



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN

**“IMPLEMENTACIÓN DE UN ROBOT SUBACUÁTICO
BIOINSPIRADO UTILIZANDO ACTUADORES BASADOS EN
METALES DE MEMORIA DE FORMA PARA EL
DESPLAZAMIENTO BIDIMENSIONAL EN UN AMBIENTE
CONTROLADO.”**

Trabajo de titulación

Tipo: Dispositivo Tecnológico

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN

AUTORES:

BRYAN ALEXANDER AGUIRRE CEVALLOS

ROBERTO ISRAEL PALACIOS PRIETO

Riobamba - Ecuador

2022



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN

**“IMPLEMENTACIÓN DE UN ROBOT SUBACUÁTICO
BIOINSPIRADO UTILIZANDO ACTUADORES BASADOS EN
METALES DE MEMORIA DE FORMA PARA EL
DESPLAZAMIENTO BIDIMENSIONAL EN UN AMBIENTE
CONTROLADO.”**

Trabajo de titulación

Tipo: Dispositivo Tecnológico

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN

AUTORES:

BRYAN ALEXANDER AGUIRRE CEVALLOS

ROBERTO ISRAEL PALACIOS PRIETO

DIRECTOR: Ing. FAUSTO CABRERA AGUAYO, MSc

Riobamba - Ecuador

2022

©2022, Bryan Alexander Aguirre Cevallos; Roberto Israel Palacios Prieto

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 Autor.

Nosotros, Bryan Alexander Aguirre Cevallos y Roberto Israel Palacios Prieto, declaramos que el presente trabajo de titulación es de nuestra autoría y los resultados de este son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados. Como autores asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 02 de febrero del 2022



Bryan Alexander Aguirre Cevallos
2300671159



Roberto Israel Palacios Prieto
0604248278

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INFORMATICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El trabajo de titulación; Tipo Dispositivo Tecnológico “**IMPLEMENTACIÓN DE UN ROBOT SUBACUÁTICO BIOINSPIRADO UTILIZANDO ACTUADORES BASADOS EN METALES DE MEMORIA DE FORMA PARA EL DESPLAZAMIENTO BIDIMENSIONAL EN UN AMBIENTE CONTROLADO**”, realizado por los señores: **BRYAN ALEXANDER AGUIRRE CEVALLOS** y **ROBERTO ISRAEL PALACIOS PRIETO**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. Pablo Eduardo Lozada Yanez PRESIDENTE DEL TRIBUNAL	_____	2022-02-24
Ing. Fausto Ramiro Cabrera Aguayo, MSc DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN	_____	2022-02-24
Ing. Paul Patricio Romero Riera, PhD MIEMBRO DEL TRIBUNAL	_____	2022-02-24

DEDICATORIA

El presente trabajo de titulación lo dedico a mi familia, en especial a mis padres David y Ingrid por siempre desear y anhelar lo mejor para mi vida, gracias por cada consejo, cada motivación, por su amor, sacrificio, y que con su apoyo incondicional me han permitido llegar a cumplir esta meta tan anhelada, mis compañeros y a todas las personas que compartieron sus conocimientos, me apoyaron, logrando que el tiempo de estudio sea agradable y que el trabajo se realice con éxito.

Bryan

El presente trabajo se lo dedico a todos quienes me han apoyado por este camino arduo pero decisivo para mi vida personal y profesional, primero agradezco a Dios siendo el que me ha protegido y brindado sabiduría para cumplir con mis metas y objetivos personales, todo el respeto y amor que les tengo se los dedico a mis padres, a mi padre Roberto y a mi madre María Esther que me guiaron siempre por el camino correcto, dándome apoyo y amor, con el firme objetivo de verme triunfar y ser la persona de buenos valores, honesta y responsable.

Mi hermana Lesly, por brindarme su apoyo y a mi hermano Jean que ha sido una de las personas que me apoya incondicionalmente en las buenas y en las malas, mi familia y amigos que son las personas con las que he compartido mi vida y a las cuales se han intervenido en todo el éxito y felicidad que me acompañan.

Roberto

AGRADECIMIENTO

Muy orgullosos de poder mencionar nuestro sincero agradecimiento a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, por brindarnos la formación necesaria, una profesión y a todas las personas quienes agradecemos el poder llegar al cumplimiento de una meta más en nuestras vidas, el cual es nuestro título profesional a través de este trabajo de tesis, en honor a tal orgullo deseo expresar mi agradecimiento con los siguientes:

A nuestro tutor de tesis Ing. Fausto Cabrera por ser la persona que con gran paciencia y profesionalismo ha sabido direccionar este trabajo de tesis.

A nuestras familias que con su apoyo han hecho cumplir nuestras metas y seguir siendo buenas personas, con valores firmes que seguiremos creyendo que la unión, la familia y los amigos son un eje fundamental para la vida y la felicidad.

A nuestros compañeros quienes con su colaboración y apoyo han hecho posible lograr culminar con este proceso de estudio.

Roberto & Bryan

TABLA DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE ANEXOS	xii
INDICE DE ABREVIATURAS	xiii
RESUMEN	xiv
ABSTRACT.....	xv
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL	6
1.1. Investigación Subacuática	6
<i>1.1.1. Robots Subacuáticos</i>	<i>6</i>
<i>1.1.2. Robot Pez.....</i>	<i>10</i>
1.2. Cinemática de robots	12
<i>1.2.1. Problemas de cinemática Directo</i>	<i>13</i>
<i>1.2.2. Problemas de cinemática Inverso</i>	<i>13</i>
1.3. Dinámica de robots	13
1.4. Movimiento Bidimensional.....	14
1.5. Hidrostática	14
<i>1.5.1. Principio de pascal</i>	<i>14</i>
<i>1.5.2. Principio de Arquímedes</i>	<i>14</i>
1.6. Flotabilidad	16
<i>1.6.1. Flotabilidad de los peces</i>	<i>16</i>
1.7. Actuadores.....	17
<i>1.7.1. Actuadores basados en SMA.....</i>	<i>17</i>
1.8. Sistemas electrónicos	18
<i>1.8.1. Utilidades de los Sistemas Electrónicos</i>	<i>18</i>
<i>1.8.2. Sistemas Eléctricos Macros</i>	<i>19</i>
<i>1.8.3. Sistemas Eléctricos Micro Controlados</i>	<i>19</i>
<i>1.8.4. Sistemas electrónicos resistentes a inmersión al agua.</i>	<i>19</i>
1.9. Tarjetas de control.....	19
<i>1.9.1. Arduino Mini.....</i>	<i>19</i>
1.10. Resistencia Pull up y pull down	20

1.11.	Sensores	20
<i>1.11.1.</i>	<i>Tipos de sensores.....</i>	<i>21</i>
1.12.	Software.....	21
<i>1.12.1.</i>	<i>SolidWorks</i>	<i>21</i>
<i>1.12.2.</i>	<i>LabVIEW</i>	<i>22</i>
<i>1.12.3.</i>	<i>Arduino</i>	<i>23</i>
<i>1.12.4.</i>	<i>Software Fritzing</i>	<i>24</i>

CAPÍTULO II

2.	PROPUESTA Y DISEÑO DE PROTOTIPO	25
2.1.	Requerimientos del prototipo.....	25
2.2.	Concepción general del prototipo bioinspirado	25
2.3.	Diseño de la arquitectura del robot subacuático bioinspirado	26
2.4.	Descripción de los elementos hardware del sistema.	27
<i>2.4.1.</i>	<i>Elementos y componentes del diseño electrónico</i>	<i>27</i>
<i>2.4.1.1.</i>	<i>Arduino nano</i>	<i>27</i>
<i>2.4.1.2.</i>	<i>Unidad de medición inercial IMU 6050.....</i>	<i>28</i>
<i>2.4.1.3.</i>	<i>Modulo Drive IBT2</i>	<i>29</i>
<i>2.4.1.4.</i>	<i>Regulador L7805</i>	<i>30</i>
<i>2.4.1.5.</i>	<i>Batería Lipo Turnigy Nano -tech 3.7 V, 300 Mah.....</i>	<i>31</i>
<i>2.4.1.6.</i>	<i>Batería Lipo Tattu 650 mah 4s 75C</i>	<i>32</i>
<i>2.4.1.7.</i>	<i>Fuente de alimentación de 12V a 10a</i>	<i>33</i>
<i>2.4.2.</i>	<i>Elementos y componentes del diseño mecánico.</i>	<i>34</i>
2.5.	Diseño mecánico y ensamblaje de las piezas del prototipo bioinspirado	40
<i>2.5.1.</i>	<i>Diseño del cuerpo.....</i>	<i>40</i>
<i>2.5.2.</i>	<i>Diseño de la aleta caudal.</i>	<i>42</i>
<i>2.5.3.</i>	<i>Diseño de la Aleta pectoral</i>	<i>46</i>
<i>2.5.4.</i>	<i>Ensamblaje del prototipo</i>	<i>49</i>
2.6.	Diseño electrónico y esquema de conexiones.....	50
2.7.	Diseño del Software de control de movimiento y monitoreo del pez	54
<i>2.7.1.</i>	<i>Requerimientos del Software</i>	<i>54</i>
<i>2.7.2.</i>	<i>Flujograma programa de control de movimiento.....</i>	<i>54</i>

CAPÍTULO III

3.	VALIDACIÓN DE PROTOTIPO.....	59
-----------	-------------------------------------	-----------

3.1.	Implementación del robot subacuático bioinspirado	59
3.2.	Caracterización del actuador	59
3.2.1.	<i>Grabado del actuador.....</i>	59
3.2.2.	<i>Movimiento del actuador</i>	81
3.3.	Validación del cuerpo, aletas pectoral y caudal.....	83
3.4.	Validación de posiciones de actuadores internos de aleta pectoral y caudal	86
3.4.1.	<i>Análisis de posiciones de los actuadores internos de aleta pectoral y caudal</i>	88
3.5.	Caracterización de los sensores.....	89
3.5.1.	<i>Validación del sensor de posición y estabilización</i>	89
3.6.	Prueba de tiempo de desplazamiento del robot bioinspirado	92
3.7.	Consumo de Corriente.....	93
 CAPÍTULO IV		95
 4.	 EVALUACIÓN ECONÓMICA	 95
 CONCLUSIONES.....		 97
RECOMENDACIONES.....		99
BIBLIOGRAFÍA		
ANEXOS		

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-2:	Características de Arduino nano.	28
Tabla 3-2:	Características de la IMU 6050.....	29
Tabla 4-2:	Combinaciones entre sensor IMU y Arduino.....	29
Tabla 5-2:	Características del Módulo Drive IBT2	29
Tabla 6-2:	Características del regulador de voltaje L7805	30
Tabla 7-2:	Características de la batería Lipo Turnigy Nano -tech 3.7 V, 300 Mah.	32
Tabla 8-2:	Características de la Batería Lipo Tattu 650 mah 4s 75C.....	32
Tabla 9-2:	Fuente de alimentación de 12V a 10 A	34
Tabla 10-2:	Propiedades Físicas del PLA.....	35
Tabla 11-2:	Propiedades mecánicas del PLA	35
Tabla 12-2:	Especificaciones del filamento de TPU.....	36
Tabla 13-2:	Propiedades Físicas de la silicona antihongos.	37
Tabla 14-2:	Propiedades Mecánicas de las aleaciones memoria de forma SMA	38
Tabla 15-2:	Características de la impresora 3D.....	39
Tabla 1-3:	Grabado del alambre según el voltaje, amperaje, temperatura y tiempo	59
Tabla 2-3:	Temperatura de activación de la aleta caudal.	68
Tabla 3-3:	Grabado del actuador aleta pectoral.	71
Tabla 4-3:	Temperatura de activación de la aleta pectoral.	78
Tabla 5-3:	Pruebas del movimiento del actuador.	81
Tabla 6-3:	Diseños del cuerpo del prototipo.....	84
Tabla 7-3:	Diseños de la Aleta Caudal.	84
Tabla 8-3:	Diseños de la Aleta Pectoral.	85
Tabla 9-3:	Diseños escogidos para el robot subacuático bioinspirado.....	85
Tabla 10-3:	Validación de distancias entre Actuadores interno aleta pectoral.....	87
Tabla 11-3:	Validación de distancias entre Actuadores interno aleta Caudal	87
Tabla 12-3:	Validación de distancias entre Actuadores internos aleta caudal y pectoral	87
Tabla 13-3:	Datos de trayectoria de nado del Pez Bioinspirado en un ambiente controlado ..	89
Tabla 14-3:	Desplazamiento robot pez.....	92
Tabla 15-2:	Consumo de corriente de los elementos del robot pez bioinspirado	94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1:	Clasificación de Robots Subacuáticos.	7
Figura 2-1:	Pez Robótico	11
Figura 3-1:	Estado de un cuerpo dentro de un líquido.....	15
Figura 4-1:	Pez robótico Principio de Arquímedes	16
Figura 5-1:	Alojamiento de la vejiga natatoria.....	17
Figura 6-1:	Distintas fases del Nitinol.....	18
Figura 7-1:	Circuito Pull Down y Pull Up.....	20
Figura 8-1:	Diseño en SolidWorks del prototipo Bioinspirado	22
Figura 9-1:	Programación en LabVIEW	23
Figura 10-1:	Programación en Arduino del prototipo Bioinspirado.	24
Figura 11-1:	Pantalla de programación de software Fritzing.....	24
Figura 1-2:	Esquema general del robot subacuático bioinspirado	26
Figura 2-2:	Diagrama de bloques de la arquitectura del prototipo.....	27
Figura 3-2:	Arduino nano.....	27
Figura 4-2:	Unidad de medición inercial IMU 6050	28
Figura 5-2:	Modulo Drive IBT2.....	29
Figura 6-2:	Batería Lipo Turnigy Nano -tech 3.7 V, 300 Mah.....	31
Figura 7-2:	Batería Lipo Tattu 650 mah 4s 75C.....	32
Figura 8-2:	Fuente de alimentación de 12V a 10 A.....	33
Figura 9-2:	Filamento PLA	35
Figura 10-2:	Filamento TPU	36
Figura 11-2:	Silicona antihongos	37
Figura 12-2:	Nitinol de 1 mm	38
Figura 13-2:	Impresión en 3D del robot pez bioinspirado.....	39
Figura 14-2:	Diseño del cuerpo en SolidWorks.	40
Figura 15-2:	Cuerpo del robot bioinspirado.	40
Figura 16-2:	Estructura del robot bioinspirado, centro de masa para su matriz de inercia	41
Figura 17-2:	Diseño del péndulo caudal en SolidWorks	42
Figura 18-2:	Diseño del péndulo unido a la aleta caudal en SolidWorks.	43
Figura 19-2:	Aleta caudal implementada.	43
Figura 20-2:	Base inferior aleta caudal, centro de masa para su matriz de inercia	44
Figura 21-2:	Péndulo caudal, centro de masa para su matriz de inercia.	45
Figura 23-2:	Diseño de la aleta pectoral en SolidWorks.	46
Figura 22-2:	Implementación de la aleta pectoral.	46

Figura 24-2:	Aleta Pectoral Base, centro de masa para su matriz de inercia	47
Figura 25-2:	Cubierta aleta pectoral, centro de masa para su matriz de inercia.....	48
Figura 26-2:	Diseño del prototipo ensamblado en SolidWorks	49
Figura 27-2:	Ensamblaje de las diferentes partes del cuerpo del robot bioinspirado	50
Figura 28-2:	Diagrama de conexión general del sistema.....	50
Figura 29-2:	Diagrama de Flujo control de movimiento	57
Figura 30-2:	Diagrama de flujo monitoreo de datos.....	58
Figura 1-3:	Grabado del nitinol.....	68
Figura 2-3:	Grabado del nitinol usado para el actuador de aleta pectoral.	81
Figura 3-3:	Grado final del actuador despues de pruebas realizadas.	83
Figura 1-3:	Trayectoria de nado de 7 puntos de referencia del Pez Bioinspirado	91
Figura 2-3:	Trayectoria de nado de 7 puntos de referencia del Pez Bioinspirado.....	92
Figura 3-3:	Colocación de cableado de alimentacion según pruebas realizadas.....	93

ÍNDICE DE ANEXOS

- ANEXO A:** DATOS TÉCNICOS DEL ARDUINO NANO.
- ANEXO B:** DATOS TÉCNICOS DEL DRIVER IBT-2
- ANEXO C:** DATOS TÉCNICOS DEL REGULADOR DE VOLTAJE L7805
- ANEXO D:** PLANO DEL DISEÑO DEL PÉNDULO Y ALETA CAUDAL.
- ANEXO E:** PLANO DEL DISEÑO DEL CUERPO HIDRODINÁMICO.
- ANEXO F:** PLANO DEL DISEÑO DEL PAR DE ALETAS PECTORALES.
- ANEXO G:** PLANO DEL DISEÑO DEL CONTENEDOR DEL CIRCUITO.
- ANEXO H:** PROGRAMACIÓN EN LABVIEW.
- ANEXO I:** CÓDIGO DEL SISTEMA.

ÌNDICE DE ABREVIATURAS

CAD:	Computer-Aided Design (Diseño asistido por computadora)
SMA:	Shape Memory Alloy (Metales con memoria de forma).
mm:	milímetro.
2D:	Dos dimensiones.
3D:	Tres dimensiones.
ROV:	Remotely Operated Underwater Vehicle (Robot Submarino Operado Remotamente).
AUV:	Autonomous Underwater Vehicle (Robot Submarino Autónomo).
MHD:	Magenta Hydro Dynamics (Magnetohidrodinámica)
AC:	Alternating Current (Corriente Alterna)
CC:	Corriente Continua.
Vca:	Voltaje de corriente altera.
Vcc:	Voltaje de corriente continua.
AVR:	Automatic Voltage Regulation (Regulador Automático de Voltaje).
DoF:	Degree of freedom (Grados de Libertad)
RISC:	Reduced Instruction Set Computer (Conjunto Reducido de Instrucciones de Cómputo).
PIC:	Programmable Interrupt Controller (Controlador Programable de Interrupciones).
IDE:	Integrated Development Environment (Entorno de Desarrollo Integrado).
PWM:	Pulse-width modulation (Modulación por ancho de pulso)
GPS:	Sistema de Posicionamiento Globa
IMU:	Unidad de medida inercial
VCC:	Voltaje de corriente continua
GND:	Ground (Puesta a tierra)
VI:	Virtual Instrument (Instrumento virtual)
PCB:	Printed circuit board (Placa de circuito impreso)
PLA:	Ácido poliláctico
TPU:	Poliuretanos termoplásticos
ABS:	Acrilonitrilo butadieno estireno
MPa:	Megapascal
Nm/g:	Newton metro por gramo
°C:	Grados Celsius
g/min:	Gramo por minuto
Kb:	Kilobyte
Mhz:	Megahercio

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo de titulación fue la implementación de un robot subacuático bioinspirado utilizando actuadores basados en metales de memoria de forma (SMA) para el desplazamiento bidimensional en un ambiente controlado. Para su diseño se utilizó el programa Solidworks, donde se buscó lograr un cuerpo hidrodinámico de forma fusiforme, para la propulsión en la natación del cuerpo se utilizaron un par de aletas pectorales y una aleta caudal bioinspiradas, ambas flexibles y ligeras, dichas aletas son impulsadas por actuadores basados en SMA. La unidad básica de los actuadores es dos alambres de 1 mm de forma rectangular incrustados en los dos lados opuestos de la aleta de silicona, la aleta con los cables SMA incrustados pueden doblarse mediante una corriente de modulación de ancho de pulso generada por el microcontrolador, además consta de un sensor de navegación IMU6050, estabilización y posicionamiento utilizado para obtener información del prototipo en funcionamiento, dichos datos son enviados por comunicación I2C a un receptor de datos en el programa LabVIEW, cabe resaltar que se calibra el sensor IMU6050 para que los datos obtenidos sean precisos, siendo esta la inicialización del proceso de monitoreo de datos de trayectoria. Como resultado se construye un robot subacuático bioinspirado. La simulación y la recopilación de datos se presenta en el capítulo III del presente documento. Con las pruebas realizadas se logró evaluar los movimientos de las diferentes aletas bioinspiradas en conjunto con el cuerpo del pez, comprobando su flotabilidad y su desplazamiento bidimensional, se concluye que el robot bioinspirado cumple con el funcionamiento de sus actuadores basados en SMA que le permiten la flotabilidad y el desplazamiento bidimensional en un ambiente controlado, se recomienda para futuras aplicaciones desarrollar actuadores con SMA personalizados con un mayor número de grados de libertad según su aplicación la requiera.

Palabras clave: <TECNOLOGIA Y CIENCIAS DE LA INGENIERIA>, <CONTROL AUTOMÁTICO>, <ROBOT SUBACUÁTICO BIOINSPIRADO>, <ALEACIONES DE MEMORIA DE FORMA (SMA)>, <ACTUADORES>, <MICROCONTROLADOR>, <DEZPLAZAMIENTO BIDIMENSIONAL>.



Firmado digitalmente por:
ELIZABETH
FERNANDA AREVALO
MEDINA



0349-DBRA-UPT-2022

ABSTRACT

The objective of the graduate research project was to implement a bio-inspired underwater robot using memory metal-based actuators in the shape of (SMA) for the two-dimensional scrolling in a controlled environment. For its design, the Solidworks software was used, where it was seeking to achieve a fusiform-shaped hydrodynamic body; for the propulsion in body swimming, a pair of pectoral fins and a tail fin were used bio-inspired, both flexible and light, these fins are driven by actuators based on SMA. The basic unit of the actuators is two 1 mm rectangular cables. Embedded in the two opposite sides of the silicon fin, the fin with the SMA cables embedded can be bent by a pulse width modulation current generated by the microcontroller; it also consists of an IMU6050 navigation sensor, stabilization and positioning used to obtain information from the prototype in operation, These data are sent by I2C communication to a data receiver in the LabVIEW software, it is worth mentioning that the IMU6050 sensor is calibrated to get accurate data, being the beginning the path of the data monitoring process. As a result, a bio-inspired underwater robot is built. Simulation and data collection are presented in Chapter III of this document. With the tests carried out, it was possible to evaluate the movements of the different bio-inspired fins together with the body of the fish, checking their buoyancy and its two-dimensional displacement; it is concluded that the bioinspired robot complies with the operation of its SMA-based actuators that allow buoyancy and two-dimensional displacement in a controlled environment, it is recommended for future applications develop custom SMA actuators with a more significant number of degrees of freedom as your application requires.

KEY WORDS: <TECHNOLOGY AND ENGINEERING SCIENCE>, <AUTOMATIC CONTROL>, <BIO-INSPIRED UNDERWATER ROBOT>, <ALLOYS OF SHAPE MEMORY (SMA)>, <ACTUATORS>, <MICROCONTROLLER>, <TWO DIMENSIONAL DISPLACEMENT>.



INTRODUCCIÓN

La superficie del planeta está cubierta por agua, la cual 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, proveyendo fuentes de alimento, estudios de fenómenos naturales y biodiversidad, por solo mencionar algunas.

La investigación Subacuática se ha venido extendiendo con el fin de buscar soluciones a problemas dentro de un ecosistema acuático dando a conocer la realidad de dicho entorno, así como el desarrollo de nuevas tecnologías como lo es la robótica bioinspirada que trabaja bajo el concepto de aprendizaje de la naturaleza, buscando lograr mecanismos más sencillos y eficaces que pueden solucionar algún problema en el campo de la ingeniería.

El robot bioinspirado se concentra en la imitación de diversos mecanismos y características propias de estos seres, bajo el concepto que la naturaleza ha llegado a un punto óptimo y eficiente en cuanto a la locomoción acuática de un pez se refiere.

El robot UC-Ika 1 desarrollado en la universidad de Canterbury, Nueva Zelanda y publicado en la revista internacional de sistemas robóticos avanzados. Es un robot bioinspirado en el movimiento de natación de un atún, consta de 4 grados de libertad el cual genera un movimiento ondulatorio gracias a su péndulo y aleta caudales accionado por un solo motor de corriente continua.(Masoomi et al., 2015, pp.1-11) .

Los actuadores inteligentes pueden optar por diferentes formas según su aplicación, por ejemplo, optar por una forma recta y ser sometido a una tensión ejerciendo fuerzas grandes con pequeños movimientos lineales, otro ejemplo es la forma de resorte helicoidal el cual posee la característica de movimientos lineales grandes y fuerzas pequeñas o rotaciones grandes. Las barras de torsión de actuadores basados en metales con memoria de forma tienen rotaciones grandes y pares pequeños.(Muñoz, 2009, pp.20-27)

En primer lugar, se presenta un revisión del estado del arte acerca de robots subacuáticos bioinspirados que nos brinda una idea principal del prototipo incluyendo las diferentes ciencias como la electrónica, la robótica bioinspirada y la física obteniendo así un desarrollo del diseño del robot subacuático bioinspirado, en el capítulo 2 se presenta el diseño del cuerpo de robot subacuático bioinspirado, el diseño mecánico de la aleta caudal y el par de aletas pectorales ambas flexibles capaces de movimientos 2D accionados por actuadores basados en metales con memoria de forma SMA. Finalmente, se lleva a cabo una serie de experimentos para investigar el desempeño del prototipo, los resultados experimentales se analizan a detalle.

ANTECEDENTES

Para la realización del presente proyecto se toma en cuenta estudios realizados anteriormente sobre temas afines a la propuesta, que establecen métodos de análisis y referencia, los mismos que guían el camino a seguir. Entre estos trabajos se tiene el pez biológicamente inspirado desarrollado en el año 2006 a un costo de medio millón de dólares, en la universidad de Essex, Reino Unido, y actualmente en exhibición en el acuario de Londres (Liu et al., 2004, pp.1-5), el pez robótico suave llamado SoFi desarrollado en la MIT, y el pez robot llamado Robofish, que puede olfatear y limpiar contaminaciones del mar (Robotics Society of Japan et al., 2016, pp.1-8) y (Katzschmann et al., 2018, pp.1-12), También sirven como antecedentes, pero sin la cualidad de autonomía, los robots desarrollados por el *National Maritime Research Institute* de Japón (Hirata, 2000, pp.1-4). Existen peces robots con capacidades o autonomía limitadas, como por ejemplo los desarrollados en el MIT (Leonard y Bahr, 2016, pp.1-4). y EPFL (Lachat, Crespi y Ijspeert, 2005, pp.12-32). SoFi abreviatura de *Soft Robotic Fish* (pez robótico suave), es un robot bioinspirado creado por científicos del Laboratorio de Inteligencia Artificial y Ciencias de la Computación del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) y publicado en la revista *Science Robotics*. Los científicos explicaron que cómo crearon el robot con aletas y cómo le fue en su primera expedición en un arrecife de coral ubicado a las afueras de Fiyi. Los peces robot como SoFi podrían ser fundamentales para comprender y proteger la vida marina que está en peligro de desaparecer dentro del frágil ambiente oceánico, el cual está bajo la amenaza debido a la actividad humana y el cambio climático. Este robot de medio metro de largo se parece a un verdadero pez: puede nadar en el océano a velocidades de hasta la mitad de su largo por segundo y a profundidades de hasta 18 metros debajo de la superficie. SoFi usa una batería que dura 45 minutos de autonomía (Robotics Society of Japan et al., 2016, pp.1-8) (Katzschmann et al., 2018, pp.1-13), debido a que no la delatan un cable conectado a un bote, una hélice ruidosa o un cuerpo enorme, rígido, extraño o angular de un aparato metálico en la superficie, no parece molestar ni ahuyentar a los peces de verdad. Hay algunos que incluso nadan con ella. Al no estar conectada, ser suave, relativamente barata y bien tolerada, SoFi podría brindar a los biólogos la perspectiva de un pez sobre las interacciones animales en los ecosistemas marinos cambiantes (Katzschmann et al., 2018, pp.1-13)

Robofish es un pez robot que puede olfatear y limpiar contaminaciones en el mar. Robofish forma parte del proyecto SHOAL, con el que un grupo de científicos ha desarrollado una serie de peces robóticos capaces de monitorear una serie de agentes contaminantes de las aguas para reportar su ubicación mucho antes de que sea afectada la fauna marina o el agua (Kat0 y Inaba, 2012, pp.1-6).

Shoal es un proyecto de investigación europeo gestionado por BMT y financiado por el Séptimo Programa Marco para las TIC. SHOAL tiene como objetivo desarrollar un número de peces robóticos que trabajarán juntos para monitorear y buscar la contaminación en los puertos y otras áreas acuáticas. Los métodos tradicionales para monitorear la contaminación implican obtener muestras de alguna manera y luego enviar las muestras al laboratorio para su análisis, todo el proceso lleva tiempo y hace que la información sobre contaminación en tiempo real no sea una realidad. Shoal tiene como objetivo hacer este proceso en tiempo real. Al tener peces controlados de forma autónoma con sensores químicos unidos, su objetivo es realizar estas pruebas in situ. Además de esto, a los peces también cuentan con una inteligencia para que si encuentran cantidades significativas de contaminación deduzcan que provenga de una fuente, todos trabajarán juntos para encontrar la fuente de la contaminación para que el puerto pueda detener el problema temprano antes de que ocurra más contaminación (Kat0 y Inaba, 2012, pp.1-6).

El estudio y análisis de diferentes actuadores basados en SMA (Carrasco León, 2019, pp. 12-16) .Nos ayuda a tomar como base para saber los comportamientos de actuadores, para ello realizaron un banco de pruebas y diferentes experimentos.

La aleación de memoria de forma o *shape memory alloy* (SMA) es una aleación capaz de recordar su memoria de forma, después de realizar una deformación aparentemente plástica gracias a un calentamiento sobre su superficie, la más destacada es la aleación de níquel y titanio. Pueden utilizarse como alternativa a los actuadores convencionales gracias a las siguientes características: peso bajo (permite realizar grandes fuerzas con cierta limitación), pequeño tamaño, coste económico menor y actuación sin ruido (Carrasco León, 2019, pp. 12-16).

La aleación de níquel titanio, conocida como Nitinol o NiTi, pertenece a la clase de materiales inteligentes. Las propiedades NiTi incluyen memoria de forma, superelástico y alta capacidad de amortiguación. Estas propiedades se pueden modificar a cierto grado por cambios de composición, mecanizado y tratamiento de calor. La forma unificada de aleación de memoria de níquel-titanio muestra un comportamiento superelástico si se deforma a una temperatura que es ligeramente por encima de su temperatura de transformación. Comportamiento super elástico es la realización más compleja de la memoria mecánica. La super elasticidad ocurre a una temperatura superior a su temperatura de transformación, la elasticidad es 10-30 veces más alto que el de un metal ordinario (Cernusca, Milici y Ungureanu, 2016, pp. 1-4).

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Se puede implementar y controlar un robot subacuático bioinspirado utilizando actuadores basados en metales de memoria de forma para el desplazamiento bidimensional en un ambiente controlado?

SISTEMATIZACIÓN DEL PROBLEMA

- ¿Existe información de investigación científica relacionadas a la implementación y control de robots subacuáticos bioinspirados en peces?
- ¿Qué materiales y equipos pueden ser utilizados para la implementación de un robot subacuático bioinspirado en un pez?
- ¿Se puede diseñar, implementar y controlar el sistema de propulsión de un robot subacuático bioinspirado en peces con actuadores basados en metales con memoria de forma?
- ¿El robot subacuático bioinspirado en un pez es capaz de desplazarse de manera bidimensional en un ambiente controlado?

OBJETIVOS

General

- Implementar un robot subacuático bioinspirado utilizando actuadores basados en metales de memoria de forma para el desplazamiento bidimensional en un ambiente controlado.

Específicos.

- Investigar el estado del arte de robots subacuáticos bioinspirados en peces.
- Seleccionar equipo y materiales para la implementación de un robot subacuático bioinspirado en un pez.
- Diseñar, implementar y controlar utilizando actuadores basado en metales de memoria de forma.
- Realizar pruebas de funcionamiento para comprobar el correcto desplazamiento bidimensional en un ambiente cerrado del robot subacuático bioinspirado utilizando actuadores basado en metales de memoria de forma.

Metodología

El método inductivo utilizado en el capítulo 1 brinda la idea principal del prototipo incluyendo las diferentes ciencias como la electrónica, la robótica bioinspirada y la física obteniendo así bases para el desarrollo del diseño del robot subacuático bioinspirado.

El método heurístico utilizado en el capítulo 2, fue aplicado para la implementación del prototipo, el cual nos brindó la posibilidad de conocer el problema, para posteriormente elaborar una solución, desarrollando el robot subacuático bioinspirado en la herramienta de diseño CAD para tener una vista digital y aplicando la etapa de selección para los diferentes componentes tanto de estructura y de control nos da una correcta implementación del prototipo.

Una vez armado el prototipo el método experimental utilizado en el capítulo 3 nos brinda el control de la propulsión del robot, para lo cual se utilizó actuadores basados en metales de memoria de forma, el mismo que se someterá a pruebas de funcionalidad en un entorno subacuático controlado con la finalidad de detectar diferentes errores y posteriormente corregirlos para tener como resultado un óptimo funcionamiento del prototipo.

