



Diseño de planeadores submarinos (gliders) para el monitoreo oceánico

Simposio Conmemorativo del 25 Aniversario del ININDETEC

Dr. Tomás Salgado Jiménez
CIDESI



2026
año de
Margarita
Maza

15 de octubre de 2026

Contenido

- **CIDESI**
- **Antecedentes**
- **Principio de operación de un planeador submarino (glider)**
- **Retos en el diseño de gliders**
- **Principios en el diseño mecánico**
- **Control de gliders**
- **Arquitectura electrónica**
- **Interfaz (Usuario - Glider)**
- **Equipo de trabajo**
- **Conclusiones y perspectivas**

Sede **Nuevo León**

- Proyectos de Innovación.
- Servicios de metrología.
- Manufactura e Industria 4.0



Sede **Querétaro**

- Caracterización de materiales
- Tecnologías emergentes
- Servicios de metrología
- Ingeniería especializada
- Electrónica y semiconductores
- -Robótica Submarina.
- Investigación y posgrado
- Manufactura



Sede **CENTA** (Centro Nacional de Tecnologías Aeronáuticas)



Sede **Edo. Mex.**

- Manufactura
- Industria 4.0



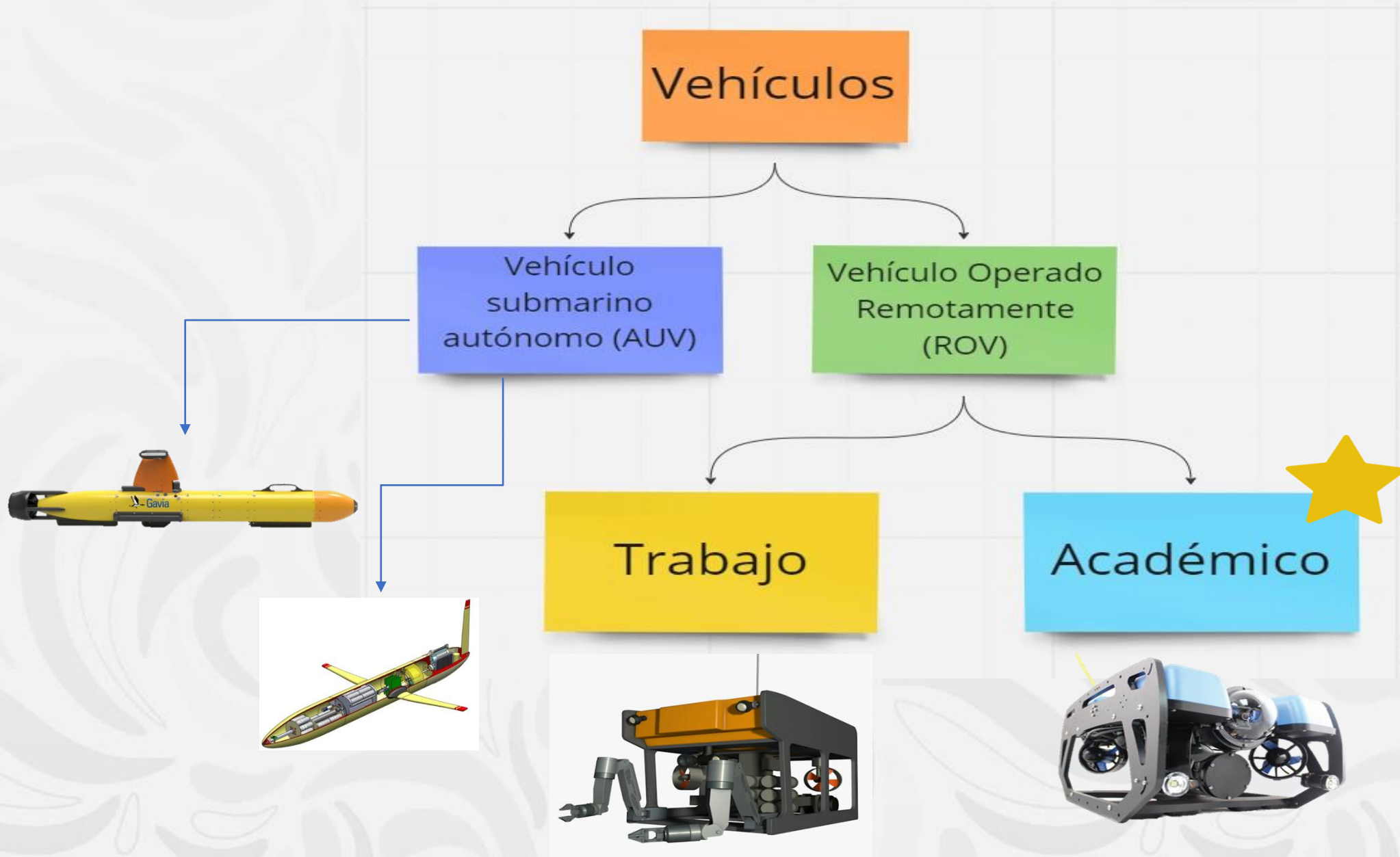
Sede **Campeche**

- Petróleo y Gas
- Servicios de metrología.

Somos uno de los 25 centros de Investigación de la SECIHTI.

Visítanos en:
<https://cidesi.com/>

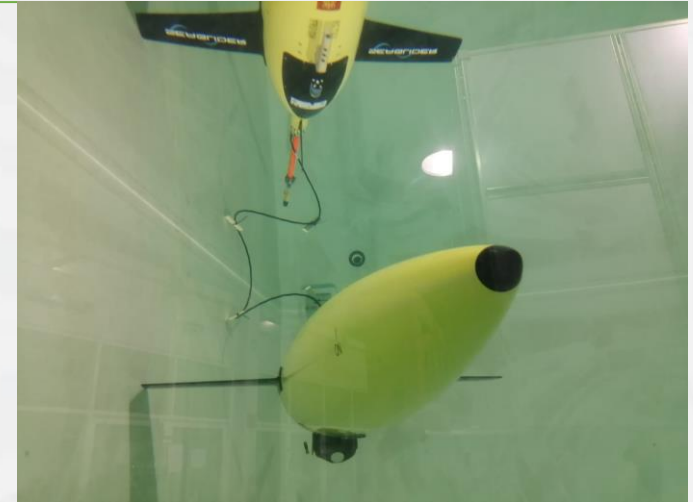
Antecedentes



Antecedentes

Monitoreo con gliders en México:

- Monitoreo en el Golfo de México:
 - Proyecto CIGoM – CICESE
 - Durante 7 años CIDESI realizó mantenimiento a las 7 gliders comerciales del proyecto.
 - Usuario PEMEX
- Monitoreo en el Océano Pacífico:
 - Monitoreo de variables oceanográficas con boyas y gliders submarinos.
 - Mejorar la predicción de huracanes.
 - Participantes: ININDETEC y CICESE.
 - **La tecnología de gliders sigue siendo útil para México.**



Fuente: laboratorio de CIDESI.

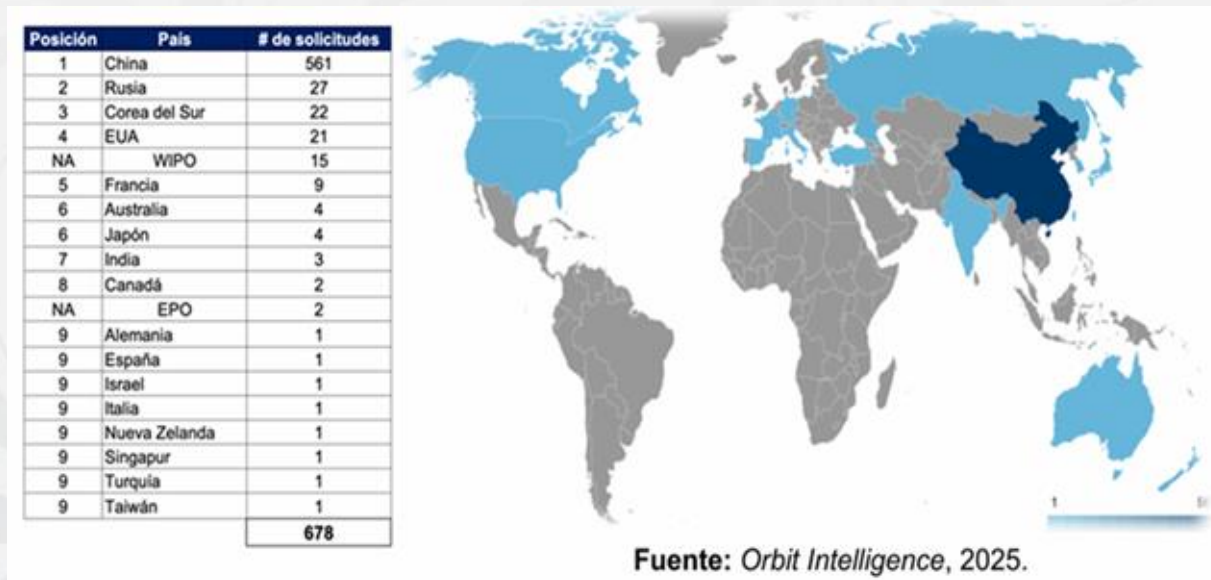


Fuente: IA del huracán Otis

Antecedentes

Benchmarking y estudio de patentes:

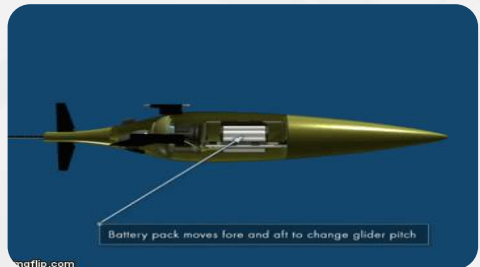
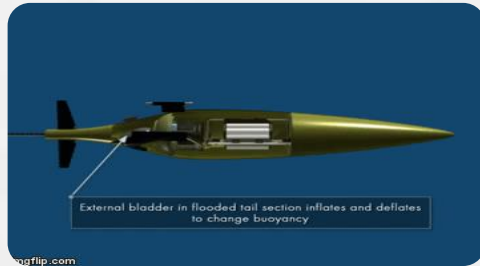
- Algunos resultados obtenidos fueron:
 - La tecnología de gliders sigue en desarrollo.
 - China presenta una gran cantidad de patentes y desarrollos científicos en el tema.



Principio de Operación de un glider

Ciclo de operación:

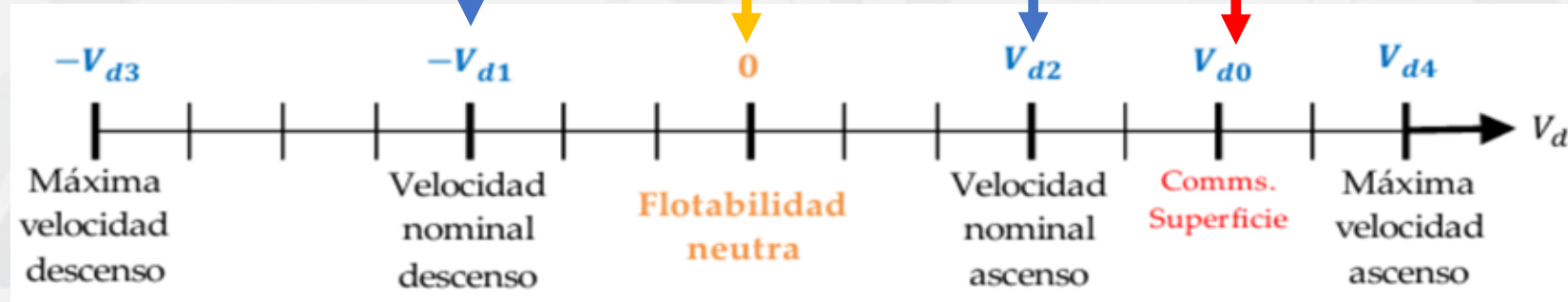
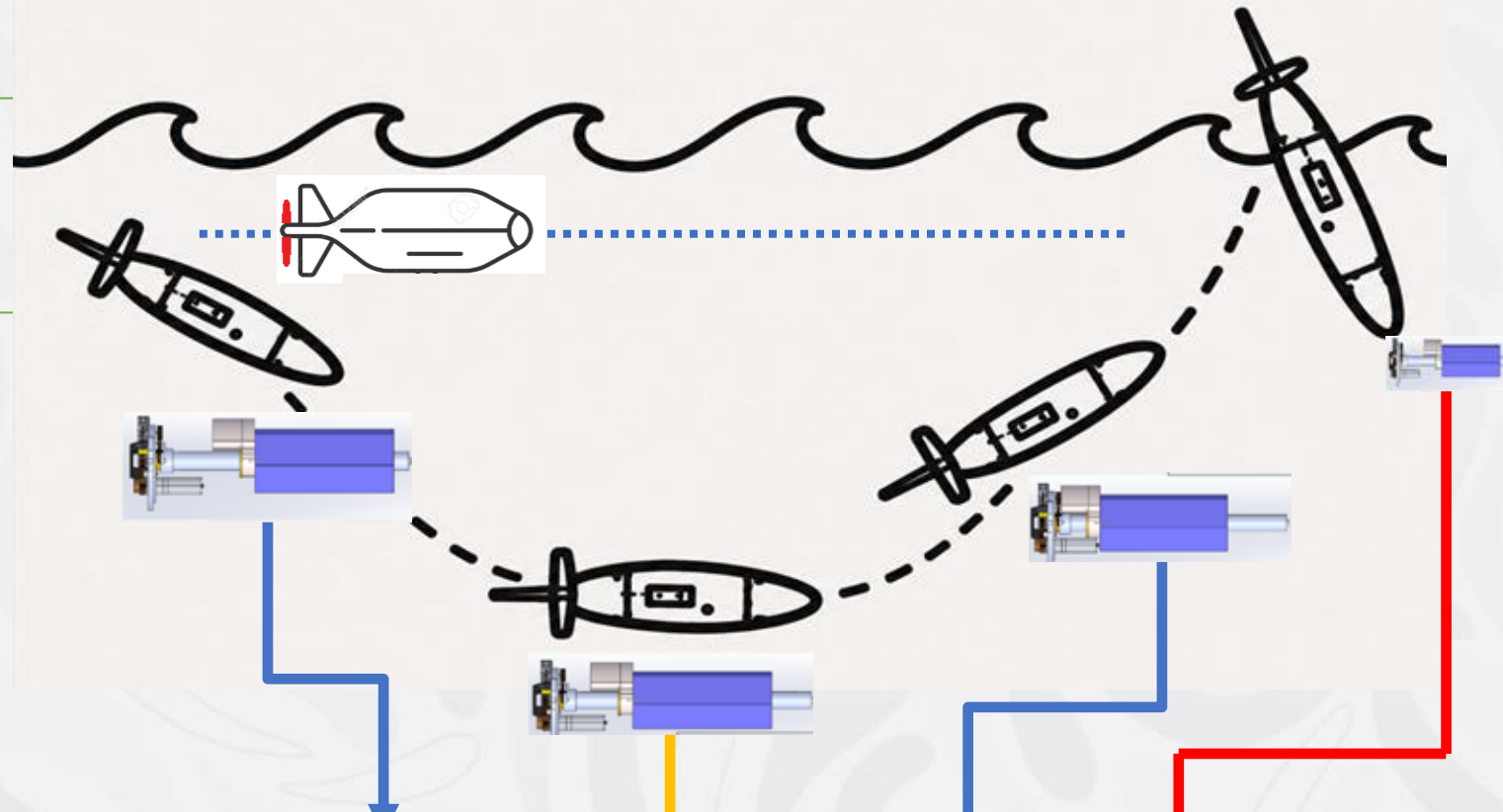
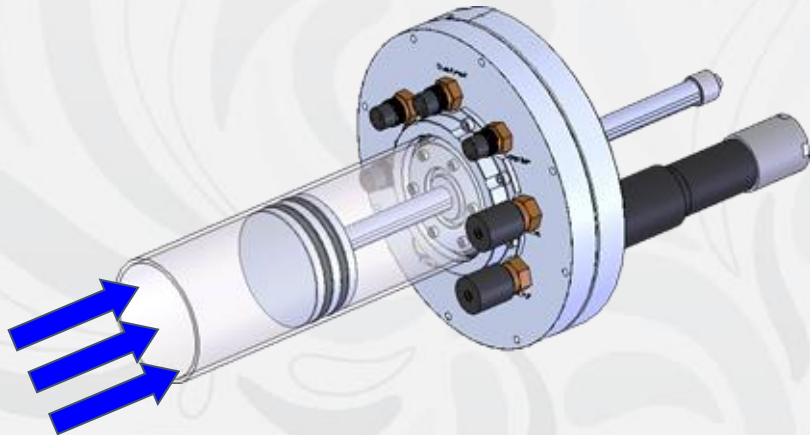
- Normalmente No cuenta con propulsores.
- Las alas, el timón y las masas excéntricas le ayudan a planear y direccionarse en el agua.
- Bajo el agua son autónomos.
- En la superficie contactan vía satélite con un piloto: el desempeño, las alarmas y la trayectoria.
- Desventajas: velocidad promedio de 0.25 a 0.50 m/seg.



Principio de Operación de un glider

Ciclo de operación:

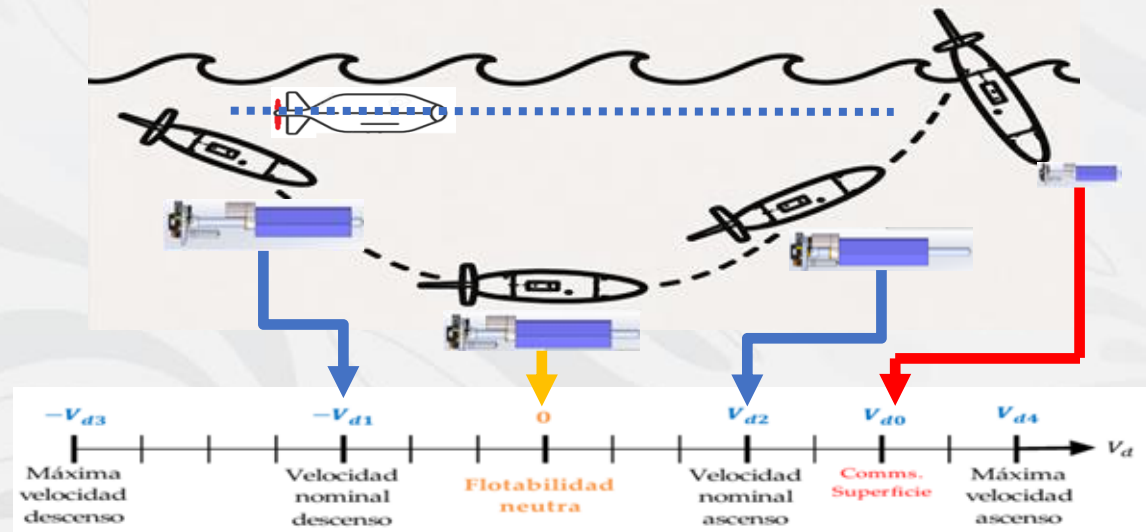
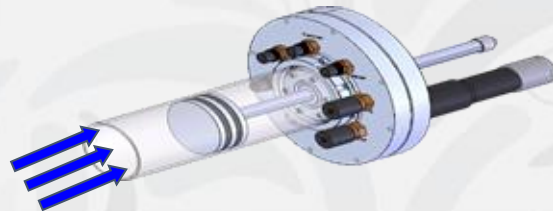
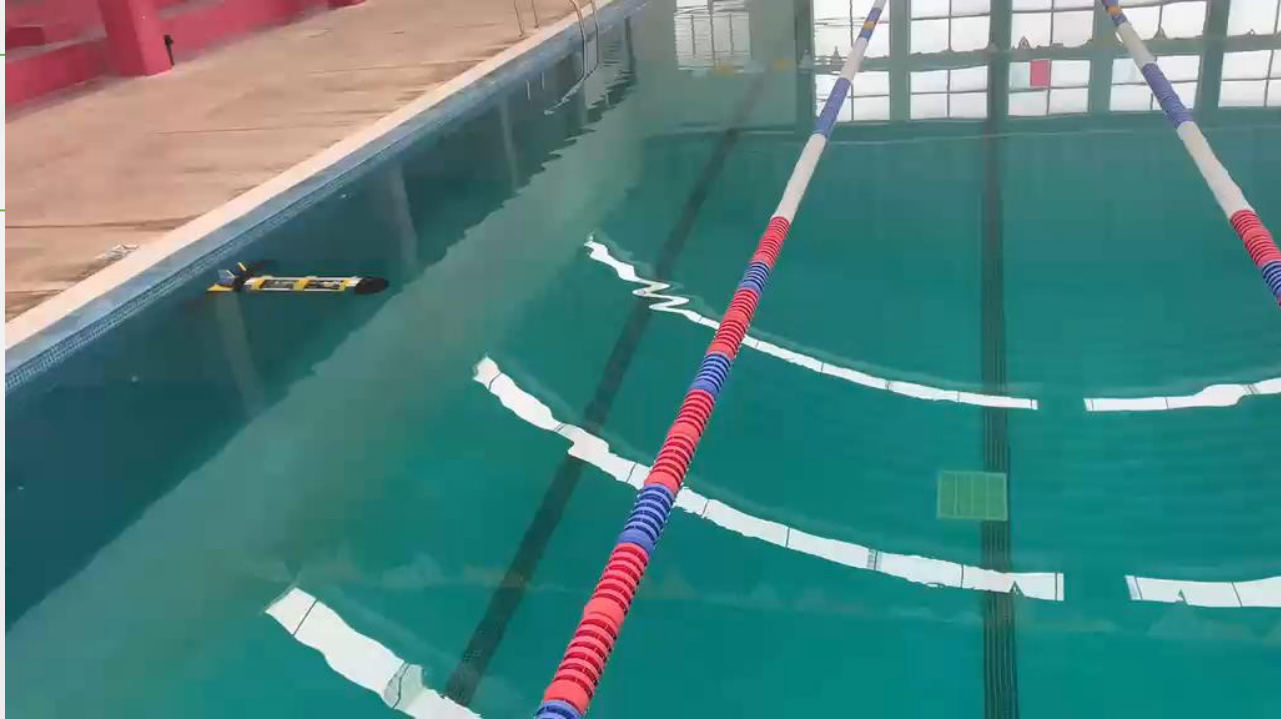
- Masa del ángulo Pitch
- Sistema de flotación VBS



Principio de Operación de un glider

Ciclo de operación:

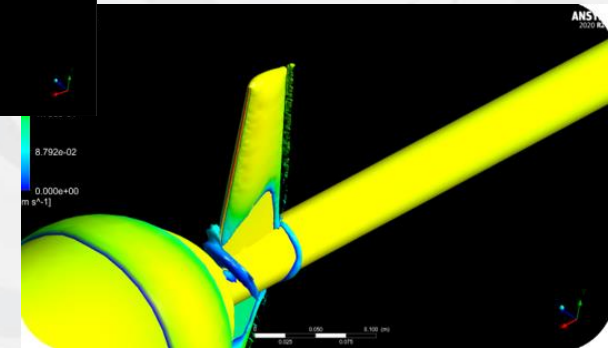
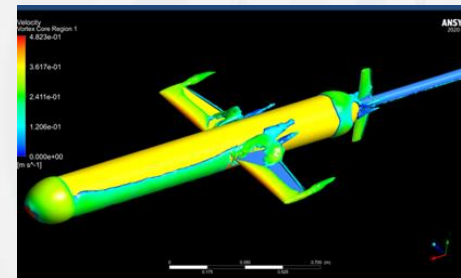
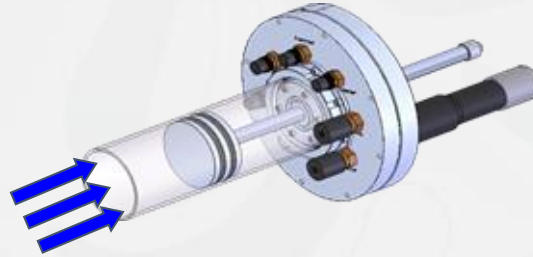
- Video:



Retos en el diseño de gliders

Retos del Diseño de un glider:

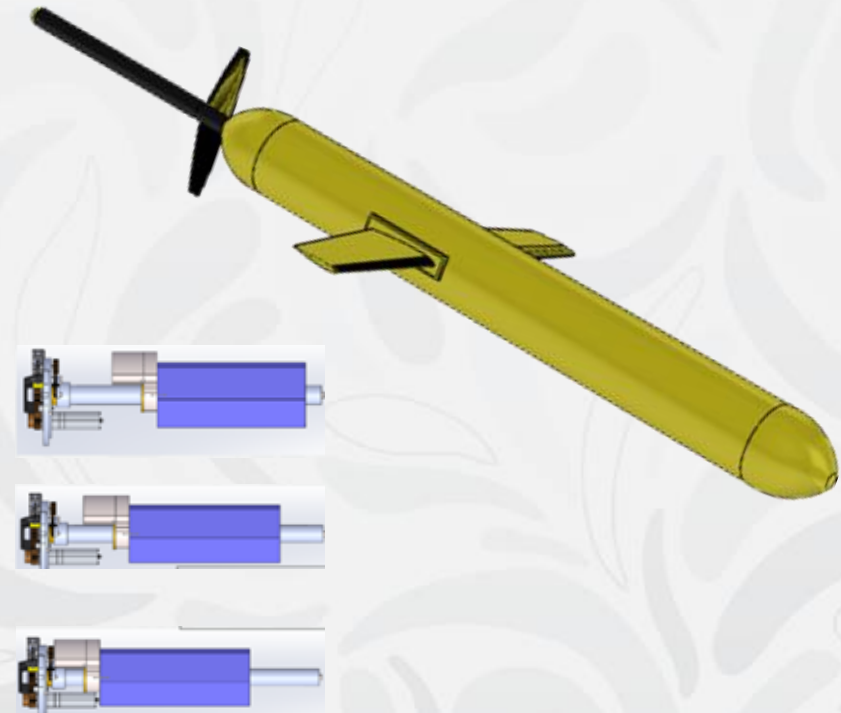
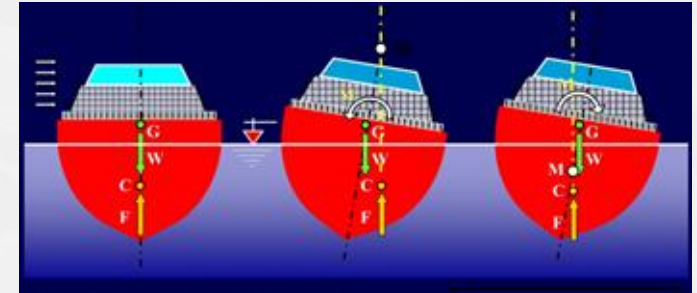
- Flotación vs Pesos:
 - El sistema de flotación es de 1,000 ml. En 500 ml tiene flotabilidad neutra. +/-300 ml el sistema baja o sube.
- Lo que implica que Flotación $\approx$ Peso: se debe cuidar el tema de volumen desplazados y el peso.
- Hidrodinámica del vehículo:
 - Posición de las alas: sustentación, ángulo de planea y momento en pitch.
 - Timón (fijo): en combinación con las alas nos dan la dinámica del giro.



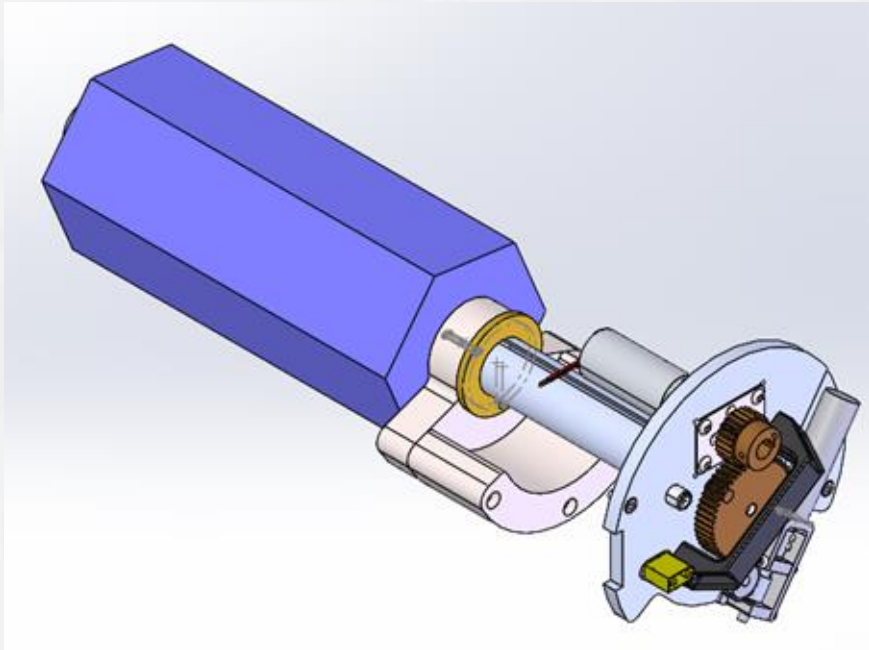
Retos en el diseño de gliders

Retos del Diseño de un glider:

- Centro de masa y Centro de Flotabilidad:
 - La distancia: centro de masa y centro de flotación deberán ser mayor a 0 pero < 1 cm en eje z
 - Con esto es posible cambiar el Pitch y el Roll con la masas móviles, mantenimiento estabilidad pasiva.
 - Balanceo en x: se deberá tener un equilibrio en el eje x: con un **movimiento de 2 cm** se deberá alcanzar el ángulo de descenso deseado.



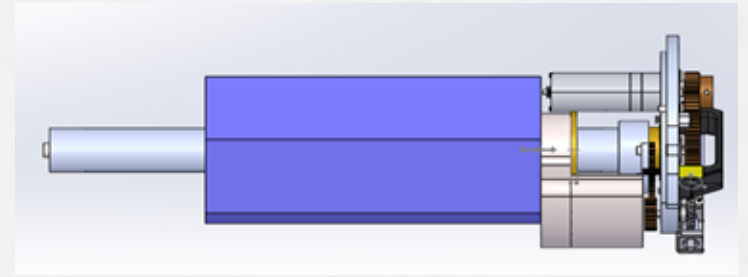
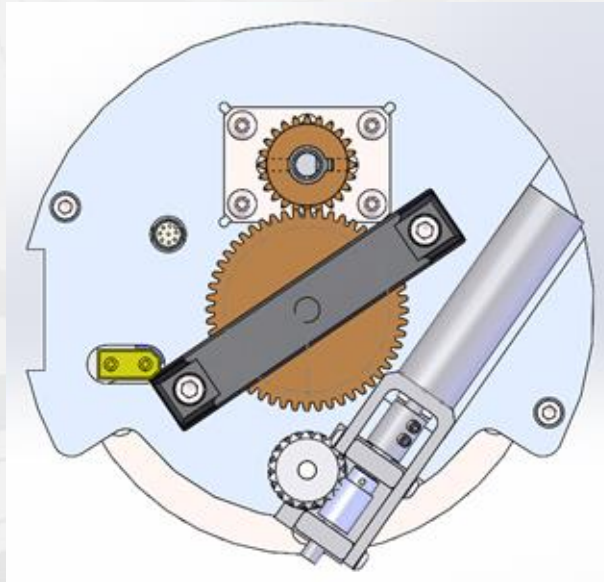
Principios en el diseño mecánico



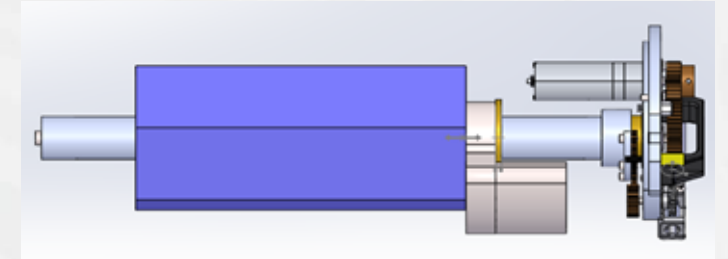
Actualización a Septiembre, para dar espacio a una batería de mayor capacidad y así mayor autonomía del Glider

Sistema Pitch

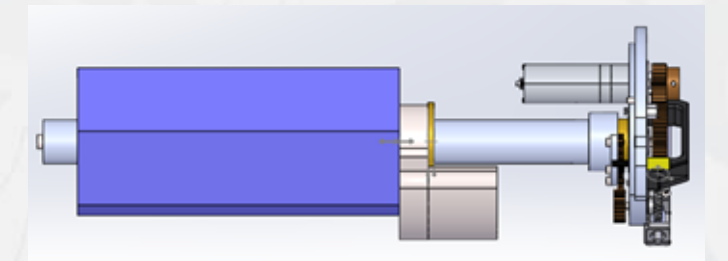
- Motor
- Reductor
- Carrera del Pitch: 100 mm de 0 a 100 mm en: 15 seg
- Peso 9.6kg (Batería + Lastre)



Posición 0

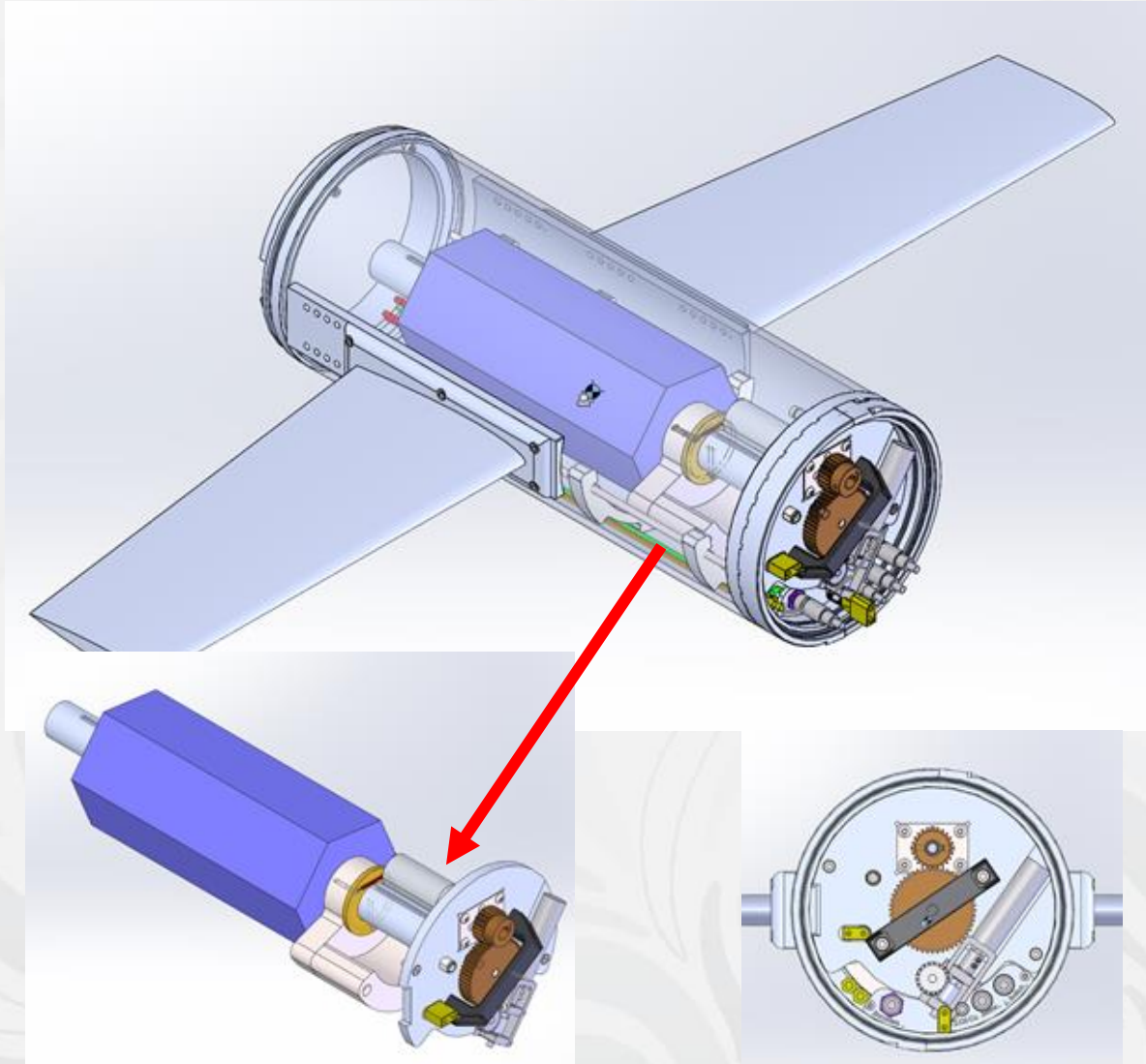


Posición 50 mm



Posición 100 mm

Principios en el diseño mecánico



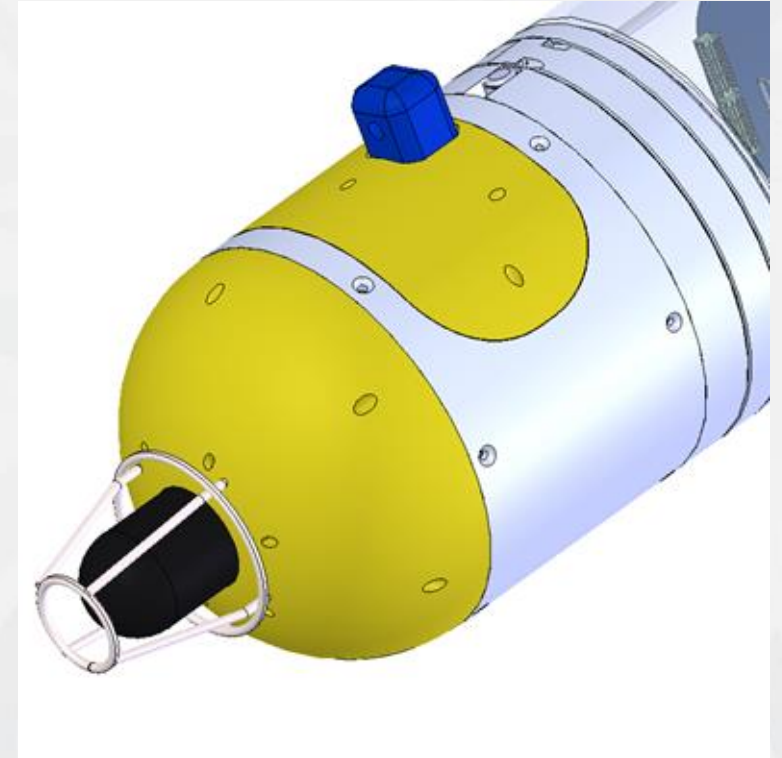
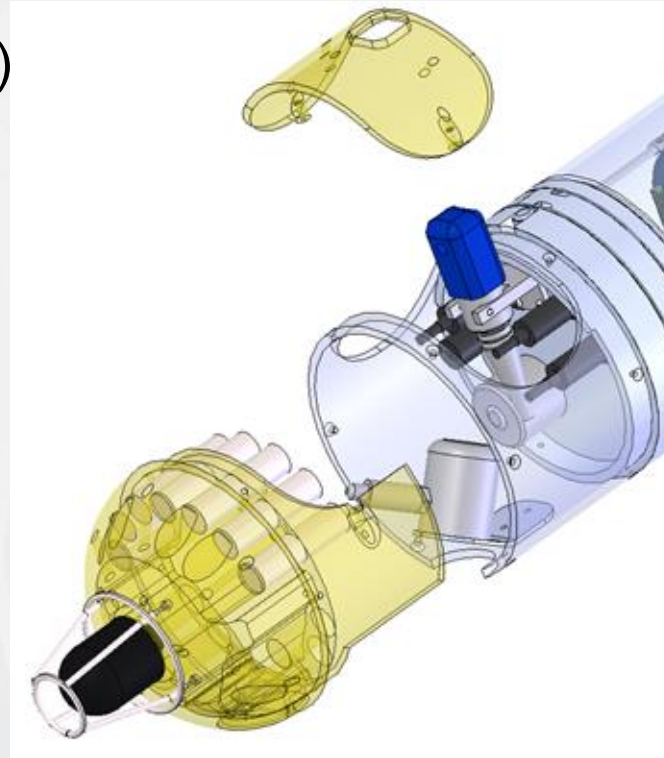
Sistema Roll

- Motor
- Reductor
- Carrera del Roll de 0° a 180° en: 10 seg
- Peso : 4 kg

Principios en el diseño mecánico

Avances:

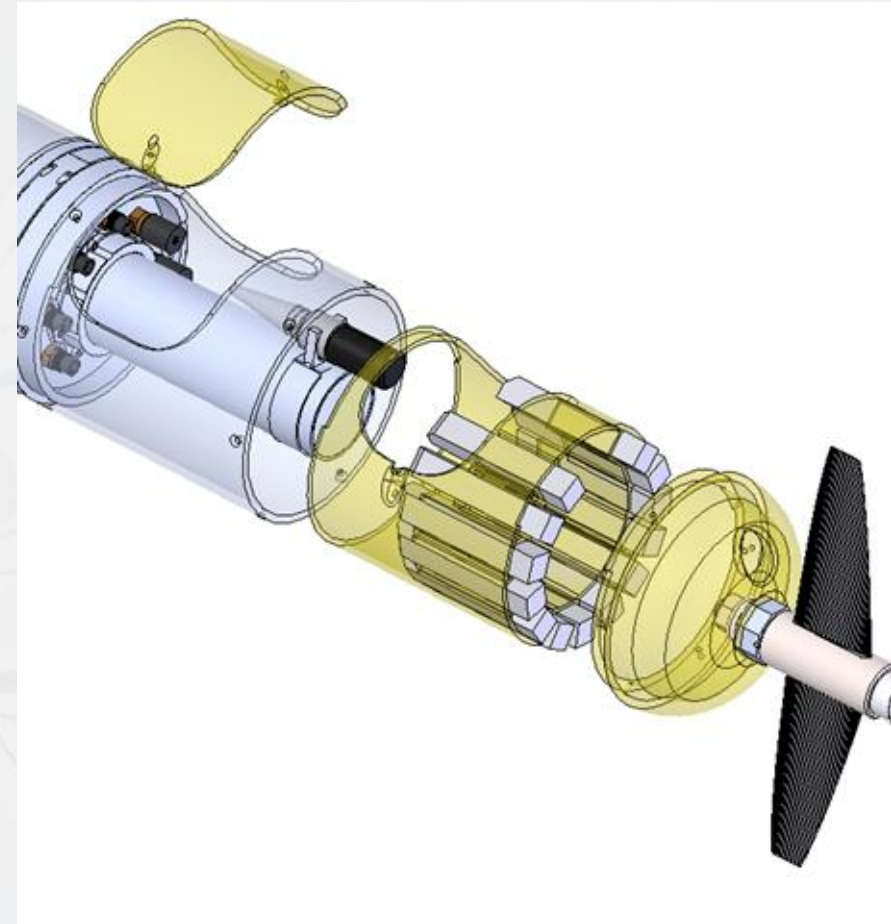
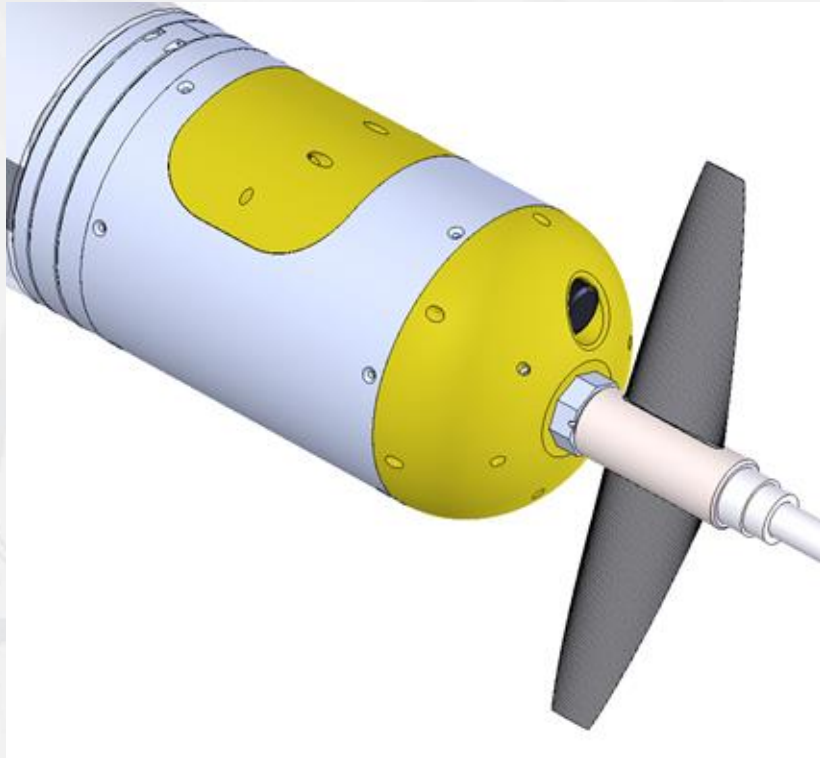
- Fairing Frontal (fuselado)
- Contrapesos de acero inoxidable para calibración fina del centro de masa
- Tapa frontal y superior para fácil acceso a zona inundable
- Construcción en Aluminio y PETG
- Soporte para hidrófono
- Soporte para altímetro con flexibilidad para variar el ángulo de ensamble



Principios en el diseño mecánico

Avances:

- Fairing Trasero
- Espuma de baja densidad para calibración fina del centro de flotabilidad
- Tapa frontal y superior para fácil acceso a zona inundable
- Construcción en Aluminio y PETG
- Soporte para Antenas y timón
- Pruebas de impresión 3D



Principios en el diseño mecánico

Avances Recientes:

- Pruebas de Inmersión del material para el Fairing
- Se debe cuidar que no absorba agua.



Tiempo de la Prueba de inmersión	
20 de mayo 2026	Hora de inicio: 14:17 horas
21 de mayo 2026	Hora de fin: 13:48 horas



PETG	ASA	PA-CF	PA-GF	PVDF
Balanza:				SARTORIUS
Modelo:				CC1200
Resolución:				0,0001 g = 0.1

Peso en seco:

	Patrón L1	Muestra L2	Muestra L3	Patrón L4
PETG	99.9984	93.4971	93.5005	99.9995
ASA	79.9993	74.5486	74.5494	79.9993
PA-CF	79.9991	69.0089	69.0125	79.999
PA-GF	39.999	37.8091	37.8109	39.9993
PVDF	49.9993	46.2529	46.2524	49.999

Peso en húmedo:

21 de mayo 2026 Hora de peso: 16:43 horas (2 horas con 55 min de escurrimiento)

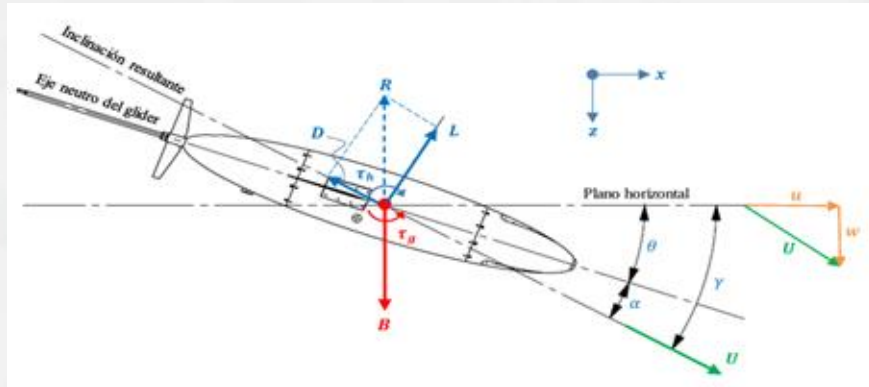
	Patrón L1	Muestra L2	Muestra L3	Patrón L4
PETG	100.0032	94.3535	94.3258	99.9976
ASA	80.0063	75.7102	75.6628	79.9994
PA-CF	79.9995	79.5441	79.481	79.9999
PA-GF	49.9992	44.27	44.229	50.001
PVDF	49.9987	46.7233	46.7091	49.9992

Diferencias

	Muestra L2	Muestra L3
PETG	0.8564	0.8253
ASA	1.1616	1.1134
PA-CF	10.5352	10.4685
PA-GF	6.4609	6.4181
PVDF	0.4704	0.4567

Principios en el diseño mecánico

- Ángulos de planeo



α	Ángulo de ataque del vehículo (respecto al ángulo de vuelo γ)
θ	Ángulo de inclinación del vehículo (<i>pitch</i>)
γ	Ángulo de vuelo o planeo (<i>glide angle</i>) $\gamma = \theta + \alpha$

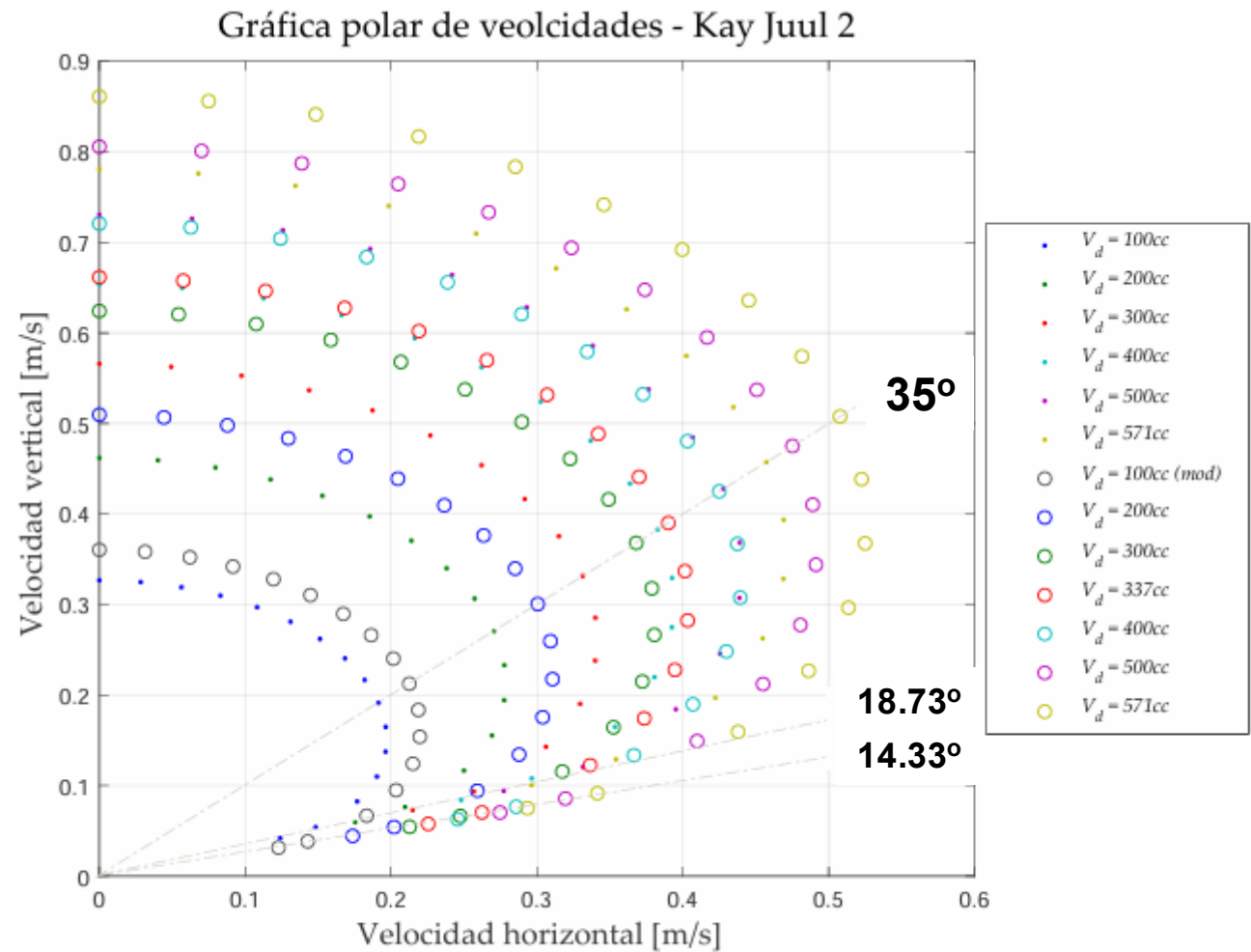


Figura 2.14. Gráfica polar de velocidades del glider Kay Juul 2

Control de gliders

Simulación y lazo abierto

$$M\dot{\nu}_r + C(\nu_r)\nu_r + D_{vec}(\nu_r, \alpha_r, \beta_r) + g(\eta) = \tau_e$$

$$\dot{\eta} = J(\eta)\nu$$

$$\nu = \nu_r + \nu_c$$

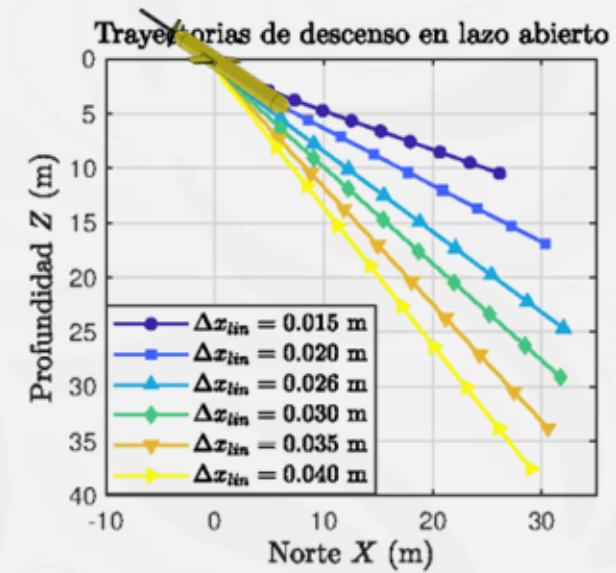


Figura 6.6: Trayectorias de descenso en lazo abierto para diversos valores de Δx_{lin} , con $\Delta B = -2.5N$ y $\gamma = 0$.

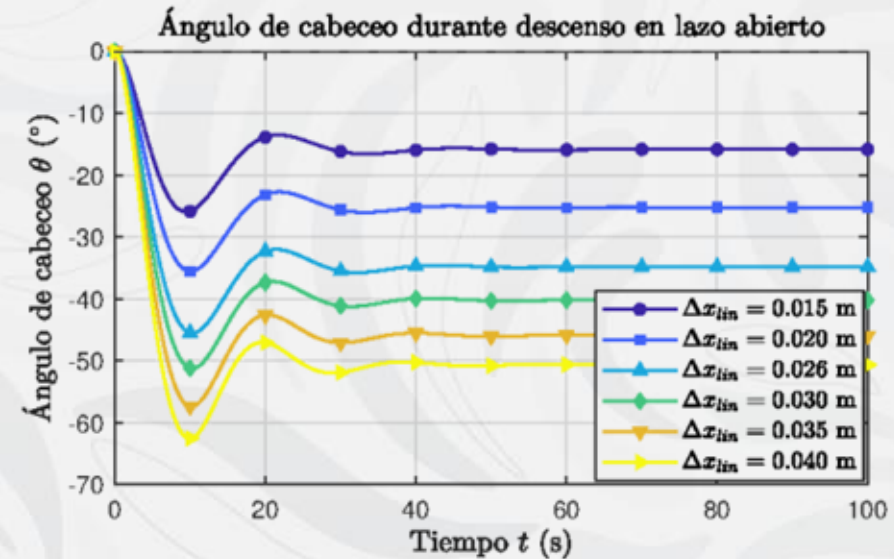


Figura 6.7: Ángulos de cabeceo asociados a las trayectorias de descenso de la Figura 6.6.

Control de gliders

Modelado Matemático - Marcos de Referencia

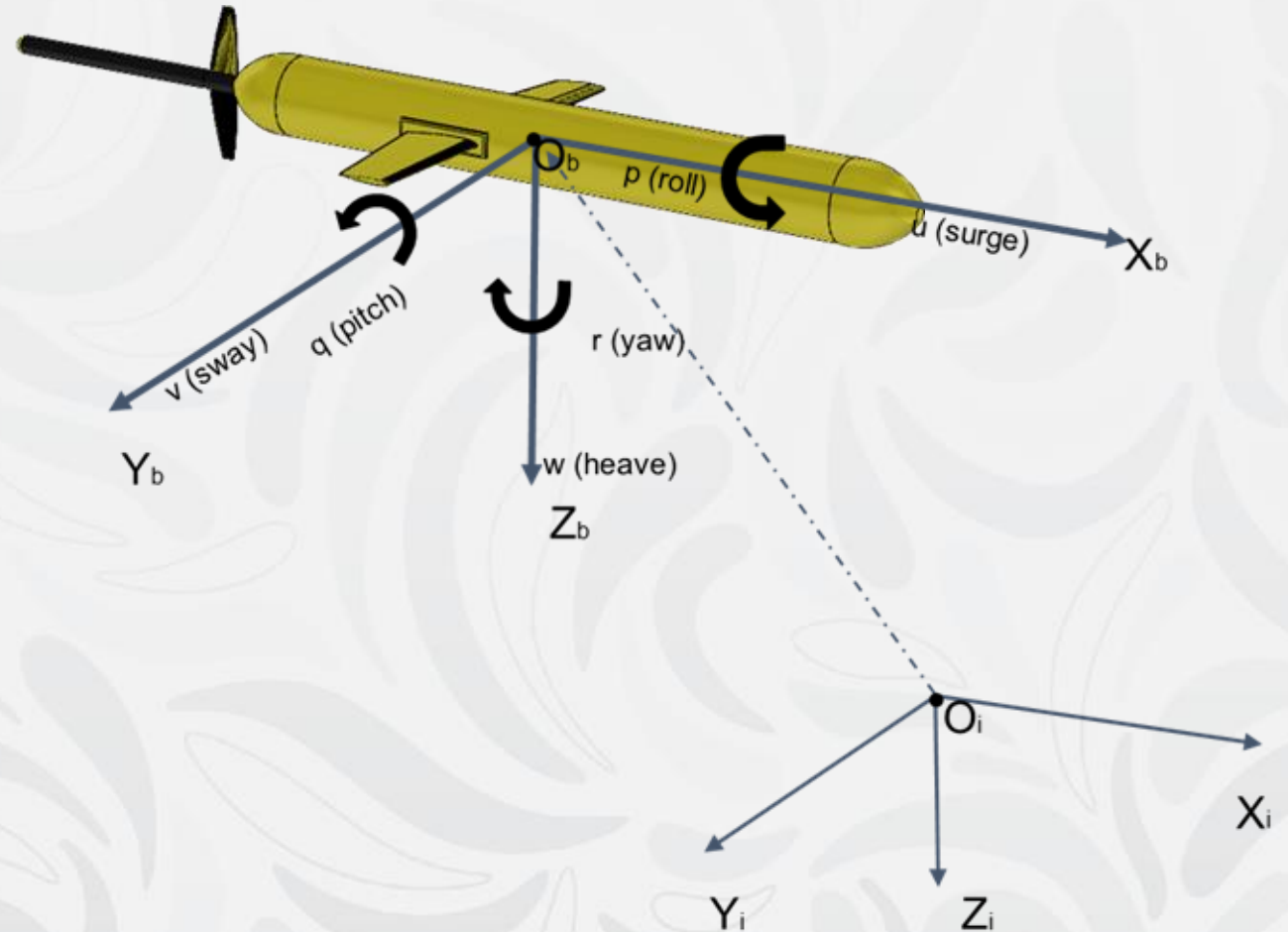
Contar con un Modelo dinámico del Planeador submarino en 6 grados de libertad, hace posible la implementación de un simulador numérico para la validación preliminar de las leyes de control propuesta:

- Marco fijo en el cuerpo $O_b: (X_b, Y_b, Z_b)$:

Marco con origen en el centro de flotabilidad del Glider, móvil en relación al marco inercial.

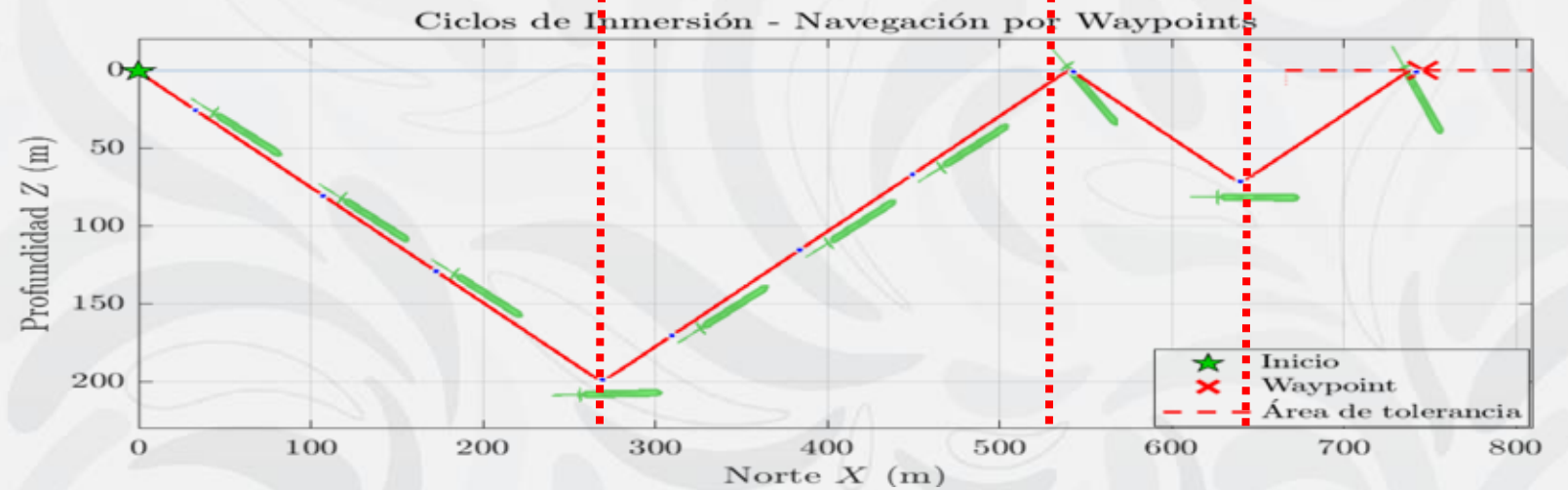
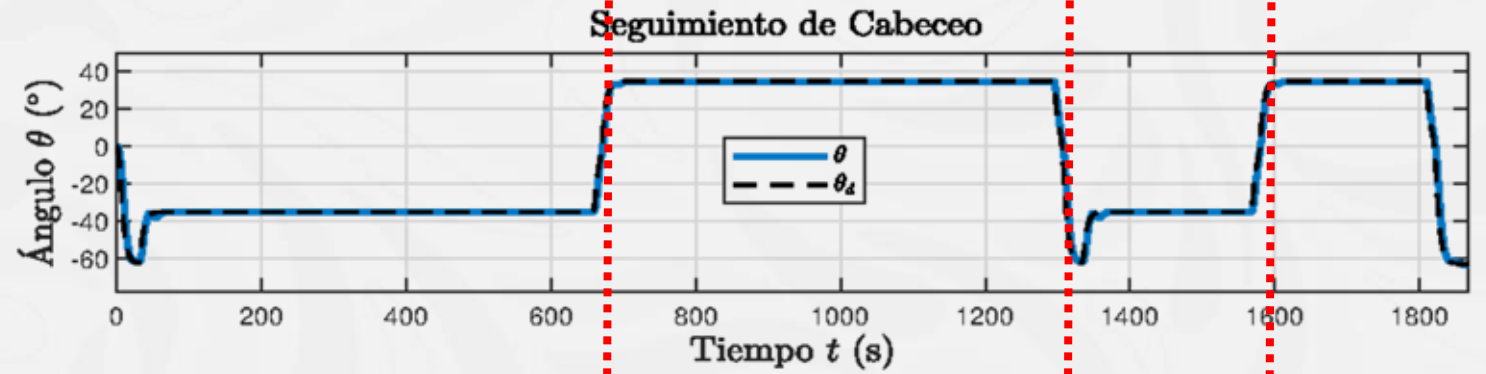
- Marco inercial $O_i (X_i, Y_i, Z_i)$:

Marco fijo en la Tierra que permite expresar la posición y orientación del vehículo en el espacio.



Control de gliders

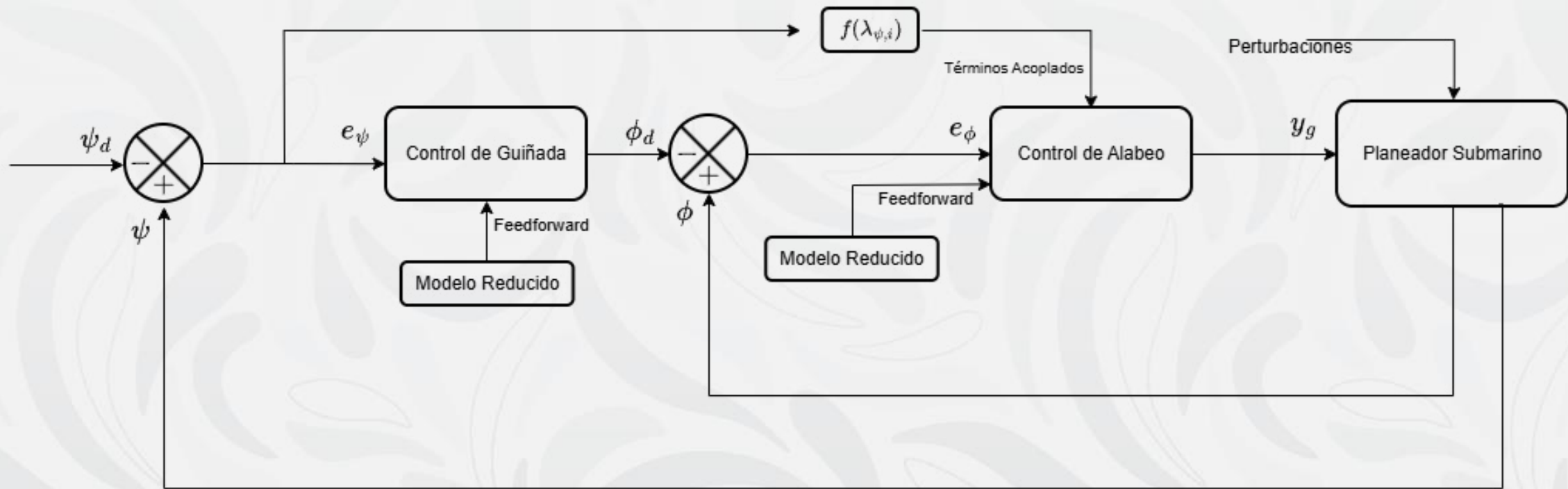
Estrategia de control: ángulo θ



Control de gliders

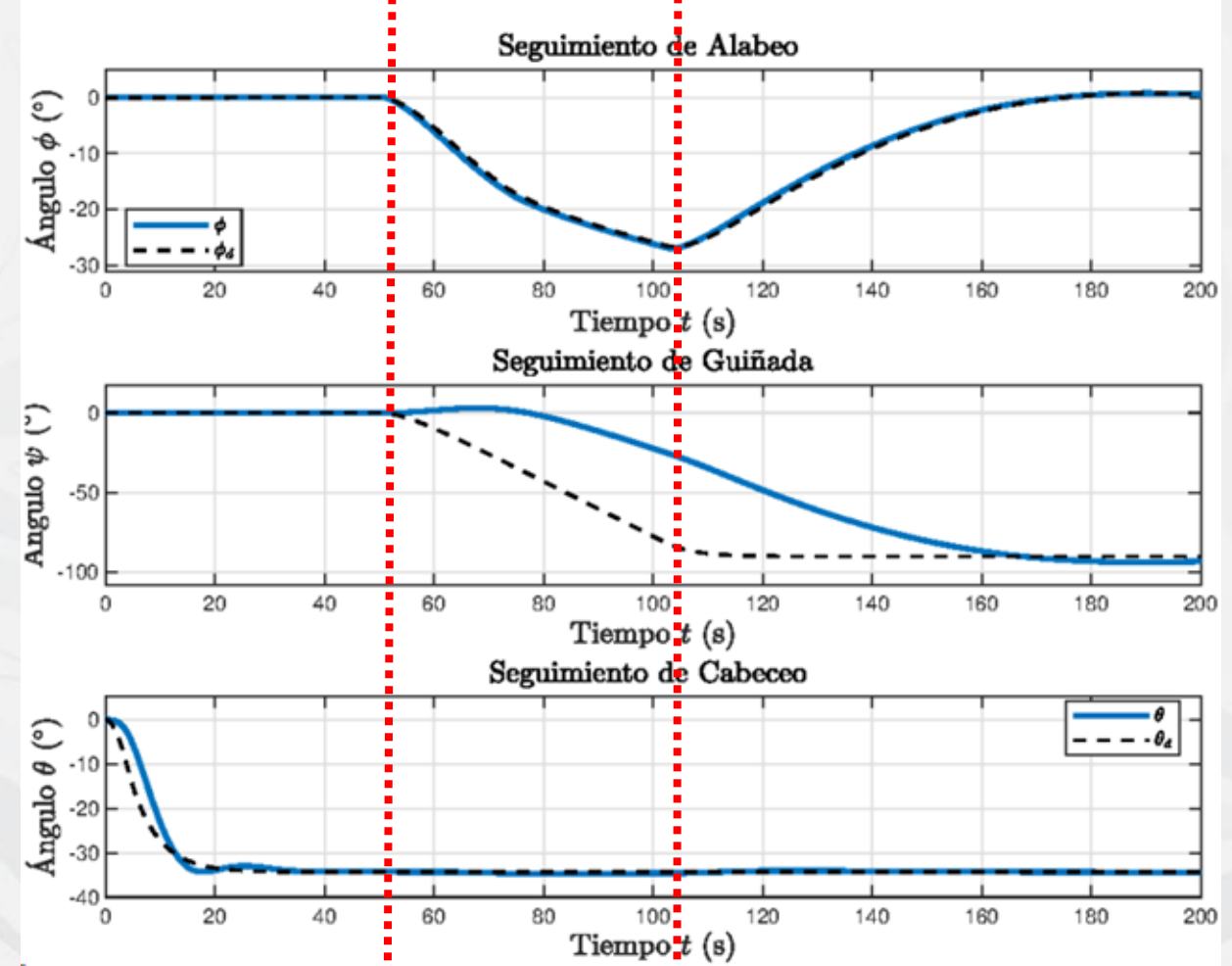
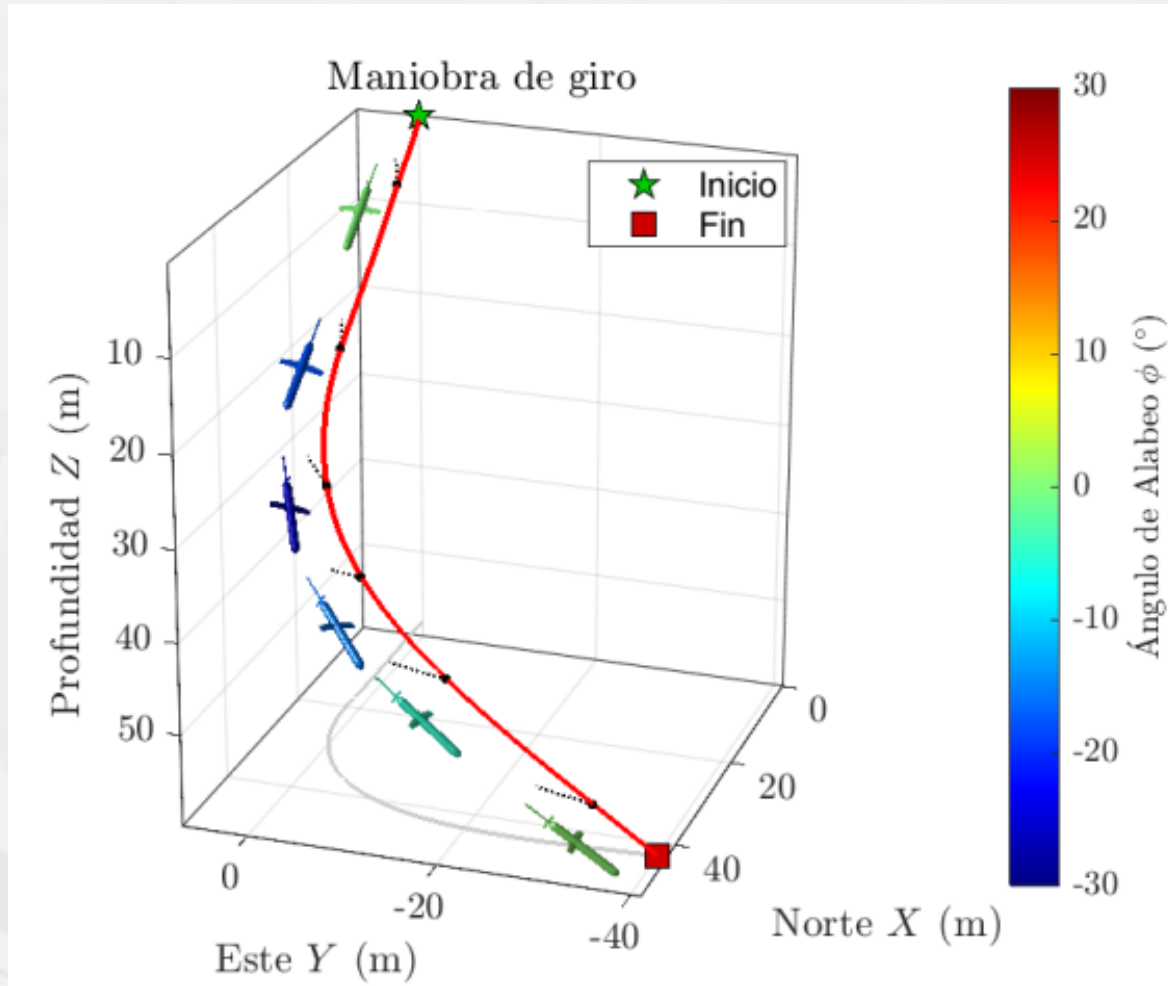
Control - Alabeo/Guiñada

Los Planeadores sumergibles presentan una dinámica acoplada de **alabeo-guiñada** que puede ser utilizada para el control de rumbo del vehículo, modificando el ángulo de guiñada a través de la inducción de un ángulo de alabeo. Se propone el diseño de una ley de control utilizando la metodología back-stepping sobre un modelo reducido, que puede ser escrita en una forma de tipo PID no lineal como se muestra a continuación:



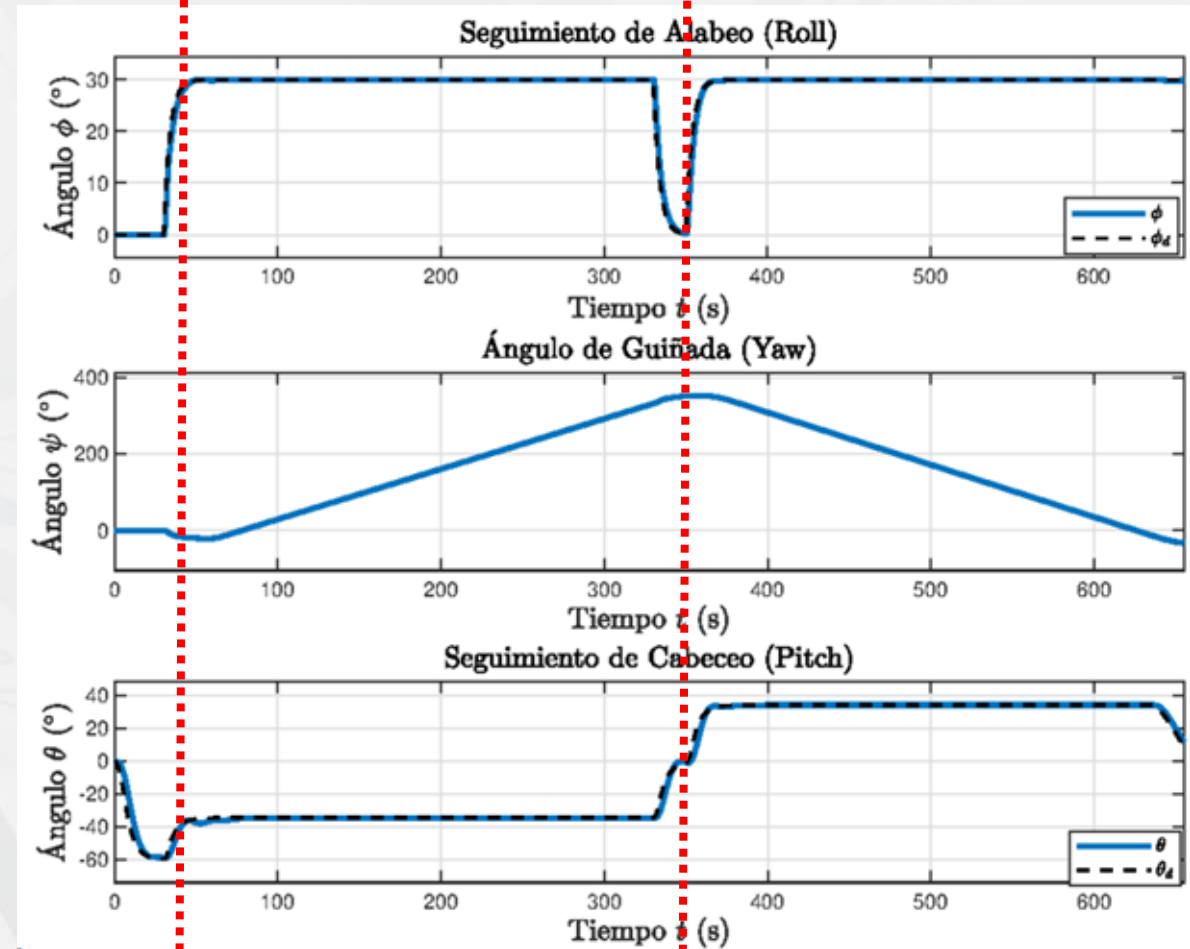
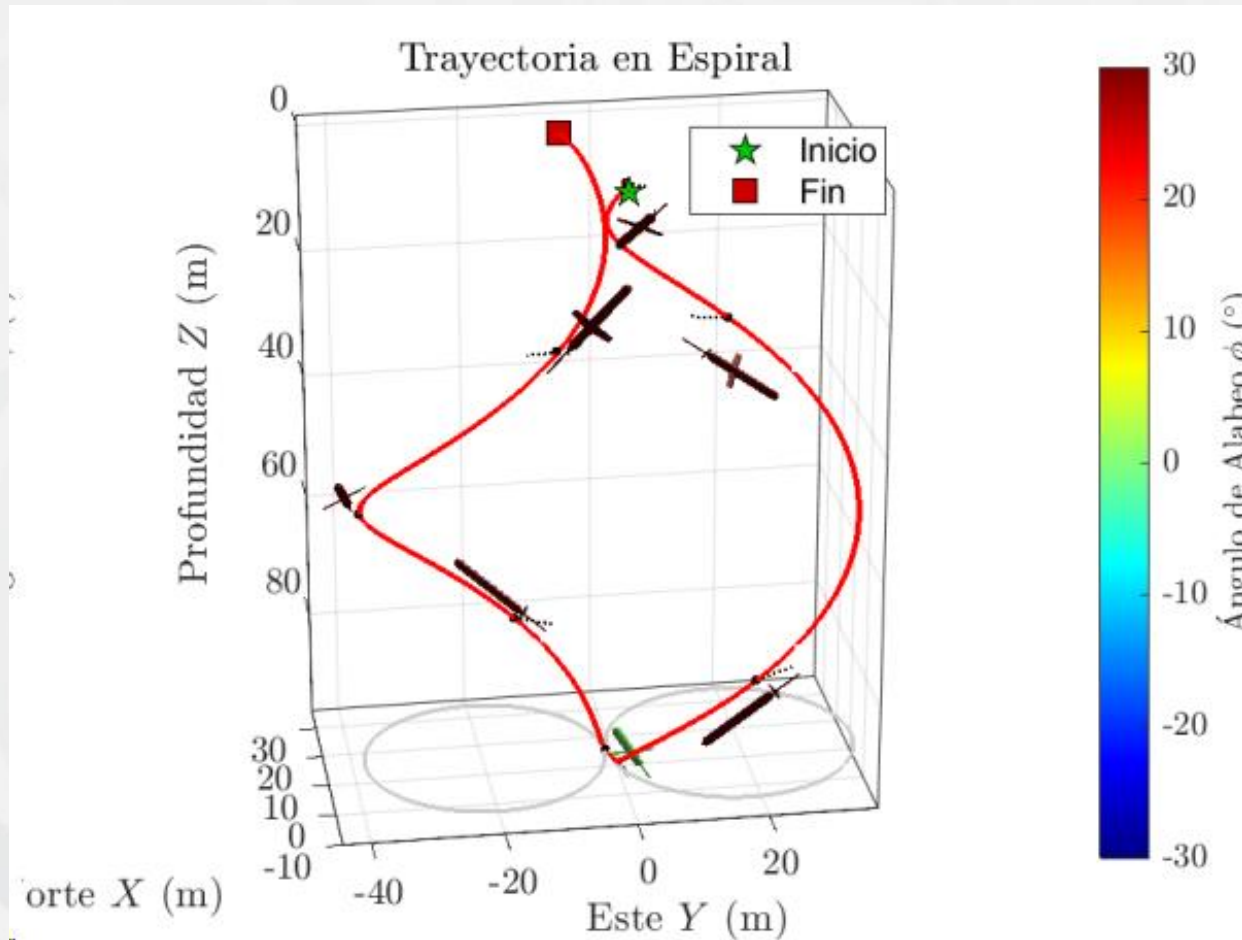
Control de gliders

Control - Alabeo/Guiñada

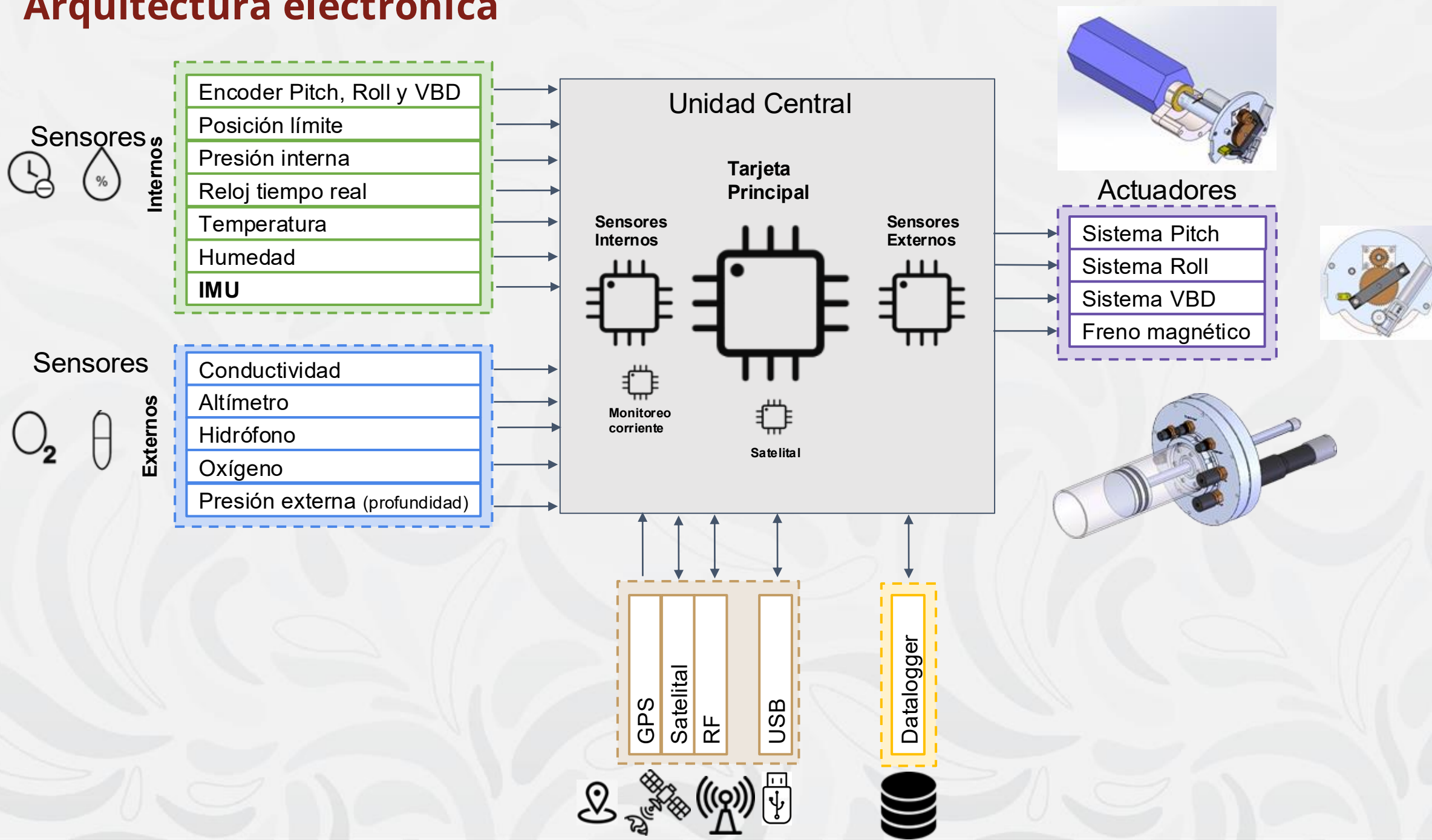


Control de gliders

Control - Alabeo/Guiñada



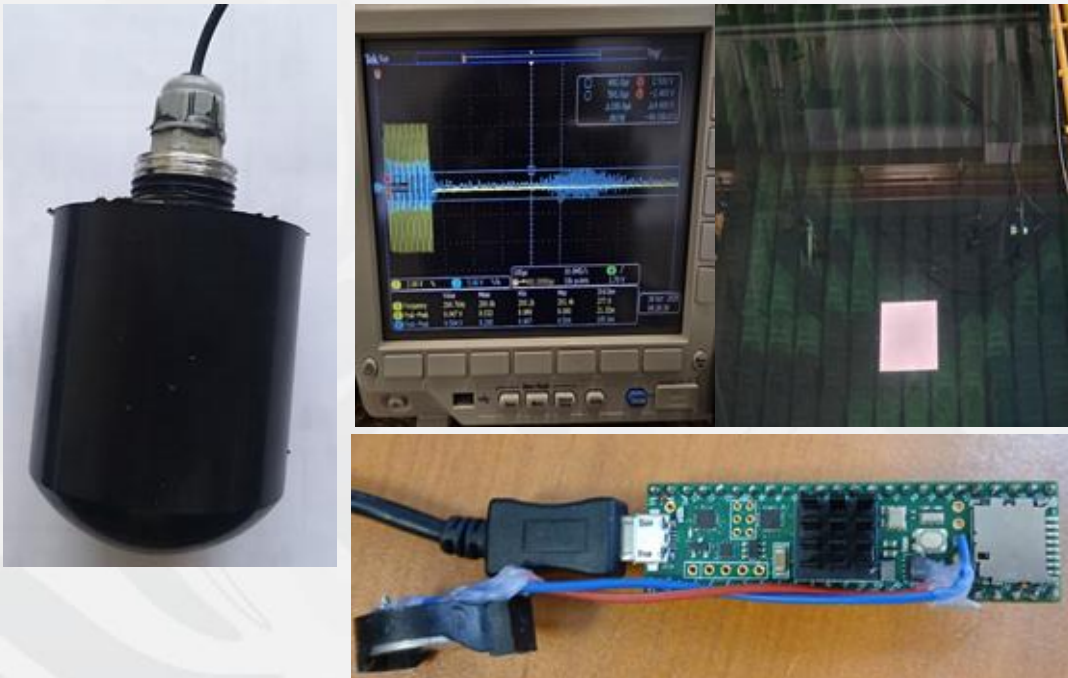
Arquitectura electrónica



Integración de electrónica: Adicionales que añaden valor al proyecto

Hidrófono diseñado en ININDETec:

- Se trabaja en adaptar la electrónica del hidrófono al glider
- Pruebas en alberca acústica del ININDETec.



Altímetro diseñado en ININDETec:

- Se trabaja en reducir y adaptar la electrónica de la ecosonda del ININDETec a un altímetro para ser usado en el glider.



Nota: imagen representativa

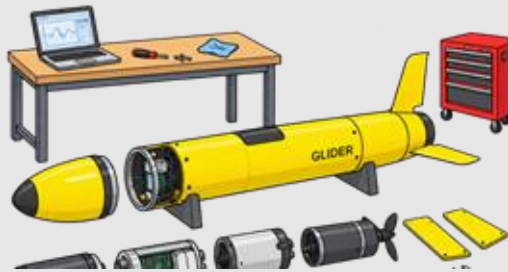
Interfaz (Usuario - Glider)



Interfaz (Usuario - Glider)

La interfaz del Planeador submarino se divide en 3 tarea puntuales:

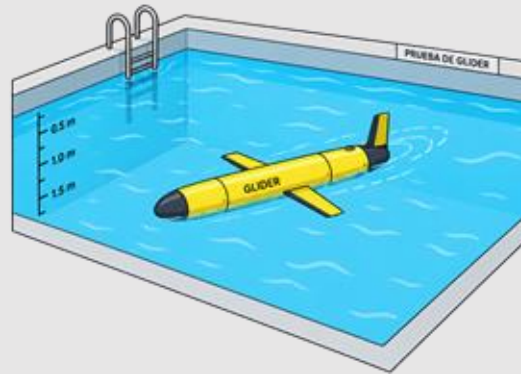
Cuando se da Mantenimiento



Aquí se validan los diferentes subsistemas y su comunicación puede ser alámbrica o inalámbrica



Cuando se simula una misión



Aquí se simula la generación de dientes de sierra y se evalúa la comunicación inalámbrica



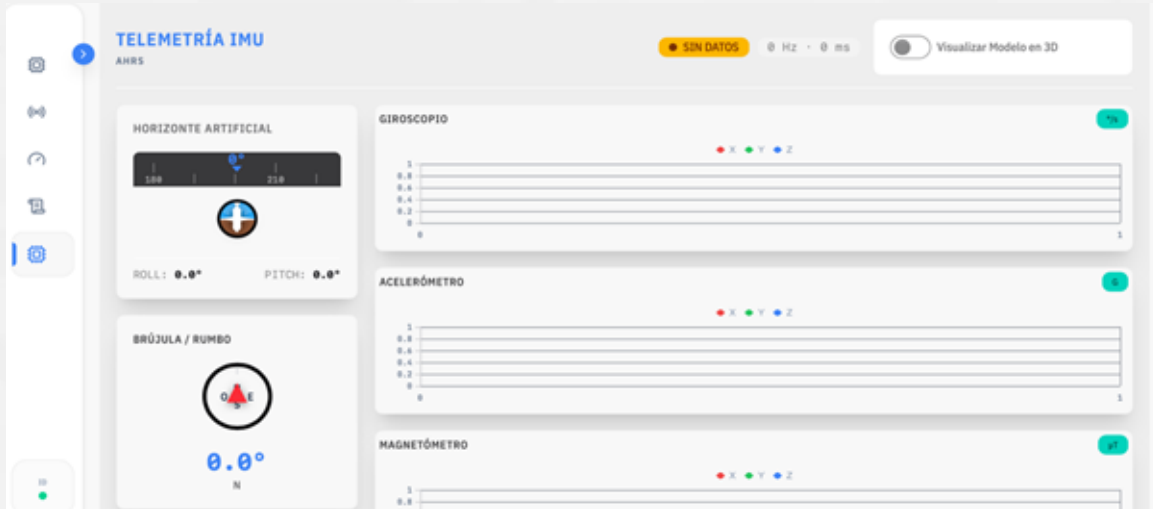
Cuando se ejecuta una misión



Aquí se configuran los dientes de cierra para salir navegas entre way points. La comunicación es satelital.



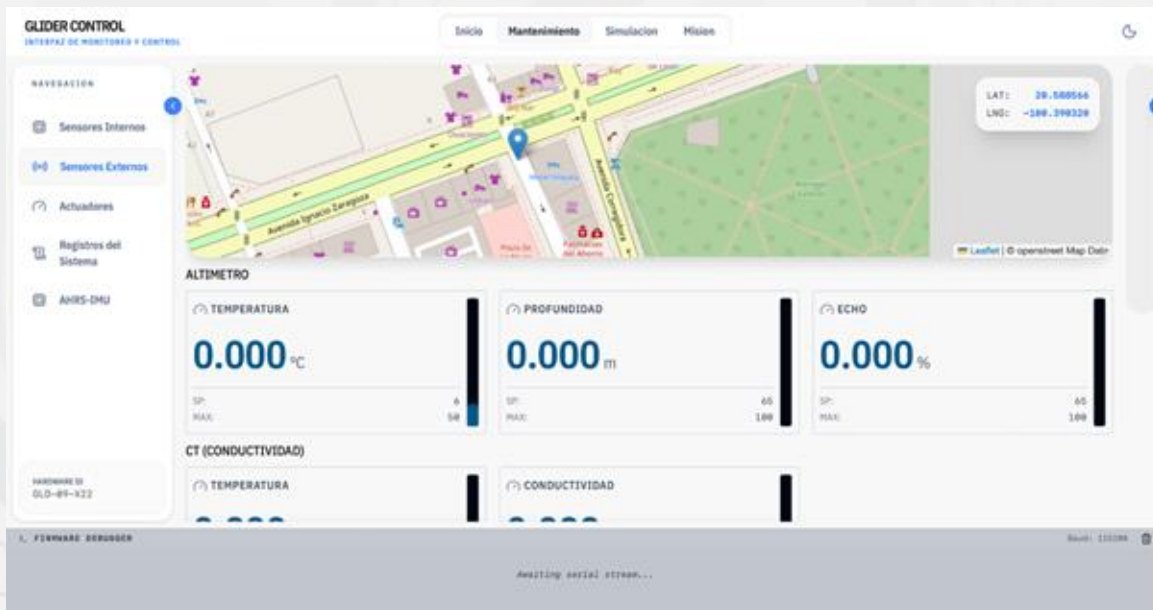
Interfaz (Usuario - Glider)



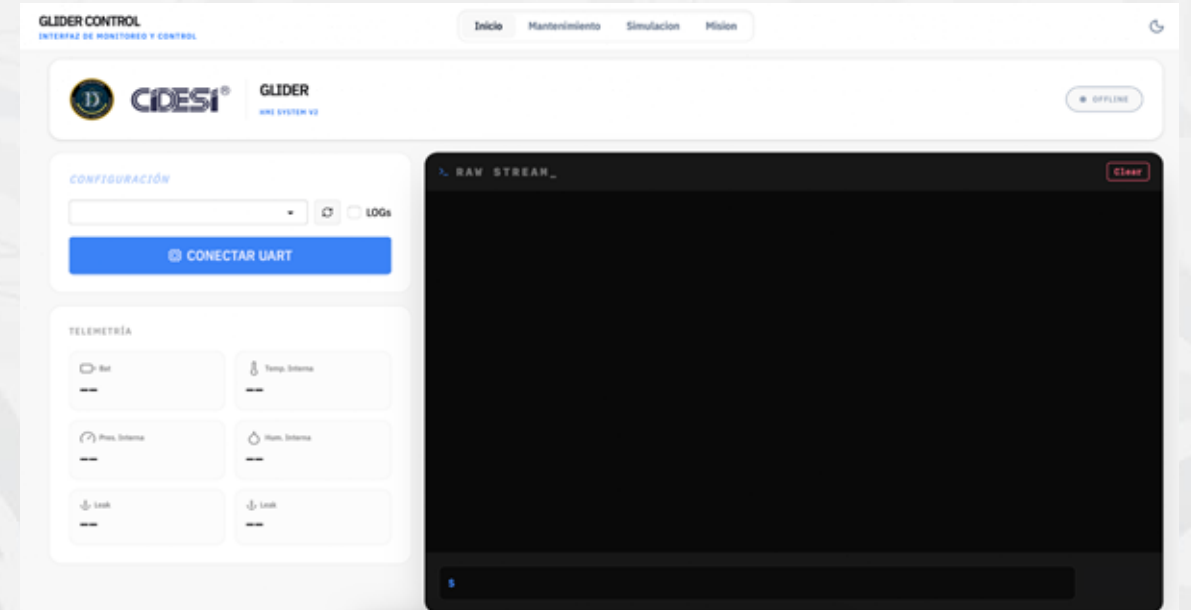
TELEMETRÍA IMU: Muestra en gráficas los datos de IMU, adicionalmente se muestra los datos en Brújula y Horizonte Artificial



TELEMETRÍA IMU: Utiliza los datos provenientes de IMU para la representación 3D del modelo



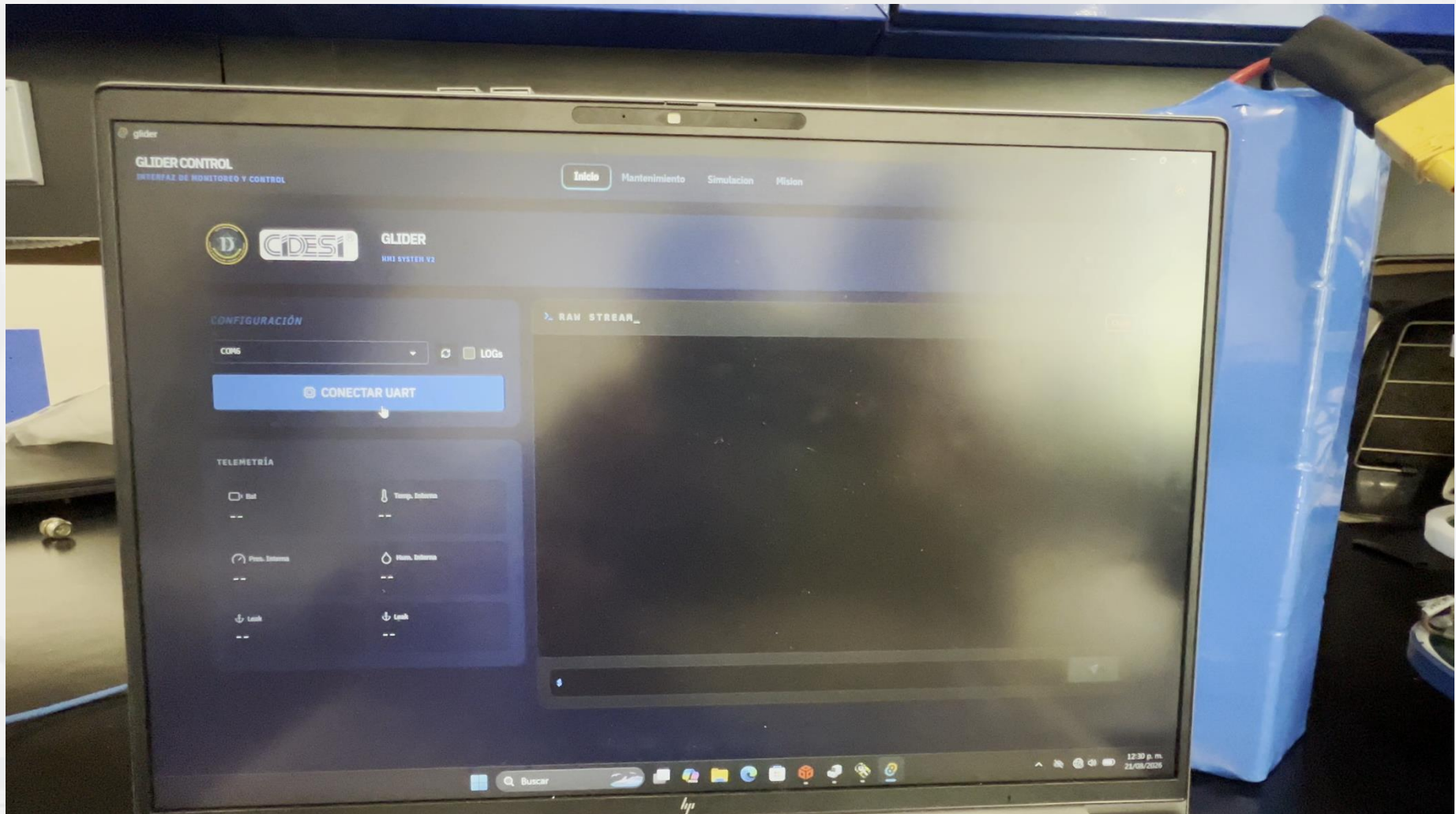
Mantenimiento>Sens. Ext. : Muestra Latitud, Longitud en Mapa (datos de GPS), Indicadores (datos de sensores)



Inicio: Integra el botón de conexión, datos iniciales de telemetría, hipertermia (para envío manual de comandos)

Interfaz (Usuario - Glider)

Video funcionamiento:



Equipo de trabajo CIDESI - ININDETEC



CIDESI - SECIHTI

1	Dr. Tomás Salgado Jiménez
2	Dr. Carlos Honorio de la Cruz Alemán
3	Dr. Noé Amir Rodríguez Olivares
4	Ing. Georgina Ibarra Vargas
5	M en C José Luis González López
6	Ing. Lissette Arhemi Del Bosque Valdés
7	Dr. Saúl Piedra González
8	Ing. José Manuel Andrade Lugo
9	Ing. Mónica Cárdenas Reyes
10	Dr. José Luis Sánchez Gaytán
11	M. en C. Daniel Kaleb Ruiz Casales
12	Ing. José Alberto Vázquez Rivera
13	M en C Daniel Mondragón Huerta
14	Dr. Cesar Ricardo Castillo Velazco
15	Ing. Jaqueline de los Ángeles Viveros González
16	M. en C. Emmanuel Martínez Hernández



ININDETEC – Marina

1	Cap. Nav. CG. DEM. Rogelio Antonio Alfaro Flores
2	Cap. Frag. SIA IMN. Alberto Antonio Espinoza Peyrot
3	Cap. Corb. SIA. IMN. Ángel Eduardo Beltrán Ceronio
4	Tte. José Reyes Velázquez
5	Dr. Luis Alberto Castellanos Rivera
6	Dr. Ricardo Villalobos Mendoza



Conclusiones y siguientes pasos

Conclusiones y siguientes pasos

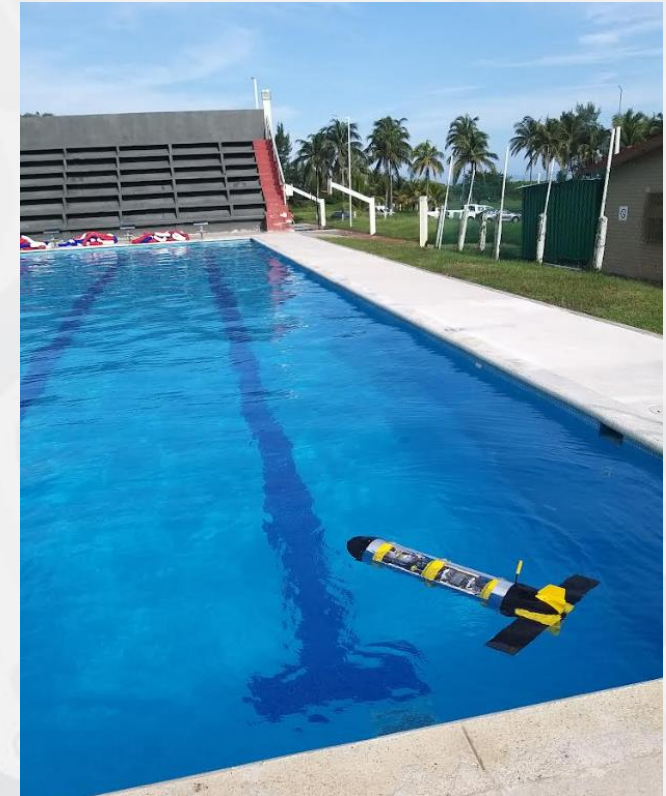
- Integraciones finales en la electrónica del glider.
 - Agregar las tarjetas de altímetro e hidrófono de diseño nacional.
- Diseño mecánico liberado para manufactura.
- Inicio de manufactura con las primeras piezas (optimizar tiempos de manufactura).
- Ensamble de piezas.
- **Sinergia** con ININDETEC para el diseño del glider.
- La **colaboración** entre instituciones nos puede aportar mucho en el desarrollo de sistemas a la medida de las necesidades nacionales, reforzando la soberanía tecnológica nacional.

Avisos:

- Invitarlos a que nos visiten en el Stand de CIDESI.



- Invitarlos a las Demos:
 - NAUTA G1 - Glider subacuático de investigación y desarrollo
- Lugar: Alberca Semi-olímpica



¡Felicidades a ININDETEC y a todo su personal por estos 25 años!.

Desearles 100 años más, México requiere centros de investigación como estos.



The banner features a dark blue background with a faint image of a computer monitor displaying a map of Mexico. At the top left, there are two circular logos: the ININDETEC logo and a '25' anniversary logo. To their right, the text 'ININDETEC 25 ANIVERSARIO' is displayed. Further right, the words 'INSTITUTO', 'SIMPOSIO', and 'REGISTRO' are listed as navigation links. On the far right, the 'Marina' logo with the text 'Secretaría de Marina' is present. The main title 'INVESTIGACIÓN NAVAL DE VANGUARDIA' is centered in large, bold, white and gold letters. To the right of the title is a large, stylized '25' in gold. At the bottom left, a tagline reads '25 años de ciencia, tecnología e innovación naval al servicio de México.' At the bottom right, the word 'ANIVERSARIO' is written in large, white, italicized letters.

ININDETEC 25 ANIVERSARIO

INSTITUTO SIMPOSIO REGISTRO

Marina
Secretaría de Marina

INVESTIGACIÓN NAVAL DE
VANGUARDIA

25

ANIVERSARIO

25 años de ciencia, tecnología e
innovación naval al servicio de México.



Ciencia y Tecnología

Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación



Marina

Secretaría de Marina



Gracias por su atención.



Contacto:

Dr. Tomás Salgado

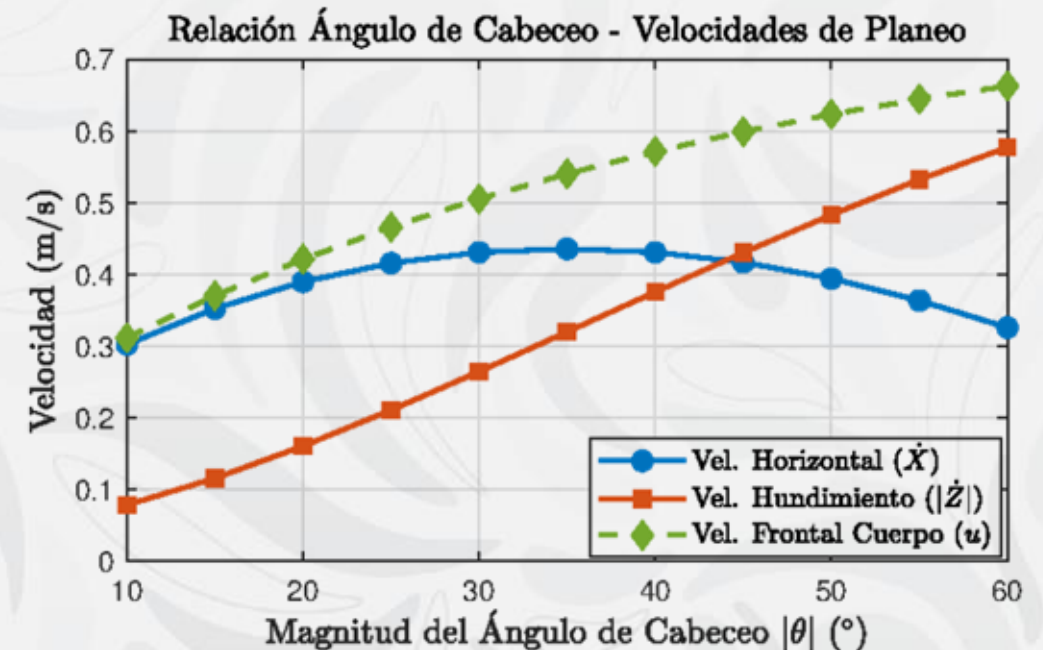
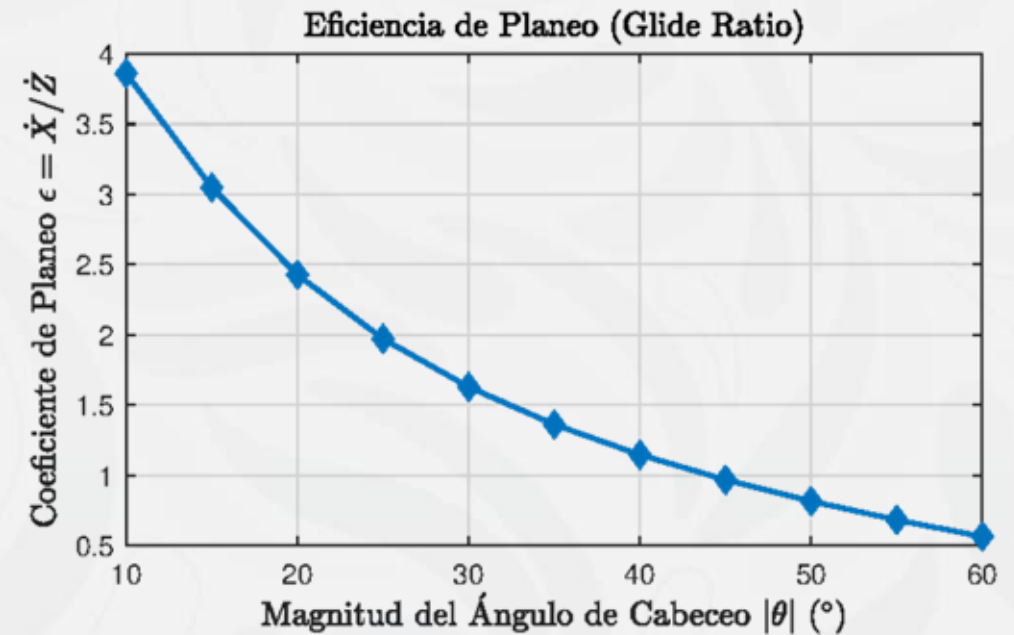
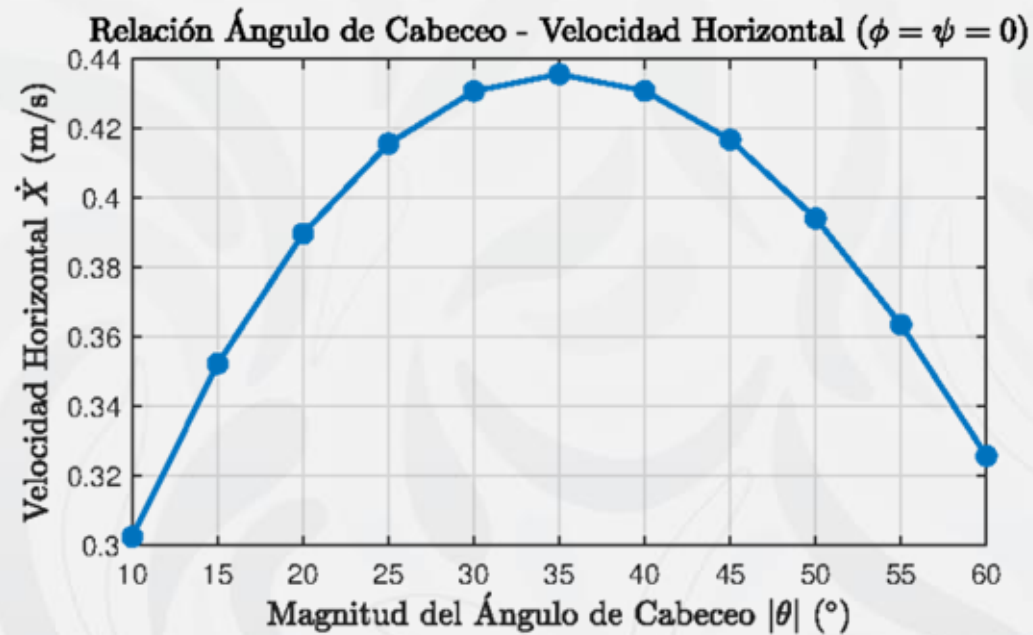
tsalgado@cidesi.edu.mx



2026
año de
Margarita
Maza

Control de gliders

Coeficiente de planeo



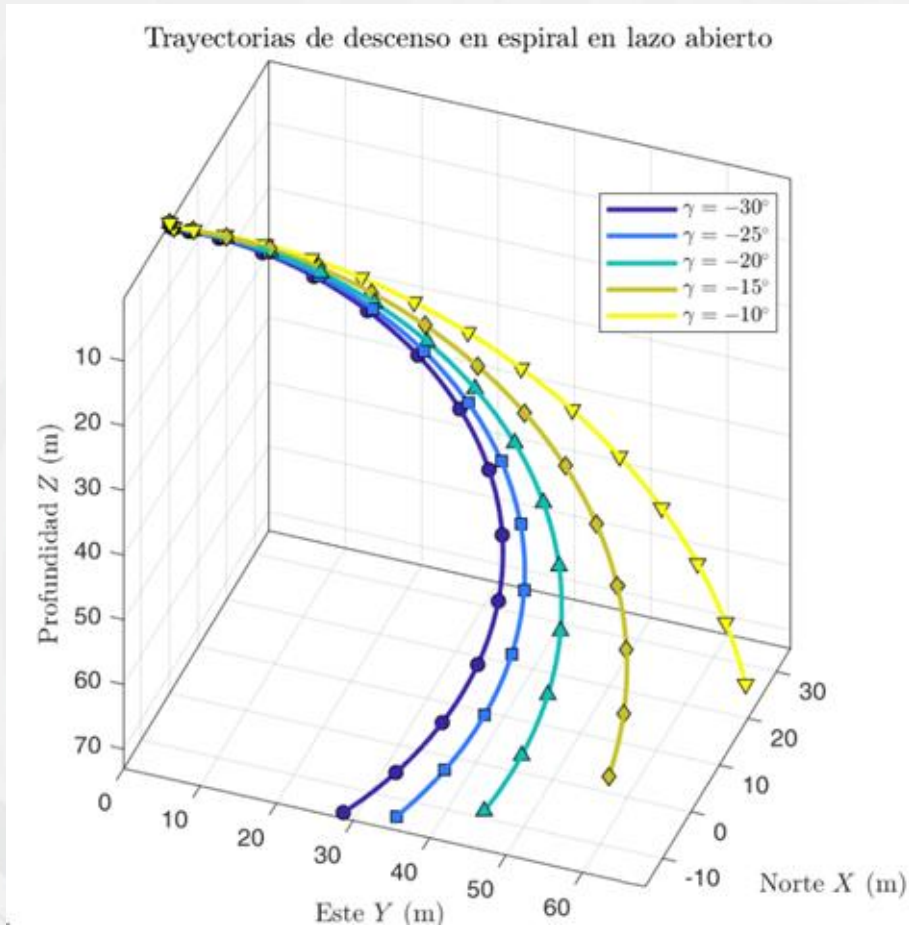
Control de gliders

Modelado Matemático - Ecuaciones de movimiento

Además de los términos de amortiguamiento Hidrodinámico, el modelo se compone por los siguientes elementos:

$$M = M_{RB} + M_A$$

$$C = C_{RB} + C_A$$



$$M_{RB} = \begin{bmatrix} m\mathbf{I}_{3 \times 3} & -mS(\mathbf{r}_G) \\ mS(\mathbf{r}_G) & \mathbf{I}_0 \end{bmatrix}$$

$$C_{RB}(\boldsymbol{\nu}) = \begin{bmatrix} mS(\boldsymbol{\nu}_2) & -mS(\boldsymbol{\nu}_2)S(\mathbf{r}_G) \\ mS(\mathbf{r}_G)S(\boldsymbol{\nu}_2) & -S(\mathbf{I}_0\boldsymbol{\nu}_2) \end{bmatrix}$$

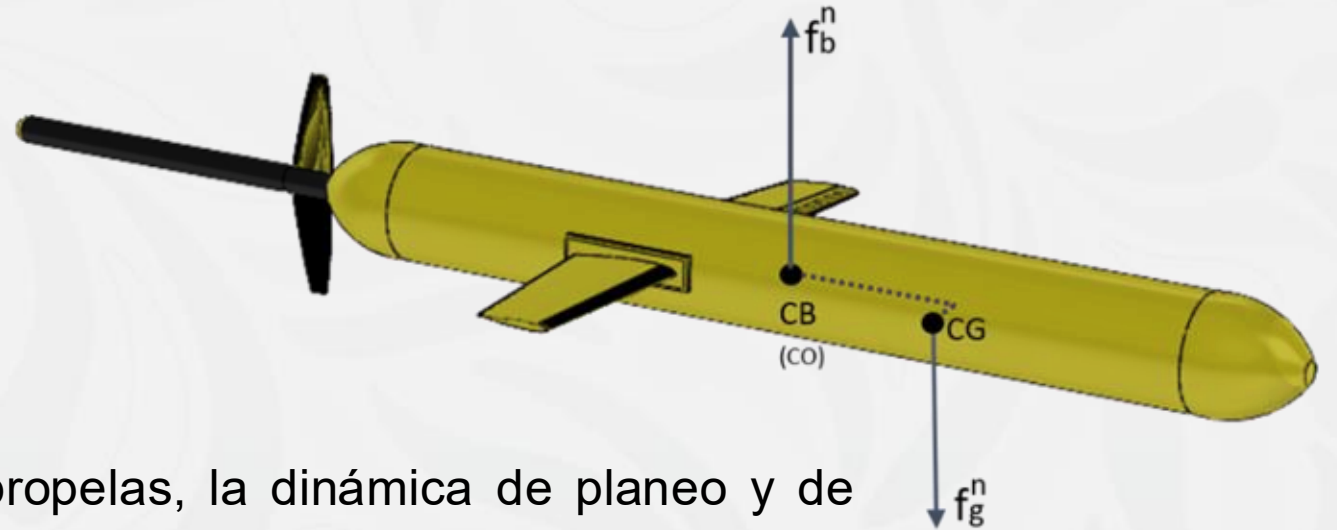
$$M_A = - \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & X_{\dot{v}} & \dots & X_{\dot{r}} \\ Y_{\dot{u}} & Y_{\dot{v}} & \dots & Y_{\dot{r}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ N_{\dot{u}} & N_{\dot{v}} & \dots & N_{\dot{r}} \end{bmatrix}$$

$$C_A(\boldsymbol{\nu}) = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & -S(\mathbf{A}_{11}\boldsymbol{\nu}_1 + \mathbf{A}_{12}\boldsymbol{\nu}_2) \\ -S(\mathbf{A}_{11}\boldsymbol{\nu}_1 + \mathbf{A}_{12}\boldsymbol{\nu}_2) & -S(\mathbf{A}_{21}\boldsymbol{\nu}_1 + \mathbf{A}_{22}\boldsymbol{\nu}_2) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \begin{bmatrix} (W - B) \sin \theta \\ -(W - B) \cos \theta \sin \phi \\ -(W - B) \cos \theta \cos \phi \\ -(y_G W - y_B B) \cos \theta \cos \phi + (z_G W - z_B B) \cos \theta \sin \phi \\ (z_G W - z_B B) \sin \theta + (x_G W - x_B B) \cos \theta \cos \phi \\ -(x_G W - x_B B) \cos \theta \sin \phi - (y_G W - y_B B) \sin \theta \end{bmatrix} \quad S(\mathbf{a}) = \begin{bmatrix} 0 & -a_3 & a_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 \end{bmatrix}$$

Simulación numérica de las trayectorias de descenso en espiral en lazo abierto. Se observan los resultados para diversos valores del ángulo de la masa rotacional γ , con un desplazamiento en la masa lineal $\Delta x_{lin} = 0.045\text{m}$ y flotabilidad $\Delta B = -2.5\text{N}$.

● Posición de Alas



- El planeador submarino no cuenta con propelas, la dinámica de planeo y de giro son el resultado del equilibrio de fuerzas de restauración e hidrodinámicas principalmente.

	Adelante del CB	Detrás del CB	Muy detrás del CB
Momento de cabeceo m	Momento contrario al ángulo de cabeceo requerido	Momento en el sentido ángulo de cabeceo requerido	Momento en el sentido correcto, potencialmente excesivo
Momento de guiñada n	Las alas refuerzan el giro hacia el lado del alabeo	Las alas se oponen débilmente al giro hacia el lado de alabeo, pero el timón fijo determina la dinámica de giro	Las alas determinan la dinámica de giro
Sentido del viraje	Mismo sentido del alabeo	Mismo sentido del alabeo	Sentido contrario al alabeo
Costo sobre la masa longitudinal	Debe desplazarse hacia proa para revertir el momento del ala	Desplazamiento mínimo: el ala aporta al momento requerido	Probable desplazamiento hacia popa para compensar el exceso

● Posición de Alas

- Se plantea realizar múltiples simulaciones en ansys para determinar momentos en el marco del flujo ante diferentes configuraciones de posición de Alas bajo las siguientes consideraciones:
 - Genere un momento en cabeceo en el sentido necesario para lograr el ángulo de cabeceo predeterminado durante los ciclos de ascenso y descenso (35°), disminuyendo así la necesidad de desplazar la masa longitudinal.
 - Mantenga un efecto aceptable de las alas sobre la dinámica de giro, en comparación con el timón fijo.
 - Mantenga un margen suficiente de distancia a los puntos que generan dinámicas problemáticas, por ejemplo un momento en cabeceo opuesto al deseado o la inversión de la relación alabeo / guiñada
- Adicionalmente se implementará un mecanismo de fijación que permita el reposicionamiento de las alas en una región de interés identificada a través de los resultados de Ansys.

Control de gliders

Modelado Matemático - Ecuaciones de movimiento

El modelo en 6 grados de libertad obtenido mediante la metodología de Newton-Euler y Lagrange-Kirchhoff, es:

$$M\dot{\boldsymbol{\nu}}_r + C(\boldsymbol{\nu}_r)\boldsymbol{\nu}_r + D_{vec}(\boldsymbol{\nu}_r, \alpha_r, \beta_r) + g(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\tau}_e$$

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})\boldsymbol{\nu}$$

$$\boldsymbol{\nu} = \boldsymbol{\nu}_r + \boldsymbol{\nu}_c$$

En donde:

- **Posición y Orientación** (Marco Inercial - Earth-fixed): $\boldsymbol{\eta} = [\boldsymbol{\eta}_1^T, \boldsymbol{\eta}_2^T]^T = [x, y, z, \phi, \theta, \psi]^T$
- **Velocidades Lineales y Angulares** (Marco del Cuerpo - Body-fixed): $\boldsymbol{\nu} = [\boldsymbol{\nu}_1^T, \boldsymbol{\nu}_2^T]^T = [u, v, w, p, q, r]^T$



El modelo hidrodinámico propuesto combina fuerzas y momentos expresados en el marco del flujo (Graver, Ansys) con momentos de amortiguamiento expresados en el marco del cuerpo (Fossen), esto constituye una mejora considerable a los simuladores que se pueden encontrar en el estado del arte y garantiza la disipación del movimiento aún cuando la velocidad resultante del vehículo (V_r) es cero.

$$\begin{aligned} D &\approx (K_{D0} + K_D \alpha_r^2) V_r^2 \\ L &\approx (K_{L0} + K_L \alpha_r) V_r^2 \\ T_{DL2} &\approx (K_{M0} + K_M \alpha_r) V_r^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} SF &\approx (K_{SF\beta} \beta_r) V_r^2 \\ T_{DL1} &\approx (K_{MR\beta} \beta_r) V_r^2 \\ T_{DL3} &\approx (K_{MY\beta} \beta_r) V_r^2 \end{aligned}$$

$$\boldsymbol{\tau}_f = \begin{bmatrix} -D \\ SF \\ -L \\ T_{DL1} \\ T_{DL2} \\ T_{DL3} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J}_{f \rightarrow b}(\alpha_r, \beta_r) = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_f^b(\alpha_r, \beta_r) & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{R}_f^b(\alpha_r, \beta_r) \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\tau}_f^b(\boldsymbol{\nu}_r) = \mathbf{J}_{f \rightarrow b}(\alpha_r, \beta_r) \cdot \boldsymbol{\tau}_f(\boldsymbol{\nu}_r)$$

$$\boldsymbol{\tau}_{d_rot}(\boldsymbol{\nu}_r) = - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ K_p p_r + K_{p|p|} |p_r| p_r \\ M_q q_r + M_{q|q|} |q_r| q_r \\ N_r r_r + N_{r|r|} |r_r| r_r \end{bmatrix} \quad \begin{aligned} \alpha &= \arctan \left(\frac{w_r}{u_r} \right) \\ \beta &= \arcsin \left(\frac{v_r}{V_r} \right) \end{aligned}$$

$$\boldsymbol{\tau}_{hid_v_r} \approx \boldsymbol{\tau}_f^b(\boldsymbol{\nu}_r) + \boldsymbol{\tau}_{d_rot}(\boldsymbol{\nu}_r) = -D_{vec}(\boldsymbol{\nu}_r, \alpha, \beta)$$