

Diseño y simulación de una aleta bioinspirada en el pargo rojo (*Lutjanus campechanus*) mediante el control de actuadores de Nitinol

*Design and simulation of a bioinspired fin in the red snapper (*Lutjanus campechanus*) using Nitinol actuator control*

Cecilia Alejandra Morales Layedra*

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo
Riobamba - Ecuador
cecilia.morales@esPOCH.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0002-1665-0772>

Oscar Danilo Llumigusin Caiza

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo
Riobamba - Ecuador
oscar.llumigusin@esPOCH.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0004-2490-7608>

Byron Joao Macas Poma

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo
Riobamba - Ecuador
byron.macas@esPOCH.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-9474-3627>

Edwin Xavier López Quispe

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo
Riobamba - Ecuador
edwin.lopez@esPOCH.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0008-7807-812X>

Deivys Dayan Iza Quishpe

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo
Riobamba - Ecuador
deivys.iza@esPOCH.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0009-7537-8386>

*Correspondencia:

cecilia.morales@esPOCH.edu.ec

Cómo citar este artículo:

Morales, C., Llumigusin, O., Macas, B., López, E., & Iza, D. (2025). Diseño y simulación de una aleta bioinspirada en el pargo rojo (*Lutjanus campechanus*) mediante el control de actuadores de Nitinol. *Esprint Investigación*, 4(1), 616-630. <https://doi.org/10.61347/ei.v4i1.126>

Recibido: 25 de mayo de 2025

Aceptado: 26 de junio de 2025

Publicado: 30 de junio de 2025

Copyright: Derechos de autor 2025 Cecilia Alejandra Morales Layedra, Oscar Danilo Llumigusin Caiza, Byron Joao Macas Poma, Edwin Xavier López Quispe, Deivys Dayan Iza Quishpe.



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

Resumen: La robótica bioinspirada busca replicar principios biomecánicos de organismos vivos para optimizar la eficiencia de sistemas robóticos, destacando el pargo rojo (*Lutjanus campechanus*) como un modelo relevante por su maniobrabilidad acuática. Este estudio tuvo como objetivo diseñar e implementar una aleta caudal robótica bioinspirada, utilizando alambre de nitinol como actuador con memoria de forma. Adoptó un enfoque cuantitativo, con un diseño experimental y se enmarcó dentro de una investigación aplicada. Se desarrolló un prototipo funcional basado en un modelo CAD en Fusion 360, con una estructura modular compuesta por tres eslabones conectados mediante pares de cables de nitinol, activados por señales PWM desde un microcontrolador Arduino Nano. Las simulaciones por elementos finitos permitieron optimizar la curvatura de la aleta a 30°, logrando una oscilación de 15° y una reducción del 25% en tensiones internas respecto a modelos iniciales. Además, se obtuvo una mejora del 20% en la eficiencia de propulsión. El valor de fuerza de contracción estimado para el alambre de 0,2 mm de diámetro fue de 0,196 N, suficiente para emular el movimiento natural del pez. Estos resultados experimentales demuestran que la integración de nitinol y control PWM constituye una alternativa efectiva y viable para la locomoción en robótica blanda subacuática, ofreciendo flexibilidad estructural sin necesidad de componentes mecánicos tradicionales.

Palabras clave: Nitinol, prototipo bioinspirado, robótica blanda, robot pez.

Abstract: Bio-inspired robotics aims to replicate biomechanical principles of living organisms to optimize the efficiency of robotic systems, highlighting the red snapper (*Lutjanus campechanus*) as a relevant model due to its aquatic maneuverability. This study aimed to design and implement a bioinspired robotic caudal fin using nitinol wire as a shape memory actuator. It adopted a quantitative approach with an experimental design and was framed within applied research. A functional prototype was developed based on a CAD model in Fusion 360, featuring a modular structure composed of three links connected by pairs of nitinol cables, activated by PWM signals from an Arduino Nano microcontroller. Finite element simulations allowed optimization of the fin curvature to 30°, achieving an oscillation of 15° and a 25% reduction in internal stresses compared to initial models. Additionally, a 20% improvement in propulsion efficiency was obtained. The estimated contraction force value for the 0.2 mm diameter wire was 0.196 N, sufficient to emulate the natural movement of the fish. These experimental results demonstrate that the integration of nitinol and PWM control constitutes an effective and viable alternative for underwater soft robotics locomotion, offering structural flexibility without the need for traditional mechanical components.

Keywords: Bioinspired prototype, fish robot, nitinol, soft robotics.

1. Introducción

Actualmente, existen instituciones de investigación a nivel mundial que estudian la robótica biomimética con el objetivo de desarrollar robots más competentes y robustos para operar en entornos no estructurados, superando el rendimiento de los robots convencionales. Se espera que estos robots biomiméticos sean más flexibles y estables que los actuales. Para ello, los diseñadores aprovechan los avances en materiales, tecnologías de fabricación, sensores y actuadores, lo que les permite imitar procesos y sistemas biológicos (Vepa, 2013).

Por lo tanto, la robótica bioinspirada ha emergido como una disciplina prometedora que busca replicar características morfológicas y funcionales de organismos vivos para mejorar la eficiencia, adaptabilidad y desempeño de los sistemas robóticos. En este contexto, los peces constituyen una fuente inagotable de inspiración para el desarrollo de robots acuáticos, debido a su capacidad de maniobra, sigilo y eficiencia en el medio marino (Gravish & Lauder, 2018).

Basados en la robótica bioinspirada, los robots pez están diseñados para imitar la locomoción y las características específicas de los peces, utilizando mecanismos de propulsión que replican el movimiento de su morfología. Equipados con sensores avanzados, estos robots pueden detectar el entorno, recolectar datos y navegar de manera autónoma. La combinación de su diseño biomimético y tecnología de vanguardia permite que los robots pez realicen tareas complejas, como la exploración de ecosistemas marinos y el monitoreo de la calidad del agua (Ma et al., 2023).

En este contexto, materiales avanzados como el nitinol una aleación equiatómica de níquel y titanio con memoria de forma (SMA) y superelasticidad, resultan fundamentales. Estas aleaciones pueden deformarse hasta en un 10% y recuperar su forma original al calentarse dentro de un rango específico de temperatura, lo que las convierte en componentes ideales para actuadores en sistemas robóticos bioinspirados (Sepulveda, 2013).

La familia Lutjanidae comprende peces marinos conocidos como pargos o huachinangos, que presentan cuerpos y tamaños variados, alcanzando hasta 180 cm de longitud total. Se distribuyen en mares tropicales y subtropicales de los océanos Pacífico y Atlántico, principalmente sobre fondos arrecifales, rocosos o coralinos, a profundidades que varían entre 15 y 180 metros, según la especie. Los pargos constituyen uno de los principales recursos pesqueros para Latinoamérica y el Caribe (Manzanilla-Verde et al., 2023). El pargo es una especie que, gracias a la forma y dinámica de su aleta caudal, presenta una combinación óptima de flexibilidad estructural y movimiento oscilatorio, lo que le permite alcanzar altas velocidades con bajo consumo energético. Replicar esta eficiencia en un sistema robótico podría aportar grandes beneficios en aplicaciones como la exploración submarina, monitoreo ambiental e investigación biológica (Lucano-Ramírez et al., 2012).

Una comprensión detallada del desarrollo morfológico y embrionario de los peces, especialmente de especies como el pargo rojo, constituye una base sólida para la robótica bioinspirada. Este enfoque se enmarca en la robótica morfogenética, la cual adapta principios de la morfogénesis biológica al diseño robótico (Stubrin, 2021). En este contexto, Ñacato et al. (2021), presentan el prototipo SpineWave, un robot pez que imita la transición rígido-flexible de la columna vertebral mediante estructuras espinales expandibles y actuadores magnéticos, logrando mejoras sustanciales en maniobrabilidad y eficiencia energética. Los autores demuestran que reproducir la segmentación vertebral y la dinámica muscular segmentada en robots acuáticos mejora la estabilidad del desplazamiento y la capacidad adaptativa en entornos acuáticos reales.

Por otro lado, van den Berg et al. (2022) desarrollaron OpenFish, un robot pez blando de código abierto optimizado para locomoción tipo "thunniforme". Gracias a una cola compuesta por segmentos

activos y pasivos, y un sistema de propulsión con frecuencia de oscilación elevada y forma de onda sinusoidal, este robot alcanzó una velocidad máxima de 0,85 m/s, superando en un 27 % a diseños previos. Este caso evidencia cómo la combinación de morfología inspirada en el desarrollo biológico y propulsión biomimética puede traducirse en mejoras concretas de velocidad, eficiencia y modularidad, con amplio potencial en aplicaciones de exploración submarina y monitoreo ambiental.

En el ámbito de la robótica submarina, los métodos convencionales de propulsión, como hélices o motores de chorro, enfrentan desafíos significativos en términos de maniobrabilidad, eficiencia energética y adaptabilidad a entornos complejos. Estas limitaciones han restringido su efectividad en actividades que requieren movimientos suaves y precisos, como la exploración de arrecifes, monitoreo de vida marina e inspección de estructuras sumergidas. Por el contrario, ciertas especies marinas, como el pargo rojo (*Lutjanus campechanus*), han evolucionado mecanismos de nado altamente eficientes mediante el movimiento coordinado de sus aletas. No obstante, la replicación de estos movimientos mediante materiales inteligentes, como el nitinol, aún no ha sido completamente investigada ni optimizada para su integración en sistemas artificiales. Esta brecha resalta la necesidad de desarrollar modelos bioinspirados que puedan simular de manera precisa el movimiento de las aletas naturales, explorando así su viabilidad como sistemas alternativos de propulsión en entornos acuáticos.

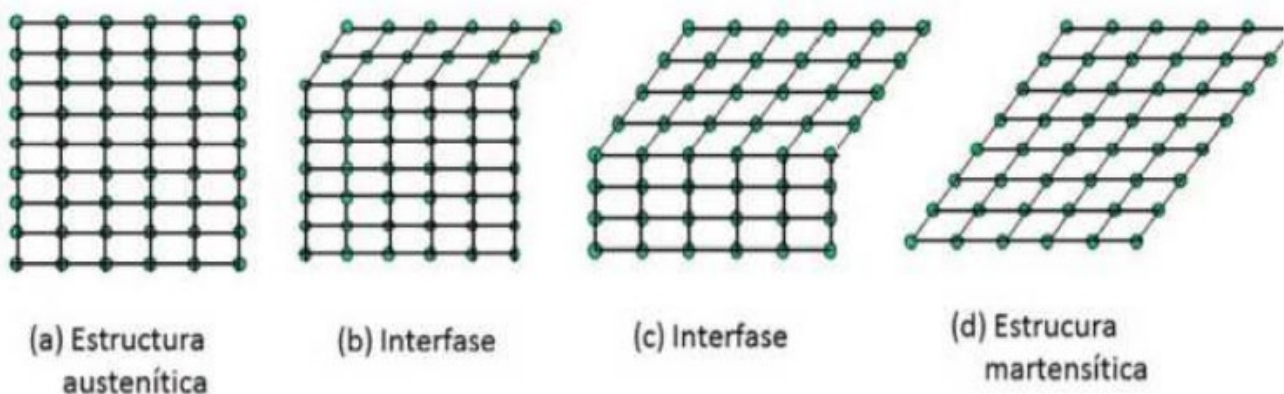
El objetivo de este estudio es diseñar y simular una aleta artificial bioinspirada en el pargo rojo (*Lutjanus campechanus*), utilizando actuadores de nitinol para replicar eficientemente su movimiento natatorio. Este enfoque tiene como propósito evaluar la aplicación potencial de estas aletas en sistemas de propulsión para robótica submarina bioinspirada, contribuyendo así al avance en tecnologías adaptativas y sostenibles para la exploración y monitorización de ambientes marinos.