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

El presente capítulo detalla el estado del arte revisado para la implementación de un robot subacuático bioinspirado utilizando actuadores basados en metales de memoria de forma para el desplazamiento bidimensional en un ambiente controlado. Este dispositivo desarrollara actuadores usando metales con memoria de forma que gracias a sus características de convierte en un actuador ideal para la robótica bioinspirada.

1.1. Investigación Subacuática

La investigación Subacuática se ha venido desarrollando hace algún tiempo atrás gracias a la motivación de los investigadores teniendo como objetivo la generación de conocimiento con aplicación directa a los problemas de la sociedad o el sector productivo, ocupándose del proceso de enlace entre la teoría y el producto, por lo tanto, la investigación subacuática se definirá como la búsqueda de soluciones a problemas desarrollados en un ecosistema acuático dando a conocer la realidad de dicho entorno, entender un proceso, así como el desarrollo de conocimiento científico o tecnológico (Aznar Gómez, 2008, pp. 1-11).

1.1.1. Robots Subacuáticos

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 entre sensores y actuadores ayudan a generar una retroalimentación para lograr un mayor rendimiento en la ejecución de tareas (Rosero Galeano y Mazón Olivo, 2019, pp. 8-10)

Los robots Subacuáticos son diseñados para realizar tareas bajo el agua, pueden trabajar de manera autónoma o tele operados. El sistema de propulsión de un robot subacuático se caracteriza por el tipo de movimientos y evasiones que se pueden presentar al realizar tareas de monitoreo, exploración o manipulación en campo, siendo este último realizado de manera indirecta al ser humano, con el fin de reducir riesgos de dicha acción en ambientes peligrosos (Moreno et al., 2014, pp. 3-5).

1.1.1.1. Clasificación de los robots Subacuáticos

Los sistemas robóticos subacuáticos se pueden clasificar de diferentes maneras y criterios, como lo podemos observar en la Figura 1-1.

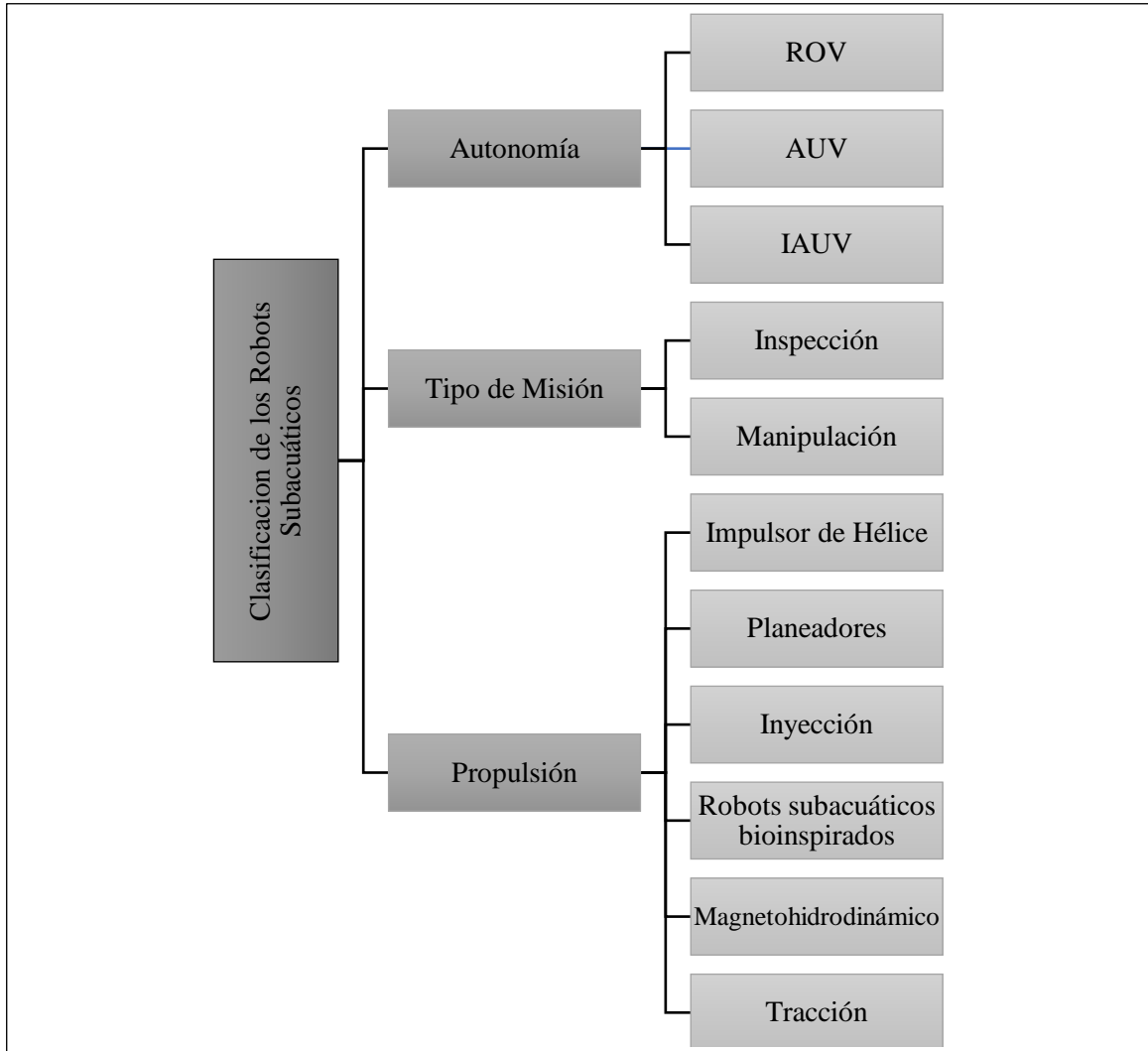


Figura 1-1: Clasificación de Robots Subacuáticos.

Fuente:(Moreno et al., 2014, pp. 3-5).

➤ **Autonomía**

Robots Submarinos Operados Remotamente, ROVs: Son vehículos operados vía remota, es decir, un robot submarino enlazado a los barcos por medio de un cable por el cual se conecta con el operador. Son comunes en industrias de aguas profundas como en la extracción de hidrocarburo. Muchas veces son llamados “*Remotely Operated Underwater Vehicle*” para distinguirlos de un “*remota control vehicle*” que estos son operados en tierra o aire. No requieren de tripulantes, pero si un operador, que vía remota dirige el sumergible. (Valdés Ruiz, 2015, pp. 6-11).

Robots Submarinos Autónomos, AUVs: Son vehículos controlados por un ordenador que operan debajo del agua, considerados autónomos porque no tienen conexión física con el operador que tal vez se encuentra a bordo de un barco o en la costa, tiene la característica de ser vehículos autoguiados y autopropulsados y que no necesitan de información durante las misiones para lograr sus tareas (Valdés Ruiz, 2015, pp. 6-11).

Robots Submarinos Autónomos para Intervenciones, IAUV: Son diseñados para realizar misiones de observación, sin embargo, recientemente se ha generado un interés en que estos puedan realizar tareas de manipulación. Esta es la idea detrás de los robots submarinos autónomos para intervención. Con este tipo de robots las misiones serían más económicas que en el caso de los ROVs, además su maniobrabilidad sería superior ya que el IAUV estaría libre de las restricciones que impone el cordón umbilical. (Novi et al., 2009, pp.1-5)

➤ **Tipo de Misión**

Un robot submarino está diseñado para realizar tareas bajo el agua, estas pueden ser mientras navega o al llegar a un lugar específico.

Inspección: Son aquellas misiones que se realizan durante la navegación del robot subacuático como 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 sin el uso de un brazo manipulador, ni de mecanismos para interactuar con el ambiente (Carreras et al., 2012, pp. 1-12).

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.

Las tareas típicas de manipulación comprenden: el mantenimiento de estructuras subacuáticas; la apertura y cierre de válvulas en instalaciones subacuáticas; la desactivación de minas; el ensamble y desensamble de componentes; la recolección de muestras para estudios arqueológicos, geológicos o ecológicos; la intervención en desastres para controlar las fugas de material contaminante o el apoyo en el rescate de personas (Carreras et al., 2012, pp. 1-12).

➤ **Propulsión**

El sistema de propulsión de un robot subacuático define totalmente los tipos de movimientos y maniobras que se puede realizar. Los sistemas de propulsión también tienen implicaciones en el consumo de energía, el hardware del robot y el efecto que el robot genera en el ambiente marino.

Impulsor de Hélice: El sistema de empuje con hélice y motor es el más utilizado en la mayoría de los robots submarinos. Consiste generalmente en un motor eléctrico, al que se le acopla una hélice. Al girar la hélice produce un efecto de empuje al desplazar el fluido de adelante hacia atrás, debido a la diferencia de presión producida. Los modelos matemáticos de impulsores que se han propuesto son solo una aproximación para describir su comportamiento, ya que influyen muchos factores tales como: la forma el diámetro y el área de las aspas; el área del ducto; la velocidad de giro de la hélice; las corrientes en el ambiente; la densidad y viscosidad del agua, etc. (Carreras et al., 2012, pp. 1-12).

Planeadores: Los robots submarinos planeadores no disponen de impulsor de hélice. Estos han sido diseñados para deslizarse desde la superficie del mar hasta una profundidad programada, luego cambian su flotabilidad y cabeceo para ir en dirección ascendente hasta llegar a un punto prefijado donde vuelven a descender y así sucesivamente (Carreras et al., 2012, pp. 1-12).

Inyección: La propulsión por inyección consiste en recoger agua del exterior para luego almacenarla en un depósito y finalmente expulsarla mediante una bomba, inyectándola al medio acuático a través de una boquilla. El agua es forzada a salir a alta presión por la boquilla y la fuerza de empuje del agua produce una aceleración en el vehículo. Cuando se puede controlar la orientación de la boquilla, es posible obtener un empuje en diversas direcciones (Carreras et al., 2012, pp. 1-12).

Bioinspirados: Este tipo de sistema de propulsión está inspirado en la fisiología de los peces o los cetáceos, y con ello su forma de desplazarse en el agua. El sistema más simple consiste en una aleta con un grado de libertad colocada vertical u horizontalmente en la parte trasera del vehículo submarino. Su movimiento cíclico perpendicular al plano de las aletas produce ondas de agua que impulsan el vehículo hacia adelante. Este movimiento produce empuje en un solo sentido (Thomas et al., 2005, pp. 1-7).

Para tener una base en cuanto a implementación de los robots bioinspirados se tiene que tomar en cuenta la parte de la biología que posee un ser vivo, siendo algunos de los rasgos más importantes en cuanto a especies marinas subacuáticas su desplazamiento, aerodinámica y su flotabilidad, ya

que son características que los distinguen de otras especies (Rosero Galeano y Mazón Olivo, 2019, pp. 7-9).

Magneto hidrodinámico: El principio de funcionamiento de los impulsores magneto hidrodinámicos consiste en hacer circular corriente eléctrica por un fluido conductor (agua salada) el cual es atravesado por un campo magnético. El impulsor MHD genera el movimiento del fluido debido a la interacción del campo magnético y la corriente que circula a través de ella ventaja que presenta este tipo de sistema de propulsión es que no tiene partes móviles por tanto será más fácil resolver problemas de estanqueidad y mantenimiento. Sin embargo, la desventaja que presenta es que los electrodos reducen notablemente el rendimiento electromecánico, debido a su disolución y al desprendimiento de gases causados por la electrolisis de los materiales afectados (Moreno et al., 2014, pp. 3-5).

Tracción: La técnica del desplazamiento de un vehículo submarino por medio de la interacción con el fondo marino es similar a la técnica utilizada por los robots terrestres, con la diferencia que el peso del vehículo en el agua se puede neutralizar mediante la flotabilidad de este, y que en el agua hay fuerzas de fricción viscosa que son mucho mayores que en el aire (Moreno et al., 2014, pp. 3-5).

1.1.2. Robot Pez

Un Robot es un sistema electromecánico capaz de realizar tareas desagradables, etimológicamente la palabra robot proviene de la palabra checa robot, la cual tiene el significado de “trabajo forzado u obligatorio”.

La robótica se ha concretado en la emulación de diversos mecanismos y características propias de los seres vivos, bajo la presunción de que la evolución en la naturaleza ha llegado a un punto óptimo de desarrollo. Esta evolución ha permitido una adaptación al entorno de acuerdo con las necesidades específicas de cada especie. Los robots inspirados en organismos biológicos se elaboran para incorporar aspectos de la biomecánica animal que permiten mejorar sus características de agilidad, eficiencia y controlabilidad en una tarea específica.

Científicos de la Universidad de Cornell crearon un sistema circulatorio sintético que permite que un pez robot pueda nadar contra corriente durante más de media hora, el equipo liderado por el ingeniero y experto en robots blandos Robert Shepherd lo ha implementado en un equipo inspirado en un pez león como se observa en la Figura 2-1, pero aseguran que este mecanismo podría ser el futuro de robots más eficientes y autónomos en el futuro (Robotix, 2019, p.1).



Figura 2-1: Pez Robótico

Fuente: (Robotix, 2019, p.1)

1.1.2.1. Partes de un Robot pez

1) Cuerpo

El cuerpo comprende el material y la estructura del robot submarino como el ordenador abordo, el equipo eléctrico y electrónico como pueden ser los actuadores, controladores, convertidores de señales, sensores, tarjetas electrónicas, etc., y los elementos mecánicos como las alertas y los impulsores. El diseño del cuerpo está determinado por factores como la profundidad, temperatura, corrosión, volumen de componentes, factibilidad de construcción, facilidad de ensamblaje y costo (Lauder, 2000, p.104)

2) Aletas Artificiales

Cualquier aleta creada artificialmente necesita de una fuente de energía, un sistema de transmisión de fuerza, un sistema de mando o acción. En la elección de la aleta en la cual se inspira esta aleta artificial, desempeña un papel fundamental el nivel de complejidad de esta, los radios y la longitud que se requiera bio inspirar.

Las diferentes aletas, tienen diferentes funciones, que se complementan entre sí, el cuerpo más la aleta caudal son responsables de la propulsión y la dirección. Las aletas pectorales sirven para el movimiento de las pectorales, la aleta pélvica es extremadamente útil para equilibrar los peces para propulsión, dirección y remo (Lauder y Madden, 2007, pp. 560-563)

3) Mecanismos de Natación

Las aletas de los peces son dispositivos propulsores notables divididos en grupos como su modo de vida y morfología, en el origen de los peces hace unos 500 millones de años y han sido una característica clave de la diversificación evolutiva de los peces. La mayoría de las especies de peces poseen aletas medianas dorsal, anal y caudal, así como aletas pectorales y pélvicas emparejadas.

Las aletas de los peces están soportadas por elementos esqueléticos articulados, rayos de aletas, que a su vez soportan una membrana colágena delgada. Los músculos en la base de la aleta se unen y actúan sobre cada aleta y las aletas generan su propia estela hidrodinámica durante la locomoción, además del movimiento del fluido inducido por la ondulación del cuerpo.

En peces óseos, los rayos articulados de la aleta pueden deformarse activamente y la superficie de la aleta puede resistir activamente la carga hidrodinámica.

Las aletas de los peces son muy flexibles, exhiben una deformación considerable durante la locomoción y pueden interactuar hidrodinámicamente durante la propulsión y las maniobras (Lauder, 2000, p.103)

1.2. Cinemática de robots

“La cinemática del griego *kineo* que significa movimiento, se ocupa del movimiento de los cuerpos, sin tener en cuenta las causas que lo producen, es decir se limita a estudiar la trayectoria de un cuerpo en función del tiempo y el espacio, proporcionándonos una descripción matemática del mismo.”(Torres Vargas, 2012, pp. 20-34)

Tomando como referencia el modelo cinemático realizado en la investigación de un diseño de robot pez bio inspirado impulsado mediante aleta caudal con 1 GDL (Cabrera Aguayo et al., 2019, pp. 348-351), donde se desarrolló un modelo matemático tomando como referencia ciertos ángulos y parámetros del sistema para encontrar las posiciones y orientaciones deseadas de los elementos, el modelo matemático que se describe a continuación inicio con un planteamiento para obtener la posición final en base al movimiento de cada uno de los eslabones del prototipo, para luego obtener la cinemática diferencial directa del prototipo impulsado mediante la aleta caudal utilizando 1 GDL (Cabrera Aguayo et al., 2019, pp. 348-351)

$$\begin{aligned}x_1 &= l_1 \cos q_1 & \dot{x}_1 &= -l_1 \dot{q}_1 \sin q_1 \\y_1 &= l_1 \sin q_1 & \dot{y}_1 &= l_1 \dot{q}_1 \cos q_1\end{aligned}$$

$$\frac{\partial x_2}{\partial q_2} = -lc_2 \dot{q}_2 \sin(q_1 + q_2)$$

$$\frac{\partial y_2}{\partial q_2} = -lc_2 \dot{q}_2 \cos(q_1 + q_2)$$

$$J^2 v = \begin{bmatrix} -lc_1 \sin q_1 & -lc_2 \sin(q_1 + q_2) & -lc_2 \sin(q_1 + q_2) \\ lc_1 \cos q_1 & +lc_2 \cos(q_1 + q_2) & +lc_2 \cos(q_1 + q_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$M_1 J^1 v^T J^1 v$$

$$M_1 = \begin{bmatrix} -lc_1 \sin q_1 & lc_1 \cos q_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -lc_1 \sin q_1 & 0 \\ lc_1 \cos q_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$M_1 = \begin{bmatrix} M_1 lc_1^2 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$J^1 W^T R_1$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R^T J^1 W$$

$$\begin{bmatrix} c_1 & s_1 & 0 \\ -s_1 & c_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

1.2.1. Problemas de cinemática Directo

“Consiste en determinar la posición y orientación del extremo final del robot tomando como marco de referencia un punto localizado en la base de este.”(Torres Vargas, 2012, pp. 20-34)

1.2.2. Problemas de cinemática Inverso

“Resuelve la configuración que debe adoptar el robot para una posición y orientación conocidas del extremo de este.”(Torres Vargas, 2012, pp. 20-34)

1.3. Dinámica de robots

El movimiento en dos dimensiones son cuando el objeto se mueve horizontal y verticalmente. El movimiento de un objeto en dos dimensiones es su posición en el plano vertical u horizontal, o la dirección de otro plano. Hay dos variables que pueden cambiar, por eso se denominan movimiento bidimensional (De et al., 2010, pp. 70-80).

Tomando como referencia el modelo dinámico desarrollado en la investigación de un diseño de robot pez bio inspirado impulsado mediante aleta caudal con 1 GDL (Cabrera Aguayo et al., 2019, pp.

348-351). Donde utilizo la teoría alargada del cuerpo de gran amplitud y obtuvo un resultado en base al tratamiento de la fuerza de empuje del cuerpo y de la aleta impar, como se describe en las siguientes ecuaciones. (Cabrera Aguayo et al., 2019, pp. 348-351).

$$\tau = \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_i} \right] - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_i}$$

$$\tau_1 = m_1 l_1^2 \ddot{\theta} + m_1 g l_1 \cos \theta_1$$

1.4. Movimiento Bidimensional

El movimiento en dos dimensiones son cuando el objeto se mueve horizontal y verticalmente. El movimiento de un objeto en dos dimensiones es su posición en el plano vertical u horizontal, o la dirección de otro plano. Hay dos variables que pueden cambiar, por eso se denominan movimiento bidimensional (De et al., 2010, pp. 70-80).

1.5. Hidrostática

Es el estudio de los fluidos en estado de reposo que pertenece al campo de la mecánica de fluidos, llamada también hidráulica (Garbacz, Topolski y Motyka, 2019, pp. 174-183).

1.5.1. Principio de pascal

La presión ejercida sobre la superficie de un líquido contenido en un recipiente cerrado se transmite a todos los puntos de este con la misma intensidad (Beléndez y Beléndez, 2012, pp. 104-195).

1.5.2. Principio de Arquímedes

Es necesario iniciar analizando el principio de Arquímedes que manifiesta: “...Cualquier cuerpo total o parcialmente sumergido en un fluido es empujado hacia arriba por una fuerza que es igual al peso del fluido desplazado por el cuerpo (Ruiz y Garrido, 2018, pp. 104-195)

La fuerza que el fluido ejerce hacia arriba sobre el objeto sumergido se conoce como fuerza de flotación, donde la magnitud de la fuerza es igual al peso del fluido desplazado por el objeto. La fuerza de flotación actúa verticalmente hacia arriba a través del centro de gravedad del fluido desplazado, esta fuerza se puede representar matemáticamente como la fuerza de flotación igual a el peso específico del fluido por el volumen desplazado del fluido, en resumen, un objeto flota cuando su peso es menor o igual al peso del fluido desplazado (Ruiz y Garrido, 2018, pp. 104-195).

A continuación, se describe el estado en que se puede encontrar un cuerpo dentro del agua.

- 1. Cuerpo Sumergido que alcanza el fondo:** El cuerpo se desplazará hasta el fondo de un recipiente sí y solo sí la densidad del material del cuerpo sumergido es mayor a la densidad del fluido, esto quiere decir que, si el peso del cuerpo es mayor que el empuje, la resultante de las fuerzas estará dirigida hacia abajo y el cuerpo se hundirá.
- 2. Cuerpo en equilibrio:** Si el peso del cuerpo es igual al empuje, la resultante será nula y el cuerpo se mantendrá en equilibrio dentro del fluido.
- 3. Cuerpo que flota:** El cuerpo se mantendrá en la superficie del fluido sí y solo sí la densidad del fluido es mayor que la densidad del material del cuerpo sumergido.

En la figura 3-1 se puede observar los diferentes estados que un cuerpo puede encontrarse dentro del agua donde \vec{E} representa el vector de empuje, \vec{P} representa el vector de peso, d_s representa la densidad del cuerpo y d_L representa la densidad del líquido o fluido.

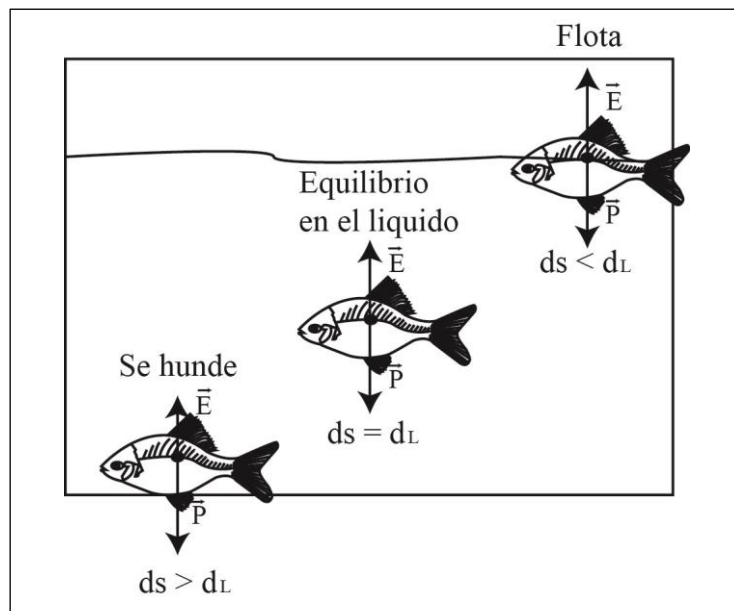


Figura 3-1: Estado de un cuerpo dentro de un líquido.

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

Un cuerpo en un fluido se considera que es estable si regresa a su posición inicial después de haber girado un poco alrededor del eje horizontal. La estabilidad tiene diferentes condiciones dependiendo de que tanto este o no sumergido el cuerpo.

En la figura 4-1 se observa los movimientos de los peces que son considerados inestables. Estos son: el giro que es la rotación sobre el eje longitudinal del pez, el cabeceo que es la rotación vertical y el ladeo que es la rotación horizontal del pez (Ruiz y Garrido, 2018, pp. 104-195).

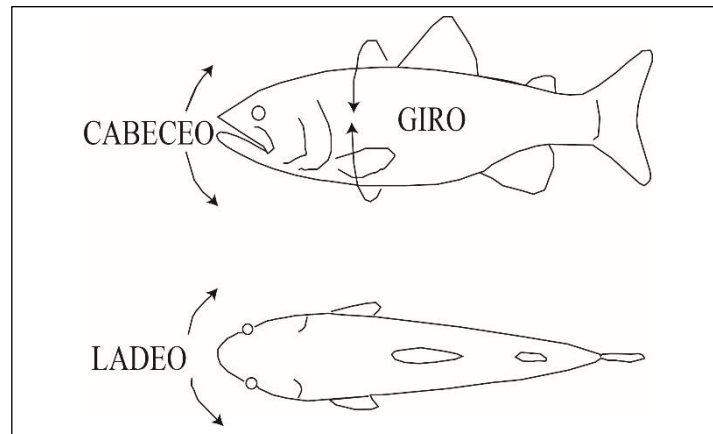


Figura 4-1: Pez robótico Principio de Arquímedes

Realizado Por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

1.6. Flotabilidad

La flotabilidad para la ciencia es una fuerza ascendente ejercida por un fluido que se opone al peso de un objeto sumergido denominada como la capacidad del cuerpo para permanecer en el líquido. La flotabilidad es positiva si el cuerpo tiende a elevarse en el líquido y, en cambio, se considera negativa si el cuerpo tiende a caer en el líquido en cuestión. Mientras tanto, si el cuerpo se suspende en el fluido se denomina flotabilidad neutral (Berenbrink, 2007, pp. 189-201).

1.6.1. Flotabilidad de los peces

Un grupo de Investigadores liderado por el Dr. Berenbrink investigó el mecanismo por el cual los peces pueden llenar la bolsa de natación con gas incluso bajo alta presión en el fondo del mar. Algunos peces no tienen vejiga natatoria, y otros simplemente la llenan tragando aire en la superficie del agua. Otro grupo de peces posee una vejiga natatoria cerrada que se infla a través de secreciones de gas aun cuando se hallan bajo fuertes presiones de agua como se observa en la figura 5-1.

El sistema conduce el oxígeno de la sangre hacia la vejiga permitiendo que el pez flote a diferentes niveles en el mar sin necesidad de acercarse a la superficie del agua en busca de oxígeno. Dicho mecanismo consiste en un sistema complejo de arterias, venas y una serie de proteínas sanguíneas especializadas que pueden liberar oxígeno incluso a altas concentraciones de gas (Berenbrink, 2007, pp. 189-201).

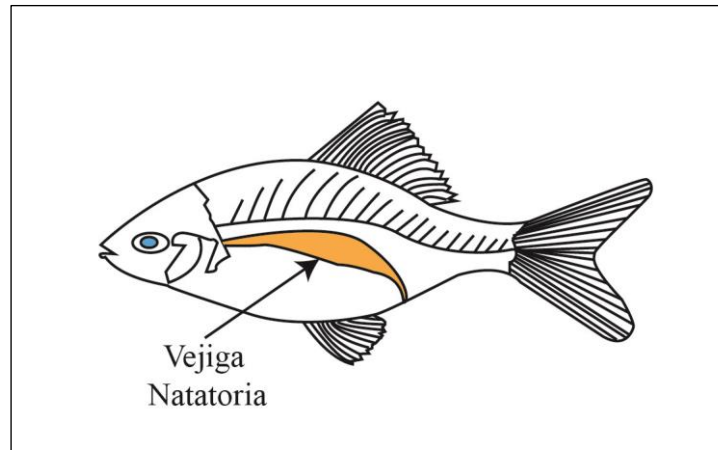


Figura 5-1: Alojamiento de la vejiga natatoria
Realizado Por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

1.7. Actuadores

Los actuadores basados en SMA pueden tener diferentes formas según su aplicación. Pueden ser rectos sometidos a tensión ejerciendo fuerzas grandes con pequeños movimientos lineales. Los elementos helicoidales de actuadores SMA tienen movimientos lineales grandes y fuerzas pequeñas o rotaciones grandes y pequeños pares. Las barras de torsión de actuadores SMA tienen rotaciones grandes y pares pequeños (Muñoz, 2009, pp. 5-33).

1.7.1. Actuadores basados en SMA

En aplicaciones como actuadores su función consiste en un cambio de forma al cambiar la temperatura. Este cambio de temperatura puede ser causado por cambio en la temperatura ambiente o calentado eléctricamente. En el primer caso, el actuador actúa como sensor y actuador mientras que en el segundo caso es sólo actuador eléctrico. Ambos actuadores combinan gran movimiento, pequeñas dimensiones y relativas altas fuerzas, por tanto, generan mucho trabajo (FLOR, 2005, pp.13-38)

1.7.1.1. Nitinol

El nitinol es un alambre hecho de una aleación entre níquel y titanio que presenta las características y propiedades de las aleaciones con memoria de forma (SMA), el término SMA es aplicado a un grupo de materiales metálicos que han demostrado la habilidad de retomar a una forma o tamaño preestablecidos mediante un adecuado procedimiento térmico y mecánico (Gilbertson, 2016, pp. 98-126).

Las ventajas de utilizar nitinol como actuador son: tamaño y peso reducidos. bajo consumo de potencia, control preciso, operación con AC o DC. larga vida y capacidad de soportar gran peso.

Como se observa en la figura 6-1 el nitinol se presenta en dos fases estables, una a alta temperatura, austenita, y otra a baja temperatura, martensita. Cuando se enfría, el Nitinol pasa de austenita a martensita. Si se calienta esta última tiene lugar la transformación inversa. Al hacer fuerza sobre la martensita se puede deformar y adoptar fácilmente otra estructura microscópica estable en la que permanece al cesar la fuerza (Gilbertson, 2016, pp. 98-126).

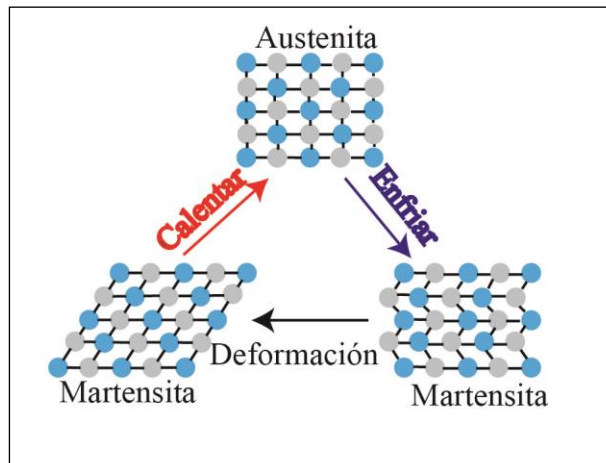


Figura 6-1: Distintas fases del Nitinol

Fuente:(Carrasco León, 2019, pp.12-16)

1.8. Sistemas electrónicos

Se los considerar como un conjunto de elementos finitos, en cuanto a conductores, transformadores y equipos necesarios para la distribución, transporte y generación de datos o energía eléctrica que son requeridos para cumplir desde funciones básicas hasta los más complejas en desarrollar (BARRERO GONZALEZ, 2004, pp. 2-17).

1.8.1. Utilidades de los Sistemas Electrónicos

Los sistemas eléctricos al referirse a la generación eléctrica o al transporte tanto de la misma energía como de datos, se los puede clasificar según su función para la cual fue diseñada ya que al diseñar sistema, se lo realiza de una manera concreta con elementos diseñados para cumplir solo con lo estipulado ya sea en cuando a soportar tiempos, potencia y energía, se lo puede ver desde sistemas de distribución macros como la generación eléctrica de una central, hasta lo micro que es una generación controlado con bajas potencias, podremos tener una clasificación en cuando a sistemas macros y micros.

1.8.2. Sistemas Eléctricos Macros

Son considerados como sistemas de potencia a gran escala diseñados para alimentar o abastecer a una ciudad o país entero siendo un conjunto de centrales generadoras, líneas de transmisión y sistemas de distribución que trabajan o se agrupan como un todo (Dolores y Cervantes, 1995, pp. 11-24).

1.8.3. Sistemas Eléctricos Micro Controlados

Los sistemas micro controlados se los relaciones con tarjetas de procesamiento ya que no generan energía eléctrica, caso contrario cumplen con el paso de datos o información para cumplir con instrucciones o pasos o seguir, mediante una lógica programada.

Estos sistemas pueden tener múltiples utilidades en cuanto al control de acciones, para lo cual se debe considerar o tomar en cuenta su aplicación y como este sistema debe estar distribuido o construido para que soporte las acciones aplicadas al mismo tanto en potencia, memoria y aplicabilidad en campo con el entorno a desarrollarse.

1.8.4. Sistemas electrónicos resistentes a inmersión al agua.

Existe en la Actualidad un rango moderado de sistemas de protección en cuanto a diversos circuitos los cuales se someterán a una determina exposición o inmersión acuática, se los puede considerar desde la protección en cableado y cuerpo del circuito mediante la técnica de la burbuja que es el encapsulamiento total del circuito hasta resinas tipo goma para la protección de ciertas partes o secciones del sistema.

1.9. Tarjetas de control.

Se considera como la interfaz física o sistema de control que nos permite trabajar con configuraciones, instrucciones y diversos tipos de lenguajes de programación para una futura implementación constando de entradas y salidas para entender su entorno y actuar según sea programado.

1.9.1. Arduino Mini

Arduino es una plataforma de creación electrónica de código abierto, la cual está basada en hardware por un microcontrolador principal llamado Atmel AVR de 8 bits encargado de realizar procesos lógicos y matemáticos dentro de la placa, además de controlar y gestionar los recursos

de cada uno de los componentes externos conectados a la misma, constando así de una amplia variedad de sensores eléctricos, no solo son componentes eléctricos, sino que también software libre, flexible y fácil. Combinada con un lenguaje de programación que sirve para controlar los distintos sensores que se encuentran conectados a la placa, por medio de instrucciones y parámetros que se establecen al conectar la placa a un ordenador.

El lenguaje que opera dentro de Arduino se llama *Wirring*, basado en la plataforma *Processing* y primordialmente en el lenguaje de C/C++ (Badamasi, 2014, pp. 1-4).

1.10. Resistencia Pull up y pull down

Son resistencias que están dispuestas en un circuito de una manera determinada las cuales establecen un estado lógico en un pin o entrada de un circuito lógico cuando se encuentra en estado de reposo, como se observa en la figura 7-1. La resistencia *pull up* establece un estado *HIGH* (Alto) y la resistencia *pull down* establece un estado *LOW* (Bajo) cuando el pin se encuentra en reposo. La finalidad de estos circuitos es evitar los falsos estados que se producen por el ruido generado por los circuitos electrónicos. (Luis del Valle Hernández, 2019, p.1)

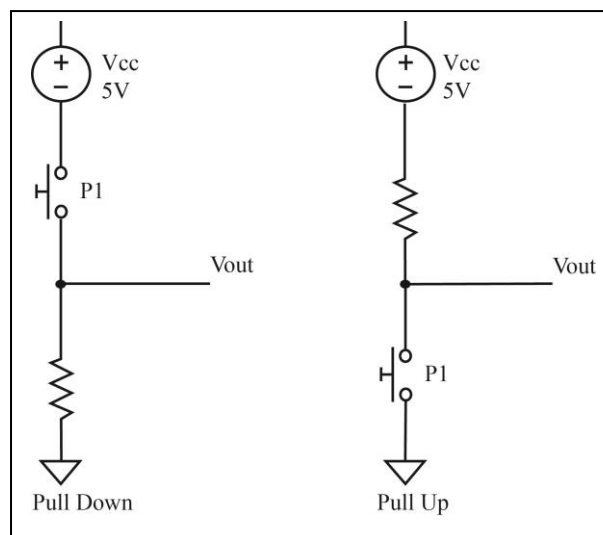


Figura 7-1: Circuito Pull Down y Pull Up

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

1.11. Sensores

Es un dispositivo que detecta una determinada acción externa, temperatura, presión etc., y la transmite adecuadamente. En el caso de los sensores electrónicos, la forma de transmitir esa detección es mediante variables eléctricas, encargados de proveer la información tanto del entorno como del robot mismo (Álvarez et al., 2009).

1.11.1. Tipos de sensores

El diseño de robots es el estudio de su funcionamiento y de su interacción con el entorno, para de esta manera poder dotar de la capacidad de realizar pequeñas tareas de forma independiente a través de sensores, que transmitan información a partir de la cual puedan conocer su entorno y llevar a cabo múltiples funciones.

1.11.1.1. 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. (Álvarez et al., 2009, pp. 93-99)

1.11.1.2. 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 (Álvarez et al., 2009, pp. 93-99).

1.11.1.3. 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. (Álvarez et al., 2009, pp. 93-99)

1.12. Software

Conjunto de programas, instrucciones y reglas informáticas para ejecutar ciertas tareas en una computadora.

1.12.1. SolidWorks

SolidWorks es un software de diseño y modelado mecánico en 3D, desarrollado por SolidWorks Corp., una *filial de Dassault Systèmes*, S.A. (Francia). Se trata de un software CAD (diseño asistido por computadora) para el sistema operativo Microsoft Windows.

El programa permite modelar piezas y conjuntos además de extraer los planos técnicos como diferente tipo de información necesaria para la producción. Otra herramienta interesante que incorpora SolidWorks, y que es muy útil para nuestro proyecto, es la posibilidad de generar documentos STL, los cuales son los empleados habitualmente para la impresión 3D. Además de estas ventajas, hay otra muy importante, y es que existe una gran cantidad de documentos y tutoriales en internet, tanto del propio desarrollador como de personas ajenas a él, lo cual resulta de mucha ayuda a la hora de realizar el diseño (Systemes, 2002, p.1). En la figura 8-1 se observa la pantalla de diseño del software SolidWorks.

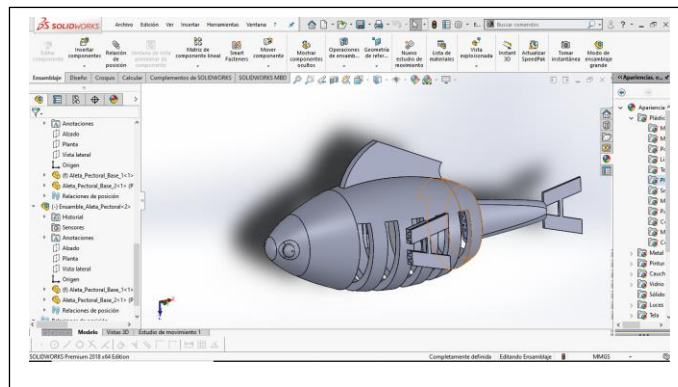


Figura 8-1: Diseño en SolidWorks del prototipo Bioinspirado

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

1.12.2. LabVIEW

Es una herramienta de programación gráfica. Originalmente este programa estaba orientado para aplicaciones de control de equipos usados en el desarrollo de sistemas de instrumentación, lo que se conoce como instrumento virtual. Por este motivo los programas creados en LabVIEW se guardarán en ficheros llamados VI (*Virtual Instrument*), y con la misma extensión.

En el Software de National Instruments LabVIEW, para poder configurar y programar una tarjeta Arduino, debemos haber cargado de antemano el FIRMWARE llamado LIFA Base, el cual nos ayudará con la comunicación serial entre LabVIEW y Arduino. El modo de programación que se utiliza en LabVIEW es mediante bloques, los cuales con la ayuda de VI Package, logramos instalar los diferentes bloques para programar la tarjeta Arduino (Vizcaíno y Sebastián, 2011, pp. 5-25). En la figura 9-1 se observa la pantalla de programación del software LabVIEW.

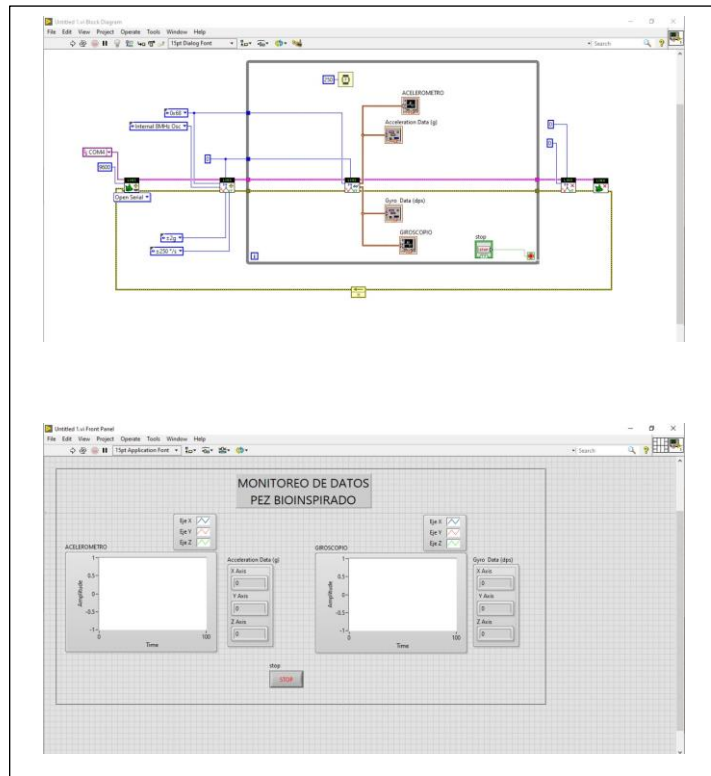


Figura 9-1: Programación en LabVIEW

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

1.12.3. Arduino

Arduino es una plataforma de electrónica de código abierto basada en hardware y software fácil de usar, pensado para que cualquier persona que desee, pueda crear proyectos sin necesidad de la elaboración de PCBs complejas y permitiendo el prototipado rápido de la solución deseada. Esta plataforma está fundamentada en la combinación de dos soluciones diferentes. Por un lado, tenemos el hardware, el cual está basado en diferentes placas de desarrollo de muy bajo coste basadas en microcontroladores ATMEGA328p. Estos son una familia de microcontroladores RISC de 8 bits de la empresa ATMEL con arquitectura Harvard, siendo el principal competidor de los PIC de 8 bits. Por otro lado, existe un IDE (*Integrated Development Enviroment*) gratuito que, mediante el uso de librerías de funciones muy sencillas, permite el desarrollo de software en C para estos microcontroladores. Por tanto, dada la facilidad de acceso tanto al hardware como al software necesario, Arduino se ha empleado en multitud de proyectos electrónicos tanto a nivel aficionado o de estudiantes como en complejos instrumentos científicos. Su gran difusión y el hecho de ser de código abierto han resultado en una gran comunidad mundial de desarrolladores y su uso en multitud de proyectos diferentes. Por tanto, es muy fácil encontrar soluciones a los posibles errores que se puedan encontrar, lo cual facilita mucho el aprendizaje tanto de electrónica

como de programación («Arduino - Home», 2021,p.1). En la figura 10-1 se observa la pantalla de programación del software Arduino.

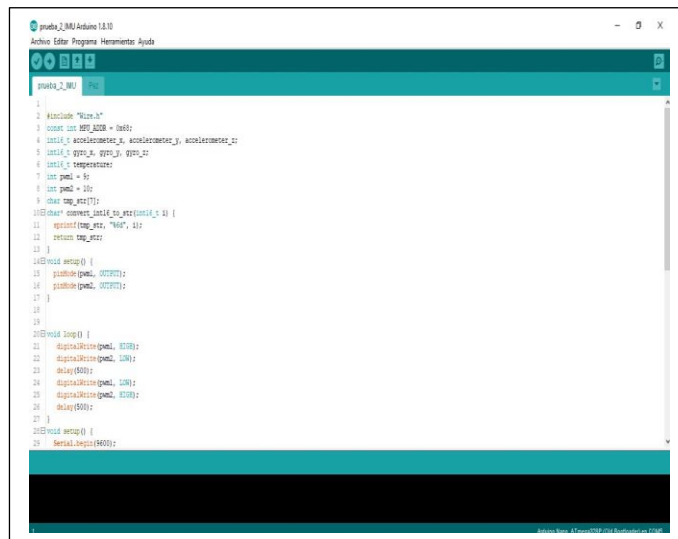


Figura 10-1: Programación en Arduino del prototipo Bioinspirado.

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

1.12.4. Software Fritzing

El software está basado en la programación visual para el diseño de electrónica basada en pantalla. Apoya a los diseñadores y artistas de artefactos electrónicos a través de esta barrera de creación de prototipos, permitiendo que el usuario documente su prototipo funcional basado en una placa de prueba con una metáfora visual que imita la situación del mundo real del usuario a su vez cuenta con la opción de convertir el circuito diseñado en una PCB profesional. (Villar y ACM Digital Library, 2009, pp. 351-356). En la figura 11-1 se observa la pantalla de diseño del *software Fritzing*.

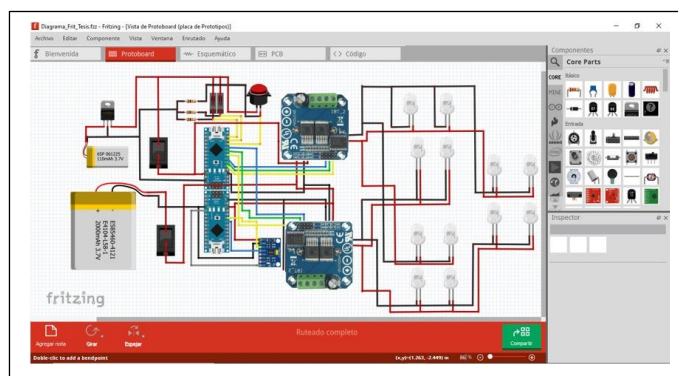


Figura 11-1: Pantalla de programación de *software Fritzing*.

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

CAPÍTULO II

2. PROPUESTA Y DISEÑO DE PROTOTIPO

En el presente capítulo se detalla los requerimientos aplicados para el diseño del prototipo del robot subacuático bioinspirado utilizando actuadores basados en metales con memoria de forma, sus componentes, el hardware y el software necesarios para su implementación. Se especifica cada uno de los componentes utilizados, sus características y los esquemas electrónicos implementados.

2.1. Requerimientos del prototipo

Mediante el análisis del estado del arte del robot subacuático bioinspirado en peces se determina que el prototipo debe satisfacer con los siguientes requerimientos.

- El prototipo debe gozar de una buena autonomía.
- Capacidad energética para completar una trayectoria
- El prototipo debe incorporar un Sistema de Navegación Inercial.
- Disponer de un sistema de control.
- Disponer de un sistema de transmisión de datos.
- De un material resistente al clima subacuáticos.
- Ser de bajo costo.
- Disponer de estabilidad y flotabilidad.
- El prototipo debe tener un correcto funcionamiento de los actuadores basados en metales de memoria de forma.

2.2. Concepción general del prototipo bioinspirado

El esquema general del prototipo se presenta en la figura 1-2 , en el cual observa las 5 etapas que lo conforman, primero la estructura, la cual conforma el diseño mecánico y la parte de selección de los componentes, la segunda es la estabilidad, la cual se lleva a cabo por el movimiento de la aleta pectoral, la tercera etapa es la propulsión, en la cual la aleta caudal es la responsable, la cuarta es la electrónica , en esta etapa se encuentran todos los componentes de control, alimentación, y sensado que permiten que el prototipo se convierta en un robot bioinspirado. Para finalizar la quinta etapa, los actuadores, los cuales son elementos no convencionales que están

basados en metales de memoria de forma, controlados por un diseño electrónico, lo que permiten el movimiento de las diferentes aletas logrando estabilidad y propulsión del prototipo.

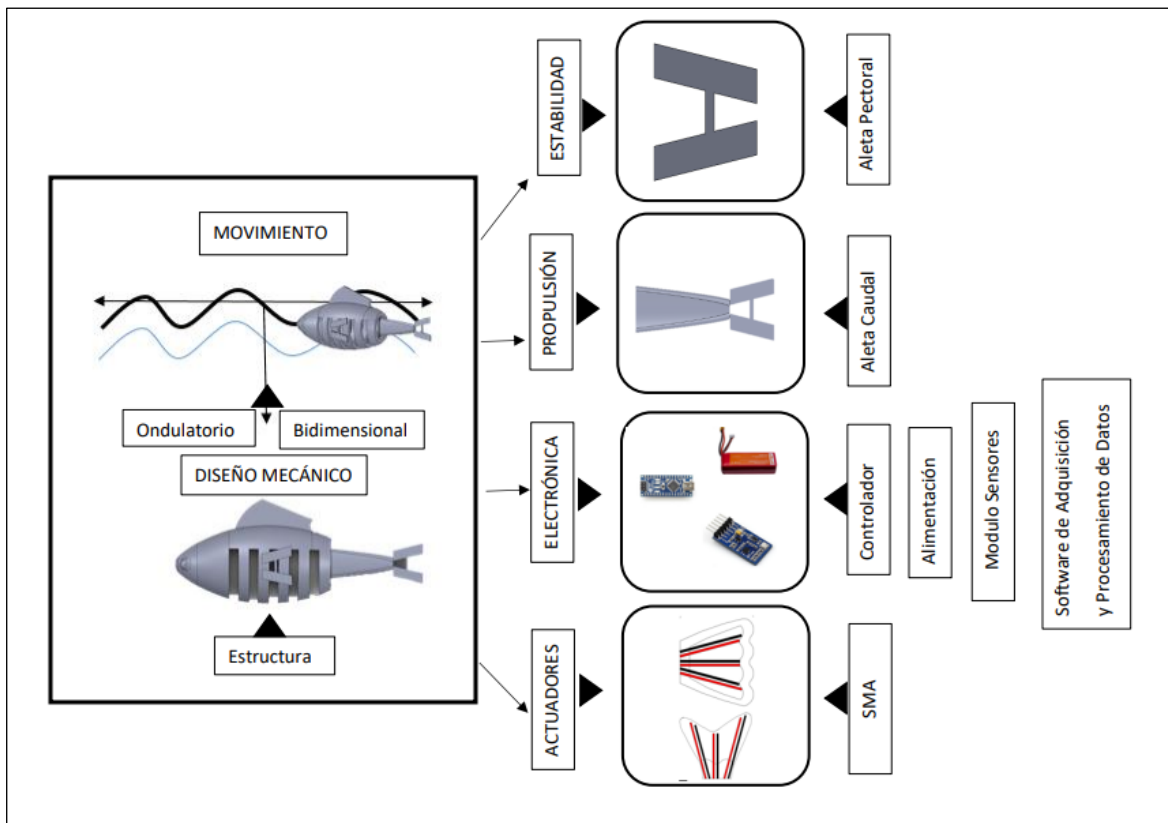


Figura 1-2: Esquema general del robot subacuático bioinspirado

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

2.3. Diseño de la arquitectura del robot subacuático bioinspirado

En este apartado se detalla la arquitectura del prototipo bioinspirado mediante un diagrama de bloques, como se observa en la figura 2-2, el bloque de usuario es aquel quien define y supervisa la tarea que debe realizar el robot bioinspirado, el bloque robot bioinspirado está constituido por un diseño bioinspirado que es parte del *hardware* y *software* del sistema, que a su vez consta del bloque sensor, el cual lo conforma el elemento sensor IMU 6050 que percibe la señal del ambiente permitiendo saber el posicionamiento del robot bioinspirado y la convierte en información que el controlador la puede leer, el bloque controlador está compuesto por un microprocesador programable en la cual se realiza el control del sistema, el bloque de actuadores está constituido por metales con memoria de forma los cuales tienen un diseño acorde con el funcionamiento del sistema y por último el bloque de alimentación que está constituido por una batería lipo que se encargará de alimentar el sistema de control y una fuente de 12Vcc que alimentara el funcionamiento de los actuadores.

2.4. Descripción de los elementos *hardware* del sistema.

En este apartado se describe cada uno de los componentes utilizados para la implementación del *hardware* del robot subacuático bioinspirado utilizando actuadores basados en metales de memoria de forma.

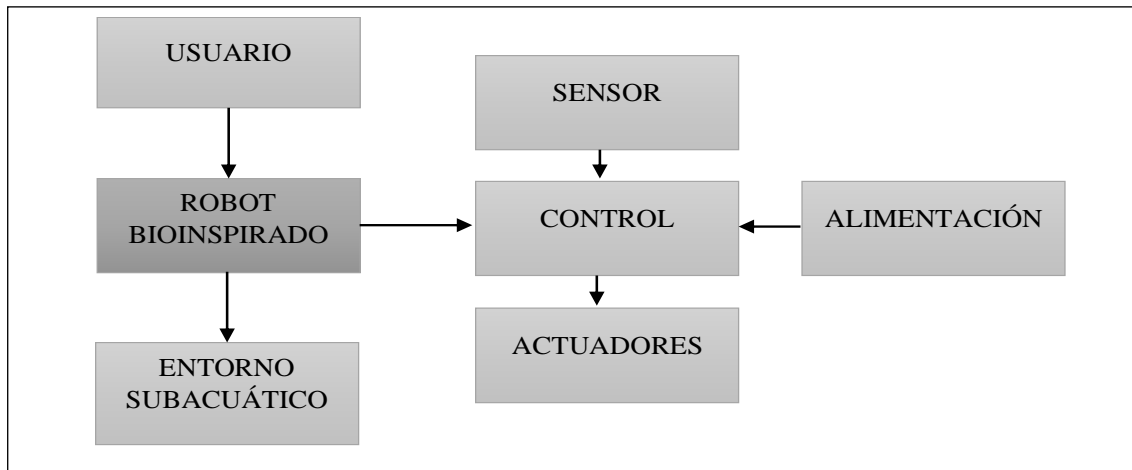


Figura 2-2: Diagrama de bloques de la arquitectura del prototipo

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

2.4.1. Elementos y componentes del diseño electrónico

2.4.1.1. Arduino nano

Arduino Nano es una placa pequeña, completa y compatible con placas de pruebas basada en ATmega328 (Arduino Nano 3.0) o ATmega168 (Arduino Nano 2. x).(Issac, 2020,p.1)

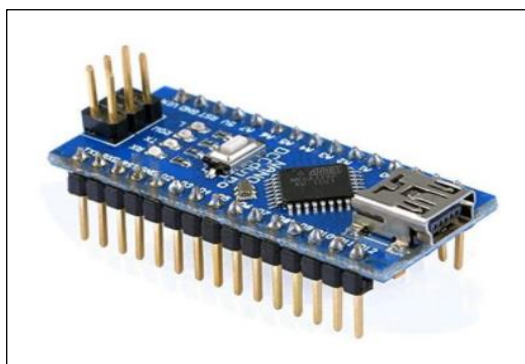


Figura 3-2: Arduino nano

Fuente:(Issac, 2020, p.1)

Las características del Arduino nano se detallan en la tabla 1-2, como podemos ver a continuación.

Tabla 1-2: Características de Arduino nano.

Características	Descripción
Microcontrolador	Arduino ATmega 328P
Arquitectura	AVR
Voltaje de operación	5V
Voltaje de entrada	7-12 V
Velocidad de Reloj	16MHz
Pines de E/S analógicos	8
Pines de E/S digitales	22
Salida PWM	6
EEPROM	1KB
Consumo de energía	19 mA
Peso	7g
SRAM	2KB

Fuente:(Issac, 2020, p.1)

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

2.4.1.2. Unidad de medición inercial IMU 6050

Es la unidad de medición inercial o IMU (*Inertial Measurement Units*) de 6 grados de libertad (*DoF*) pues combina un acelerómetro de 3 ejes y un giroscopio de 3 ejes. Este sensor es muy utilizado en navegación, goniometría, estabilización, etc. (Issac, 2020,p.1)

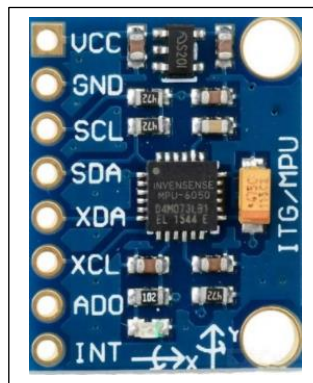


Figura 4-2: Unidad de medición inercial IMU 6050

Fuente:(Issac, 2020,p.1)

Este IMU 6050 puede saber cómo está posicionado el objeto que lo contiene para usarlo en aplicaciones de navegación, goniometría, estabilización, control por gestos, etc. Los teléfonos móviles suelen incluir este tipo de sensores para, por ejemplo, controlar ciertas funciones mediante gestos, como parar si se le da la vuelta al smartphone, conducir vehículos en videojuegos girando el móvil como si fuese un volante, etc.(Araluce Ruiz, 2018, p. 27)

Tabla 2-2: Características de la IMU 6050.

Características	Descripción
Rangos FS giróscopos	$\pm 250, \pm 500, \pm 1000, \pm 2000$ o/s
Rangos FS acelerómetros	$\pm 2, \pm 4, \pm 6, \pm 8, \pm 16$ g
Rango de tensión de entrada	2.375 a 3.46 V

Fuente:(Issac, 2020,p.1)

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

Tabla 3-2: Combinaciones entre sensor IMU y Arduino.

Combinación entre Arduino y el IMU 6050	
VCC	5V
GND	GND
SCL	A5
SDA	A4

Fuente:(Issac, 2020,p.1)

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

2.4.1.3. Modulo Drive IBT2

Este módulo está basado en chips BTN7960B / BTS7960B. El módulo está diseñado para motores de CC de alta potencia y unidades de solenoides. La interconexión de este controlador de alta corriente con Arduino, PIC y AVR es extremadamente fácil. Este módulo de controlador le permite controlar un motor de CC con una corriente tan alta como 43 A. La frecuencia máxima de operación es de hasta 25 kHz.(Araluce Ruiz, 2018, p.49)

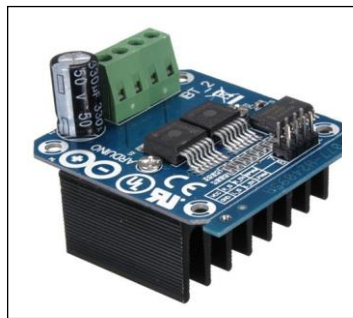


Figura 5-2: Modulo Drive IBT2

Fuente:(Araluce Ruiz, 2018, p.49)

Tabla 4-2: Características del Módulo Drive IBT2

Características	Descripción
Estructura de chip dual BTN7960B / BTS7960	(corriente máxima 43A)
Controlador de memoria	intermedia 74HC244 para un mejor aislamiento.
Conexión de 5 hilos de MCU al módulo	GND, 5V, IN1, IN2, EN

Voltaje de funcionamiento	DC 8 ~ 24V
Entrada máxima de frecuencia	25 kHz
Tamaño	46 mm (L) x 46 mm (W)
Altura máxima total	38 mm (incluido el disipador térmico, el condensador y las alturas de los conectores)
Especificaciones técnicas	
Chip de controlador	BTN7960B / BTS7960B
Rango de tensión de funcionamiento	5,5 a 28 V
Corriente máxima de carga	43 A
Resistencia de trayectoria combinada para lados alto y bajo	16mOhm (típico) y 30.3mOhm (peor a 150C)
Tipo de motor	motor de corriente continua
Tamaño de la tarjeta	4 * 5 * 1.2 cm

Fuente:(Araluce Ruiz, 2018, p.49)

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

2.4.1.4. Regulador L7805

Los reguladores de la serie L78xx consta de tres terminales positivos, que permiten eliminar problemas de distribución asociados con la regulación en un solo punto ya que proporcionan tarjetas locales de regulación. Emplea limitación de corriente interna, apagado térmico y protección de área segura, por lo que es básicamente indestructible. El regulador L7805 se puede utilizar con componentes externos para obtener voltaje y corriente variable.(By ALLDATASHEETCOM, 2013,p.1)

Tabla 5-2: Características del regulador de voltaje L7805

Símbolo	Parámetro	Condiciones de prueba	Min.	Máx.	Unidad
V_o	Tensión de salida	$T_J=25^{\circ}\text{C}$	4.8	5.2	V
V_o	Tensión de salida	$I_o = 5 \text{ mA a } 1 \text{ A}$ $V_i = 8 \text{ a } 20\text{V}$	4.65	5.35	V
$\Delta V_o^{(1)}$	Regulación de línea	$V_i = 7 \text{ a } 12 \text{ V}$ $T_J=25^{\circ}\text{C}$	-	50	mV
		$V_i = 8 \text{ a } 25 \text{ V}$ $T_J=25^{\circ}\text{C}$	-	25	mV
$\Delta V_o^{(1)}$	Regulación de carga	$I_o = 5 \text{ mA a } 1.5 \text{ A}$ $T_J=25^{\circ}\text{C}$	-	100	mA
		$I_o = 250 \text{ a } 750 \text{ mA}$ $T_J=25^{\circ}\text{C}$	-	25	mA
I_d	Corriente de reposo	$T_J=25^{\circ}\text{C}$	-	6	mA
ΔI_d	Cambio de corriente de reposo	$I_o = 5 \text{ mA a } 1 \text{ A}$	-	0.5	mA

		$V_I = 8 A \ 25 V$	-	0.8	mA
$\Delta V_o / \Delta T$	Deriva del voltaje de salida	$I_o = 5 mA$	-	-	mV/°C
eN	Voltaje de ruido de salida	$B = 10Hz \ a \ 100kHz$ $T_{J=25^\circ C}$	-	40	$\mu V / V_o$
SVR	Rechazo de tensión de alimentación	$V_I = 8 \ a \ 18 V,$ $f = 120Hz$	68	-	dB
V_d	Voltaje de caída	$I_o = 1 A,$ $T_{J=25^\circ C}$	-	2.5	V
R_o	Resistencia de salida	$f = 1 kHz$	-	-	m Ω
I_{sc}	Corriente de cortocircuito	$V_I = 35 V$ $T_{J=25^\circ C}$	-	1.2	A
I_{scp}	Corriente máxima de cortocircuito	$T_{J=25^\circ C}$	1.3	3.3	A

Fuente:(By ALLDATASHEETCOM, 2013,p.18)

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

2.4.1.5. Batería Lipo Turnigy Nano -tech 3.7 V, 300 Mah

Las baterías de nanotecnología *TURNIGY* fueron diseñadas desde cero con un rendimiento serio en mente. Utilizando un sustrato avanzado de nanotecnología LiCo que permite que los electrones pasen más libremente del ánodo al cátodo con menos impedancia interna. En breve; menor caída de voltaje y una tasa de descarga más alta que las baterías de polímero de litio de densidad similar (*no nano-tech*) (ROCHE VACACELA, 2019,p.72).

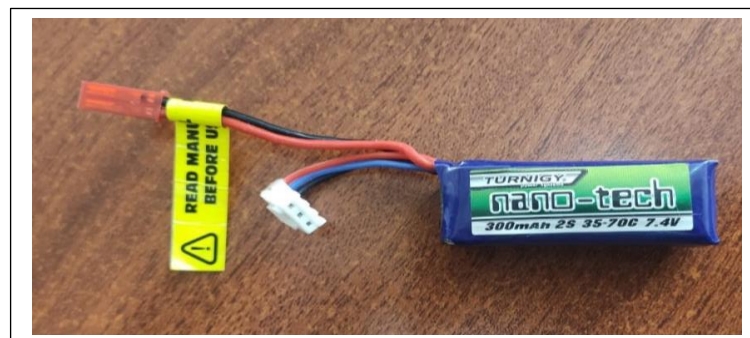


Figura 6-2: Batería Lipo Turnigy Nano -tech 3.7 V, 300 Mah

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

A continuación, detallaremos las características de la batería Lipo Turnigy Nano -tech 3.7 V, 300 Mah en la tabla 6-2.

Tabla 6-2: Características de la batería Lipo Turnigy Nano -tech 3.7 V, 300 Mah.

Características	Descripción
Celdas	1
Voltaje	3.7 V
Capacidad	300 mAh
Velocidad de descarga	45C-90C
Conector de carga	Molex de 2 pines
Dimensión	43 x 17 x 6 mm
Peso	19.5 g

Fuente: (ROCHE VACACELA, 2019,p.72)

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

2.4.1.6. Batería Lipo Tattu 650 mah 4s 75C

Para poder mover el motor y, con él, el mecanismo, necesitamos una fuente de energía que serán las baterías. Para nuestro diseño, y comúnmente en otros UAVs, se ha utilizado una batería LiPo, una batería de polímeros de litio formada por varias celdas, cada una de las cuales posee un voltaje máximo de 3,7V o 4,2V. En concreto, para que cumpla con los requisitos del ornitóptero, se ha seleccionado un LiPo de 7,4V y 650mAh. (Kapp y Smit, 2019, p.87).



Figura 7-2: Batería Lipo Tattu 650 mah 4s 75C

Fuente:(Kapp y Smit, 2019, p.87).

Tabla 7-2: Características de la Batería Lipo Tattu 650 mah 4s 75C.

Características	Descripción
SKU	TA-75C-650-4S1P
Peso neto (g)	74
Capacidad	650 mAh
Tasa de descarga (C)	75
Corriente continua máxima (A)	48.75
Corriente máxima de explosión (A)	97.5

Tasa máxima de descarga de ráfaga (C)	150
Paralelo (P)	1
Voltaje	4S (14.8V)
Longitud (mm)	60
Ancho (mm)	31
Espesor (mm)	21
Calibre del cable	16#
Longitud del cable (C / D)	35mm/65mm
tipo de conector	XT-30
Tipo de conector del equilibrador	JST-XHR

Fuente: (Kapp y Smit, 2019, p.87).

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

2.4.1.7. Fuente de alimentación de 12V a 10a

Es un dispositivo electrónico comúnmente llamado fuente d alimentación, fuente de poder o fuente conmutada. En electrónica se define como el instrumento que transforma corriente alterna en corriente continua en una o varias salidas.

Fuente conmutada 12V 10A permite transformar la energía eléctrica de Vca a Vcc puede alimentar a diferentes dispositivos electrónicos, por ejemplo: motor de CC, leds de potencia, tira de leds, cámaras de CCTV, Módulos PWM, tarjetas o módulos Arduino, sensores, actuadores, amplificadores, circuitos integrados, etc(Sánchez et al. , 2013,p.1).



Figura 8-2: Fuente de alimentación de 12V a 10 A

Fuente :(Sánchez et al., 2013, p.1)

A continuación, podemos observar en la tabla 8-2, las diferentes especificaciones y características de la fuente de alimentación.

Tabla 8-2: Fuente de alimentación de 12V a 10 A .

Características	Descripción
Fabricante	JOYLAND
Peso del producto	15.7 onzas
Dimensiones del producto	7.9 x 4 x 1.68 pulgadas
País de origen	China
Material	Hierro
Voltaje de salida	12V DC
Corriente Max.	10A DC
Potencia Nominal	120W
Rizado y ruido	120mV P-P
Tiempo de activación	20 ms/230VAC
Voltaje de entrada	AC 100-120 V, AC 200-240 V, 50Hz/60Hz
Patrón	120W
Forma	Cuadrado
Fuente de energía	DC
Potencia máxima	120 Vatios
Rango de temperatura	-20-60 Grados Celsius

Fuente : (Sánchez et al., 2013, p.1)

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

2.4.2. Elementos y componentes del diseño mecánico.

2.4.2.1. Filamento PLA plus.

El *ácido poli láctico*, es el poliéster alifático biodegradable más investigado y utilizado en la historia de la humanidad. El propósito principal de esta revisión es elaborar las propiedades mecánicas y físicas que afectan su estabilidad, procesabilidad, degradación, inmiscibilidad de PLA-otros polímeros, envejecimiento y reciclabilidad y, por lo tanto, su potencial idoneidad para cumplir con los requisitos específicos de la aplicación.

En la impresión 3D, el *ácido poli láctico* es el mejor, aunque a menudo es comparado con el ABS (Acrilonitrilo butadieno estireno), que es el otro tipo de filamento comúnmente usado. El PLA es de uso sencillo, se imprime a baja temperatura, no se deforma fácilmente, por lo que una plataforma precalentada no es necesaria, no despiden mal olor durante la impresión y es un termoplástico biodegradable, ya que se fabrica con almidón de maíz o caña de azúcar. (Farah, Anderson y Langer, 2016, p.28)



Figura 9-2: Filamento PLA

Fuente: (Farah, Anderson y Langer, 2016, p.28)

A continuación, se detallan en la tabla 9-2. algunas de las propiedades físicas del PLA.

Tabla 9-2: Propiedades Físicas del PLA

Características			Descripción
ρ	Densidad	(g/cm ³)	1.21–1.25
σ	Resistencia a la tracción	(MPa)	21–60
E	Módulo de tracción	(GPa)	0.35–3.5
ϵ	Deformación Máxima	(%)	2.5–6
σ^*	Tracción específica fuerza	(Nm/g)	16.8–48.0
E *	Tracción específica módulo	(kNm/g)	0.28–2.80
Tg	Transición vítrea temperatura	(°C)	45–60
Tm	Derritiendo temperatura	(°C)	150–162

Fuente: (Farah, Anderson y Langer, 2016, p.28)

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

El PLA ofrece una buena resistencia a la tracción y calidad superficial, facilita el trabajo a altas velocidades de impresión, simplifica el uso en entornos domésticos y de oficina y permite la creación de piezas de alta resolución, a continuación, se detallarán las propiedades mecánicas del filamento PLA.

Tabla 10-2: Propiedades mecánicas del PLA

Características	Descripción
Módulo de elasticidad a la tracción	2346,5 MPa
Esfuerzo de tracción a la deformación	49,5 MPa
Esfuerzo de tracción a la rotura	45,6 MPa
Alargamiento a la deformación	3,3 %
Alargamiento a la rotura	5,2 %
Resistencia a la flexión	103,0 MPa

Módulo de flexión	3150,0 MPa
Resistencia a la prueba de impacto Izod, con mella (a 23 °C)	5,1 kJ/m ²
Dureza	83 (Shore D)

Fuente:(Ultimaker, 2017, p.12)

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

2.4.2.2. Filamento TPU

Poliuretano termoplástico es un termoplástico flexible y resistente a la abrasión. Se utiliza en los procesos de fabricación para el consumo y la industria puede llegar a ser muy blando, pero el material TPU ofrece diferentes beneficios y características, es resistente a la abrasión puede soportar impactos y es resistente a productos químicos (Holweistrat, 2020, p.8) .



Figura 10-2: Filamento TPU

Fuente:(Holweistrat, 2020, p.8) .

El filamento de TPU tiene una serie de características que lo convierten en una gran elección para una alta gama de usos como podemos ver en la Tabla 11-2.

Tabla 11-2: Especificaciones del filamento de TPU

Características	Descripción
Durabilidad	Alto
Fuerza	Alto
Flexibilidad	Alto
Resistencia a la abrasión	Alto
Resistencia química	Medio Alto
Resistencia al agua	Medio
La temperature de la boquilla	220 – 250 °C
Cama calefactada	Hasta 60 °C

Fuente:(Holweistrat, 2020, p.8) .

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

2.4.2.3. Silicona antihongos

La Silicona antihongos se solidifica rápidamente para formar un material de sellado flexible y duraderos con una fuerte resistencia a la tensión climática al exponerse al aire.

Es un sellador que proporciona una buena resistencia a la intemperie en la mayoría de las diferentes aplicaciones. (Manuel, 2013, p.1)



Figura 11-2: Silicona antihongos

Fuente: (Manuel, 2013, p.1)

Tabla 12-2: Propiedades Físicas de la silicona antihongos.

Antes del curado	
Características	Descripción
Gravedad específica (g/cm ³)	Alrededor de 0,97
Fluyendo (mm)	Alrededor de 0
La tasa de extracción (g/min)	Alrededor de 260
El curado	
Tiempo de secado de la superficie (min)	Acerca de ≤10
La tasa de curación	Acerca de 3mm/día Acerca de 9 mm/7 días
Temperatura de Aplicación °C	+5 a +40 °C
Después del curado	
Dureza	Alrededor de 21
Tasa de recuperación elástica	Aproximadamente el 95%
Capacidad de desplazamiento de la interfaz	Alrededor de 20
La temperatura de trabajo °C	-30 A +120

Fuente: (Manuel, 2013, p.1)

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

2.4.2.4. Metal de memoria de forma SMA Nitinol de 1mm

Nitinol: Se trata de una aleación de níquel y titanio de proporciones casi *equimolecular*, que tiene propiedades de memoria de forma excelentes. Esta aleación particular, tiene además muy buenas propiedades eléctricas y mecánicas, resistencia a la fatiga, y resistencia a la corrosión.



Figura 12-2: Nitinol de 1 mm

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

El NiTi presenta todas las propiedades típicas en las aleaciones con memoria de forma o SMA:

- Transformación martensítica termo elástica.
- Memoria de forma simple.
- Memoria de forma doble.
- Superelasticidad.
- Pseudoelasticidad.
- Capacidad de amortiguamiento.

El estado por el cual estos materiales recuperan su forma es resultado de la transformación de fase sólida-sólida entre dos estructuras materiales, es decir, la austenita y la martensita.

Tabla 13-2: Propiedades Mecánicas de las aleaciones memoria de forma SMA

Características	Descripción
Deformaciones recuperables (%)	8
Módulo de elasticidad (MPa)	8,7*10 ⁴ (A); 1,4*10 ⁴ (M)
Resistencia a la cedencia (MPa)	200-700 (A); 70-140 (M)
Resistencia última a tracción (MPa)	900 (f.a); 2000 (w.h)
Elongación a rotura (%)	24-50 (f.a); 5-10 (w.h.)
Resistencia a la corrosión	Excelente

Fuente: (FLOR ,2005, p.29)

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

2.4.2.5. Impresora 3D

Es una forma de tecnología de fabricación aditiva donde un objeto tridimensional es creado mediante sucesivas capas de material. También se conoce como creación rápida de un prototipo. La manufactura por capas o impresión 3D comprende un conjunto de tecnologías de alto grado de automatización y flexibilidad que permiten la obtención de piezas sólidas a partir de modelos o prototipos virtuales creados con casi cualquiera de los programas CAD de modelamiento tridimensional disponibles en el mercado, en tiempo relativamente corto, bajo consumo de energía eléctrica y contaminación casi nula. (Marin Moncada, Marin Moncada y Valdivieso Armendariz, 2014, p.6)



Figura 13-2: Impresión en 3D del robot pez bioinspirado.

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

Tabla 14-2: Características de la impresora 3D.

Características	Descripción
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.

Fuente: (Marin Moncada, Marin Moncada y Valdivieso Armendariz, 2014, p.6)

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

2.5. Diseño mecánico y ensamblaje de las piezas del prototipo bioinspirado

Las diferentes piezas y el ensamblaje del prototipo bioinspirado se diseñó en el software SolidWorks 2020. Para el diseño se tomaron en cuenta varios aspectos, tales como: peso, estabilidad, flotabilidad, volumen y forma de las diferentes aletas en conjunto con el cuerpo.

2.5.1. Diseño del cuerpo

El diseño del cuerpo fue inspirado en un pez común, buscando lograr un cuerpo hidrodinámico de forma fusiforme. En la figura 14-2 se observa su diseño, el cual es una sola pieza que consta inicialmente de una cabeza unida al tronco que en su diseño tiene surcos con el fin de lograr una buena sumergibilidad, además de una aleta dorsal fija que se encuentra en el lomo del cuerpo, su función es dar estabilidad al prototipo.

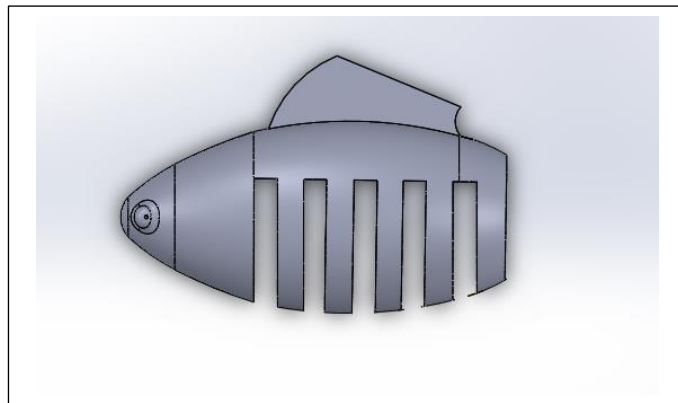


Figura 14-2: Diseño del cuerpo en SolidWorks.

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

En la figura 15-2 se muestra el cuerpo implementado del robot bioinspirado.

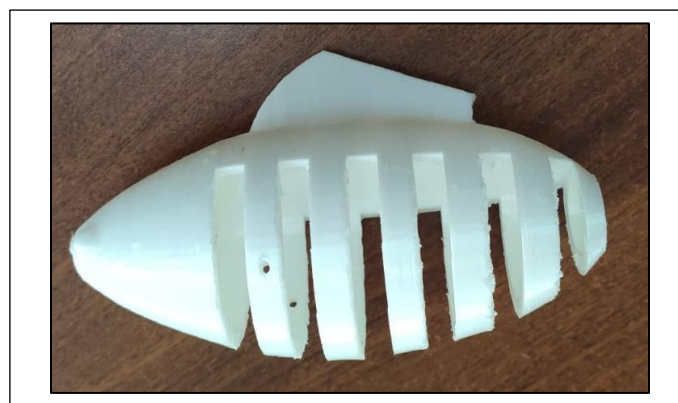


Figura 15-2: Cuerpo del robot bioinspirado.

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

En la figura 16-2 se observa el análisis de inercia de masa del cuerpo.

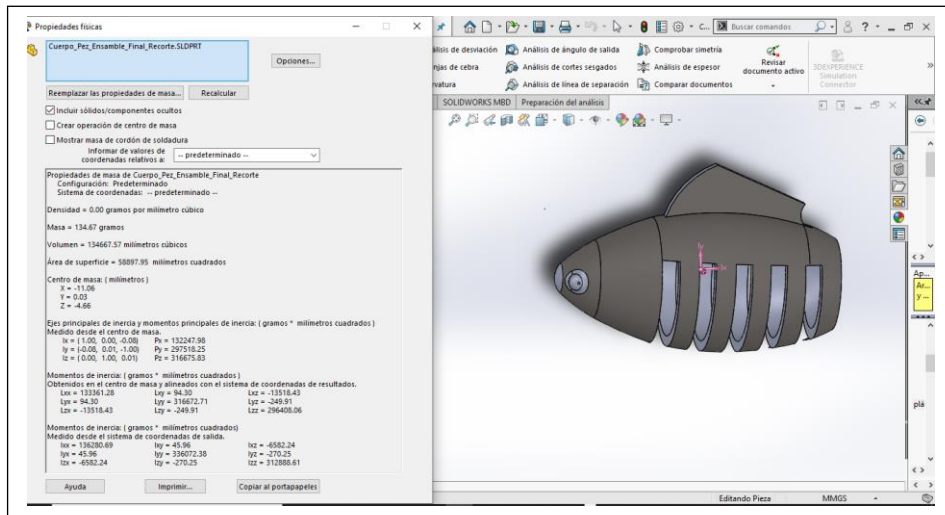


Figura 16-2: Estructura del robot bioinspirado, centro de masa para su matriz de inercia

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

➤ **Datos obtenidos**

Propiedades de masa de Cuerpo robot bioinspirado

Densidad = 0.00 gramos por milímetro cúbico

Masa = 134.67 gramos

Volumen = 134667.57 milímetros cúbicos

Área de superficie = 58897.95 milímetros cuadrados

Centro de masa: (milímetros)

$$X = -11.06$$

$$Y = 0.03$$

$$Z = -4.66$$

Ejes principales de inercia y momentos principales de inercia: (gramos * milímetros cuadrados)

Medido desde el centro de masa.

$$I_x = (1.00, 0.00, -0.08) \quad P_x = 132247.98$$

$$I_y = (-0.08, 0.01, -1.00) \quad P_y = 297518.25$$

$$I_z = (0.00, 1.00, 0.01) \quad P_z = 316675.83$$

Momentos de inercia: (gramos * milímetros cuadrados)

Obtenidos en el centro de masa y alineados con el sistema de coordenadas de resultados.

$$L = \begin{pmatrix} L_{xx} = 133361.28 & L_{xy} = 94.30 & L_{xz} = -13518.43 \\ L_{yx} = 94.30 & L_{yy} = 316672.71 & L_{yz} = -249.91 \\ L_{zx} = -13518.43 & L_{zy} = -249.91 & L_{zz} = 296408.06 \end{pmatrix}$$

Momentos de inercia: (gramos * milímetros cuadrados)

Medido desde el sistema de coordenadas de salida.

$$I = \begin{pmatrix} I_{xx} = 136280.69 & I_{xy} = 45.96 & I_{xz} = -6582.24 \\ I_{yx} = 45.96 & I_{yy} = 336072.38 & I_{yz} = -270.25 \\ I_{zx} = -6582.24 & I_{zy} = -270.25 & I_{zz} = 312888.61 \end{pmatrix}$$

2.5.2. *Diseño de la aleta caudal.*

El diseño de la aleta impar que se encuentra ubicada al final del cuerpo, como se observa en la figura 18-2, consta de un péndulo caudal (cuerpo a) unido a una aleta caudal (cuerpo b), formando así una aleta caudal completa (cuerpo c).

En la figura 17-2 se observa el diseño del péndulo caudal el cual es un molde donde posteriormente dentro del cuerpo (a) se colocará una silicona antihongos, consta de 4 surcos donde estarán ubicados los actuadores no convencionales, que nos permiten impulsar el prototipo hacia adelante, la forma de esta cola trasera del robot pez aumenta o disminuye la fuerza de empuje del prototipo, es decir que la forma específica por la que el prototipo nada, se corresponde con la aleta caudal.

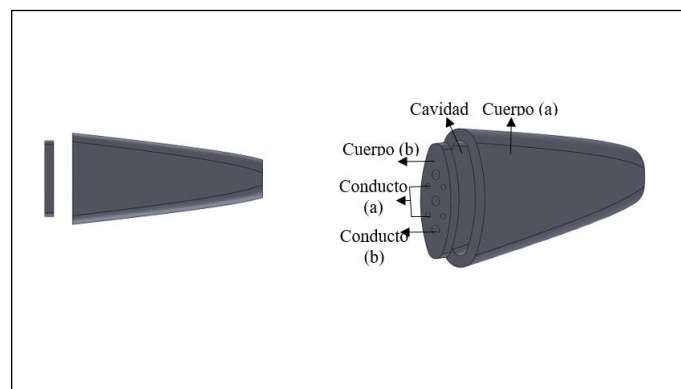


Figura 17-2: Diseño del péndulo caudal en SolidWorks

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

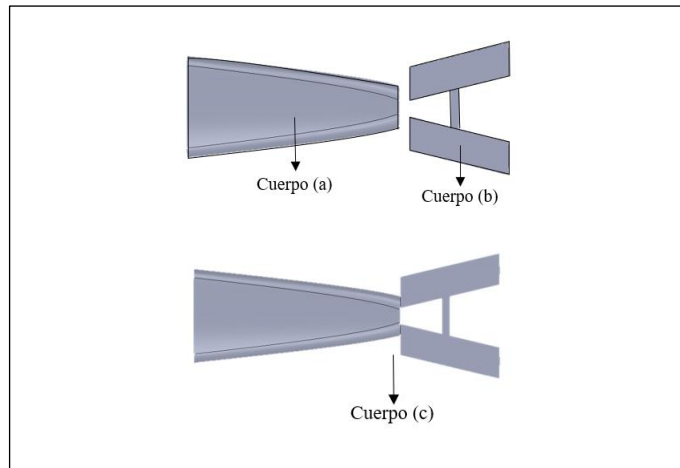


Figura 18-2: Diseño del péndulo unido a la aleta caudal en SolidWorks.

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

En la figura 19-2 se muestra la implementación de la aleta caudal, donde se puede observar el nitinol rectangular incrustados en los dos lados opuestos de la aleta de silicona.

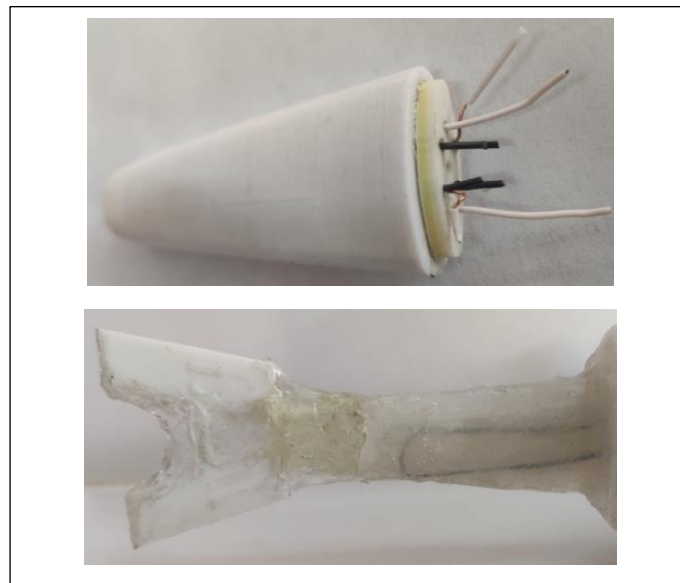


Figura 19-2: Aleta caudal implementada.

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

En la figura 20-2 se observa el análisis de inercia de masa de la base inferior de la aleta caudal

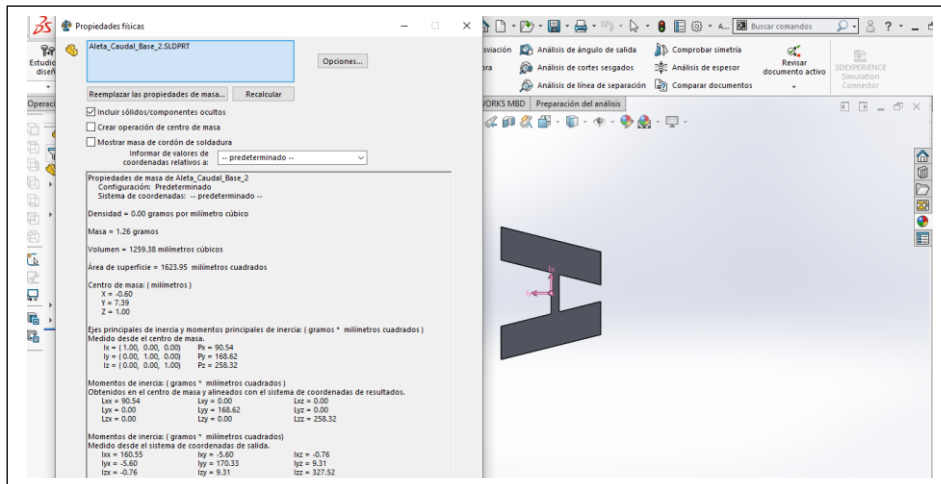


Figura 20-2: Base inferior aleta caudal, centro de masa para su matriz de inercia

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

➤ **Datos obtenidos**

Propiedades de masa de Aleta_Caudal_Base_Inferior

Densidad = 0.00 gramos por milímetro cúbico

Masa = 1.26 gramos

Volumen = 1259.38 milímetros cúbicos

Área de superficie = 1623.95 milímetros cuadrados

Centro de masa: (milímetros)

$$X = -0.60$$

$$Y = 7.39$$

$$Z = 1.00$$

Ejes principales de inercia y momentos principales de inercia: (gramos * milímetros cuadrados)

Medido desde el centro de masa.

$$I_x = (1.00, \quad 0.00, \quad 0.00) \quad P_x = 90.54$$

$$I_y = (0.00, \quad 1.00, \quad 0.00) \quad P_y = 168.62$$

$$I_z = (0.00, \quad 0.00, \quad 1.00) \quad P_z = 258.32$$

Momentos de inercia: (gramos * milímetros cuadrados)

Obtenidos en el centro de masa y alineados con el sistema de coordenadas de resultados.

$$L = \begin{pmatrix} L_{xx} = 90.54 & L_{xy} = 0.00 & L_{xz} = 0.00 \\ L_{yx} = 0.00 & L_{yy} = 168.62 & L_{yz} = 0.00 \\ L_{zx} = 0.00 & L_{zy} = 0.00 & L_{zz} = 258.32 \end{pmatrix}$$

Momentos de inercia: (gramos * milímetros cuadrados)

Medido desde el sistema de coordenadas de salida.

$$I = \begin{pmatrix} I_{xx} = 160.55 & I_{xy} = -5.60 & I_{xz} = -0.76 \\ I_{yx} = -5.60 & I_{yy} = 170.33 & I_{yz} = 9.31 \\ I_{zx} = -0.76 & I_{zy} = 9.31 & I_{zz} = 327.52 \end{pmatrix}$$

En la figura 21-2 se observa el análisis de inercia de masa del péndulo caudal.

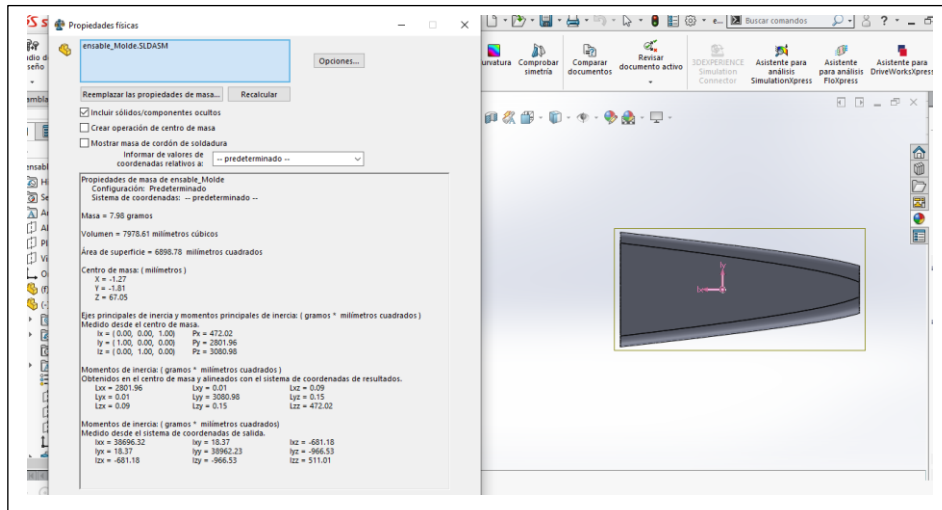


Figura 21-2: Péndulo caudal, centro de masa para su matriz de inercia.

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

➤ **Datos obtenidos**

Propiedades de masa de Cuerpo Aleta Caudal

Masa = 7.98 gramos

Volumen = 7978.61 milímetros cúbicos

Área de superficie = 6898.78 milímetros cuadrados

Centro de masa: (milímetros)

$$X = -1.27$$

$$Y = -1.81$$

$$Z = 67.05$$

Ejes principales de inercia y momentos principales de inercia: (gramos * milímetros cuadrados)

Medido desde el centro de masa.

$$I_x = (0.00, \quad 0.00, \quad 1.00) \quad P_x = 472.02$$

$$I_y = (1.00, \quad 0.00, \quad 0.00) \quad P_y = 2801.96$$

$$I_z = (0.00, \quad 1.00, \quad 0.00) \quad P_z = 3080.98$$

Momentos de inercia: (gramos * milímetros cuadrados)

Obtenidos en el centro de masa y alineados con el sistema de coordenadas de resultados.

$$L = \begin{pmatrix} L_{xx} = 2801.96 & L_{xy} = 0.01 & L_{xz} = 0.09 \\ L_{yx} = 0.01 & L_{yy} = 3080.98 & L_{yz} = 0.15 \\ L_{zx} = 0.09 & L_{zy} = 0.15 & L_{zz} = 472.02 \end{pmatrix}$$

Momentos de inercia: (gramos * milímetros cuadrados)

Medido desde el sistema de coordenadas de salida.

$$I = \begin{pmatrix} I_{xx} = 38696.32 & I_{xy} = 18.37 & I_{xz} = -681.18 \\ I_{yx} = 18.37 & I_{yy} = 38962.23 & I_{yz} = -966.53 \\ I_{zx} = -681.18 & I_{zy} = -966.53 & I_{zz} = 511.01 \end{pmatrix}$$

2.5.3. Diseño de la Aleta pectoral

El diseño del par de aletas pectoral busca proporcionar estabilidad al prototipo, en la figura 22-2, se observa una de las aletas pectorales, consta de dos cuerpos a y b, los cuales servirá como moldes para crear la aleta que será construida con silicona antihongos donde tendrá en su interior los actuadores no convencionales.

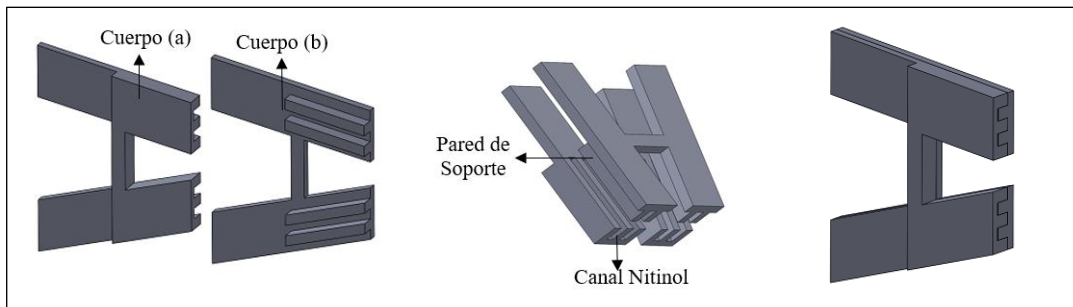


Figura 22-2: Diseño de la aleta pectoral en SolidWorks.

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021



Figura 23-2: Implementación de la aleta pectoral.

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

En la figura 23-2 se observa la implementación de la aleta pectoral, con 4 cables incrustados en su interior 2 para el movimiento hacia adentro del cuerpo y los otros 2 para el movimiento hacia afuera del cuerpo, se encuentra recubierto por una fina capa de silicona para evitar el contacto con el líquido.

En la figura 24-2 se observa el análisis de inercia de masa de la base de la aleta pectoral.

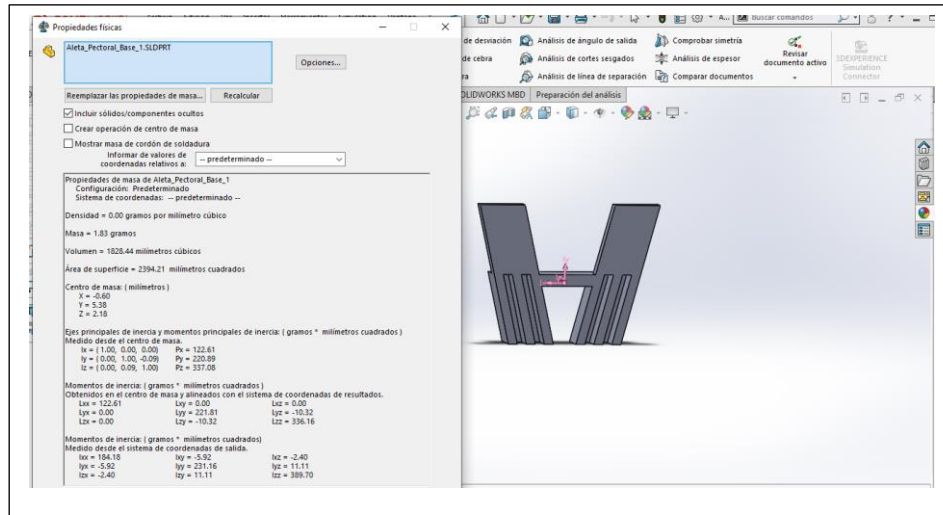


Figura 24-2: Aleta Pectoral Base, centro de masa para su matriz de inercia

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

➤ **Datos obtenidos**

Propiedades de masa de Aleta_Pectoral_Base

Densidad = 0.00 gramos por milímetro cúbico

Masa = 1.83 gramos

Volumen = 1828.44 milímetros cúbicos

Área de superficie = 2394.21 milímetros cuadrados

Centro de masa: (milímetros)

$$X = -0.60$$

$$Y = 5.38$$

$$Z = 2.18$$

Ejes principales de inercia y momentos principales de inercia: (gramos * milímetros cuadrados)

Medido desde el centro de masa.

$$I_x = (1.00, \quad 0.00, \quad 0.00) \quad P_x = 122.61$$

$$I_y = (0.00, \quad 1.00, -0.09) \quad P_y = 220.89$$

$$I_z = (0.00, \quad 0.09, \quad 1.00) \quad P_z = 337.08$$

Momentos de inercia: (gramos * milímetros cuadrados)

Obtenidos en el centro de masa y alineados con el sistema de coordenadas de resultados.

$$L = \begin{pmatrix} L_{xx} = 122.61 & L_{xy} = 0.00 & L_{xz} = 0.00 \\ L_{yx} = 0.00 & L_{yy} = 221.81 & L_{yz} = -10.32 \\ L_{zx} = 0.00 & L_{zy} = -10.32 & L_{zz} = 336.16 \end{pmatrix}$$

Momentos de inercia: (gramos * milímetros cuadrados)

Medido desde el sistema de coordenadas de salida.

$$I = \begin{pmatrix} I_{xx} = 184.18 & I_{xy} = -5.92 & I_{xz} = -2.40 \\ I_{yx} = -5.92 & I_{yy} = 231.16 & I_{yz} = 11.11 \\ I_{zx} = -2.40 & I_{zy} = -11.11 & I_{zz} = 389.70 \end{pmatrix}$$

En la figura 25-2 se observa el análisis de inercia de masa de la cubierta de la aleta pectoral.

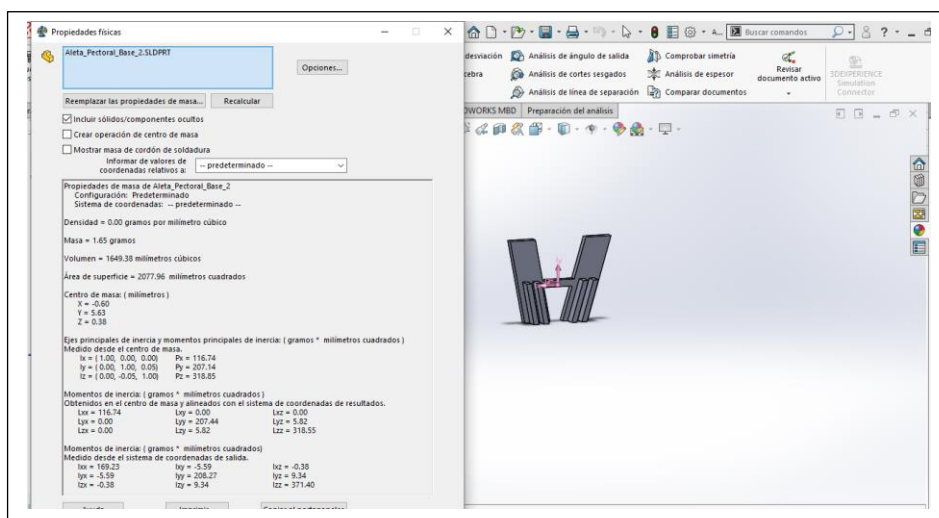


Figura 25-2: Cubierta aleta pectoral, centro de masa para su matriz de inercia

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

➤ **Datos obtenidos**

Propiedades de masa de Aleta_Pectoral_Base_2

Densidad = 0.00 gramos por milímetro cúbico

Masa = 1.65 gramos

Volumen = 1649.38 milímetros cúbicos

Área de superficie = 2077.96 milímetros cuadrados

Centro de masa: (milímetros)

$$X = -0.60$$

$$Y = 5.63$$

$$Z = 0.38$$

Ejes principales de inercia y momentos principales de inercia: (gramos * milímetros cuadrados)
Medido desde el centro de masa.

$$I_x = (1.00, 0.00, 0.00) \quad P_x = 116.74$$

$$I_y = (0.00, 1.00, 0.05) \quad P_y = 207.14$$

$$I_z = (0.00, -0.05, 1.00) \quad P_z = 318.85$$

Momentos de inercia: (gramos * milímetros cuadrados)

Obtenidos en el centro de masa y alineados con el sistema de coordenadas de resultados.

$$L = \begin{pmatrix} L_{xx} = 116.74 & L_{xy} = 0.00 & L_{xz} = 0.00 \\ L_{yx} = 0.00 & L_{yy} = 207.44 & L_{yz} = 5.82 \\ L_{zx} = 0.00 & L_{zy} = 5.82 & L_{zz} = 318.55 \end{pmatrix}$$

Momentos de inercia: (gramos * milímetros cuadrados)

Medido desde el sistema de coordenadas de salida.

$$I = \begin{pmatrix} I_{xx} = 169.23 & I_{xy} = -5.59 & I_{xz} = -0.38 \\ I_{yx} = -5.59 & I_{yy} = 208.27 & I_{yz} = 9.34 \\ I_{zx} = -2.38 & I_{zy} = 9.34 & I_{zz} = 371.40 \end{pmatrix}$$

2.5.4. Ensamblaje del prototipo

El ensamblaje del prototipo como se observa en la figura 26-2, se lo realizó en el software SolidWorks, el cual permite ensamblar cada una de las piezas diseñadas dando como resultado una imagen digital de como quedará el prototipo armado

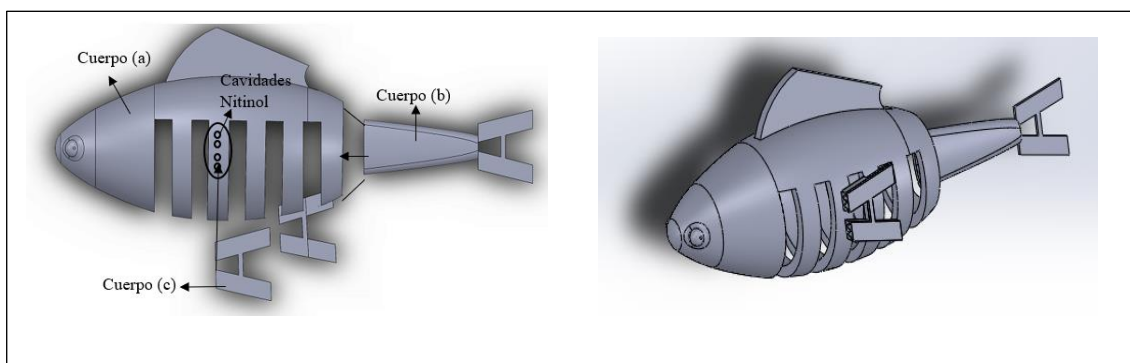


Figura 26-2: Diseño del prototipo ensamblado en SolidWorks

Realizado Por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

En la figura 27-2 se observa la implementación de cuerpo completo del prototipo bioinspirado.

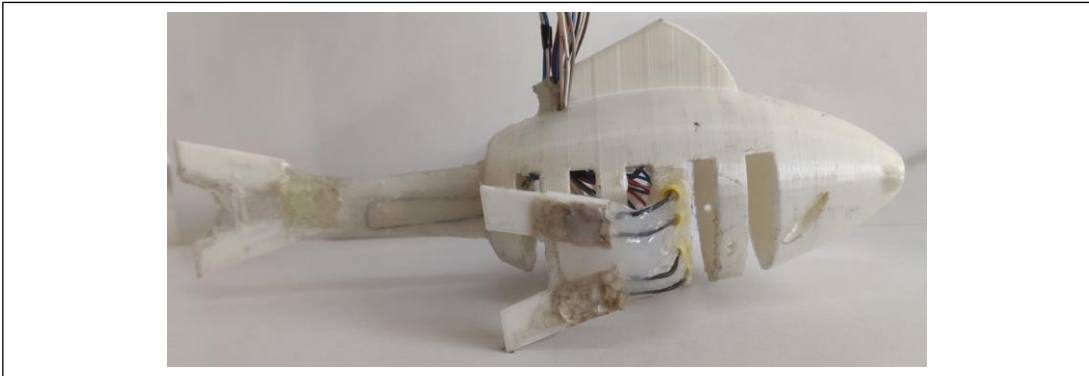


Figura 27-2: Ensamblaje de las diferentes partes del cuerpo del robot bioinspirado

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

2.6. Diseño electrónico y esquema de conexiones.

El diseño y esquema de conexiones fue realizado en los softwares *Fritzing* y Proteus 8 Profesional, los cuales permitieron realizar el diseño y simulación del circuito a implementar.

En la figura 28-2 se puede observar los respectivos elementos utilizados: Batería lipo 7.4V a 300mAh, Fuentes reguladora de 12V a 12A, Regulador de Voltaje 7805, Switch de alimentación y control, Arduino nano, pulsado, Controlador IBT_2 (módulo BTS7960) a 43A, Modulo Sensor IMU MPU6050.

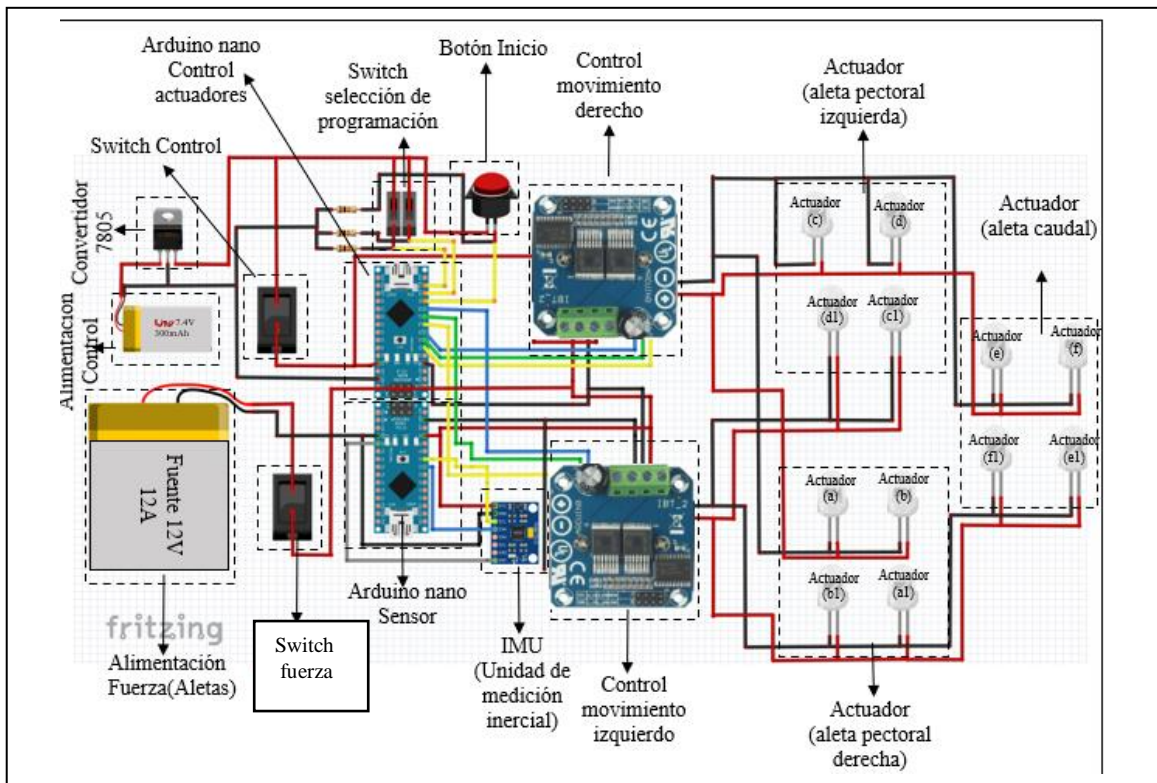


Figura 28-2: Diagrama de conexión general del sistema.

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

A continuación, se detalla las respectivas conexiones de la figura 23-2.

Conexión Regulador de Voltaje 7805

- Cable rojo de Vcc del regular se conecta con el Vcc de la fuente de alimentación de 7.4V a 300mAh
- Cable negro de Gnd del regulador se conecta al Gnd de la fuente de alimentación de 7.4V a 300mAh.

Conexión de Arduino nano control de actuadores

- Para la alimentación de la placa se utilizó una batería lipo externa la cual pasa por un regulador 7805 para que pueda tener la alimentación de 5V adecuada para el Arduino siendo el cable rojo de Vcc que sale de la pata 3 del regular a la entrada de voltaje de la placa, cable negro o Gnd se la toma del cable negro Gnd de la fuente de alimentación de 7.4V a 300mAh.

Conexión de Arduino nano monitoreo

- Para la alimentación de la placa se tomó la conexión en paralelo de la ya realizada con el Arduino nano de control el cual es cable rojo Vcc y cable negro Gnd.

Conexión Switch de selección de programación

- El switch de dos vías de selección se encuentra conectado por el un extremo a la fuente de alimentación externa los cuales son los cables rojos conectados al positivo de la misma.
- El otro extremo o la vía de salida del switch se encuentra conectado al Arduino nano de control, los cuales son los pines digitales 3 y 7 respectivamente teniendo una conexión Pull UP.

Conexión botón inicio

- El cable rojo se encuentra conectado al positivo de la alimentación teniendo una conexión Pull Down para realizar la señal y el otro extremo se encuentra conectado al pin digital 12 del Arduino nano de control.

Conexión Modulo Controlador IBT_2 43 A, control Movimiento Derecho

- El cable Rojo pertenece a Vcc el cual será conectado a la salida de 5V que posee el Arduino nano de control.
- El cable Negro pertenece a Gnd el cual será conectado a la salida Gnd del Arduino nano de control.
- La entrada R_IS1 Cable amarillo se encuentra conectado a la salida digital 1 del Arduino nano de control.
- La entrada L_IS1 cable amarillo franja negra se encuentra conectado a la salida digital 4 del Arduino nano de control.
- La entrada R_EN1 cable café se encuentra conectado a la salida digital 2 del Arduino nano de control.
- La entrada L_EN1 cable café franja negra se encuentra conectado a la salida digital 5 del Arduino nano de control.
- La entrada RPWM_1 cable azul se encuentra conectada a la salida digital 9 del Arduino nano de control.
- La entrada LPWM_1 cable azul franja negra se entra conectado a la salida digital 6 del Arduino nano de control.
- Cable rojo con franja salida del controlador se encuentra conectado al cable de alimentación Vcc_1 de la fuente de 12V a 12 A.
- Cable negro con Franja Roja del controlador se encuentra conectado al cable de Alimentación Gnd_1 de la fuente de 12V a 12 A.

Conexión Modulo Controlador IBT_2 43 A, control Movimiento izquierdo

- El cable Rojo pertenece a Vcc el cual será conectado a la salida de 5V que posee el Arduino nano de control.
- El cable Negro pertenece a Gnd el cual será conectado a la salida Gnd del Arduino nano de control.
- La entrada R_IS2 Cable tomate se encuentra conectado a la salida digital 1 del Arduino nano de control.
- La entrada L_IS2 cable tomate franja negra se encuentra conectado a la salida digital 4 del Arduino nano de control.

- La entrada R_EN2 cable morado se encuentra conectado a la salida digital 2 del Arduino nano de control.
- La entrada L_EN2 cable morado franja negra se encuentra conectado a la salida digital 5 del Arduino nano de control.
- La entrada RPWM_2 cable blanco se encuentra conectada a la salida digital 11 del Arduino nano de control.
- La entrada LPWM_2 cable blanco franja negra se entra conectado a la salida digital 10 del Arduino nano de control.
- Cable rojo con franja salida del controlador se encuentra conectado al cable de alimentación Vcc_2 de la fuente de 12V a 12 A.
- Cable negro con Franja Roja del controlador se encuentra conectado al cable de Alimentación Gnd_2 de la fuente de 12V a 12 A.

Conexión Modulo Sensor IMU MPU6050

- La entrada de Vcc y Gnd del módulo sensor los cuales son rojo y negro respectivamente se conectan con las salidas de 5V y Gnd del Arduino nano de monitoreo.
- La entrada SCL del módulo se conecta con la salida analógica 4 del Arduino nano de monitoreo.
- La entrada SDA del módulo se conecta con la salida analógica 5 del Arduino nano de monitoreo.

Conexión Actuadores Aleta Pectoral Derecha

- Actuadores a y a1 cable rojo y negro conectadas a las salidas Vcc y Gnd del controlador IBT_2 movimiento derecho.
- Actuator b y b1 cable rojo y negro conectados a las salidas Vcc y Gnd del controlador IBT_2 movimiento Izquierdo.

Conexión Actuadores Aleta Pectoral Izquierda

- Actuadores c y c1 cable rojo con franja negra y negro con franja roja conectadas a las salidas Vcc y Gnd del controlador IBT_2 movimiento derecho.
- Actuadores d y d1 cable rojo con franja negra y negro con franja roja conectadas a las salidas Vcc y Gnd del controlador IBT_2 movimiento izquierdo.

Conexión Actuadores Aleta Caudal

- Actuadores e y e1 cable rojo con dos franjas negras y negro con dos franjas rojas conectadas a las salidas Vcc y Gnd del controlador IBT_2 movimiento derecho.
- Actuadores f y f1 cable rojo con dos franjas negras y negro con franjas rojas conectadas a las salidas Vcc y Gnd del controlador IBT_2 movimiento izquierdo.

2.7. Diseño del Software de control de movimiento y monitoreo del pez

En el siguiente apartado describe el programa realizado para el control de movimiento del robot bioinspirado realizado en IDE Arduino 1.8.12 («Arduino - Home», 2021), el cual posee las instrucciones necesarias para el control de componentes, en cuanto al monitoreo se lo realizo en el programa LabVIEW-NI 2020 (Vizcaíno & Sebastián, 2011), en este apartado se muestra la lógica de programación representado con un diagrama de flujo, funciones, módulos y librerías empleadas.

2.7.1. *Requerimientos del Software*

- Admitir bloques de códigos siendo una estructura switch case, al ingresar bits de entrada
- Permanecer en hibernación hasta activación de puso de inicio
- Control de actuadores mediante PWM
- Recopilación de datos del sensor según su movimiento
- Graficación de muestras del sensor

2.7.2. *Flujograma programa de control de movimiento*

En la figura 29-2 y 30-2 se puede visualizar de una forma detalla el programa para el control de sus movimientos del robot bioinspirado.

A continuación, se describe los comandos y librerías que se utilizaron en la programación de control de movimiento y monitoreo de datos.

2.7.2.1. *Control de Movimiento*

Según la figura 29-2 se la puede dividir en 4 partes las cuales representan diferentes características y funciones en la programación

Inicialización y selección de programa, bloque (a)

- Se crea variables para el botón de inicio, el switch, los módulos driver IBT_2 43 A
- Se definen las variables de entrada y salida
- Se asignan terminales del Arduino los cuales van a pertenecer a cada uno de los elementos
- Se adquiere el dato de la posición del pulsado de inicialización
- Se adquiere el dato de las posiciones del Dip Switch

Ciclos de repetición

Como se puede observar en la figura 24-2 el ciclo de repetición se lo realiza según el programa al cual se dirige y fue seleccionado previamente.

Ciclo de repetición, bloque (b)

- Lee el estado de posición del Dip Switch.
- Se detecta el estado del Dip Switch correspondiente a los bits 11 y el estado del while correspondiente a 1.
- Comienza el contador del ciclo cuando se la inicializo en 1 hasta 10.
- Activa el flanco de subida del R_PWM_1 como un ligero calentamiento en 20ms.
- Activa el flanco de subida del R_PWM_1 como activación de energía siendo este el movimiento izquierdo en un tiempo de 4s.
- Activa del flanco de bajada del R_PWM_1 como desactivación de energía parando el movimiento izquierdo en un tiempo de 20ms.
- Activa el flanco de subida del R_PWM_2 como un ligero calentamiento en 20ms.
- Activa el flanco de subida del R_PWM_2 como activación de energía siendo este el movimiento derecho en un tiempo de 4s.
- Activa del flanco de bajada del R_PWM_2 como desactivación de energía parando el movimiento derecho en un tiempo de 20ms.
- Termina el contador del ciclo
- Desactivación del R_PWM_1 y R_PWM_2 cortando la energía y movimientos como un periodo de espera de 5s para el descanso del actuador.

Ciclo de repetición, bloque (c)

- Lee el estado de posición del Dip Switch.
- Se detecta el estado del Dip Switch correspondiente a los bits 10.

- Se Activa el flanco de subida del R_PWM_1 como calentamiento del actuador con un tiempo de 2s de igual forma se activa el R_PWM_2 como calentamiento del actuador con un tiempo de 2s, al terminar este proceso se desactivan respectivamente.
- Se detecta el estado del While en 1
- Activa el flanco de subida del R_PWM_1 como activación de energía siendo este el movimiento izquierdo en un tiempo de 4s.
- Activa del flanco de bajada del R_PWM_1 como desactivación de energía parando el movimiento izquierdo en un tiempo de 20ms.
- Activa el flanco de subida del R_PWM_2 como activación de energía siendo este el movimiento derecho en un tiempo de 4s.
- Activa del flanco de bajada del R_PWM_2 como desactivación de energía parando el movimiento derecho en un tiempo de 20ms.
- Desactivación del R_PWM_1 y R_PWM_2 cortando la energía y movimientos como un periodo de espera de 2s para el descanso del actuador.

Ciclo de repetición, bloque (d)

- Lee el estado de posición del Dip Switch.
- Se detecta el estado del Dip Switch correspondiente a los bits 01.
- Se detecta el estado del While en 1
- Activa el flanco de subida del R_PWM_1 como activación de energía siendo este el movimiento izquierdo en un tiempo de 4s.
- Activa del flanco de bajada del R_PWM_1 como desactivación de energía parando el movimiento izquierdo en un tiempo de 20ms.
- Activa el flanco de subida del R_PWM_2 como activación de energía siendo este el movimiento derecho en un tiempo de 4s.
- Activa del flanco de bajada del R_PWM_2 como desactivación de energía parando el movimiento derecho en un tiempo de 20ms.
- Desactivación del R_PWM_1 y R_PWM_2 cortando la energía y movimientos como un periodo de espera de 2s para el descanso del actuador.

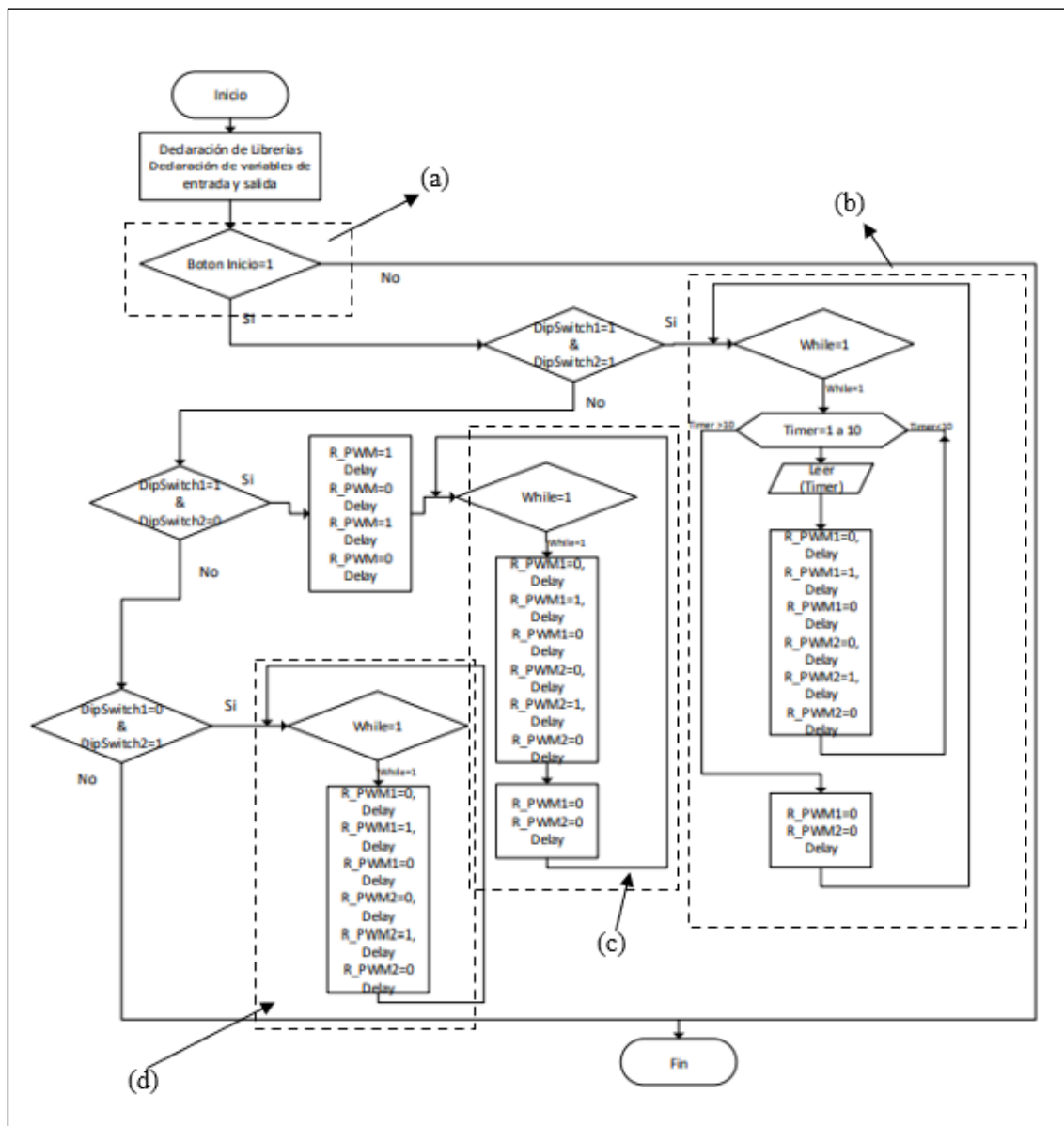


Figura 29-2: Diagrama de Flujo control de movimiento

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

2.7.2.2. Monitoreo de datos

Según la figura 30-2 se la puede dividir en 2 partes las cuales representan diferentes características y funciones en la programación

Inicialización y selección de programa

- Se crea variables para el botón de inicio, y el Módulo Sensor IMU 6050
- Se definen las variables de entrada y salida como constantes

- Se asignan terminales del Arduino los cuales van a pertenecer a cada uno de los elementos
- Se adquiere el dato de la posición del pulsado de inicialización
- Se adquiere el dato del puerto serial del Arduino

Ciclo de repetición

- Lee el estado del botón de inicialización y el puerto serial.
- Lee las entras de inicialización para el módulo sensor IMU 6050.
- Adquiere los datos del giroscopio y acelerómetro respectivamente del Módulo Sensor IMU 6050.
- Imprime y visualiza los datos obtenidos a través del puerto serial.
- Cierra el ciclo a través del botón de paro que se encuentra en el programa por medio del puerto serial.

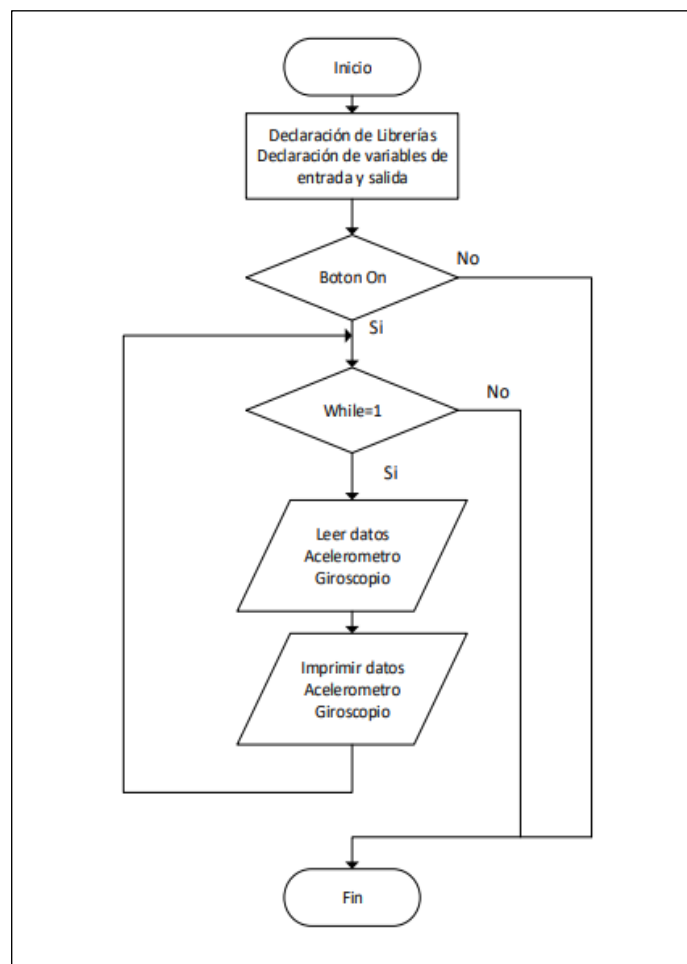


Figura 30-2: Diagrama de flujo monitoreo de datos

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

CAPÍTULO III

3. VALIDACIÓN DE PROTOTIPO

En esta sección se presenta las diferentes pruebas de funcionamiento y los resultados obtenidos, a través de la caracterización de sensores, determinación de la capacidad de movimiento bidimensional, recopilación de datos y consumo total de corriente del prototipo en funcionamiento.

3.1. Implementación del robot subacuático bioinspirado

El prototipo desarrollado presenta unas dimensiones de 210mm de largo por 92mm de ancho, y un peso de 0.075 kg. La realización de pruebas se realizó en un ambiente controlado donde no se varía la temperatura del agua. En la Figura 2-3 se presenta el prototipo sumergido en el medio subacuático.

3.2. Caracterización del actuador

Para determinar el correcto funcionamiento de los diferentes actuadores que permiten la propulsión en la natación del prototipo bioinspirado, se ejecutaron diversas pruebas que se detallan a continuación:

3.2.1. Grabado del actuador

Para evitar el sobrecalentamiento del actuador SMA, y la fatiga que podría presentar debido al proceso de grabado y activación, se realizó pruebas para ejecutar este proceso con efectividad. Las Tabla 1-3, 2-3, 3-3 y 4-3 muestran los resultados obtenidos en este proceso. Se observa un breve análisis a partir de las pruebas realizadas categorizándola como excelente, bueno, regular, pésimo.

Tabla 1-3: Grabado del alambre según el voltaje, amperaje, temperatura y tiempo

Muestra	Alambre		Amperaje de alimentación (A)	Voltaje de alimentación (V)	Tiempo de grabado	Temperatura Alcanzada °C	Angulo de grabado
	Diámetro mm	Longitud mm					

1	0,5mm	110mm	300mAh	0.5V	2s	30°C	60°
							90°
							120°
					5s	45°C	60°
							90°
							120°
					10s	60°C	60°
							90°
							120°
				2.5V	2s	45°	60°
							90°
							120°
					5s	70°	60°
							90°
							120°
					10s	80°	60°
							90°
							120°
				5V	2s	50°	60°
							90°
							120°
					5s	85°	60°
							90°
							120°
10s	100°	60°					
		90°					
		120°					
7.4V	2s	60°	60°				
			90°				
			120°				
	5s	120°	60°				
			90°				
			120°				
	10s	200°	60°				
			90°				
			120°				
2	0,5mm	110mm	800mAh	0.5V	2s	40°C	60°
							90°
							120°
					5s	60°C	60°
							90°
							120°
					10s		60°

						80°C	90°	
						120°		
						5V	2s	50°
					90°			
					120°			
					5s	100°	60°	
							90°	
							120°	
					10s	180°	60°	
				90°				
				120°				
				7V	2s	80°	60°	
							90°	
							120°	
					5s	140°	60°	
							90°	
							120°	
					10s	220°	60°	
							90°	
							120°	
				11.1V	2s	150°	60°	
							90°	
							120°	
					5s	200°	60°	
90°								
120°								
10s	260°	60°						
		90°						
		120°						
3	0,5mm	110mm	650mAh	0.5V	2s	30°C	60°	
						90°		
						120°		
					5s	50°C	60°	
							90°	
							120°	
				10s	70°C	60°		
						90°		
						120°		
				5V	2s	50°	60°	
							90°	
							120°	
5s	90°	60°						
		90°						
		90°						

						10s	170°	120°
								60°
								90°
						2s	80°	120°
								60°
								90°
					8V	5s	135°	120°
								60°
								90°
						10s	210°	120°
								60°
								90°
					14.8V	2s	150°	120°
								60°
								90°
						5s	200°	120°
60°								
90°								
10s	260°	120°						
		60°						
		90°						
4	0,5mm	110mm	12A	0.5V	2s	30°C	60°	
							90°	
							120°	
					5s	45°C	60°	
							90°	
							120°	
				10s	75°C	60°		
						90°		
						120°		
				2.5V	2s	45°C	60°	
							90°	
							120°	
5s	60°C	60°						
		90°						
		120°						
10s	100°C	60°						
		90°						
		120°						
8.5V	2s	60°C	60°					
			90°					
			120°					

					5s	150°C	60°
							90°
							120°
					10s	230°C	60°
							90°
							120°
				12V	2s	70°C	60°
							90°
							120°
					5s	190°C	60°
							90°
							120°
10s	260°C	60°					
		90°					
		120°					
5	1mm	110mm	300mAh	0.5V	2s	30°C	60°
							90°
							120°
					5s	45°C	60°
							90°
							120°
				10s	60°C	60°	
						90°	
						120°	
				2.5V	2s	45°	60°
							90°
							120°
					5s	70°	60°
							90°
							120°
				10s	80°	60°	
						90°	
						120°	
5V	2s	50°	60°				
			90°				
			120°				
	5s	85°	60°				
			90°				
			120°				
10s	100°	60°					
		90°					
		120°					
7.4V	2s	60°	60°				

							90°	
							120°	
					5s	120°	60°	
							90°	
							120°	
					10s	200°	60°	
							90°	
							120°	
6	1mm	110mm	800mAh	0.5V	2s	40°C	60°	
							90°	
							120°	
						5s	60°C	60°
					90°			
					120°			
						10s	80°C	60°
					90°			
					120°			
				5V	2s	50°	60°	
							90°	
							120°	
						5s	100°	60°
					90°			
					120°			
					10s	180°	60°	
				90°				
				120°				
				7V	2s	80°	60°	
							90°	
							120°	
						5s	140°	60°
					90°			
					120°			
	10s	220°	60°					
90°								
120°								
11.1V	2s	150°	60°					
			90°					
			120°					
		5s	200°	60°				
	90°							
	120°							
	10s	260°	60°					
90°								

							120°
7	1mm	110mm	650mAh	0.5V	2s	30°C	60°
							90°
							120°
					5s	50°C	60°
							90°
							120°
					10s	70°C	60°
							90°
							120°
				5V	2s	50°	60°
							90°
							120°
					5s	90°	60°
							90°
							120°
					10s	170°	60°
							90°
							120°
				8V	2s	80°	60°
							90°
							120°
					5s	135°	60°
							90°
							120°
10s	210°	60°					
		90°					
		120°					
14.8V	2s	150°	60°				
			90°				
			120°				
	5s	200°	60°				
			90°				
			120°				
	10s	260°	60°				
			90°				
			120°				
8	1mm	110mm	12A	0.5V	2s	30°C	60°
							90°
							120°
					5s	45°C	60°
							90°
							120°

				2.5V	10s	75°C	60°	
							90°	
							120°	
					2.5V	2s	45°C	60°
								90°
								120°
						5s	60°C	60°
								90°
								120°
				10s	100°C	60°		
						90°		
						120°		
				8.5V	2s	60°C	60°	
							90°	
							120°	
					5s	150°C	60°	
							90°	
							120°	
					10s	230°C	60°	
							90°	
							120°	
				12V	2s	70°C	60°	
							90°	
							120°	
5s	190°C	60°						
		90°						
		120°						
10s	260°C	60°						
		90°						
		120°						

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

En la Tabla 1-3 se observa los diferentes valores de grabado que fueron aplicados para la creación del actuador aleta caudal. Análisis por cada muestra.

Muestra 1: Se observa que, al no alcanzar su temperatura de grabado nominal, el nitinol tiende a tomar la forma instantánea o solo tener un leve deforma miento de la forma requerida

Muestra 2: Al tener la temperatura un poco baja de la nominal experimentalmente el nitinol tiende a tomar formas instantáneas o solo tener una leve deformación aun no parecida a la requerida.

Muestra 3: Se observa que el nitinol tiene una temperatura en el rango moderado ideal a temperatura ambiente sin someterse a ninguna forma de enfriamiento por disipación de calor la cual el nitinol no tiene un desgaste de este y llega a la deformación requerida.

Muestra 4: Se observa que el nitinol tiene una temperatura en el rango moderado ideal con temperatura ambiente y sin someterse a ninguna forma de disipación de calor la cual el nitinol presenta un leve desgaste por sobrecalentamiento, pero llega a la forma requerida.

Muestra 5: Se observa que el nitinol tiene una temperatura que sobrepasa el rango moderado por lo que el nitinol llega a la forma requerida pero su estructura tiende a sobrecalentarse y produce un desgaste en el material, por lo consecuente no se va a tener una precisión de grabado requerido porque al mínimo movimiento tendera a grabar su forma nuevamente.

Muestra 6: Se observa que, al no alcanzar su temperatura de grabado nominal, el nitinol tiende a tomar la forma instantánea o solo tener un leve deforma miento de la forma requerida

Muestra 7: Al tener la temperatura un poco baja de la nominal experimentalmente el nitinol tiende a tomar formas instantáneas o solo tener una leve deformación aun no parecida a la requerida.

Muestra 8: Se observa que el nitinol tiene una temperatura en el rango moderado ideal a temperatura ambiente sin someterse a ninguna forma de enfriamiento por disipación de calor la cual el nitinol no tiene un desgaste de este y llega a la deformación requerida.

Muestra 9: Se observa que el nitinol tiene una temperatura en el rango moderado ideal con temperatura ambiente y sin someterse a ninguna forma de disipación de calor la cual el nitinol presenta un leve desgaste por sobrecalentamiento, pero llega a la forma requerida.

Muestra 10: Se observa que el nitinol tiene una temperatura que sobrepasa el rango moderado por lo que el nitinol llega a la forma requerida pero su estructura tiende a sobrecalentarse y produce un desgaste en la materia, por lo consecuente no se va a tener una precisión de grabado requerido porque al mínimo movimiento tendera a grabar su forma nuevamente.

Siendo un análisis final de las pruebas realizadas y analizadas por separado se toma en cuenta que la 5 primera muestra tiene un diámetro inferior a las pruebas siguientes y tiene una temperatura de grabado un poco más elevada por lo que tiene a fatigar el material al no tener una precisión exacta en cuanto a su temperatura, como se observa en la figura 1-3 el grabado se lo realizo con dos alicates para obtener el ángulo deseado y enviando el voltaje apropiado de temperatura para alcanzar la consigna planificada, se resalta que no se debe realizar el grabado directamente de la fuente ya que el material podría romperse por fatiga por lo que se lo realizo con el control de voltaje con los IBT_2.

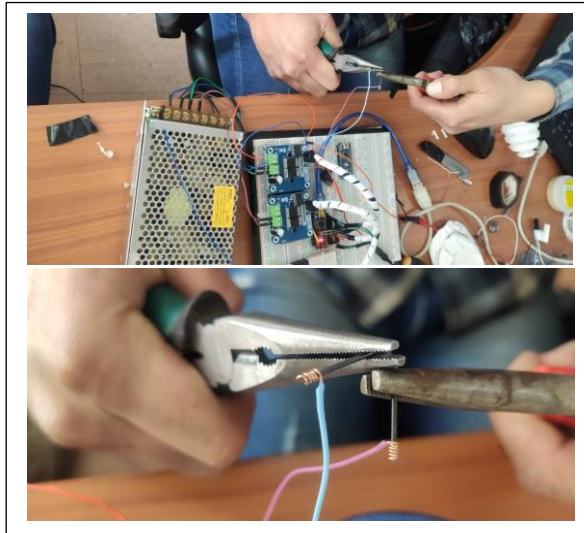


Figura 1-3: Grabado del nitinol

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

Tabla 2-3: Temperatura de activación de la aleta caudal.

Muestra	Alambre		Temperatura de grabado experimental. °C	Temperatura de activación experimental °C	Angulo de activación
	Diámetro mm	Longitud mm			
1	0,5mm	110mm	180°C	40°C	60°
					90°
					120°
				60°C	60°
					90°
					120°
				85°C	60°
					90°
					120°
2	0,5mm	110mm	200°C	40°C	60°
					90°
					120°
				60°C	60°
					90°
					120°
				85°C	60°
					90°
					120°
3	0,5mm	110mm	210°C	40°C	60°
					90°
					120°
				60 °C	60°

					90°
					120°
				85°C	60°
					90°
					120°
4	0,5mm	110mm	220°C	40°C	60°
					90°
					120°
				60°C	60°
					90°
					120°
				85°C	60°
					90°
					120°
5	0,5mm	110mm	260°C	40°C	60°
					90°
					120°
				60 °C	60°
					90°
					120°
				85°C	60°
					90°
					120°
6	1mm	110mm	160°C	30°C	60°
					90°
					120°
				40°C	60°
					90°
					120°
				60°C	60°
					90°
					120°
7	1mm	110mm	180°C	30°C	60°
					90°
					120°
				40°C	60°
					90°
					120°
				60°C	60°
					90°
					120°
8	1mm	110mm	190°C	30°C	60°
					90°

					120°
				40°C	60°
					90°
					120°
				60°C	60°
					90°
					120°
9	1mm	110mm	200°C	30°C	60°
					90°
					120°
				40°C	60°
					90°
					120°
				60°C	60°
					90°
					120°
10	1	110	240	30°C	60°
					90°
					120°
				40°C	60°
					90°
					120°
				60°C	60°
					90°
					120°

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

Al observar la Tabla 2-3, las pruebas realizadas existen variaciones en cuanto a su activación ya que las pruebas se las realizo con dos cables de nitinol de diferente diámetro y tiene parámetros de activación distintos siendo estos un punto de diferencia para su control.

De la muestra 1 a la 5 al poseer un diámetro de 0.5mm tiene un rango moderado de activación que se encuentra entre los 50°C a 70°C en condiciones ideales, analizándolo de una forma general al estar fuera del rango su activación es pésima ya que no llega al Angulo deseado, de otra forma al estar dentro del rango su activación es la adecuada pero se debe tener en cuenta el ángulo y la temperatura a la cual fueron grabados ya que depende de este factor para llegar a la forma requerida ,como punto final de estas muestras al llegar a una temperatura alta después del rango el nitinol podría deformarse y tomar una forma distinta a la grabada anteriormente.

En las muestras finales de la 6 a la 10 que poseen un diámetro de 1mm tiene un rango de activación completamente diferente a la anterior siendo este de 30°C a 50°C en condiciones ideales al analizar las muestras se considera que con una temperatura fuera del rango en niveles bajos el nitinol

tiende a reaccionar, pero de una forma lenta y no llega a su consigna, al estar dentro del rango y en condiciones ideales llega a su forma final tomando en cuenta los factores de grabados anteriormente analizados, como se observó en las muestras anteriores al estar sobrepasando el rango de temperatura su forma tiende a cambiar dependiendo del tiempo que se lo esté sometiendo la temperatura.

Al analizar la tabla 2-3 y la tabla 2-3 por completo se contempló la utilización de un Nitinol de 1mm de diámetro con 110mm de longitud con una fuente de alimentación de 12V a 10 A, con un grabado de 200°C y una activación de 40°C a un tiempo de 5s y con un ángulo de 90°.

Tabla 3-3: Grabado del actuador aleta pectoral.

Muestra	Alambre		Amperaje de alimentación (A)	Voltaje de alimentación (V)	Tiempo de grabado	Temperatura Alcanzada °C	Angulo de grabado
	Diámetro mm	Longitud mm					
1	0,5mm	60mm	300mAh	0.5V	2s	30°C	60°
							90°
							120°
					5s	45°C	60°
							90°
							120°
					10s	60°C	2s
							90°
							120°
				2.5V	2s	45°	60°
							90°
							120°
					5s	70°	60°
							90°
							120°
					10s	80°	60°
							90°
							120°
				5V	2s	50°	60°
							90°
							120°
					5s	85°	60°
							90°
							120°
10s	100°	60°					
		90°					
		120°					

							120°
							60°
					2s	60°	90°
							120°
				7.4V	5s	120°	60°
							90°
							120°
					10s	200°	60°
							90°
							120°
					2s	40°C	60°
							90°
							120°
				0.5V	5s	60°C	60°
							90°
							120°
					10s	80°C	60°
							90°
							120°
					2s	50°	60°
							90°
							120°
				5V	5s	100°	60°
							90°
							120°
					10s	180°	60°
							90°
							120°
					2s	80°	6°
							90°
							120°
				7V	5s	140°	60°
							90°
							120°
					10s	220°	60°
							90°
							120°
					2s	150°	60°
							90°
							120°
				11.1V	5s	200°	60°
							90°
							120°

					10s	260°	60°
							90°
							120°
					2s	30°C	60°
							90°
							120°
				0.5V	5s	50°C	60°
							90°
							120°
					10s	70°C	60°
							90°
							120°
					2s	50°	60°
							90°
							120°
				5V	5s	90°	60°
							90°
							120°
					10s	170°	60°
							90°
							120°
					2s	80°	60°
							90°
							120°
				8V	5s	135°	60°
							90°
							120°
					10s	210°	60°
							90°
							120°
					2s	150°	60°
							90°
							120°
				14.8V	5s	200°	60°
							90°
							120°
					10s	260°	60°
							90°
							120°
3	0,5m m	60mm	650mAh				
					2s	30°C	60°
							90°
							120°
				0.5V	5s	45°C	60°
4	0,5m m	60mm	12A				
					2s	30°C	60°
							90°
							120°
				0.5V	5s	45°C	60°

					10s	75°C	90°			
							120°			
							2.5V	2s	45°C	60°
										90°
										120°
								5s	60°C	60°
					90°					
					120°					
					10s	100°C	60°			
							90°			
							120°			
					8.5V	2s	60°C	60°		
				90°						
				120°						
				5s		150°C	60°			
							90°			
							120°			
				10s		230°C	60°			
							90°			
							120°			
				12V	2s	70°C	60°			
							90°			
							120°			
					5s	190°C	60°			
90°										
120°										
10s	260°C	60°								
		90°								
		120°								
5	1mm	60mm	300mAh	0.5V	2s	30°C	60°			
							90°			
							120°			
					5s	45°C	60°			
							90°			
							120°			
				10s	60°C	60°				
						90°				
						120°				
2.5V	2s	45°	60°							
			90°							

					5s	70°	120°
							60°
							90°
					10s	80°	120°
							60°
							90°
				5V	2s	50°	120°
							60°
							90°
					5s	85°	120°
							60°
							90°
				10s	100°	120°	
						60°	
						90°	
				7.4V	2s	60°	120°
							60°
							90°
5s	120°	120°					
		60°					
		90°					
10s	200°	120°					
		60°					
		90°					
6	1mm	60 mm	800mAh	0.5V	2s	40°C	120°
							60°
							90°
					5s	60°C	120°
							60°
							90°
				10s	80°C	120°	
						60°	
						90°	
				5V	2s	50°	120°
							60°
							90°
5s	100°	120°					
		60°					
		90°					
10s	180°	120°					
		60°					
		90°					

				7V	2s	80°	60°
							90°
							120°
					5s	140°	60°
							90°
							120°
				10s	220°	60°	
						90°	
						120°	
				11.1V	2s	150°	60°
							90°
							120°
5s	200°	60°					
		90°					
		120°					
10s	260°	60°					
		90°					
		120°					
7	1mm	60 mm	650mAh	0.5V	2s	30°C	60°
							90°
							120°
					5s	50°C	60°
							90°
							120°
				10s	70°C	60°	
						90°	
						120°	
				5V	2s	50°	60°
							90°
							120°
					5s	90°	60°
							90°
							120°
				10s	170°	60°	
						90°	
						120°	
8V	2s	80°	60°				
			90°				
			120°				
	5s	135°	60°				
			90°				
			120°				
10s	210°	60°					

				14.8V	2s	150°	90°
							120°
							60°
					5s	200°	90°
							120°
							60°
					10s	260°	90°
							120°
							60°
				0.5V	2s	30°C	60°
							90°
							120°
					5s	45°C	60°
							90°
							120°
10s	75°C	60°					
		90°					
		120°					
2.5V	2s	45°C	60°				
			90°				
			120°				
	5s	60°C	60°				
			90°				
			120°				
10s	100°C	60°					
		90°					
		120°					
8.5V	2s	60°C	60°				
			90°				
			120°				
	5s	150°C	60°				
			90°				
			120°				
10s	230°C	60°					
		90°					
		120°					
12V	2s	70°C	60°				
			90°				
	5s	190°C	60°				
			90°				

							120°
					10s	260°C	60°
							90°
							120°

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

Tabla 4-3: Temperatura de activación de la aleta pectoral.

Muestra	Alambre		Temperatura de grabado experimental. °C	Temperatura de activación experimental constante °C	Angulo de activación
	Diámetro mm	Longitud mm			
1	0,5mm	60mm	180°C	40°C	60°
					90°
					120°
				60°C	60°
					90°
					120°
				85°C	60°
					90°
					120°
2	0,5mm	60mm	200°C	40°C	60°
					90°
					120°
				60°C	60°
					90°
					120°
				85°C	60°
					90°
					120°
3	0,5mm	60mm	210°C	40°C	60°
					90°
					120°
				60 °C	60°
					90°
					120°
				85°C	60°
					90°
					120°
4	0,5mm	60mm	220°C	40°C	60°
					90°
					120°
				60°C	60°

					90°
					120°
				85°C	60°
					90°
					120°
5	0,5mm	60mm	260°C	40°C	60°
					90°
					120°
				60 °C	60°
					90°
					120°
				85°C	60°
					90°
					120°
6	1mm	60mm	160°C	30°C	60°
					90°
					120°
				40°C	60°
					90°
					120°
				60°C	60°
					90°
					120°
7	1mm	60mm	180°C	30°C	60°
					90°
					120°
				40°C	60°
					90°
					120°
				60°C	60°
					90°
					120°
8	1mm	60mm	190°C	30°C	60°
					90°
					120°
				40°C	60°
					90°
					120°
				60°C	60°
					90°
					120°
9	1mm	60mm	200°C	30°C	60°
					90°

					120°
				40°C	60°
					90°
					120°
				60°C	60°
					90°
					120°
10	1	60mm	240	30°C	60°
					90°
					120°
				40°C	60°
					90°
					120°
				60°C	60°
					90°
					120°

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

En la tabla 3-3 y la tabla 4-3 se observa diferentes diámetros de cable los cuales son de 0.5mm y 1 mm respectivamente los cuales como ya los mencionamos anteriormente tienen diferentes rangos de activación, guíese del comentario de la tabla 2-3, se puede considerar de la misma forma que al estar fuera del rango de grabado no se produce el ángulo deseado y de la misma forma se considera con su activación, y al estar fuera de estos rangos el material en el rango tiende a fatigarse y en ciertos casos romperse o tomar formas distintas de la misma forma en la activación se produce deformaciones dependiendo del tiempo que se someta como punto importante en este tipo de actuador que es para la aleta pectoral al tener una longitud menor a la anterior su estructura se calienta aún más rápido por lo que se considera obtener un equilibrio entre los actuadores o se buscó una forma en este tipo de aleta pectoral de disipar su calor para que no se fatigue y pueda llegar a su punto óptimo.

Al analizar la tabla 3-3 y la tabla 4-3 por completo se contempló la utilización de un Nitinol de 1mm de diámetro con 60mm de longitud con una fuente de alimentación de 12V a 10 A, con un grabado de 180°C y una activación de 40°C a un tiempo de 5s y con un ángulo de 90°.

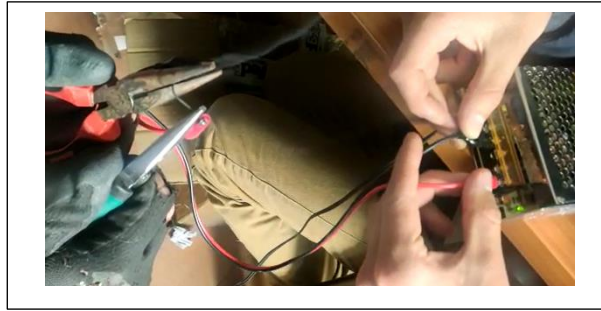


Figura 2-3: Grabado del nitinol usado para el actuador de aleta pectoral.

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

3.2.2. *Movimiento del actuador*

Con la finalidad de poder lograr el movimiento en las aletas tanto pectoral como caudal del robot subacuático se realizó diversas pruebas de grabado con distintos ángulos como se mostró en la tabla 5-3. Para esta prueba se tomó varias muestras sobre un actuador de Nitinol de donde se tomó como consideración la cantidad de fuerza que debe ejercer para mover la aleta en condiciones con agua y sin agua, incluyendo el peso de su recubrimiento, y el movimiento que se espera obtener para que su movimiento lo realice de manera efectiva.

Tabla 5-3: Pruebas del movimiento del actuador.

Muestra	Ángulo	Tiempo de activación Aplicado	Peso (gramos)	Condiciones de reacción en dos ambientes a diferentes temperaturas, desplazamiento alcanzado					
				Agua(°C)			Tierra(°C)		
				5	10	20	5	10	20
1	30°	2s	10g	20°	22°	22°	24°	26°	28°
			40g	15°	16°	18°	17°	20°	22°
			60g	12°	15°	15°	14°	16°	19°
		5s	10g	15°	18°	20°	20°	25°	30°
			40g	12°	16°	16°	15°	18°	25°
			60g	18°	20°	20°	22°	25°	25°
		10s	10g	28°	30°	30°	30°	30°	30°
			40g	25°	28°	30°	27°	30°	30°
			60g	20°	25°	25°	22°	28°	28°
2	45°	2s	10g	20°	22°	22°	24°	26°	28°

			40g	15°	16°	18°	17°	20°	22°
			60g	12°	15°	15°	14°	16°	19°
			5s	10g	40°	45°	45°	44°	45°
		40g		30°	35°	35°	32°	36°	36°
		60g		20°	26°	28°	25°	30°	30°
		10s	10g	45°	45°	44°	45°	45°	42°
			40g	45°	42°	40°	45°	40°	40°
			60g	45°	42°	39°	45°	40°	38°
		3	60°	2s	10g	20°	22°	22°	24°
40g	15°				16°	18°	17°	20°	22°
60g	12°				15°	15°	14°	16°	19°
5s	10g			55°	60°	60°	44°	60°	60°
	40g			50°	60°	58°	52°	60°	57°
	60g			45°	48°	48°	47°	50°	50°
10s	10g			60°	60°	58°	60°	60°	57°
	40g			60°	57°	55°	60°	55°	50°
	60g			60°	52°	50°	60°	52°	49°
6	90°	2s	10g	20°	22°	22°	24°	26°	28°
			40g	15°	16°	18°	17°	20°	22°
			60g	12°	15°	15°	14°	16°	19°
		5s	10g	75°	90°	90°	80°	90°	90°
			40g	70°	72°	72°	74°	78°	78°
			60g	65°	75°	76°	68°	78°	80°
		10s	10g	90°	90°	85°	90°	90°	86°
			40g	90°	85°	82°	90°	85°	84°
			60g	90°	84°	84°	90°	82°	82°
7	120°	2s	10g	20°	22°	22°	24°	26°	28°
			40g	15°	16°	18°	17°	20°	22°
			60g	12°	15°	15°	14°	16°	19°
		5s	10g	114°	120°	120°	115°	120°	120°
			40g	90°	92°	95°	95°	98°	98°
			60g	85°	86°	89°	85°	90°	92°
		10s	10g	116°	117°	120°	118°	120°	120°

			40g	120°	112°	110°	120°	112°	110°
			60g	115°	110°	109°	115°	108°	105°

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

Analizando los datos obtenidos en la tabla 5-3 se observa que con un ángulo de 90° sus variaciones con respecto al tiempo, y peso están dentro de un rango moderado de poder llegar a la consigna asignada para poder realizar un desplazamiento adecuado.

Como se observa en la Figura 3-3 el actuador después de las pruebas realizadas tiene a bajar sus grados ya que el grabado original es de 90° y su resultado final es de 70° teniendo un error de 20° después de realizar todas las pruebas con diferentes pesos, esto se puede producir como una fatiga del nitinol por llevarla al límite en cuanto a pesos y tiempos de activación.



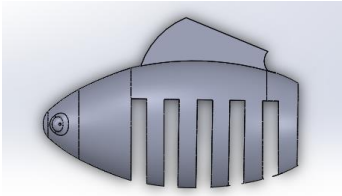
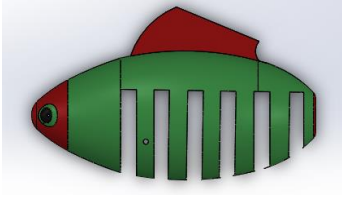
Figura 3-3: Grado final del actuador después de pruebas realizadas.

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

3.3. Validación del cuerpo, aletas pectoral y caudal

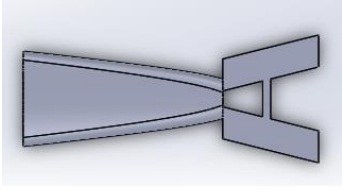
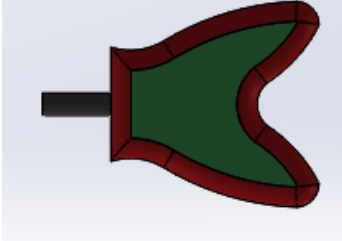
Para lograr el movimiento esperado del prototipo se debe tomar en cuenta un diseño que permita maximizar el empleo de fuerza que genera el actuador, es por ello por lo que se realizó varios diseños de las diferentes partes del cuerpo del prototipo, mismos que se presentan en las tablas 6-3, 7-3, 8-3 y las cuales describen una comparación con aspectos basados en el peso, agarre, fuerza y rigidez.

Tabla 6-3: Diseños del cuerpo del prototipo.

Diseño	Imagen	Material	Pruebas realizadas			
			Peso	Flexibilidad	Resistencia	Flotabilidad
1		PLA	30g	1°	90°C	Equilibrio
		TPU	30g	20°±5	80°C	Sumergido
2		PLA	35g	1°	90°C	Equilibrio
		TPU	34g	20°±5	80°C	Sumergido

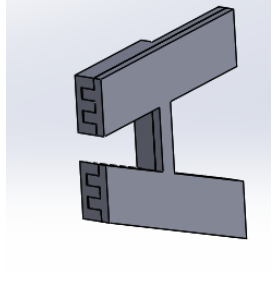
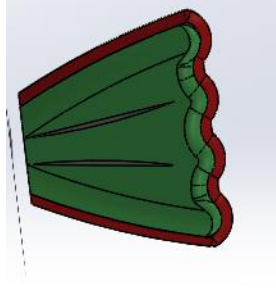
Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

Tabla 7-3: Diseños de la Aleta Caudal.

Diseño	Imagen	Material	Pruebas realizadas			
			Peso	Flexibilidad	Resistencia	Flotabilidad
1		PLA	10g	5°±2	90°C	Equilibrio
		TPU	10g	20°±5	80°C	Equilibrio
2		PLA	12g	1°	90°C	No se Hunde
		TPU	12g	10°±5	80°C	Equilibrio

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

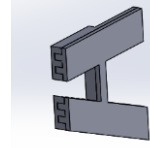
Tabla 8-3: Diseños de la Aleta Pectoral.

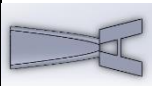

Diseño	Imagen	Material	Pruebas realizadas			
			Peso	Flexibilidad	Resistencia	Flotabilidad
1		PLA	5g	5°±2	90°C	Equilibrio
		TPU	5g	30°±5	80°C	Equilibrio
2		PLA	9g	1°	90°C	No se Hunde
		TPU	6g	20°±5	80°C	Equilibrio

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

Tomando en cuenta las tablas de comparación de los diferentes diseños se define en la tabla 7-3 que la mejor opción para un desplazamiento adecuado del robot en cuanto a la aleta caudal y pectoral es la utilización del diseño 1 de la tabla , y el diseño uno de la tabla 8-3, por la razón de sus características tomando como parámetros fundamentales la Resistencia y peso, siendo esta parte del prototipo la que estará sometida al funcionamiento del actuador la cual está en función de la temperatura de activación y fuerza del nitinol, para el cuerpo se determinó el diseño 1 de la tabla 6-3 por su propiedad de flotabilidad y flexibilidad, en cuanto a soportar cambios bruscos y por su facilidad de ensamblaje.

Tabla 9-3: Diseños escogidos para el robot subacuático bioinspirado.

Diseño	Imagen	Material	Pruebas realizadas				Material de Recubrimiento
			Peso	Flexibilidad	Resistencia	Flotabilidad	
1		PLA	5g	5°±2	90°C	Equilibrio	Fina capa de silicona antihongos

2		PLA	9g	1°	90°C	No se Hunde	Relleno de silicona antihongos
3		TPU	30g	20°±5	80°C	Sumergido	Fina capa de silicona antihongos y uniones con silicona caliente

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

3.4. Validación de posiciones de actuadores internos de aleta pectoral y caudal

Para un correcto movimiento en sentido de la corriente del agua o para el impulso en cuento a estabilidad y movimiento de las aletas pectorales ya que son un par y las dos tiene que coordinar o poseer el mismo movimiento síncrono se procede a realizar pruebas en cuando a posiciones y separaciones entre el cuerpo del prototipo y las aletas, así como su caracterización de pulsos en cuanto a su PWM de activación.

La tabla 10-3 muestran datos tomados con diferentes distancias entre actuadores para la aleta pectoral con las constantes de una distancia de nado de 400mm y con un Angulo de activación de actuador del 90°

La tabla 11-3 muestran datos tomados con diferentes distancias entre actuadores para la aleta caudal con las constantes de una distancia de nado de 400mm y con un Angulo de activación de actuador del 90°

La tabla 12-3 muestran datos tomados con diferentes distancias entre actuadores para las aletas pectoral y caudal, con las constantes de una distancia de nado de 400mm y con un Angulo de activación de actuador de 90°.

Se tiene en cuenta que las distancias entre actuadores internos o cables de nitinol para las respectivas aletas varían por su respectivo tamaño y forma de grabado, al realizar las pruebas se desactivaron aleta por aleta para registrar su funcionamiento.

Tabla 10-3: Validación de distancias entre Actuadores interno aleta pectoral

Muestra	Programación de activación Switch de posiciones	Distancia entre Actuadores internos	Desplazamiento esperado (Tiempo/s)	Desplazamiento registrado (Tiempo/s)
1	10	4mm	20s	22s
		6mm	21s	24s
		10mm	25s	32s
	11	4mm	40s	42s
		6mm	44s	48s
		10mm	50s	65s
	01	4mm	20s	22s
		10mm	24s	26s
		6mm	30s	44s

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

Tabla 11-3: Validación de distancias entre Actuadores interno aleta Caudal

Muestra	Programación de activación Switch de posiciones	Distancia entre Actuadores internos	Desplazamiento esperado (Tiempo/s)	Desplazamiento registrado (Tiempo/s)
1	10	4mm	10s	12s
		6mm	11s	14s
		10mm	15s	22s
	11	4mm	20s	22s
		6mm	24s	28s
		10mm	26s	35s
	01	4mm	10s	14s
		10mm	14s	18s
		6mm	16s	24s

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

Tabla 12-3: Validación de distancias entre Actuadores internos aleta caudal y pectoral

Muestra	Programación de activación Switch de posiciones	Distancia Entre Actuadores Interno Aleta Caudal	Distancia entre Actuadores internos Aleta Pectoral	Desplazamiento esperado (Tiempo/s)	Desplazamiento registrado (Tiempo/s)
1	10	4mm	4mm	6s	8s
			6mm	10s	12s
			10mm	13s	17s
		6mm	4mm	16s	19s
			6mm	14	18s

		10mm	10mm	22s	25s	
			4mm	20s	25s	
			6mm	22s	26s	
			10mm	24s	29s	
	11	4mm	4mm	9s	12s	
			6mm	13s	15s	
			10mm	15s	20s	
		6mm	4mm	18s	20s	
			6mm	20s	22s	
			10mm	23s	25s	
		10mm	4mm	25s	27s	
			6mm	26s	28s	
			10mm	30s	22s	
		01	4mm	4mm	11s	13s
				6mm	13s	17s
				10mm	17s	22s
	6mm		4mm	19s	23s	
			6mm	21s	25s	
			10mm	25s	30s	
	10mm		4mm	27s	32s	
6mm			26s	35s		
10mm			32s	38s		

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

En la programación de activación se puede interpretar como tres tipos de programas que ofrece el prototipo las cuales se describirán a continuación:

- La primera programación con el número binario 11 consta de flancos de subida y bajado tanto para el movimiento izquierdo y derecho respectivamente con 10 ciclos cada uno y con un descanso largo después de cumplir sus repeticiones.
- La segunda programación con el número binario 01 consta de flancos de subida y bajada rápidos con descanso entre ellos de 5s los cuales permiten movimiento lento de los actuadores.
- La tercera programación con el número binario 10 consta con una programación cíclica rápida con flancos de subida y bajada rápidos, pero con un ligero sobrecalentamiento de los actuadores.

3.4.1. Análisis de posiciones de los actuadores internos de aleta pectoral y caudal

Para la Tabla 10-3 hay que considerar que la programación (10) es la óptima para el desplazamiento y teniendo en cuenta la distancia de 4mm entre actuadores internos, obteniendo un tiempo eficaz con un rango de error mínimo esperado.

Para la Tabla 11-3 hay que considerar que la programación (10) es la óptima para el desplazamiento y teniendo en cuenta la distancia de 4mm entre actuadores internos, obteniendo un tiempo eficaz con un rango de error mínimo del esperado, adicional se obtiene un desplazamiento más grande por el mismo actuador en cuanto a tamaño memorando así el tiempo de llegada a la distancia deseada.

Para la Tabla 12-3 hay que considerar que la programación (10) es la óptima para el desplazamiento y teniendo en cuenta la distancia de 4mm para la aleta pectoral y 4 mm para la aleta caudal de sus actuadores internos o cables de nitinol obteniendo un tiempo un tiempo eficaz con un rango de error mínimo del esperado.

3.5. Caracterización de los sensores

Para determinar si el prototipo no incorpora errores adicionales a los sensores y presenta estabilidad en su diseño, se ejecutaron 2 pruebas para el sensor IMU 6050 que se detallan a continuación:

3.5.1. Validación del sensor de posición y estabilización

Después de que se realizó la comunicación entre el microcontrolador Arduino nano y el sensor IMU 6050, se procede a realizar la toma de datos con respecto a la trayectoria del pez bioinspirado en base a los ejes X y Y, siendo estos Roll y Yaw respectivamente.

Tabla 13-3: Datos de trayectoria de nado del Pez Bioinspirado en un ambiente controlado

Muestra	Posición enviada por el sensor				Posición Obtenida mediante el plano		Error				Error absoluto	
	Valores esperados		Valores obtenidos				Sensor		Sensor y plano			
	Roll	Yaw	Roll	Yaw	Roll	Yaw	Roll	Yaw	Roll	Yaw	Roll	Yaw
1	110	110	110	110	110	110	0	0	0	0	0	0
2	110	110	110	109	110	110	0	1	0	0	0	1
3	110	110	112	115	112	115	2	5	2	5	0	0
4	110	110	113	112	110	110	3	2	0	0	3	2
5	110	110	112	119	113	111	2	9	3	1	1	8
6	110	110	118	106	108	109	8	4	2	1	6	3
7	110	110	115	121	110	111	5	11	0	1	5	10
8	110	110	120	116	115	115	10	6	5	5	5	1
9	110	110	118	120	119	125	8	10	9	15	1	5

10	110	110	121	117	118	113	11	7	8	3	3	4
11	110	110	115	126	112	119	5	16	2	9	3	7
12	110	110	121	125	122	114	11	15	12	4	1	11
13	110	110	120	126	122	126	10	16	12	16	2	0
14	110	110	123	118	119	116	13	8	9	6	4	2
15	110	110	118	120	117	122	8	10	7	12	1	2
16	110	110	125	115	129	119	15	5	19	9	4	4
17	110	110	130	119	133	112	20	9	23	2	3	7
18	110	110	127	122	124	121	17	12	14	11	3	1
19	110	110	128	125	126	127	18	15	16	17	2	2
20	110	110	125	121	127	123	15	11	17	13	2	2
21	110	110	130	120	132	127	20	10	22	17	2	7
22	110	110	128	130	119	132	18	20	9	22	9	2
23	110	110	125	129	116	125	15	19	6	15	9	4
24	110	110	135	130	132	132	25	20	22	22	3	2
25	110	110	128	124	123	129	18	14	13	19	5	5
26	110	110	135	126	130	130	25	16	20	20	5	4
27	110	110	129	139	137	133	19	29	27	23	8	6
28	110	110	130	125	119	122	20	15	9	12	11	3
29	110	110	135	128	126	129	25	18	16	19	9	1
30	110	110	136	125	128	124	26	15	18	14	8	1
31	110	110	140	129	137	126	30	19	27	16	3	3
32	110	110	138	135	129	132	28	25	19	22	9	3
33	110	110	123	138	135	128	13	28	25	18	12	10
34	110	110	135	136	138	135	25	26	28	25	3	1
35	110	110	144	136	149	134	34	26	39	24	5	2
36	110	110	145	140	141	143	35	30	31	33	4	3
37	110	110	139	142	139	149	29	32	29	39	0	7
38	110	110	146	146	140	141	36	36	30	31	6	5
39	110	110	142	150	142	139	32	40	32	29	0	11
40	110	110	150	127	153	124	40	17	43	14	3	3
41	110	110	150	138	151	136	40	28	41	26	1	2
42	110	110	145	149	149	142	35	39	39	32	4	7
43	110	110	152	138	155	137	42	28	45	27	3	1
44	110	110	136	148	142	138	26	38	32	28	6	10
45	110	110	128	146	148	142	18	36	38	32	20	4
46	110	110	145	138	146	132	35	28	36	22	1	6
47	110	110	160	134	139	139	50	24	29	29	21	5

48	110	110	152	140	157	145	42	30	47	35	5	5
49	110	110	149	150	146	146	39	40	36	36	3	4
50	110	110	155	150	150	142	45	40	40	32	5	8
51	110	110	158	145	147	146	48	35	37	36	11	1
52	110	110	148	158	152	152	38	48	42	42	4	6
53	110	110	145	158	146	155	35	48	36	45	1	3
54	110	110	138	158	139	153	28	48	29	43	1	5
55	110	110	137	154	140	158	27	44	30	48	3	4
56	110	110	145	154	149	152	35	44	39	42	4	2
57	110	110	156	158	152	147	46	48	42	37	4	11
58	110	110	160	156	142	154	50	46	32	44	18	2
59	110	110	158	154	149	145	48	44	39	35	9	9
60	110	110	164	154	156	149	54	44	46	39	8	5

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

La tabla 13-3 muestra los datos obtenidos en 7 puntos de la trayectoria del robot bioinspirado, los cuales serán comparados y se obtendrá su error absoluto, como dos comparaciones se tiene el valor esperado o dato inicial del sensor y datos tomados en su trayectoria, adicional se colocó un plano con grados que se le acoplo al acuario de pruebas como se puede observar en la figura 1-3 que se encuentran con marcas de grados en su plano cartesiano para poder observar de una forma directa la variación de trayectoria en Roll y Yaw, con estos datos se obtendrá sus errores absolutos y al final un error absoluto final entre los dos errores anteriores.

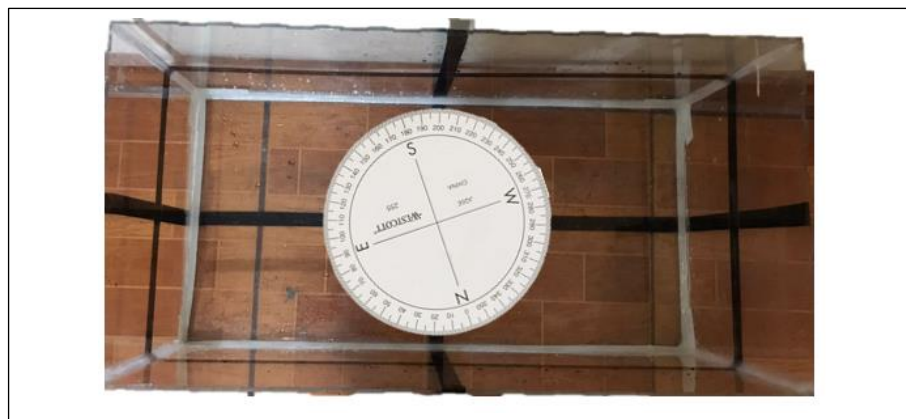


Figura 1-3: Trayectoria de nado de 7 puntos de referencia del Pez Bioinspirado

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

Como se observa en la figura 1-3 se encuentran dos gráficos de trayectoria siendo la representación de 7 puntos intermedios de los datos obtenidos en donde la primera representa la trayectoria optima y funcionar teniendo un movimiento lineal perfecto sin perturbaciones, en el

segundo son los datos reales obtenidos por el sensor teniendo una ligera desviación en cuanto a Roll y Yaw, la desviación se genera hacia la parte derecha de su trayectoria línea siendo así una trayectoria no lineal.

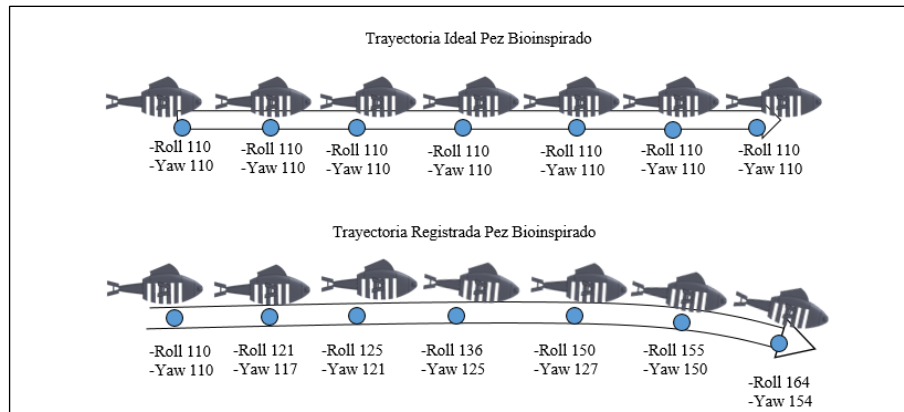


Figura 2-3: Trayectoria de nado de 7 puntos de referencia del Pez Bioinspirado

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

3.6. Prueba de tiempo de desplazamiento del robot bioinspirado

Para el análisis de esta prueba se tomó 12 muestras donde se evaluó el tiempo que tarda en desplazarse a una distancia de 400mm, con un ángulo de ataque de 90, con la programación de bists (10) que fue la elegida anteriormente en este apartado se tomara pruebas en base a la distancia de cable de alimentación y control en los actuadores del pez.

Tabla 14-3: Desplazamiento robot pez

Muestra	Cable de alimentación y control		Tiempo ideal esperado (s)	Tiempo detectado	Variación (Error Absoluto)
	Diámetro (mm)	Longitud (mm)			
1	0.5	1500	10s	12s	2s
2			10s	-	-
3		2000	10s	12,7s	2.7s
4			10s	-	-
5	1	1500	10s	12s	2s
6			10s	13,2s	3.2s
7		2000	10s	12s	2s
8			10s	13.5s	3.5s
9	2	1500	10s	12s	2s
10			10s	13.4s	3.4s
11		2000	10s	12.2s	2.2s
12			10s	12.5s	2.5s

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

En base a los datos obtenidos en la tabla 14-3, se observó que en las primeras muestras tomadas con el cable de 0.5mm de 1500mm y 2000mm en la primera prueba llegan a su consigna o a su punto final, pero en la segunda prueba de cada uno, el alambre tiende a calentarse al no tener un diámetro adecuado para disipar el calor por consiguiente se rompe.

Las muestras posteriores con el cable de 1mm con su respectiva longitud llegan todos a la consigna final con tiempos moderados y con un rango no tan alejado al deseado pero su cable tiende a calentarse y caliente a los actuadores y tienden a perder su forma de grabado, perdiendo estabilidad.

En las pruebas finales con el cable de 2mm sus tiempos son los esperados con un rango no tan alejado al deseado de error absoluto en cuanto a su cable tiende a calentarse ligeramente compensando con la temperatura a la cual era el agua que será controlada previamente, obteniendo así que el cable de 2mm es el adecuado a una longitud de 20000mm por ser un ambiente controlado donde no tiene mucha necesidad de alargar su espacio de trabajo del pez.

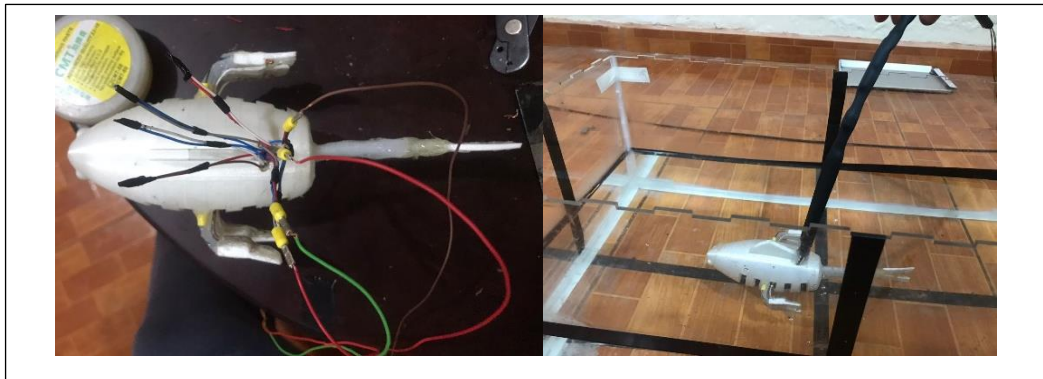


Figura 3-3: Colocación de cableado de alimentación según pruebas realizadas

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

Como se observa en la figura 2-3 de la colocación del cable con los actuadores se colocó uniones de aluminio con recubrimiento de plástico ya que son resistentes al calor y se adhieren muy bien al nitinol y al cable de alimentación adicional de poner disipar en un cierto porcentaje el calor generado y así evitar rupturas entre uniones.

3.7. Consumo de Corriente

Con la finalidad de determinar el consumo total de corriente del prototipo, se realizó un análisis, considerando la información técnica de cada elemento. La Tabla 15.2 presenta el consumo total de corriente y la potencia del prototipo.

Tabla 15-2: Consumo de corriente de los elementos del robot pez bioinspirado

N	Elemento	Corriente
1	Arduino mini	200 mA
2	Sensor IMU 6050	8 mA
3	Circuito de propulsión	1.2 A
4	Corriente total del sistema	508 mA
5	driver IBT-2	100 mA

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

Obtenida la corriente consumida por el sistema de control de (0.82 A) y conociendo que la capacidad de la batería es de 0.3 A

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

$$\frac{0.3 \text{ A/h}}{0.82 \text{ A}} = 0.37 \text{ h}$$

$$0.37 \text{ h} * \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} = 21 \text{ min}$$

Obtenida la corriente consumida por el sistema de propulsión de (1.2 A) y conociendo que la capacidad de la batería es de 0.65 A

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

$$\frac{0.65 \text{ A/h}}{1.2 \text{ A}} = 0.54 \text{ h}$$

$$0.54 \text{ h} * \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} = 32.4 \text{ min}$$

Acogiéndonos al menor tiempo de duración de la batería obtenemos como resultado una autonomía de 21 min en nuestro prototipo.

CAPÍTULO IV

4. EVALUACIÓN ECONÓMICA

En esta sección se presenta un análisis económico del disipativo tecnológico con el fin de determinar costos de diseño e implementación. La Tabla 4-1, presenta el análisis económico del robot subacuático bioinspirado utilizando actuadores basados en metales de memoria de forma. Tal análisis detalla: los componentes utilizados, la cantidad, valor unitario y el precio total en dólares americanos.

Tabla 1-4: Costo total de implementación del robot subacuático bioinspirado utilizando actuadores basado en metales con memoria de forma.

	Componentes	Cantidad	Precio Unitario (USD)	Precio Total (USD)
Materiales estructurales	Impresión del cuerpo.	3 ud.	12	33
	Impresión del molde de la aleta pectoral	3 ud.	6	18
	Impresión del molde la aleta caudal	3 ud.	8	24
	Recipiente para pruebas	1 ud.	47	47
	Estante de control y alimentación	1 ud.	25	25
Componentes <i>hardware</i>	Arduino nano	1 ud.	8	8
	Unidad de medición inercial IMU 6050	1 ud.	4	4
	Modulo Drive IBT2	2 ud.	24	48
	Metal con memoria de forma (SMA) Nitinol de 1 mm	1 ud.	25	25
	Metal con memoria de forma (SMA) Nitinol de 0.5 mm	1 ud.	25	25
	Fuente de alimentación de 12 V a 10 A.	1 ud.	11	11
	Impresión PCB	1 ud.	18	18
Materiales	Silicona antihongos	1 ud.	3.5	3.5

	Estaño	1 m	3	3
	Pasta para soldar	1 ud.	2	2
	Alambres calibre 24 AWG	10 m	0.6	6
	Costos varios			53

Realizado por: Aguirre, B. & Palacio, R., 2021

La tabla 1-4 presenta el costo total del robot subacuático bioinspirado correspondiendo a \$ 353.5 dólares americanos, sin incluir los costos de ingeniería y mano de obra.

CONCLUSIONES

- Se diseño e implemento un robot subacuático bioinspirado utilizando actuadores basados en metales de memoria de forma para el desplazamiento bidimensional en un ambiente controlado, donde se obtuvo datos de grabado y activación de los actuadores utilizados en las diferentes aletas y por medio de un sensor de medición inercial logramos obtener datos de posicionamiento de la trayectoria planificada en ciertos puntos del plano.
- Se realizo un estudio del estado del arte acerca de temas a fines a la investigación donde se logró determinar que varios autores en sus investigaciones se han enfocado en el sistema de propulsión de sus dispositivos bioinspirados para lograr un óptimo desplazamiento en el medio subacuático utilizando como medio de propulsión una aleta caudal y el par de aletas pectorales que utilizan como actuadores motores de inducción convencionales.
- Se selecciono equipos y materiales de acuerdo con las necesidades presentadas en la implementación del prototipo bioinspirado, como el material TPU y la silicona antihongos utilizados para la implementación del cuerpo y las diferentes aletas del robot que gracias a sus características de flexibilidad y resistencia térmica es adecuado para el funcionamiento del actuador.
- Para el diseño del prototipo bioinspirado se tomó en cuenta aspectos como forma, peso, tamaño y estabilidad, para posteriormente trabajar en el Software SolidWorks con lo cual nos permitió realizar ensamblaje, para obtener el modelo previo a su implementación.
- Se realizo la implementación del robot con alimentación y control fuera del robot por medio de un cordón umbilical, y dentro de él se instaló una tarjeta censora o unidad de medición inercial para obtener los datos durante la navegación.
- Las aletas pectorales y caudal diseñadas para el robot poseen características fundamentales de dinámica y equilibrio con las cuales se pudo implementar y montar sobre el robot logrando la propulsión y estabilidad deseada.
- El robot bioinspirado produce un movimiento hacia adelante cuando se tiene la aleta caudal funcionando con su sistema ondulatorio produciendo una perturbación en el agua teniendo como resultado que el robot avance.

- Con una sola aleta pectoral funcionando, dependiendo del lado de activación el pez logra girar en su propio eje teniendo un cierto grado de inclinación o desajuste de trayectoria.
- Los rangos de activación y grabado del nitinol recomendados por las fabricantes son un rango moderado optimo y en condiciones ideales, que al ponerlo en práctica no se cumplen a cabalidad porque no se toman en cuenta condiciones externas como el clima, la longitud de cable y la aplicación a la cual se está sometiendo el prototipo.
- Aplicamos pruebas en cuanto a la distancia entre cables de nitinol para los actuadores tanto de la aleta pectoral como caudal se considera que la distancia de 4mm entre ellos es la adecuada ya que todos se conectan en un punto estructural teniendo un equilibrio optimo y un movimiento adecuado del mismo.
- Realizamos el método experimental de dejar ciertas partes del cable al descubierto al momento de sumergir el pez que, ya que al realizar el corto se genera la activación y por ende la temperatura sube, esta cierta área compensara el calor siendo así un medio de disipación de calor por medio del agua siendo un tipo de sistema de enfriamiento directo.
- Al monitorear la temperatura del cable de alimentación de una manera experimental cuando el pez se encuentra funcionando, se observa que con un cable largo tiende a disipar el calor, pero consume más energía, y en un cable corto su temperatura se eleva causando problemas en los actuadores.
- El sensor IMU 6050 al utilizarlo para la detección de puntos de trayectoria del pez durante su funcionamiento tiende a descalabrarse y no se obtiene datos precisos los cuales se tendrán que comparar con un determinado número de muestras para optimizar su resultado.

RECOMENDACIONES

- Para elaborar un diseño bioinspirado es importante guiarse en la morfología de los peces para que al momento de realizar el diseño en un software CAD sea lo más parecido al real.
- El prototipo se puede mejorar implementando diferentes sensores que trabajen en conjunto con un control PID de lazo cerrado que le permita interactuar con las diferentes variables que se encuentran en un medio subacuático.
- Analizar nuevos diseños personalizados de actuadores basados en metales de memoria de forma para diferentes grados de libertad que según la aplicación la requiera.
- Al diseñar la estructura en el programa SolidWorks se toma en cuenta que es un diseño 3d y que las medidas se las realiza según el criterio de cada proyecto y al momento de imprimir como existen partes que van a encajar con otra estructura hay que dejar una cierta longitud de holgura para que la pieza encaje correctamente ya que al momento de imprimir dependiendo de la calibración de la impresora suele subir la capa 1 o 2 milímetros de la estipulada.
- Al momento de realizar grabados del nitinol se recomienda utilizar pinzas de metal ya que son buenas disipadoras de calor así no forzaremos al alambre a su punto de ruptura y adicional precautelar la seguridad de la persona que lo manipula
- Se recomienda al momento de realizar el ángulo en el nitinol de no forzar al límite el mismo porque tiende a romperse al exceder la fuerza de elasticidad que posee dicho material.
- Se recomienda utilizar dos fuentes diferentes de alimentación una para la alimentación de control de Arduino y otra para el control de fuerza para los actuadores ya que el consumo de estos es alto y se necesita una fuente constante para su autonomía.
- Al momento de realizar las pruebas se recomienda tener algunos actuadores o cables previamente grabados ya que como se experimenta con algunos voltajes y generan diferentes temperaturas se tiende a quemarse por sobre temperatura y quedan obsoletos y para optimizar tiempo tener en cuenta más actuadores de repuestos instantáneos.

- Utilizar un sensor más preciso que el IMU 6050 ya que en cuanto a toma de datos de posiciones al utilizarlo no es tan preciso porque requiere calibración cada que se realiza la prueba e inicializarlo según la posición en la que se encuentra
- Para futuras investigaciones e implementaciones del tema tratado se puede asignar un control de retroalimentación en cuanto a pérdida de posición inicial y así corregir su trayectoria, además de incorporar un sistema de enfriamiento más eficaz y que no interfiera con la movilidad del pez bioinspirado.

BIBLIOGRAFÍA

ÁLVAREZ, C., SALTAREN, R., ARACIL, R. and 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*, 2009. vol. 6, no. 3, pp. 92–100. ISSN 1697-7912. DOI 10.1016/S1697-7912(09)70268-7.

ARALUCE RUIZ, J. Automatización de un vehículo eléctrico. [en línea], 2018. [Consulta: 20 January 2022]. Disponible en: <https://ebuah.uah.es/dspace/handle/10017/34001>.

ARDUINO. Arduino - Home. [en línea], 2021. [Consulta: 20 January 2022]. Disponible en: <https://www.arduino.cc/>.

AZNAR GÓMEZ, M.J. “La definición del patrimonio cultural subacuático en la Convención UNESCO de 2001”. *revista PH*, 2008, pp. 100. ISSN 2340-7565. DOI 10.33349/2008.67.2583.

BADAMASI, Y.A. The working principle of an Arduino. *Proceedings of the 11th International Conference on Electronics, Computer and Computation*, 2014. DOI 10.1109/ICECCO.2014.6997578.

BARRERO GONZALEZ, F.E.R.M.I.N. *Sistemas de energía eléctrica*. 2004. S.l.: Paraninfo.

BELÉNDEZ, T. and BELÉNDEZ, A. Estática de fluidos, Física General, 2012. pp. 1-11.

BERENBRINK, P. y otros. “Equilibrio de carga egoísta distribuido”. *Revista SIAM de Computación*, 2007. pp. 1-17.

BY ALLDATASHEETCOM, P. This is information on a product in full production. L78xx, L78xxC, L78xxAB, L78xxAC. [en línea], 2013. S.l.: Disponible en: www.st.com.

CABRERA AGUAYO, F.R., SANTACRUZ SULCA, F.J., BERMEO JIMÉNEZ, B.H. and OROZCO CAZCO, C.A. Diseño de robot pez bioinspirado impulsado mediante aleta caudal con 1 GDL. *Ciencia Digital*, vol. 3, no. 3.3, 2019, pp. 345–355. ISSN 2602-8085. DOI 10.33262/cienciadigital.v3i3.3.826.

CARRASCO LEÓN, C. Estudio y análisis de diferentes actuadores basados en SMA. [en línea], 2019. [Consulta: 20 January 2022]. Disponible en: <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/29829>.

CARRERAS, M., RIDAO, P., GARCÍA, R., RIBAS, D. and PALOMERAS, N. Inspección visual subacuática mediante robótica submarina. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* [en línea], 2012, vol. 9, no. 1, pp. 34–45. [Consulta: 20 January 2022]. ISSN 1697-7912. DOI 10.1016/J.RIAI.2011.11.011. Disponible en: <https://riunet.upv.es/handle/10251/144307>.

CERNUSCA, D., MILICI, D.L. and UNGUREANU, C. “Theoretical and experimental contribution of using special actuators and materials with shape memory”. *Proceedings of the 2016 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering*, 2016. pp. 171–174. DOI 10.1109/ICEPE.2016.7781327.

DE, J., RODRIGUEZ, D., FERROL, G. and DE, O. Grupo innovación mariñas departamento de construcción navais tesis doctoral desarrollo de un sistema experimental de propulsión ondulante y del método de predicción de su comportamiento mediante CFD. S.l.: 2010. pp. 40-43.

DOLORES, J. and CERVANTES, J. Sistemas de distribución de energía eléctrica. *Azcapotzalco* [en línea], 1995, vol. 52, no. 1, pp. 300. [Consulta: 20 January 2022]. DOI 10.16/CSS/JQUERY.DATATABLES.MIN.CSS. Disponible en: <http://zaloamati.azc.uam.mx/handle/11191/1231>.

FARAH, S., ANDERSON, D.G. and LANGER, R. Physical and Mechanical Properties of PLA, and Their Functions in Widespread Applications-A Comprehensive Review. *Advanced Drug Delivery Reviews* [en línea], 2016, vol. 107, pp. 367–92. [Consulta: 25 January 2022]. DOI 10.1016/J.ADDR.2016.06.012. Disponible en: <http://hdl.handle.net/1721.1/112940>.

FLOR, S. de la. “Simulación numérica y correlación experimental de las propiedades mecánicas en las aleaciones con memoria de forma”. *Universitat Politècnica de Catalunya*, 2005. pp. 1-14.

GARBACZ, H.T.K. y M.M. “Hydrostatic extrusion. In Nanocrystalline Titanium.”, *Elsevier*, 2019. pp.1-18.

GILBERTSON, R.G. *Muscle Wires Project Book*, 2016. San Anselmo: Mondotronics. Inc. . pp. 85-93.

HIRATA, K. Development of Experimental Fish Robot, 2000. p.1

HOLWEISTRAT. Filamento de TPU - aprende todo sobre el material de TPU. [en línea], 2020. [Consulta: 26 January 2022]. Disponible en: <https://tractus3d.com/es/materials/tpu/>.

ISAAC. MPU6050: módulo para posicionamiento con Arduino | Hardware libre. [en línea], 2020. [Consulta: 20 January 2022]. Disponible en: <https://www.hwlibre.com/mpu6050/>.

ISSAC. Arduino Nano: todo lo que necesitas saber sobre esta placa de desarrollo | Hardware libre. [en línea], 2020. [Consulta: 20 January 2022]. Disponible en: <https://www.hwlibre.com/arduino-nano/>.

KAPP, M. Modelling a fuel cell propulsion system for multicopters. [en línea], 2019, [Consulta: 25 January 2022]. Disponible en: <https://scholar.sun.ac.za:443/handle/10019.1/106056>.

KAPP, M. and SMIT, W.J. Modelling a fuel cell propulsion system for multicopters. [en línea], 2019, [Consulta: 20 January 2022]. Disponible en: <https://scholar.sun.ac.za:443/handle/10019.1/106056>.

KAT0, N. and INABA, T. Control Performance of Fish Robot with Pectoral Fins in Horizontal Plane, 2012.p. 1.

KATZSCHMANN, R.K., DELPRETO, J., MACCURDY, R. and RUS, D. Exploration of underwater life with an acoustically controlled soft robotic fish. *Science Robotics* [en línea], 2018, vol. 3, no. 16. [Consulta: 20 January 2022]. ISSN 24709476. DOI 10.1126/SCIROBOTICS.AAR3449/SUPPL_FILE/AAR3449_SM.PDF. Disponible en: <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/scirobotics.aar3449>.

LACHAT, D., CRESPI, A. and IJSPEERT, A.J. “Boxybot, the fish robot design and realization”. *EPFL-Semester Project*, 2005.pp. 12-19. vol. 27.

LAUDER, G.M.PG. “Locomoción de los peces: cinemática e hidrodinámica de aletas flexibles en forma de lámina”. *Experimentos en fluidos*, 2007. pp.1-11.

LAUDER, G. v, Function of the Caudal Fin During Locomotion in Fishes: Kinematics, Flow Visualization, and Evolutionary Patterns 1. [en línea], 2000, S.l.: Disponible en: <https://academic.oup.com/icb/article/40/1/101/2140072>.

LEONARD, J.J. and BAHR, A. Autonomous Underwater Vehicle Navigation. *Springer Handbook of Ocean Engineering* [en línea], 2016. pp. 341–358. [Consulta: 25 January 2022]. DOI 10.1007/978-3-319-16649-0_14. Disponible en: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-16649-0_14.

LIU, J., DUKES, I., KNIGHT, R. and HU, H. DEVELOPMENT OF FISH-LIKE SWIMMING BEHAVIOURS FOR AN AUTONOMOUS ROBOTIC FISH.,2004. pp. 185-193.

LUIS DEL VALLE HERNÁNDEZ. Resistencia pull up y pull down con Arduino, para qué sirven. [en línea] , 2019. [Consulta: 16 January 2022]. Disponible en: <https://programarfacil.com/blog/arduino-blog/resistencia-pull-up-y-pull-down/>.

MANUEL, J., 2013. Resistente a hongos y moho para zonas exteriores susceptibles la humedad tales como ventanas, riesgos, características y potencialidades futuras. *Revista chilena de ingeniería,*

MARIN MONCADA, C.A., MARIN MONCADA, E. and VALDIVIESO ARMENDARIZ, C. Diseño de controlador empleando sistema arduino para posicionamiento de cabezal de impresión de tres dimensiones, ejemplo de aplicación utilizando prototipo de impresora 3d, 2014. p. 1.

MASOOMI, S.F., GUTSCHMIDT, S., CHEN, X.Q. and SELIER, M. "The kinematics and dynamics of undulatory motion of a tuna-mimetic robot". *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2015, vol. 12. ISSN 17298814. DOI 10.5772/60059.

MORENO, H.A., SALTARÉN, R., PUGLISI, L., CARRERA, I., CÁRDENAS, P. and ÁLVAREZ, C. Robótica Submarina: Conceptos, Elementos, Modelado y Control. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* [en línea], 2014, vol. 11, no. 1, pp. 3–19. [Consulta: 20 January 2022]. ISSN 1697-7920. DOI 10.1016/J.RIAI.2013.11.001. Disponible en: <https://polipapers.upv.es/index.php/RIAI/article/view/9474>.

MUÑOZ, M.L. Materiales inteligentes: aleaciones con memoria de forma (SMA). [en línea], 2009. S.l.: Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/258108524>.

NOVI, G. de, MELCHIORRI, C., GARCÍA, J.C., SANZ, P.J., RIDAO, P. and OLIVER, G. "A new approach for a reconfigurable autonomous underwater vehicle for intervention." *2009 IEEE International Systems Conference Proceedings*, 2009, pp. 23–26. DOI 10.1109/SYSTEMS.2009.4815765.

ROBOTICS SOCIETY OF JAPAN, IEEE ROBOTICS AND AUTOMATION SOCIETY, IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY and INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. *IROS 2016 : 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems : October 9-14, 2016, Daejeon Convention Center, Daejeon, 2016, Korea*. S.l.: s.n. ISBN 9781509037629.

ROBOTIX. Pez robótico | Robotix. [en línea] , 2019. [Consulta: 20 January 2022]. Disponible en: <https://www.soyrobotix.com/pez-robotico/>.

ROCHE VACACELA, L.F. SISTEMA DE ESTABILIZACIÓN Y CONTROL DE UN DRONE, MEDIANTE ARDUINO PARA VIDEO VIGILANCIA, DE LAS BARRAS DE LOS EQUIPOS DE LA LIGA RODRIGO PAZ. [en línea], 2019, [Consulta: 25 January 2022]. Disponible en: <http://repositorio.uisrael.edu.ec/handle/47000/2120>.

ROSERO GALEANO, B.I. and MAZÓN OLIVO, T.S. Diseño e implementación de un prototipo de robot subacuático autónomo dotado de un sistema de navegación inercial. [en línea], 2019, [Consulta: 20 January 2022]. Disponible en: <http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/13710>.

RUIZ, A.P. and GARRIDO, Q.G. *Ciencia y el Cosmos del siglo XXI*. S.l.: s.n., 2018. pp. 29-35.

SÁNCHEZ, K., COLINA, G., PIRE, M., DÍAZ, A. and CARRASQUERO, S. "China fabricante de aluminio personalizado de alta presión moldeado a presión de zinc proveniente de los desechos de tenerías". *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 2013. pp 193-203.

SYSTEMES, D. SOLIDWORKS. [en línea], 2002. [Consulta: 20 January 2022]. Disponible en: <https://www.solidworks.com/es>.

THOMAS, A.M.P., MILANO, M., G'SELL, M.G., FISCHER, K. and BURDICK, J. "Synthetic jet propulsion for small underwater vehicles". *Proceedings - IEEE International*

Conference on Robotics and Automation, 2005 , pp. 181–187. ISSN 10504729. DOI 10.1109/ROBOT.2005.1570116.

TORRES VARGAS, L.Z. “Cinemática y métodos de programación del robot.Introducción a la robótica”. *Grupo Editorial Éxodo*, 2012. pp. 1-19.

ULTIMAKER. Ultimaker PLA TDS – Ultimaker Support. [en línea], 2017. [Consulta: 26 January 2022]. Disponible en: <https://support.ultimaker.com/hc/en-us/articles/360011962720>.

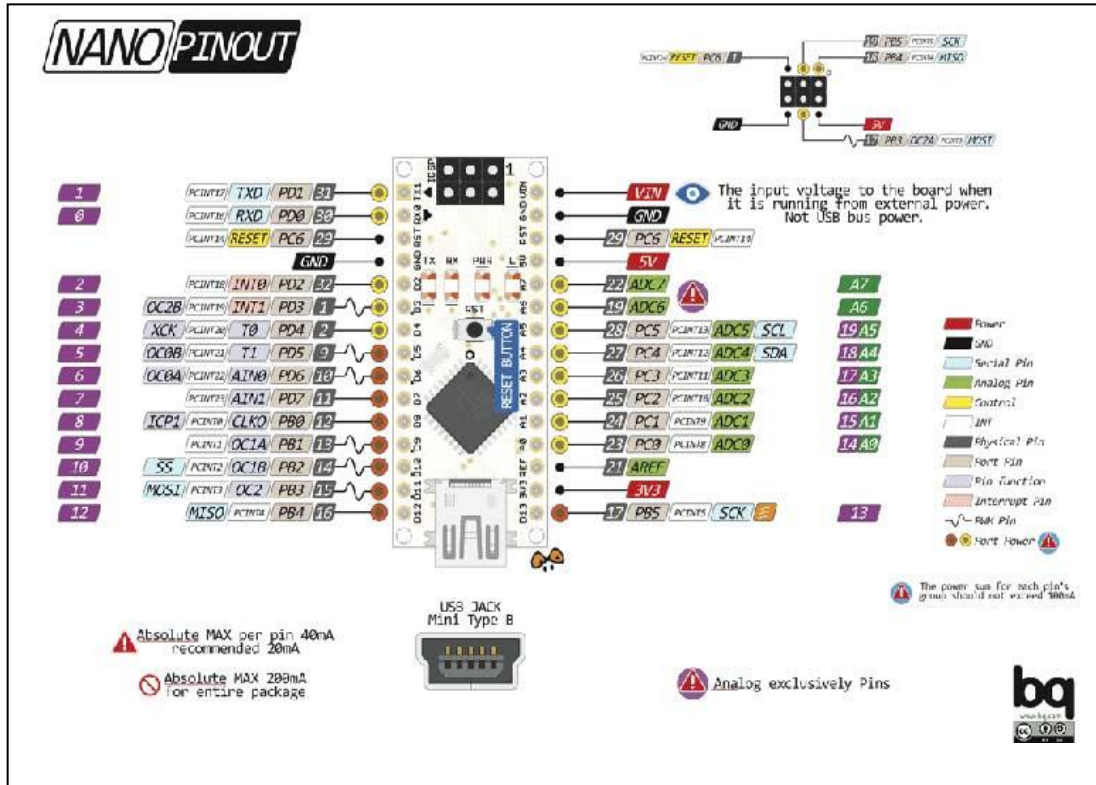
VALDÉS RUIZ, D. Estado del arte en robótica submarina. [en línea], 2015, [Consulta: 20 January 2022]. Disponible en: <https://riunet.upv.es/handle/10251/59038>.

VILLAR, Nicolas. and ACM DIGITAL LIBRARY. *Proceedings of the 3rd International Conference on Tangible and Embedded Interaction*. S.l.: ACM. ISBN 9781605584935. 2009. pp. 64-76.

VIZCAÍNO, J.R.L. and SEBASTIÁ, J.P. *LabView: entorno gráfico de programación*. S.l.: Marcombo. ISBN 8426716962. 2011, pp. 1-11.

ANEXOS

ANEXO A: DATOS TÉCNICOS DEL ARDUINO NANO.



MB0016: OEM ARDUINO NANO V3.0

Descripción:

Arduino Nano es una pequeña y completa placa basada en el ATmega328 (Arduino Nano 3.0) que se usa conectándola a una Protoboard. Tiene funcionalidad similar al Arduino UNO, pero con una presentación diferente. No posee conector para alimentación externa, y funciona con un cable USB Mini-B en vez del cable estándar.

Especificaciones

Microcontrolador: ATmega328.
 Tensión de Operación (nivel lógico): 5 V.
 Tensión de Entrada (recomendado): 7-12 V.
 Tensión de Entrada (límites): 6-20 V.
 Pines E/S Digitales: 14 (de los cuales 6 proveen de salida PWM).

AG Electrónica
 ¿Qué vamos a innovar hoy?

Entradas Analógicas: 8.
 Corriente máx por cada PIN de E/S: 40 mA.
 Memoria Flash: 32 KB (ATmega328) de los cuales 2KB son usados por el bootloader.
 SRAM: 2 KB (ATmega328).
 EEPROM: 1 KB (ATmega328).
 Frecuencia de reloj: 16 MHz.
 Dimensiones: 18.5mm x 43.2mm

Alimentación

El Arduino Nano puede ser alimentado usando el cable USB Mini-B, con una fuente externa no regulada de 6-20V (pin 30), o con una fuente externa regulada de 5V (pin 27). La fuente de alimentación es seleccionada automáticamente a aquella con mayor tensión.

El chip FTDI FT232RL que posee el Nano solo es alimentado si la placa está siendo alimentada usando el cable USB.

Cuando se utiliza una fuente externa (no USB), la salida de 3.3V (la cual es proporcionada por el chip FTDI) no está disponible y los pines 1 y 0 parpadearán si los pines digitales 0 o 1 están a nivel alto.

AG Electrónica
 ¿Qué vamos a innovar hoy?

ANEXO B: DATOS TÉCNICOS DEL DRIVER IBT-2

IBT-2 HIGH CURRENT 30A DC MOTOR DRIVER



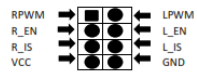
This driver uses two high current half bridge Infineon BTS 7960 chip for motor drive applications. Interfacing to a microcontroller is made easy using this driver which features current sensing, slew rate adjustment and protection against overn temperature, overvoltage, undern voltage, Overn current and short circuit.

This small size driver provides a cost optimized solution for protected high current PWM motor drives.

Feature

- Operating Voltage 5 to 27V (B+)
- Control motor speed by PWM up to 25 kHz.
- Motor forward and backward motion control
- Switched mode current limitation for reduced power dissipation.
- Current limitation level of 30 A Current sense capability
- Over-temperature shut down Over-voltage lock out.
- Large size heat sink is mounted to driver.
- Size: 4*5*1.2 cm.
- Weight: 66 gm.

Conexiones:



1	RPWM	Forward level or PWM signal input, active HIGH
2	LPWM	Reverse level or PWM signal input, active HIGH
3	R_EN	Forward drive enable input, HIGH enable, LOW Close
4	L_EN	Reverse drive enable input, HIGH enable, LOW Close
5	R_IS	Forward drive – side current alarm output
6	L_IS	Reverse drive – side current alarm output
7	VCC	5V power input to control board
8	GND	Ground.

B+, B-: Motor power Input.
M+, M-: Motor power Output.

ANEXO C: DATOS TÉCNICOS DEL REGULADOR DE VOLTAJE L7805

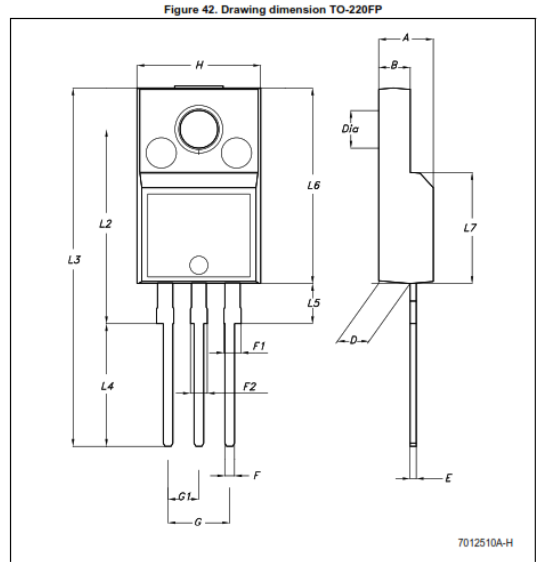
L78xx, L78xxC, L78xxAB, L78xxAC			Electrical characteristics			
5 Electrical characteristics						
Refer to the test circuits, $T_J = -55$ to 150 °C, $V_I = 10$ V, $I_O = 500$ mA, $C_I = 0.33$ μ F, $C_O = 0.1$ μ F unless otherwise specified.						
Table 4. Electrical characteristics of L7805						
Symbol	Parameter	Test conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
V_O	Output voltage	$T_J = 25^\circ\text{C}$	4.8	5	5.2	V
V_O	Output voltage	$I_O = 5$ mA to 1 A, $V_I = 8$ to 20 V	4.65	5	5.35	V
$\Delta V_O^{(1)}$	Line regulation	$V_I = 7$ to 25 V, $T_J = 25^\circ\text{C}$		3	50	mV
		$V_I = 8$ to 12 V, $T_J = 25^\circ\text{C}$		1	25	
$\Delta V_O^{(1)}$	Load regulation	$I_O = 5$ mA to 1.5 A, $T_J = 25^\circ\text{C}$			100	mV
		$I_O = 250$ to 750 mA, $T_J = 25^\circ\text{C}$			25	
I_d	Quiescent current	$T_J = 25^\circ\text{C}$			6	mA
ΔI_d	Quiescent current change	$I_O = 5$ mA to 1 A			0.5	mA
		$V_I = 8$ to 25 V			0.8	
$\Delta V_O/\Delta T$	Output voltage drift	$I_O = 5$ mA		0.6		mV/°C
eN	Output noise voltage	$B = 10$ Hz to 100 kHz, $T_J = 25^\circ\text{C}$			40	$\mu\text{V}/V_O$
SVR	Supply voltage rejection	$V_I = 8$ to 18 V, $f = 120$ Hz	68			dB
V_d	Dropout voltage	$I_O = 1$ A, $T_J = 25^\circ\text{C}$		2	2.5	V
R_O	Output resistance	$f = 1$ kHz		17		m Ω
I_{sc}	Short circuit current	$V_I = 35$ V, $T_J = 25^\circ\text{C}$		0.75	1.2	A
I_{scp}	Short circuit peak current	$T_J = 25^\circ\text{C}$	1.3	2.2	3.3	A

1. Load and line regulation are specified at constant junction temperature. Changes in V_O due to heating effects must be taken into account separately. Pulse testing with low duty cycle is used.

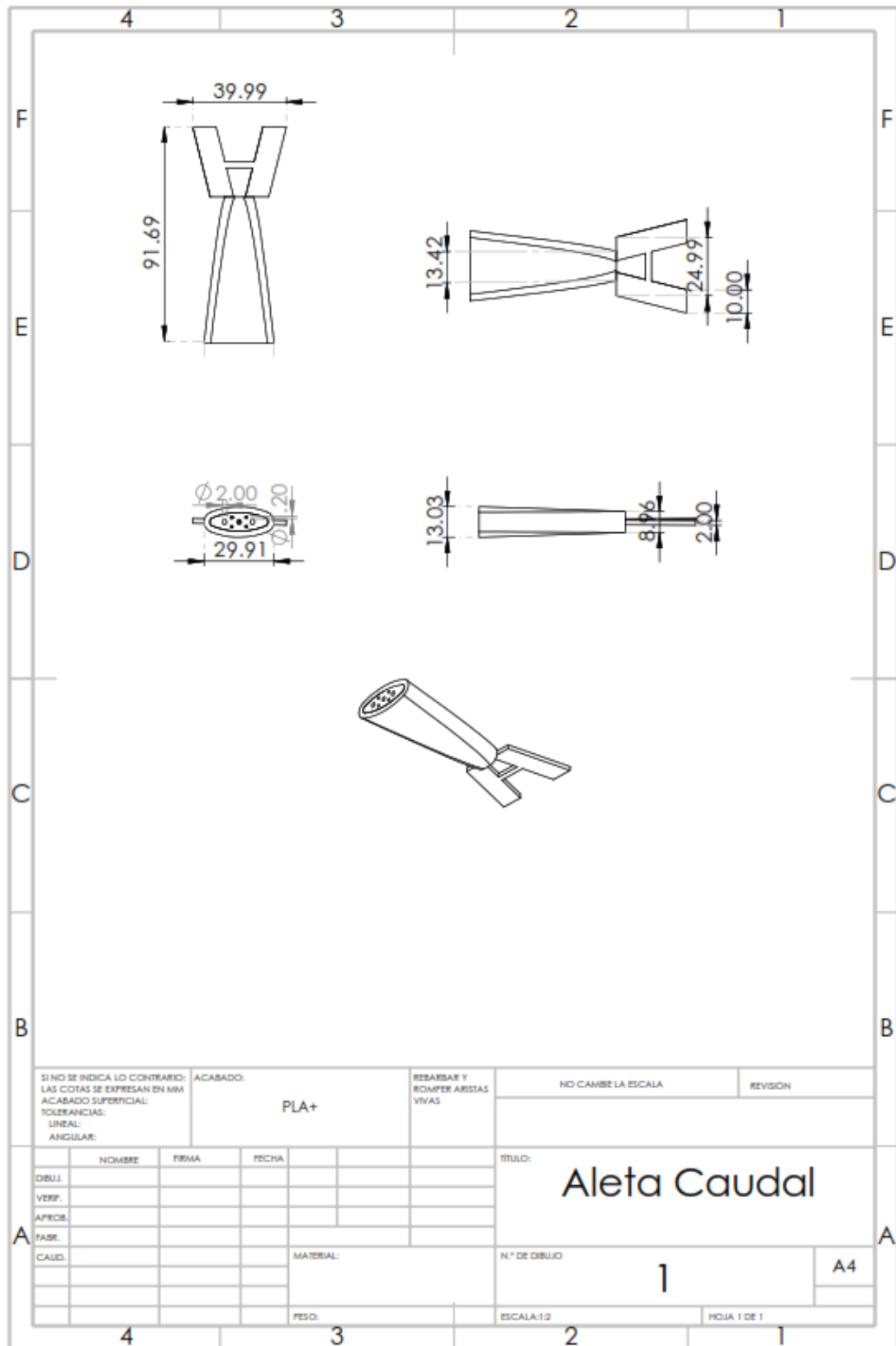
L78xx, L78xxC, L78xxAB, L78xxAC			Package mechanical data			
8 Package mechanical data						
In order to meet environmental requirements, ST offers these devices in different grades of ECOPACK® packages, depending on their level of environmental compliance. ECOPACK® specifications, grade definitions and product status are available at: www.st.com . ECOPACK® is an ST trademark.						
Table 23. TO-220 mechanical data						
Dim.	Type STD - ST Dual Gauge			Type STD - ST Single Gauge		
	mm.			mm.		
	Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.
A	4.40		4.60	4.40		4.60
b	0.61		0.88	0.61		0.88
b1	1.14		1.70	1.14		1.70
c	0.48		0.70	0.48		0.70
D	15.25		15.75	15.25		15.75
D1		1.27				
E	10.00		10.40	10.00		10.40
e	2.40		2.70	2.40		2.70
e1	4.95		5.15	4.95		5.15
F	1.23		1.32	0.51		0.60
H1	6.20		6.60	6.20		6.60
J1	2.40		2.72	2.40		2.72
L	13.00		14.00	13.00		14.00
L1	3.50		3.93	3.50		3.93
L20		16.40			16.40	
L30		28.90			28.90	
QP	3.75		3.85	3.75		3.85
Q	2.65		2.95	2.65		2.95

In spite of some difference in tolerances, the packages are compatible.

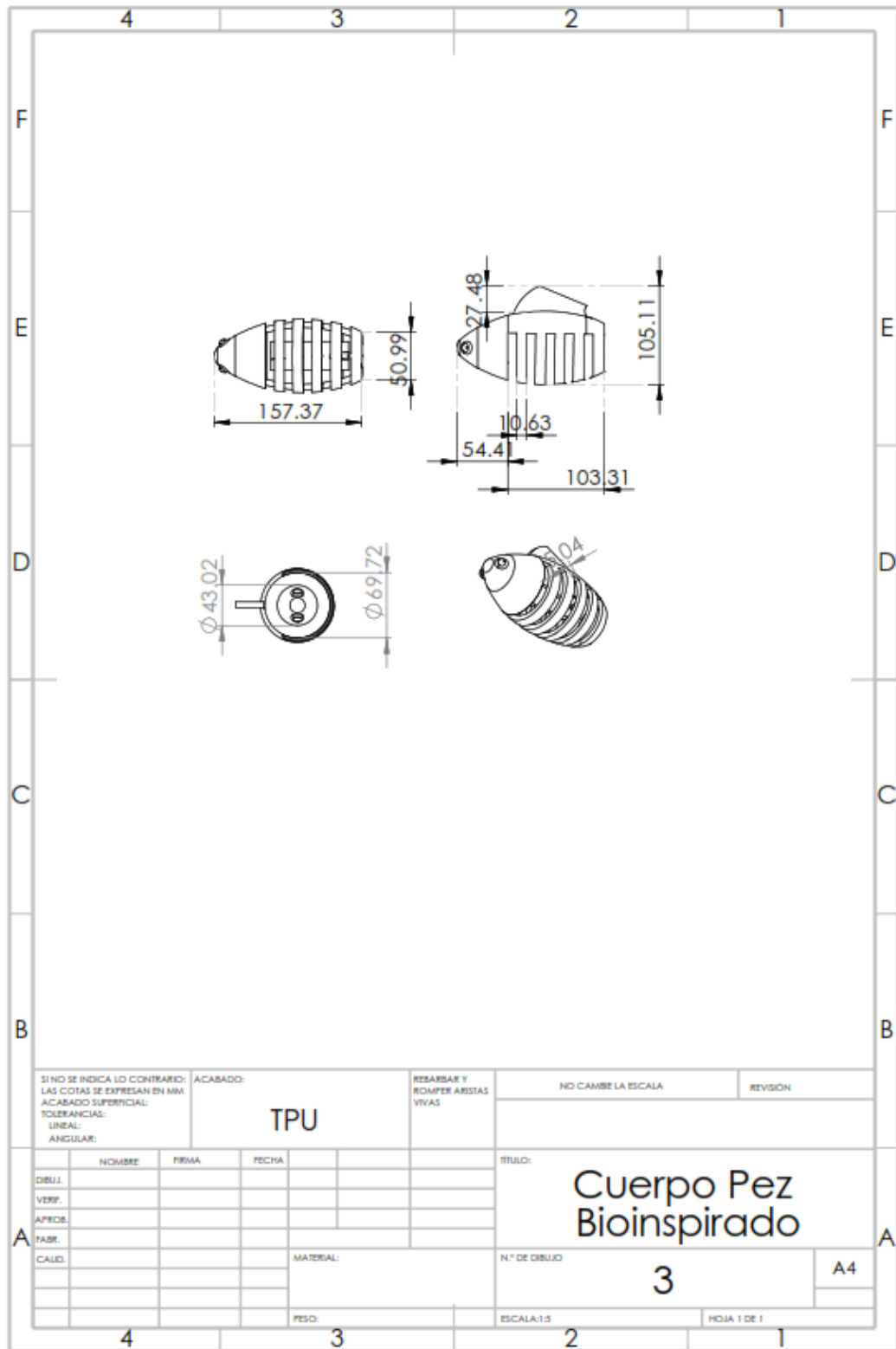
L78xx, L78xxC, L78xxAB, L78xxAC Package mechanical data



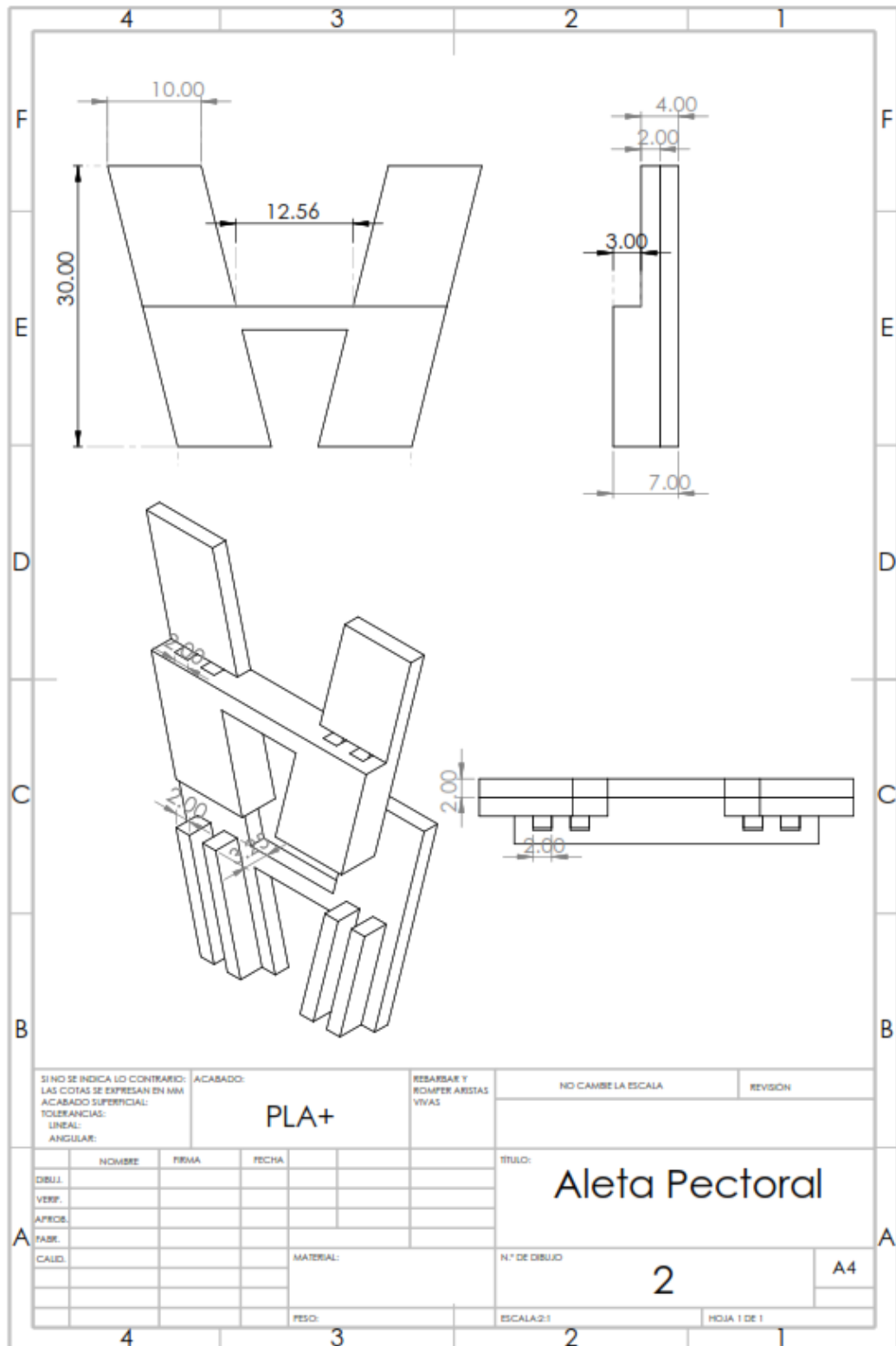
ANEXO D: PLANO DEL DISEÑO DEL PÉNDULO Y ALETA CAUDAL.



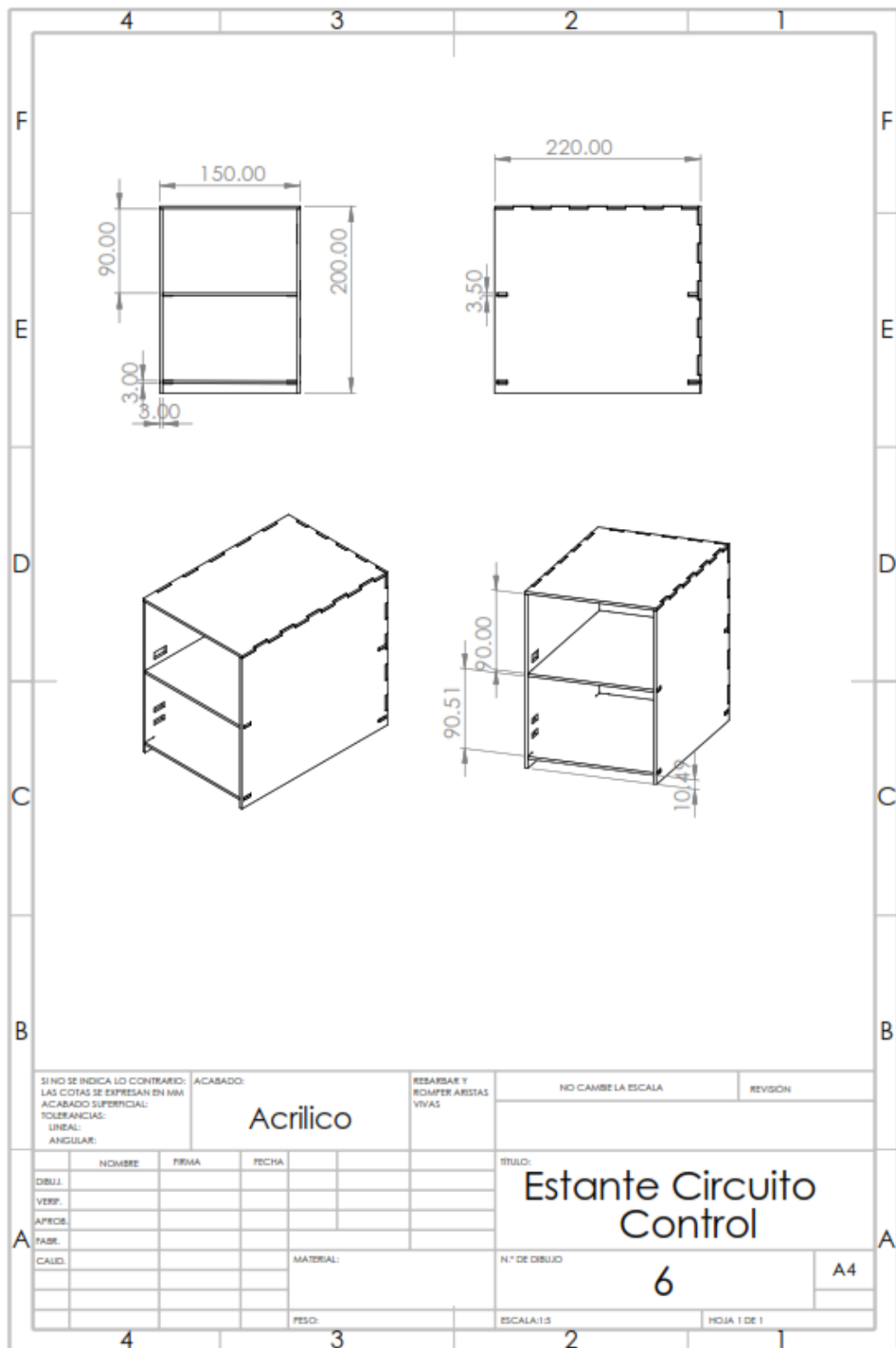
ANEXO E: PLANO DEL DISEÑO DEL CUERPO HIDRODINÁMICO.



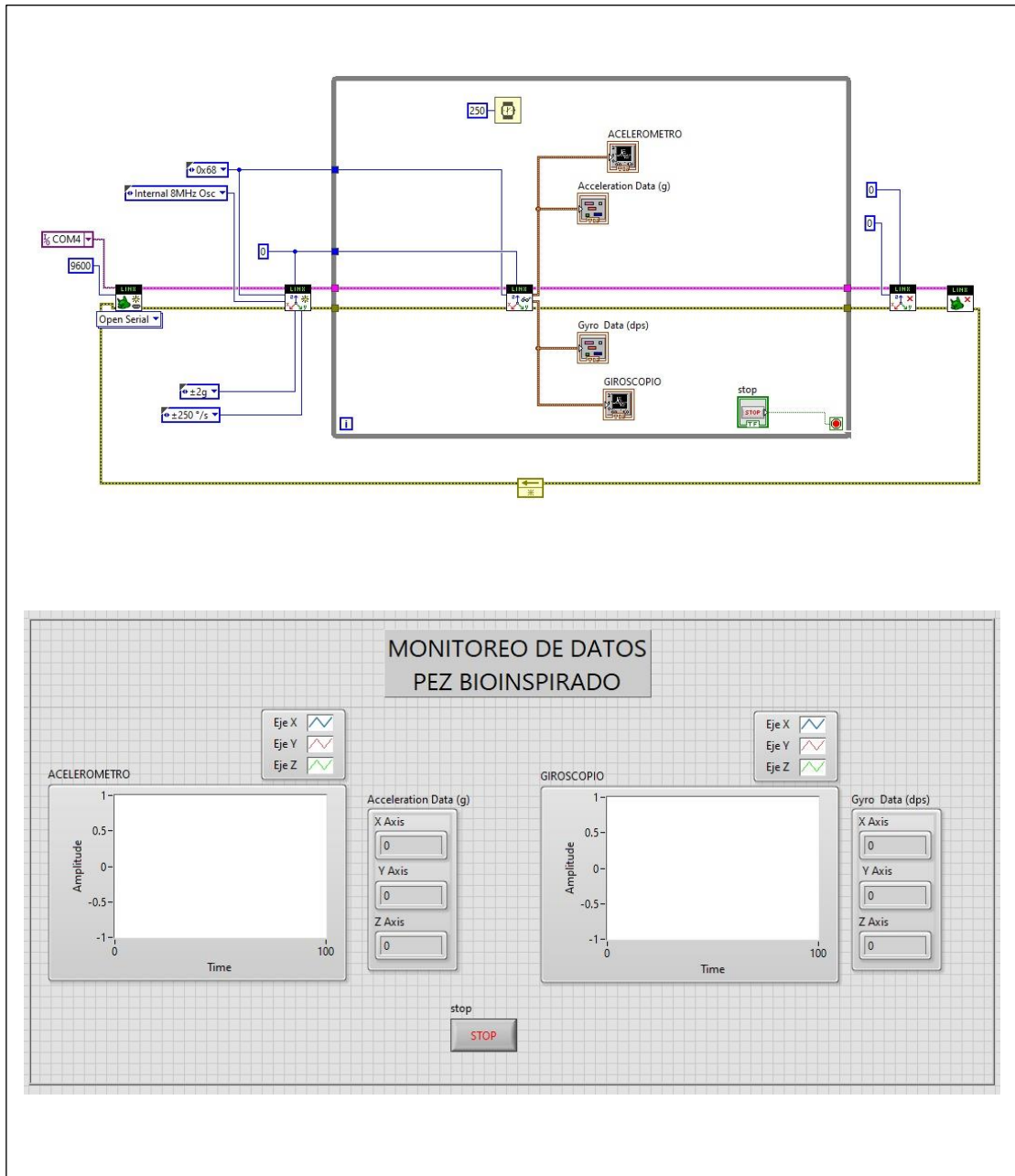
ANEXO F: PLANO DEL DISEÑO DEL PAR DE ALETAS PECTORALES.



ANEXO G: PLANO DEL DISEÑO DEL CONTENEDOR DEL CIRCUITO.



ANEXO H: PROGRAMACIÓN EN LABVIEW.



ANEXO I: CÓDIGO DEL SISTEMA.

```
#define DipSwitch1 3
#define DipSwitch2 7
int R_IS=1;
int Bot_Inicio = 12;
int R_EN=2;
int R_PWM=9;
int R_PWM2=11;
int L_IS=4;
int L_EN=5;
int L_PWM=6;
int L_PWM2=10;
int i, j, i1, j1;
int timer=1;

void setup() {
  pinMode (R_IS, OUTPUT);
  pinMode (R_EN, OUTPUT);
  pinMode (R_PWM, OUTPUT);
  pinMode (R_PWM2, OUTPUT);
  pinMode (L_IS, OUTPUT);
  pinMode (L_EN, OUTPUT);
  pinMode (L_PWM, OUTPUT);
  pinMode (L_PWM2, OUTPUT);
  pinMode(Bot_Inicio, INPUT);
  pinMode(DipSwitch1, INPUT);
  pinMode(DipSwitch2, INPUT);
  digitalWrite (R_IS, LOW);
  digitalWrite (L_IS, LOW);
  digitalWrite (R_EN, HIGH);
  digitalWrite (L_EN, HIGH);
  digitalWrite(L_PWM, 0);
  digitalWrite(L_PWM2, 0);
  analogWrite(R_PWM,10);
  delay(500);
```

```

analogWrite(R_PWM,0);
delay(25);
analogWrite(R_PWM2,10);
delay(500);
analogWrite(R_PWM2,0);
delay(25);
}
void loop() {
if (digitalRead(Bot_Inicio)==1){
if (digitalRead(DipSwitch1) == 1 && digitalRead(DipSwitch2) == 1) //11
{
while(1){
for (timer=1; timer<=10; timer++){
analogWrite(R_PWM,5);
delay(20);
analogWrite(R_PWM,10);
delay(380);
analogWrite(R_PWM,0);
delay(25);
analogWrite(R_PWM2,5);
delay(20);
analogWrite(R_PWM2,10);
delay(380);
analogWrite(R_PWM2,0);
delay(25);
}
analogWrite(R_PWM,LOW);
analogWrite(R_PWM2,LOW);
delay(5000);
}
}

if (digitalRead(DipSwitch1) == 1 && digitalRead(DipSwitch2) == 0) //10
{
while(1){
analogWrite(R_PWM,5);

```

```

delay(20);
analogWrite(R_PWM,10);
delay(380);
analogWrite(R_PWM,0);
delay(25);
analogWrite(R_PWM2,5);
delay(20);
analogWrite(R_PWM2,10);
delay(380);
analogWrite(R_PWM2,0);
delay(25);
analogWrite(R_PWM,LOW);
analogWrite(R_PWM2,LOW);
delay(2500);
}
}
  if (digitalRead(DipSwitch1) == 0 && digitalRead(DipSwitch2) == 01)  //01
{
  while(1){
    analogWrite(R_PWM,5);
    delay(20);
    analogWrite(R_PWM,10);
    delay(3800);
    analogWrite(R_PWM,0);
    delay(25);
    analogWrite(R_PWM2,5);
    delay(20);
    analogWrite(R_PWM2,10);
    delay(3800);
    analogWrite(R_PWM2,0);
    delay(25);
  }
}
}
}

```



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE
CHIMBORAZO

DIRECCIÓN DE BIBLIOTECAS Y RECURSOS DEL
APRENDIZAJE



UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS
REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 07 / 03 / 2022

INFORMACIÓN DE LOS AUTORES
Nombres – Apellidos: BRYAN ALEXANDER AGUIRRE CEVALLOS ROBERTO ISRAEL PALACIOS PRIETO
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA
Carrera: ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN
Título a optar: INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN
f. Analista de Biblioteca responsable:

