

## Diseño y control de una tilapia (*Oreochromis niloticus*) biomimética mediante actuadores de Nitinol

### *Design and control of a biomimetic tilapia (*Oreochromis niloticus*) using Nitinol actuators*

**Héctor Gonzalo Palacios León\***

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo  
Riobamba - Ecuador  
hector.palacios@esPOCH.edu.ec  
<https://orcid.org/0009-0000-6596-4204>

**Byron Xavier Pullopaxi Yugcha**

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo  
Riobamba - Ecuador  
byron.pullopaxi@esPOCH.edu.ec  
<https://orcid.org/0009-0006-3856-8605>

**Wilmer Joel Chuquiñana Casicana**

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo  
Riobamba - Ecuador  
wilmer.chuquiñana@esPOCH.edu.ec  
<https://orcid.org/0009-0007-3087-3258>

**Angel Moises Agualongo Chela**

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo  
Riobamba - Ecuador  
moises.agualongo@esPOCH.edu.ec  
<https://orcid.org/0009-0009-1710-5961>

**Dennys Fabricio Romero Bravo**

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo  
Riobamba - Ecuador  
dennys.romero@esPOCH.edu.ec  
<https://orcid.org/0009-0001-3366-7915>

\*Correspondencia:

hector.palacios@esPOCH.edu.ec

**Cómo citar este artículo:**

Palacios, H., Pullopaxi, B., Chuquiñana, W., Agualongo, A., & Romero, D. (2025). Diseño y control de una tilapia (*Oreochromis niloticus*) biomimética mediante actuadores de Nitinol. *Esprint Investigación*, 4(2), 34-46. <https://doi.org/10.61347/ei.v4i2.143>

**Recibido:** 22 de mayo de 2025

**Aceptado:** 2 de julio de 2025

**Publicado:** 8 de julio de 2025

**Copyright:** Derechos de autor 2025 Héctor Gonzalo Palacios León, Byron Xavier Pullopaxi Yugcha, Wilmer Joel Chuquiñana Casicana, Angel Moises Agualongo Chela, Dennys Fabricio Romero Bravo.



Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-NonComercial 4.0.

**Resumen:** El desarrollo de robots bioinspirados representa una estrategia innovadora para replicar los principios biomecánicos de la locomoción animal en entornos que requieren eficiencia energética y adaptabilidad, como en el medio acuático. En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo diseñar y controlar un robot biomimético basado en la tilapia (*Oreochromis niloticus*), utilizando alambre de Nitinol como actuador principal para imitar el patrón de nado carangiforme. Se empleó un enfoque cuantitativo, bajo un diseño experimental, y la investigación se ubicó en el campo de los estudios aplicados. Se realizó un análisis morfológico y biomecánico del pez, con énfasis en la segmentación corporal y la frecuencia de oscilación. Posteriormente, se diseñó un prototipo mediante impresión 3D con materiales flexibles que permiten flexión lateral. El sistema de activación térmica del Nitinol, regulado electrónicamente mediante señales PWM, generó contracciones secuenciales que simulan el movimiento muscular del pez. Se realizaron simulaciones y pruebas experimentales para validar el desplazamiento ondulatorio del robot, alcanzando ángulos de oscilación de  $\pm 15^\circ$  por segmento y una frecuencia de nado de hasta 2.8 Hz. El análisis estadístico de los datos evidenció una respuesta consistente y diferencias significativas en el rendimiento de propulsión en función del ciclo de activación ( $p < 0.05$ ). En conclusión, el sistema logró replicar con éxito la dinámica de nado de la tilapia, demostrando que el uso de Nitinol como actuador inteligente, combinado con estrategias de diseño biomimético, permite desarrollar soluciones funcionales y eficientes para la robótica subacuática.

**Palabras clave:** Alambre con memoria de forma, biomecánica, diseño biomimético, nado carangiforme, tilapia.

**Abstract:** The development of bioinspired robots represents an innovative strategy to replicate the biomechanical principles of animal locomotion in environments that require energy efficiency and adaptability, such as aquatic settings. In this context, the objective of the present study is to design and control a biomimetic robot based on the tilapia (*Oreochromis niloticus*), using Nitinol wire as the main actuator to mimic the carangiform swimming pattern. A quantitative approach was employed, under an experimental design, and the research was situated within the field of applied studies. A morphological and biomechanical analysis of the fish was conducted, with emphasis on body segmentation and oscillation frequency. Subsequently, a prototype was designed using 3D printing with flexible materials that allow for lateral bending. The Nitinol thermal activation system, electronically regulated through PWM signals, generated sequential contractions that simulate the muscle movement of the fish. Simulations and experimental tests were carried out to validate the undulatory motion of the robot, achieving oscillation angles of  $\pm 15^\circ$  per segment and a swimming frequency of up to 2.8 Hz. Statistical analysis of the data revealed a consistent response and significant differences in propulsion performance depending on the activation cycle ( $p < 0.05$ ). In conclusion, the system successfully replicated the swimming dynamics of tilapia, demonstrating that the use of Nitinol as a smart actuator, combined with biomimetic design strategies, enables the development of functional and efficient solutions for underwater robotics.

