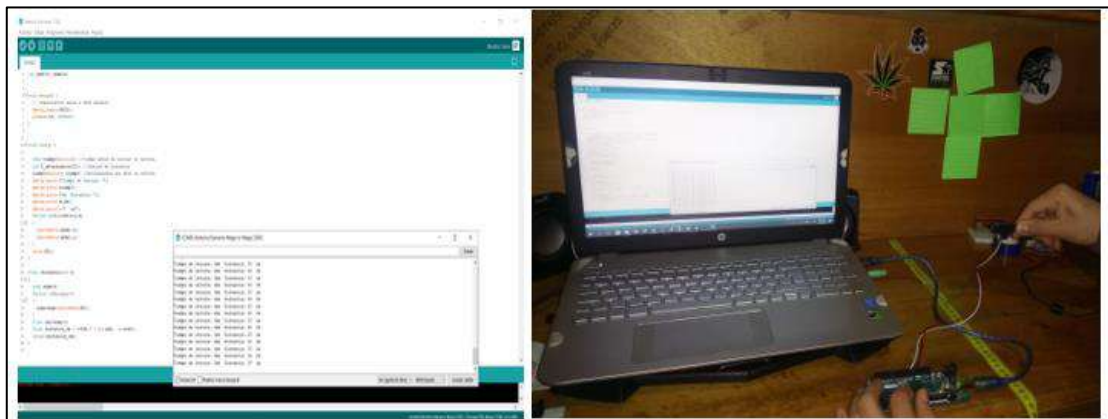
### 3.1.5. Prueba del sensor ultrasónico

Para la realización de esta prueba se utilizó un código que se cargó a la tarjeta Arduino para medir la distancia mediante este sensor. En la tabla 5-3 se observan las mediciones a diferentes distancias y en la figura 5-3 la evidencia de dicha prueba.

**Tabla 5-3:** Prueba del sensor ultrasónico MB 7389-100.

Medición	Distancia flexómetro	Distancia del sensor
1	100 cm	98 cm
2	150 cm	148 cm
3	200 cm	199 cm
4	250 cm	251 cm
5	300 cm	302 cm
6	350 cm	352 cm
7	400 cm	398 cm
8	450 cm	447 cm
9	500 cm	499 cm

**Realizado por:** (Rosero y Mazón, 2019)



**Figura 5-3:** Prueba de funcionamiento del sensor ultrasónico MB 7389-100.

**Realizado por:** (Rosero y Mazón, 2019)

Al finalizar la prueba se evidenció el correcto funcionamiento de este sensor, se apreciaron pequeñas discrepancias entre las mediciones del sensor y del flexómetro, pero estas son mínimas e irrelevantes.



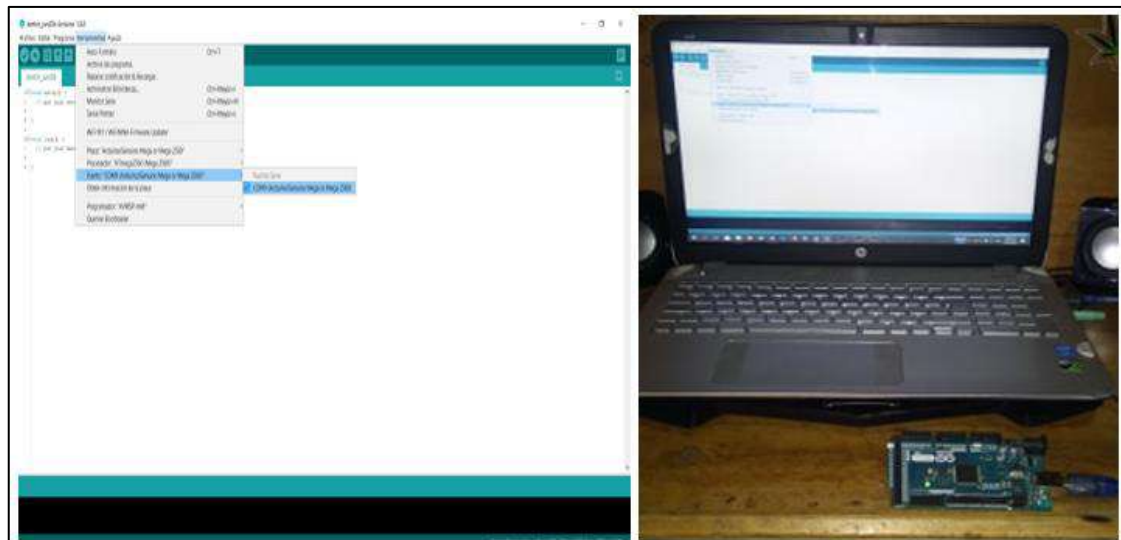
### 3.1.6. Prueba de la tarjeta de desarrollo Arduino

La tarjeta de desarrollo Arduino MEGA 2560 fue sometida a pruebas para comprobar su correcto funcionamiento, en la tabla 6-3 se aprecia los resultados de esta prueba. En la figura 6-3 se observa realización de la prueba.

**Tabla 6-3:** Resultados de la prueba de funcionamiento de la tarjeta Arduino 2560.

Característica	Estado
Conexión tarjeta/ordenador	Correcto
Pines digitales	Correcto
Pines analógicos	Correcto

Realizado por: (Rosero y Mazón, 2019)



**Figura 6-3:** Prueba de funcionamiento de la tarjeta Arduino 2560.

Realizado por: (Rosero y Mazón, 2019)

### 3.2. Pruebas de impermeabilidad e integridad del prototipo

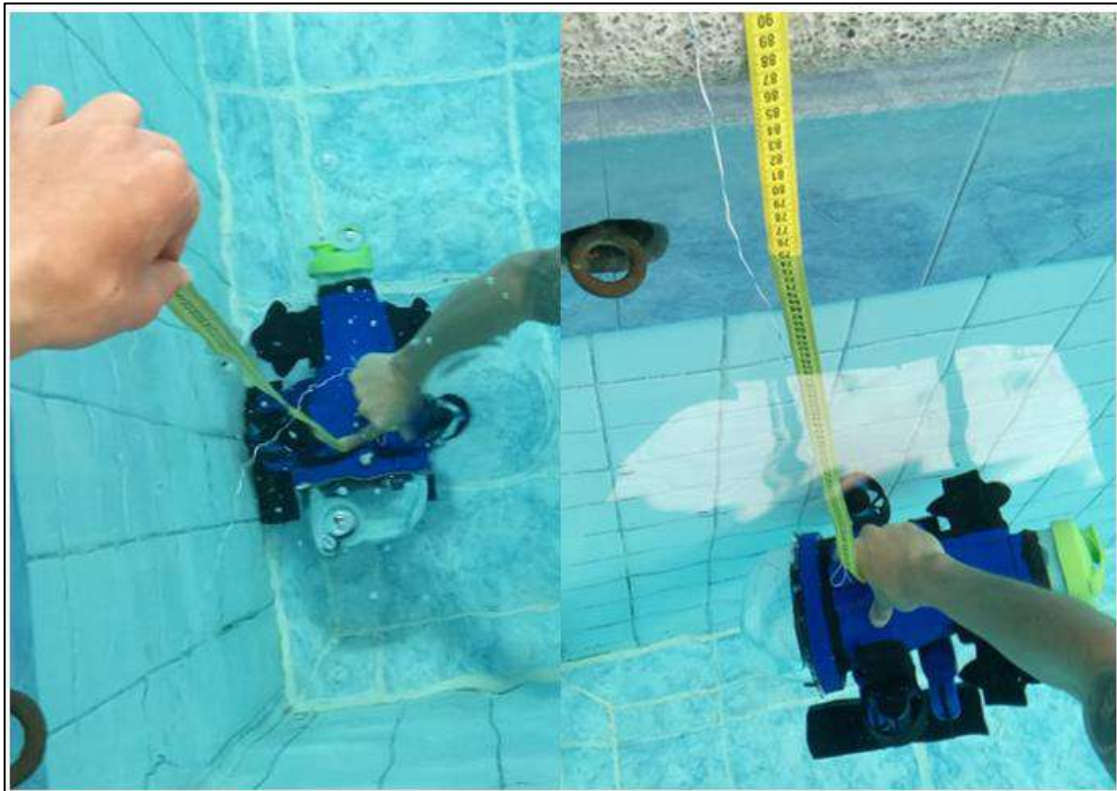
Una vez ensamblado el prototipo (sin circuitería en su interior) se procedió a realizar la prueba de impermeabilidad e integridad del prototipo, esta última se puede constatar observando si existen deformaciones en el casco. Esta prueba es de vital importancia para mantener la integridad de los elementos electrónicos internos y evitar posibles cortocircuitos debido a filtraciones de agua. Se realizó sumersión del prototipo a diferentes profundidades. En la tabla 7-3 se muestran los resultados obtenidos para esta prueba.

**Tabla 7-3:** Resultados de la prueba de impermeabilidad e integridad del prototipo.

Profundidad	Duración	Deformaciones	Filtraciones
0.25 m	5 min	Ninguna	Ninguna
0.5 m	5 min	Ninguna	Ninguna
0.75 m	5 min	Ninguna	Ninguna
1 m	5 min	Ninguna	Ninguna
1.25 m	5 min	Ninguna	Ninguna
1.5 m	5 min	Ninguna	Ninguna
1.75 m	5 min	Ninguna	Ninguna
2 m	5 min	Ninguna	Ninguna

Realizado por: (Rosero y Mazón, 2019)

La duración de cada prueba fue de 5 minutos debido a que esta es la autonomía energética que proporciona la batería empleada. Además, se validaron los datos proporcionados por las simulaciones entregados por el software SolidWorks. En la figura 7-3 se aprecia la realización de dicha prueba.

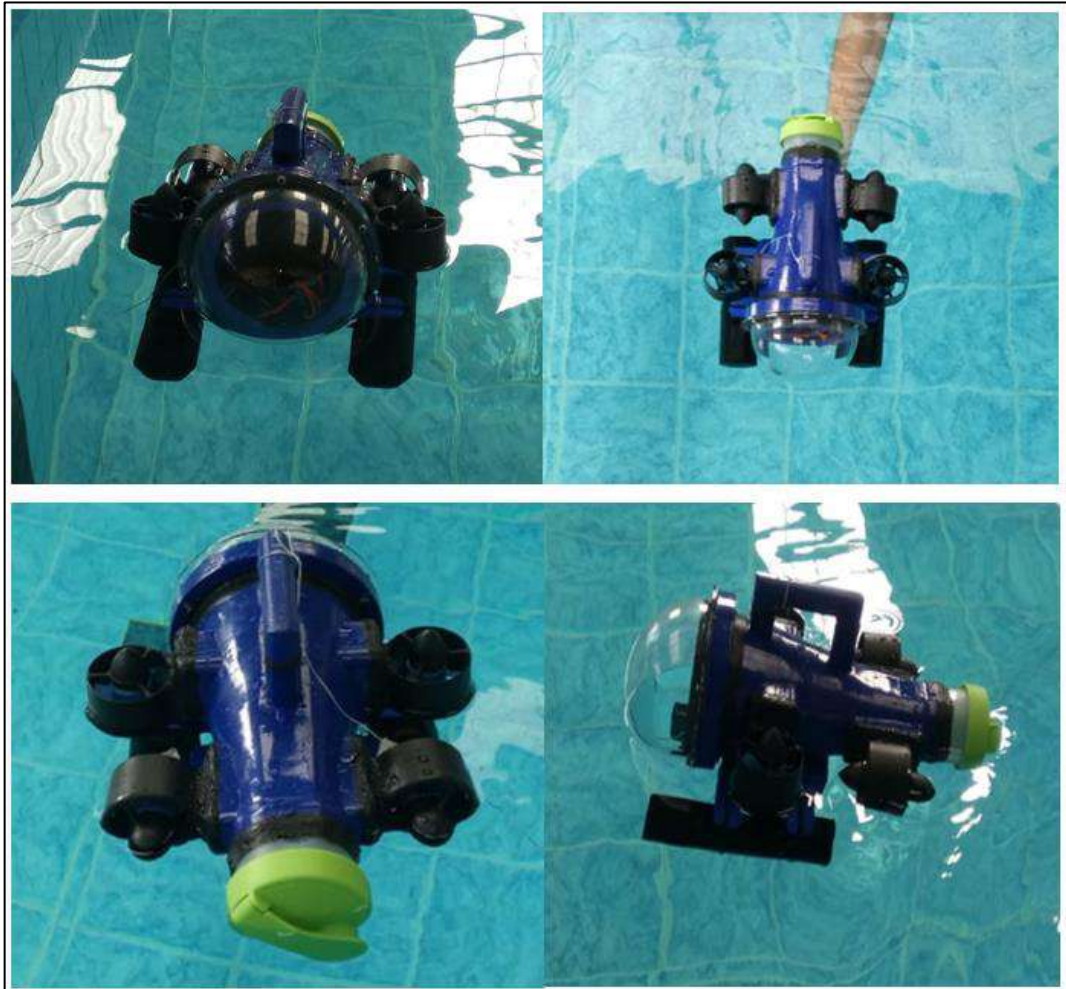


**Figura 7-3:** Prueba de impermeabilidad e integridad del prototipo.

Realizado por: (Rosero y Mazón, 2019)

### 3.3. Pruebas de estabilidad

Con el objetivo de asegurar un correcto desplazamiento del prototipo es necesario comprobar su estabilidad, para ello se realizaron pruebas. Observando si existe alguna inclinación del prototipo sobre todo en el ángulo roll y pitch, pues de existir el movimiento no sería el deseado impidiendo alcanzar el punto objetivo. Al concluir con las pruebas se comprobó que no existe inclinaciones que afecten la movilidad del prototipo. La figura 8-3 es evidencia de lo mencionado anteriormente.



**Figura 8-3:** Prueba de estabilidad del prototipo.

Realizado por: (Rosero y Mazón, 2019)

### 3.4. Pruebas de las conexiones del prototipo

Con el propósito de garantizar el correcto funcionamiento del prototipo se procedió a realizar pruebas a cada una de las conexiones descritas en el anterior capítulo.

### 3.4.1. Prueba de las conexiones del circuito de encendido

Como se vio anteriormente, este circuito permite encender y apagar el prototipo. Para corroborar su operatividad fue necesario realizar varias conmutaciones del interruptor para encontrar posibles fallas en caso de haberlas. En la tabla 8-3 se muestran los resultados de esta prueba.

**Tabla 8-3:** Resultados de la prueba conexiones del circuito de encendido.

Número de conmutación	Fallas detectadas
1	No
2	No
3	No
4	No
5	No
6	No
7	No
8	No
9	No
10	No

Realizado por: (Rosero y Mazón, 2019)

### 3.4.2. Prueba de las conexiones de los propulsores

De la misma manera que la prueba anterior se realizaron pruebas para comprobar el correcto funcionamiento de cada uno de los propulsores y verificando la sincronización de sus ESC, estos emiten dos sonidos, el primero indica el encendido y el segundo la sincronización que significa que el propulsor está listo para usarse. En la tabla 9-3 se muestran los resultados obtenidos.

**Tabla 9-3:** Prueba de las conexiones de los propulsores.

Propulsores de sumersión		Estado
Izquierdo	Encendido	Correcto
	Sincronización	Correcto
Derecho	Encendido	Correcto

	Sincronización	Correcto
<b>Propulsores de avance</b>		<b>Estado</b>
Izquierdo	Encendido	Correcto
	Sincronización	Correcto
Derecho	Encendido	Correcto
	Sincronización	Correcto

**Realizado por:** (Rosero y Mazón, 2019)

### 3.4.3. Prueba de las conexiones del sensor ultrasónico MB 7389-100.

El sensor ultrasónico es de vital importancia para la navegación del prototipo por lo cual es imprescindible realizar correctamente las conexiones e instalación dentro del prototipo. Para comprobar lo dicho anteriormente se realizaron varias mediciones con cada conmutación del circuito de encendido. A continuación, se observan los datos obtenidos de esta prueba.

**Tabla 10-3:** Prueba de las conexiones del sensor ultrasónico MB 7389-100.

Número de conmutación	Distancia Real	Medición
1	100	98
2	150	148
3	200	199
4	250	251
5	300	302
6	350	352
7	400	398
8	450	447
9	500	499
10	500	499

**Realizado por:** (Rosero y Mazón, 2019)

Como se observa en la tabla 10-3, las conexiones están correctas debido a que en cada conmutación el sensor provee una medición.

### 3.5. Pruebas de navegación

Con el objetivo de comprobar que el prototipo cumpla con los requerimientos de navegación planteados (alcanzar el punto objetivo), se realizaron una serie de pruebas, las cuales consisten en medir las variables de desplazamiento y orientación durante el recorrido. Es de suma importancia aclarar que el entorno de trabajo es conocido y debe poseer las siguientes características: tamaño máximo de 4x3 m y agua sin turbulencia (aguas tranquilas).

#### 3.5.1. Pruebas de desplazamiento

Las pruebas se realizaron teniendo como variable la distancia a recorrer, para ello se consideraron distancias de 1, 3 y 5 m; y con ángulos de 20°, 40°, 60° y 80°. En las tablas 11-3, 12-3, 13-3 se observan los datos adquiridos durante cada prueba.

**Tabla 11-3:** Pruebas de navegación a 1 m de desplazamiento.

Ángulo	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5	Promedio	Error medio %	Error máximo %
20°	110 cm	112 cm	107 cm	109 cm	111cm	109.8	9.8 %	12%
40°	112 cm	103 cm	95 cm	108 cm	105 cm	104.6	4.6 %	12%
60°	104 cm	110 cm	109 cm	108 cm	110 cm	106.2	8.2 %	10%
80°	99 cm	104 cm	106 cm	113 cm	110 cm	106.6	6.4%	13%

Realizado por: (Rosero y Mazón, 2019)

**Tabla 12-3:** Pruebas de navegación a 3 m de desplazamiento.

Ángulo	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5	Promedio	Error medio %	Error máximo %
20°	290 cm	285 cm	303 cm	301 cm	295 cm	294.8 cm	1.73%	5%
40°	287 cm	312 cm	295 cm	290 cm	304 cm	297.6 cm	0.8%	4.33%
60°	293 cm	309 cm	307 cm	289 cm	278 cm	295.2 cm	1.6%	7.33%
80°	299 cm	306 cm	316 cm	310 cm	291 cm	304.4 cm	1.46%	5.33%

Realizado por: (Rosero y Mazón, 2019)

**Tabla 13-2:** Pruebas de navegación a 5 m de desplazamiento.

Ángulo	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5	Promedio	Error medio %	Error máximo %
20°	480 cm	478 cm	498 cm	485 cm	475 cm	483.2 cm	3.36%	5%
40°	505 cm	489 cm	496 cm	504 cm	490 cm	496.8 cm	0.64%	2.2%
60°	469 cm	479 cm	493 cm	503 cm	490 cm	485.4 cm	2.92%	5.16%
80°	473 cm	485 cm	494 cm	491 cm	497 cm	488 cm	2.4%	5.4%

Realizado por: (Rosero y Mazón, 2019)

En base a los datos obtenidos, se evidencia que a distancias de pequeñas el error porcentual tiende a aumentar, a 1 m se tiene una exactitud aproximada del 87% debido a que se obtuvo un error porcentual máximo del 13%. A 3 m se tiene una exactitud aproximada del 92% y a 5 m un 94%. Aunque el error absoluto aumenta con la distancia.

### 3.5.2. Pruebas de trayectoria

Para conocer la trayectoria trazada por el prototipo se realizaron pruebas, las cuales consisten en obtener la posición durante el recorrido, para lo cual se mide el ángulo y la distancia recorrida. Para calcular la posición en X e Y el ángulo considerado es el promedio entre el ángulo actual y el anterior, en cuanto al desplazamiento se toma en cuenta la distancia recorrida desde la muestra anterior hasta la muestra actual. Para la adquisición de las muestras se decidió que sean equidistantes, con el fin de observar de mejor manera el comportamiento del prototipo durante el recorrido. Además, se fijó la distancia del recorrido en 5m debido a que esta es el límite y el comportamiento a distancias menores sería similar hasta el punto que se fije.

**Tabla 14-3:** Recorrido del prototipo con 20° y 5 m.

N muestra	X deseado	Y deseado	X medido	Y medido	D deseado	D medido	Θ deseado	Θ medido	Error abs.	Error %
0	0	0	0	0	0	0	20	20,41	0	0
1	0,23	0,09	0,24	0,1	0,25	0,26	20	22,73	0,01	4,00
2	0,47	0,17	0,48	0,19	0,5	0,51	20	19,78	0,01	2,00
3	0,7	0,26	0,72	0,28	0,75	0,77	20	20,51	0,02	2,67
4	0,94	0,34	0,95	0,36	1	1,02	20	20,89	0,02	2,00
5	1,17	0,43	1,21	0,47	1,25	1,3	20	22,15	0,05	4,00
6	1,41	0,51	1,41	0,55	1,5	1,52	20	20,98	0,02	1,33
7	1,64	0,6	1,68	0,66	1,75	1,82	20	23,56	0,07	4,00
8	1,88	0,68	1,88	0,74	2	2,03	20	20,76	0,03	1,50

9	2,11	0,77	2,12	0,83	2,25	2,27	20	20,98	0,02	0,89
10	2,35	0,86	2,39	0,94	2,5	2,57	20	22,15	0,07	2,80
11	2,58	0,94	2,62	1,03	2,75	2,82	20	21,13	0,07	2,55
12	2,82	1,03	2,84	1,11	3	3,04	20	20,15	0,04	1,33
13	3,05	1,11	3,11	1,2	3,25	3,31	20	19,54	0,06	1,85
14	3,29	1,2	3,33	1,28	3,5	3,54	20	20,55	0,04	1,14
15	3,52	1,28	3,6	1,38	3,75	3,84	20	20,44	0,09	2,40
16	3,76	1,37	3,82	1,47	4	4,09	20	21,78	0,09	2,25
17	3,99	1,45	3,97	1,55	4,25	4,29	20	22,49	0,04	0,94
18	4,23	1,54	4,22	1,64	4,5	4,54	20	20,79	0,04	0,89
19	4,46	1,62	4,46	1,73	4,75	4,78	20	21,13	0,03	0,63
20	4,7	1,71	4,6	1,78	5	4,93	20	20,76	0,07	1,40

Realizado por: (Rosero y Mazón, 2019)

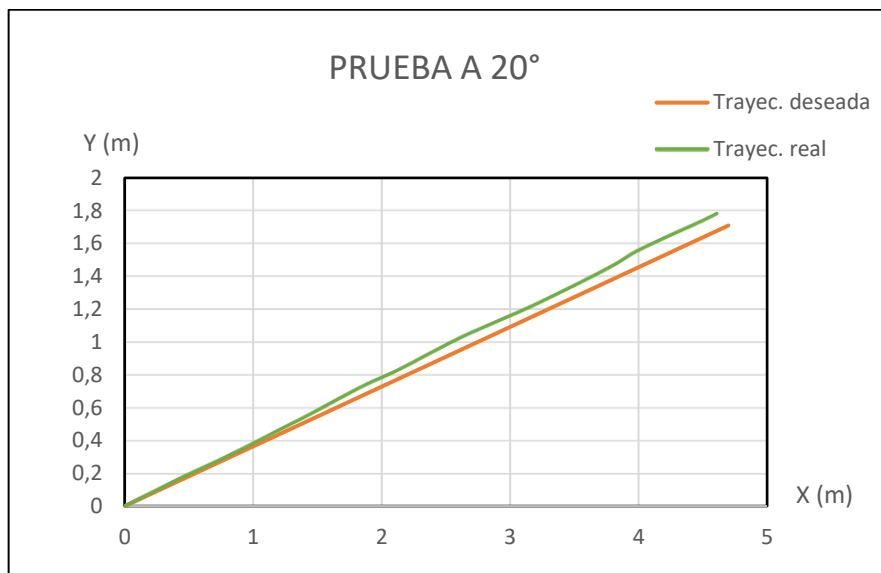


Gráfico 1-3: Trayectoria del prototipo con parámetros de 5 m y 20°.

Realizado por: (Rosero y Mazón, 2019)

Tabla 15-3: Recorrido del prototipo con 40° y 5 m.

N muestra	X deseado	Y deseado	X medido	Y medido	D deseado	D medido	Θ deseado	Θ medido	Error abs.	Error %
0	0	0	0	0	0	0	40	40,41	0	0
1	0,19	0,16	0,18	0,16	0,25	0,24	40	42,78	0,01	4,00
2	0,38	0,32	0,39	0,35	0,5	0,52	40	41,75	0,02	4,00
3	0,57	0,48	0,58	0,51	0,75	0,77	40	40,17	0,02	2,67
4	0,77	0,64	0,78	0,7	1	1,05	40	43,12	0,05	5,00
5	0,96	0,8	0,96	0,85	1,25	1,28	40	40,96	0,03	2,40
6	1,15	0,96	1,17	1,04	1,5	1,56	40	41,56	0,06	4,00



7	1,34	1,12	1,39	1,24	1,75	1,86	40	42,23	0,11	6,29
8	1,53	1,29	1,5	1,34	2	2,01	40	40,14	0,01	0,50
9	1,72	1,45	1,7	1,5	2,25	2,27	40	39,64	0,02	0,89
10	1,92	1,61	1,92	1,68	2,5	2,55	40	40,93	0,05	2,00
11	2,11	1,77	2,13	1,87	2,75	2,83	40	41,88	0,08	2,91
12	2,3	1,93	2,28	2,01	3	3,04	40	42,35	0,04	1,33
13	2,49	2,09	2,48	2,19	3,25	3,31	40	42,03	0,06	1,85
14	2,68	2,25	2,65	2,34	3,5	3,54	40	41,36	0,04	1,14
15	2,87	2,41	2,8	2,47	3,75	3,73	40	41,68	0,02	0,53
16	3,06	2,57	3,03	2,68	4	4,04	40	42,44	0,04	1,00
17	3,26	2,73	3,17	2,8	4,25	4,23	40	41,75	0,02	0,47
18	3,45	2,89	3,39	3,01	4,5	4,53	40	42,49	0,03	0,67
19	3,64	3,05	3,53	3,13	4,75	4,72	40	40,89	0,03	0,63
20	3,83	3,21	3,61	3,21	5	4,83	40	42,86	0,17	3,40

Realizado por: (Rosero y Mazón, 2019)

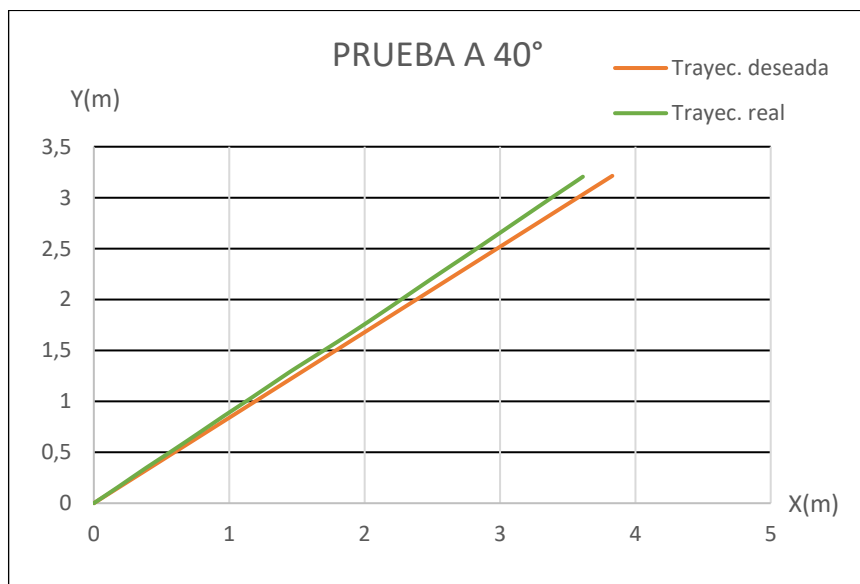


Gráfico 2-3: Trayectoria del prototipo con parámetros de 5 m y 40°.

Realizado por: (Rosero y Mazón, 2019)

Tabla 16-3: Recorrido del prototipo con 60° y 5 m.

N muestra	X deseado	Y deseado	X medido	Y medido	D deseado	D medido	Θ deseado	Θ medido	Error abs.	Error %
0	0	0	0	0	0	0	60	61,46	0	0
1	0,13	0,22	0,12	0,23	0,25	0,26	60	62,78	0,01	4,00
2	0,25	0,43	0,23	0,45	0,5	0,51	60	63,75	0,01	2,00
3	0,38	0,65	0,36	0,68	0,75	0,77	60	60,17	0,02	2,67
4	0,5	0,87	0,48	0,9	1	1,02	60	61,16	0,02	2,00
5	0,63	1,08	0,61	1,15	1,25	1,3	60	62,91	0,05	4,00

6	0,75	1,3	0,71	1,34	1,5	1,52	60	61,55	0,02	1,33
7	0,88	1,52	0,85	1,61	1,75	1,82	60	62,23	0,07	4,00
8	1	1,73	0,96	1,79	2	2,03	60	60,14	0,03	1,50
9	1,13	1,95	1,07	2	2,25	2,27	60	62,64	0,02	0,89
10	1,25	2,17	1,21	2,27	2,5	2,57	60	60,93	0,07	2,80
11	1,38	2,38	1,33	2,49	2,75	2,82	60	61,7	0,07	2,55
12	1,5	2,6	1,43	2,68	3	3,04	60	62,89	0,04	1,33
13	1,63	2,81	1,56	2,92	3,25	3,31	60	62,03	0,06	1,85
14	1,75	3,03	1,66	3,12	3,5	3,54	60	63,23	0,04	1,14
15	1,88	3,25	1,8	3,39	3,75	3,84	60	61,65	0,09	2,40
16	2	3,46	1,92	3,61	4	4,09	60	62,44	0,09	2,25
17	2,13	3,68	2,01	3,79	4,25	4,29	60	61,75	0,04	0,94
18	2,25	3,9	2,13	4,01	4,5	4,54	60	63,49	0,04	0,89
19	2,38	4,11	2,24	4,22	4,75	4,78	60	61,93	0,03	0,63
20	2,5	4,33	2,31	4,35	5	4,93	60	60,78	0,07	1,40

Realizado por: (Rosero y Mazón, 2019)

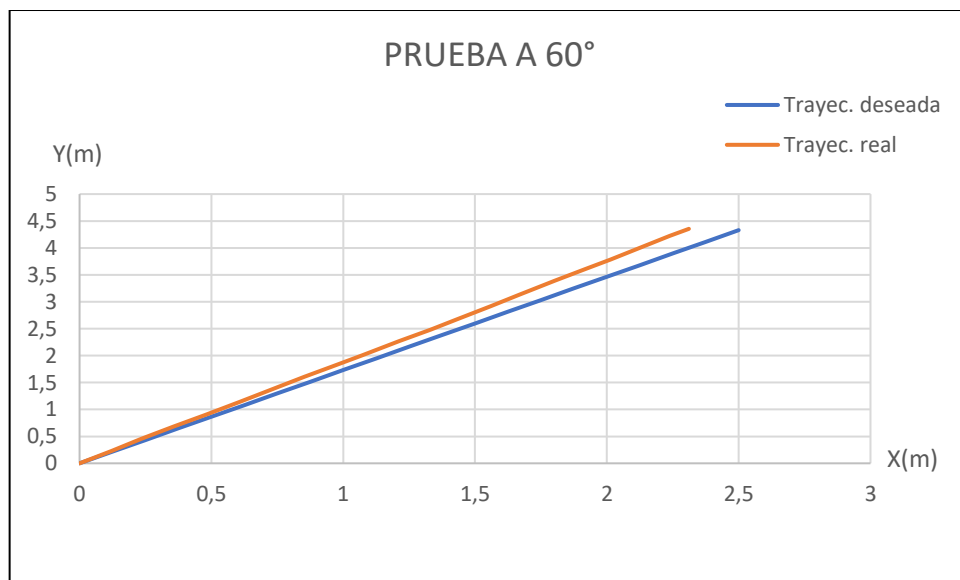


Gráfico 3-3: Trayectoria del prototipo con parámetros de 5 m y 60°.

Realizado por: (Rosero y Mazón, 2019)

Tabla 17-3: Recorrido del prototipo con 80° y 5 m.

N muestra	X deseado	Y deseado	X medido	Y medido	D deseado	D medido	Θ deseado	Θ medido	Error abs.	Error %
0	0	0	0	0	0	0	80	79,45	0	0
1	0,04	0,25	0,04	0,24	0,25	0,24	80	80,63	0,01	4,00
2	0,09	0,49	0,08	0,5	0,5	0,51	80	81,75	0,01	2,00
3	0,13	0,74	0,12	0,72	0,75	0,73	80	80,17	0,02	2,67
4	0,17	0,98	0,17	1,01	1	1,02	80	79,44	0,02	2,00
5	0,22	1,23	0,21	1,26	1,25	1,28	80	80,99	0,03	2,40

6	0,26	1,48	0,25	1,49	1,5	1,51	80	81,59	0,01	0,67
7	0,3	1,72	0,28	1,75	1,75	1,77	80	82,48	0,02	1,14
8	0,35	1,97	0,33	2	2	2,03	80	78,73	0,03	1,50
9	0,39	2,22	0,38	2,29	2,25	2,32	80	81,12	0,07	3,11
10	0,43	2,46	0,41	2,5	2,5	2,53	80	82,93	0,03	1,20
11	0,48	2,71	0,43	2,69	2,75	2,72	80	81,71	0,03	1,09
12	0,52	2,95	0,48	3	3	3,04	80	80,89	0,04	1,33
13	0,56	3,2	0,51	3,19	3,25	3,23	80	81,03	0,02	0,62
14	0,61	3,45	0,55	3,45	3,5	3,49	80	80,23	0,01	0,29
15	0,65	3,69	0,6	3,73	3,75	3,78	80	82,13	0,03	0,80
16	0,69	3,94	0,63	3,97	4	4,02	80	81,25	0,02	0,50
17	0,74	4,19	0,67	4,23	4,25	4,28	80	80,47	0,03	0,71
18	0,78	4,43	0,71	4,41	4,5	4,47	80	79,19	0,03	0,67
19	0,82	4,68	0,75	4,66	4,75	4,72	80	81,93	0,03	0,63
20	0,87	4,92	0,77	4,79	5	4,85	80	80,78	0,15	3,00

Realizado por: (Rosero y Mazón, 2019)

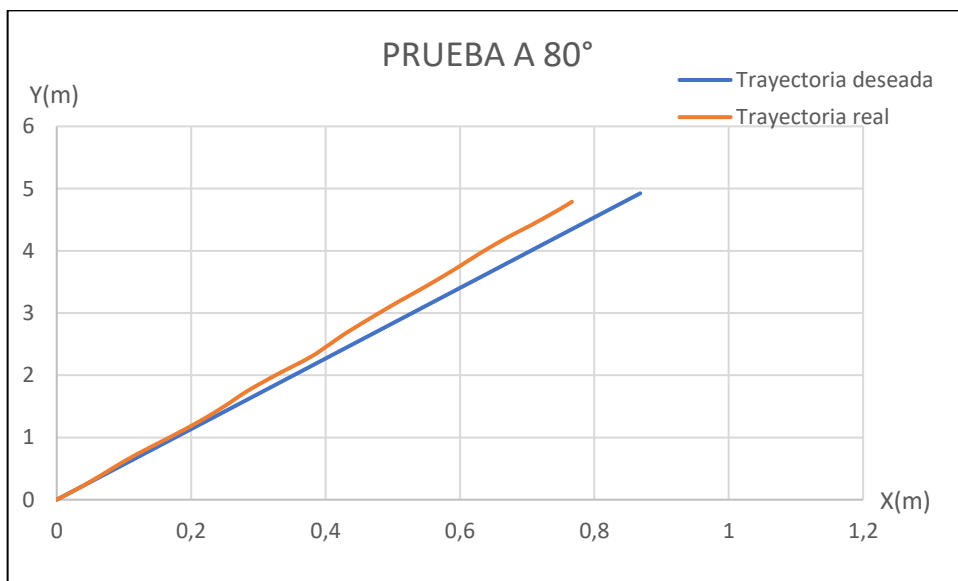


Gráfico 4-3: Trayectoria del prototipo con parámetros de 5 m y 60°.

Realizado por: (Rosero y Mazón, 2019)

En base a las tablas y gráficos anteriores se evidencia que el prototipo sigue la trayectoria con una gran aceptabilidad, con tendencia a desviarse cuanto mayor es la distancia recorrida.

### 3.6. Análisis de costos

Para el análisis de costos del prototipo se consideraron todos los materiales estructurales y electrónicos usados, a continuación, en la tabla se enlistan dichos componentes.

**Tabla 14-3.** Análisis de costos.

<b>Elementos</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo</b>
Arduino Mega 2560	1	\$50
ROVMAKER underwater DC motor brushless thruster	4	\$ 512
LiPo Turnigy 4S 30-40C 4000 mAh	1	\$ 96
Mini Power HUB	1	\$ 15
IMU BNO055 Adafruit	1	\$ 40
Sensor ultrasónico MB 7389-100	1	\$ 90
Carrete de PLA (Impresión 3D)	3	\$ 90
Domo acrílico 7 pulgadas diámetro	1	\$ 20
Hora impresión 3D	170	\$ 680
Elementos electrónicos varios	1	\$ 20
Elementos de oficina	1	\$ 20
Varios	1	\$ 75
<b>COSTO TOTAL</b>		<b>\$ 1708</b>

Realizado por: (Rosero and Mazón, 2019)

## CONCLUSIONES

- Se diseñó e implementó un prototipo de robot subacuático autónomo dotado de un sistema de navegación inercial.
- Los sistemas de navegación inercial poseen una gran fiabilidad en cuanto a la orientación, pero con lo que respecta a posición (desplazamiento) no son confiables debido a la naturaleza de los acelerómetros que acumulan errores a través de tiempo, lo cual impide calcular la posición con una precisión aceptable.
- Para el diseño del casco del prototipo se tomaron en cuenta varios aspectos tales como: forma, tamaño, peso, espacio interior, capacidad de soportar la presión, impermeabilidad y estabilidad.
- Se analizaron los requerimientos del prototipo para definir los componentes electrónicos, el software y el hardware.
- El control empleado en el AUV se basa en la teoría del control clásico garantizando la estabilidad, además se evitó y redujo en lo posible interferencias de cualquier naturaleza debido a que el sistema es susceptible a estas.
- La exactitud del posicionamiento del prototipo es de aproximadamente un 87%.

## RECOMENDACIONES

- Emplear productos de sellado (resinas, pegamentos, etc.) diseñados para aplicaciones acuáticas, lo cual otorgará al prototipo de una mayor confiabilidad ante filtraciones.
- Optar por diferentes tecnologías para la fabricación del casco que ofrezcan una mejor calidad, en la impresión 3D por deposición fundida de filamento PLA pueden presentarse grietas en el contorno de la pieza cuando estas son de gran tamaño.
- Considerar otros métodos de posicionamiento tales como GPS, visión artificial, ondas acústicas para lograr una mayor precisión y alcance.
- Realizar un estudio dinámico del diseño del prototipo para determinar secciones débiles del contorno que puedan deformarse y/o agrietarse, determinar el centro de masa el cual es muy importante para la estabilidad.
- Investigar y estudiar áreas de trabajo con el objetivo de dotar al prototipo de diversos dispositivos complementarios o mejorar los componentes empleados, permitiendo ser empleado en diferentes aplicaciones específicas.
- Debido a la naturaleza del prototipo (AUV) es imperativo realizar las pruebas descritas en este trabajo con el fin de evitar inconvenientes de mal funcionamiento (fallos de cualquier índole).

## GLOSARIO

**AUV (Vehículo Submarino Autónomo):** Este tipo de vehículo se controla de manera autónoma, es decir no posee cables permitiendo realizar varios tipos de misiones a grandes distancias.

**ROV (Vehículo Submarino Operado Remotamente):** Vehículo controlado de manera remota, generalmente usados en aplicaciones de corto alcance y gran precisión.

**Arduino:** Es una plataforma de código libre cuyo software se basa en lenguaje C y el hardware es de fácil uso y adquisición.

**SolidWorks:** Software de diseño CAD 3D, usado para modelar piezas y ensamblajes en dos y tres dimensiones permitiendo al usuario generar una gran variedad de productos.

**PROCESSING:** Lenguaje de programación de código abierto, basado en Java que permite realizar gráficos en dos y tres dimensiones.

**Yaw – Pitch - Roll:** Son los Ángulos de Euler, representan la orientación espacial de un objeto en tres dimensiones.

## BIBLIOGRAFÍA

- ADAFRUIT.** *Processing Test | Adafruit BNO055 Absolute Orientation Sensor | Adafruit Learning System.* [en línea]. [Consulta: 20 junio 2019]. Disponible en: <https://learn.adafruit.com/adafruit-bno055-absolute-orientation-sensor/processing-test>.
- AGGARWAL, P., SYED, Z. y EL-SHEIMY, N.** *Mems-based integrated navigation* [en línea], 2010. S.l.: s.n. [Consulta: 19 noviembre 2018]. Disponible en: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/esepoch/reader.action?docID=587845&query=gyroscopes>.
- ALL3DP - LA REVISTA LÍDER INTERNACIONAL DE IMPRESIÓN 3D.** *Tipos de impresoras 3D.* [en línea], 2019. [Consulta: 3 julio 2019]. Disponible en: <https://all3dp.com/es/1/tipos-de-impresoras-3d-tecnologia-de-impresion-3d/>.
- ÁLVAREZ, C., SALTAREN, R., ARACIL, R. y GARCÍA, C.** Concepción, Desarrollo y Avances en el Control de Navegación de Robots Submarinos Paralelos: El Robot Remo-I. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI* [en línea], 2009, vol. 6, no. 3, pp. 92-100. ISSN 16977912. DOI 10.1016/S1697-7912(09)70268-7. Disponible en: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1697791209702687>.
- ANDREA, D.** *Battery Management Systems for Large Lithium Ion Battery Packs* [en línea]. 2010. S.l.: s.n. [Consulta: 20 noviembre 2018]. Disponible en: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/esepoch/reader.action?docID=617500&query=lipo+battery>.
- ANTONELLI, G., FOSSEN, T.I. y YOERGER, D.R.** Underwater vehicles . *Underwater robotics*, 2008, pp. 987-1008.
- ARDUINO.** *ARDUINO.* [en línea], 2019. Disponible en: <https://www.arduino.cc/>.



**BADEN, T., CHAGAS, A.M., GAGE, G., MARZULLO, T., PRIETO-GODINO, L.L. y EULER, T.,** 2015. Open Labware: 3-D Printing Your Own Lab Equipment. *PLOS Biology* [en línea], vol. 13, no. 3, pp. e1002086. [Consulta: 3 julio 2019]. ISSN 1545-7885. DOI 10.1371/journal.pbio.1002086. Disponible en: <https://dx.plos.org/10.1371/journal.pbio.1002086>.

**BAMBINO, I.** Una Introducción a los Robots Móviles. [en línea], 2008. [Consulta: 8 enero 2019]. Disponible en: [https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/36815262/monografia\\_robot\\_movil.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1546984120&Signature=zHh2XfcrR8%2BaEm33s4433jndLYU%3D&response-content-disposition=inline%3Bfilename%3DMonografia\\_robot\\_movi](https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/36815262/monografia_robot_movil.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1546984120&Signature=zHh2XfcrR8%2BaEm33s4433jndLYU%3D&response-content-disposition=inline%3Bfilename%3DMonografia_robot_movi).

**BARRIENTOS, A., PEÑIN, L.F., BALAGUER, C. y ARACIL, R.** *Fundamentos de Robotica*. 1996.

**DOBRA, A.** General classification of robots. Size criteria. *23rd International Conference on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region, IEEE RAAD 2014 - Conference Proceedings*, 2015, pp. 44-51. DOI 10.1109/RAAD.2014.7002249.

**EL UNIVERSO.** Un robot ayudó a estudiar vida marina en la Antártida. [en línea]. 2016. [Consulta: 14 septiembre 2018]. Disponible en: <https://www.eluniverso.com/noticias/2016/08/24/nota/5760351/robot-ayudo-estudiar-vida-marina-antartida>.

**FRAILE MORA, J.** *Máquinas Eléctricas* [en línea]. 2008, 6ta. [Consulta: 2 julio 2019]. Disponible en: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/epochsp/reader.action?docID=3195345&query=motores%2Bsin%2Bescobillas#>.

**GALARZA OSCAR, M.J.** *Sistemas Robóticos y Automáticos*. 2010, vol. 5, pp. 10.

**GÓMEZ-BRAVO, F., CUESTA, F. y OLLERO, A.** Planificación de trayectorias en robots móviles basada en técnicas de control de sistemas no holónomos. 2003.

**GROVES, P.D.** *Principles of GNSS, Inertial, and Multi-sensor Integrated Navigation Systems* [en línea]. 2007. [Consulta: 18 noviembre 2018]. Disponible en: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/esepoch/reader.action?docID=338782&query=inertial+navigation>.

**GROVES, P.D.** *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems* [en línea]. 2013, Segunda. [Consulta: 19 noviembre 2018]. Disponible en: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/esepoch/reader.action?docID=1531533&query=inertial+navigation#>.

**HERNÁNDEZ, R.** *Introducción a los sistemas de control: Conceptos, aplicaciones y con simulación MATLAB*. 2010. ISBN 9786074428421.

**INOCAR.** *Robots submarinos serán instalados a lo largo de la costa ecuatoriana*. [en línea]. 2013. Disponible en: <https://www.inocar.mil.ec/web/index.php/comunicamos/315-robots-submarinos-seran-instalados-a-lo-largo-de-la-costa-ecuatoriana>.

**KUMAR, S.** *Introducción a la robótica*. México: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, 2010. ISBN 9786071503138.

**LÓPEZ, D., CUESTA, F. y OLLERO, A..** Planificación de Trayectorias con Algoritmos RRT, aplicados a robots no holónomos. 2006, pp. 56-67.

**MORENO, H.A., SALTARÉN, R., PUGLISI, L., CARRERA, I., CÁRDENAS, P. y ÁLVAREZ, C.** Robótica submarina: Conceptos, elementos, modelado y control. *RIAI - Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial*, vol. 11, 2014, no. 1, pp. 3-19. ISSN 16977920. DOI 10.1016/j.riai.2013.11.001.

**PAULL, L., SAEEDI, S., SETO, M. y LI, H.** AUV Navigation and Localization : A Review. ,

vol. 39, 2014, no. 1, pp. 131-149.

**QUISPE, R.** *Auv para prospección arqueológica del fondo marino mediante un sonar de barrido lateral.* PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ, Lima, Perú 2014.

**RASPBERRY.** Raspberry. [en línea], 2019. [Consulta: 15 mayo 2018]. Disponible en: <https://www.raspberrypi.org/>.

**ROJAS, O. y ROJAS, L.** Diseño asistido por computador. 2006.

**ROVMAKER.** ROVMAKER. [en línea]. 2019. [Consulta: 27 marzo 2019]. Disponible en: <https://www.rovmaker.com/>.

**BOSCH-SENORTEC.** BNO055 Intelligent 9-axis absolute orientation sensor, 2010.

**SUGAR, T. y KUMAR, V.** Control of Cooperating Mobile Manipulators. *IEEE* [en línea], 2002 vol. 18, no. 5, pp. 94-103. ISSN 1538-9588. DOI 10.1080/15389588.2016.1247446. Disponible en: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15389588.2016.1247446>.

**TURNIGY.** Website - Turnigy. [en línea]. 2019. [Consulta: 11 julio 2019]. Disponible en: <http://www.turnigy.com/>.

**WANG, W.H., ENGELAAR, R.C., CHEN, X.Q. y CHASE, J.G..** The State-of-Art of Underwater Vehicles - Theories and Applications. *Mobile Robots - State of the Art in Land, Sea, Air, and Collaborative Missions*, 2009, vol. 2000. DOI 10.5772/6992.

**WOODMAN, O.J.** An introduction to inertial navigation. [en línea], 2007. [Consulta: 17 noviembre 2018]. ISSN 1476-2986. Disponible en: <http://www.cl.cam.ac.uk/http://www.cl.cam.ac.uk/techreports/>.

**YAMASHITA, A., ARAI, T., OTA, J. y ASAMA, H.** Motion planning of multiple mobile robots for Cooperative manipulation and transportation. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, 2007, vol. 19, no. 2, pp. 223-237. ISSN 1042-296X. DOI 10.1109/TRA.2003.809592.

**ZAVALA, G.** *Robótica: Guía Teórica y Práctica*. Buenos Aires, Argentina 2007. ISBN 9789871347568.

# ANEXOS

## Anexo A: Datos técnicos de Arduino Mega 2560

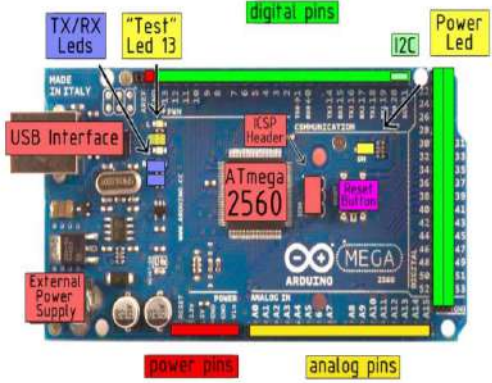
### Technical Specification

EAGLE files: [arduino-mega2560-reference-design.zip](#), Schematic: [arduino-mega2560-schematic.pdf](#)

Summary

Microcontroller	ATmega2560
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limits)	6-20V
Digital I/O Pins	54 (of which 14 provide PWM output)
Analog Input Pins	16
DC Current per I/O Pin	40 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	256 KB of which 8 KB used by bootloader
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Clock Speed	16 MHz

the board



Power

The Arduino Mega2560 can be powered via the USB connection or with an external power supply. The power source is selected automatically. External (non-USB) power can come either from an AC-to-DC adapter (wall-wart) or battery. The adapter can be connected by plugging a 2.1mm center-positive plug into the board's power jack. Leads from a battery can be inserted in the Gnd and Vin pin headers of the POWER connector.

The board can operate on an external supply of 6 to 20 volts. If supplied with less than 7V, however, the 5V pin may supply less than five volts and the board may be unstable. If using more than 12V, the voltage regulator may overheat and damage the board. The recommended range is 7 to 12 volts.

The Mega2560 differs from all preceding boards in that it does not use the FTDI USB-to-serial driver chip. Instead, it features the ATmega8U2 programmed as a USB-to-serial converter.

The power pins are as follows:

- **VIN.** The input voltage to the Arduino board when it's using an external power source (as opposed to 5 volts from the USB connection or other regulated power source). You can supply voltage through this pin, or, if supplying voltage via the power jack, access it through this pin.
- **5V.** The regulated power supply used to power the microcontroller and other components on the board. This can come either from VIN via an on-board regulator, or be supplied by USB or another regulated 5V supply.
- **3V3.** A 3.3 volt supply generated by the on-board regulator. Maximum current draw is 50 mA.
- **GND.** Ground pins.

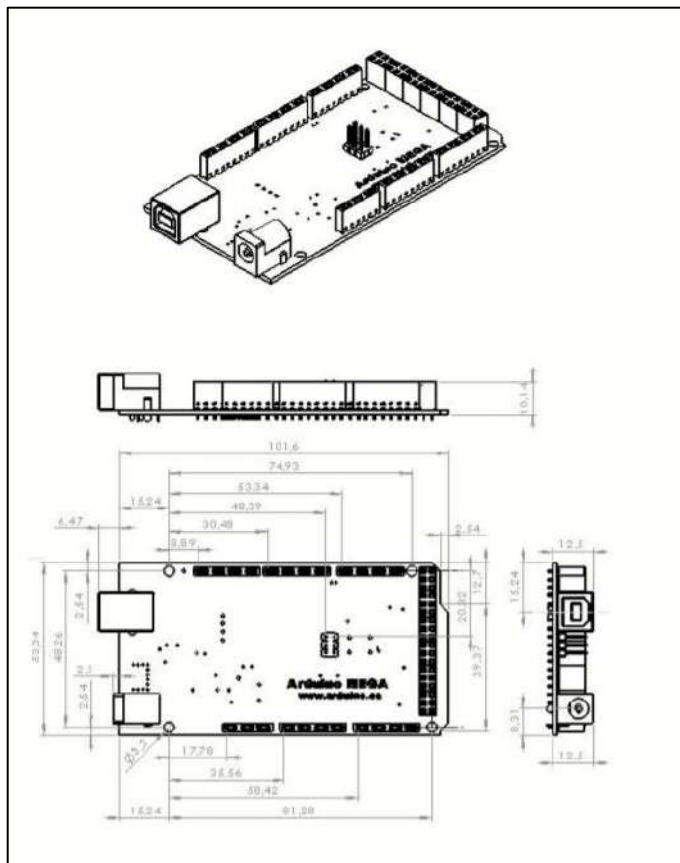
Memory

The ATmega2560 has 256 KB of flash memory for storing code (of which 8 KB is used for the bootloader), 8 KB of SRAM and 4 KB of EEPROM (which can be read and written with the [EEPROM library](#)).

Input and Output

Each of the 54 digital pins on the Mega can be used as an input or output, using [pinMode\(\)](#), [digitalWrite\(\)](#), and [digitalRead\(\)](#) functions. They operate at 5 volts. Each pin can provide or receive a maximum of 40 mA and has an internal pull-up resistor (disconnected by default) of 20-50 kOhms. In addition, some pins have specialized functions:

- **Serial:** 0 (RX) and 1 (TX); Serial 1: 19 (RX) and 18 (TX); Serial 2: 17 (RX) and 16 (TX); Serial 3: 15 (RX) and 14 (TX). Used to receive (RX) and transmit (TX) TTL serial data. Pins 0 and 1 are also connected to the corresponding pins of the ATmega8U2 USB-to-TTL Serial chip.
- **External Interrupts:** 2 (interrupt 0), 3 (interrupt 1), 18 (interrupt 5), 19 (interrupt 4), 20 (interrupt 3), and 21 (interrupt 2). These pins can be configured to trigger an interrupt on a low value, a rising or falling edge, or a change in value. See the [attachInterrupt\(\)](#) function for details.
- **PWM:** 0 to 13. Provide 8-bit PWM output with the [analogWrite\(\)](#) function.
- **SPI:** 50 (MISO), 51 (MOSI), 52 (SCK), 53 (SS). These pins support SPI communication, which, although provided by the underlying hardware, is not currently included in the Arduino language. The SPI pins are also broken out on the ICSP header, which is physically compatible with the Duemilanove and Diecimila.
- **LED:** 13. There is a built-in LED connected to digital pin 13. When the pin is HIGH value, the LED is on, when the pin is LOW, it's off.
- **PC:** 20 (SDA) and 21 (SCL). Support PC (TWI) communication using the [Wire library](#) (documentation on the Wiring website). Note that these pins are not in the same location as the I/O pins on the Duemilanove.



## Anexo B: Datos técnicos de la IMU BNO055.

BOSCH		BNO055 Data sheet	Page 2
<b>BNO055</b>			
<b>INTELLIGENT ABSOLUTE ORIENTATION SENSOR, 9-AXIS SENSOR FUSION ALL-IN-ONE WINDOWS 8x COMPLIANT SENSOR HUB</b>			
<b>Basic Description</b>			
<b>Key features:</b>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>Outputs fused sensor data</li> <li>3 sensors in one device</li> <li>Small package</li> <li>Power Management</li> <li>Common voltage supplies</li> <li>Digital interface</li> <li>Consumer electronics suite</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Quaternion, Euler angles, Rotation vector, Linear acceleration, Gravity, Heading</li> <li>an advanced triaxial 16bit gyroscope, a versatile, leading edge triaxial 14bit accelerometer and a full performance geomagnetic sensor</li> <li>LGA package 28 pins</li> <li>Footprint 3.8 x 5.2 mm<sup>2</sup>, height 1.13 mm<sup>2</sup></li> <li>Intelligent Power Management: normal, low power and suspend mode available</li> <li>V<sub>DD</sub> voltage range: 2.4V to 3.6V</li> <li>HID-I2C (Windows 8 compatible), I<sup>2</sup>C, UART</li> <li>V<sub>DDIO</sub> voltage range: 1.7V to 3.6V</li> <li>MSL1, RoHS compliant, halogen-free</li> <li>Operating temperature: -40°C ... +85°C</li> </ul>		
<b>Key features of integrated sensors:</b>			
<b>Accelerometer features</b>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>Programmable functionality</li> <li>On-chip interrupt controller</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Acceleration ranges ±2g/±4g/±8g/±16g</li> <li>Low-pass filter bandwidths 1kHz - &lt;8Hz</li> <li>Operation modes: <ul style="list-style-type: none"> <li>Normal</li> <li>Suspend</li> <li>Low power</li> <li>Standby</li> <li>Deep suspend</li> </ul> </li> <li>Motion-triggered interrupt-signal generation for <ul style="list-style-type: none"> <li>any-motion (slope) detection</li> <li>slow or no motion recognition</li> <li>high-g detection</li> </ul> </li> </ul>		

BOSCH		BNO055 Data sheet	Page 3
<b>Gyroscope features</b>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>Programmable functionality</li> <li>On-chip interrupt controller</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ranges switchable from ±125°/s to ±2000°/s</li> <li>Low-pass filter bandwidths 523Hz - 12Hz</li> <li>Operation modes: <ul style="list-style-type: none"> <li>Normal</li> <li>Fast power up</li> <li>Deep suspend</li> <li>Suspend</li> <li>Advanced power save</li> </ul> </li> <li>Motion-triggered interrupt-signal generation for <ul style="list-style-type: none"> <li>any motion (slope) detection</li> <li>high rate</li> </ul> </li> </ul>		
<b>Magnetometer features</b>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>Flexible functionality</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Magnetic field range typical ±1300µT (x-, y axis); ±2500µT (z-axis)</li> <li>Magnetic field resolution of ~0.3µT</li> <li>Operating modes: <ul style="list-style-type: none"> <li>Low power</li> <li>Regular</li> <li>Enhanced regular</li> <li>High Accuracy</li> </ul> </li> <li>Power modes: <ul style="list-style-type: none"> <li>Normal</li> <li>Sleep</li> <li>Suspend</li> <li>Force</li> </ul> </li> </ul>		
<b>Typical applications</b>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>Navigation</li> <li>Robotics</li> <li>Fitness and well-being</li> <li>Augmented reality</li> <li>Context awareness</li> <li>Tablets and ultra-books</li> </ul>			

BOSCH		BNO055 Data sheet	Page 12			
<b>Specification</b>						
If not stated otherwise, the given values are over lifetime and full performance temperature and voltage ranges, minimum/maximum values are ±3 sigma.						
<b>1.1 Electrical specification</b>						
Table 0-1: Electrical parameter specification						
OPERATING CONDITIONS BNO055						
Parameter	Symbol	Condition	Min	Typ	Max	Unit
Supply Voltage (only Sensors)	V <sub>DD</sub>	---	2.4	---	3.6	V
Supply Voltage (I <sup>2</sup> C and I/O Domain)	V <sub>DDIO</sub>	---	1.7	---	3.6	V
Voltage Input Low Level (UART, I2C)	V <sub>DDIO,VL</sub>	V <sub>DDIO</sub> = 1.7-2.7V	---	---	0.25	V <sub>DDIO</sub>
		V <sub>DDIO</sub> = 2.7-3.6V	---	---	0.3	V <sub>DDIO</sub>
Voltage Input High Level (UART, I2C)	V <sub>DDIO,VH</sub>	V <sub>DDIO</sub> = 1.7-2.7V	0.7	---	---	V <sub>DDIO</sub>
		V <sub>DDIO</sub> = 2.7-3.6V	0.55	---	---	V <sub>DDIO</sub>
Voltage Output Low Level (UART, I2C)	V <sub>DDIO,VOL</sub>	V <sub>DDIO</sub> > 3V, I <sub>OL</sub> = 20mA	---	0.1	0.2	V <sub>DDIO</sub>
		V <sub>DDIO</sub> > 3V, I <sub>OL</sub> = 10mA	0.9	0.8	---	V <sub>DDIO</sub>
POR Voltage threshold on VDDIO-IN rising	V <sub>DDIO,POR+</sub>	V <sub>DDIO</sub> falls at 1V/ms or slower	---	1.45	---	V
POR Voltage threshold on VDDIO-IN falling	V <sub>DDIO,POR-</sub>	---	---	0.99	---	V
Operating Temperature	T <sub>A</sub>	---	-40	---	+85	°C
Total supply current normal mode at T <sub>A</sub> (BQDF @100kHz output data rate)	I <sub>DD,NM</sub>	V <sub>DD</sub> = 3V, V <sub>DDIO</sub> = 2.5V	---	---	12.3	mA
Total supply current Low power mode at T <sub>A</sub>	I <sub>DD,LP</sub>	V <sub>DD</sub> = 3V, V <sub>DDIO</sub> = 2.5V	---	---	0.4	mA
Total supply current suspend mode at T <sub>A</sub>	I <sub>DD,SU</sub>	V <sub>DD</sub> = 3V, V <sub>DDIO</sub> = 2.5V	---	---	0.04	mA

BOSCH		BNO055 Data sheet	Page 18
<b>3. Functional Description</b>			
<b>3.1 Architecture</b>			
The following figure shows the basic building blocks of the BNO055 device.			
Figure 1: system architecture			
<pre> graph TD     subgraph BNO055         Mag[Magnetometer]         Acc[Accelerometer]         Gyro[Gyroscope]         MCU[MCU]         subgraph MCU             DF[Data Fusion]             PM[Power Management]         end     end     Mag --- MCU     Acc --- MCU     Gyro --- MCU     MCU --- HP[Host Processor]     HP -- "PC/I2C" --&gt; BNO055     HP -- "INT" --&gt; BNO055     </pre>			

Anexo C: Datos técnicos del sensor ultrasónico MB 7389-100.

**HRXL-MaxSonar® - WR/WRC™ Series**


---



## HRXL-MaxSonar® - WR™ Series

**High Resolution, Precision, IP67 Weather Resistant, Ultrasonic Range Finder**  
**MB7360, MB7363, MB7366, MB7367, MB7368, MB7369,**  
**MB7380, MB7383, MB7386, MB7387, MB7388, MB7389<sup>2</sup>**

*The HRXL-MaxSonar-WR sensor line is a cost-effective solution for applications requiring precision range-finding, low-voltage operation, space saving, low-cost, and IP67 rating for weather resistance.*

*The HRXL-MaxSonar-WR sensor line provides high accuracy and high resolution ultrasonic proximity detection and ranging in air. This sensor line features 1-mm resolution, target-size and operating-voltage compensation for improved accuracy, superior rejection of outside noise sources, internal speed-of-sound temperature compensation and optional external speed-of-sound temperature compensation. The HRXL-MaxSonar-WR/WRC models are available in 5-meter or 10-meter models. This ultrasonic sensor detects objects from 1-mm and ranges to objects from 30-cm\* to maximum range. Objects closer than 30-cm\* are typically reported as 30-cm\*. The interface output formats are pulse width, analog voltage, and digital serial in either RS232 (MB7360 series) or TTL (MB7380 series). Factory calibration is standard. \*For select sensors this distance is 50-cm, refer to pages 4 and 5.*



---

<p><b>Precision Ultrasonic Range Sensing</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Range-finding at a fraction of the cost of other precision rangefinders</li> <li>• Reading-to-reading stability of 1-mm at 1-meter is typical<sup>1</sup></li> <li>• Accuracy is factory-matched providing a typical accuracy of 1% or better<sup>1,2</sup></li> <li>• Internal temperature compensation is standard and optional external temperature compensation</li> <li>• Determines range to largest object (MB7368, MB7369, MB7388, MB7389)</li> <li>• Determines range to first detectable object (MB7360, MB7363, MB7366, MB7367, MB7380, MB7383, MB7386, MB7387)</li> <li>• Excellent clutter rejection</li> <li>• Additional chemical resistance available<sup>6</sup></li> </ul> <p><b>Very Low Power Requirements</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fast first reading after power-up eases battery requirements</li> <li>• Wide, low supply voltage of 2.7V to</li> </ul>	<p>5.5V requirements eases battery powered design</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Low current draw reduces current drain for battery operation</li> <li>• Very low-power rangefinder, excellent for multiple sensor or battery based systems</li> </ul> <p><b>Easy to Use Component Module</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Gracefully handles other ultrasonic sensors<sup>5</sup></li> <li>• Stable and reliable range readings and excellent noise rejection make the sensor easy to use for most users</li> <li>• Easy to use interface with distance provided in a variety of outputs</li> <li>• Target size compensation provides greater consistency and accuracy</li> <li>• Sensor automatically handles acoustic noise<sup>2,4</sup></li> <li>• Calibrated sensor eliminates most sensor to sensor variations</li> </ul>	<p><b>Applications &amp; Uses</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tank level measurement (MB7369 or MB7389)</li> <li>• Weather station monitoring</li> <li>• Bin level measurement</li> <li>• Proximity zone detection</li> <li>• People detection</li> <li>• Robot ranging sensor</li> <li>• Long range object detection</li> <li>• Environments with acoustic and electrical noise</li> <li>• Height monitors</li> <li>• Auto sizing</li> <li>• Box dimensions</li> <li>• Automated factory systems</li> </ul> <p><b>Notes:</b></p> <p><sup>1</sup> Refer to section that compares WR to alternative housings on page 4</p> <p><sup>2</sup> Users are encouraged to evaluate the sensor performance in their application</p> <p><sup>3</sup> Reference pages 8-9 for part specific timing information by design</p> <p><sup>4</sup> See page 6 for multi-sensor operation</p> <p><sup>5</sup> F-Option provides additional protection from hazardous chemical environments</p> <p><sup>6</sup> Please reference page 10 &amp; 11 for minimum operating voltage verses temperature information</p> <p><sup>7</sup> Please reference page 18 for part number key</p>
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

---

**Close Range Operation**

Applications requiring 100% reading-to-reading reliability should not use MaxSonar sensors at a distance closer than 50cm. Although most users find MaxSonar sensors to work reliably from 0 to 50cm for detecting objects in many applications, MaxBotix® Inc. does not guarantee operational reliability for objects closer than the minimum reported distance. Because of ultrasonic physics, these sensors are unable to achieve 100% reliability at close distances.

---

**Warning: Personal Safety Applications**

We do not recommend or endorse this product be used as a component in any personal safety applications. This product is not designed, intended or authorized for such use. These sensors and controls do not include the self-checking redundant circuitry needed for such use. Such unauthorized use may create a failure of the MaxBotix® Inc. product which may result in personal injury or death. MaxBotix® Inc. will not be held liable for unauthorized use of this component.

---

**MaxBotix® Inc.**  
 Copyright 2008 - 2012 MaxBotix Incorporated  
 Patent 7,079,996

MaxBotix Inc., products are engineered and assembled in the USA.

Page 1  
 Web: [www.maxbotix.com](http://www.maxbotix.com)  
 PD11500V

**General Characteristics**

- Low cost ultrasonic rangefinder
- Detection out to 5-meters or 10-meters
- Resolution of 1-mm
- Distance sensor from 30-cm to 5-meters or 50-cm to 10-meters based on model
- Excellent <sup>2</sup> Mean Time Between Failure (MTBF)

- Triggered operation yields real-time range data
- Free run operation with superior noise rejection <sup>3</sup>
- Operating temperature range from -40°C to +65°C <sup>7</sup>
- Operating voltage of 2.7V to 5.5V<sup>7</sup>
- Nominal current draw of 2.3mA (peak ~49mA) at 3.3V, and 3.1mA (peak ~98mA) at 5V
- IP67 Rated

**Range Outputs**

- Pulse width, 1uS/mm resolution
- Analog Voltage, 5-mm resolution (5-meter sensors)
- Analog Voltage, 10-mm resolution (10-meter sensors)
- Serial, 1-mm resolution
- Available in RS232 (MB7360 series) or TTL (MB7380 series)

**HRXL-MaxSonar-WR Pin Out**

**Pin 1- Temperature Sensor Connection:** Leave this pin unconnected if an external temperature sensor is not used. For best accuracy, this pin is optionally connected to the HR-MaxTemp temperature sensor. Some additional information for the temperature sensor can be found on page 10 of the datasheet.

**Pin 2- Pulse Width Output:** This pin outputs a pulse width representation of the distance with a scale factor of 1uS per mm. The pulse width output is sent with a value within 0.5% of the serial output.

**Pin 3- Analog Voltage Output:** This pin outputs a single ended analog voltage scaled representation of the distance. This output is referenced to the sensor ground and Vcc. After the ~50mS power up initialization, the voltage on this pin is set to a low voltage. Once the sensor has completed a range reading the voltage on this pin is set to the voltage corresponding to the latest measured distance.

The 5-meter sensors (MB7360, MB7369, MB7380, and MB7389) use a scale factor of (Vcc/5120) per 1-mm. The distance is output with a 5-mm resolution. The analog voltage output is typically within ±5-mm of the serial output.

The 10-meter sensors (MB7363, MB7366, MB7368, MB7383, MB7386, and MB7388) use a scale factor of (Vcc/10240) per 1-mm. The distance is output with a 10-mm resolution. The analog voltage output is typically within ±10-mm of the serial output.

Using a 10-bit analog to digital converter with the 5-meter sensors, one can read the analog voltage counts (i.e. 0 to 1023) directly and just multiply the number of counts in the value by 5 to yield the range in mm. For example, a converted value of 60 corresponds to 300-mm (where 60 x 5 = 300), and 1000 counts corresponds to 5,000-mm (where 1000 x 5 = 5,000-mm).

Using a 10-bit analog to digital converter with the 10-meter sensors, one can read the analog voltage counts (i.e. 0 to 1023) directly and just multiply the number of counts in the value by 10 to yield the range in mm. For example, 30 counts corresponds to 300-mm (where 30 x 10 = 300), and 1000 counts corresponds to 10,000-mm (where 1000 x 10 = 10,000-mm).

**Pin 4- Ranging Start/Stop:** This pin is internally pulled high. If this pin is left unconnected or held high, the sensor will continually measure and output the range data. If held low, the HRXL-MaxSonar-WR will stop ranging. Bring high for 20uS or longer to command a range reading.

**Filtered Range Data:** When pin 4 is left high on the sensors, the sensors will continue to range. The data that is output includes a filter for increased accuracy. The sensors will output the range based on recent range information. The filter does not affect the speed at which data is made available to the user but instead allows for more consistent range information to be presented. For sensor specific timing and filter information refer to pages 8 and 9.

**Real-time Range Data:** When pin 4 is low and then brought high, the sensor will operate in real time and the first reading output will be the range measured from this first commanded range reading. When the sensor tracks that the RX pin is low after each range reading, and then the RX pin is brought high, unfiltered real time range information can be obtained. For timing information please refer to pages 8 and 9.

**Pin 5-Serial Output:** The MB736X sensors have an RS232 data format (with 0V to Vcc levels) and the MB738X sensors have a TTL outputs. The output is an ASCII capital "R", followed by four ASCII character digits representing the range in millimeters, followed by a carriage return (ASCII 13). The maximum range reported is 4999 mm (5-meter models) or 9998 mm (10-meter models). A range value of 5000 or 9999 corresponds to no target being detected in the field of view.

The serial data format is 9600 baud, 8 data bits, no parity, with one stop bit (9600-8-N-1).

Because the data is presented in a binary data format, the serial output is most accurate.

**V+ Pin 6 - Positive Power, Vcc:** The sensor operates on voltages from 2.7V - 5.5V DC. For best operation, the sensor requires that the DC power be free from electrical noise. (For installations with known dirty electrical power, a 100uF capacitor placed at the sensor pins between V+ and GND will typically correct the electrical noise.) Please reference page 10 & 11 for minimum operating voltage verses temperature information.

**GND Pin 7 – Sensor ground pin:** DC return, and circuit common ground.



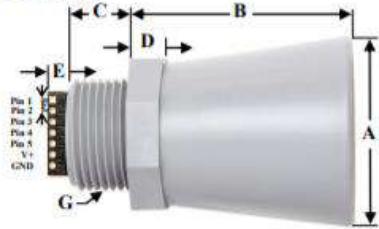
**Performance Changes when Selecting a Non-Full Horn Package**

When selecting a HRXL-MaxSonar-WR sensor without the full horn the sensor will experience the following performance changes:

- The sensor will have a wider beam shape for the first meter.
- The sensor may be less accurate by an additional +/- 0.5%.
- The sensor may have a dead zone from 0mm-500mm.
- The sensor may have worse performance to small or soft targets.
- The sensor may experience decreased noise immunity when ranging to small, soft, angled, or distant targets.

**Mechanical Dimensions**

**Full Horn**

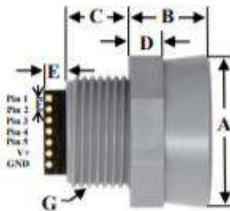


A	1.72" dia.	43.8 mm dia.
B	2.00"	50.7 mm
C	0.58"	14.4 mm
D	0.31"	7.9 mm
E	0.23"	5.8 mm
F	0.1"	2.54 mm
G	3/4"-14 NPS	
H	1.032" dia.	26.2 mm dia.
I	1.37"	34.8 mm
Weight, 1.76 oz., 50 grams		

Values Are Nominal



**Compact Housing**

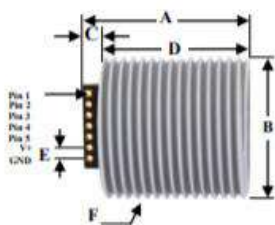


A	1.37" dia.	34.7 mm dia.
B	0.70"	17.9 mm
C	0.57"	14.4 mm
D	0.31"	7.9 mm
E	0.23"	5.8 mm
F	0.1"	2.54 mm
G	3/4"-14 NPS	
H	1.032" dia.	26.2 mm dia.
I	1.37"	34.8 mm
Weight, 1.23 oz., 32 grams		

Values Are Nominal

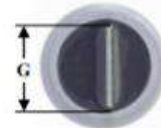


**1" NPS Pipe Threading**

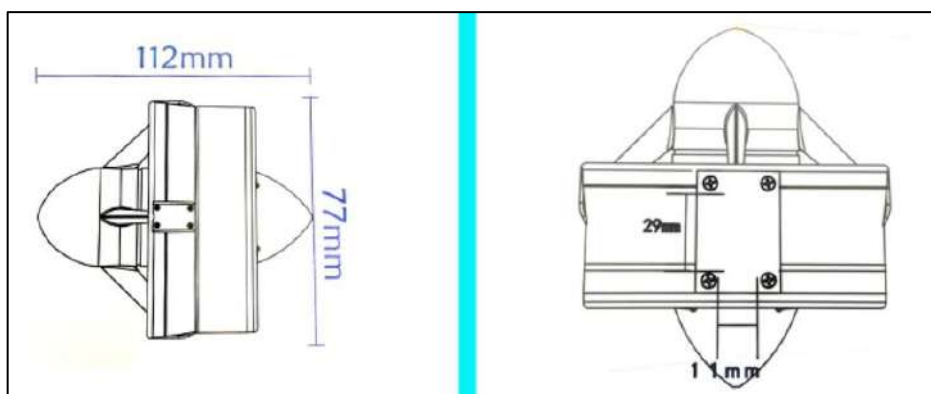
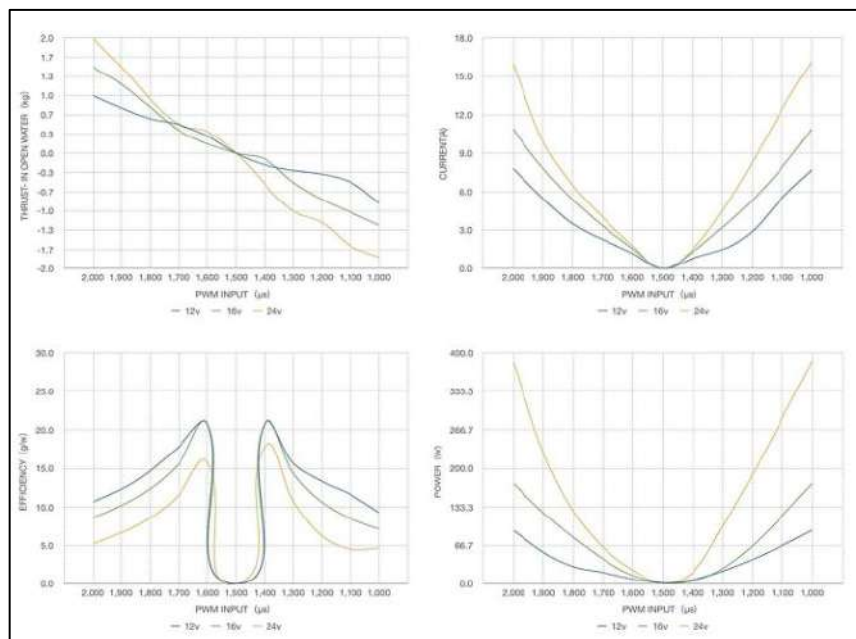
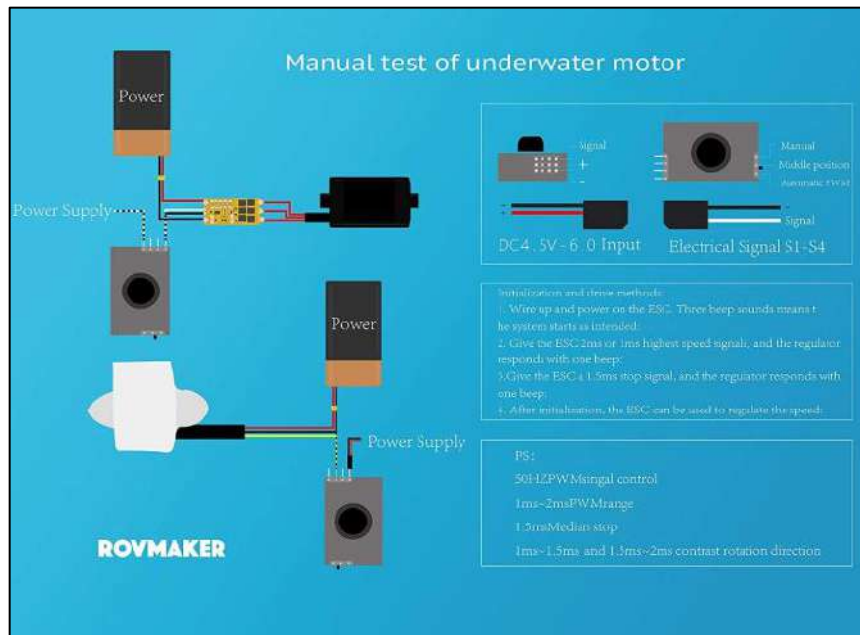


A	1.52"	38.5 mm
B	1.29" dia.	33.0 mm dia.
C	0.22"	5.5 mm
D	1.30"	33.1 mm
E	0.10"	2.54 mm
F	1" - NPS	
G	0.78"	19.81 mm
Weight, 1.23 oz., 35 grams		


Values Are Nominal



**Anexo D:** Datos técnicos de los propulsores ROVMAKER underwater DC motor brushless thruster.



## Anexo E: Datos técnicos de la tarjeta de distribución de energía Mini Power HUB



**Matek Systems**

MANUAL

SKU: HUB5V12V

### MINI POWER HUB w/ BEC 5V & 12V

The Mini POWER HUB has been engineered to provide the highest possible performance and reliability in a 36\*36mm & 4 layers PCB. The HUB distributes power from a battery pack to 4 ESCs, as well as providing synchronised & regulated DC outputs for powering cameras, servos, video transmitters, LEDs, etc. Batteries may range from 3S to 6S LiPo. The HUB also features convenient solder bridge of various voltage for camera & video TX.

#### Features

- 2oz copper & 4-layers PCB.
- ESC & Battery solder tabs in pairs
- Solder Bridges of various voltage for Camera & VTX.
- 5V & 12V Output LED indicators & Short circuit tolerant

#### Specifications

**General:**

- Input voltage range (3S-6S operation): 9 - 26VDC
- Regulated 5V and 12V outputs
- LED power indicators ( 5V & 12V outputs )
- 4 ESC outputs

**ESC outputs:**

- Continuous current: 20A per output
- Peak current (10 seconds/minute): 25A per output

**BEC 5V output:**

- Designed for RC Receivers, Flight controllers, OSD, and Servos
- DC/DC synchronous buck regulator, Efficiency is up to 95%.
- Voltage: 5.0 +/- 0.1VDC
- Continuous current: 3 Amps
- Short-circuit tolerant (10 seconds/minute)
- LED (indicates voltage is in regulation)

**BEC 12V output:**

- The battery should be 4S-6S LiPo
- Standard output designed to power cameras and video transmitters, etc.
- Voltage: 12.0 +/- 0.2VDC
- Continuous current: 2 Amps (Max.3A 10s/minute)
- Short-circuit tolerant (10 seconds/minute)
- LED (indicates voltage is in regulation)

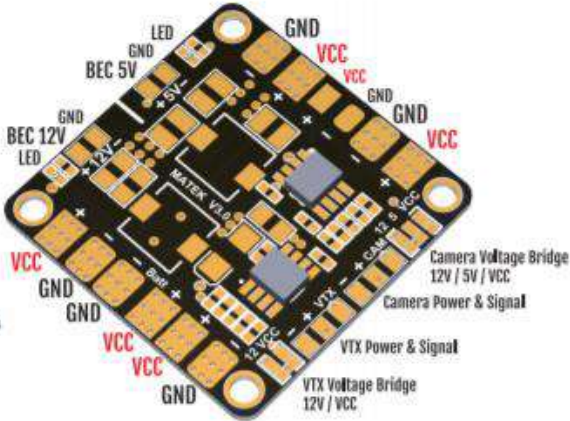
**CAM & VTX voltage bridge**

- 3S operation. choose "VCC" for 12V camera & 12V VTX, VCC=Battery Voltage.
- 4-6S operation, choose "12" for 12V camera & 12V VTX
- 3-6S operation, choose "5" for 5V camera
- Video pass through from the "CAM" pad to the "VTX" pad


**Physical:**

- Dimensions: 36 x 36mm
- Weight: 6g
- Mounting holes 30.5mm square spacing

#### Layout

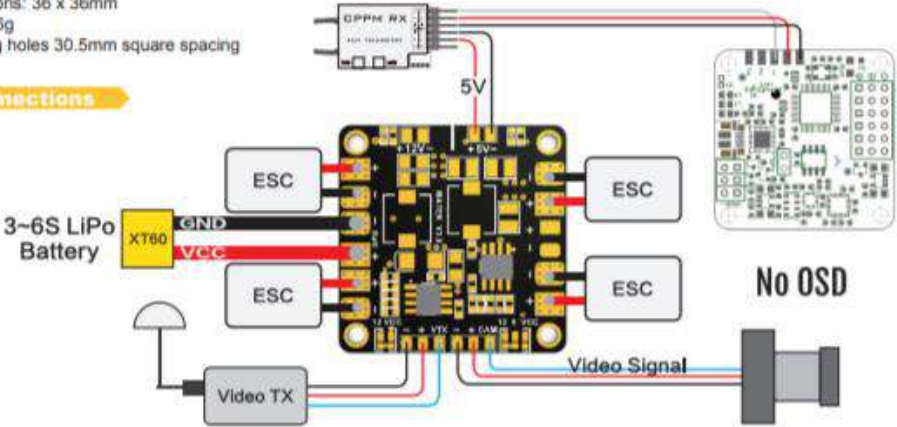


Camera Voltage Bridge  
12V / 5V / VCC  
Camera Power & Signal  
VTX Power & Signal  
VTX Voltage Bridge  
12V / VCC



e.g. choose 5V for camera, 12V for VTX.

#### Connections



No OSD

**Anexo F:** Datos técnicos de la impresora 3D Ender PRO.

## 1. Introduction

1. SD Slot and USB Port
2. Control Box
3. Print Surface
4. Control Knob

5. Display Screen
6. Nozzle Assembly
7. Spool Holder
8. Extruder (E) Stepper
9. Power
10. Y Limit Switch
11. Y Stepper
12. Coupling
13. Z Stepper
14. Z Limit Switch
15. X Limit Switch
16. X Stepper

## 2. Screen Information

### Information Displayed

Print Speed

Model

100%

www.creality3d.cn

Push: OK/Enter Sub Menu  
Turn: Change Option/Value

- Set Temperature of the Nozzle
- Current Temperature of the Nozzle
- Set Temperature of the Hot Bed
- Current Temperature of the Hot Bed
- Part Cooling Fan Speed
- Current Location of the nozzle
- Print Time
- Print Progress
- Prompt Message

Screen Options		
Menu	Sub Menu	Explanation
↑ Info Screen ↑	↑ main ↑	Return
Prepare →	Disable Steppers	Moving X Y Z axis by your hands
	Auto Home	return to the origin
	Preheat PLA	
	Preheat ABS	
Control →	Cooldown	Close and cooldown the nozzle
	Move Axis →	Moving X Y Z axis or Extruder by given value.
No card /Print from SD	Temperature →	Heat the nozzle and the bed or change fan speed by given value
	Restore Failsafe	Restore factory setting
Init. SD-Card		Select the printing model
/Change SD-Card		
Printing		
Tune →	Speed	Change Printing Speed by given value
	Nozzle	Change the temperature by given value
	Bed	Change the temperature by given value
	Fan Speed	Change Fan Speed by given value
	Flow	Change filament flow by given value
Pause Print		
Stop Print		

## ANEXO G: Programación del Sistema de Navegación Inercial.

```
#include <Wire.h>           //LIBRERIAS EMPLEADAS
#include <Servo.h>
#include <math.h>
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <Adafruit_BNO055.h>

const double pin=15;
Servo ESC1;
Servo ESC2;

uint16_t BNO055_SAMPLERATE_DELAY_MS = 50;
uint16_t BNO055_SAMPLERATE_DELAY_MS2 = 50;//how often to read data from the board
uint16_t PRINT_DELAY_MS2 = 500;
uint16_t PRINT_DELAY_MS = 50; // how often to print the data
uint16_t printCount = 0; //counter to avoid printing every 10MS sample
uint16_t printCount2 = 0; //counter to avoid printing every 10MS sample

//Variables Control Proporcional (P) turbinas

int Tiempomuestreo = 1; //Tiempo de muestreo en milisegundos
unsigned long pasado = 0; //Tiempo pasado (Tiempo para asegurar el tiempo de muestreo)
unsigned long ahora,ti;
double error, error_pora = 100; //Error
double U, Vmax, U_ant; //Señal de control
double angulo;
int R, count=0, cambiotiempo;
double cop= 98; //Y
double cad = 17; //X
double hip, pos;
double teta,teta_grad;
double error_por = 100, dimya;

//Variables Control Proporcional Integral (P) turbinas

int Tiempomuestreo2 = 1; //Tiempo de muestreo en milisegundos
unsigned long pasado2 = 0; //Tiempo pasado (Tiempo para asegurar el tiempo de muestreo)
```

```

unsigned long ahora2;
//float Setpoint = 90; //Referencia
double Y2, S,Sant, S1, posy, dimy; //Salida
double error2; //Error
double U2, Vmax2, U_ant2; //Señal de control
double angulo2;
int Ri, Rd, z;
int Tsy = 1;
double err_py = 0, err_pa2;
int Kp = 3;
int Kp2 = 3;
double Ki = 0.1;
int qw;
Adafruit_BNO055 bno = Adafruit_BNO055(55);

void setup(void)
{
  //Activacion de ESC de lasturbinas

  delay(5000);
  ESC1.attach(8);
  ESC2.attach(6);
  ESC1.writeMicroseconds(2000); //1000 = 1ms OJO REVISAR
  delay(2000);
  ESC2.writeMicroseconds(2000);
  delay(2000); //Esperar 5 segundos para hacer la activacion
  ESC1.writeMicroseconds(1500);
  delay(5000);
  ESC2.writeMicroseconds(1500);
  delay(5000);

  //Comprobacion encendido IMU

  Serial.begin(115200);
  if (!bno.begin())
  {
    while (1);
  }
}

```

```

}

teta = atan(cop / cad); //CALCULO ANGULO DE ORIENTACION
teta_grad = (teta*180)/3.1415;
hip = sqrt((cad*cad)+(cop*cop));

delay(1000);
}

void loop(void)
{
  unsigned long tStart = micros();// tiempo de impresion
  ahora = millis();          //tiempo de muestreo

  sensors_event_t orientationData , linearAccelData;
  bno.getEvent(&orientationData, Adafruit_BNO055::VECTOR_EULER);
  bno.getEvent(&linearAccelData, Adafruit_BNO055::VECTOR_LINEARACCEL);

  angulo = orientationData.orientation.x; //LECTURA DEL ANGULO DE ORIENTACION

  if (angulo > 350.00)
  {
    angulo = 0;
  }

  // CONTROL POSICION ANGULAR

  if(abs(error_pora)>=6){

    cambiotiempo = 0;
    cambiotiempo = ahora - pasado; //Diferencia entre tiempo actual y tiempo pasado

    if(cambiotiempo >= Tiempomuestreo)
    {
      error = teta_grad - angulo; //Error en control en lazo cerrado
      U = Kp*error; //Señal de Control
      pasado = ahora; //Actualizar el tiempo de muestreo
    }
  }
}

```

```

}

if(U > U_ant)
{
  Vmax = U;
}

//SEÑAL PWM ENVIADO A LAS TURBINAS
if(U>=0)
{
  Ri = map(U, 0, Vmax, 1500, 1430);
  Rd=1500;
}
if(U<0)
{
  U=abs(U);
  Ri=1500;
  Rd = map(U, 0, Vmax, 1500, 1400);
}

U_ant = U;

if(Ri>=1460 && Ri<1500)
{
  Ri = 1460;
}
if(Rd>=1450 && Rd<1500)
{
  Rd = 1450;
}
z=0;
}

//CONTROL DESPLAZAMIENTO
if(abs(error_por)>=5 && z==1)
{

```



```

S1 = analogRead(pin);    //LECTURA SENSOR DE PROXIMIDAD
S = S1*5.35/10;
count=count+1;

if(count==1)
{
  dimy=S;
}

Sant=S;

posy = dimy - S;    //CALCULO DE DESPLAZAMIENTO
dimya=dimy;

int cambiotiempo2 = 0;
cambiotiempo2 = ahora-pasado2;    //Diferencia entre tiempo actual y tiempo pasado

if(cambiotiempo2 >= Tiempomuestreo2)
{
  error2 = hip - posy;    //Error en control en lazo cerrado
  err_py=error2*Tsy/1000+err_py;
  float P2 = Kp2*error2;
  float I2 = Ki*err_py;
  U2 = P2 + I2;    //SEÑAL DE CONTROL

  pasado2 = ahora;    //Actualizar el tiempo de muestreo
}

err_pa2 = ((teta_grad - angulo2)/teta_grad)*100;

if(U2 > U_ant2)
{
  Vmax2 = U2;
}

// SEÑAL PWM ENVIADO A LAS TURBINAS

```

```
if(U2>=0)
{
  Ri = map(U2, 0, Vmax2, 1500, 1400);
  Rd = map(U2, 0, Vmax2, 1500, 1350);
}
```

```
if(U2<0)
{
  Rd = map(U2, 0, Vmax2, 1500, 1625);
  Ri = map(U2, 0, Vmax2, 1500, 1625);
}
```

```
if(Rd>=1480)
{
  Rd = 1500;
}
```

```
if(Ri>=1480)
{
  Ri = 1500;
}
```

```
U_ant2 = U2;
```

```
}
```

```
error_pora = ((teta_grad - angulo)/teta_grad)*100;
```

```
error_por = ((hip - posy)/hip)*100;
```

```
//ESCRITURA SEÑAL DE PWM
```

```
ESC1.writeMicroseconds(Rd);
```

```
ESC2.writeMicroseconds(Ri);
```

```
//RANGO LIMITE PARA ESTADO ESTACIONARIO DEL CONTROLADOR
```

```
if(abs(error_pora)<=5)
```

```
{
```

```
  z=1;
```

```

}
pos=posy;

if(abs(error_por)<=5){
  Rd = 1500;
  Ri = 1500;
  error_pora = 0;
  error_por = 0;
}

if (printCount * BNO055_SAMPLERATE_DELAY_MS2 >= PRINT_DELAY_MS2) {
  //enough iterations have passed that we can print the latest data
  Serial.print("Posicion Angular: ");
  Serial.println(angulo);
  Serial.print("Señal de Control R ");
  Serial.print(Rd);
  Serial.print(" , ");
  Serial.println(Ri);
  Serial.print("hipot ");
  Serial.println(hip);
  Serial.print("Error % angular: ");
  Serial.println(error_pora);
  Serial.print("Error Porcentual: ");
  Serial.println(error_por);
  Serial.print("distancia: ");
  Serial.println(S);
  Serial.println("%");
  printCount = 0;
}
else {
  printCount = printCount + 1;
}

while ((micros() - tStart) < (BNO055_SAMPLERATE_DELAY_MS * 1000))
{
  //poll until the next sample is ready
}
}

```

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO  
DIRECCIÓN DE BIBLIOTECAS Y RECURSOS PARA EL APRENDIZAJE Y  
LA INVESTIGACIÓN

UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS

REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 25 /10 /2019

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)

Nombres-Apellidos: Byron Israel Rosero Galeano  
Thayron Saúl Mazón Olivo

INFORMACIÓN INSTITUCIONAL

Facultad: Informática y Electrónica

Carrera: Ingeniería Electrónica en Control y Redes Industriales

Título a optar: Ingeniero Electrónico en Control y Redes Industriales

f. Documentalista responsable:

