



## **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

### **“IMPLEMENTACIÓN DE UNA ALETA PECTORAL BIO- INSPIRADA CON TRES GRADOS DE LIBERTAD UTILIZANDO ACTUADORES NO CONVENCIONALES PARA EL CONTROL DE ORIENTACIÓN DE UN ROBOT PEZ *Pseudorinelepis genibarbis*”**

**DIEGO RAMIRO ÑACATO ESTRELLA**

Trabajo de titulación modalidad: Proyecto de Investigación y Desarrollo, presentado ante el Instituto de Posgrado y Educación Continua de la ESPOCH, como requisito parcial para la obtención del grado de:

**MAGISTER EN SISTEMAS DE CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN  
INDUSTRIAL**

Riobamba - Ecuador

Diciembre 2019



## ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

### CERTIFICACIÓN:

El Tribunal del trabajo de titulación certifica que:

El **trabajo de titulación modalidad proyectos de Investigación y Desarrollo**, titulado: “IMPLEMENTACIÓN DE UNA ALETA PECTORAL BIO-INSPIRADA CON TRES GRADOS DE LIBERTAD UTILIZANDO ACTUADORES NO CONVENCIONALES PARA EL CONTROL DE ORIENTACIÓN DE UN ROBOT PEZ *Pseudorinelepis genibarbisbio*”, de responsabilidad del señor Diego Ramiro Ñacato Estrella, ha sido minuciosamente revisado y se autoriza su presentación.

Tribunal

**ING. WILSON ARMANDO ZUÑIGA VINUEZAMsc.**

**PRESIDENTE**

---

**ING. FAUSTO RAMIRO CABRERA AGUAYO Msc.**

**DIRECTOR**

---

**ING. JORGE LUÍS HERNADEZ AMBATO PhD.**

**MIEMBRO**

---

**ING. PAÚL DAVID MORENO AVILÉS PhD.**

**MIEMBRO**

---

## **DERECHOS INTELECTUALES**

Yo, Diego Ramiro Ñacato Estrella, declaro que soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en este trabajo de titulación modalidad Proyectos de investigación y desarrollo y que el patrimonio intelectual generado por el mismo pertenece exclusivamente a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

---

**DIEGO RAMIRO ÑACATO ESTRELLA**

No. Cédula 060333153-9

Yo, Diego Ramiro Ñacato Estrella declaro que el presente proyecto de investigación es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de titulación de Maestría.

---

DIEGO RAMIRO ÑACATO ESTRELLA

No. Cedula 060333153-9

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo dedico a mi familia por confiar en mí y brindarme el apoyo incondicional en el transcurso del mismo.

A mi padre Ramiro y mi abuelito Tomás que desde el cielo siguen guiando mi camino para poder continuar con sus enseñanzas y ser un hombre de bien como ellos lo fueron.

Ramiro

## **AGRADECIMIENTO**

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por haberme guiado a lo largo de mi carrera, por darme la fuerza en los momentos de debilidad, de la misma manera agradezco a mis padres Ramiro y Elsa por haber sido un apoyo incondicional, por todos los valores que me han inculcado, por ser un ejemplo de perseverancia para ser una persona de bien.

Ramiro

## CONTENIDO

RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Problema de Investigación .....</b>	<b>1</b>
<i>1.1.1 Planteamiento del problema .....</i>	<i>1</i>
<b>1.2 Formulación del problema .....</b>	<b>3</b>
<b>1.3 Preguntas Directrices.....</b>	<b>4</b>
<b>1.4 Objetivos de la investigación .....</b>	<b>4</b>
<i>1.4.1 Objetivo General.....</i>	<i>4</i>
<i>1.4.2 Objetivos Específicos: .....</i>	<i>4</i>
<b>1.5 Justificación de la investigación.....</b>	<b>4</b>
<b>1.6 Hipótesis General .....</b>	<b>6</b>
<b>CAPÍTULO II</b>	
<b>2 MARCO DE REFERENCIA .....</b>	<b>7</b>
<b>2.1 Antecedentes del problema.....</b>	<b>7</b>
<b>2.2 Base teórica.....</b>	<b>9</b>
<i>2.2.1 Aleta del pez.....</i>	<i>9</i>
<i>2.2.2 Sistemas de aletas artificiales .....</i>	<i>12</i>
<i>2.2.2.1 Mecanismos de Natación .....</i>	<i>12</i>
<i>2.2.3 Aleación de memoria de forma SMA .....</i>	<i>12</i>
<i>2.2.3.1 Nitinol.....</i>	<i>13</i>
<i>2.2.4 Hidrostática .....</i>	<i>14</i>
<i>2.2.4.1 Principio de Arquímedes.....</i>	<i>14</i>
<i>2.2.4.2 Principio de Pascal.....</i>	<i>14</i>

2.2.4.3 Flotabilidad.....	15
2.2.4.3.1 Flotabilidad de los peces .....	15
2.2.5 <b>Sistemas de control automático</b> .....	16
2.2.5.1 <i>Sistemas de control de lazo abierto</i> .....	16
2.2.5.2 <i>Sistemas de control lazo cerrado</i> .....	16
2.2.5.3 <i>Controlador</i> .....	17
2.2.5.3.1 <i>Modos de Control</i> .....	17
2.2.6 <b>Rotación sobre los ejes</b> .....	18
2.2.7 <b>Articulaciones de los huesos</b> .....	19
 <b>CAPÍTULO III</b>	
<b>3 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN</b> .....	<b>20</b>
<b>3.1 Mecánica de movimientos</b> .....	<b>20</b>
<b>3.2 Diseño de aleta pectoral</b> .....	<b>22</b>
3.2.1 <i>Materiales</i> .....	22
3.2.2 <i>Actuadores no convencionales</i> .....	22
3.2.2.1 <i>Actuador Migaone</i> .....	22
3.2.2.2 <i>Miga Analog Driver v5 - MOSFET Switch</i> .....	23
3.2.2.3 <i>Actuador de metal con memoria giratoria</i> .....	24
<b>3.3 Técnica de control implementada</b> .....	<b>25</b>
3.3.1 <i>Sensor</i> .....	25
3.3.2 <i>Microcontrolador</i> .....	26
3.3.3 <i>Comunicación</i> .....	29
3.3.4 <i>Interfaz HMI</i> .....	29
<b>3.4 Implementación de Prototipo</b> .....	<b>32</b>
 <b>CAPÍTULO IV</b>	
<b>4 PRUEBAS Y RESULTADOS</b> .....	<b>35</b>
<b>4.1 Configuración de los dispositivos y esquemas de conexión del Prototipo</b> .....	<b>35</b>
4.1.1 <i>Diseño mecánico</i> .....	35

<i>4.1.2 Diseño de la aleta</i> .....	37
<i>4.1.3 Configuración módulos de comunicación</i> .....	38
<b>4.2 Pruebas de funcionamiento</b> .....	39
<i>4.2.1 Prueba de comunicación inalámbrica</i> .....	40
<i>4.2.2 Prueba de activación Grado de libertad 1</i> .....	41
<i>4.2.3 Prueba de activación Grado de libertad 2</i> .....	43
<i>4.2.4 Prueba de activación Grado de libertad 3</i> .....	44
<b>4.3 Funcionamiento del prototipo</b> .....	45
<b>4.4 Análisis económico de la implementación del prototipo</b> .....	46
<b>4.5 Validación de la hipótesis</b> .....	47
<i>4.5.1 Problema</i> .....	47
<i>4.5.1.1 Grado de libertad 1</i> .....	48
<i>4.5.1.2 Grado de libertad 2</i> .....	49
<i>4.5.1.3 Grado de libertad 3</i> .....	51
<b>CONCLUSIONES</b> .....	54
<b>RECOMENDACIONES</b> .....	55
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	
<b>ANEXOS</b>	

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1 – 3:</b> Parámetros de escalonado .....	28
<b>Tabla 1 – 4:</b> Variables encendido apagado.....	41
<b>Tabla 2 – 4:</b> Variables grado de libertad 1 .....	42
<b>Tabla 3 – 4:</b> Variables grado de libertad 2 .....	44
<b>Tabla 4 – 4:</b> Variables grado de libertad 3 .....	45
<b>Tabla 5 – 4:</b> Análisis de costo .....	47

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1 – 2:</b> Aletas de los peces y su ubicación.....	11
<b>Figura 2 – 2:</b> Transformación entre fases del Nitinol .....	14
<b>Figura 3 – 2:</b> Detalle de vejiga natatoria .....	15
<b>Figura 4 – 2:</b> Diagrama de bloque para un sistema de lazo abierto .....	16
<b>Figura 5 – 2:</b> Diagrama de bloques para un sistema de lazo cerrado .....	17
<b>Figura 6 – 2:</b> Yaw, Pitch, Roll .....	18
<b>Figura 1 – 3:</b> Articulación rotacional modelada 3d.....	20
<b>Figura 2 – 3:</b> Diseño impreso en 3d .....	21
<b>Figura 3 – 3:</b> Articulación rotacional impresa en 3d.....	21
<b>Figura 4 – 3:</b> Actuador Migaone .....	23
<b>Figura 5 – 3:</b> Miga Analog Driver v5 .....	24
<b>Figura 6 – 3:</b> a) NM70R-2P b) NM70R-6P .....	24
<b>Figura 7 -3:</b> Esquema propuesto técnica de control .....	25
<b>Figura 8 – 3:</b> Ejes MPU-6050 .....	26
<b>Figura 9 – 3:</b> Pines de entrada salida Arduino nano.....	26
<b>Figura 10 – 3:</b> Lectura de offset para calibración .....	27
<b>Figura 11 – 3:</b> Calibración acelerómetro y giroscopio.....	28
<b>Figura 12 – 3:</b> Módulo de comunicación Xbee s1 pro .....	29
<b>Figura 13 – 3:</b> Adquisición de datos .....	30
<b>Figura 14 – 3:</b> Envío de datos mediante puerto serial .....	30
<b>Figura 15 – 3:</b> Gráfico de datos.....	31
<b>Figura 16 – 3:</b> Interfaz de comunicación .....	31
<b>Figura 17 – 3:</b> a) Prototipo de aleta 3d; b) Prototipo de silicona .....	32
<b>Figura 18 – 3:</b> Prototipo propuesto .....	33

<b>Figura 19 – 3:</b> Prototipo implementado .....	33
<b>Figura 20 – 3:</b> Pseudorinelepis genibarbisbio (Carachama) .....	34
<b>Figura 1 – 4:</b> Articulación rotacional .....	35
<b>Figura 2 – 4:</b> Ubicación de los grados de libertad.....	36
<b>Figura 3 – 4:</b> Implementación articulación rotacional .....	36
<b>Figura 4 – 4:</b> Aleta implementada.....	37
<b>Figura 5 – 4:</b> Aleta de la carachama.....	38
<b>Figura 6 – 4:</b> Configuración Xbee.....	38
<b>Figura 7 – 4:</b> Datos recibidos X-CTU .....	39
<b>Figura 8 – 4:</b> Datos recibidos mediante monitor serial .....	39
<b>Figura 9 – 4:</b> Activación Movimiento 1 GDL 1 .....	42
<b>Figura 10 – 4:</b> Activación Movimiento 2 GDL 2.....	43
<b>Figura 11 – 4:</b> Activación Movimiento 3 GDL 3.....	45
<b>Figura 12 – 4:</b> Prototipo Implementado .....	46
<b>Figura 13 – 4:</b> Resultado del test de Wilcoxon para grado de libertad 1 .....	48
<b>Figura 14 – 4:</b> Distribución de variable test de Wilcoxon grado de libertad 1 .....	49
<b>Figura 15 – 4:</b> Resultado del test de Wilcoxon para grado de libertad 2 .....	50
<b>Figura 16 – 4:</b> Distribución de variable test de Wilcoxon grado de libertad 2 .....	50
<b>Figura 17 – 4:</b> Resultado del test de Wilcoxon para grado de libertad 3 .....	51
<b>Figura 18 – 4:</b> Distribución de variable test de Wilcoxon grado de libertad 3 .....	52

## **RESUMEN**

En la presente investigación se implementó un prototipo de aleta de tres grados de libertad con control todo o nada y comunicación inalámbrica. Los grados de libertad se encuentran ligados a movimientos de Yaw, Pitch y Roll, estos se ejecutan desde una interfaz gráfica hombre máquina. Consta de tres módulos, el módulo de sensado se comunica de manera inalámbrica utilizando tecnología xbee. El primero, denominado módulo de sensado formado por sensores acelerómetro y giroscopio que recogen la información proporcionada por los movimientos de la aleta y transmiten de manera inalámbrica hasta el módulo de control. El segundo, un módulo de control conformado por un microcontrolador Atmega 328p montado sobre una tarjeta de desarrollo Arduino que se encarga de recibir las señales de los sensores, filtrar, linealizar y escalar los valores obtenidos y enviar señales de control a los actuadores. El tercero, un módulo de actuación que se encuentra conformado por actuadores de nitinol rotacionales y lineales que se encargan del movimiento de la aleta. Todos estos módulos se encuentran montados sobre una estructura impresa en 3D, e impermeabilizada con un sellador de silicona anti-hongo. La interfaz gráfica hombre máquina permite el control de cada grado de libertad de forma inalámbrica desde la computadora, así como visualizar los datos de aceleración y velocidad angular para poder formar un gráfico tridimensional para una mejor apreciación de la orientación del prototipo. Con las pruebas realizadas se comprobó que el sistema implementado es adaptable tanto en software como en hardware además que es sumergible. Se concluye que el robot bio inspirado cumple con los tres grados de libertad necesario para su control de orientación, se recomienda para futuras aplicaciones desarrollar los actuadores con memoria de forma de manera personalizada de acuerdo a los grados de libertad a implementar.

**PALABRAS CLAVE:** <TECNOLOGIA Y CIENCIAS DE LA INGENIERIA>, <CONTROL AUTOMATICO>, <ROBOTICA>, <ROBOT BIOINSPIRADO>, <CONTROL INALAMBRO>, <MICROCONTROLADOR>, <TRIDIMENSIONAL>.

## **ABSTRACT**

In this investigation, a three-degree fin prototype with all or nothing control and wireless communication was implemented. The degrees of freedom are linked to movements of Yaw, Pitch and Roll, these are executed from a graphic interface man machine. It consists of three modules, the sensor module communicates wirelessly using xbee technology. The first, called the sensor module formed by accelerometer and gyroscope sensors that collect the information provided by the fin movements and transmit wirelessly to the module of control. The second, a control module consisting of an Atmega 328p microcontroller mounted on an Arduino development card that is responsible for receiving the signals from the sensors, filtering, linearizing and scaling the obtained values and sending control signals to the actuators. The third, an actuation module that is made up of rotational and linear nitinol actuators that are responsible for the movement of the fin. All these modules are mounted on a 3D printed structure, and waterproofed with an anti-fungus silicone sealant. The graphic man-machine interface allows the control of each degree of freedom wirelessly from the computer, as well as visualizing the acceleration and angular velocity data to form a three-dimensional graph for a better appreciation of the orientation of the prototype. With the tests carried out it was verified that the implemented system is adaptable in both software and hardware, and that it is submersible. It is concluded that the bio-inspired robot complies with the three degrees of freedom necessary for its orientation control, it is recommended for future applications to develop the actuators with a customized shape according to the degrees of freedom to be implemented.

**KEYWORDS:** <ENGINEERING TECHNOLOGY AND SCIENCES>, <AUTOMATIC CONTROL>, <ROBOTICS>, <BIOINSPIRED ROBOT>, <WIRELESS CONTROL>, <MICROCONTROLLER,> <THREE-DIMENSIONAL.>

## **Términos Usados**

**SMA:** Aleación de memoria de forma

**Robofish:** El pez robot que puede olfatear y limpiar contaminaciones en el mar.

**ST:** Structured Text

**GDL:** Grados de libertad

**Bioinspirados:** Robots basados en un cuerpo biológico

**Soft Robotic:** Pez robótico suave

**Nitinol:** Clase de materiales inteligentes

**Hidrostática:** Estudio de los fluidos en estado de reposo

**Roll:** La rotación alrededor del eje de adelante hacia atrás.

**Pitch:** La rotación alrededor del eje de lado a lado.

**Yaw:** La rotación alrededor del eje vertical.

**Robofish:** El pez robot que puede olfatear y limpiar contaminaciones en el mar.

## **Listado de anexos**

**Anexo A:** Datos MPU6050

**Anexo B:** Calibración MPU6050

**Anexo C:** Escalonado MPU6050

**Anexo D:** Pruebas Realizadas

# CAPÍTULO I

## 1 INTRODUCCIÓN

### 1.1 Problema de Investigación

#### 1.1.1 Planteamiento del problema

Los científicos a menudo buscan inspiración en la naturaleza, la misma que puede ofrecer soluciones a los desafíos tecnológicos, biomédicos o industriales. El diseño bio inspirado, también conocido como diseño biomimético, tiene muchas aplicaciones en los productos cotidianos. En la actualidad un robot ha dejado de ser solo un dispositivo mecatrónico capaz de interactuar con su entorno y cumplir con una determinada tarea, los prototipos robóticos se asemejan cada vez más a personas y animales, con el uso de materiales y elementos que simulan de mejor manera un entorno natural. (Rangel, García, Peña, & Hernández, 2012)

En la naturaleza, existen innumerables cuerpos con estructuras suaves y deformables, pero que tienen características robustas. Algunos ejemplos mencionables son: las patas de los gecos o salamandras se adhieren firmemente a las superficies lisas, la hoja del loto y su extremada capacidad para repeler el agua, la lengua de un camaleón es el doble de su cuerpo con lo que permanece enroscada dentro la boca sus tejidos se comprimen acumulando energía. Así, diferentes especies han adaptado su estructura y forma al ambiente en el que viven, su forma de moverse, alimentarse y protegerse de los depredadores. Estas características han llevado a desarrolladores a inspirarse para la creación de robots, aprovechando los beneficios de la estructura física y anatómica de ciertas especies, flexibilidad y estructura del cuerpo, diseño de patas y garras, diseño de alas, diseño de aletas, capacidad para moverse sobre superficies, capacidad de vuelo desigual y extremadamente plana y vuelo en condiciones complejas, son algunas de las estas características. Estos robots se utilizan en tareas de vigilancia aérea, exploración de fondos marinos, navegación remota para ayudar en tareas de búsqueda y rescate.(Rangel et al., 2012)

Otro ejemplo de diseño bio-inspirado fue el descubrimiento del mecanismo que hay detrás del Velcro, el cual se atribuye a un ingeniero suizo, George de Mestral, y se remonta a 1941. Al volver

de un paseo por los Alpes con su perro, observó que el pelo del animal había recogido semillas de bardana. Una inspección más minuciosa reveló que las semillas contenían pequeños ganchos al final de sus espinas protectoras. Estos ganchos se habían quedado prendidos a los rizos del pelo del perro. De Mestral vio la oportunidad de unir dos superficies sintéticas creando un sistema artificial equivalente, con ganchos y rizos, que pudieran fijarse a dichas superficies. Su invento fue finalmente patentado y comenzó la producción comercial. Desde entonces ha cumplido muchas funciones para diversas aplicaciones domésticas, científicas, industriales y militares.(Rangel et al., 2012)(Vukusic & Barr, 2010)

La tendencia de los robots subacuáticos bio-inspirados ha surgido como una búsqueda de una alternativa a los vehículos submarinos propulsados por hélices tradicionales. El impulso de esta tendencia, como en cualquier otra área de robótica bio inspirada, es la creencia de que explotando soluciones que la evolución ya ha optimizado conduce a tecnologías y dispositivos más avanzados. En robótica submarina, se espera que el diseño bio inspirado ofrezca robots subacuáticos más ágiles, robustos y estables con mayor eficiencia energética y más maniobrables. Las 30,000 especies de peces han inspirado a los desarrolladores a imitar atunes, rayas, pez cofre, anguilas entre otros. El desarrollo del primer robot tipo pez comercializado Ghostswimmer de Boston Engineering y el desarrollo de robots de peces para pruebas de campo con aplicaciones específicas como nivel de contaminación, marcan un nuevo grado de madurez de la biomimética, después de décadas de ensayos de laboratorio.(Jung et al., 2014)

Inspirado por la velocidad, la eficiencia y la agilidad de la biología de los peces, ha habido un gran interés en desarrollar robótica marina, en las últimas dos décadas. Estos robots logran natación y maniobras a través del movimiento del cuerpo y apéndices en forma de aleta. Comparando los vehículos subacuáticos impulsado por hélices, los peces robóticos son potencialmente más naturales; presentan formas de vigilia similares a peces vivos y es menos probable que dañe a los animales acuáticos. El bajo costo, tamaño compacto, y el peso ligero de estos robots los hacen implementables en grupos para detección móvil en entornos versátiles, como estanques, lagos, ríos e incluso océanos. Por otro lado, son típicamente limitados en las capacidades de energía, y comunicación, lo que plantea grandes desafíos para su robustez, tamaño, duración, operación autónoma y colaborativa en un entorno incierto del campo.(Zhang et al., 2014)(Kongsberg, 2018)

En el deslizamiento de peces robóticos la mayor parte de su locomoción al deslizarse como planeadores submarinos, utilizando su flotabilidad y gravedad para permitir el movimiento sin ninguna propulsión adicional, y ajustando su centro de gravedad para lograr una cierta apariencia natural, usando aletas activamente controladas para lograr alta neutralidad, durante el giro y

orientación. Las aletas también pueden proporcionar energía de propulsión adicional durante la locomoción, si es necesario.(Zhang et al., 2014)

El movimiento oscilante de la aleta caudal es el universal en movimiento para animales acuáticos, como delfines y peces. El rasgo de esta forma es que la parte frontal del cuerpo del pez está casi inmóvil, y la fuerza para el movimiento se logra balanceando la parte trasera del pez y la aleta caudal. La ventaja de esta forma en movimiento es la pequeña resistencia. Muchas instituciones de investigación nacionales y extranjeras están investigando la función de propulsión de la aleta caudal del pez robot bio inspirado para mejorar la eficiencia de los vehículos subacuáticos.(Tianmiao, Wenkai, & Jianhong, 2007)

En 1994, TriantafyllouM y sus socios, los investigadores del MIT, desarrollaron el primer pez robot "Robo Tuna", que tiene una longitud de 1,24 m, y luego completaron con otro robot "Robo Pick" de 0.8 m, que puede simular el movimiento de torneado y la aceleración de los peces. En 2001, K A. Morgansen propone otros métodos de control no lineal de simples modelos de peces robot, que pueden producir la fuerza hacia adelante y ajustar la marcha. Pero los dos modelos anteriores no resuelven el problema de la distorsión del movimiento de la aleta caudal al voltear.(Tianmiao et al., 2007)

El control de giro de la aleta caudal con dos grados, que es conducido por dos servomotores de corriente continua, es un problema de movimiento para el control en condiciones de alta velocidad y carga pesada. Comparando con el sistema de mecanizado de control numérico, no necesita por separado la alta precisión de velocidad o posición, pero no requiere distorsión de velocidad y posición para mejorar la estabilidad del volteo, que es necesario para formar un empuje estable.(Tianmiao et al., 2007) con la implementación de una aleta pectoral bio inspirada se tendrá estabilidad en el desplazamiento del pez minimizando el esfuerzo que se realiza con la aleta caudal, utilizando actuadores lineales miniatura, potentes y livianos para reemplazar motores de corriente continua y solenoides, estos actuadores de memoria Shape son silenciosos y de acción rápida lo cual hará que la aleta bio inspirada se asemeje a la aleta real.

## **1.2 Formulación del problema**

Una aleta pectoral bio-inspirada con tres grados de libertad, implementada utilizando actuadores no convencionales, podría permitir el control de orientación de un robot pez *Pseudorinelepis Genibarbis* bio

### **1.3 Preguntas Directrices**

¿Cuáles son los principales movimientos de la aleta pectoral que se pretende bio inspirar?

¿Cuáles son los tipos de movimiento que se pueden implementar?

¿Cuáles son los tipos de actuadores que se puede utilizar?

### **1.4 Objetivos de la investigación**

#### **1.4.1 Objetivo General:**

Implementar una aleta pectoral bio-inspirada con tres grados de libertad utilizando actuadores no convencionales para el control de orientación de un robot pez *Pseudorinelepis genibarbis*bio.

#### **1.4.2 Objetivos Específicos:**

- Investigar la mecánica de movimiento de la aleta pectoral del pez *Pseudorinelepis genibarbis* a emular con una aleta bio-inspirada.
- Diseñar una aleta pectoral para un robot pez *Pseudorinelepis genibarbis* usando diferentes tipos materiales y actuadores no convencionales.
- Desarrollar un algoritmo de control que pueda ser aplicado al movimiento de la aleta.
- Implementar un prototipo de aleta pectoral y realizar de pruebas de funcionamiento.

### **1.5 Justificación de la investigación**

La bio inspiración también llamada biomimética implica hallar la innovación en la naturaleza para crear algo totalmente nuevo, duplicar diseños naturales en productos y tecnologías para los seres humanos.(Rangel et al., 2012)

El mundo de la biología tiene muchos ejemplos de diseños enormemente funcionales y adaptados, gracias a los cuales los animales o las plantas aprovechan las ventajas de la interacción entre ellos y con lo que los rodea.

En las últimas décadas conforme la ciencia y la tecnología han ido avanzando, el tamaño y la complejidad de los problemas a los que nos enfrentábamos han sido cada vez mayores y con ello se hizo necesaria la búsqueda de nuevos procedimientos para hacer frente a dicha problemática. Una de estas nuevas fuentes de inspiración ha sido la naturaleza ya que es capaz de proveer soluciones sencillas y eficaces a cuestiones que son mucho más difíciles de resolver con los métodos utilizados hasta ese momento.(Vukusic & Barr, 2010)(Andaluz, 2004)

En el caso de los problemas de optimización en las ciencias de la computación, este hecho ha dado lugar a la aparición de los algoritmos bio inspirados, que adoptan fenómenos presentes en la naturaleza para la resolución de estos problemas, mostrando resultados sorprendentes hasta el momento. Este ha sido el motivo por el que se ha realizado un gran esfuerzo en su desarrollo, dando como resultado una amplia variedad de algoritmos bio inspirados.(H & N, 2014)

Según la literatura, la mayoría de los peces robot actuales usan solo una aleta caudal impulsada por diferentes métodos, mientras que las aletas pectorales y las aletas dorsales solo se usan para la estabilidad y la decoración. Las aletas caudales pertenecen a la locomoción de cuerpo y aleta caudal BCF. Los ejemplos incluyen el SPC-II, SPC-III. Hay peces robot que usan la locomoción de aletas medias y pectorales MPF, en la cual la aleta caudal es utilizada solo para la estabilidad. Los ejemplos incluyen Black Bass, que usa dos servomotores para alimentar la aleta pectoral, y tiene una cola rígida que es un pez robot de aleta media impulsada por seis motores. El otro ejemplo es el Aqua-Penguin desarrollado por Festo Co., que utiliza dos aletas pectorales para propulsión. Sin embargo, en la naturaleza la mayoría de los peces usan ambas aletas caudales y aletas pectorales y ambas aletas juegan un papel importante en nadando, algunos peces robot usan ambas aletas caudales y aletas pectorales. Por ejemplo, la aleta caudal se utiliza para la propulsión mientras que la aleta pectoral se utiliza para la elevación vertical.(Zhong, Li, & Du, 2013)(Gao, Bi, Li, & Liu, 2009) Pero, no ha habido intentos de incorporar una aleta pectoral más sofisticada para sistemas de maniobra de aletas en nadadores BCF.(Zhong et al., 2013)

Las aletas pectorales son cruciales para las maniobras de los peces. Algunos peces también usan las aletas pectorales para su desplazamiento a baja velocidad. Se ha desarrollado un pez robot, en el cual las aletas pectorales se pueden usar para propulsión y maniobras. También se puede usar en coordinación con la aleta caudal. Según la teoría de Blake, una aleta roma en forma de cuña es hidrodinámicamente más eficiente para la propulsión basada en arrastre que una forma rectangular debido a la menor resistencia a la interferencia cerca del cuerpo.(Zhong et al., 2013)

El control de giro de la aleta caudal con dos grados, que es conducido por dos servomotores de CC, es un problema en el movimiento de giro para el control en condiciones de alta velocidad y carga pesada.(Tianmiao et al., 2007) por lo cual es necesario incluir una aleta pectoral que ayude a mimetizar la dinámica de un pez real para tener una mejor estabilidad en el desplazamiento del pez, lo que se pretende con esta investigación es desarrollar un prototipo robótico bio inspirado, en el cual se va a evaluar la funcionalidad de solo tres grados de libertad implementados en la aleta pectoral, así como el control de la misma resolviendo los movimientos que se desean, para lo cual se debe contraponer los ángulos que logra la aleta del pez *Pseudorinelepis genibarbis* y la aleta bio inspirada, esto permitirá realizar estudios de áreas marina con reducido espacio aprovechando las ventajas de desarrollar un pez bio inspirado con aleta pectoral, tratando de minimizar el impacto en el entorno dónde se realice la investigación tratando que el pez bio inspirado se asemeje lo más posible a su símil biológico

## **1.6 Hipótesis General**

Una aleta pectoral, implementada con actuadores no convencionales, permite un control de orientación de un robot pez *Pseudorinelepis genibarbis*.

## CAPÍTULO II

### 2 MARCO DE REFERENCIA

#### 2.1 Antecedentes del problema

El desarrollo de este proyecto se fundamenta en referencias de los estudios anteriormente realizados sobre temas afines a la propuesta que respaldan la investigación y establecen métodos de análisis y referencias que guían el camino a seguir. Entre estos trabajos se tienen los siguientes:

Robofish: El 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.(Speller, 2012)

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 (buzos) 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 y 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.(Speller, 2012)

Otra contribución al desarrollo de peces bioinspirados es la esencia de SoFi: abreviatura de Soft Robotic Fish (pez robótico suave) recientemente revelado por científicos del Laboratorio de Inteligencia Artificial y Ciencias de la Computación del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) en la revista Science Robotics.

Los científicos explicaron 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 a la vez.(Katzschmann, De Maille, Dorhout, & Rus, 2016)(Katzschmann, DelPreto, MacCurdy, & Rus, 2018), 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., 2016)(Katzschmann et al., 2018)

Una contribución adicional es el desarrollo del robot pez con aleta pectoral como aparato de movimiento final (Gao et al., 2009), cada aparato tiene dos servomotores donde los ángulos son detectados por potenciómetros y son controlado de forma independiente por una computadora personal mediante el uso de un control Proporcional Derivativo, dos servomotores corresponden al retraso de avance movimiento y el movimiento de emplume de la aleta pectoral. La rotación del eje vertical en cada aparato y el del eje horizontal corresponde al movimiento de retraso-avance y movimiento de empuje, respectivamente. Aunque el aparato puede generar cualquier tipo de movimiento programado dentro del rendimiento de los motores, utilizan plomo-lag sinusoidal. Usan la aleta pectoral de placa plana de espesor de 0.6 mm y de la longitud de la cuerda de 0.155 metros.(Kato & Inaba, 1998)

Contribución teórica y experimental del uso de actuadores especiales y materiales con memoria de forma en el estudio sobre la implementación del motor de nitinol que utiliza resortes con memoria de forma. Se refiere a un sistema de motor con dos sistemas de anillos excéntricos, que

están unidos entre sí con los elementos de nitinol. Mientras están sumergidos en agua caliente, generan fuerzas que darán como resultado un movimiento rotativo. Las características de operación se presentan materializadas, en la variación de la fuerza del resorte y el par y la velocidad del motor. Las características se logran dependiendo de la temperatura que viene bajo los resortes de nitinol.(Dumitru Cernusca, Milici, & Ungureanu, 2016)

La aleación de níquel titanio, conocida como Nitinol o NiTi, pertenece a la clase de materiales inteligentes. Las propiedades NiTi incluyen memoria efecto, superelástico y alta capacidad de amortiguación. Las propiedades de la aleación de níquel-titanio 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. Las aleaciones NiTi presentan características de memoria de forma, fenómenos tales como la capacidad de almacenamiento de energía elástica en carga isotérmica o deformaciones máximas que pueden ser recuperadas de la memoria mecánica. Comportamiento superelástico es la realización más compleja de la memoria mecánica. La superelasticidad ocurre a una temperatura superior a su temperatura de transformación, la elasticidad es 10-30 veces más alto que el de un metal ordinario.(D Cernusca, Milici, & Poienar, 2016)

## **2.2 Base teórica**

### **2.2.1 Aleta del pez**

Las aletas de los peces difieren según grupos, morfología y en definitiva según su modo de vida. Las aletas de los peces se sostienen mediante radios óseos o cartilagosos, los cuales pueden ser duros (espiniformes) o blandos, también existen de tipo ramificados, no todos los peces presentan el mismo número de aletas. Estas han representado un papel importante en la evolución de los peces.(Lauder & Madden, 2007)

La forma, tamaño y funcionalidad de las aletas difieren de unos peces a otros, incluso en algunos miembros de la misma especie sirve para distinguir el sexo. En otros casos las aletas se fusionan con el tronco, sin aparentes diferencias como es el caso del grupo de rajiformes.

Se pueden distinguir entre aletas pares e impares.

### **Aletas de los peces pares**

Presente a ambos lados del pez son las pectorales y pélvicas, estas últimas también denominadas ventrales.

Las aletas ventrales pueden posicionarse de diferente manera: abdominal, torácica, yugular o intermedia.

- Abdominal: aletas ventrales en posición posterior a las pectorales.
- Yugular: aletas ventrales en posición anterior a las pectorales.
- Torácica: las ventrales se ubican bajo las pectorales.
- Intermedias: como su nombre indica, en la parte intermedia del cuerpo del pez.

Las aletas pélvicas o ventrales no están presente en todos los peces, en muchos son filamentosas y útiles a modo de órgano sensorial.

Las pectorales se posicionan cerca del opérculo a ambos lados del pez, algunos han desarrollado ciertas dotes para caminar con ellas.

Las Aletas pectorales son utilizadas como remos (típico de los peces óseos que no tienen peso en el agua), también a modo de hidropilano en el caso de los tiburones (de esa manera no se hunden y pueden alimentarse en la superficie, ya que su cuerpo es más pesado que el del agua). (Lauder & Madden, 2007)

Longitud pre-pectoral: distancia del extremo anterior del organismo a la base de la aleta pectoral.

Longitud de la aleta pectoral: distancia desde el origen hasta el extremo posterior de la aleta pectoral.

### **Aletas de los peces impares**

Las aletas de los peces impares son la dorsal, caudal y la anal. Algunos peces también disponen de una aleta adiposa, la cual carece de radios, por ejemplo, en el grupo de los salmónidos. Si bien la aleta dorsal es impar desde el punto de vista de que no presenta simetría bilateral, puede constituirse en dos partes, bien de forma independiente o por el contrario soldadas entre sí, incluso en ciertas especies los primeros radios pueden ser de tipo espinosos. (Lauder & Madden, 2007)

En lo que respecta a la aleta caudal puede ser simétrica o asimétrica, en el primer caso se denomina homocerca, por ejemplo, especies del género *Gambusia*, y en el segundo heterocerca, predominantes en el género *Acipenser*. También está la denominada dificerca, presente en especies como los celacantos. Finalmente, la gefirocerca (protocerca) es propia de especies de peces pulmonados. (Lauder & Madden, 2007)

La aleta caudal homocerca a su vez se presenta en diversas formas: bifurcada (ahorquillada), endentada o redonda.

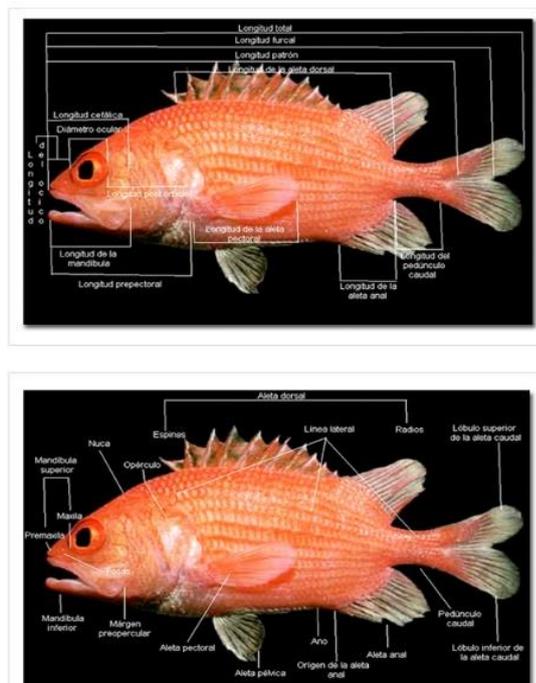
La anal, como su nombre indica se ubica cerca del ano en la zona ventral del pez.

Radios de las aletas

Radios duros: espinosos (con espinas).

Radios blandos: segmentados, flexibles, en ciertas especies ramificados.

Las aletas son miembros adaptados para la natación en los peces. Las aletas están provistas de un esqueleto óseo o cartilaginoso con numerosos radios y vascularizadas. Están casi en constante movimiento, le permiten al pez dar vuelta, subir, bajar, y nadar hacia atrás. Son las aletas que se encuentran más cercanas a las branquias. (Lauder & Madden, 2007)



**Figura 1 – 2:** Aletas de los peces y su ubicación

**Fuente:** Departamento de Zoología Universidad Nacional de México.

### **2.2.2 *Sistemas de 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 la misma, los radios y la longitud que se requiera bio inspirar.

#### **2.2.2.1 *Mecanismos de Natación***

Las aletas de los peces son extraordinarios dispositivos de propulsión que aparecen 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 (media) 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 & Madden, 2007)

### **2.2.3 *Aleación de memoria de forma SMA***

Las aleaciones con memoria de forma (SMA) representan una clase de material única que exhibe propiedades peculiares como el efecto de memoria de forma, la alta elasticidad asociada con las capacidades de amortiguación, alta corrosión y extraordinaria resistencia a la fatiga.(Yoneyama & Miyazaki, 2008)

Las aleaciones con memoria de forma (SMA) son parte de los materiales inteligentes.(Thijssen, n.d.) Las SMA pueden “Recordar” una forma constituida de antemano(Wakjira, 2001) . Esta forma es la forma permanente. Las SMA pueden sentir un estímulo externo y responder a él cambiando sus propiedades físicas queda como resultado una deformación o desviación de la estructura. La forma permanente vuelve de nuevo de esta forma, pueden deshacer una deformación que parecía irreversible al principio.(Rottiers, Broeck, Peeters, & Arras, 2011)

### 2.2.3.1 Nitinol

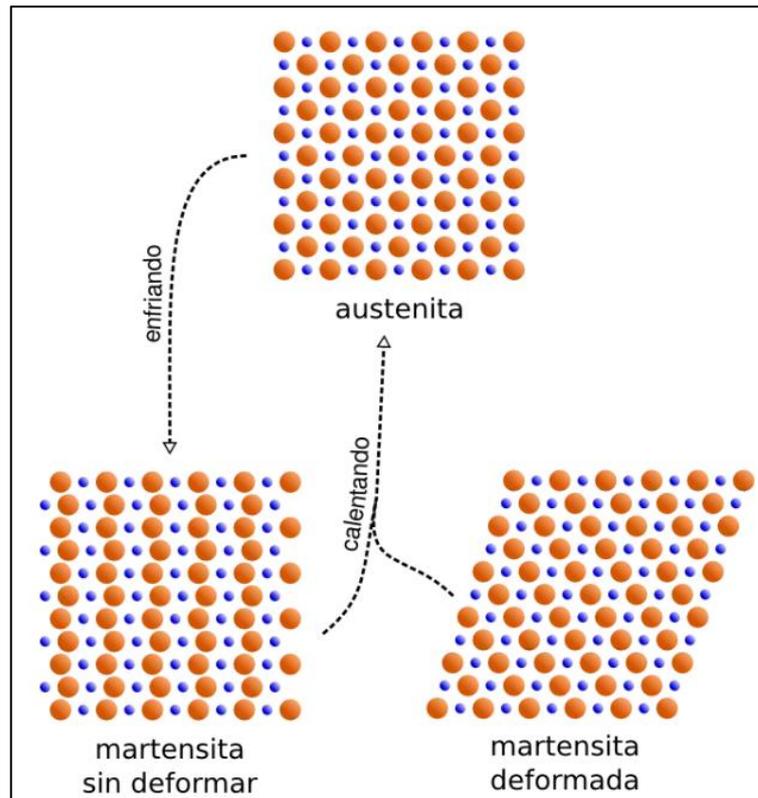
Uno de los materiales con memoria de forma más comunes es una aleación de Ni (Níquel) y Ti (Titanio) llamada Nitinol. Su nombre es un acrónimo que incluye los dos metales constituyentes, así como el laboratorio de armas de la Armada estadounidense responsable de su descubrimiento: *Nickel Titanium Naval Ordnance Laboratory* (Instituto Naval de Níquel Titanio)

Su descubridor fue William J. Buehler, un metalúrgico que trabajó para preparar aleaciones para conos frontales de misiles polaris en el Laboratorio.

El material que estaba buscando debe soportar las condiciones extremas que caracterizan el retorno de los misiles a la atmósfera de la Tierra. En 1959 concentró su investigación en aleaciones equimolares de níquel-titanio a las que denominó NITINOL. Cuando cayó una muestra, descubrió accidentalmente que el sonido emitido al llegar al piso del laboratorio era diferente dependiendo de la temperatura de la muestra. Esto sugiere un cambio en la estructura de la aleación en función de la temperatura. A principios de la década de 1960, Buehler probó la resistencia a la fatiga de las aleaciones. Usando la tira de Nitinol, se dobló como un acordeón y se estiró y dobló sin romperse a temperatura ambiente. En 1961, Buehler no pudo asistir a una reunión para analizar el progreso del proyecto en desarrollo, así que envió a uno de sus asistentes, Raymond C. Wiley. En la reunión, Wiley mostró su trabajo en forma de acordeón. Fue entregado de mano en mano entre los participantes y confirmó sus propiedades mecánicas. Uno de los asistentes, el fumador de pipa David S. Magee, calentó la habitación con un encendedor. Frente al sorprendido asistente, la muestra de Nitinol se estiró adoptando una forma lineal, mostrando su sorprendente memoria de forma. (Rottiers et al., 2011)

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.

Al calentar cualquiera de las dos martensitas, la deformada o la sin deformar, se transforman en una única austenita. A su vez, al enfriar la austenita, se transforma en la martensita no deformada. (Rottiers et al., 2011)



**Figura 2 – 2:** Transformación entre fases del Nitinol  
 Fuente: [www.dibuladores.com](http://www.dibuladores.com)

#### 2.2.4 Hidrostática

La 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, & Motyka, 2019)

##### 2.2.4.1 Principio de Arquímedes

El principio de Arquímedes establece que todos los sólidos que están total o parcialmente sumergidos en el fluido están sujetos a un empuje vertical y ascendente con una fuerza igual al peso del volumen del fluido eliminado. Un objeto no tiene que estar completamente sumergido en el fluido porque flota y solo se hunde parcialmente cuando el empuje recibido por el fluido es mayor que el peso aparente del objeto. (Garbacz et al., 2019)

##### 2.2.4.2 Principio de Pascal

El principio Blaise Pascal establece que, cuando se le aplica presión a un líquido no comprimible dentro de un recipiente cerrado, la presión se transmite en todas las direcciones y sentidos con la misma intensidad. (Garbacz et al., 2019)

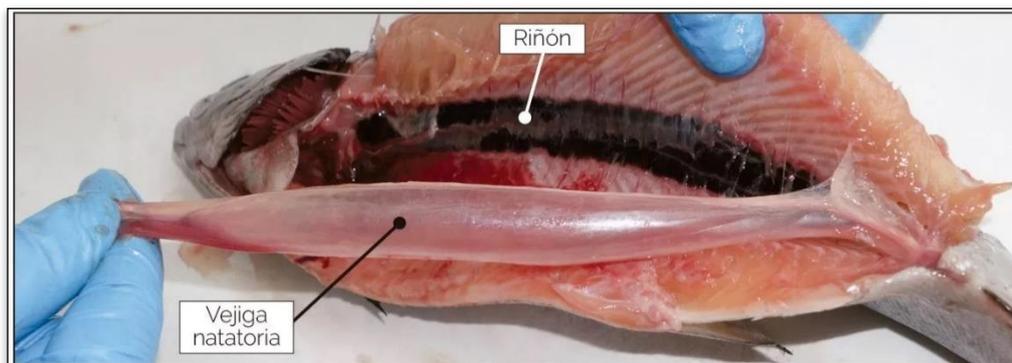
### 2.2.4.3 Flotabilidad

La flotabilidad es denominada como la capacidad del cuerpo para permanecer en el líquido. La flotabilidad de un objeto en un fluido particular depende de las diversas fuerzas que actúan sobre él y la dirección que muestran. 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 y se denomina flotabilidad neutral.

#### 2.2.4.3.1 Flotabilidad de los peces

El Dr. Belembrink 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. Este 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)

Este sistema guía el oxígeno desde la sangre hasta la vejiga, permitiendo que los peces floten a varios niveles en el mar sin tener que acercarse a la superficie en busca de oxígeno. También existe un sistema similar en el ojo del pez, que proporciona suficiente oxígeno a la retina. Algunos peces no tienen vejiga para nadar, mientras que otros simplemente llenan la superficie al tragar aire. Otro grupo de peces tiene una vejiga natatoria cerrada que se expande a través de las secreciones de gases incluso bajo una fuerte presión del agua. (Berenbrink, 2007)



**Figura 3 – 2:** Detalle de vejiga natatoria

Fuente: Grupo de Innovación sobre la docencia en diversidad Biológica

En términos generales, la flotabilidad puede calcularse con la ecuación

$$F_b = V_s * D * g$$

Donde:

$F_b$  : Flotabilidad

$V_s$  : Volumen de la parte sumergida del objeto

$D$  : Densidad del fluido en el que está sumergido el objeto

$g$  : Fuerza de la gravedad.

### 2.2.5 *Sistemas de control automático*

Un sistema de control automatizado es una interconexión de los elementos que componen una configuración llamada sistema, de modo que la disposición resultante puede controlarse a sí misma.(Hernandez, 2010)

#### 2.2.5.1 *Sistemas de control de lazo abierto*

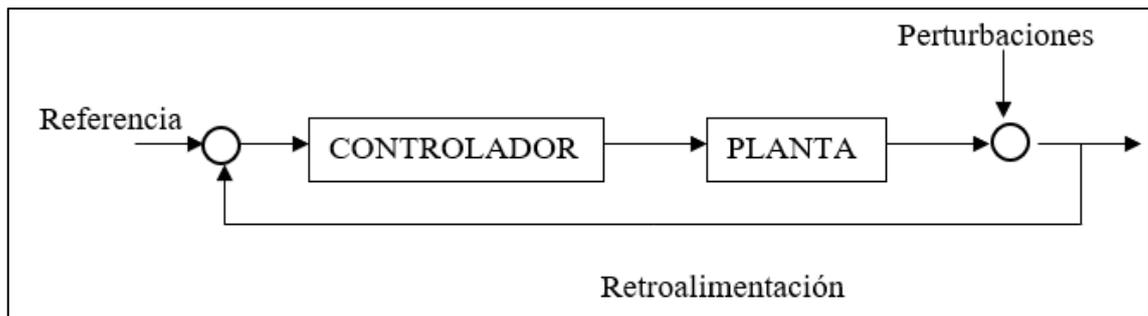
Se llaman sistemas de control de lazo abierto. Si la salida no afecta continuamente la acción de control, es decir, la salida no siempre se compara con la entrada de referencia. Por lo tanto, las condiciones de funcionamiento fijas corresponden a cada entrada de referencia, la precisión del sistema depende de la calibración y el funcionamiento del operador humano que actúa como controlador al comparar el estado deseado, la secuencia de trabajo y el estado actual.(Hernandez, 2010)



**Figura 4 – 2:** Diagrama de bloque para un sistema de lazo abierto  
**Realizado por:** Ñacato, Diego, 2019.

#### 2.2.5.2 *Sistemas de control lazo cerrado*

Se llama sistema de control de circuito cerrado, donde el valor de la variable de control se cuantifica constantemente y se compara con el valor de la entrada de referencia, generando así una señal de error en presencia de perturbaciones que cambian el sistema. Desviando del punto de operación, cuando se introduce esa magnitud en el controlador, se genera una acción correctiva en el elemento de control final para que la variable manipulada actúe o se ajuste, y la salida del sistema vuelva autónomamente al punto de equilibrio.(Hernandez, 2010)



**Figura 5 – 2:** Diagrama de bloques para un sistema de lazo cerrado

Realizado por: Ñacato, Diego, 2019.

### 2.2.5.3 Controlador

Como se mencionó anteriormente, el controlador es un componente del sistema que detecta desviaciones existentes entre el valor medido por el sensor y el valor objetivo o referencia programado por el operador. Emite una señal de corrección al actuador para que se genere la acción de control en el efector final. (Hernandez, 2010)

#### 2.2.5.3.1 Modos de Control

De manera simplificada, los distintos modos para controlar la planta pueden ser:

- Si-No, (Conectado-Desconectado, Dos Posiciones, On-Off, Todo-Nada): Funciona cuando existe "error". En este sistema, el controlador enciende o apaga la entrada y se usa, por ejemplo, en alumbrado público, ya que éste se enciende cuando la luz ambiental es más baja que un predeterminado nivel de luminosidad.
- Proporcional: actúa sobre “la cantidad de error”: En este sistema, la amplitud de la señal de entrada al sistema afecta directamente a la salida. Este no es solo un nivel dado, sino también todo el rango de niveles o valores de entrada. Algunos sistemas de iluminación automática utilizan el sistema P para determinar la intensidad de una lámpara de iluminación que depende directamente del brillo ambiental.
- Integral: actúa sobre “el promedio del error”:
- Derivativa: actúa sobre “la velocidad de cambio del error”

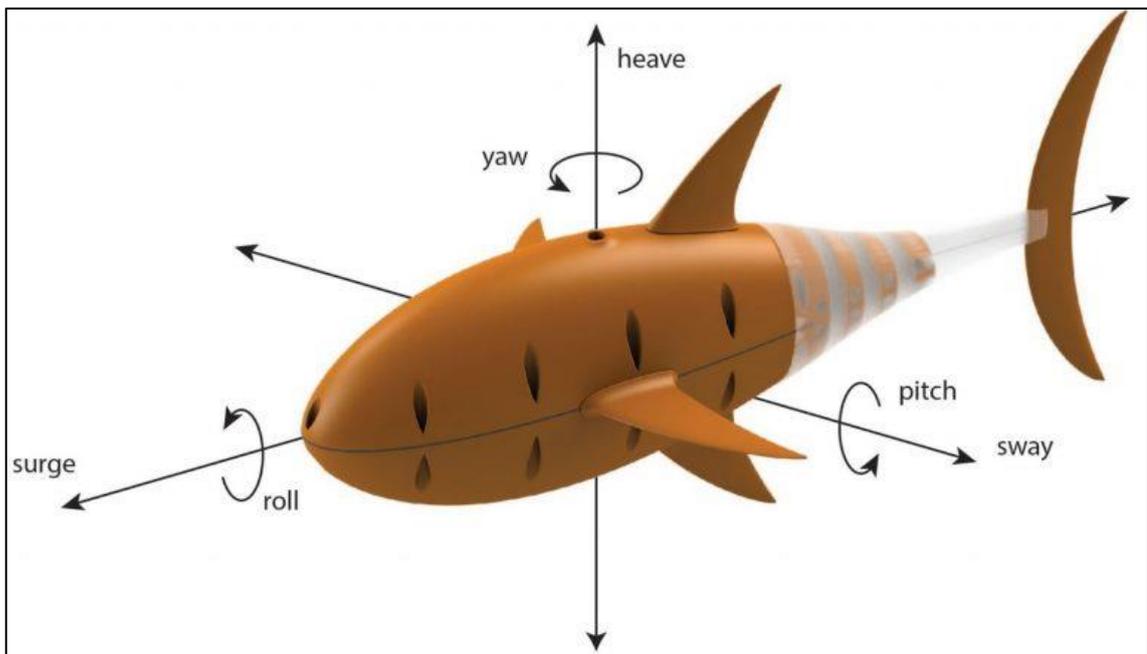
Proporcional derivativo (PD). En este sistema, la velocidad de cambio de la señal de entrada se utiliza para determinar el factor de corrección, calculando la derivada de la señal.

Proporcional integral (PI). Este sistema es similar al anterior, solo que la señal se integra en vez de derivarse, es decir, es una acción acumulativa para determinar el factor de corrección.

Proporcional integral derivativo (PID). Este sistema combina los tres tipos anteriores.

### 2.2.6 Rotación sobre los ejes

Los vehículos que operan libremente en tres dimensiones, como los aviones y los submarinos, pueden cambiar su altitud y rotación sobre los tres ejes ortogonales centrados en el centro de gravedad del vehículo: los ejes longitudinal, vertical y horizontal. El movimiento sobre el eje longitudinal se denomina **roll** y, en los aviones, determina cuánto están inclinadas las alas. El movimiento sobre los ejes perpendiculares se llama **yaw** y para los aviones determina hacia dónde apunta la nariz. El movimiento sobre el eje lateral se llama **pitch** y es una medida de qué tan inclinado está el vehículo hacia arriba o hacia abajo. (Chaehoi, Dumas, Mailly, Latorre, & Nouet, 2005)



**Figura 6 – 2:** Yaw, Pitch, Roll

Fuente: [www.machinedesign.com](http://www.machinedesign.com)

La rotación alrededor del eje de adelante hacia atrás se llama **roll**.

La rotación alrededor del eje de lado a lado se llama **pitch**.

La rotación alrededor del eje vertical se llama **yaw**.

### **2.2.7 Articulaciones de los huesos**

La biomecánica articular estudia los movimientos transportados por las articulaciones y las cargas que transportan. La función mecánica de la articulación es convertir las fuerzas de corte, fuerzas laterales, además de promover un movimiento más abundante al esqueleto.(Elsevier Connect, 2018)

Existen muchos tipos de articulaciones, incluidas las articulaciones que no se mueven en adultos, tales como las articulaciones sutúrales del cráneo. Las articulaciones que no se mueven se denominan fijas. Existen otras articulaciones que se mueven un poco, como las vértebras. (Silvia E. Rodrigo, Jorge A. C. Ambrósio, 2017) Los ejemplos de articulaciones móviles incluyen los siguientes:

- Enartrosis. Las enartrosis, como las articulaciones del hombro y la cadera, permiten los movimientos hacia atrás, hacia adelante y hacia los costados, y la rotación.
- Articulaciones de bisagra. Las articulaciones de bisagra, como las de los dedos, rodillas, codos y dedos del pie, permiten movimientos de flexión y enderezamiento únicamente.
- Articulaciones rotatorias. Las articulaciones rotatorias, como las articulaciones del cuello, permiten movimientos giratorios limitados.
- Articulaciones elipsoidales. Las articulaciones elipsoidales, como la articulación de la muñeca, permiten todo tipo de movimientos, excepto los movimientos rotatorios.

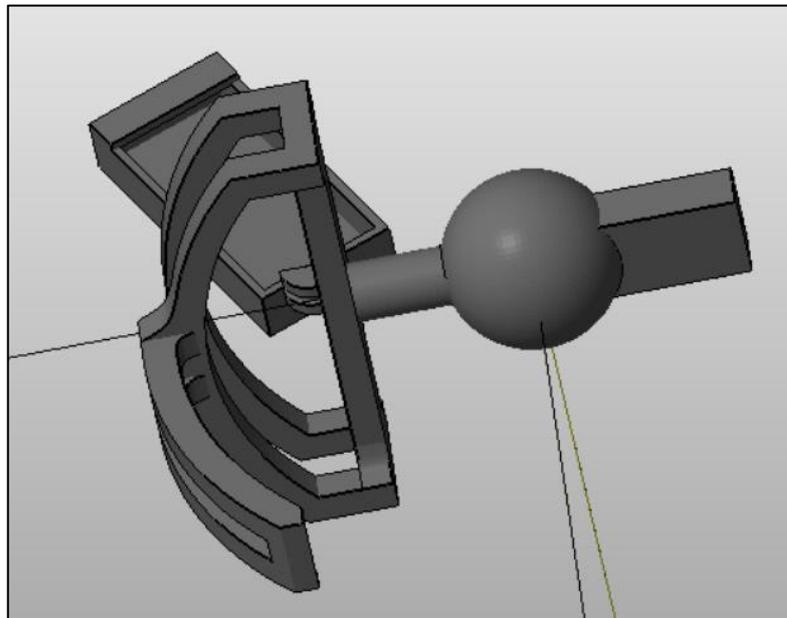
## CAPÍTULO III

### 3 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

En el presente capítulo se describe los pasos a seguir para la realización de la investigación, en el cual se desarrolla la mecánica del movimiento de los grados de libertad (GDL), diseño de la aleta pectoral con el uso de los actuadores no convencionales, implementación de un modo de control para los GDL, la implementación del prototipo para cumplir con los objetivos planteados en la investigación.

#### 3.1 Mecánica de movimientos.

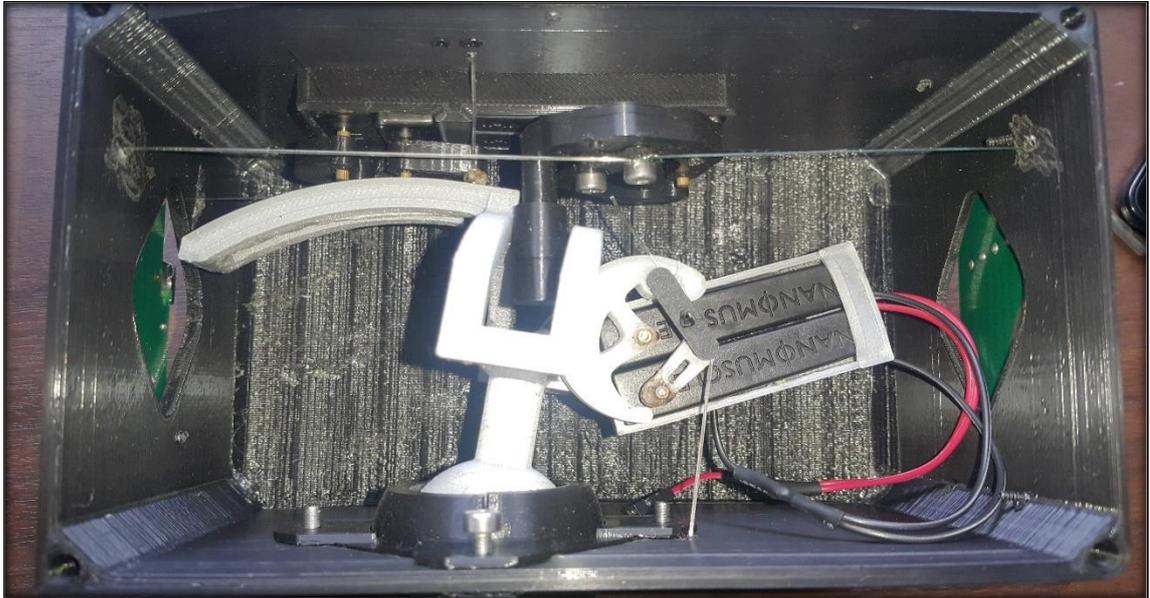
El diseño de la mecánica para poder implementar los 3 grados de libertad de la aleta se investigó los distintos tipos de articulaciones de los huesos aplicados a la bio mecánica, con las distintas clasificaciones existentes se tomó en cuenta la que pudo brindar los 3 grados de libertad necesarios, para lo cual se basó en las articulaciones rotacionales del cuerpo humano. Como se muestra en la figura.



**Figura 1 – 3:** Articulación rotacional modelada 3d.  
Realizado por: Ñacato Diego, 2019

La propuesta a implementar se diseñó tomando en cuenta las restricciones de los actuadores, ángulo de giro, carrera de desplazamiento.

Además, se tuvo la necesidad de anclar el diseño a una base donde se sujetará la parte circular de la articulación, lo cual permitirá el ángulo de giro necesario.



**Figura 2 – 3:** Diseño impreso en 3d  
Realizado por: Nacato Diego, 2019

En la figura 3-3, se muestra el diseño implementado impreso 3d de material PLA biodegradable. Instalado a la base que será parte del cuerpo del pez bio inspirado.



**Figura 3 – 3:** Articulación rotacional impresa en 3d  
Realizado por: Nacato Diego, 2019

## **3.2 Diseño de aleta pectoral.**

El diseño de la aleta se lo realizo con un software de modelado 3d, tomando en cuenta las restricciones al momento de la implementación y el pez al cual se quiere bio inspirar, para poder implementar los grados de libertad.

### **3.2.1 Materiales**

En los materiales utilizados para la implementación de la aleta se utilizó:

- Sellador de silicona anti-hongo, es un sellador de curado acético, forma una película de sellado en un tiempo estimado de 10 minutos, se vulcaniza a temperatura ambiente con la humedad atmosférica.

Para la implementación de la aleta se utilizó alrededor de 150 mililitros de sellador, mientras que para el sellado exterior del prototipo se utilizó alrededor de 320 mililitros.

- Filamento PLA, este filamento es el más popular en el mercado de las impresoras 3d, se deriva de materias primas naturales y renovables, como el maíz, y pertenece a los poliésteres como un polímero sintético, no emite emisiones tóxicas, además de ser biodegradable. Lo cual es muy importante para este tipo de investigación.

Se utilizó en la parte estructural del pez, así como en sus articulaciones, un estimado de 1000 gramos de filamento, con un tiempo estimado de impresión de 80 horas de impresión a una temperatura de 220 grados centígrados.

### **3.2.2 Actuadores no convencionales**

Dentro de los actuadores utilizados, se seleccionaron actuadores en base a memoria de forma con desplazamiento lineal y rotacional.

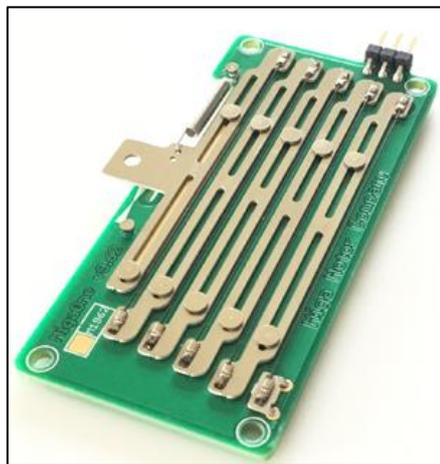
#### **3.2.2.1 Actuator Migaone**

Los metales con memoria de forma fueron desarrollados por la NASA para la industria espacial, y se han utilizado para aumentar las aplicaciones en la Tierra. Por ejemplo, se han realizado estudios limitados sobre el uso de estos materiales en robótica. Permiten crear robots muy ligeros.

El MigaOne es un actuador de metal de memoria del tamaño de una tarjeta de crédito, con 0.325 pulgadas de carrera y tres opciones de fuerza de salida. Con un peso de menos de 1/2 onza (12.8 gramos), el MigaOne es el actuador más delgado del mundo. El tiempo de actuación es de ~ 1.0 segundo a 5.8V, y ~ 0.1 segundo a 18V.

Los actuadores MigaOne deben usarse junto con el Miga Analog Driver V5 - Interruptor MOSFET, que proporciona detección de fin de carrera y conmutación de potencia. El MigaOne puede funcionar con baterías estándar de alta energía o la mayoría de las fuentes de alimentación de laboratorio (de 5 a 30 voltios, dependiendo del tiempo de activación deseado).

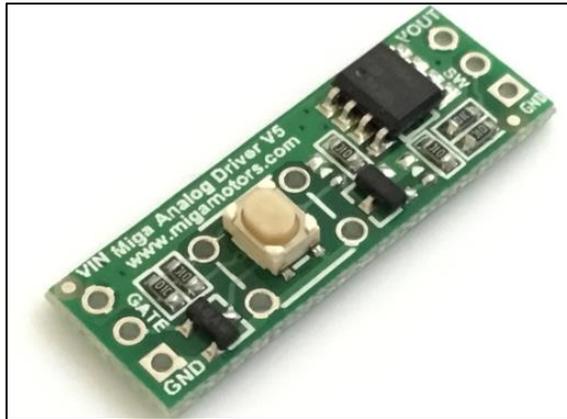
El MigaOne proporciona 4.5 libras de fuerza, utilizando elementos SMA de 0.015 pulgadas de diámetro con resistencia de 2.7ohm.



**Figura 4 – 3:** Actuador Migaone  
Fuente: [www.migamotors.com](http://www.migamotors.com)

### 3.2.2.2 *Miga Analog Driver v5 - MOSFET Switch*

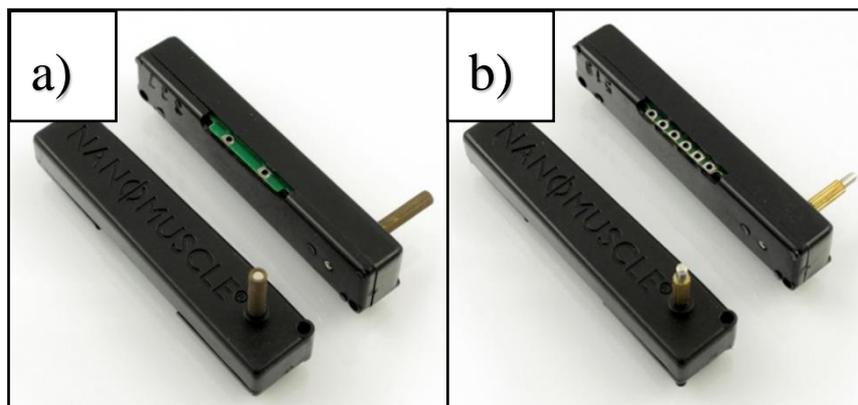
El Miga Analog Driver v5 (MADv5) es un interruptor MOSFET diseñado para alimentar de forma segura el MigaOne, Dash4, TWA-090, NM70R-6P y otros actuadores de aleación de memoria de forma en un amplio rango de velocidades o voltajes de entrada. El MADv5 permite el control por botón o señales GATE o ENABLE externas (de 2.5 - 30V) para cambiar la alimentación hasta que se contacte el límite de fin de carrera del actuador. El MADv5 corta la energía momentáneamente: evita el sobrecalentamiento de los elementos de memoria de forma.



**Figura 5 – 3:** Miga Analog Driver v5  
**Fuente:** www.migamotors.com

### 3.2.2.3 Actuador de metal con memoria giratoria

Pequeños, silenciosos y livianos con solo 4.2 gramos, los actuadores de aleación con memoria de forma rotativa “NanoMuscle” proporcionan 60° de rotación utilizando un actuador de metal con memoria NM70-Super lineal encapsulado en un cuerpo con una salida giratoria accionada por resorte y acción de leva. Los actuadores rotativos NanoMuscle vienen en dos versiones diferentes: el NM70R-2P de 2 pines y el NM70R-6P de 6 pines. El actuador -2P 'rebota' entre paradas de límite cuando está conectado a una fuente de alimentación, y el -6P proporciona un mayor control, con acceso a sensores de límite final, y puede ser manejado por el MADv5. Los voltajes de operación son ~ 3-9V.

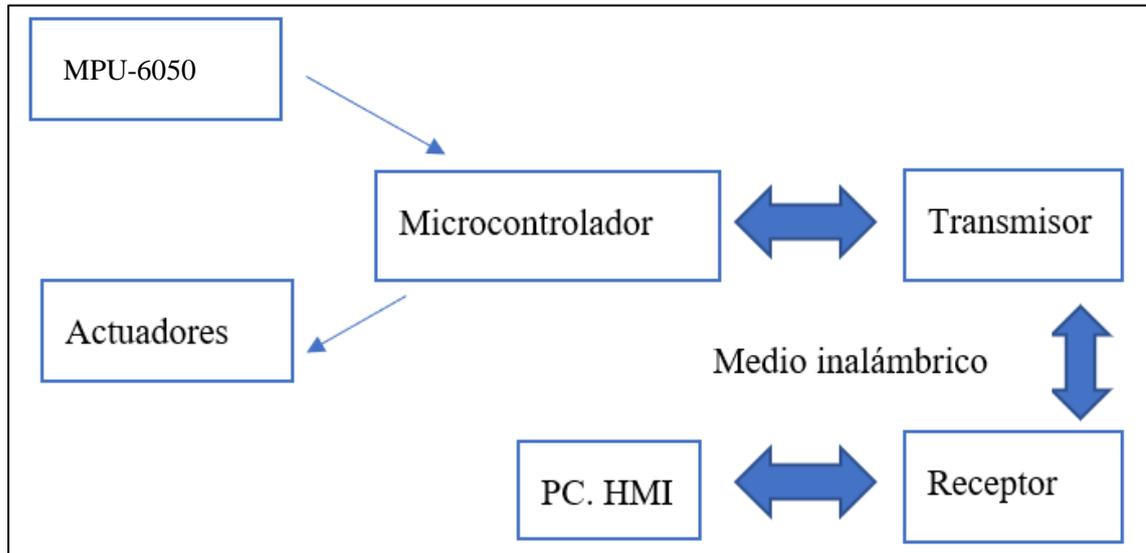


**Figura 6 – 3:** a) NM70R-2P  
**Fuente:** www.migamotors.com

b) NM70R-6P

### 3.3 Técnica de control implementada.

Para poder aplicar una técnica de control se tuvo que tomar en cuenta la adquisición de datos, microcontrolador, canal de comunicación, interfaz de comunicación, de esta manera se planteó un esquema de conexiones.

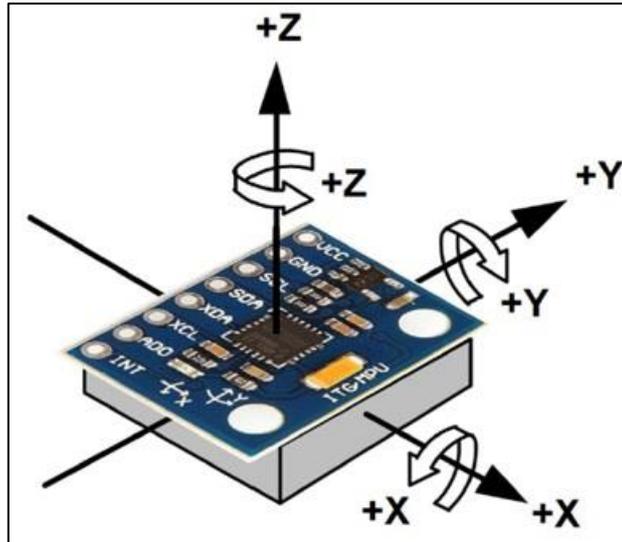


**Figura 7 -3:** Esquema propuesto técnica de control  
Realizado por: Nacato Diego, 2019

#### 3.3.1 Sensor

Se seleccionó un sensor comercial que permita obtener datos de la rotación mientras la aleta está en funcionamiento así podrá conocerse la orientación en los ejes X, Y, Z.

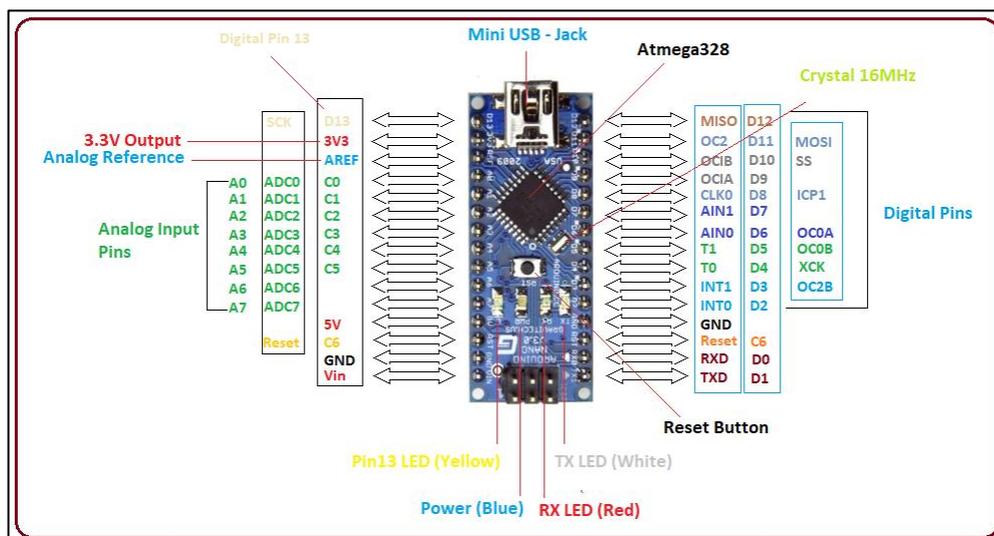
El sensor seleccionado es un acelerómetro de 3 ejes, el cual permite tener una retro alimentación de orientación en todos los ejes, el sensor es el MPU 60-50, los datos enviados por el sensor deben ser previamente procesados y linealizados para la correcta interpretación de los mismos. La comunicación entre el sensor y el microcontrolador se realiza mediante comunicación I2C.



**Figura 8 – 3:** Ejes MPU-6050  
**Fuente:** naylampmechatronics.com

### 3.3.2 Microcontrolador

El microcontrolador seleccionado debía tener ciertas características como: comunicación I2C, entradas analógicas, salidas digitales, PWM y comunicación serial. El microcontrolador seleccionado fue un ATmega 328p en una tarjeta de desarrollo Arduino Nano, el microcontrolador se programó con la interfaz propia de la tarjeta de desarrollo en la cual se implementó un algoritmo de calibración del sensor una vez instalado, ya que se debe calibrar el sensor siempre que cambie de posición inicial.



**Figura 9 – 3:** Pines de entrada salida Arduino nano  
**Fuente:** www.theengineeringprojects.com

El programa de calibración se encuentra constantemente modificando los offset para intentar eliminar el error con la medida real que se desea: Inicialmente se lee los offsets actuales y se envía un carácter por el puerto serie, antes de enviar el carácter es necesario colocar el sensor en posición horizontal dentro del prototipo y evitar moverlo durante la calibración, la posición en la cual se encuentra el prototipo será el nivel para futuras mediciones.

Una vez enviado el carácter el programa realiza las lecturas tanto del acelerómetro como del giroscopio, utilizando un filtro se estabiliza un poco las lecturas y cada 100 lecturas comprobamos si los valores son los valores que deseamos leer, dependiendo de esto se aumenta o disminuye los offsets. Esto hará que las lecturas filtradas converjan a:

-aceleración: p\_ax=0 , p\_ay=0 , p\_az=+16384

-Velocidad angular: p\_gx=0 , p\_gy=0 , p\_gz=0

En el monitor serial se observarán valores cercanos a los anteriores en este momento se desconecta o reiniciar el Arduino. Con esto el MPU6050 quedará configurado con el último offset calculado en el programa de calibración.

```
if (sensor.testConnection()) Serial.println("Sensor iniciado correctamente");

// Leer los offset los offsets anteriores
ax_o=sensor.getXAccelOffset();
ay_o=sensor.getYAccelOffset();
az_o=sensor.getZAccelOffset();
gx_o=sensor.getXGyroOffset();
gy_o=sensor.getYGyroOffset();
gz_o=sensor.getZGyroOffset();

Serial.println("Offsets:");
Serial.print(ax_o); Serial.print("\t");
Serial.print(ay_o); Serial.print("\t");
Serial.print(az_o); Serial.print("\t");
Serial.print(gx_o); Serial.print("\t");
Serial.print(gy_o); Serial.print("\t");
Serial.print(gz_o); Serial.print("\t");
Serial.println("\n\nEnvie cualquier caracter para empezar la calibracionnn");
// Espera un caracter para empezar a calibrar
while (true){if (Serial.available()) break;}
Serial.println("Calibrando, no mover IMU");
```

**Figura 10 – 3:** Lectura de offset para calibración  
Realizado por: Nacato Diego, 2019

Una vez realizada la calibración se debe escalar las lecturas a valores con las unidades de aceleración y velocidad angular.

Primero se debe conocer los rangos con los que está configurado el MPU6050, estos rangos pueden ser 2g/4g/8g/16g para el acelerómetro y 250/500/1000/2000(°/s) para el giroscopio.

En la aplicación se trabajó con rangos por defecto (2g y 250°/s):

Lecturas variables	Mínimo	Medio	Máximo
MPU6050	-32759	0	+32765
Aceleración	-2g	0	+2g
Velocidad Angular	-250°/s	0°/s	+250°/s

**Tabla 1 – 3:** Parámetros de escalonado

Realizado por: Nacato Diego, 2019

```

//Calibrar el acelerometro a 1g en el eje z (ajustar el offset)
if (p_ax>0) ax_o--;
else {ax_o++;}
if (p_ay>0) ay_o--;
else {ay_o++;}
if (p_az-16384>0) az_o--;
else {az_o++;}

sensor.setXAccelOffset(ax_o);
sensor.setYAccelOffset(ay_o);
sensor.setZAccelOffset(az_o);

//Calibrar el giroscopio a 0°/s en todos los ejes (ajustar el offset)
if (p_gx>0) gx_o--;
else {gx_o++;}
if (p_gy>0) gy_o--;
else {gy_o++;}
if (p_gz>0) gz_o--;
else {gz_o++;}

```

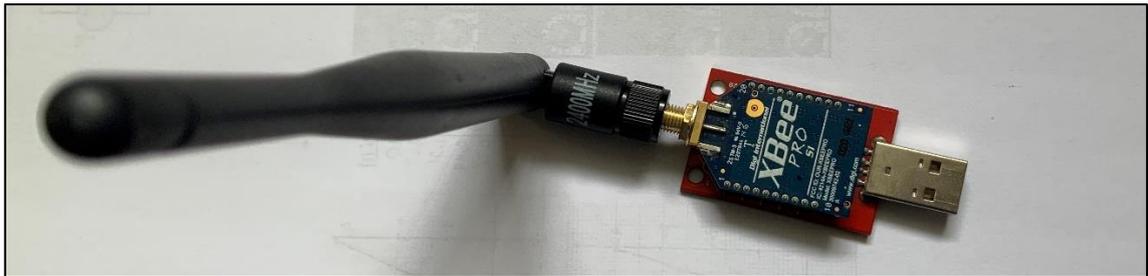
**Figura 11 – 3:** Calibración acelerómetro y giroscopio

Realizado por: Nacato Diego, 2019

### 3.3.3 Comunicación

Para la comunicación entre el microcontrolador y la PC, se utilizó una comunicación inalámbrica para tratar de minimizar el uso de cableado externo que pueda afectar a correcto entorno al momento de implementar el prototipo bio inspirado.

Se seleccionó dos módulos de comunicación inalámbrica XBEE S1 Pro, basado en el protocolo 802.15.4 (la base para Zigbee), estos módulos se configuraron para tener una comunicación punto a punto lo cual nos permite tener una comunicación confiable y segura.



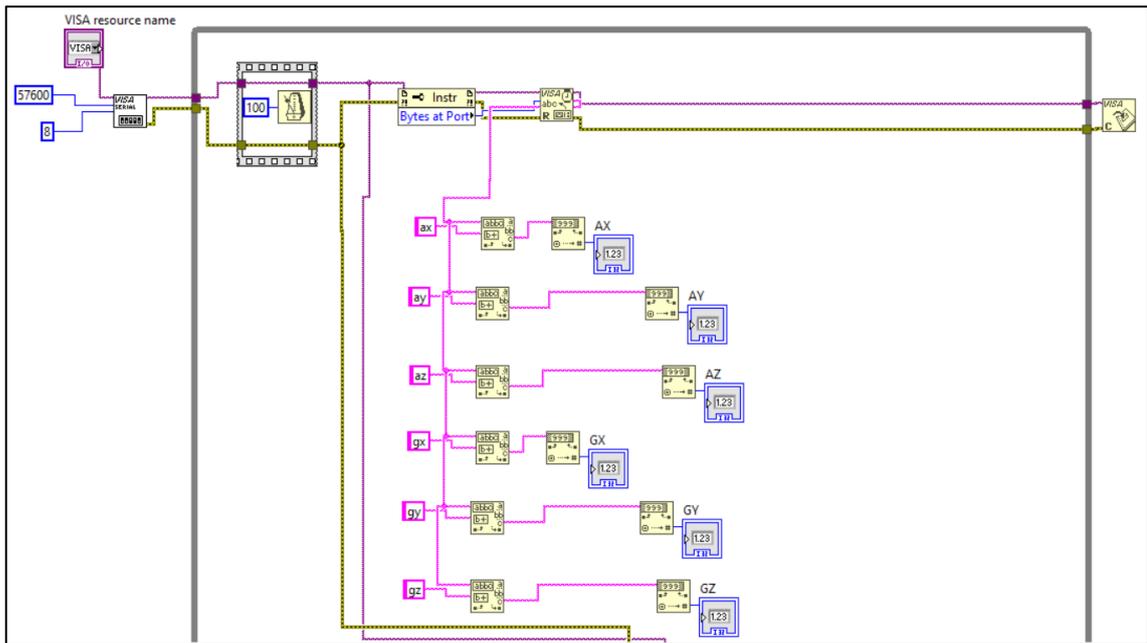
**Figura 12 – 3:** Módulo de comunicación Xbee s1 pro  
Realizado por: Ñacato Diego, 2019

### 3.3.4 Interfaz HMI

Para la interpretación de los datos de aclaración y velocidad angular, se utilizó un programa que permita una comunicación serial, se seleccionó el programa Labview 2018.

Se programó en tres etapas:

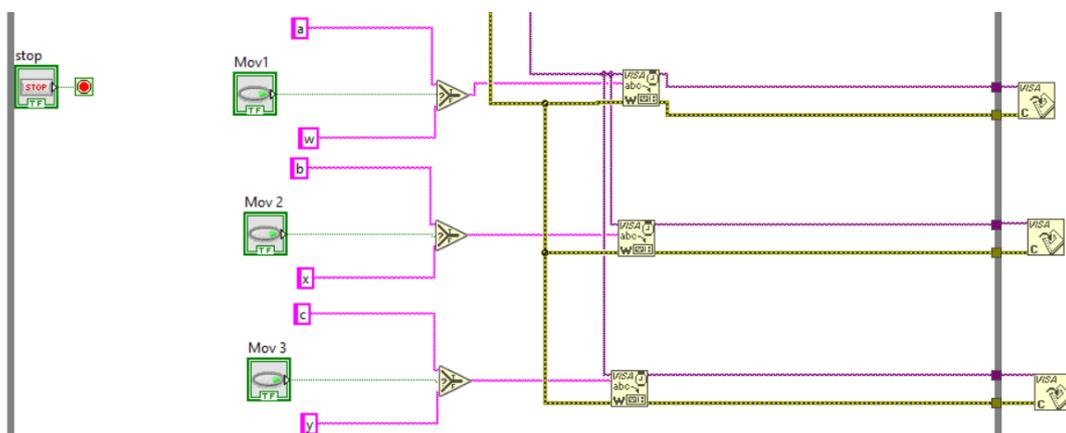
La primera es la adquisición de los datos y visualización.



**Figura 13 – 3:** Adquisición de datos  
 Realizado por: Ñacato Diego, 2019

En esta etapa se adquiere los datos enviados desde el microcontrolador, se configura los parámetros de comunicación los cuales son los baudios, bits de datos, tiempo de muestreo, un parámetro importante es la descomposición de la trama de datos que se recibe, para poder dividir los datos en cada eje, luego la conversión de cadena de caracteres a número.

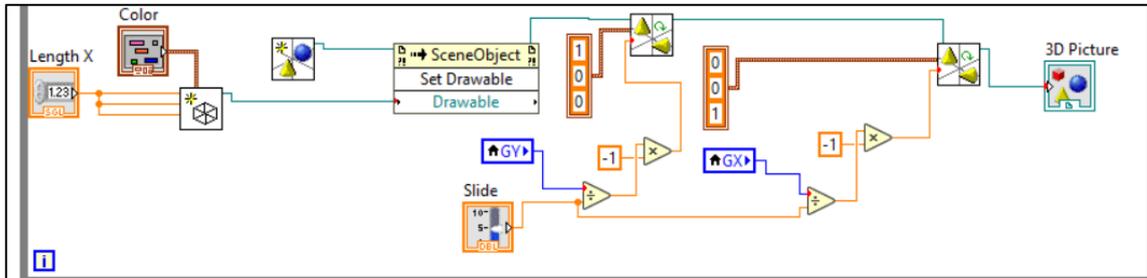
La segunda etapa es el accionamiento de cada grado de libertad de la aleta



**Figura 14 – 3:** Envío de datos mediante puerto serial  
 Realizado por: Ñacato Diego, 2019

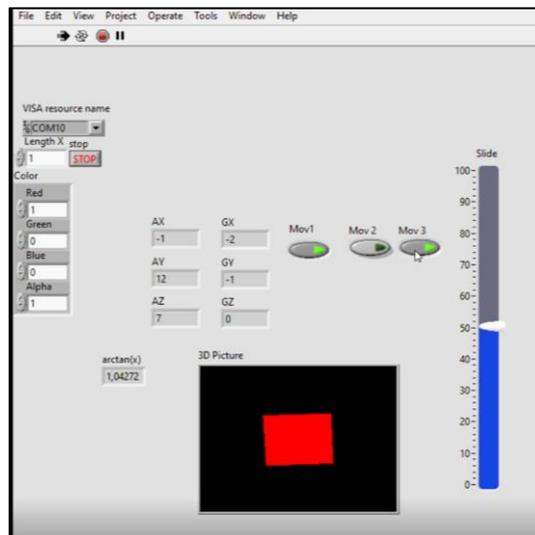
En esta etapa se realiza el envío de caracteres hacia el microcontrolador para activar o desactivar los actuadores de cada grado de libertad de la aleta.

Tercera etapa, procesamiento de los datos para conformar un gráfico en tercera dimensión para una mejor interpretación de la orientación al momento de accionar los movimientos de la aleta.



**Figura 15 – 3:** Gráfico de datos  
Realizado por: Ñacato Diego, 2019

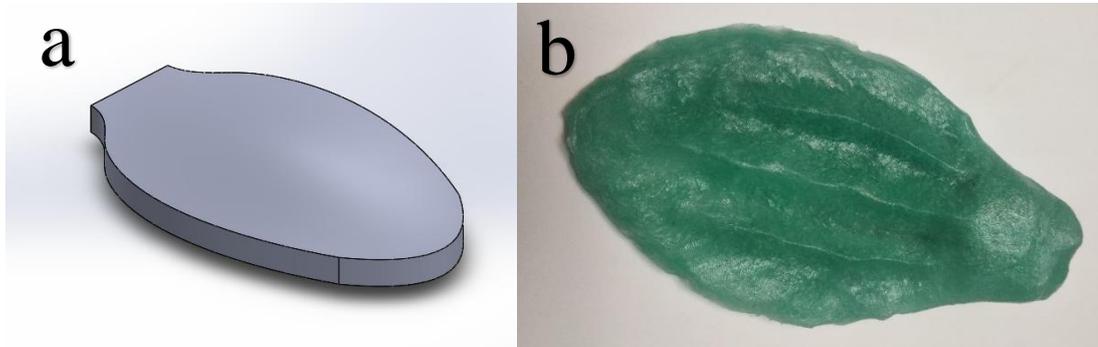
En esta etapa se realiza un gráfico en tercera dimensión con los datos obtenidos, para esta etapa se debe tomar en cuenta la posición del sensor puesto que cada dato está asociado a un eje en el gráfico 3d, también es importante la velocidad con la que están variado los datos, si la velocidad es muy alta no se podrá visualizar de manera correcta el gráfico, para minimizar esto se implementó una variable por el cual será dividido los valores obtenidos para reducir la velocidad de movimiento e interpretar mejor la orientación actual del prototipo.



**Figura 16 – 3:** Interfaz de comunicación  
Realizado por: Ñacato Diego, 2019

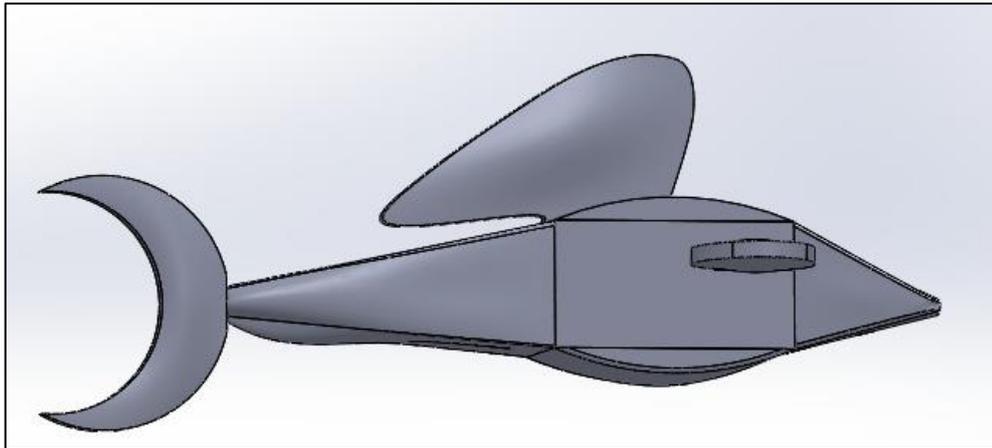
### 3.4 Implementación de Prototipo

Se implementó la aleta del pez *Pseudorinelepis Genibarbisbio* (carachama) tomando en cuenta las restricciones de actuadores y materiales, logrando un prototipo:



**Figura 17 – 3:** a) Prototipo de aleta 3d; b) Prototipo de silicona  
Realizado por: Ñacato Diego, 2019

El prototipo implementado cuenta con los tres grados de libertad, utilizando actuadores con desplazamiento lineal y rotacional, la estructura completa fue impresa en filamento de PLA, en una impresora 3d, además cuenta con un sistema de alimentación por baterías de lipo, divididas en dos partes una batería de tres celdas y 450 mili amperios que alimenta los actuadores de desplazamiento lineal y dos baterías de dos celdas y 300 miliamperios conectadas en paralelo que energiza la placa de control el módulo transmisor y los actuadores rotacionales, cada entapa de alimentación cuenta con un regulador independiente para acondicionar los voltajes, para los actuadores de desplazamiento lineal un regulador reduce el voltaje de 11.1 voltios a 7.8 voltios, el segundo regulador acondiciona el voltaje para los actuadores rotacionales de 7.4 voltios a 5 voltios.



**Figura 18 – 3:** Prototipo propuesto  
**Realizado por:** Ñacato Diego, 2019

En la figura 18-3 se presenta el prototipo modelado en un software de CAD, armado completamente para su impresión.



**Figura 19 – 3:** Prototipo implementado  
**Realizado por:** Ñacato Diego, 2019

En la figura 3-19 se muestra el prototipo una vez impreso todas sus partes y armado, adicionalmente se realizó el impermeabilizado de todas las partes para armarlo en su totalidad.



**Figura 20 – 3:** *Pseudorinelepis genibarbisbio* (Carachama)  
Realizado por: Ñacato Diego, 2019

En la figura 20-3, se muestra el pez *Pseudorinelepis genibarbisbio* (Carachama), en el cual se bio inspiró el prototipo final presentado.

## CAPÍTULO IV

### 4 ANÁLISIS Y RESULTADOS

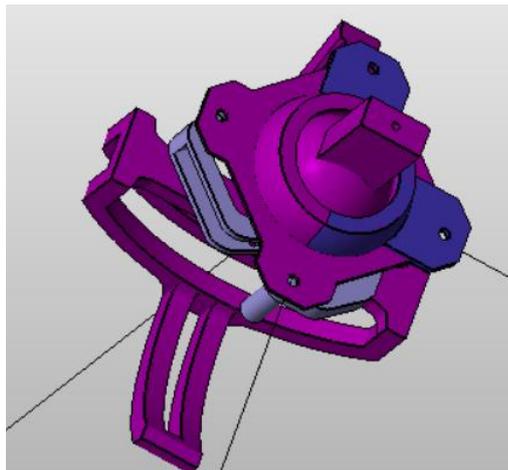
Al concluir con el desarrollo de prototipo tanto en el Hardware y Software es de mucha utilidad someter a pruebas de funcionamiento a cada uno de los componentes del sistema para evaluar su funcionamiento individual y en conjunto con el sistema. Es así que en el presente capítulo se detallarán las configuraciones y pruebas realizadas a cada uno de los dispositivos y al prototipo.

#### 4.1 Configuración de los dispositivos y esquemas de conexión del Prototipo

Una vez reconocidos los componentes electrónicos y los dispositivos de control y actuadores que darán funcionamiento a la aleta, se presentan los diagramas de conexiones de cada uno de ellos a detalle, así también se muestra la configuración que cada uno de estos elementos

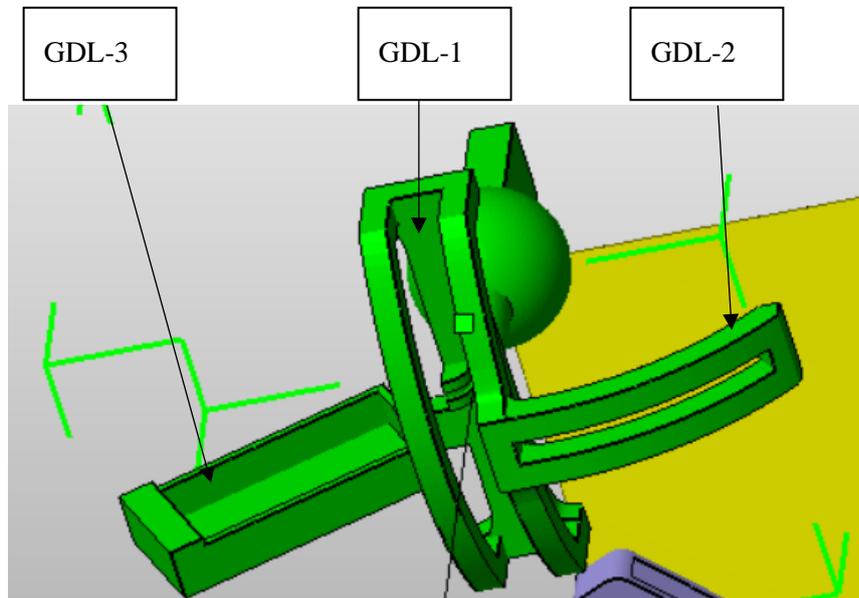
##### 4.1.1 *Diseño mecánico*

En la figura 1-4 se puede observar la articulación rotacional implementada en el prototipo, el diseño nos da los tres grados de libertad necesario para el movimiento de la aleta.



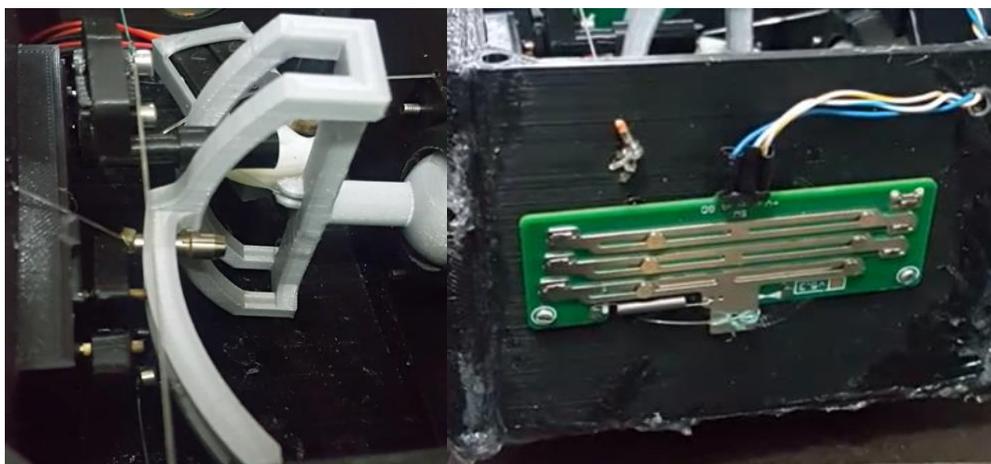
**Figura 1 – 4:** Articulación rotacional  
Realizado por: Ñacato Diego, 2019

En la figura 2-4, se muestra cómo va a actuar cada grado de libertad y cómo será su desplazamiento, podemos observar que el diseño tiene la posibilidad de escalar y dar el mayor ángulo de movimiento de la aleta.



**Figura 2 – 4:** Ubicación de los grados de libertad  
Realizado por: Ñacato Diego, 2019

En la figura 3-4, se observa el diseño mecánico impreso y anclado a su base, así como los actuadores de cada grado de libertad dándonos así los movimientos deseados con ayuda de un sistema de resortes. Los cuales permiten el retorno a la posición inicial de estado de reposo de la aleta. El primer grado de libertad permite un desplazamiento de izquierda a derecha, el segundo grado de libertad permite un desplazamiento de arriba hacia abajo, el tercer grado de libertad permite la flexión de la aleta.

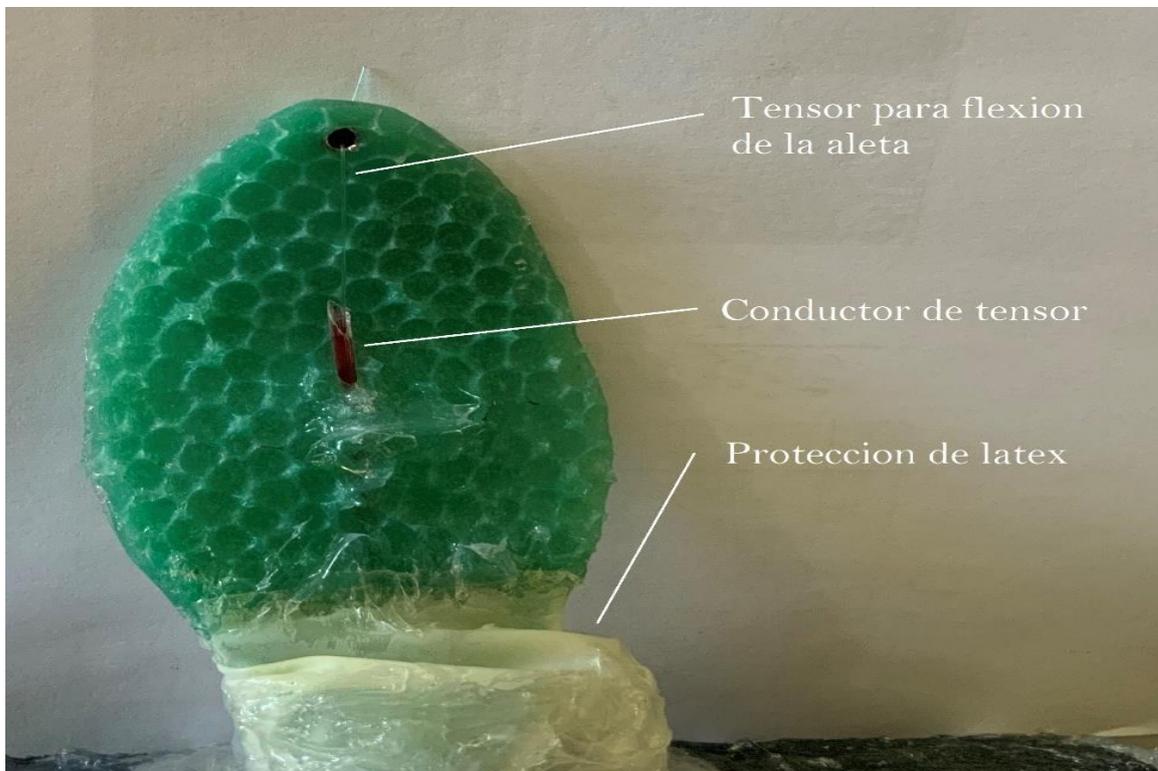


**Figura 3 – 4:** Implementación articulación rotacional  
Realizado por: Ñacato Diego, 2019

#### 4.1.2 *Diseño de la aleta*

La aleta fue diseñada en base de silicona emulando lo mejor posible a la aleta con sus requerimientos para cada movimiento tomando en cuenta, el tercer movimiento principal que es la flexión de la aleta, mediante el cable tensor que es de un polímero de nylon transparente, el cual será el encargado de ayudar a flexionar la aleta.

En la figura 4-4 se puede observar la aleta ya implementada con sus mecanismos, mientras que en la figura 5-4 se puede observar la aleta en su estado natural de la carachama que cual fue inspirada el prototipo.



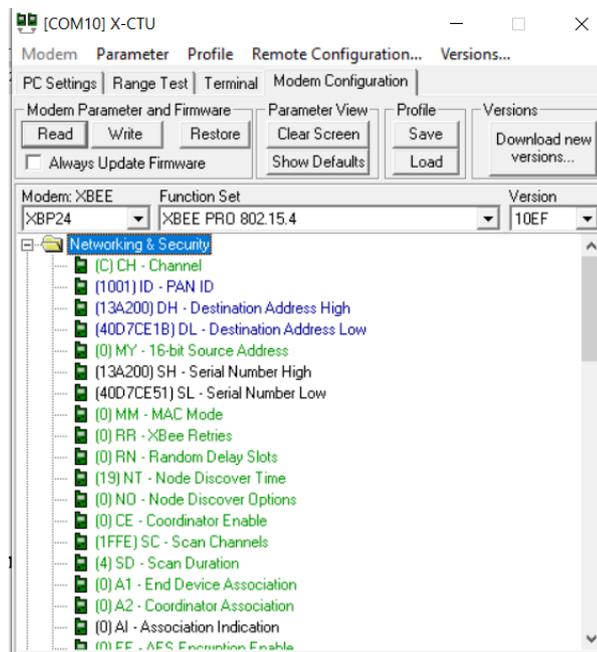
**Figura 4 – 4:** Aleta implementada  
Realizado por: Ñacato Diego, 2019



**Figura 5 – 4:** Aleta de la carachama  
Realizado por: Ñacato Diego, 2019

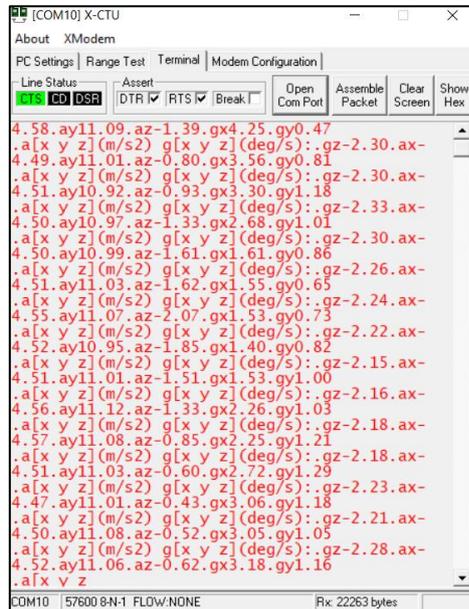
### 4.1.3 Configuración módulos de comunicación

Para los módulos de comunicación se realizó una configuración denominada punto a punto, lo que nos permite tener mayor seguridad puesto que cada módulo Xbee está configurado con la dirección única que posee cada módulo, esta configuración nos permite recobrar de manera inmediata la comunicación después de la pérdida de energía o cuando se pierde la línea de vista.

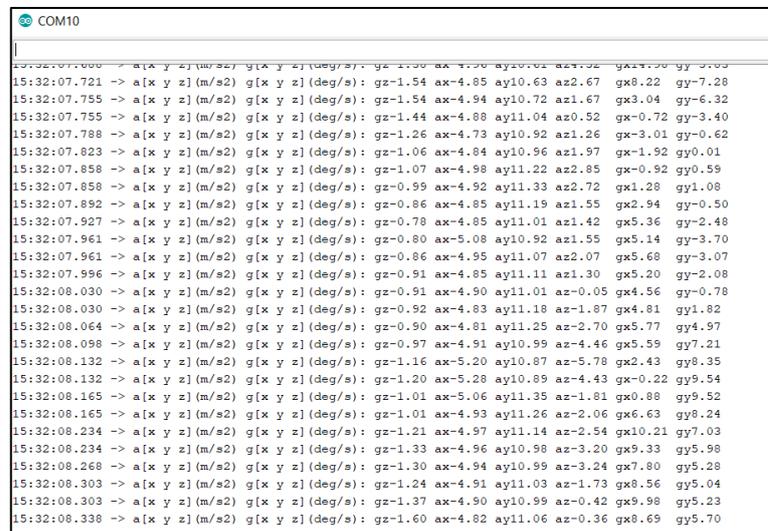


**Figura 6 – 4:** Configuración Xbee  
Realizado por: Ñacato Diego, 2019

El software X-CTU nos permite realizar la configuración de cada módulo de comunicación además nos permite visualizar los datos que está recibiendo la pc mediante el módulo receptor, adicionalmente permite realizar un Test para verificar el correcto funcionamiento del módulo.



**Figura 7 – 4:** Datos recibidos X-CTU  
Realizado por: Ñacato Diego, 2019



**Figura 8 – 4:** Datos recibidos mediante monitor serial  
Realizado por: Ñacato Diego, 2019

## 4.2 Pruebas de funcionamiento

Una vez que el prototipo ha sido ensamblado, es necesario realizar varios procedimientos de pruebas de funcionamiento. Para la realización de estas pruebas de carácter técnico se hace

necesario valorar cada una de ellas con valores booleanos que permiten establecer el funcionamiento de acuerdo con los siguientes parámetros:

Válido: Se obtiene una respuesta válida, si el resultado de la prueba es exitoso, es decir si funciona con normalidad.

Inválido: Se obtiene una respuesta Invalida, si no existe funcionamiento en la prueba.

Cuestionable: Se considera cuestionable siempre que la prueba tenga problemas de funcionamiento y aún así se ejecute la orden dada.

#### ***4.2.1 Prueba de comunicación inalámbrica***

Esta prueba consiste en realizar el procedimiento de conexión y desconexión de la tarjeta de control y evaluar el porcentaje de fiabilidad de la reconexión entre el RECEPTOR y el prototipo. El objetivo de esta prueba está en probar si el prototipo es capaz de reestablecer la comunicación entre el RECEPTOR conectado al PC y el TRANSMISOR conectado a la tarjeta de control de manera automática.

Para el desarrollo de esta prueba se utilizó el procedimiento:

ENCENDIDO/ APAGADO: Consiste en el corte y alimentación de la fuente de todos los módulos conectados a la placa de control, y mediante un monitor serial verificar si el receptor esta aceptando datos.

Este procedimiento se realiza con el objetivo de reiniciar furtivamente la tarjeta de control y con ello reiniciar también su funcionamiento y su conexión inalámbrica.

El tiempo de activación del botón de desconexión será de un segundo. Durante el tiempo de uso de la batería se realizaron aproximadamente 50 desconexiones.

Encendido – Apagado					
Número de pruebas	Válido	Inválido	Cuestionable	Total	%
50	50	0	0	50	100%
%	100	0	0	50	100%

**Tabla 1 – 4:** Variables encendido apagado

Realizado por: Ñacato Diego, 2019

Como se muestra en la tabla 1-4, en la prueba encendido apagado 100% de valores válidos para el funcionamiento. Esto indica que la conexión inalámbrica es una característica técnica confiable en el prototipo.

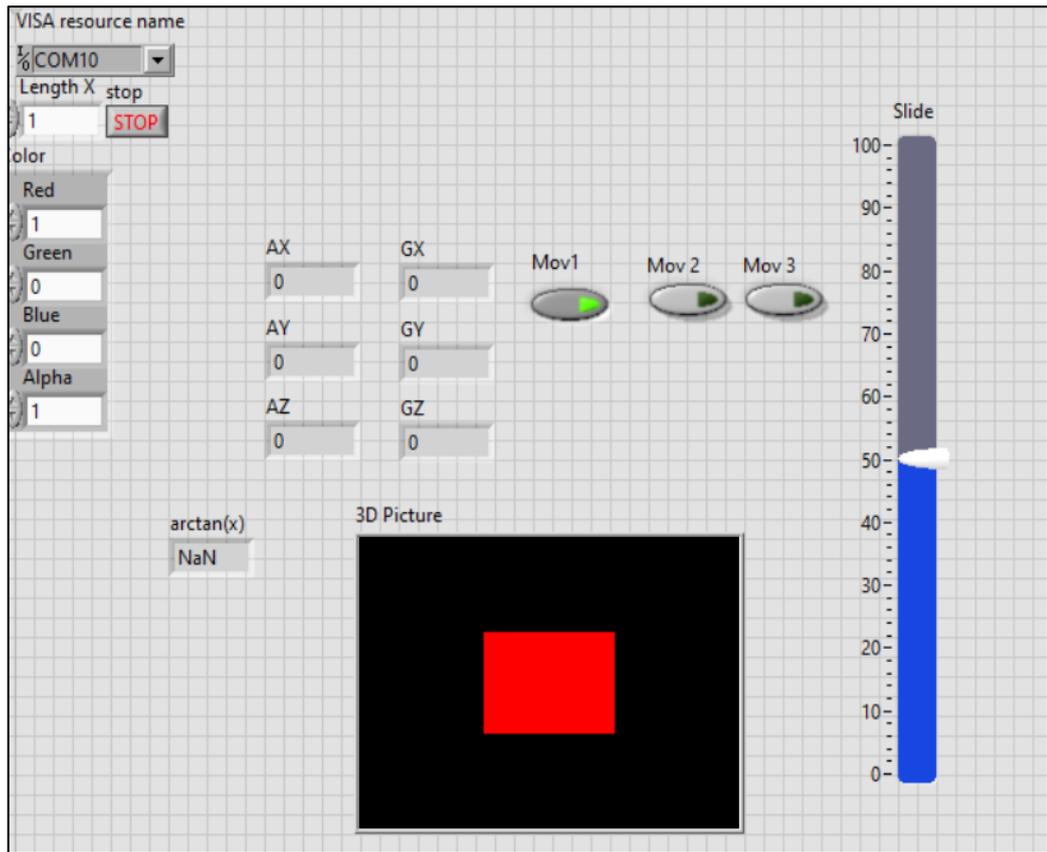
#### **4.2.2 Prueba de activación Grado de libertad 1**

Esta prueba consiste en realizar el procedimiento de activación de la comunicación entre La interfaz HMI y la placa de control como puente de comunicación entre el transmisor y receptor. El objetivo de esta prueba está en probar si es posible activar la comunicación y transferencia del movimiento 1 hasta la placa de control con la utilización del botón de activación.

Para el desarrollo de esta prueba se utilizó el procedimiento:

Encender y Apagar: Consiste en la utilización del botón de encendido y apagado integrado en la HMI para enviar la orden de ejecución del grado de libertad. Este procedimiento se realiza con el objetivo de ejecutar la comunicación serial entre el prototipo y la PC.

Para la realización de la prueba se realiza el encendido y apagado del primer grado de libertad un número de 50 secuencias que abarca el fallo general, y que nos da una prueba confiable.



**Figura 9 – 4:** Activación Movimiento 1 GDL 1  
 Realizado por: Ñacato Diego, 2019

Grado de libertad 1						
Número de pruebas	Valor	Válido	Inválido	Cuestionable	Total	%
50	SI	30	0	0	50	100%
	NO		20			
%		60%	40%	0%	50	100%

**Tabla 2 – 4:** Variables grado de libertad 1  
 Realizado por: Ñacato Diego, 2019

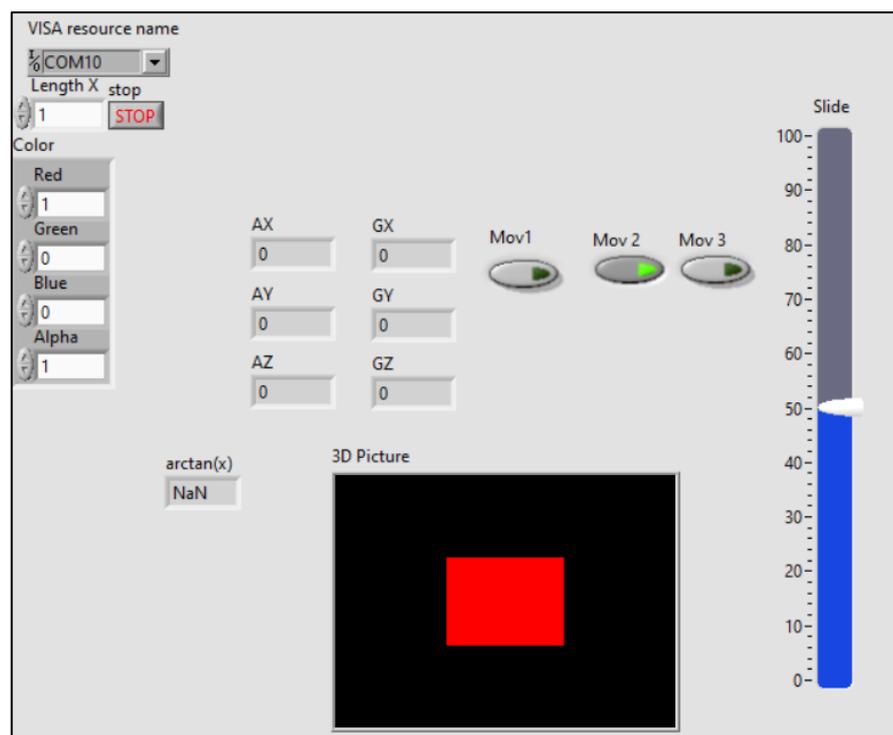
### 4.2.3 Prueba de activación Grado de libertad 2

Esta prueba consiste en realizar el procedimiento de activación de la comunicación entre La interfaz HMI y la placa de control como puente de comunicación entre el transmisor y receptor. El objetivo de esta prueba está en probar si es posible activar la comunicación y transferencia del movimiento 2 hasta la placa de control con la utilización del botón de activación.

Para el desarrollo de esta prueba se utilizó el procedimiento:

Encender y Apagar: Consiste en la utilización del botón de encendido y apagado integrado en la HMI para enviar la orden de ejecución del grado de libertad. Este procedimiento se realiza con el objetivo de ejecutar la comunicación serial entre el prototipo y la PC.

Para la realización de la prueba se realiza el encendido y apagado del segundo grado de libertad un número de 50 secuencias que abarca el fallo general, y que nos da una prueba confiable.



**Figura 10 – 4:** Activación Movimiento 2 GDL 2  
Realizado por: Ñacato Diego, 2019

<b>Grado de libertad 2</b>						
<b>Número de pruebas</b>	<b>Valor</b>	<b>Válido</b>	<b>Inválido</b>	<b>Cuestionable</b>	<b>Total</b>	<b>%</b>
<b>50</b>	SI	33	0	1	50	100%
	NO		16			
<b>%</b>		66 %	32%	2%	50	100%

**Tabla 3 – 4:** Variables grado de libertad 2  
**Realizado por:** Ñacato Diego, 2019

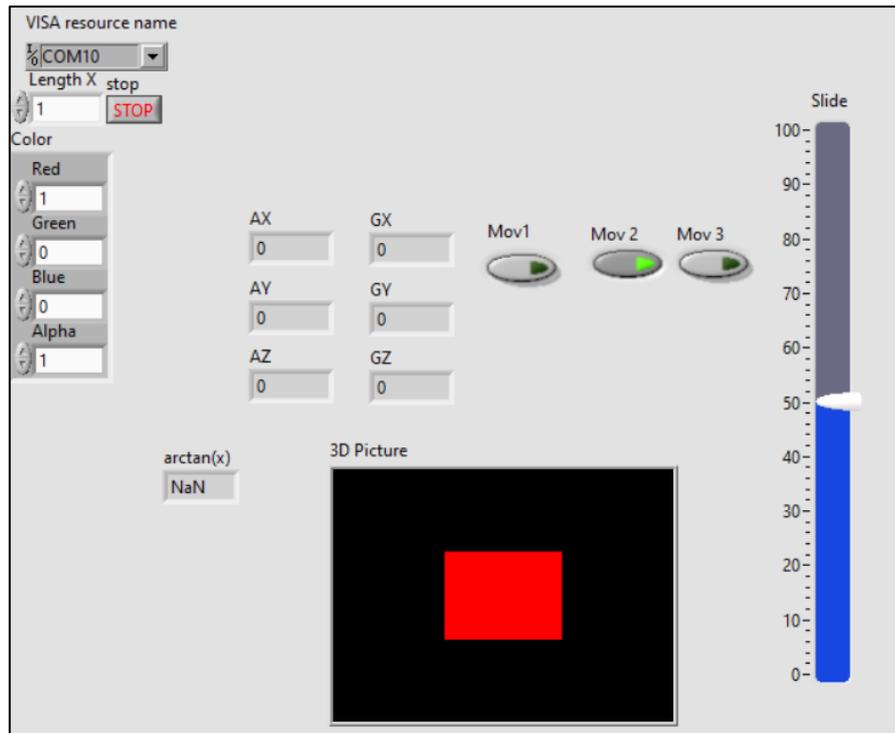
#### **4.2.4 Prueba de activación Grado de libertad 3**

Esta prueba consiste en realizar el procedimiento de activación de la comunicación entre La interfaz HMI y la placa de control como puente de comunicación entre el transmisor y receptor. El objetivo de esta prueba está en probar si es posible activar la comunicación y transferencia del movimiento 3 hasta la placa de control con la utilización del botón de activación.

Para el desarrollo de esta prueba se utilizó el procedimiento:

**Encender y Apagar:** Consiste en la utilización del botón de encendido y apagado integrado en la HMI para enviar la orden de ejecución del grado de libertad. Este procedimiento se realiza con el objetivo de ejecutar la comunicación serial entre el prototipo y la PC.

Para la realización de la prueba se realiza el encendido y apagado del tercer grado de libertad un número de 50 secuencias que abarca el fallo general, y que nos da una prueba confiable.



**Figura 11 – 4:** Activación Movimiento 3 GDL 3  
 Realizado por: Ñacato Diego, 2019

Grado de libertad 3						
Número de pruebas	Valor	Válido	Inválido	Cuestionable	Total	%
50	SI	42	0	5	50	100%
	NO		3			
%		84%	6%	10%	50	100%

**Tabla 4 – 4:** Variables grado de libertad 3  
 Realizado por: Ñacato Diego, 2019

### 4.3 Funcionamiento del prototipo

Luego de realizar la calibración del sensor MPU-6050 y las pruebas de funcionamiento de cada uno de los grados de libertad que componen el prototipo. En la figura 4-12 se muestra el prototipo

final implementado. El detalle de su funcionamiento de muestra en imágenes que enseñan cada uno de los grados de libertad en el Anexo D.



**Figura 12 – 4:** Prototipo Implementado  
Realizado por: Ñacato Diego, 2019

#### **4.4 Análisis económico de la implementación del prototipo**

A continuación, se muestra el costo económico del prototipo después de realizar un análisis económico de cada uno de los componentes de sus módulos. Este informe incluye el valor de los elementos que han sido importados y el costo de la estructura.

Etapas	Componentes	Cantidad	Costo	Procedencia	Total USD
<b>Mecánica de movimientos</b>	Impresión 3d filamento de nylon	25	3	Nacional	75
		2	1	Nacional	2
<b>Diseño de aleta</b>	Sellador de silicona	2	10	Nacional	20
	filamento PLA	5	3	Nacional	15
	nanoMusculo 6p	6	26,85	USA Importado	161,1
	nano musculo 2p	6	23,85	USA Importado	143,1
	Miga Analog Driver v5 - MOSFET Switch	10	35,85	USA Importado	358,5
	dash4	1	149,7	USA Importado	149,7
	Migaone 12	1	119,85	USA Importado	119,85
<b>Placa de control</b>	Mpu 6050	2	10	Nacional	20
	Arduino Uno	1	10	Nacional	10
	Arduino Nano	1	8	Nacional	8
	led, resistencias Regulador de voltaje con voltmetro	10	1	Nacional	10
	Regulador Pololu	1	6	Nacional	6
	Varios	1	30	Nacional	30
<b>Comunicación inalámbrica</b>	xbee si pro	2	125	USA Importado	250
	Explorer regulado	1	33	USA Importado	33
	Usb Explorer	1	35	USA Importado	35
<b>TOTAL</b>					<b>1456,25</b>

**Tabla 5 – 4:** Análisis de costo  
Realizado por: Nacato Diego, 2019

## 4.5 Validación de la hipótesis

### 4.5.1 Problema

Se desea conocer si el funcionamiento promedio de las instrucciones dadas al prototipo en los 3 grados de libertad en conexión inalámbrica difiere, con el fin de conocer si la secuencia de movimientos presenta la mayor cantidad de errores al ser planteados para la orientación del

prototipo y medir la funcionalidad de la mecánica del movimiento de la aleta planteada. La funcionalidad del prototipo está definida por el cumplimiento de los objetivos de cada una de las pruebas de movimiento aplicadas a cada grado de libertad.

#### 4.5.1.1 Grado de libertad 1

### TEST DE NORMALIDAD DE LA VARIABLE VALOR MEDIDO

Shapiro-Wilk normality test

$W = 0.67026$ ,  $p\text{-value} = 0.000000002515$

Según el test de Shapiro-Wilk con un  $p\text{-valor} = 0.000000002515 < 0.05$ , la variable valor medido no se distribuye normalmente al 95% de confianza.

Por este resultado se aplica el test no paramétrico de Wilcoxon, para comparar la variable valor medido con el valor teórico de 7.96.

### TEST DE WILCOXON

Prueba de hipótesis - Movimiento 1

Ho: La distribución de los datos de la variable valor medido no difiere significativamente del valor teórico de 7.96.

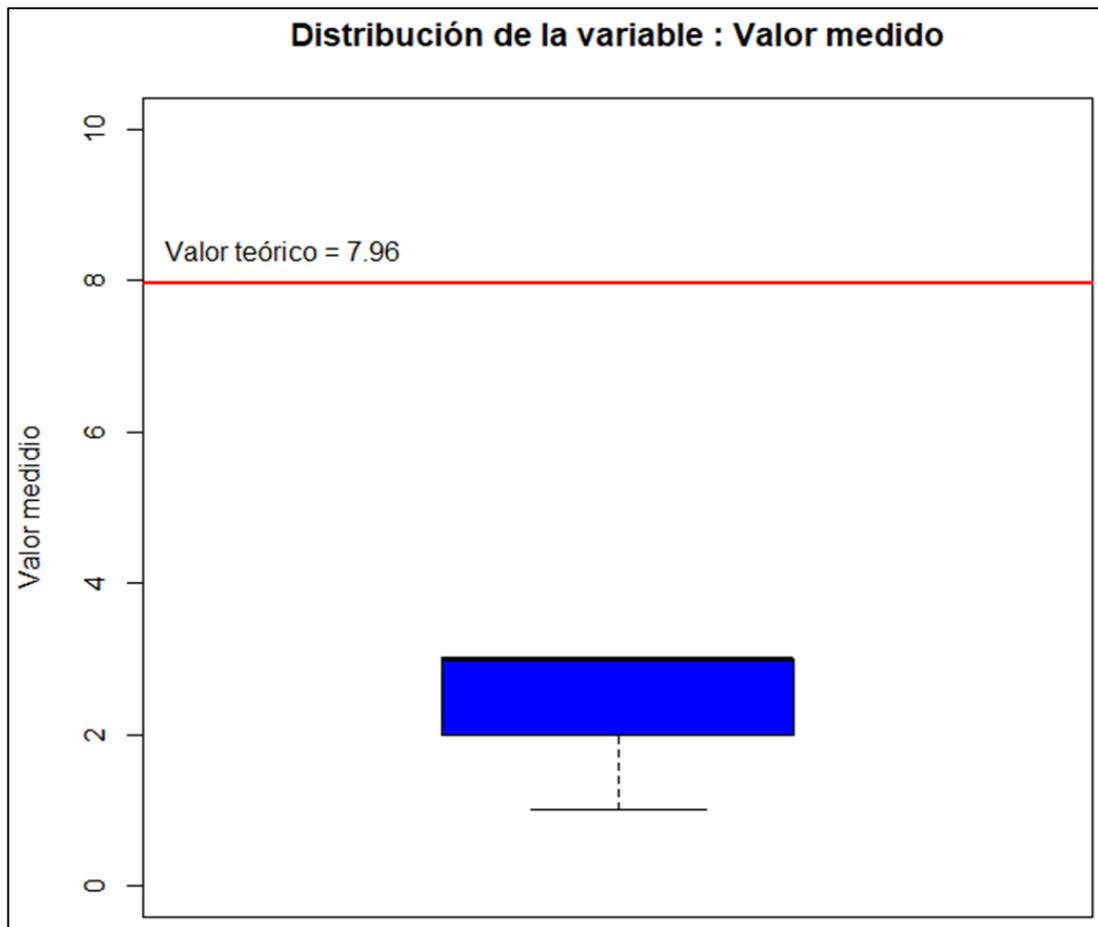
Ha: La distribución de los datos de la variable valor medido difiere significativamente del valor teórico de 7.96.

<b>Wilcoxon signed rank test with continuity correction</b>			
<b>data: VALOR.MEDIDO</b>			
<b>V = 0, p-value = 1.998e-10</b>			
<b>alternative hypothesis: true location is not equal to 7.96</b>			

**Figura 13 – 4:** Resultado del test de Wilcoxon para grado de libertad 1  
Realizado por: Nacato Diego, 2019

Según el test de Wilcoxon con un  $p\text{-valor} = 1.998e-10 < 0.05$ , se acepta Ha, es decir, los datos de la variable valor medido difiere significativamente del valor teórico de 7.96 al 95% de confianza.

Como también se puede observar en la figura.



**Figura 14 – 4:** Distribución de variable test de Wilcoxon grado de libertad 1  
Realizado por: Ñacato Diego, 2019

#### 4.5.1.2 Grado de libertad 2

### TEST DE NORMALIDAD DE LA VARIABLE VALOR MEDIDO

Shapiro-Wilk normality test

$W = 0.672$ ,  $p\text{-value} = 0.00000000269$

Según el test de Shapiro-Wilk con un  $p\text{-valor} = 0.00000000269 < 0.05$ , la variable valor medido no se distribuye normalmente al 95% de confianza.

Por este resultado se aplica el test no paramétrico de Wilcoxon, para comparar la variable valor medido con el valor teórico de 21.7.

## TEST DE WILCOXON

Prueba de hipótesis - Movimiento 2

Ho: La distribución de los datos de la variable valor medido no difiere significativamente del valor teórico de 21.7.

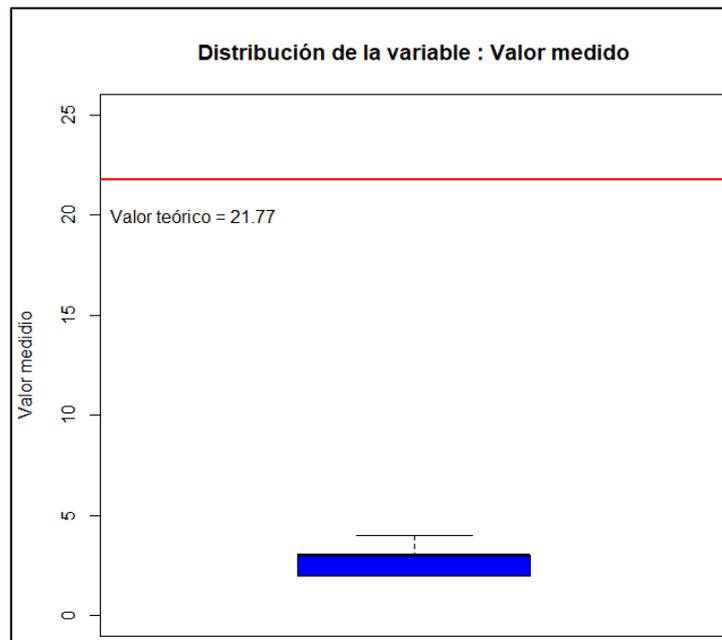
Ha: La distribución de los datos de la variable valor medido difiere significativamente del valor teórico de 21.7.

Wilcoxon signed rank test with continuity correction			
data: VALOR.MEDIDO			
V = 0, p-value = 1.693e-10			
alternative hypothesis: true location is not equal to 21.77			

**Figura 15 – 4:** Resultado del test de Wilcoxon para grado de libertad 2  
Realizado por: Ñacato Diego, 2019

Según el test de Wilcoxon con un p-valor =  $1.693e-10 < 0.05$ , se acepta Ha, es decir, los datos de la variable valor medido difiere significativamente del valor teórico de 21.77 al 95% de confianza.

Como también se puede observar en la figura.



**Figura 16 – 4:** Distribución de variable test de Wilcoxon grado de libertad 2  
Realizado por: Ñacato Diego, 2019

#### 4.5.1.3 Grado de libertad 3

### TEST DE NORMALIDAD DE LA VARIABLE VALOR MEDIDO

Shapiro-Wilk normality test

$W = 0.72812$ ,  $p\text{-value} = 0.00000002744$

Según el test de Shapiro-Wilk con un  $p\text{-valor} = 0.00000002744 < 0.05$ , la variable valor medido no se distribuye normalmente al 95% de confianza.

Por este resultado se aplica el test no paramétrico de Wilcoxon, para comparar la variable valor medido con el valor teórico de 16.67.

### TEST DE WILCOXON

Prueba de hipótesis - Movimiento 3

$H_0$ : La distribución de los datos de la variable valor medido no difiere significativamente del valor teórico de 16.67.

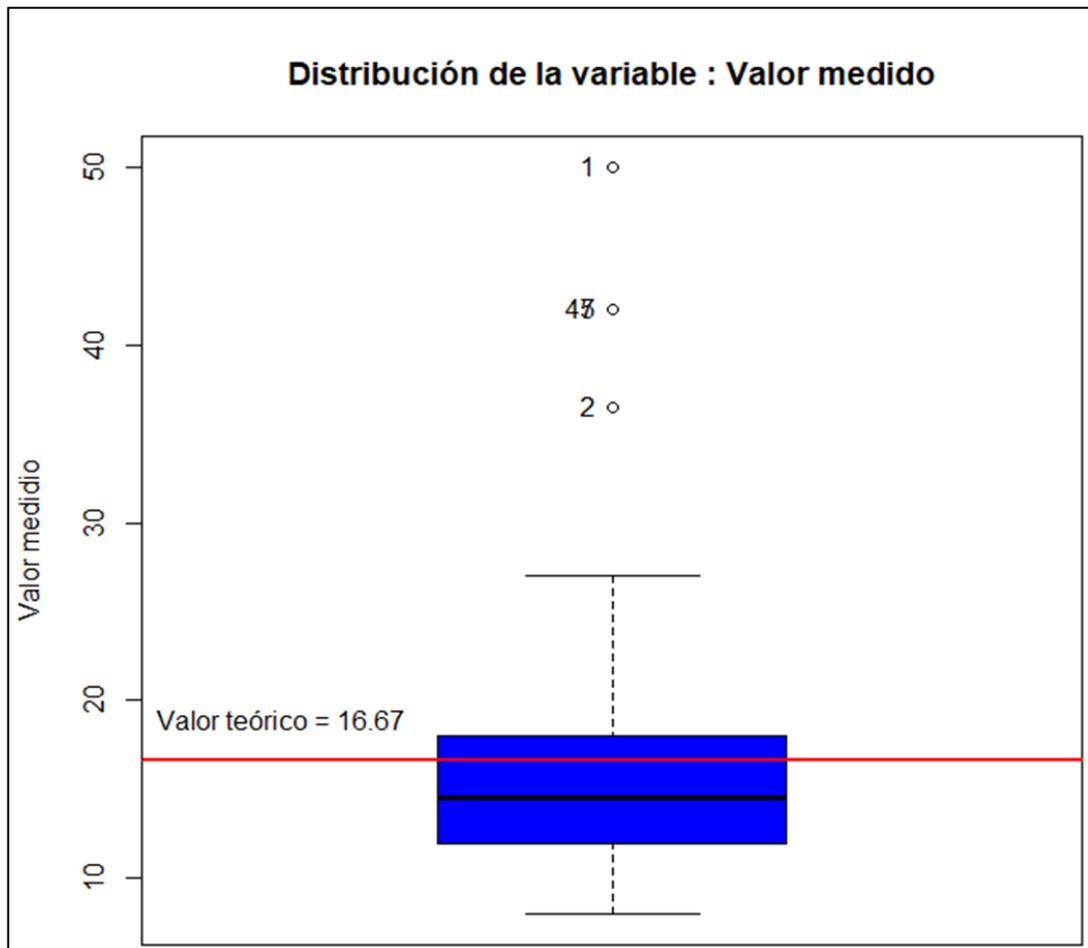
$H_a$ : La distribución de los datos de la variable valor medido difiere significativamente del valor teórico de 16.67.

<b>Wilcoxon signed rank test with continuity correction</b>			
<b>data: VALOR.MEDIDO</b>			
<b>V = 458, p-value = 0.08384</b>			
<b>alternative hypothesis: true location is not equal to 16.67</b>			

**Figura 17 – 4:** Resultado del test de Wilcoxon para grado de libertad 3  
Realizado por: Ñacato Diego, 2019

Según el test de Wilcoxon con un  $p\text{-valor} = 0.08384 > 0.05$ , se acepta  $H_0$ , es decir, los datos de la variable valor medido no difiere significativamente del valor teórico de 16.67 al 95% de confianza.

En la figura 18-4, se observa cuatro valores atípicos, correspondientes a los valores de las pruebas 1, 2, 5, 47.



**Figura 18 – 4:** Distribución de variable test de Wilcoxon grado de libertad 3  
Realizado por: Ñacato Diego, 2019

### Hipótesis

Una aleta pectoral, implementada con actuadores no convencionales, permite un control de orientación de un robot pez *Pseudorinelepis genibarbis*.

### Toma de decisión

Como se puede observar en los test aplicados a cada grado de libertad para el grado de libertad 1: se acepta la hipótesis alternativa, para el grado de libertad 2: se acepta la hipótesis nula, mientras que para el grado de libertad 3: se acepta la hipótesis nula.

Por lo tanto, se puede concluir que la funcionalidad de la mecánica aplicada para los grados de libertad 1 y 2 difiere significativamente en los resultados esperados, mientras que para el grado de libertad 3 los resultados no difieren significativamente de los resultados esperados.

El prototipo cuenta con 3 grados de libertad, para el control de orientación.

## CONCLUSIONES

- Se implementó un prototipo de aleta pectoral bio-inspirada en un pez *Pseudorinelepis genibarbis*, con tres grados de libertad utilizando actuadores de memoria de forma, mediante una conexión inalámbrica para el control de cada grado de libertad, siendo importante analizar su símil biológico para establecer los intervalos de acción, que mediante un grupo de pruebas se pudo comprobar la capacidad de cada grado de libertad para cumplir con la consigna.
- Se realizó la investigación de los mecanismos utilizados en la emulación de articulaciones, siendo la más adecuada la de tipo rotacional que nos brinda la facilidad de manejar 3 grados de libertad reduciendo el tamaño del prototipo en comparación con otros mecanismos de transmisión de movimiento.
- Se diseñó el sistema de control con una técnica on off en función de los actuadores a través de un sistema inalámbrico, el cual permite mantener el control mediante una interfaz gráfica de cada grado de libertad con una retroalimentación visual para el operador humano.
- Se sometió el prototipo a pruebas de funcionamiento de cada grado de libertad con la finalidad de evaluar los controles inalámbricos de cada grado de libertad verificando su ejecución al momento de enviar las órdenes de acción mediante la interfaz gráfica, además para verificar si se tiene retroalimentación mediante el sensor acelerómetro implementado.

## RECOMENDACIONES

- Desarrollar actuadores propios para este tipo de aplicación, para poder implementar la carrera de desplazamiento en actuadores lineales, tomando en cuenta la longitud de arco para el desplazamiento deseado.
- Implementar Sistemas de control que se adapten a los movimientos deseados con retroalimentación para mejorar lo movimientos en los grados de libertad de los robot pez
- Utilizar sistemas de transmisión mecánicos que mejoren el movimiento de cada grado de libertad y de esta manera obtener un movimiento preciso en el desplazamiento del robot pez.
- Desarrollar un sistema de Inmersión que aporte con la maniobrabilidad del robot pez en un entorno bajo el agua y poder alcanzar mayores distancias de profundidad sin forzar los mecanismos de las aletas para su desplazamiento.
- Reducir el tamaño del robot pez para poder utilizar actuadores no convencionales de tipo comercial, mejorando los mecanismos de transmisión de movimiento haciéndolos más simples y funcionales.
- Impermeabilizar los sistemas que componen el robot pez, ya sea de manera individual o con alguna técnica especializada para circuitos electrónicos o de manera exterior recubriendo toda la estructura con resinas de vulcanizado.
- Implementar algoritmos de inteligencia artificial, con la instrumentación necesaria para mejorar los movimientos de cada grado de libertad de manera automática.

## BIBLIOGRAFÍA

- Andaluz, A. M.** (2004). Algoritmos Evolutivos y Algoritmos Genéticos. *Universidad Carlos III de Madrid*, 1–14. Retrieved from <http://www.it.uc3m.es/~jvillena/irc/practicas/estudios/aeag>
- Berenbrink, M.** (2007). Historical reconstructions of evolving physiological complexity: O<sub>2</sub> secretion in the eye and swimbladder of fishes. *Journal of Experimental Biology*, 210(9), 1641–1652. <https://doi.org/10.1242/jeb.003319>
- Cernusca, D, Milici, D. L., & Poienar, M.** (2016). Development of Special Actuators Using Smart Materials. *Proceedings of the 2016 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering*, (Epe), 567–570.
- Cernusca, Dumitru, Milici, D. L., & Ungureanu, C.** (2016). 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, EPE 2016*, (Epe), 171–174. <https://doi.org/10.1109/ICEPE.2016.7781327>
- Chaehoi, A., Dumas, N., Maily, F., Latorre, L., & Nouet, P.** (2005). Absolute pitch, roll and yaw measurement on CMOS. *Proceedings of IEEE Sensors, 2005*, 133–136. <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2005.1597654>
- Elsevier Connect. (2018).** *Apuntes de Anatomía. Tipos de articulaciones: sinoviales y sólidas.* Retrieved from <https://www.elsevier.com/es-es/connect/medicina/anatomia-tipos-articulaciones-sinoviales-y-solidas>
- Gao, J., Bi, S., Li, J., & Liu, C.** (2009). Design and experiments of robot fish propelled by pectoral fins. *2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO 2009*, 445–450. <https://doi.org/10.1109/ROBIO.2009.5420688>
- Garbacz, H., Topolski, K., & Motyka, M.** (2019). Chapter 3 - Hydrostatic extrusion. In *Nanocrystalline Titanium*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814599-9.00003-1>
- H, J. M., & N, P. V. (2014).** “Soft Robotic ”: *Una nueva generación de robots.* 109–118.
- Hernandez, R.** (2010). *Introduccion a los sistemas de control.* Retrieved from [file:///C:/Users/DJTICO/Desktop/conceptual/1 Control.pdf](file:///C:/Users/DJTICO/Desktop/conceptual/1%20Control.pdf)

- Jung, D. S., Kruusmaa, M., Listak, M., Liszewski, A., Maud, J. L., Megill, W. M., ... Toming, G.** (2014). FILOSE for Svenning. *Ieee Robotics & Automation Magazine*, (September), 51–62.
- Kato, N., & Inaba, T.** (1998). Control performance of fish robot with pectoral fins in horizontal plane. *UT 1998 - Proceedings of the 1998 International Symposium on Underwater Technology*, 357–362. <https://doi.org/10.1109/UT.1998.670126>
- Katzschmann, R. K., De Maille, A., Dorhout, D. L., & Rus, D.** (2016). Cyclic hydraulic actuation for soft robotic devices. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2016-Novem*, 3048–3055. <https://doi.org/10.1109/IROS.2016.7759472>
- Katzschmann, R. K., DelPreto, J., MacCurdy, R., & Rus, D.** (2018). Exploration of underwater life with an acoustically controlled soft robotic fish. *Science Robotics*, 3(16), eaar3449. <https://doi.org/10.1126/scirobotics.aar3449>
- Kongsberg.** (2018). *Seaglider*. (May), 1–2. Retrieved from [https://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0397.nsf/AllWeb/3DB608B825D76BFBC1257B9F00392305/\\$file/Seaglider\\_product\\_specification.pdf](https://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0397.nsf/AllWeb/3DB608B825D76BFBC1257B9F00392305/$file/Seaglider_product_specification.pdf)
- Lauder, G. V., & Madden, Æ. P. G. A.** (2007). *Fish locomotion : kinematics and hydrodynamics of flexible foil-like fins*. 641–653. <https://doi.org/10.1007/s00348-007-0357-4>
- Rangel, E. R., García, J. A. R., Peña, E. M., & Hernández, J. L.** (2012). Biomimética: innovación sustentable inspirada por la naturaleza. *8 de Junio de 2012, Número 54*, 56–61.
- Rottiers, W., Broeck, L. Van Den, Peeters, C., & Arras, P.** (2011). *Shape Memory Materials and their applications*. 1–12.
- Silvia E. Rodrigo, Jorge A. C. Ambrósio, O. P.** (2017). *ANÁLISIS DINÁMICO INVERSO DE MODELOS BIOMECÁNICOS ESPACIALES 8º CONGRESO IBEROAMERICANO DE INGENIERIA MECANICA*. (May 2014).
- Speller, L.** (2012). Fishing for Pollutants. *Ingenia*, (53), 27–32.
- Thijssen, E. L. R. W.** (2018). GEHEUGENMETAAL. *Matrix*.
- Tianmiao, W., Wenkai, M., & Jianhong, L.** (2007). Study on control algorithm of tail fin flapping of robofish. *2006 IEEE International Conference on Industrial Informatics, INDIN'06, 00*, 815–820. <https://doi.org/10.1109/INDIN.2006.275667>

- Vukusic, P., & Barr, J.** (2010). *Introducción al diseño bioinspirado. 5*. Retrieved from <http://www.academyofvisioncare.com/files/documents/Productos Bio-inspirados.pdf>
- Wakjira, J. F.** (2001). The VT1 Shape Memory Alloy Heat Engine Design The VT1 Shape Memory Alloy Heat Engine Design Jilcha Wakjira ( Abstract ). *Design*, (January).
- Yoneyama, T., & Miyazaki, S.** (2008). Shape Memory Alloys for Biomedical Applications. In *Shape Memory Alloys for Biomedical Applications*. <https://doi.org/10.1533/9781845695248>
- Zhang, F., Wang, J., Thon, J., Thon, C., Litchman, E., & Tan, X.** (2014). Gliding robotic fish for mobile sampling of aquatic environments. *Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, ICNSC 2014*, 167–172. <https://doi.org/10.1109/ICNSC.2014.6819619>
- Zhong, Y., Li, Z., & Du, R.** (2013). The design and prototyping of a wire-driven robot fish with pectoral fins. *2013 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO 2013*, (December), 1918–1923. <https://doi.org/10.1109/ROBIO.2013.6739749>

## ANEXOS

### Anexo A: Datos MPU6050

```
// Librerías I2C para controlar el MPU6050
// la librería MPU6050.h necesita I2Cdev.h, I2Cdev.h necesita Wire.h
#include "I2Cdev.h"
#include "MPU6050.h"
#include "Wire.h"

int pinled1=8;
int pinled2=9;
int pinled3=10;
//int pinled4=11;
//int pinled4=12;
//int pinled4=13;

int var;

// La dirección del MPU6050 puede ser 0x68 o 0x69, dependiendo
// del estado de AD0. Si no se especifica, 0x68 estará implícito
MPU6050 sensor;

// Valores RAW (sin procesar) del acelerómetro y giroscopio en los ejes x,y,z
int ax, ay, az;
int gx, gy, gz;

void setup() {
  pinMode(pinled1,OUTPUT);
  pinMode(pinled2,OUTPUT);
  pinMode(pinled3,OUTPUT);
  Serial.begin(57600); //Iniciando puerto serial
  Wire.begin(); //Iniciando I2C
  sensor.initialize(); //Iniciando el sensor

  if (sensor.testConnection()) Serial.println("Sensor iniciado correctamente");
  else Serial.println("Error al iniciar el sensor");
}

void loop() {
  // Leer las aceleraciones y velocidades angulares
  if(Serial.available())
  {
    var=Serial.read();
    if(var=='a')
```

```
{digitalWrite(pinled1,HIGH);}
if(var=='w')
{digitalWrite(pinled1,LOW);}
if(var=='b')
{digitalWrite(pinled2,HIGH);}
if(var=='x')
{digitalWrite(pinled2,LOW);}
if(var=='c')
{digitalWrite(pinled3,HIGH);}
if(var=='y')
{digitalWrite(pinled3,LOW);}
}
sensor.getAcceleration(&ax, &ay, &az);
sensor.getRotation(&gx, &gy, &gz);

//Mostrar las lecturas separadas por un [tab]
Serial.print("a[x y z] g[x y z]:\tgz");
Serial.print(ax); Serial.print("\tax");
Serial.print(ay); Serial.print("\tay");
Serial.print(az); Serial.print("\taz");
Serial.print(gx); Serial.print("\tgx");
Serial.print(gy); Serial.print("\tgy");
Serial.println(gz);

delay(100);
```

## Anexo B: Calibración MPU6050

```
// Librerías I2C para controlar el mpu6050
// la librería MPU6050.h necesita I2Cdev.h, I2Cdev.h necesita Wire.h
#include "I2Cdev.h"
#include "MPU6050.h"
#include "Wire.h"

// La dirección del MPU6050 puede ser 0x68 o 0x69, dependiendo
// del estado de AD0. Si no se especifica, 0x68 estará implícito
MPU6050 sensor;

// Valores RAW (sin procesar) del acelerómetro y giroscopio en los ejes x,y,z
int ax, ay, az;
int gx, gy, gz;

// Variables usadas por el filtro pasa bajos
long f_ax, f_ay, f_az;
int p_ax, p_ay, p_az;
long f_gx, f_gy, f_gz;
int p_gx, p_gy, p_gz;
int counter=0;

// Valor de los offsets
int ax_o, ay_o, az_o;
int gx_o, gy_o, gz_o;

void setup() {
  Serial.begin(57600); //Iniciando puerto serial
  Wire.begin();      //Iniciando I2C
  sensor.initialize(); //Iniciando el sensor

  if (sensor.testConnection()) Serial.println("Sensor iniciado correctamente");

  // Leer los offset los offsets anteriores
  ax_o=sensor.getXAccelOffset();
  ay_o=sensor.getYAccelOffset();
  az_o=sensor.getZAccelOffset();
  gx_o=sensor.getXGyroOffset();
  gy_o=sensor.getYGyroOffset();
  gz_o=sensor.getZGyroOffset();

  Serial.println("Offsets:");
  Serial.print(ax_o); Serial.print("\t");
  Serial.print(ay_o); Serial.print("\t");
  Serial.print(az_o); Serial.print("\t");
  Serial.print(gx_o); Serial.print("\t");
  Serial.print(gy_o); Serial.print("\t");
```

```

Serial.print(gz_o); Serial.print("\t");
Serial.println("\nEnvie cualquier caracter para empezar la calibracionnn");
// Espera un caracter para empezar a calibrar
while (true){if (Serial.available()) break;}
Serial.println("Calibrando, no mover IMU");

}

void loop() {
// Leer las aceleraciones y velocidades angulares
sensor.getAcceleration(&ax, &ay, &az);
sensor.getRotation(&gx, &gy, &gz);

// Filtrar las lecturas
f_ax = f_ax-(f_ax>>5)+ax;
p_ax = f_ax>>5;
f_ay = f_ay-(f_ay>>5)+ay;
p_ay = f_ay>>5;
f_az = f_az-(f_az>>5)+az;
p_az = f_az>>5;
f_gx = f_gx-(f_gx>>3)+gx;
p_gx = f_gx>>3;
f_gy = f_gy-(f_gy>>3)+gy;
p_gy = f_gy>>3;

f_gz = f_gz-(f_gz>>3)+gz;
p_gz = f_gz>>3;

//Cada 100 lecturas corregir el offset
if (counter==100){
//Mostrar las lecturas separadas por un [tab]
Serial.print("promedio:"); Serial.print("\t");
Serial.print(p_ax); Serial.print("\t");
Serial.print(p_ay); Serial.print("\t");
Serial.print(p_az); Serial.print("\t");
Serial.print(p_gx); Serial.print("\t");
Serial.print(p_gy); Serial.print("\t");
Serial.println(p_gz);

//Calibrar el acelerometro a 1g en el eje z (ajustar el offset)
if (p_ax>0) ax_o--;
else {ax_o++;}
if (p_ay>0) ay_o--;
else {ay_o++;}
if (p_az-16384>0) az_o--;
else {az_o++;}

sensor.setXAccelOffset(ax_o);

```

```
sensor.setYAccelOffset(ay_o);
sensor.setZAccelOffset(az_o);

//Calibrar el giroscopio a 0°/s en todos los ejes (ajustar el offset)
if (p_gx>0) gx_o--;
else {gx_o++;}
if (p_gy>0) gy_o--;
else {gy_o++;}
if (p_gz>0) gz_o--;
else {gz_o++;}

sensor.setXGyroOffset(gx_o);
sensor.setYGyroOffset(gy_o);
sensor.setZGyroOffset(gz_o);

counter=0;
}
counter++;
}
```

## Anexo C: Escalonado MPU6050

```
// Librerías I2C para controlar el mpu6050
// la librería MPU6050.h necesita I2Cdev.h, I2Cdev.h necesita Wire.h
#include "I2Cdev.h"
#include "MPU6050.h"
#include "Wire.h"
int pinled1=8;
int pinled2=9;
int pinled3=7;
int var;
// La dirección del MPU6050 puede ser 0x68 o 0x69, dependiendo
// del estado de AD0. Si no se especifica, 0x68 estará implícito
MPU6050 sensor;

// Valores RAW (sin procesar) del acelerómetro y giroscopio en los ejes x,y,z
int ax, ay, az;
int gx, gy, gz;

void setup() {
  pinMode(pinled1,OUTPUT);
  pinMode(pinled2,OUTPUT);
  pinMode(pinled3,OUTPUT);
  Serial.begin(57600); //Iniciando puerto serial
  Wire.begin(); //Iniciando I2C
  sensor.initialize(); //Iniciando el sensor

  if (sensor.testConnection()) Serial.println("Sensor iniciado correctamente");
  else Serial.println("Error al iniciar el sensor");
}

void loop() {
  // Leer las aceleraciones y velocidades angulares
  sensor.getAcceleration(&ax, &ay, &az);
  sensor.getRotation(&gx, &gy, &gz);
  float ax_m_s2 = ax * (9.81/16384.0);
  float ay_m_s2 = ay * (9.81/16384.0);
  float az_m_s2 = az * (9.81/16384.0);
  float gx_deg_s = gx * (250.0/32768.0);
  float gy_deg_s = gy * (250.0/32768.0);
  float gz_deg_s = gz * (250.0/32768.0);
  //Mostrar las lecturas separadas por un [tab]
  Serial.print("a[x y z](m/s2) g[x y z](deg/s):\tgz");
  Serial.print(ax_m_s2); Serial.print("\tax");
  Serial.print(ay_m_s2); Serial.print("\tay");
  Serial.print(az_m_s2); Serial.print("\taz");
  Serial.print(gx_deg_s); Serial.print("\tgx");
  Serial.print(gy_deg_s); Serial.print("\tgy");
```

```
Serial.println(gz_deg_s);
delay(20);
if(Serial.available())
{
  var=Serial.read();
  if(var=='a')
  {digitalWrite(pinled1,HIGH);}
  if(var=='w')
  {digitalWrite(pinled1,LOW);}
  if(var=='b')
  {digitalWrite(pinled2,HIGH);}
  if(var=='x')
  {digitalWrite(pinled2,LOW);}
  if(var=='c')
  {digitalWrite(pinled3,HIGH);}
  if(var=='y')
  {digitalWrite(pinled3,LOW);}
}
delay(0.2);
}
```

**Anexo D: Pruebas Realizadas**

<b>NUM. PRUEBA</b>	<b>VALOR MEDIDO</b>	<b>Error a 16,67 grados</b>	<b>VALOR MEDIDO</b>	<b>Error a 21,77 grados</b>	<b>VALOR MEDIDO</b>	<b>Error a 7,96 grados</b>
Prueba 1	50,00	-33,33	2,00	19,77	1,00	6,96
Prueba 2	36,50	-19,83	2,00	19,77	2,00	5,96
Prueba 3	27,00	-10,33	3,00	18,77	2,00	5,96
Prueba 4	18,00	-1,33	3,00	18,77	3,00	4,96
Prueba 5	42,00	-25,33	3,00	18,77	2,00	5,96
Prueba 6	25,00	-8,33	3,00	18,77	3,00	4,96
Prueba 7	22,00	-5,33	3,00	18,77	2,00	5,96
Prueba 8	19,00	-2,33	2,00	19,77	3,00	4,96
Prueba 9	25,00	-8,33	2,00	19,77	3,00	4,96
Prueba 10	17,00	-0,33	3,00	18,77	2,00	5,96
Prueba 11	12,00	4,67	3,00	18,77	3,00	4,96
Prueba 12	15,00	1,67	3,00	18,77	2,00	5,96
Prueba 13	14,00	2,67	3,00	18,77	3,00	4,96
Prueba 14	14,00	2,67	2,00	19,77	3,00	4,96
Prueba 15	16,00	0,67	2,00	19,77	3,00	4,96
Prueba 16	15,00	1,67	3,00	18,77	2,00	5,96
Prueba 17	15,00	1,67	3,00	18,77	2,00	5,96
Prueba 18	20,00	-3,33	3,00	18,77	3,00	4,96
Prueba 19	14,00	2,67	3,00	18,77	2,00	5,96
Prueba 20	18,50	-1,83	3,00	18,77	3,00	4,96
Prueba 21	13,00	3,67	4,00	17,77	2,00	5,96
Prueba 22	12,00	4,67	2,00	19,77	2,00	5,96
Prueba 23	10,00	6,67	2,00	19,77	3,00	4,96
Prueba 24	9,00	7,67	3,00	18,77	2,00	5,96
Prueba 25	10,00	6,67	3,00	18,77	3,00	4,96
Prueba 26	13,00	3,67	3,00	18,77	3,00	4,96

Prueba 27	12,00	4,67	3,00	18,77	3,00	4,96
Prueba 28	11,00	5,67	3,00	18,77	3,00	4,96
Prueba 29	13,50	3,17	3,00	18,77	3,00	4,96
Prueba 30	13,00	3,67	3,00	18,77	3,00	4,96
Prueba 31	11,00	5,67	2,00	19,77	3,00	4,96
Prueba 32	17,50	-0,83	2,00	19,77	2,00	5,96
Prueba 33	17,00	-0,33	2,00	19,77	2,00	5,96
Prueba 34	11,00	5,67	2,00	19,77	2,00	5,96
Prueba 35	12,50	4,17	2,00	19,77	2,00	5,96
Prueba 36	14,00	2,67	3,00	18,77	3,00	4,96
Prueba 37	9,00	7,67	3,00	18,77	3,00	4,96
Prueba 38	8,00	8,67	3,00	18,77	3,00	4,96
Prueba 39	12,00	4,67	3,00	18,77	3,00	4,96
Prueba 40	13,50	3,17	3,00	18,77	3,00	4,96
Prueba 41	14,00	2,67	3,00	18,77	3,00	4,96
Prueba 42	11,00	5,67	3,00	18,77	3,00	4,96
Prueba 43	17,00	-0,33	3,00	18,77	2,00	5,96
Prueba 44	16,00	0,67	3,00	18,77	3,00	4,96
Prueba 45	17,00	-0,33	3,00	18,77	2,00	5,96
Prueba 46	18,00	-1,33	3,00	18,77	2,00	5,96
Prueba 47	42,00	-25,33	2,00	19,77	3,00	4,96
Prueba 48	15,00	1,67	2,00	19,77	3,00	4,96
Prueba 49	13,00	3,67	2,00	19,77	3,00	4,96
Prueba 50	17,00	-0,33	2,00	19,77	3,00	4,96