**Keywords:** Biomechanics, biomimetic design, carangiform swimming, shape memory alloy wire, tilapia.

## 1. Introducción

La robótica bioinspirada se ha consolidado como una disciplina clave en el desarrollo de sistemas mecatrónicos avanzados, al emular mecanismos naturales optimizados por la evolución biológica. Esta área busca replicar estrategias estructurales, funcionales y adaptativas de organismos vivos para mejorar la eficiencia energética, maniobrabilidad y resiliencia de sistemas robóticos en entornos dinámicos (Bianchi et al., 2021; Prakash et al., 2024). La locomoción acuática, en particular, ofrece paradigmas de propulsión altamente eficientes que superan a enfoques convencionales en términos de autonomía y adaptabilidad (Bao et al., 2023; Zhang et al., 2025).

En el entorno acuático, especies como la tilapia (*Oreochromis niloticus*) han desarrollado patrones de nado carangiforme que combinan una baja disipación energética con alta maniobrabilidad, mediante ondulaciones concentradas en la región posterior del cuerpo (Albeláez-Rojas et al., 2024; Siddique et al., 2025). Este tipo de locomoción representa un equilibrio óptimo entre velocidad de desplazamiento y control direccional (Cabrera et al., 2019; Ñacato et al., 2021). Emular dicho patrón en sistemas robóticos requiere una comprensión profunda de la morfología, la biomecánica y la dinámica de fluidos implicadas en el desplazamiento del pez en su entorno natural.

Varios estudios demuestran que robots biomiméticos que replican estos principios logran eficiencias de propulsión superiores a los sistemas tradicionales. Por ejemplo, Chen et al. (2020) exploró el rendimiento de natación de un robótico biomimético multiarticular, demostrando que la eficiencia energética de propulsión puede mejorar hasta un 89% bajo ciertas condiciones, gracias al uso de articulaciones pasivas y control de fase. El diseño biomimético se inspiró en patrones de nado como el carangiforme, característicos de especies como la tilapia.

Los actuadores con memoria de forma (SMA), especialmente el Nitinol, han emergido como elementos clave en robótica blanda bioinspirada debido a su biocompatibilidad, superelasticidad y capacidad para simular contracciones musculares (Kim et al., 2023). Aprovechando estas propiedades, el diseño del robot biomimético se basa en una segmentación estructural del cuerpo y la activación alternada de alambres de Nitinol, con el objetivo de reproducir el movimiento ondulatorio característico del nado natural de la tilapia (*Oreochromis niloticus*). Este enfoque permite evaluar tanto el rendimiento hidrodinámico del sistema como su potencial para funcionar como un mecanismo autónomo de propulsión acuática.

No obstante, replicar con precisión el movimiento de organismos acuáticos sigue siendo un desafío técnico considerable en la robótica bioinspirada. Aunque los peces como la tilapia (*Oreochromis niloticus*) han perfeccionado un patrón de nado eficiente basado en ondulaciones controladas del cuerpo, la implementación de este comportamiento mediante actuadores artificiales presenta limitaciones inherentes. En particular, el uso de alambres de Nitinol ofrece ventajas significativas en términos de flexibilidad y biomimetismo, pero también impone restricciones relacionadas con el control térmico. La necesidad de ciclos precisos de calentamiento y enfriamiento para activar el material compromete la continuidad del movimiento y limita la frecuencia de oscilación, lo que impacta directamente en la eficiencia propulsiva del sistema.

Esta problemática resalta la urgencia de optimizar tanto el diseño mecánico como los algoritmos de control para alcanzar una propulsión más natural, autónoma y sostenible en ambientes acuáticos. La superación de estas limitaciones es relevante para aplicaciones como el monitoreo ambiental, la exploración marina y la robótica educativa, donde la eficiencia y adaptabilidad son cruciales.

En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo diseñar y controlar un robot biomimético inspirado en la tilapia (*Oreochromis niloticus*) utilizando alambre de Nitinol como actuador principal.

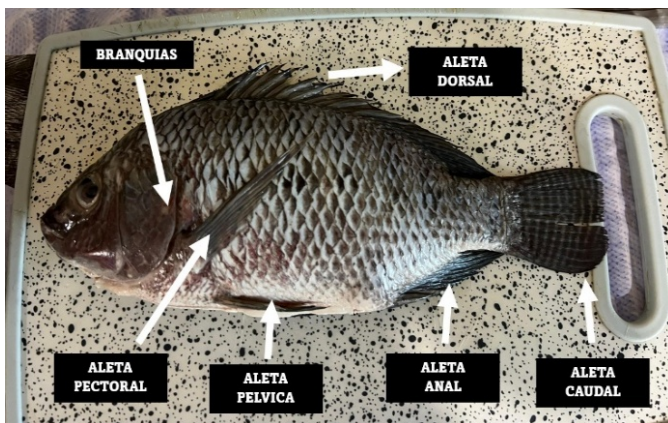
La finalidad es replicar el patrón de nado carangiforme y evaluar su desempeño hidrodinámico y su eficiencia energética, contribuyendo así a los avances en la implementación práctica de sistemas robóticos bioinspirados para entornos acuáticos.

### Morfología funcional de las aletas

Como se ilustra en la figura 1, las aletas de la tilapia (*Oreochromis niloticus*) desempeñan funciones específicas esenciales para el desplazamiento y la estabilidad. La aleta caudal actúa como el principal medio de propulsión, generando el empuje necesario para el avance. Por otro lado, las aletas pectorales y pélvicas tienen un rol clave en el control de maniobra y estabilidad, permitiendo al pez realizar giros precisos, frenar y mantener el equilibrio direccional del cuerpo durante el nado. Finalmente, las aletas dorsal y anal actúan como estabilizadores, funcionando como contrapesos que previenen el vuelco ante corrientes o cambios bruscos de dirección.

#### Figura 1

*Morfología de las aletas de la tilapia*



### Patrón de locomoción acuática: Nado carangiforme

En la figura 2 se presentan diversos tipos de movimientos que realizan los peces, destacando que la tilapia (*Oreochromis niloticus*) emplea principalmente el patrón carangiforme. Este patrón está adaptado para equilibrar la eficiencia energética con una maniobrabilidad moderada, lo que resulta especialmente ventajoso en ambientes con corrientes variables.

#### Figura 2

*Tipos de movimiento acuático*



**Nota.** Adaptado de Sfakiotakis et al. (1999)

Como se muestra en la figura 3, la tilapia (*Oreochromis niloticus*) produce ondulaciones concentradas en el 30–40 % posterior de su cuerpo, mientras mantiene rígidas las regiones frontal y media. Esta estrategia biomecánica reduce significativamente la pérdida de energía durante el nado, favoreciendo un desplazamiento eficiente y estable en su entorno natural.

### Figura 3

*Secuencia de fotogramas de nado carangiforme en tilapia*



Según el estudio de Sánchez-Rodríguez et al. (2023), que analiza la relación entre la frecuencia de batido caudal y la velocidad de natación en patrones ondulatorios subacuáticos, los valores correspondientes al nado de la tilapia (*Oreochromis niloticus*) se presentan en la tabla 1.

**Tabla 1**

*Parámetros de nado en tilapia*

Modo de nado	Frecuencia (Hz)	Amplitud (%L)	Velocidad (L/s)
Sostenido	2-3	6-8	1-2
Aceleración	3-4	8-10	2-3

### Activación muscular secuencial y generación de movimiento

El mecanismo de nado de la tilapia (*Oreochromis niloticus*) se basa en una contracción muscular secuencial, como se observa en la figura 4, donde las fibras musculares blancas y rojas se activan en cadena desde la cabeza hacia la cola. Esta activación genera ondas de contracción que recorren el cuerpo y producen el movimiento ondulatorio característico del patrón carangiforme.

### Figura 4

*Estructura muscular*



Este proceso de activación progresivo permite un control eficiente tanto del empuje como de la dirección del desplazamiento. La transmisión de fuerza se realiza a través del esqueleto y la piel como se muestra en la figura 5, garantizando una transferencia energética coordinada y altamente eficiente que optimiza el rendimiento hidrodinámico durante la natación.

**Figura 5***Estructura esquelética*

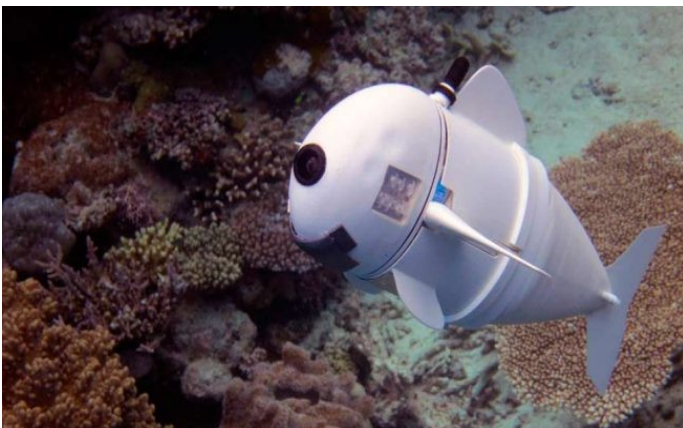
Además, la tilapia (*Oreochromis niloticus*), al igual que muchos peces óseos, regula su flotabilidad mediante un sistema basado en la vejiga natatoria, una estructura interna representada en la figura 6. Esta bolsa de paredes flexibles llena de gas, ajusta la densidad relativa del pez respecto al agua, permitiéndole ascender o descender en la columna acuática sin un gasto muscular excesivo. Esta capacidad es fundamental para el diseño de robots submarinos bioinspirados que buscan replicar la habilidad de ajustar la posición vertical de manera eficiente y autónoma.

**Figura 6***Vejiga Natatoria*

Dentro del campo de la robótica bioinspirada acuática, existen desarrollos destacados que sirven como referencia para el diseño y control de robots tipo pez. Uno de ellos es BlueSwarm (figura 7), un proyecto del laboratorio de Radhika Nagpal en la Universidad de Harvard (EE. UU.), que consiste en un enjambre de robots diseñados para imitar el comportamiento colectivo de los bancos de peces. Estos robots emplean sensores distribuidos y algoritmos de autoorganización que les permiten nadar de manera coordinada, lo cual resulta útil en aplicaciones como la exploración submarina y el monitoreo ambiental.

**Figura 7***Robot del proyecto BlueSwarm***Nota.** Desarrollado por Berlinger (2021).

Otro caso relevante es SoFi (figura 8), un robot pez desarrollado por el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), cuyo diseño permite estudiar la vida marina sin perturbarla. Este dispositivo, controlado de forma remota, es capaz de nadar junto a peces reales y capturar imágenes y videos de alta resolución, lo que facilita la observación directa en ecosistemas sensibles, como los arrecifes de coral.

**Figura 8***MIT SoFi project***Nota.** desarrollado por Williamson (2022)

## 2. Metodología

El presente estudio adopta un enfoque cuantitativo, fundamentado en la recopilación y análisis de datos numéricos obtenidos a partir de simulaciones computacionales y pruebas experimentales en entornos controlados. La investigación es de carácter experimental, ya que se manipulan variables deliberadamente, como la geometría del robot (modelo biomimético), el voltaje aplicado al alambre de Nitinol y la frecuencia de activación, con el objetivo de evaluar su impacto en el movimiento ondulatorio y la eficiencia de propulsión.

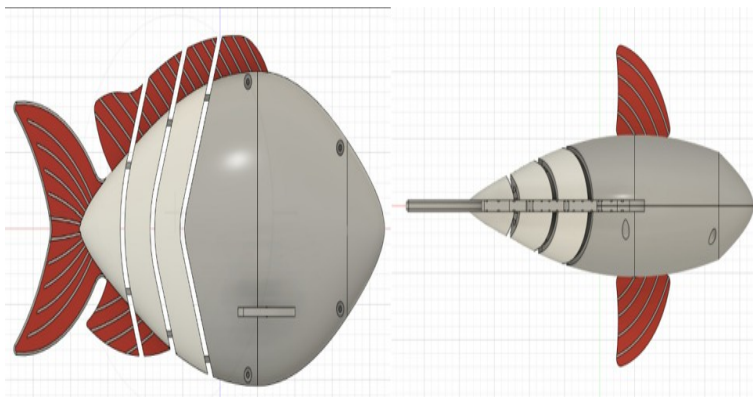
Desde su finalidad, esta investigación se inscribe en un enfoque aplicado, puesto que busca desarrollar y validar una solución funcional para la robótica submarina potencialmente viable en tareas

de inspección, monitoreo y exploración en ambientes acuáticos. La integración del diseño biomimético, el control preciso de los actuadores con memoria de forma y la evaluación de su desempeño en condiciones reales confirman la viabilidad y eficiencia del sistema propuesto para aplicaciones en robótica blanda subacuática.

Como parte del desarrollo del prototipo, se adoptó un enfoque de robótica bioinspirada, replicando las características estructurales y funcionales observadas en organismos acuáticos reales. En este caso, el diseño se inspiró en la tilapia (*Oreochromis niloticus*), lo cual permitió construir un modelo con comportamiento natatorio realista, tal como se representa en la figura 9. Comprender los principios biológicos de locomoción fue esencial para la implementación de una arquitectura mecánica eficiente.

### Figura 9

*Arquitectura mecánica inspirada en tilapia*



Para el diseño del robot, se tomaron como base las características morfológicas y biomecánicas de la tilapia (*Oreochromis niloticus*), cuyas adaptaciones fueron replicadas mediante componentes robóticos para optimizar la locomoción en ambientes acuáticos. Su cuerpo fusiforme, con un perfil lateral cónico y comprimido, reduce significativamente el arrastre hidrodinámico, facilitando la penetración en el agua y minimizando la resistencia durante el nado. Internamente, la estructura rígida del pez se complementa con paneles exteriores curvados que refuerzan esta forma fusiforme, mejorando aún más su desempeño hidrodinámico (Koiri et al., 2024).

La arquitectura mecánica del robot se basa en una estructura modular que imita la organización segmentada del cuerpo del pez, combinando una zona rígida en el tronco con una región flexible en la cola, capaz de generar ondulaciones. Para replicar el patrón carangiforme, se integran actuadores de ondulación, tales como aleaciones con memoria de forma (SMA), que emulan la función de las fibras musculares. Asimismo, se utiliza un revestimiento escamado con materiales texturizados diseñado para reducir el arrastre y mejorar la hidrodinámica del desplazamiento.

Existen dos tipos de memoria de forma. En la memoria de forma de una sola vía, el material solo recuerda su forma original al calentarse, después de haber sido deformado en la fase martensítica. Por otro lado, la memoria de forma de doble vía permite al material recordar dos configuraciones distintas: una a baja temperatura y otra a alta temperatura. Este comportamiento dual se obtiene mediante procesos de entrenamiento térmico especializados y resulta especialmente útil en sistemas robóticos que requieren movimientos repetitivos sin intervención mecánica externa. Las características físicas del Nitinol, uno de los materiales más utilizados para estos actuadores, se detallan en la tabla 2.

**Tabla 2***Características físicas del Nitinol*

Propiedades	Valor Aproximado
Composición química	55 %, 45 % Ti
Densidad	6.45 g/ cm <sup>3</sup>
Temperatura de transformación	32°C – 100°C (ajustable)
Temperatura de fusión	~1310°C
Módulo de elasticidad (Austenita)	70-83 GPa
Módulo de elasticidad (Martensita)	28-41 GPa
Resistencia a la tracción	700-1000 MPa
Alargamiento a la rotura	Hasta 8%
Conductividad térmica	18 W/m. K
Resistencia eléctrica	76-100μΩcm

Para estimar el comportamiento térmico del alambre de Nitinol utilizado como actuador principal en el robot biomimético, se realizó un análisis energético basado en el calentamiento por efecto Joule. El alambre evaluado posee un diámetro de 2 mm y una longitud de 10 cm, cuyas propiedades físicas fueron obtenidas de literatura especializada de Duerig y Jones, incluyendo una densidad de 6450 kg/m<sup>3</sup>, calor específico de 320 J/kg · °C, y resistividad eléctrica de 82 × 10<sup>-8</sup> Ω · m.

La energía térmica necesaria para elevar la temperatura del Nitinol desde una temperatura ambiente de 25 °C hasta los 75 °C, se calculó mediante la ecuación clásica de calor sensible:  $Q = m \cdot c \cdot \Delta T$ , donde  $m$  es la masa del alambre,  $c$  su calor específico y  $\Delta T$  el incremento de temperatura. Considerando el volumen cilíndrico del alambre y su densidad, se obtuvo una masa aproximada de 2.025 × 10<sup>-3</sup> kg, lo que implica una energía requerida de 32.4 J para completar el ciclo de calentamiento.

Posteriormente, se estimó la resistencia eléctrica del alambre utilizando la relación  $R = \rho e \cdot \frac{L}{A}$ , obteniendo un valor de 0.261 Ω. Bajo la suposición de una corriente constante de 2A, la potencia disipada por efecto Joule se calculó como  $P = I^2 \cdot R = 1.044 W$ . Con esta potencia y la energía requerida previamente obtenida, se estimó un tiempo de calentamiento aproximado de 31 segundos, utilizando la ecuación  $t = \frac{Q}{P}$ . Resultado que coincide con las predicciones teóricas dadas por Duerig et al. (1999) y Sepulveda (2013).

Estos cálculos permiten anticipar el desempeño térmico del actuador durante los ciclos de contracción y relajación, Facilitando el diseño adecuado de los intervalos de activación para evitar sobrecalentamiento o fatiga térmica. El análisis confirma que el uso del Nitinol como actuador térmico es viable para generar movimientos ondulatorios eficientes, siempre que se controle con precisión el suministro de corriente eléctrica, como ha sido validado en estudios recientes con actuadores SMA (Muralidharan & Palani, 2021).

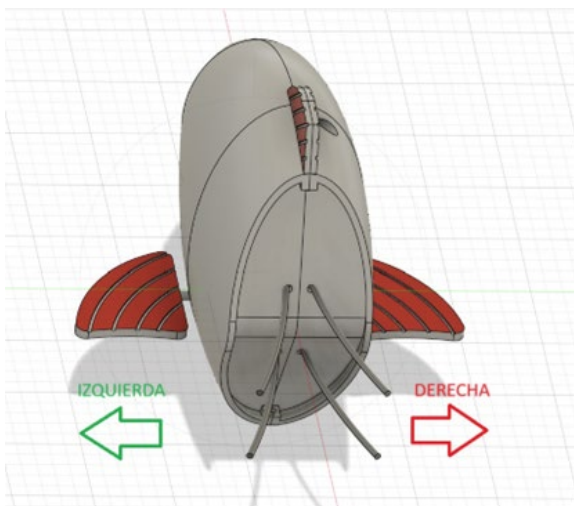
### 3. Resultados y discusión

Los resultados obtenidos confirman el correcto funcionamiento del mecanismo de flexión lateral basado en alambres de Nitinol. El principio de actuación se fundamenta en la contracción térmica del material cuando es atravesado por corriente eléctrica, lo que genera el movimiento ondulatorio característico en el cuerpo del robot.

- **Movimiento Alternado por Control Pulsado:** Se empleó un sistema de control mediante pulsos eléctricos alternos que activan los alambres de forma secuencial, permitiendo un movimiento lateral hacia la izquierda y derecha, como se observa en la figura 10. Esta alternancia genera un patrón de ondulación eficiente que emula el desplazamiento natural de un pez real.

**Figura 10**

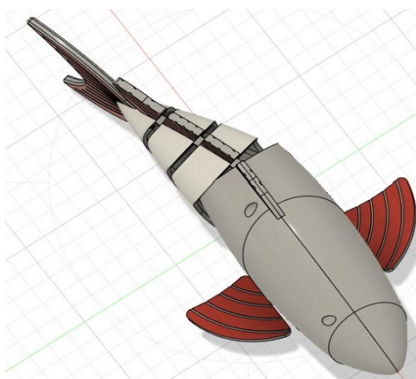
*Movimiento alternado izquierda y derecha*



- **Rango de Movimiento:** El análisis cinemático demostró que el rango angular alcanzado es de 30 grados, siendo el primer y segundo segmento del cuerpo robótico de aproximadamente  $\pm 15^\circ$ , como se muestra en la figura 11. Esta oscilación lateral es suficiente para generar el empuje necesario para el avance en medios acuáticos, replicando fielmente el movimiento ondulatorio de peces reales. Estos resultados concuerdan con los datos experimentales reportados por Hou (2021) y Li et al. (2021) en sus prototipos simulados.

**Figura 11**

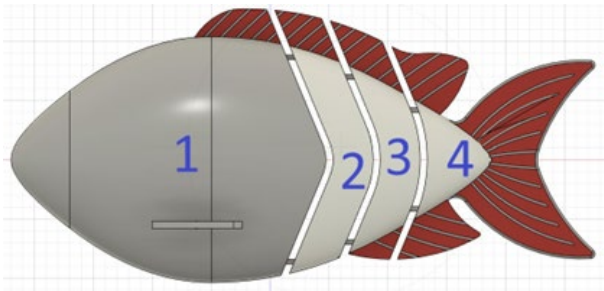
*Rango de movimiento de aproximadamente  $\pm 15^\circ$*



- **Número de segmentos del cuerpo:** El diseño estructural del robot contempla una división en cuatro segmentos móviles junto con una sección frontal rígida. Esta configuración permite que cada segmento se articule lateralmente, reproduciendo el patrón de ondulación típico del desplazamiento de un pez. La segmentación propuesta fue fundamental para alcanzar un movimiento fluido y realista en el medio acuático, contribuyendo significativamente a la eficiencia del sistema de propulsión (ver figura 12).

## Figura 12

### Segmentación



- **Inspiración Biológica en la Tilapia (*Oreochromis niloticus*):** La morfología del cuerpo y la forma de la aleta caudal fueron diseñadas tomando como referencia a la tilapia, especie reconocida por su eficiencia hidrodinámica. Este diseño inspirado en la naturaleza no solo mejora la estética bioinspirada, sino que también optimiza el consumo energético durante el desplazamiento. Además, los patrones de movimiento de la tilapia sirvieron como base para definir los parámetros de oscilación en cuanto a ángulo y frecuencia.

El presente estudio aborda el uso del Nitinol con un enfoque técnico más detallado, incluyendo la explicación de los principios termoeléctricos, las necesidades específicas de corriente y las técnicas de control mediante modulación por ancho de pulso (PWM) para prevenir el sobrecalentamiento. Estos aspectos fueron poco explorados en trabajos anteriores. En contraste, el presente proyecto otorga mayor relevancia a la dinámica funcional, al control preciso del actuador y a la verificación experimental del sistema. Esta evolución técnica apunta hacia desarrollos más sólidos, eficientes y con mayor potencial de aplicación en condiciones reales. Implementaciones similares han sido probadas en entornos de laboratorio, como los presentados por Aguirre & Palacios (2022).

## 4. Conclusiones

El prototipo desarrollado demostró la viabilidad funcional de la propulsión carangiforme mediante actuadores con memoria de forma (SMA). Se alcanzaron oscilaciones de  $\pm 15^\circ$  por segmento y frecuencias de nado de hasta 2,8 Hz, reproducidas de forma estable en pruebas controladas. Estos valores confirman que la activación térmica secuencial del alambre de Nitinol regulada mediante modulación por ancho de pulso (PWM), puede emular con precisión la contracción muscular de la tilapia (*Oreochromis niloticus*) y generar un empuje hidrodinámico suficiente para el desplazamiento autónomo. Así se valida la idoneidad de los actuadores con memoria de forma como alternativa ligera, silenciosa y de baja complejidad mecánica para robots subacuáticos.

El análisis térmico basado en el efecto Joule evidenció que se requieren aproximadamente 32 J para elevar la temperatura del alambre de  $25^\circ\text{C}$  a  $75^\circ\text{C}$ , con un tiempo de calentamiento estimado de 31 segundos bajo una corriente de 2 A. Estos datos demuestran que un control térmico preciso transforma

al Nitinol en un actuador energéticamente eficiente, competitivo frente a servomotores eléctricos convencionales en tareas de locomoción ondulatoria.

Finalmente, la convergencia entre el diseño biomimético y la fabricación aditiva se consolidó como una plataforma escalable para el desarrollo de robots blandos subacuáticos. La segmentación corporal impresa en 3D con materiales flexibles, combinada con la geometría fusiforme inspirada en la tilapia (*Oreochromis niloticus*), permitió reducir el arrastre sin comprometer la rigidez estructural de la sección anterior. Este trabajo sienta las bases para la creación de robots capaces de realizar tareas de inspección y monitoreo ecosistémico en ambientes acuáticos.

## Referencias

- Aguirre, B., & Palacios, R. (2022). *Implementación de un robot subacuático bioinspirado utilizando actuadores basados en metales de memoria de forma para el desplazamiento bidimensional en un ambiente controlado* [Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. <https://acortar.link/AK1jYV>
- Albeláez-Rojas, G., Silva, T., Ota, E., Moraes, G., & Inoue, L. (2024). Growth Performance of Tilapia Juveniles *Oreochromis niloticus* Reared in Two Sustained Swimming Speeds and Two Stocking Densities. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 67, e24220239. <https://doi.org/10.1590/1678-4324-2024220239>
- Bao, P., Shi, L., Duan, L., Guo, S., & Li, Z. (2023). A Review: From Aquatic Lives Locomotion to Bio-inspired Robot Mechanical Designations. *Journal of Bionic Engineering*, 20(6), 2487-2511. <https://doi.org/10.1007/s42235-023-00421-2>
- Berlinger, F. (2021). *Blueswarm: 3D Self-Organization in a Fish-Inspired Robot Swarm* [Tesis doctoral, Universidad de Harvard]. ProQuest Dissertations & Theses Global. <https://acortar.link/OnfMaQ>
- Bianchi, G., Cinquemani, S., & Resta, F. (2021). Bio-Inspired Design of an Underwater Robot Exploiting Fin Undulation Propulsion. *Applied Sciences*, 11(6), 2556. <https://doi.org/10.3390/app11062556>
- Cabrera, F., Santacruz, F., Bermeo, B., & Orozco, C. (2019). Diseño de robot pez bio inspirado impulsado mediante aleta caudal con 1 GDL. *Ciencia Digital*, 3(3.3), 345-355. <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v3i3.3.826>
- Chen, D., Wu, Z., Dong, H., Tan, M., & Yu, J. (2020). Exploration of swimming performance for a biomimetic multi-joint robotic fish with a compliant passive joint. *Bioinspiration & Biomimetics*, 16(2). <https://doi.org/10.1088/1748-3190/abc494>
- Duerig, T., Pelton, A., & Stöckel, D. (1999). An overview of nitinol medical applications. *Materials Science and Engineering: A*, 273-275, 149-160. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(99\)00294-4](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(99)00294-4)
- Hou, N. (2021). The design and simulation of biomimetic fish robot for aquatic creature study (Unpublished manuscript). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2110.07019>
- Kim, M.-S., Heo, J.-K., Rodrigue, H., Lee, H.-T., Pané, S., Han, M.-W., & Ahn, S.-H. (2023). Shape Memory Alloy (SMA) Actuators: The Role of Material, Form, and Scaling Effects. *Advanced Materials*, 35(33), 2208517. <https://doi.org/10.1002/adma.202208517>
- Koiri, M., Dubey, V., Sharma, A., & Chuchala, D. (2024). Design of a Shape-Memory-Alloy-Based Carangiform Robotic Fishtail with Improved Forward Thrust. *Sensors*, 24(2), 544. <https://doi.org/10.3390/s24020544>

- Li, D., Deng, H., Bayiz, Y., & Cheng, B. (2021). Effects of design and hydrodynamic parameters on optimized swimming for simulated, fish-inspired robots. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2111.05682>
- Muralidharan, M., & Palani, I. (2021). Development of Subcarangiform Bionic Robotic Fish Propelled by Shape Memory Alloy Actuators. *Defence Science Journal*, 71(1), 94-101. <https://doi.org/10.14429/dsj.71.15777>
- Ñacato, D., Cabrera, F., Dumancela, V., Moncayo, C., & Chicaiza, A. (2021). Control de Trayectoria lineal del Robot pez bioinspirado en un atún con BCF. *Dominio de las Ciencias*, 7(3), 1538-1557. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8229720>
- Prakash, A., Nair, A., Arunav, H., Akhil, V., Tawk, C., & Shankar, K. (2024). Bioinspiration and biomimetics in marine robotics: A review on current applications and future trends. *Bioinspiration & Biomimetics*, 19(3), 031002. <https://doi.org/10.1088/1748-3190/ad3265>
- Sánchez-Rodríguez, J., Raufaste, C., & Argentina, M. (2023). Scaling the tail beat frequency and swimming speed in underwater undulatory swimming. *Nature Communications*, 14(1), 5569. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-41368-6>
- Sepulveda, A. (2013). *El Nitinol: Un material Inteligente*. <https://n9.cl/yb0r7y>
- Sfakiotakis, M., Lane, D., & Davies, J. (1999). Review of fish swimming modes for aquatic locomotion. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 24(2), 237-252. <https://doi.org/10.1109/48.757275>
- Siddique, M., Mahalder, B., Haque, M., & Ahammad, A. (2025). Impact of climatic and water quality parameters on Tilapia (*Oreochromis niloticus*) broodfish growth: Integrating ARIMA and ARIMAX for precise modeling and forecasting. *PLoS ONE*, 20(3), e0313846. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0313846>
- Williamson, R. (2022). *MIT SoFi: A Study in Fabrication, Target Tracking, and Control of Soft Robotic Fish* [Tesis de pregrado, Massachusetts Institute of Technology]. <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/143173>
- Zhang, T., Dong, J., Chen, Q., Wu, X., Wang, S., & Guan, Y. (2025). Review of bioinspired aquatic jumping robots. *Biomimetic Intelligence and Robotics*, 5(2), 100204. <https://doi.org/10.1016/j.birob.2024.100204>

---

## Transparencia

### Conflicto de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés de naturaleza alguna como parte de la presente investigación.

### Fuente de financiamiento

Los autores financiaron completamente la investigación.

### Contribución de autoría

Héctor Gonzalo Palacios León: Conceptualización, metodología, software, validación, análisis formal, investigación, gestión de datos, visualización, redacción - preparación del borrador original, redacción - revisión y edición, financiamiento, administración del proyecto, recursos, supervisión.

Byron Xavier Pullopaxi Yugcha: Conceptualización, metodología, software, validación, análisis formal, investigación, gestión de datos, visualización, redacción - preparación del borrador original, redacción - revisión y edición, financiamiento, supervisión.

Wilmer Joel Chuquiana Casicana: Conceptualización, metodología, software, validación, análisis formal, investigación, redacción - preparación del borrador original, redacción - revisión y edición, financiamiento, administración del proyecto, recursos, supervisión.

Angel Moises Agualongo Chela: Conceptualización, análisis formal, investigación, gestión de datos, visualización, redacción - preparación del borrador original, redacción - revisión y edición, financiamiento, administración del proyecto, recursos, supervisión.

Dennys Fabricio Romero Bravo: Conceptualización, metodología, software, validación, análisis formal, investigación, redacción - revisión y edición, financiamiento, administración del proyecto, recursos, supervisión.

Los autores contribuyeron activamente en el análisis de los resultados, revisión y aprobación del manuscrito final.