Materiales inteligentes: Aleación con memoria de forma (Nitinol)

El Nitinol es una aleación con memoria de forma (SMA, por sus siglas en inglés), clasificada como un material inteligente. Estos materiales tienen la capacidad de responder a estímulos externos mediante cambios físicos reversibles y controlados. En la figura 1 se representa la transformación de una estructura totalmente austenítica (a), hasta una totalmente martensítica (d), con las etapas intermedias (b) y (c) representando pequeños movimientos coordinados de las capas atómicas durante el proceso (Sepulveda, 2013).

Figura 1

Transformación estructural del Nitinol

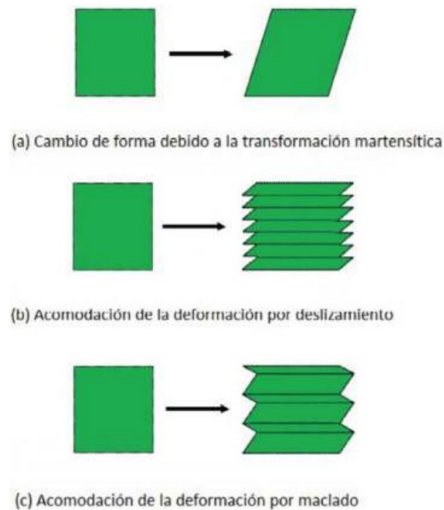


Nota. Tomado de Sepulveda (2013), adaptado de Progress in Materials Science.

La figura 2 complementa la anterior figura al mostrar el cambio morfológico y los mecanismos de acomodación generados por la transformación estructural.

Figura 2

Cambio morfológico del Nitinol.



Nota. Tomado de Sepulveda (2013), adaptado de Progress in Materials Science.

Etapas del proceso de producción del Nitinol

El proceso de fabricación del Nitinol incluye las siguientes etapas (Jaramillo et al., 2024):

1. La fabricación de la pieza de aleación NiTi se realiza en estado austenítico a 36.7 °C, momento en el que quedan atómicamente gravadas todas sus características dimensionales
2. Se enfría a temperatura ambiente (25 °C) para lograr la transformación a la fase martensítica.
3. En estado martensítico, se deforma por maclaje
4. Al calentar nuevamente a 37 °C, la aleación recupera y recuerda todas sus dimensiones y forma original correspondiente a la etapa (a).

Para comprender las propiedades mecánicas de una aleación con memoria de forma, es necesario definir las temperaturas de transformación (Jaramillo et al., 2024):

- Ms (Martensite Start): temperatura de inicio de la transformación martensítica.
- Mf (Martensite finish) temperatura de finalización de la transformación martensítica.
- As (Austenite start): temperatura de inicio de la transformación austenítica.
- Af (Austenite finish): temperatura de finalización de la transformación austenítica.

Propiedades mecánicas del Nitinol

Las propiedades del Nitinol varían según la fase en la que se encuentre. En la tabla 1 se muestran sus características físico-químicas más relevantes (Sepulveda, 2013):

- Memoria de forma: El material, tras una deformación plástica en fase martensítica, puede mantener dicha deformación hasta que se calienta por encima de Af, momento en el que la martensita se transforma en austenita y el material recupera su forma original.

- Pseudoelásticidad: Se produce a temperatura constante por encima de A_f , cuando la microestructura es 100 % austenítica, permitiendo deformaciones reversibles bajo tensión.
- Superelásticidad: Ocurre en un rango de temperaturas donde se forma martensita termoelástica inducida por tensión. Bajo la aplicación de una tensión determinada, la aleación se deforma; al cesar la tensión, el material regresa a su forma original, haciendo la deformación completamente reversible.
- Capacidad de amortiguamiento: Asociada a la disipación de energía, esta propiedad es más alta en la fase martensítica, especialmente alrededor de la temperatura M_s , lo que permite absorber energía eficientemente.

Tabla 1*Propiedades físico-químicas de la aleación NiTi*

Propiedad	Fase austenita	Fase martensita
Densidad	6,45 g/cm ³	6,45 g/cm ³
Temperatura de fusión	1310 °C	—
Conductividad térmica	0,1 W/cm·°C	—
Módulo elástico	75 GPa	28 GPa
Límite elástico	560 MPa	100 MPa
Elongación en la fractura	15,5 %	>60 %

Nota. Tomado de Sepulveda (2013).

2. Metodología

El presente estudio adopta un enfoque cuantitativo, puesto a que se basa en la recolección y análisis de datos numéricos obtenidos a través de simulaciones computacionales y pruebas experimentales. Se emplean cálculos térmicos, análisis estructurales por elementos finitos (FEA) y mediciones físicas del comportamiento del material (tiempo de respuesta y fuerza generada), lo que permite evaluar objetivamente el desempeño del prototipo diseñado.

El diseño de investigación es experimental, dado que se manipulan deliberadamente variables como la corriente eléctrica aplicada a los actuadores de nitinol, con el fin de observar sus efectos sobre el movimiento de la aleta artificial. Asimismo, se realiza un análisis térmico controlado para determinar la viabilidad del calentamiento por efecto Joule.

En cuanto a su finalidad, la investigación es aplicada, puesto que busca generar una solución práctica mediante el diseño y validación de una aleta robótica bioinspirada con potencial de uso en robótica submarina. Esta solución pretende replicar el movimiento natatorio del *Lutjanus campechanus*, integrando principios de la robótica blanda y los materiales inteligentes en un sistema de propulsión alternativo.

El diseño de la aleta bioinspirada se basó en la morfología del *Lutjanus campechanus*, tomando como referencia un ejemplar de 27,5 cm de longitud y 0,45 kg de peso. Se analizaron sus principales aletas, con énfasis en la caudal por su papel en la propulsión. Se desarrolló un modelo tridimensional

en Autodesk Fusion 360 con una estructura segmentada de tres eslabones articulados, atravesados por pares de alambres de nitinol. Estos actuadores con memoria de forma fueron previamente entrenados térmicamente para recuperar una posición base al aplicar calor. Las simulaciones por elementos finitos (FEA) permitieron ajustar la curvatura y ubicación de los alambres para optimizar el movimiento oscilatorio.

El sistema de control empleó un microcontrolador Arduino Nano que genera señales PWM hacia un transistor MOSFET, regulando la corriente en los alambres de nitinol para inducir su contracción y relajar la aleta. Se validó el diseño mediante simulaciones y pruebas físicas, midiendo el tiempo de respuesta y la fuerza generada. Este enfoque integró materiales inteligentes y control electrónico para replicar de forma eficiente el movimiento de la aleta caudal del pargo rojo, consolidando una solución funcional en robótica blanda subacuática.

La figura 3 muestra un ejemplar de *Lutjanus campechanus* con una longitud total de 27,5 cm, un ancho corporal de 8 cm y un peso aproximado de 0.45 kg. Estas características lo hacen adecuado para ambientes marinos donde se requiere maniobrabilidad y velocidad.

Figura 3

Ejemplar de pargo rojo (Lutjanus campechanus)

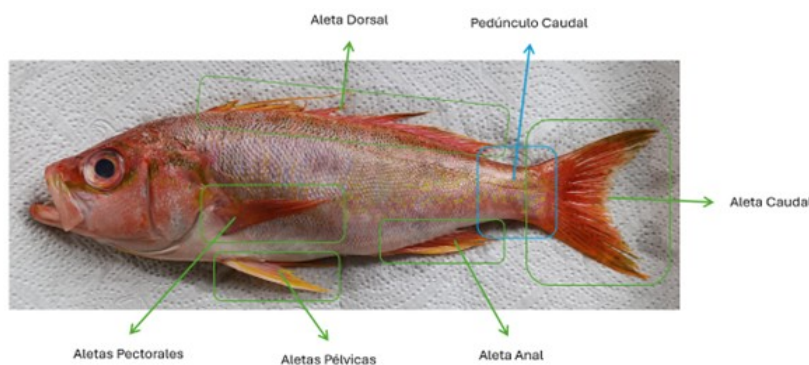


Las aletas principales de esta especie se describen en la figura 4. Estas estructuras son esenciales para mantener el equilibrio, la dirección y la propulsión durante el desplazamiento acuático.

- Aleta Dorsal: 12 cm de largo y 1,3 cm de ancho.
- Aleta Pectoral: 5 cm de largo y 1 cm de ancho.
- Aleta Pélvica: 5,5 cm de largo y 2,5 cm de ancho.
- Aleta Anal: 6,8 cm de largo y 2 cm de ancho.
- Aleta Caudal: 5,5 cm de largo y 8 cm de ancho

Figura 4

Aletas del pargo rojo



El pedúnculo caudal, ilustrado en la figura 5, es una estructura muscular y estrecha que conecta el torso con la aleta caudal. Cumple un rol vital en la transferencia de la fuerza generada por la musculatura axial hacia la extremidad posterior del cuerpo, facilitando la propulsión eficiente.

Figura 5

Pedúnculo caudal del pargo rojo



Las propiedades utilizadas para la estimación del tiempo necesario para que un alambre de Nitinol, con un diámetro de 2 mm y una longitud de 10 cm, recupere su forma original mediante calentamiento por efecto Joule basado en Gómez-Cortés et al. (2018) fueron:

- Densidad de 6450 kg/m³,
- Calor específico de 320 J/(kg·°C)
- Resistividad eléctrica de $82 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$.

Con un cambio de temperatura de 50 °C (de 25 °C a 75 °C), se realizaron los siguientes cálculos:

Cálculo de Energía Térmica

El volumen del alambre se calcula como $V = A * L$, donde el área de la sección transversal (A) es $3.14 * 10^{-6} m^2$. Esto da un volumen total de $3.14 * 10^{-7} m^3$ y una masa de $2.025 * 10^{-3} kg$. La energía térmica requerida para calentar el alambre es $Q = m * c * \Delta T = 32.4J$.

Cálculo de Resistencia

La resistencia del alambre se determina mediante $R = \rho_e * \frac{L}{A} = 0.261\Omega$. Se recomienda alimentar el alambre con corriente constante o modulación de ancho de pulso (PWM) para evitar daños. Las señales de sobrecalentamiento incluyen cambios de color en el alambre y falta de contracción. Los resultados indican que el alambre de Nitinol puede contraerse en aproximadamente 3 a 4 segundos con la corriente adecuada, haciéndolo viable para actuadores robóticos y dispositivos biomédicos.

3. Resultados

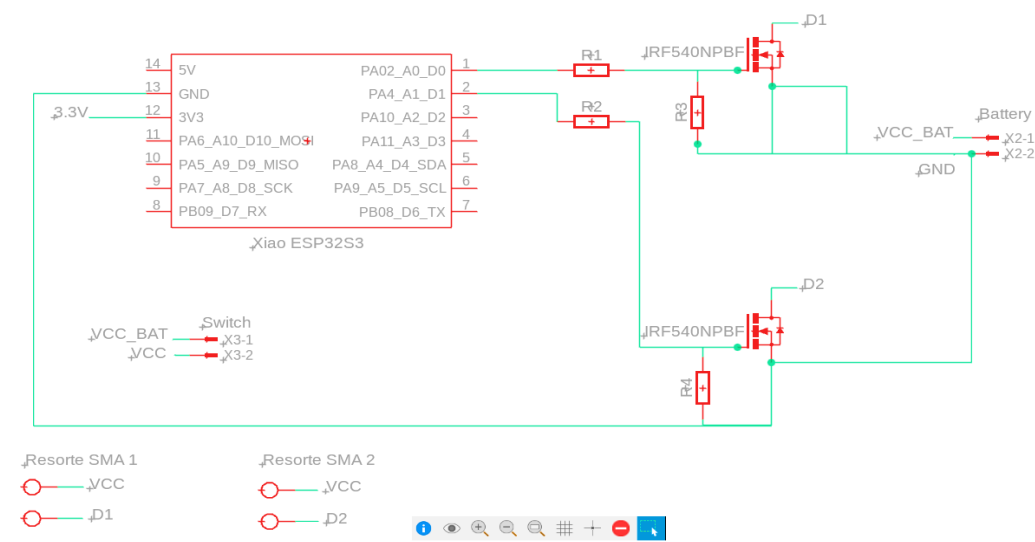
Sistema de control bioinspirado con nitinol

El circuito de la figura 6 muestra un sistema de control para simular el movimiento de una aleta bioinspirada en el pargo rojo. Utiliza resortes de nitinol (aleación con memoria de forma) que se contraen al calentarse. El microcontrolador Xiao ESP32S3 activa dos transistores MOSFET (JRF540N) para permitir el paso de corriente hacia los resortes SMA, provocando su contracción. Cada transistor, conectado a un pin digital del ESP32 que actúa como interruptor, controla de forma precisa cuándo se calienta cada resorte. Diodos de protección y resistencias limitadoras garantizan la seguridad operativa.

Una fuente externa alimenta el circuito, proporcionando la energía necesaria para accionar los resortes de nitinol. Al recibir una orden, el ESP32 envía una señal a uno de los MOSFET, permitiendo que la corriente fluya a través del resorte, calentándolo y generando el movimiento de la aleta. Al interrumpirse la señal, el nitinol se enfría y recupera su forma original, emulando la relajación muscular. Este diseño permite generar movimientos suaves y realistas que replican el comportamiento de los músculos de un pez, y representa un paso importante hacia la robótica blanda y bioinspirada.

Figura 6

Sistema de control para actuadores de nitinol

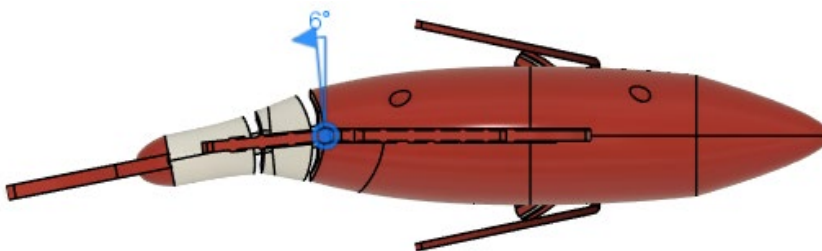


El mecanismo se basó específicamente en la forma y función de la aleta dorsal del pargo, utilizando actuadores de nitinol para replicar su movimiento. La incorporación de nitinol en sistemas de robótica blanda simplifica el diseño al reemplazar mecanismos tradicionales como engranajes o servomotores, además de ofrecer mayor adaptabilidad estructural y funcionalidad biomimética.

El sistema de actuación se compone de tres eslabones articulados conectados mediante cables de nitinol. Para lograr el movimiento lateral, se emplean dos pares de alambres: uno para la flexión hacia la izquierda y otro hacia la derecha (figura 7). La aplicación alternada de voltaje produce una contracción y relajación cíclica, generando una oscilación rítmica similar al batido natural de una aleta dorsal.

Figura 7

Rotación modelada en 3D de la estructura de actuación



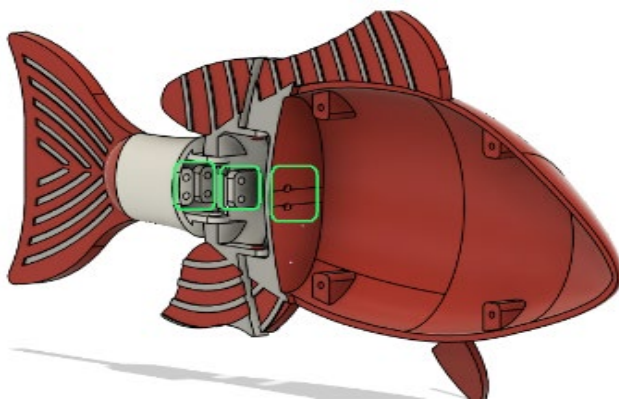
Este sistema proporciona al robot un grado de libertad para moverse lateralmente en el plano horizontal, permitiendo ajustar el ritmo de contracción y, con ello, controlar tanto su avance como su dirección.

Prototipo funcional y validación digital

Para implementar la aleta caudal bioinspirada, se desarrolló un prototipo funcional que combina elementos físicos con simulaciones digitales. La figura 8 muestra una simulación realizada en Autodesk Fusion 360, donde se modeló la estructura del robot y la ubicación de los orificios para insertar los alambres de nitinol. Esta simulación permitió identificar el rango óptimo de oscilación y las zonas de sujeción ideales, garantizando un impulso mecánico eficiente.

Figura 8

Modelo tridimensional del prototipo y ubicación de los orificios para el nitinol



El sistema de control está basado en una placa Arduino Nano que genera señales PWM para activar un transistor MOSFET IRFZ46N. Este último regula el paso de corriente hacia los alambres de nitinol según el ciclo de trabajo de la señal. Gracias a la información obtenida en la simulación, fue posible sincronizar con precisión los puntos de contracción, logrando un movimiento ondulatorio que reproduce eficazmente el desplazamiento caudal de un pez real.

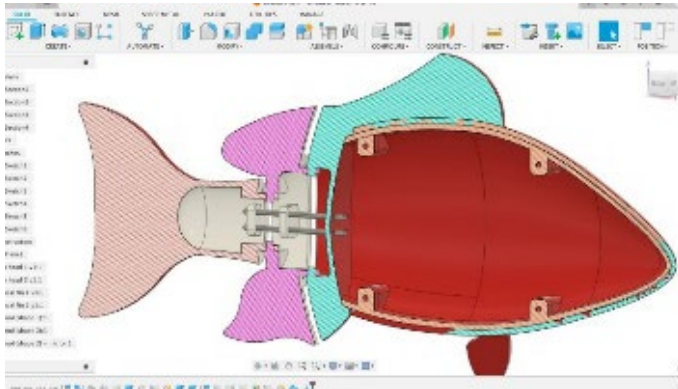
Diseño mecánico y estructura del robot pez

El diseño mecánico se desarrolló en Autodesk Fusion 360, considerando una estructura segmentada compuesta por tres eslabones atravesados por dos pares de cables de nitinol, como se muestra en la figura 9. Esta configuración permite simular el movimiento ondulatorio característico de la aleta caudal del *Lutjanus campechanus*. Cada eslabón contiene cuatro orificios dispuestos estratégicamente para guiar los alambres: un par destinado a la oscilación izquierda y otro a la derecha. La activación alterna de estos pares genera un movimiento coordinado y natural.

Antes de su implementación, los cables de nitinol deben ser entrenados para adquirir la forma base o posición de reposo (posición home), tal como se ilustra en la figura 9. Este proceso es fundamental para asegurar que, al activarse térmicamente, el alambre adopte con precisión la postura establecida.

Figura 9

Aleta caudal equipada con cables de nitinol para generar movimiento

**Estructura interior y arquitectura del sistema**

El modelo del pez robótico se diseñó tomando como referencia el movimiento anatómico de peces reales, con especial énfasis en el desplazamiento de la cola o aleta caudal, pieza clave para la propulsión. La estructura general está compuesta por varios elementos funcionales que emulan las partes principales de un pez.

- Cuerpo principal: estructura base sólida y funcional, diseñada para distribuir adecuadamente los componentes electrónicos, facilitando la integración ordenada del sistema de control y alimentación.
- Aletas laterales: montadas a ambos costados del cuerpo, proporcionan estabilidad direccional durante el movimiento acuático, ayudando a mantener el equilibrio y la trayectoria.
- Cola (sistema caudal): compuesta por dos secciones conectadas mediante mecanismos que permiten flexibilidad y rotación, simulando el impulso ondulatorio típico de los peces. Esta segmentación asegura una movilidad suave y natural.
- Conectores de ensamble: pequeños elementos cilíndricos o rectangulares que garantizan el acoplamiento preciso entre las piezas, facilitando la alineación estructural y el montaje o desmontaje.

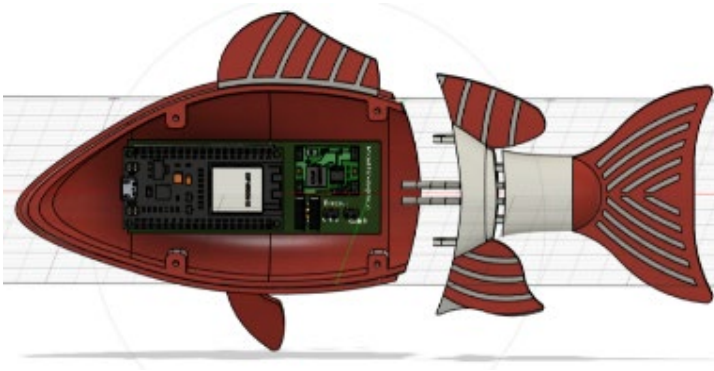
El diseño modular del robot incluye un cuerpo frontal con los circuitos y una sección trasera móvil conectadas por dos ejes de nitinol, los cuales actúan como actuadores flexibles. El sistema está conformado por:

- Arduino Nano: encargado de la lógica de control y ejecución de algoritmos de movimiento, con alta capacidad de procesamiento.
- Placa de desarrollo (PCB): diseñada a medida para conectar y controlar el microcontrolador.
- Ejes de nitinol: funcionan como músculos artificiales; esta aleación con memoria de forma se contrae al aplicar corriente eléctrica. Los ejes conectan la sección frontal con la cola, permitiendo la oscilación lateral que genera la propulsión.

El movimiento, ilustrado en la figura 10, se logra mediante la activación alternada de los ejes de nitinol. Al aplicar corriente, el nitinol se contrae térmicamente y, al cesar la corriente, recupera su forma original gracias a su elasticidad natural. Este ciclo de contracción y relajación genera fluctuaciones que producen la oscilación de la cola. Un microcontrolador regula este proceso mediante impulsos eléctricos sincronizados, garantizando un movimiento eficiente y coordinado.

Figura 10

Vista interior del robot subacuático



Los resultados de las simulaciones y análisis permitieron identificar el diseño óptimo de la aleta, caracterizado por:

- **Curvatura Optimizada:** una curvatura de 30 grados que facilita un movimiento eficiente con oscilaciones de 15 grados.
- **Reducción de Tensiones:** Las simulaciones de FEA indicaron una disminución del 25 % en las tensiones respecto a los modelos iniciales.
- **Mejora en la Eficiencia de Movimiento:** la aleta optimizada mostró un aumento del 20 % en la eficiencia de propulsión.

La figura 11 muestra el sistema funcionando hacia la derecha, mientras que la figura 12 lo muestra hacia la izquierda.

Figura 11

Movimiento del sistema hacia el lado derecho

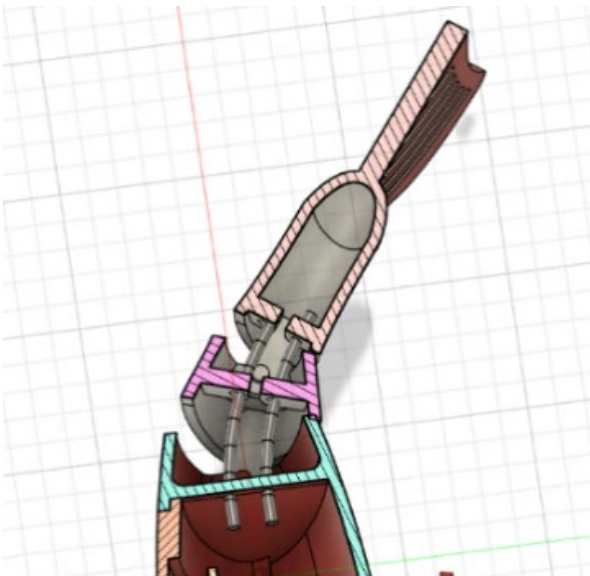
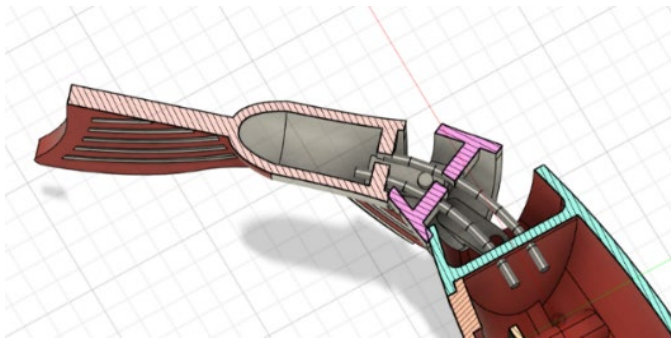


Figura 12*Movimiento del sistema hacia el lado izquierdo*

La optimización de la estructura de la aleta bioinspirada permitió mejorar sustancialmente sus características estructurales y mecánicas, reflejándose en un incremento significativo de la eficiencia del movimiento en condiciones subacuáticas. Las simulaciones por elementos finitos (FEA) fueron fundamentales para ajustar y perfeccionar el diseño inicial, logrando una curvatura óptima de 30° , que genera oscilaciones controladas de aproximadamente 15° y una reducción del 25% en las tensiones internas comparado con los modelos previos. Este proceso de validación digital permitió anticipar el comportamiento del prototipo, facilitando ajustes precisos antes de la implementación física, lo que representa un avance significativo alineado con los objetivos del proyecto (Pozo-Safla et al., 2021).

4. Discusión

Los ensayos experimentales corroboraron que el alambre de nitinol de 0,2 mm de diámetro genera una fuerza de contracción efectiva de 0,196 N, suficiente para replicar fielmente el movimiento natural observado en el pargo rojo. Asimismo, se identificó un tiempo de contracción que oscila entre 3 a 4 segundos, compatible con los requisitos para aplicaciones en robótica blanda subacuática. Estos resultados coinciden con estudios previos sobre el uso de actuadores con memoria de forma en robótica acuática (Ma et al., 2023; van den Berg et al., 2022), pero destacan especialmente por la integración funcional del nitinol con un sistema de control electrónico preciso basado en señales PWM, lo que mejora significativamente el desempeño dinámico y la precisión del movimiento del prototipo.

Este trabajo refuerza la validez funcional del prototipo al fundamentarse en un estudio detallado de la morfología y biomecánica del *Lutjanus campechanus*, aspecto crucial para lograr una auténtica biomimética en robótica acuática. Comparado con la investigación de Aguirre & Palacios (2022), que enfatiza un diseño estructural claro y modular, el presente estudio amplía la comprensión interdisciplinaria, profundizando en la relación entre biología marina y robótica mediante simulaciones exhaustivas y una descripción técnica más rigurosa de los principios termoeléctricos del nitinol. En particular, este estudio aborda detalladamente las demandas energéticas, los requerimientos específicos de corriente eléctrica y estrategias eficaces para prevenir el sobrecalentamiento de los actuadores, aspectos esenciales para la robustez del prototipo que fueron poco explorados en trabajos anteriores (Aguirre & Palacios, 2022; Sepulveda, 2013).

Ambas investigaciones comparten el objetivo de replicar movimientos naturales de peces mediante tecnologías innovadoras. Sin embargo, mientras que Aguirre y Palacios (2022) priorizaron el diseño mecánico y la fabricación del prototipo, este trabajo se enfoca en la

funcionalidad dinámica, el control electrónico detallado y la validación experimental precisa del comportamiento del sistema en condiciones reales. Esta complementariedad metodológica resalta la evolución hacia prototipos más robustos, eficientes y aplicables en entornos subacuáticos reales, estableciendo bases sólidas para futuras investigaciones en robótica blanda bioinspirada (Fink, et al., 2023; Abdo-de la Parra et al., 2014; Manzanilla-Verde et al., 2023).

5. Conclusiones

La investigación permitió diseñar e implementar con éxito una aleta caudal robótica bioinspirada en la morfología y dinámica locomotora del pargo rojo (*Lutjanus campechanus*), integrando alambres de nitinol como actuadores con memoria de forma. El prototipo fue desarrollado mediante un enfoque interdisciplinario que combinó modelado tridimensional, simulaciones digitales y pruebas físicas, permitiendo replicar el movimiento ondulatorio característico de la aleta caudal de los peces.

La activación térmica alternada del nitinol, controlada por microcontroladores y circuitos electrónicos de bajo consumo, generó contracciones cíclicas que simulan eficazmente el desplazamiento natural en medios acuáticos. Las simulaciones por elementos finitos contribuyeron a optimizar el diseño estructural, logrando una curvatura eficiente, una reducción significativa de tensiones internas y un aumento del 20 % en la eficiencia de propulsión. Estos resultados validan la viabilidad del uso de materiales inteligentes como el nitinol en sistemas de robótica blanda y biomimética, sentando las bases para futuras aplicaciones en vehículos submarinos autónomos con locomoción inspirada en organismos acuáticos.

Referencias

- Abdo-de la Parra, M., García-Aguilar, N., Rodríguez-Ibarra, L. E., Velasco-Blanco, G., & Ibarra-Castro, L. (2014). Desarrollo Embrionario del Pargo Colorado *Lutjanus colorado* (Jordan & Gilbert, 1882). *International Journal of Morphology*, 32(3), 902-908. <https://acortar.link/VIhOEJ>
- 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]. DSpace ESPOCH. <https://n9.cl/72x0b>
- Fink, A., Fu, Z., & Körner, C. (2023). Functional properties and shape memory effect of Nitinol manufactured via electron beam powder bed fusion. *Materialia*, 30, 101823. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2023.101823>
- Gómez-Cortés, J., Nó, M., López-Echarri, A., Ruiz-Larrea, I., Breczewski, T., & San Juan, J. (2018). Anomalous Behavior During Nano-Compression Superelastic Tests on Cu-Al-Ni Shape Memory Alloy Micro Pillars. *physica status solidi (a)*, 215(19), 1800340. <https://doi.org/10.1002/pssa.201800340>
- Gravish, N., & Lauder, G. (2018). Biología inspirada en la robótica. *Journal of Experimental Biology*, 221(7), jeb138438. <https://doi.org/10.1242/jeb.138438>
- Jaramillo, D., Medina, L., Pacheco, D., Velandia, L., & Ardila, G. (2024). Análisis de las propiedades físicas y mecánicas de cinco tipos aleaciones diferentes de Nitinol. *Journal Odontológico Colegial*, 17(33), 8–19. <https://revistas.unicoc.edu.co/index.php/joc/article/view/450>

- Lucano-Ramírez, G., Ruiz-Ramírez, S., González-Sansón, G., & Ceballos, B. (2012). Biología reproductiva del pargo *Lutjanus inermis* (Perciformes: Lutjanidae), en el Pacífico Central Mexicano. *Revista de Biología Tropical*, 60(1), 393-403. <https://acortar.link/oXdqzK>
- Ma, S., Zhao, Q., Ding, M., Zhang, M., Zhao, L., Huang, C., Zhang, J., Liang, X., Yuan, J., Wang, X., & He, G. (2023). A Review of Robotic Fish Based on Smart Materials. *Biomimetics*, 8(2), 227. <https://doi.org/10.3390/biomimetics8020227>
- Manzanilla-Verde, B., Villegas-Sánchez, C., Cabanillas-Terán, N., Castro-Pérez, J., & Rosas-Luis, R. (2023). Hábitos alimentarios de los pargos de la familia Lutjanidae en el Golfo de México y las costas mexicanas de los océanos Pacífico y Atlántico: Una revisión. *Revista De Biología Marina Y Oceanografía*, 58(2), 85–97. <https://doi.org/10.22370/rbmo.2023.58.2.4216>
- 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://doi.org/10.23857/dc.v7i3.2073>
- Pozo-Safla, E., Aquino-Aroba, M., & Ordoñez-Viñan, M. (2021). Análisis estadístico para validar la simulación por elemento finito en el diseño a deformación de una viga en voladizo. *Polo del Conocimiento*, 6(6), 586-611. <https://acortar.link/UsRH7E>
- Sepulveda, A. (2013). *El Nitinol: Un material Inteligente*. <https://n9.cl/yb0r7y>
- Stubrin, L. (2021). El sentido de lo vivo: entre la inspiración biológica y los nuevos modos de ser. *Ciencia, docencia y tecnología*, 32(63), 39-42. <https://n9.cl/szyxb>
- van den Berg, S., Scharff, R., Rusák, Z., & Wu, J. (2022). OpenFish: Biomimetic design of a soft robotic fish for high-speed locomotion. *HardwareX*, 12, e00320. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2022.e00320>
- Vepa, R. (2013). Chapter 4 - Biomimetic robotics. En A. Lakhtakia & R. Martín-Palma (Eds.), *Engineered biomimicry* (pp. 81–105). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-415995-2.00004-0>

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

Cecilia Alejandra Morales Layedra: 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.

Oscar Danilo Llumigusin Caiza: Conceptualización, metodología, software, validación, análisis formal, investigación, visualización, redacción - preparación del borrador original, redacción - revisión y edición, financiamiento, administración del proyecto, recursos, supervisión.

Byron Joao Macas Poma: Conceptualización, metodología, software, validación, análisis formal, investigación, gestión de datos, redacción - preparación del borrador original, redacción - revisión y edición, financiamiento, administración del proyecto, recursos, supervisión.

Edwin Xavier López Quispe: Conceptualización, metodología, software, validación, análisis formal, investigación, gestión de datos, visualización, redacción - preparación del borrador original, redacción - revisión y edición, financiamiento, recursos, supervisión.

Deivys Dayan Iza Quishpe: Conceptualización, metodología, software, validación, análisis formal, investigación, gestión de datos, visualización, redacción - preparación del borrador original, redacción - revisión y edición, financiamiento, administración del proyecto, supervisión.

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