

Propulsión biomimética para vehículos submarinos autónomos mediante mecanismos paralelos

Tercer Simposio ININDETEC 25 Aniversario

M.C. Cristina Tehaní Aparicio García
Tecnológico de Monterrey



Introducción

ROV



AUV

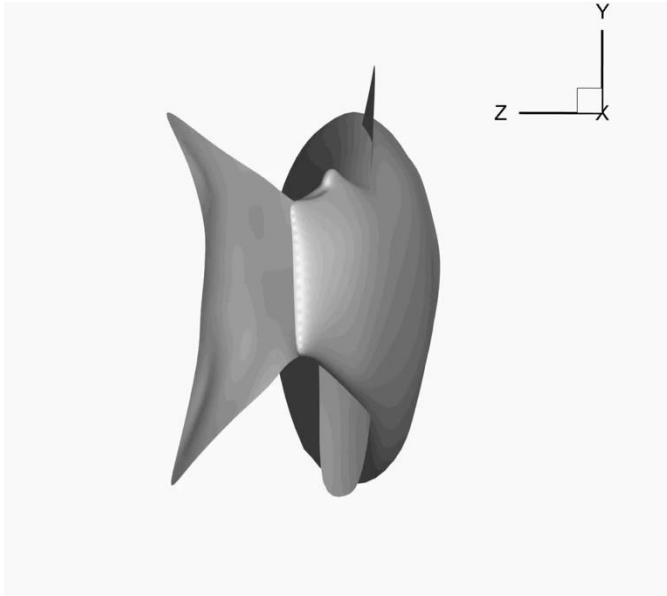
Propulsión de un AUV

La misión condiciona cómo debe moverse el vehículo.

En operaciones submarinas, la propulsión no sólo determina la velocidad: también influye en la maniobrabilidad, el consumo energético y la perturbación del entorno.

- Inspección y monitoreo requieren trayectorias precisas.
- Espacios confinados demandan cambios de orientación y velocidad controlados.
- En ciertas misiones, reducir perturbaciones acústicas puede ser una ventaja operacional.

De la hélice a la locomoción biomimética

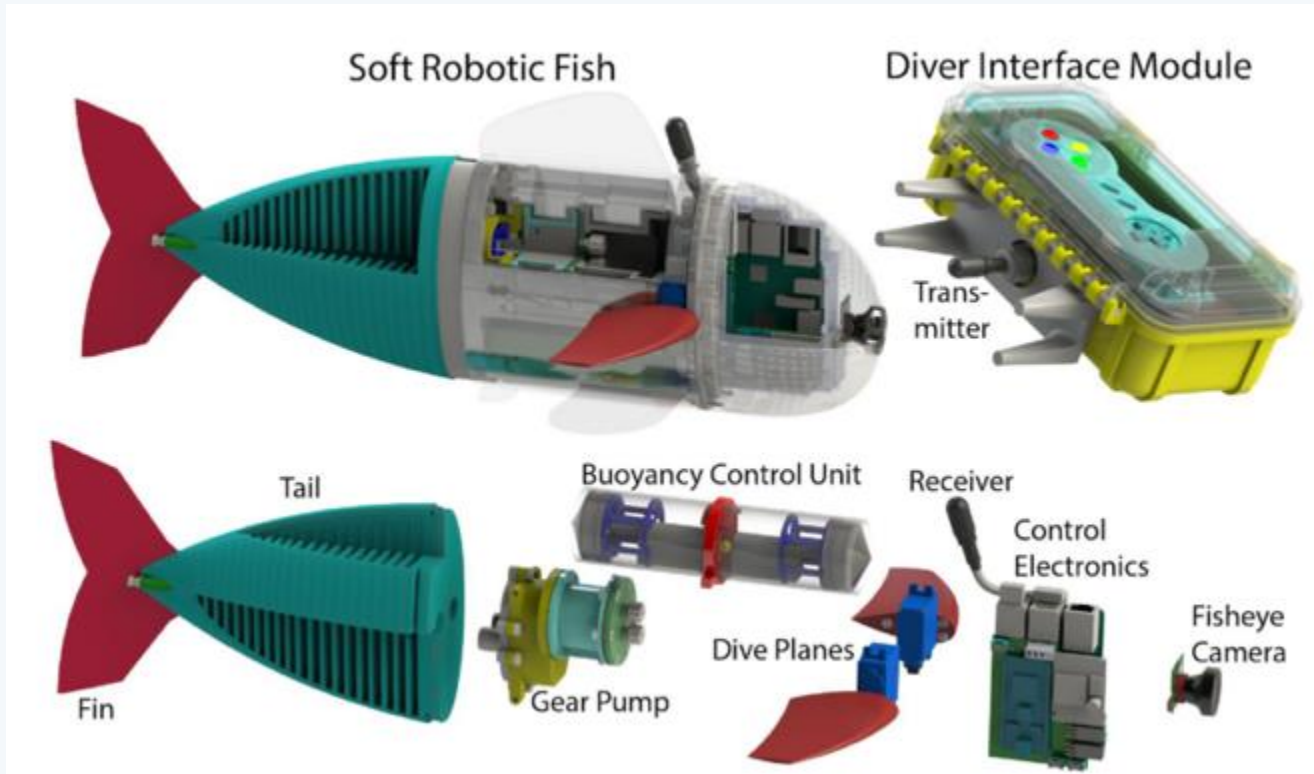


PROPULSIÓN BIOMIMÉTICA

Una alternativa inspirada en la forma en que los animales acuáticos generan y orientan fuerzas.

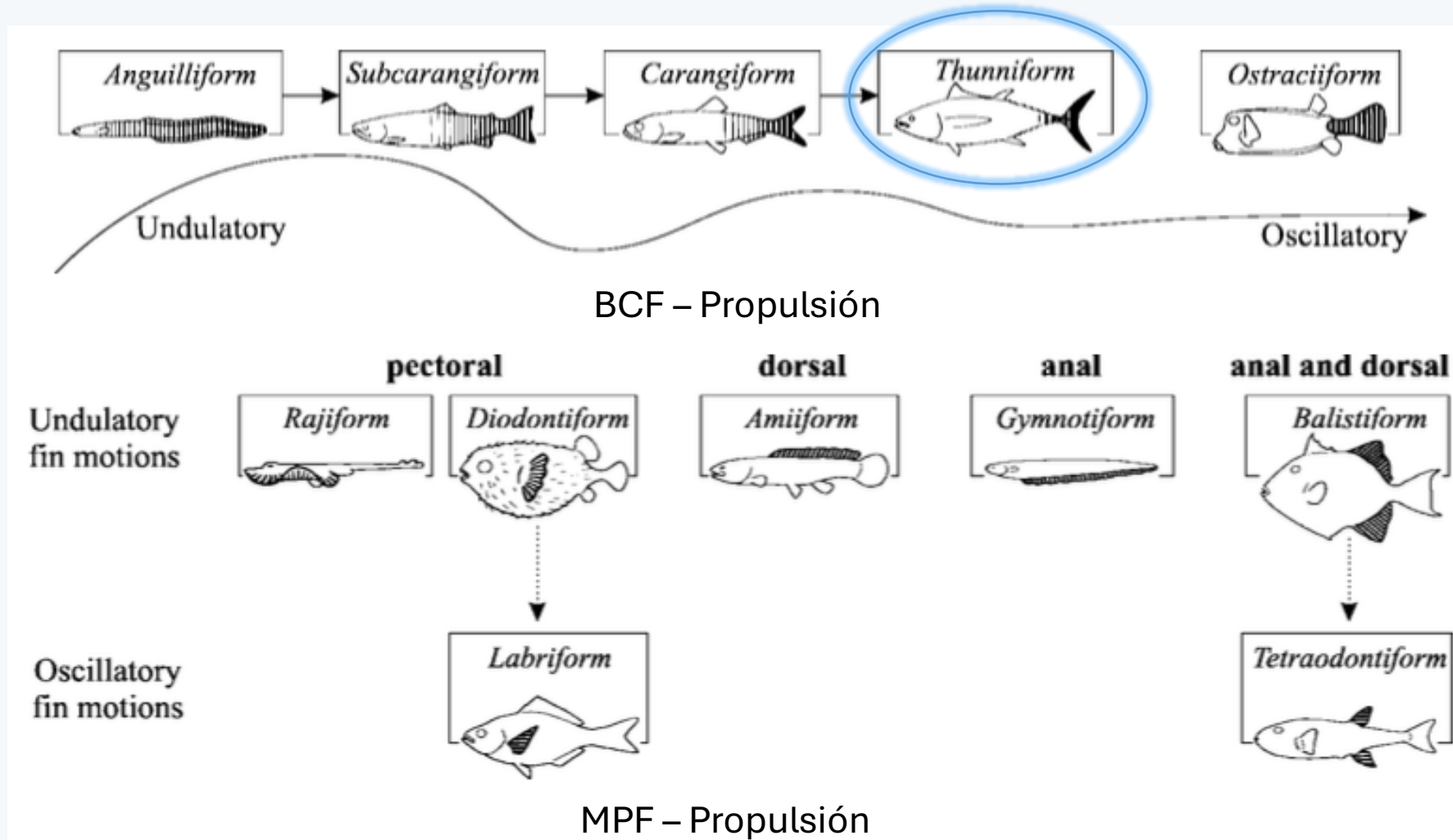
Nota: la reducción de ruido es una motivación de diseño; no fue medida experimentalmente en este trabajo.

Propulsión biomimética probada en ambientes marinos



[R. K. Katzschmann, J. DelPreto, R. MacCurdy, and D. Rus, "Exploration of underwater life with an acoustically controlled soft robotic fish," *Sci. Robot.*, vol. 3, no. 16, 2018.]

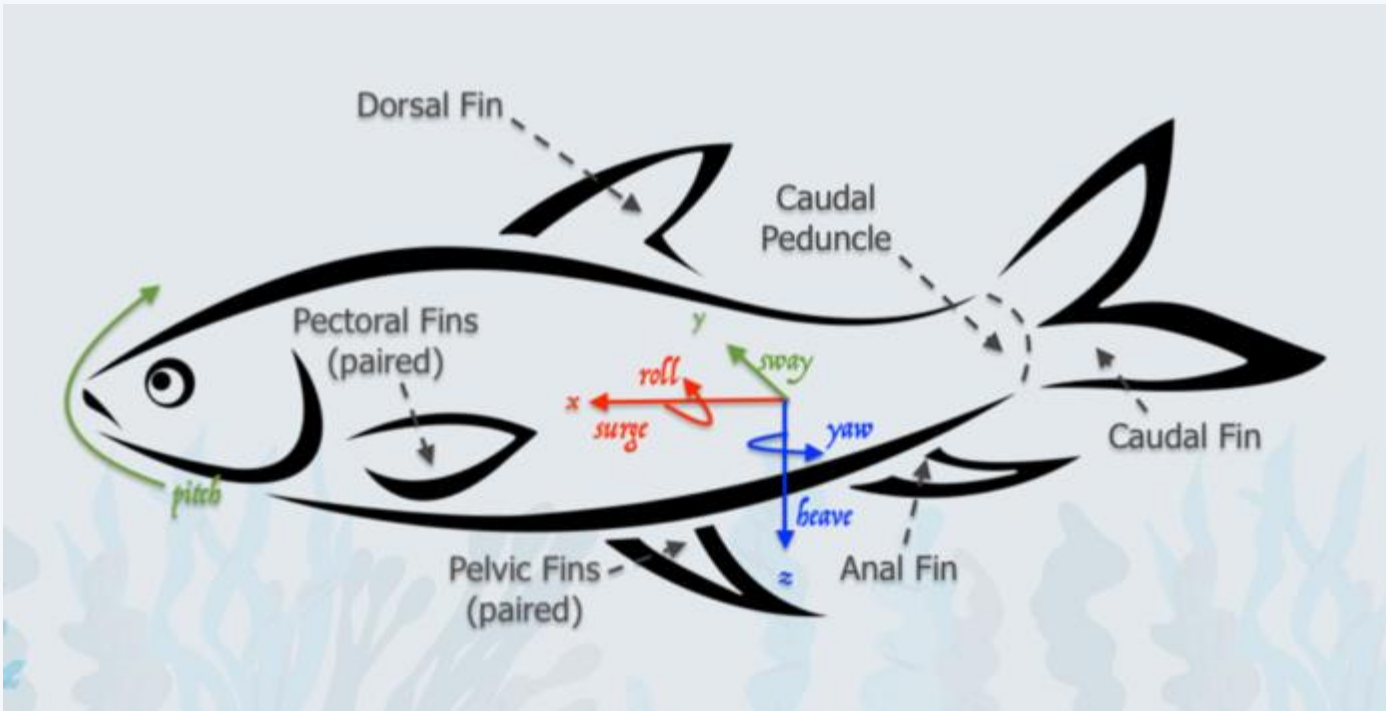
Locomoción



[Sfakiotakis, M., Lane, D. M., & Davies, B. C. (1999). Review of Fish Swimming Modes for Aquatic Locomotion. *IEEE Journal of Ocean Engineering*, 24 (2), 237-252.]

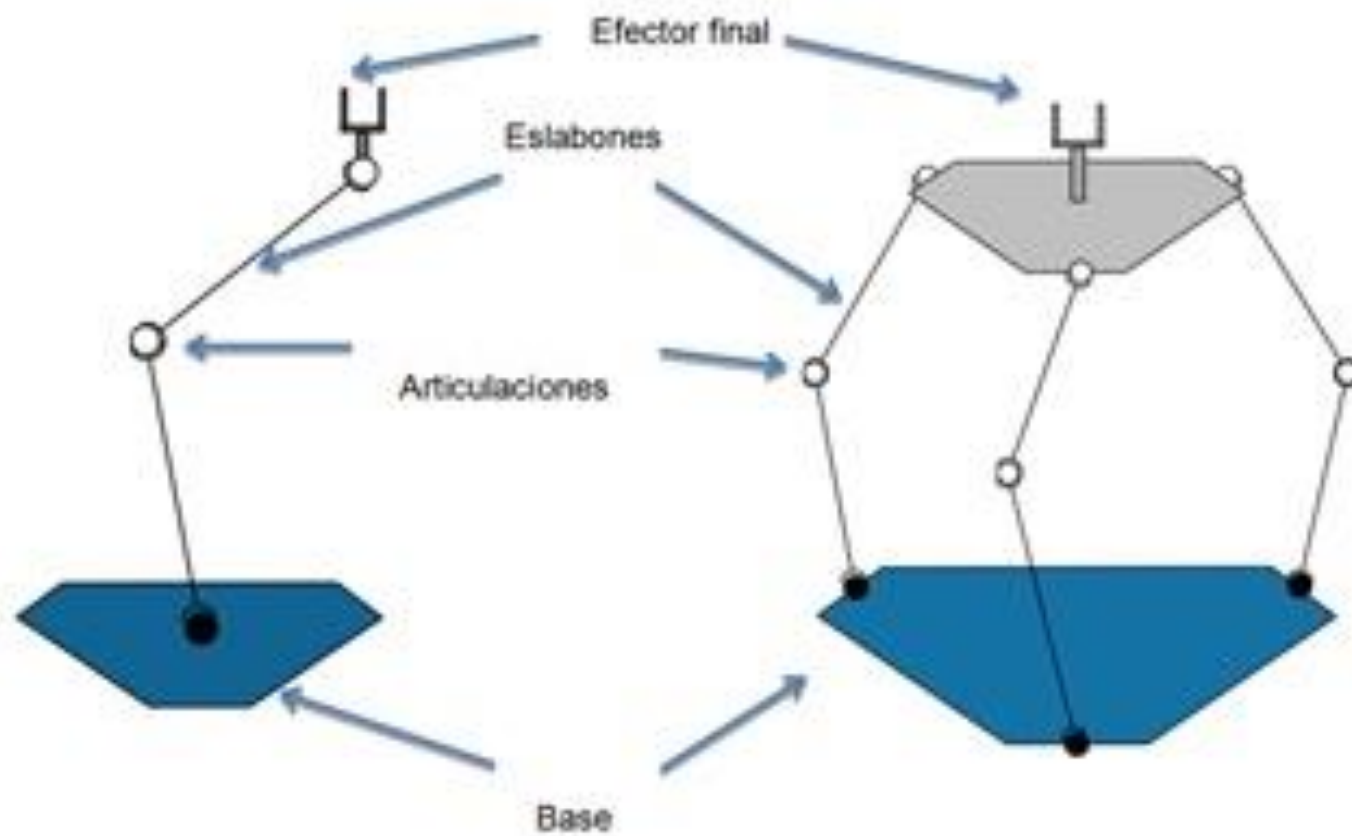
¿Qué imitamos de un pez?

El sistema toma como referencia el modo de locomoción tipo *thunniform*.



La mayor parte del movimiento propulsivo se concentra hacia el pedúnculo y la aleta caudal.

Mecanismos Paralelos



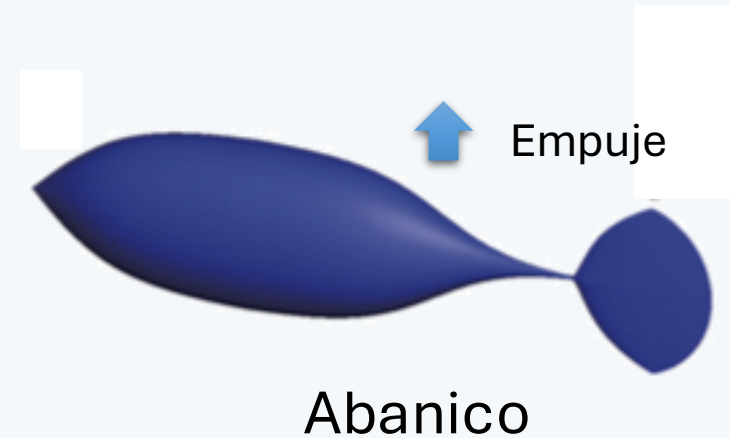
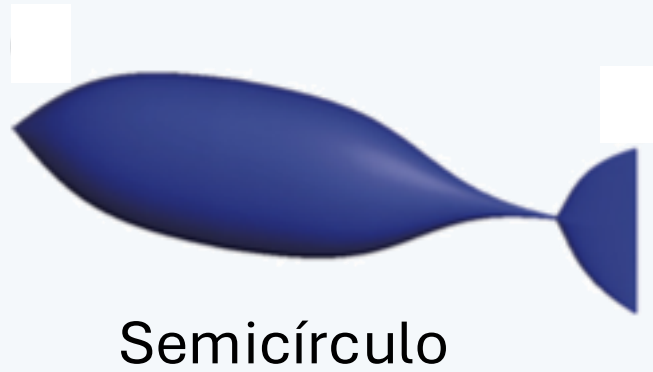
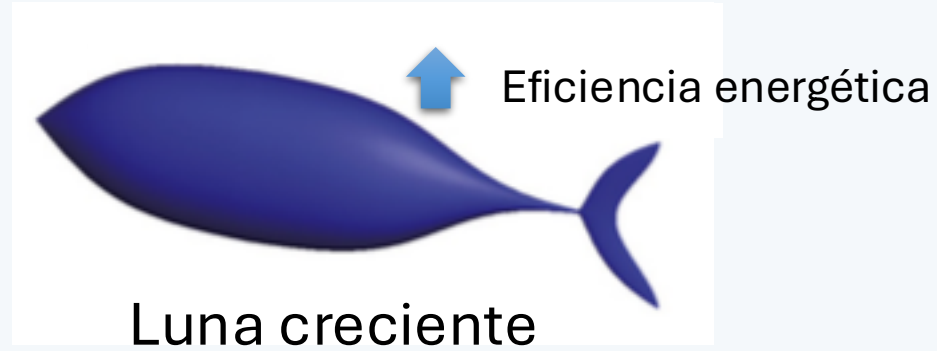
[H. D. Taghirad, Parallel Robots: Mechanics and Control, CRC Press, 2013.]

3UCU-1S



[Leal Merlo, S.A., and Rodriguez Leal, E., 2016, “Parallel Mechanism with Multiple Legs with Spherical Motion”, Mexican Institute for Intellectual Property (IMPI), Mx/a/2016/015913.]

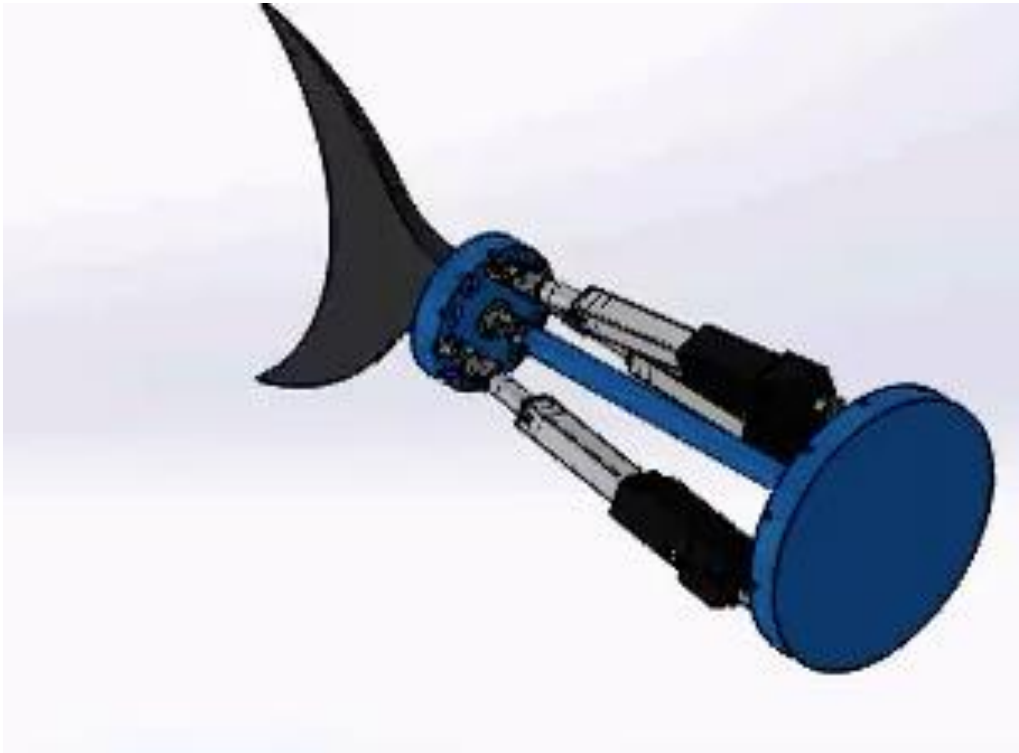
Formas de aletas



[Chang, X., Zhang, L., & He, X. (2012). Numerical study of the thunniform mode of fish swimming with different Reynolds number and caudal fin shape. *Computers & Fluids*, 68, 54-70.]

Mecanismo Paralelo como Sistema de Propulsión

Un mecanismo paralelo de 3 GDL orienta una aleta caudal artificial.



3UCU-1S

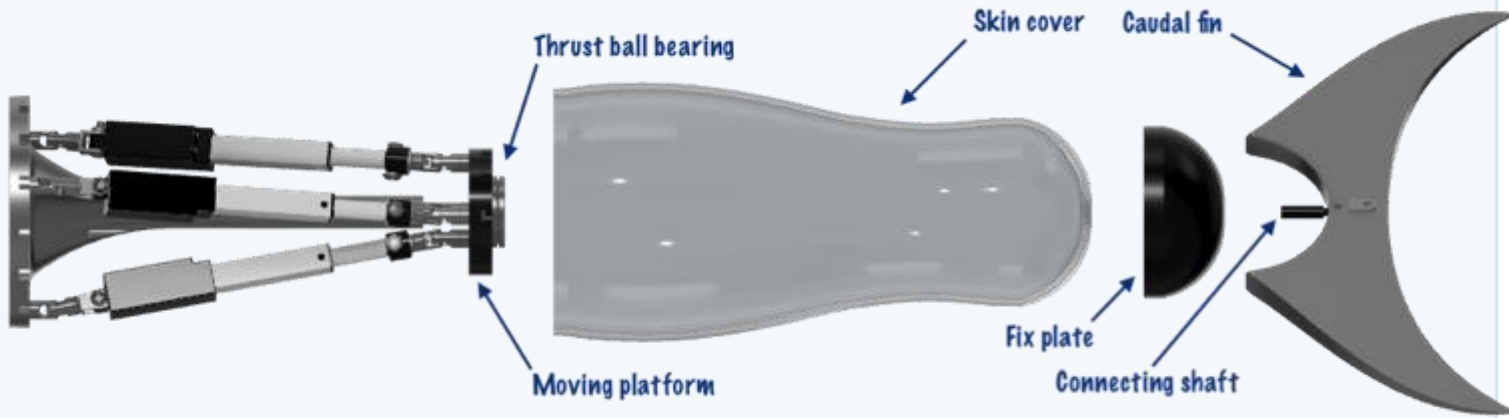
- Aleteo Vertical
- Aleteo horizontal
- Transición entre planos

Actuadores lineales:
12 V · carrera 50 mm · 32 mm/s

[Aparicio-García et al. (2020), "Design, Construction, and Modeling of a BAUV with Propulsion System based on a Parallel Mechanism for the Caudal Fin," Applied Sciences.]

Del concepto al prototipo

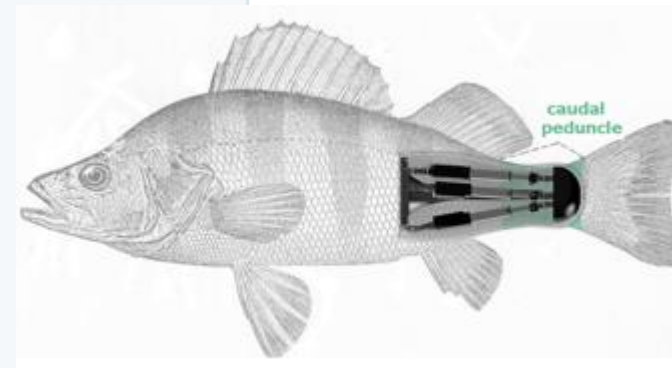
Diseño mecánico, actuadores, electrónica y aleta integrados en un mismo módulo.



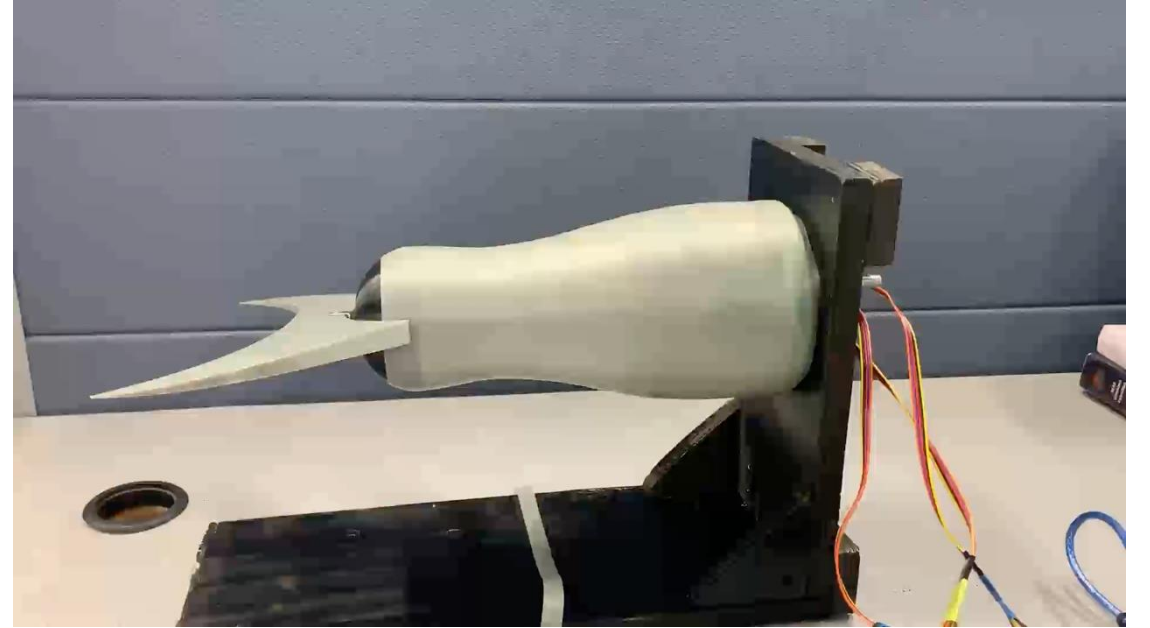
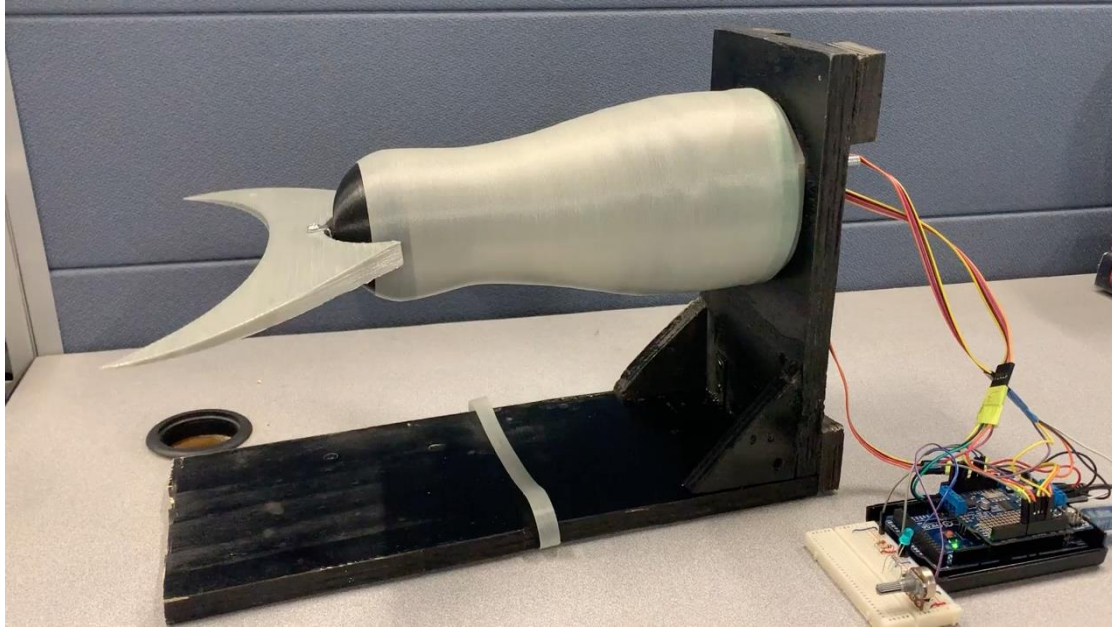
- Base fija
- Mecanismo paralelo
- Plataforma móvil
- Cubierta / pedúnculo
- Aleta caudal



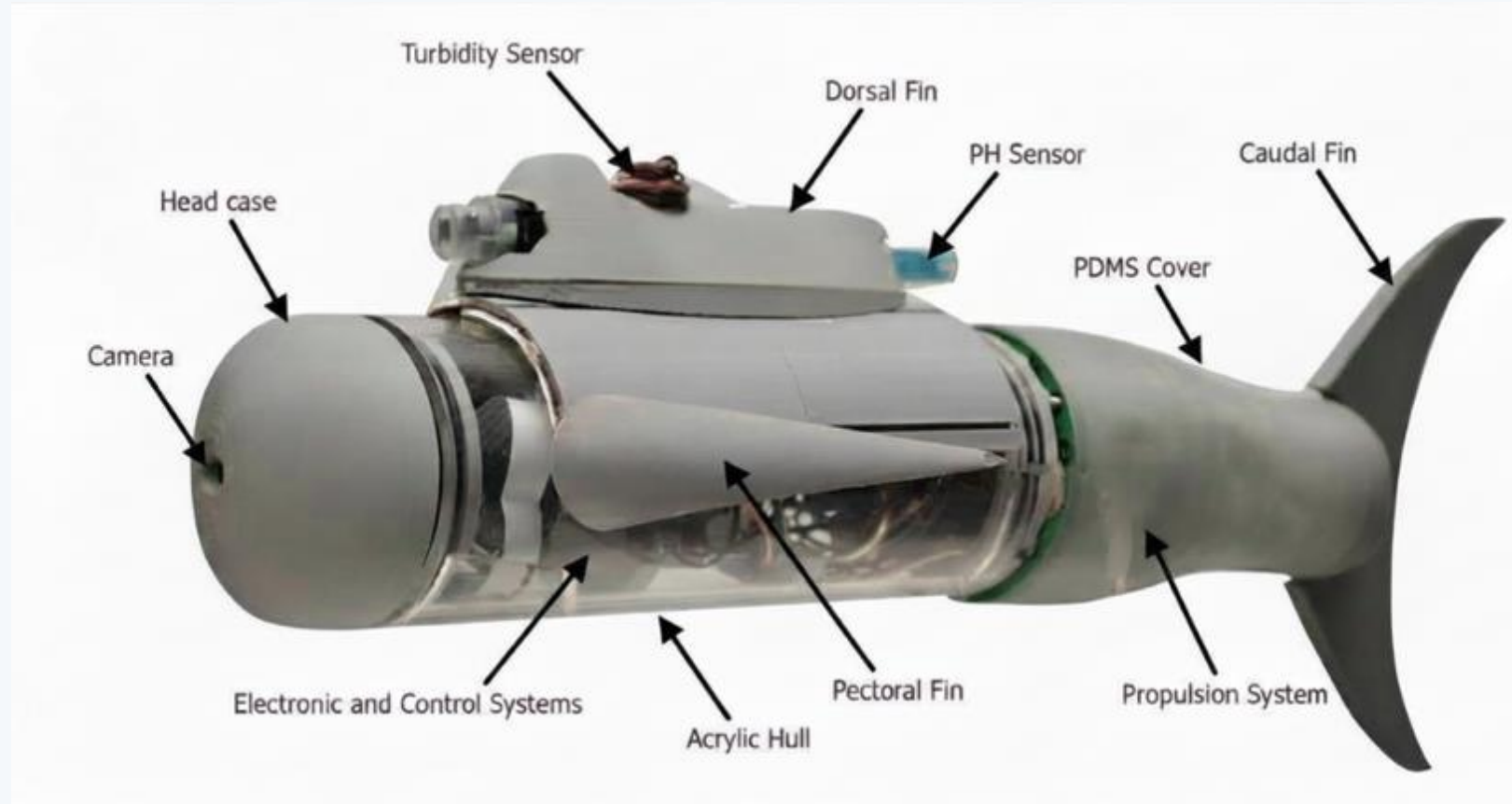
Prototipo físico del módulo



Concepto de integración al vehículo



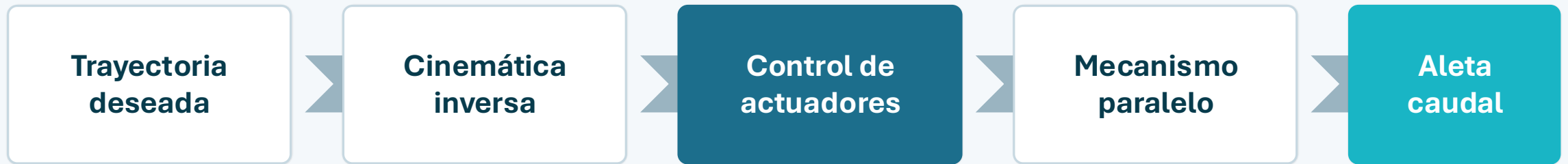
Integración al vehículo



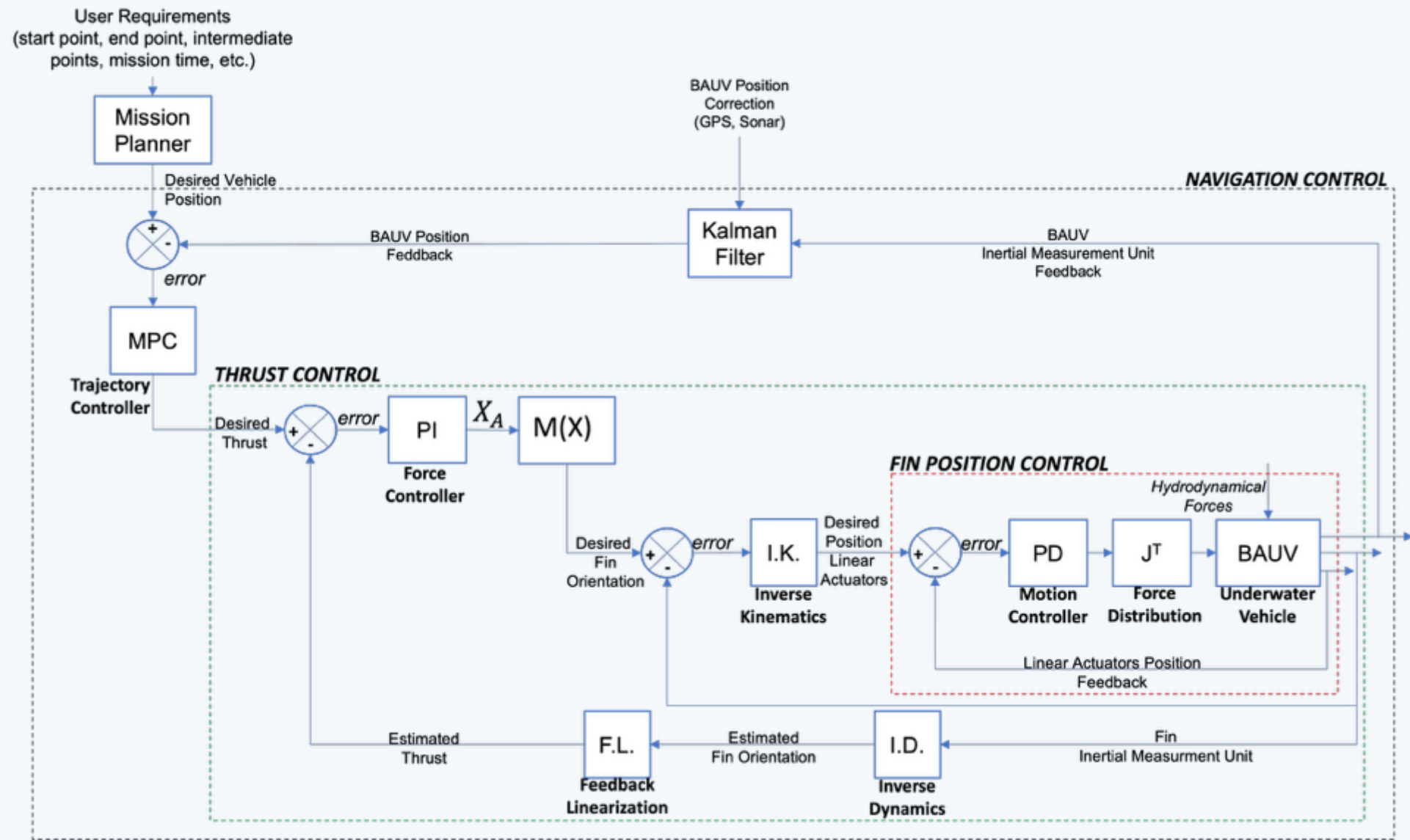
[Aparicio-García et al. (2020), "Design, Construction, and Modeling of a BAUV with Propulsion System based on a Parallel Mechanism for the Caudal Fin," Applied Sciences.]

Cómo se controla el movimiento

La lógica de control puede explicarse sin entrar en las ecuaciones.



El controlador convierte una orientación deseada de la aleta en desplazamientos coordinados de los actuadores y compensa perturbaciones dentro del modelo.

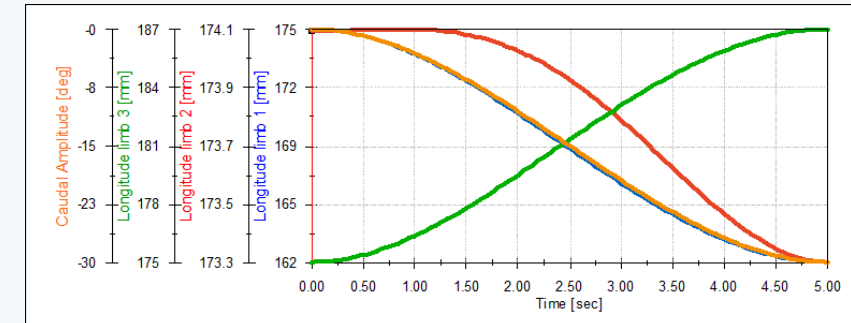
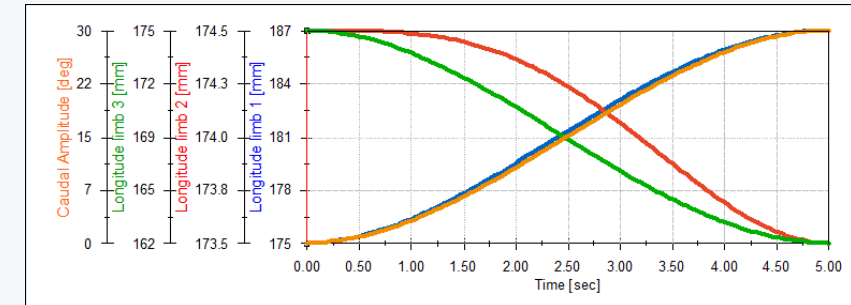
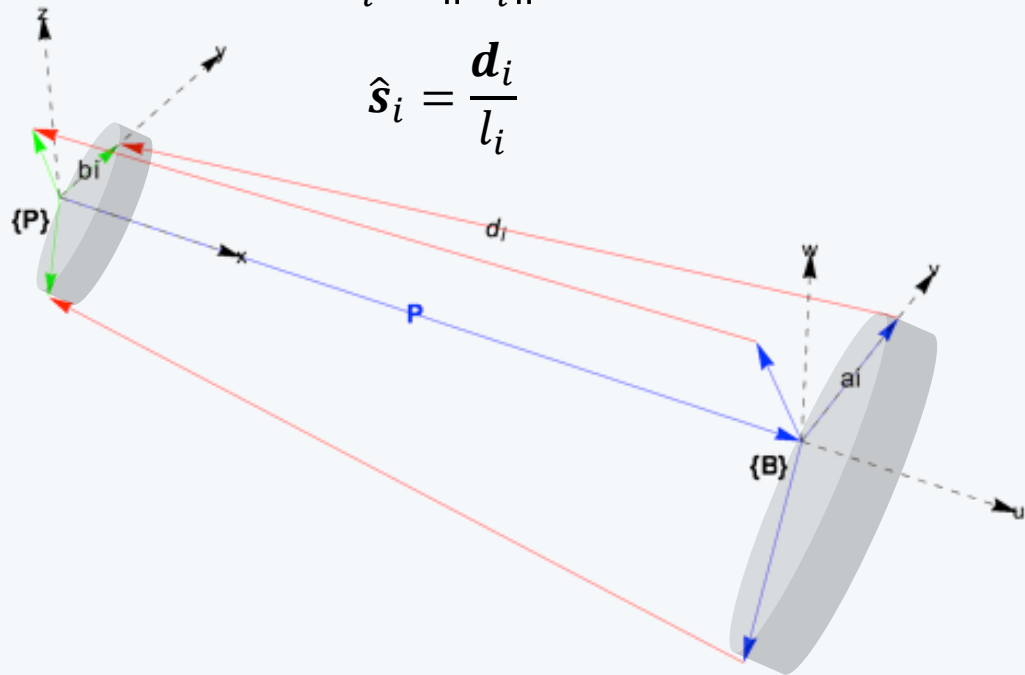


Cinemática inversa

$$\mathbf{d}_i = l_i \hat{\mathbf{s}}_i = \mathbf{P} + {}^A \mathbf{R}_B {}^B \mathbf{b}_i - \mathbf{a}_i$$

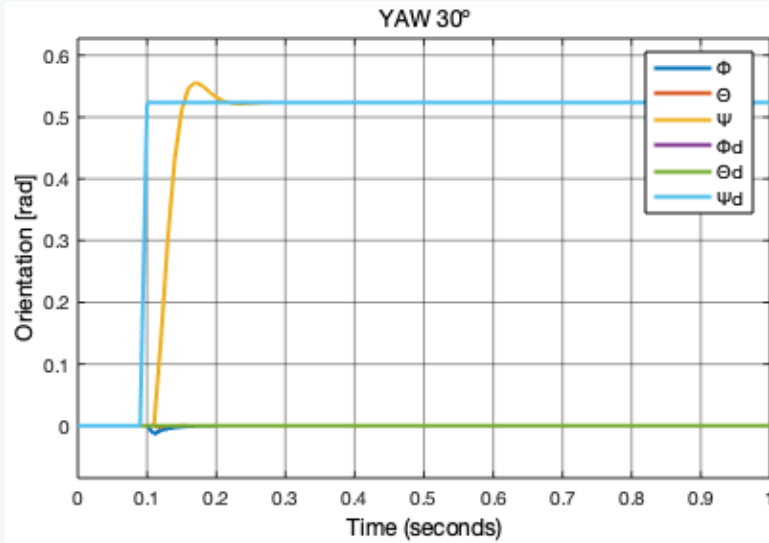
$$l_i = \|\mathbf{d}_i\|$$

$$\hat{\mathbf{s}}_i = \frac{\mathbf{d}_i}{l_i}$$

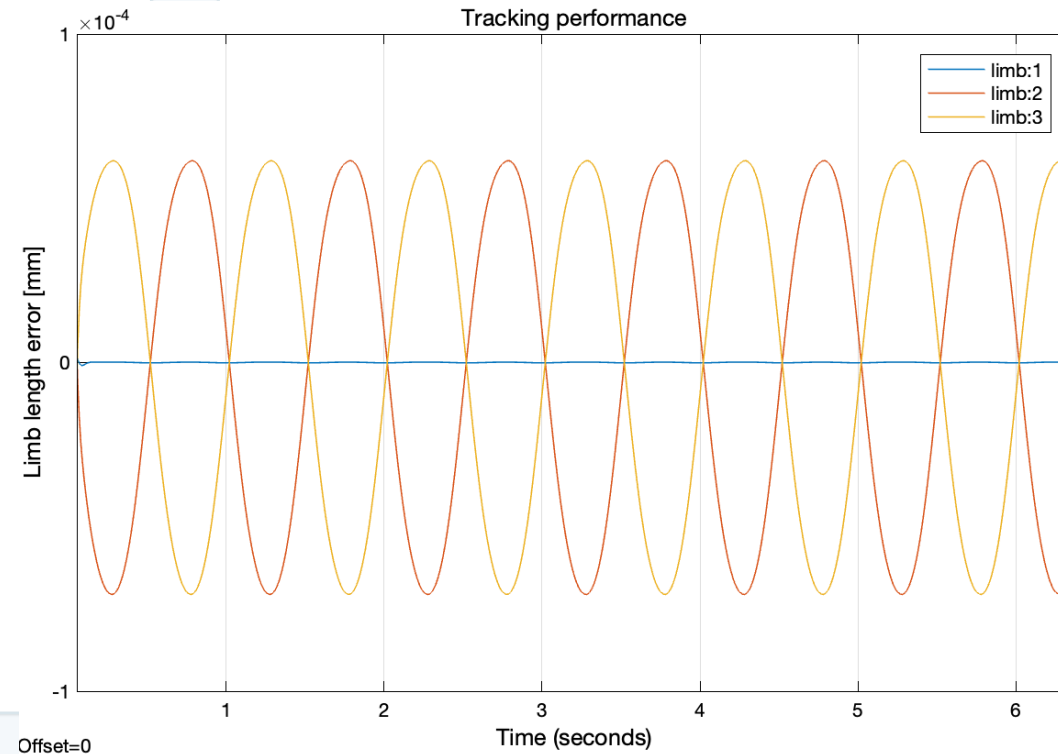


[Aparicio-García et al. (2020), "Design, Construction, and Modeling of a BAUV with Propulsion System based on a Parallel Mechanism for the Caudal Fin," Applied Sciences.]

Validación en simulación

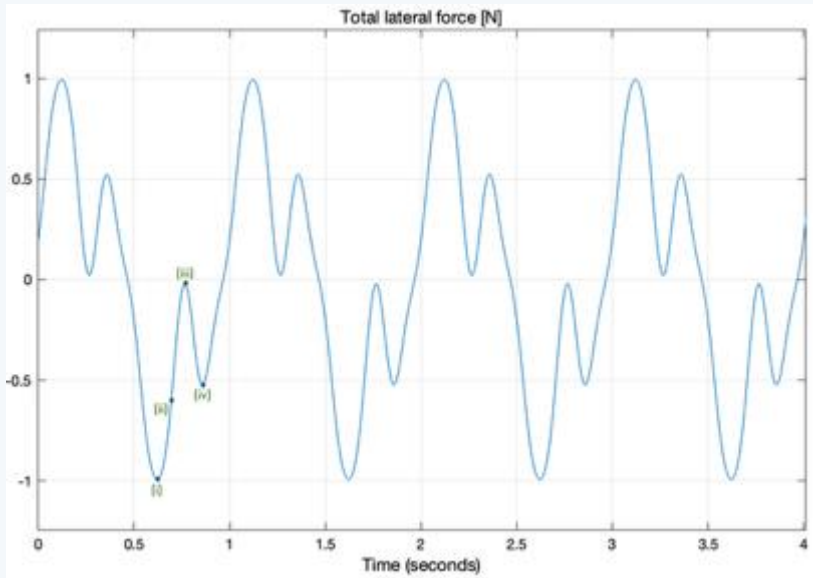


Aleteo: $\pm 30^\circ$ a 1 Hz

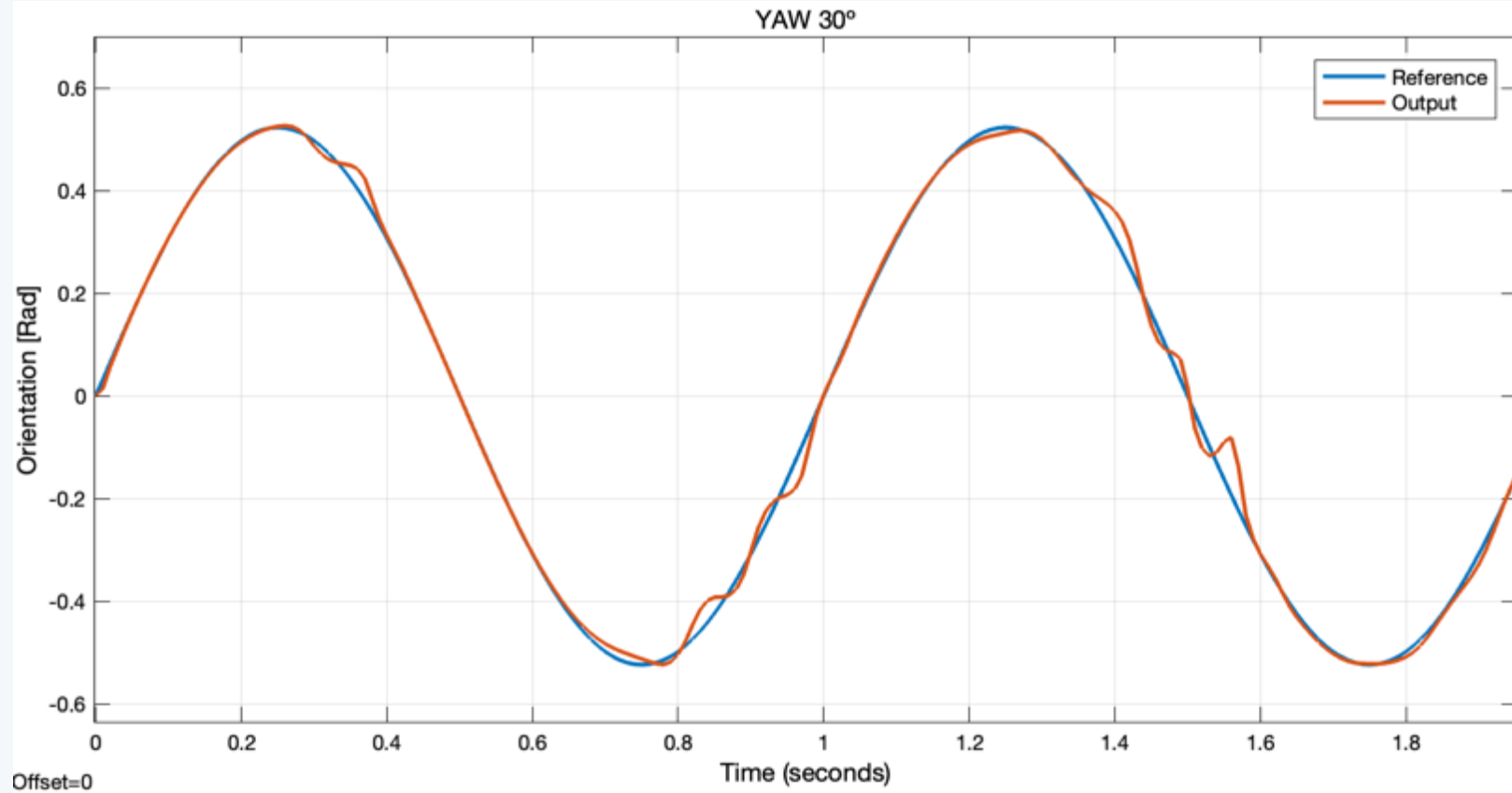


Fuerzas hidrodinámicas laterales

El sistema reproduce movimientos de aleteo y mantiene seguimiento ante perturbaciones modeladas.

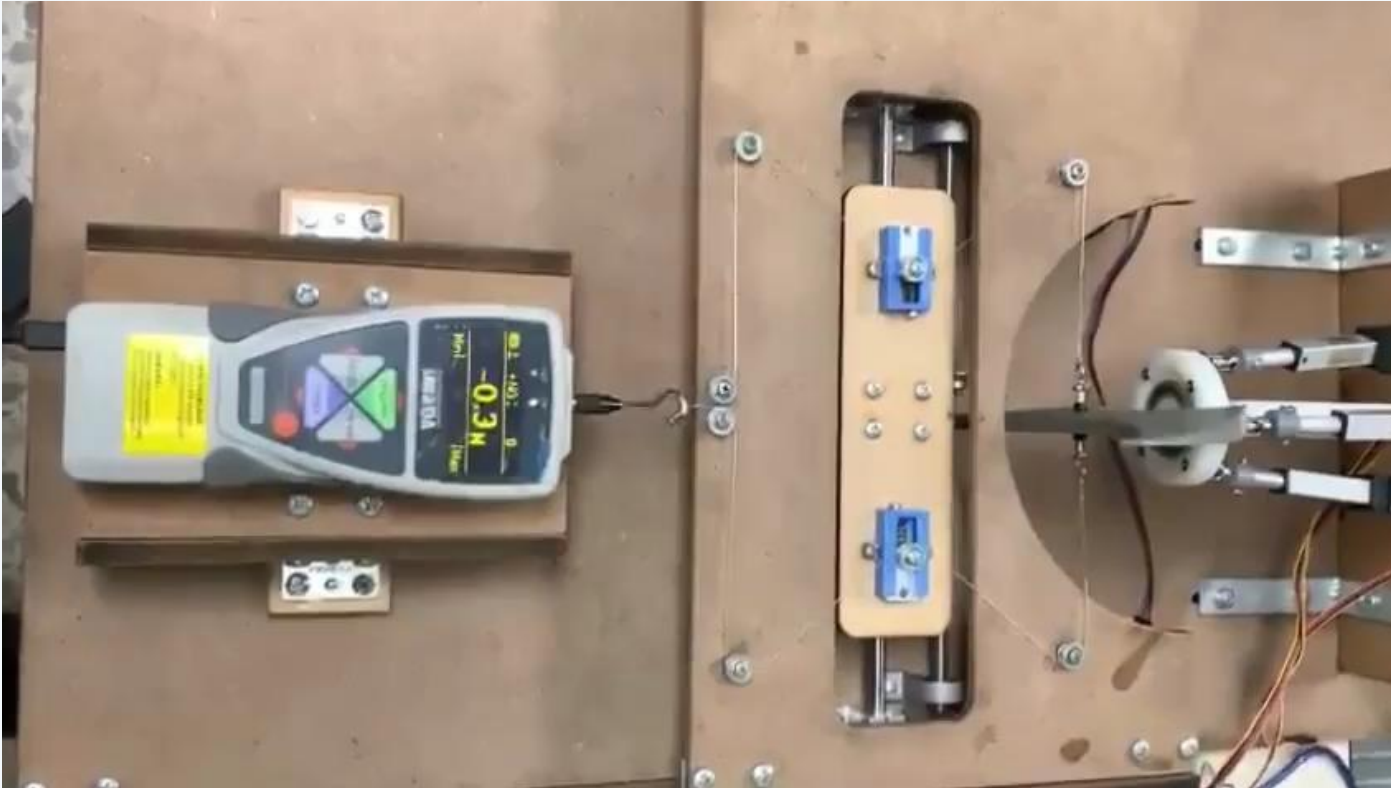


Se evaluó el seguimiento ante perturbaciones hidrodinámicas variables tomadas de un modelo publicado.



Validación experimental: pruebas en seco

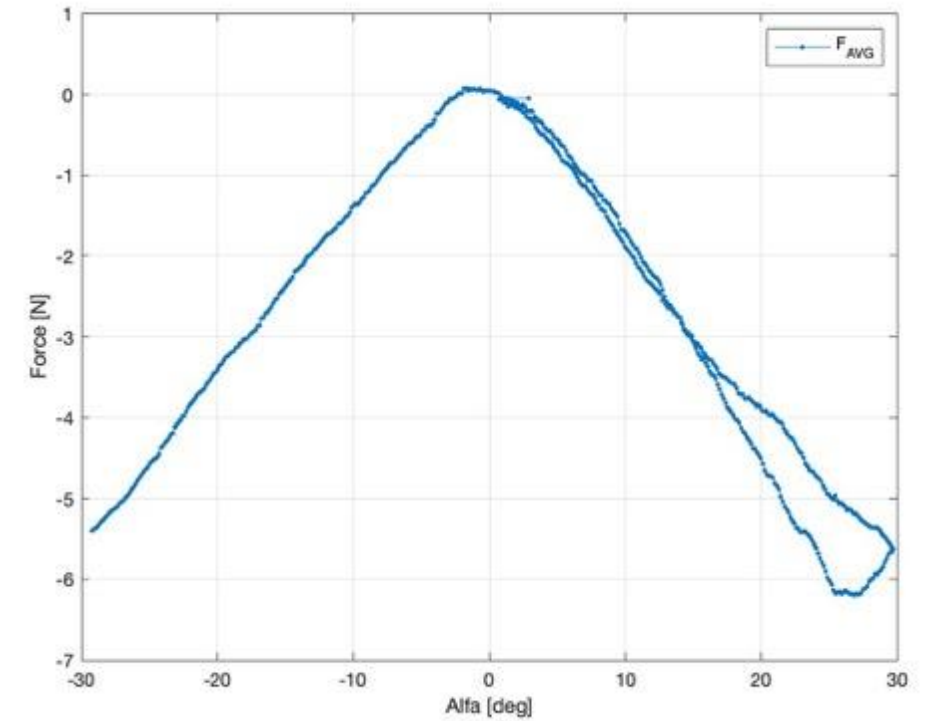
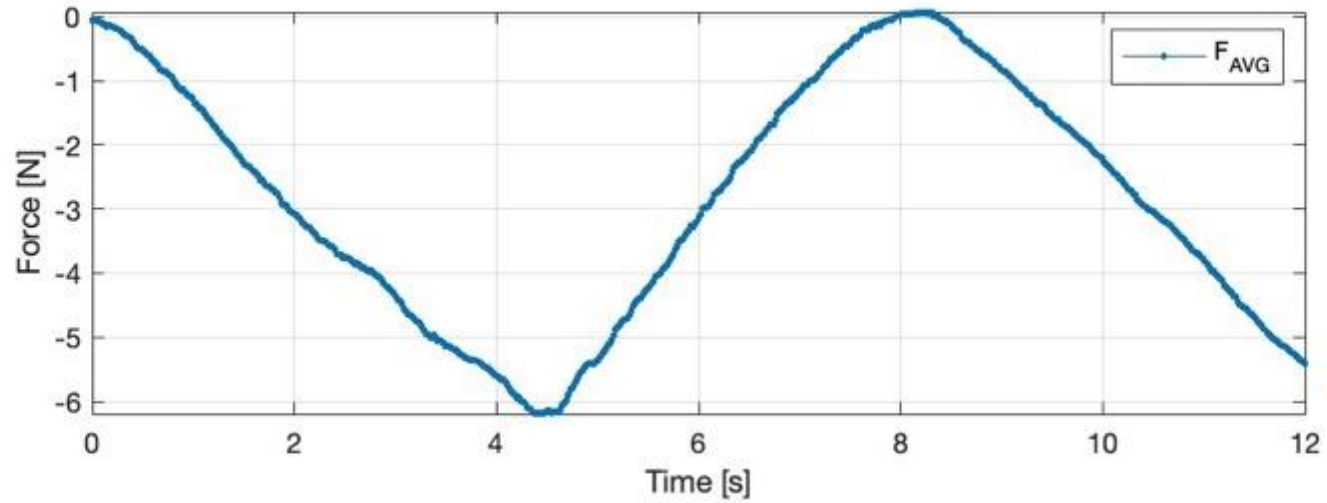
Se construyó un banco para medir la fuerza asociada al movimiento de aleteo.



¿Qué se valida?

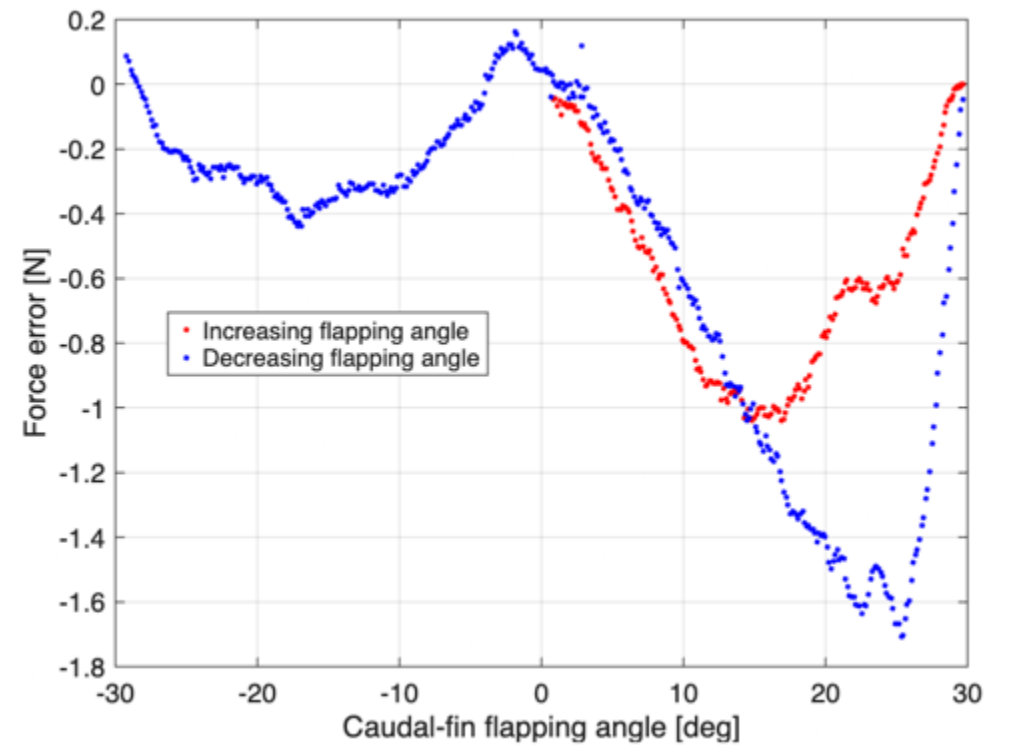
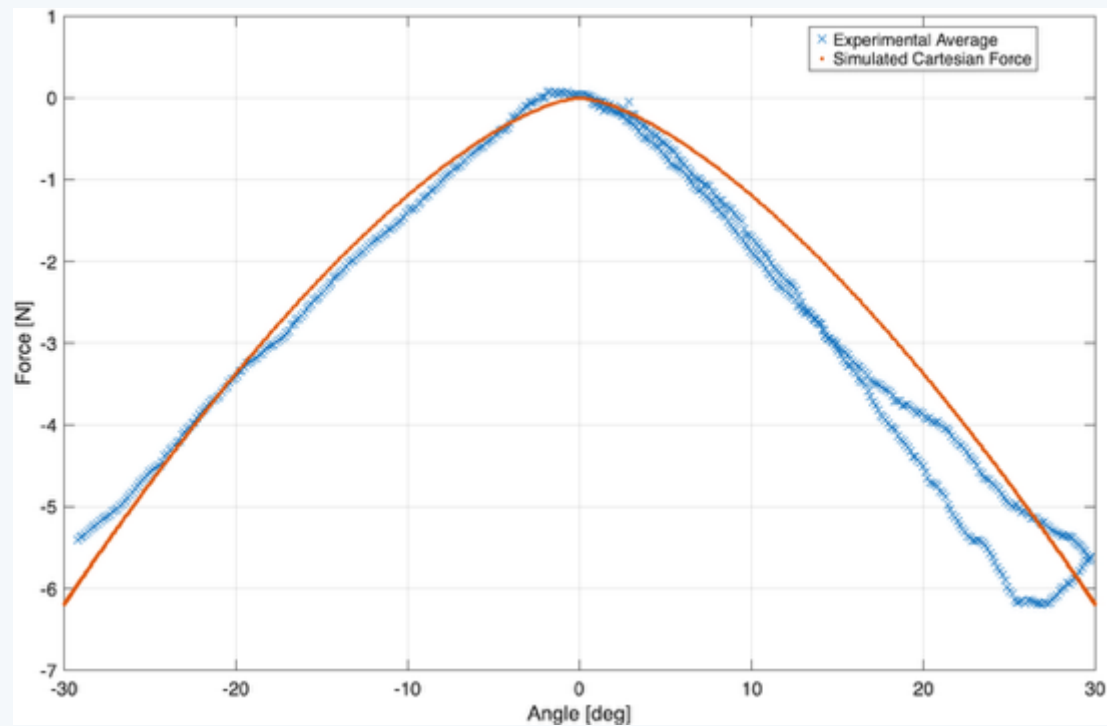
- Repetibilidad del movimiento.
- Respuesta de fuerza durante el barrido angular.
- Consistencia entre comportamiento simulado y medido.

Resultados experimentales



Resultados experimentales

La tendencia fuerza-ángulo medida reproduce el comportamiento esperado por el modelo.



¿Dónde podría ser útil una arquitectura así?

Aplicaciones potenciales.



Inspección

Cascos, muelles,
estructuras sumergidas e
infraestructura portuaria.



Monitoreo

Seguimiento ambiental,
levantamiento de
información y
observación prolongada.



Reconocimiento técnico

Exploración de zonas de
difícil acceso o con
requerimientos de
maniobra precisa.

Proyección de aplicaciones

HIDROGRAFÍA

- Levantamientos batimétricos
- Para labores en costas, aguas interiores y ríos

OCEANOGRAFÍA

- Estudio de habitats y especies marinas
- Estudios de calidad del agua y PH

VIGILANCIA Y RECONOCIMIENTO

- Apoyo a misiones de observación y monitoreo en zonas de difícil acceso.

BÚSQUEDA Y LOCALIZACIÓN

- Apoyo a la búsqueda de objetos o personas sumergidas.

DESARROLLO TECNOLÓGICO

- Aplicación de algoritmos de control

Qué falta para llevarlo al agua

La investigación resolvió el concepto mecánico y de control; la siguiente etapa es la validación submarina.

1

Sellado y confiabilidad

Protección de actuadores, juntas, sensores y conexiones.

2

Pruebas hidrodinámicas

Medir empuje real, fuerzas y comportamiento bajo agua.

3

Eficiencia energética

Relacionar consumo de actuadores con fuerza útil generada.

4

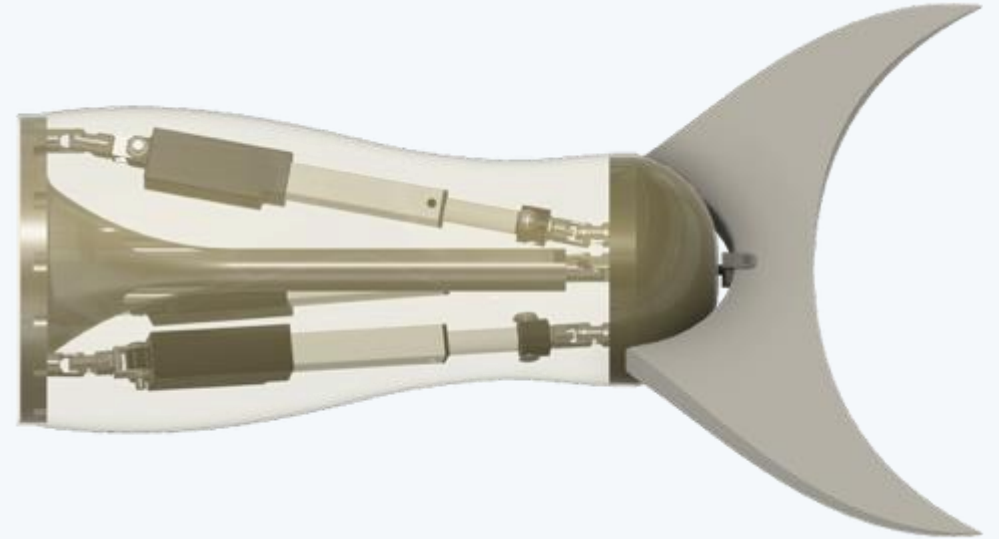
Integración al vehículo

Control de profundidad, actitud, trayectoria y maniobra.

5

Caracterización acústica

Evaluar la firma acústica del sistema.



Mensajes clave

Tres ideas para llevarse de esta propuesta.

1

Biomimética

La locomoción acuática ofrece principios útiles para diseñar nuevas formas de propulsión.

2

Mecanismos paralelos

Permiten orientar una aleta caudal en múltiples direcciones con una arquitectura compacta.

3

Validación progresiva

Modelo, simulación, prototipo y pruebas en seco muestran viabilidad; el siguiente reto es la validación hidrodinámica.

Bibliografía

1. Chang, x., Zhang , L., & He , X. (2012). Numerical study of the thunniform mode of fish swimming with different reynolds number and caudal fin shape . *computers & fluids* , 68, 54-70.
2. Sfakiotakis, m., Lane, D. M., & Davies, B. C. (1999). Review of fish swimming modes for aquatic locomotion. *IEEE journal of ocean engineering* , 24 (2), 237-252.
3. Shukla, a., & Karki, H. (2016). Application of robotics in offshore oil and gas industry— A review part II. *Robotics and autonomous systems* , 75, 508-524.
4. Leal merlo, s. A. (9 de december de 2014). Design, construction and control of the 3-UCU, 1-S parallel mechanism with spherical motion for forearm and wrist prosthetics. Monterrey, nuevo león, méxico: instituto tecnológico y de estudios superiores de monterrey - campus monterrey.
5. Leal Merlo, S.A., and Rodriguez Leal, E., 2016, “Parallel Mechanism with Multiple Legs with Spherical Motion”, Mexican Institute for Intellectual Property (IMPI), Mx/a/2016/015913.
6. R. K. Katzschmann, J. Delpreto, R. Maccurdy, and D. Rus, “exploration of underwater life with an acoustically controlled soft robotic fish,” *sci. Robot.*, Vol. 3, no. 16, 2018.
7. H. D. Taghirad, *Parallel Robots Mechanics and Control*, no. 13. 2013.
8. H. Chung, S. Cao, M. Philen, P. S. Beran, and K. G. Wang, “CFD-CSD coupled analysis of underwater propulsion using a biomimetic fin-and-joint system,” *Comput. Fluids*, vol. 172, pp. 54–66, 2018.
9. Aparicio-García et al. (2020), “Design, Construction, and Modeling of a BAUV with Propulsion System based on a Parallel Mechanism for the Caudal Fin,” *Applied Sciences*.

Gracias

Cristina Tehaní Aparicio García
cristina.aparicio@tec.mx

Bajo las olas yace un mundo oculto,
frágil pero hermoso,
que nos invita a explorar, proteger y
admirar sus misterios