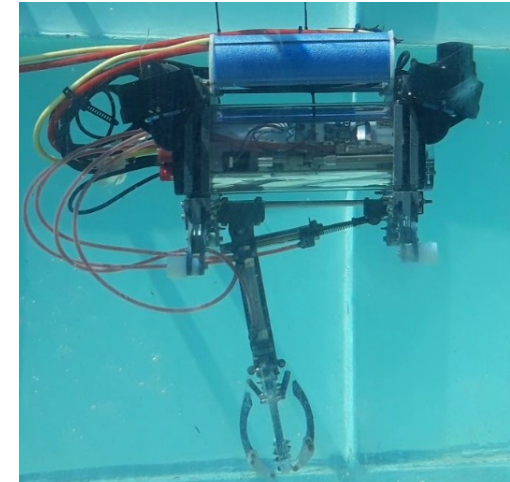
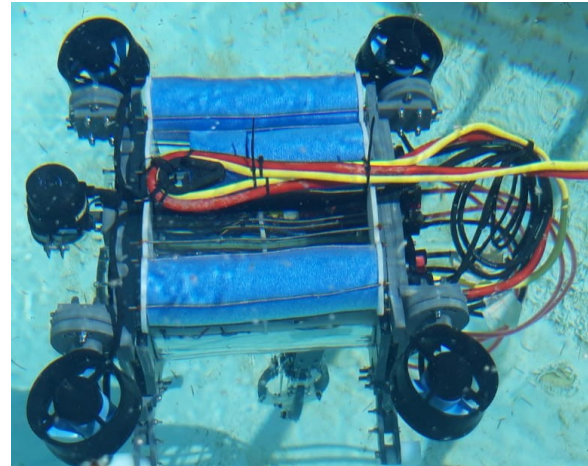
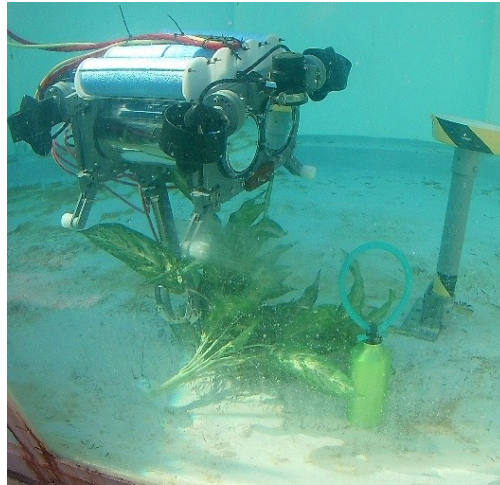




Universidad
Rey Juan Carlos

MECATRÓNICA EN UN PROYECTO REAL



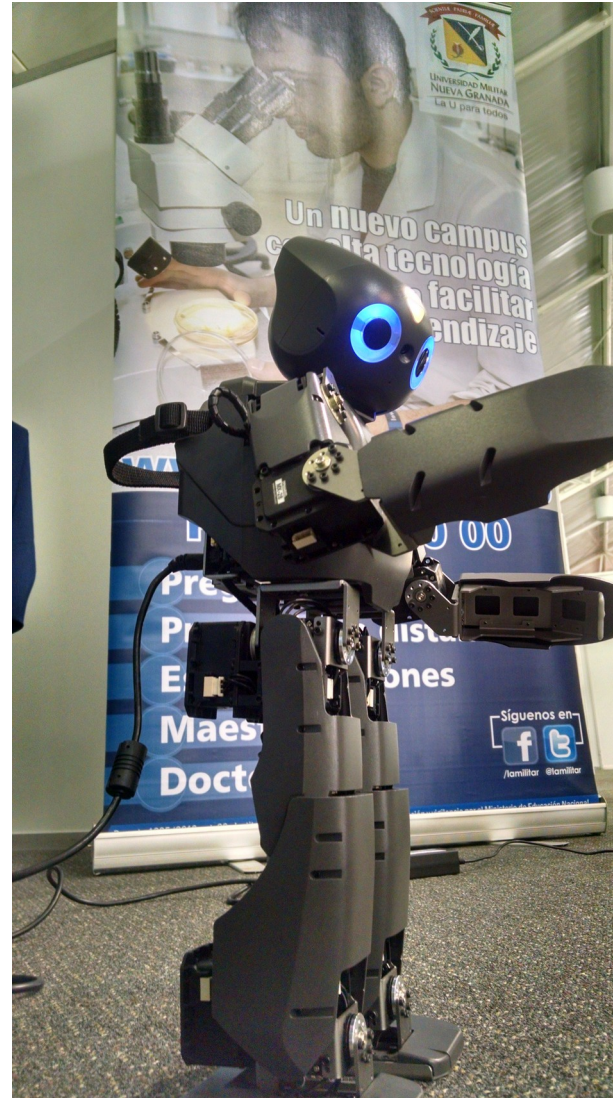
PARTE I :

Asignatura: Mecatrónica
Grado en Ingeniería de Robótica Software

DEFINICIONES Y MODELO



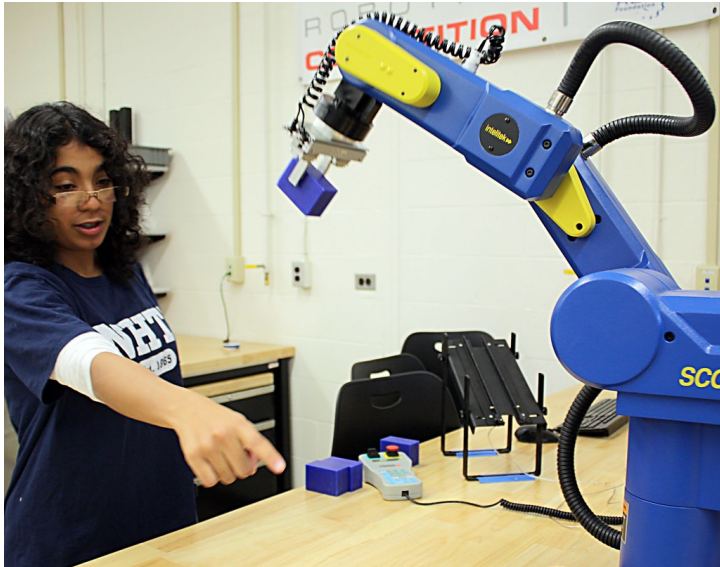
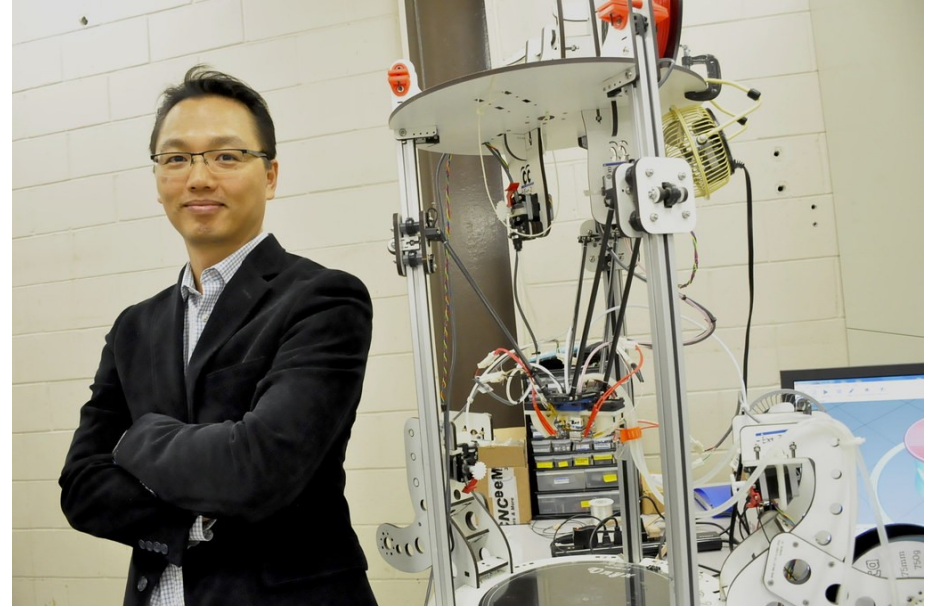
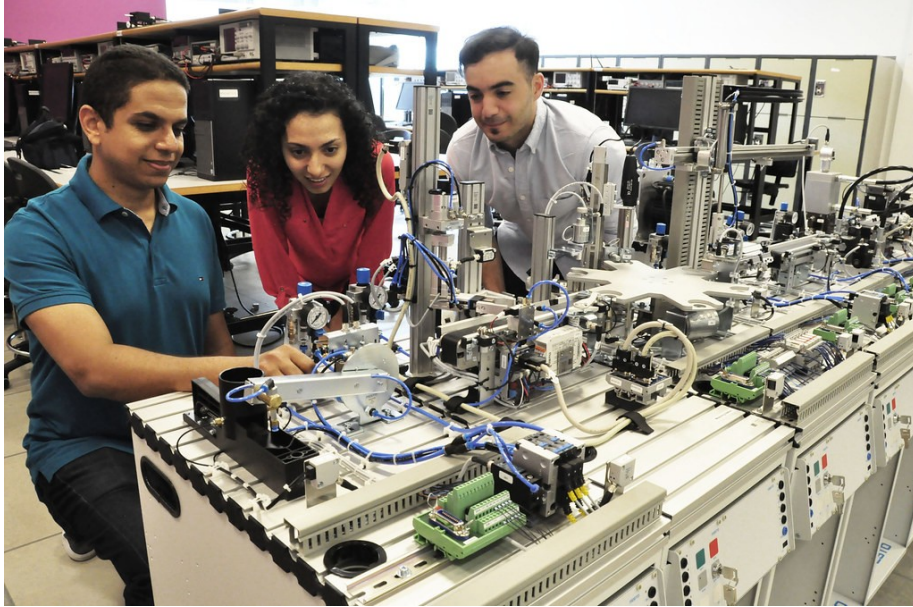
1. DEFINICIONES



Definición de Mecatrónica

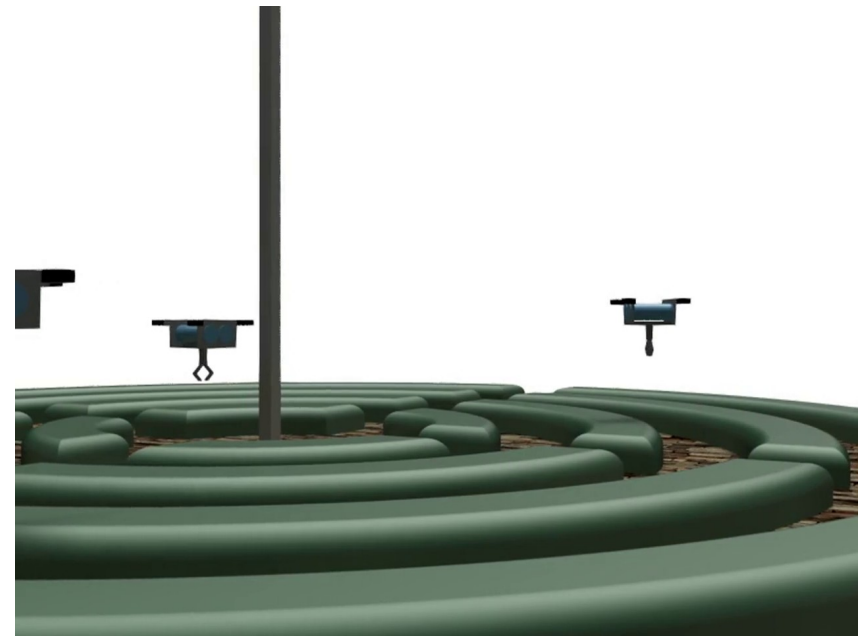
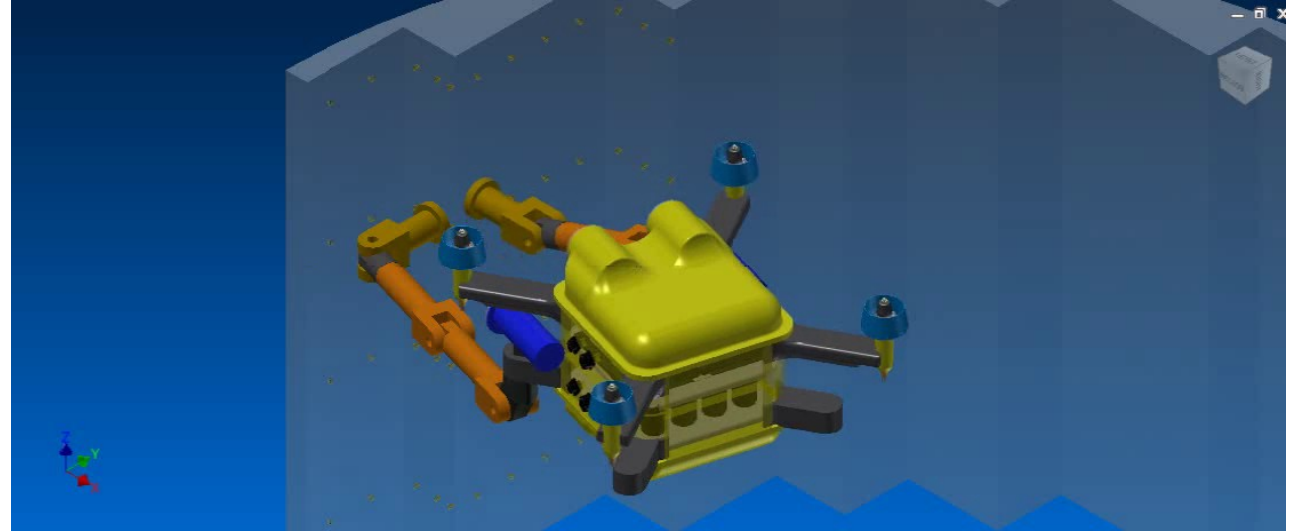
- “The application of complex decision making to the operation of physical systems.” - D. M. Auslander
- "Es la integración de la ingeniería mecánica con la electrónica y el control de una computadora inteligente en el diseño y fabricación de productos y procesos industriales" - IEEE
- “La combinación sinérgica de la ingeniería mecánica de precisión, control electrónico y los sistemas inteligentes en el diseño de productos y procesos de manufactura.” - J. A. Rietdijk (IEEE/ASME)

Ejemplos de Mecatrónica





2. DESCRIPCIÓN UDRONE



Problema

- Existen territorios en el planeta en el cual las condiciones para el cultivo no son las ideales y su población pasa hambre, datos según FAO.
- Tener “cultivos” en el agua puede permitir usar superficies donde tradicionalmente no se cultiva.
- Ya hay propuestas para hacer uso de productos extraídos de cultivos bajo el agua con calidades elevadas para consumo humano.
- A los buzos les cuesta trabajar a mucha profundidad, además que son tareas repetitivas y riesgosas.



Food and Agriculture Organization
of the United Nations

<https://www.fao.org/state-of-food-security-nutrition/2021/en/>



Chef Angel León holding seaweed at his Michelin three-star seafood restaurant, Aponte, in El Puerto de Santa María, Spain. Photo: Vanessa/VOX for TIME

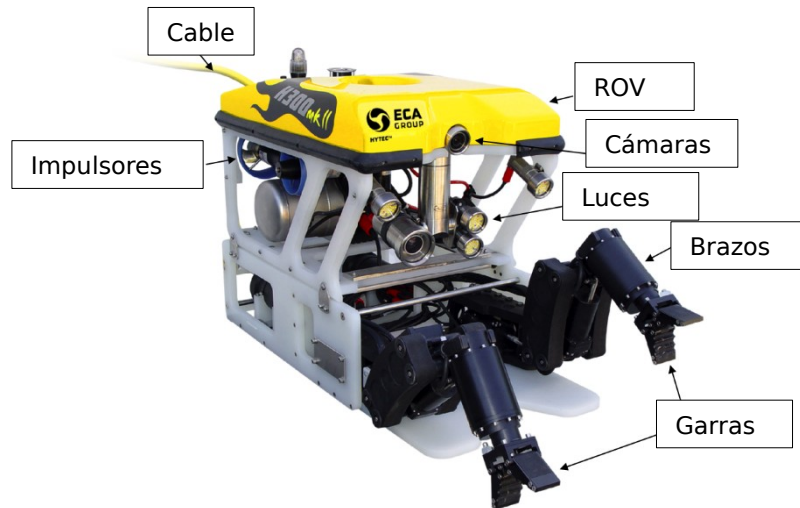
TIME 2030
← BACK TO HOME

Seeding the Ocean: Inside a Michelin-Starred
Chef's Revolutionary Quest to Harvest Rice
From the Sea

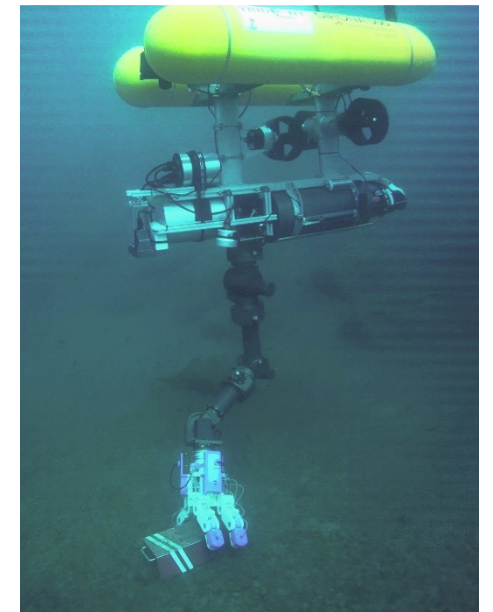
<https://time.com/5926780/chef-angel-leon-sea-rice/>

Underwater Vehicle-Manipulator System

- Un Sistema Subacuático Vehículo-Manipulador (UVMS)
- La necesidad de tener una plataforma robótica móvil subacuática con capacidades de manipulación.
- Definición no exclusiva, un ROV con un brazo es un UVMS.



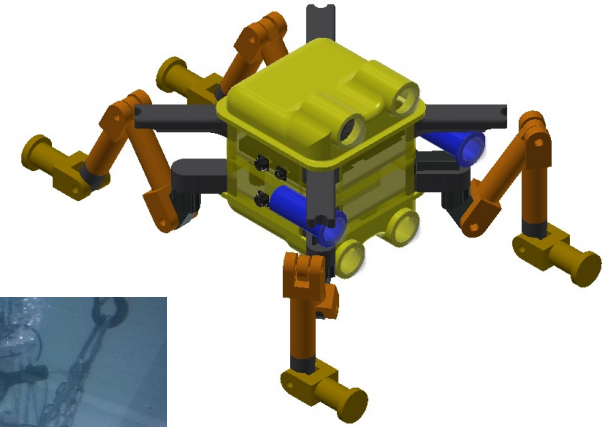
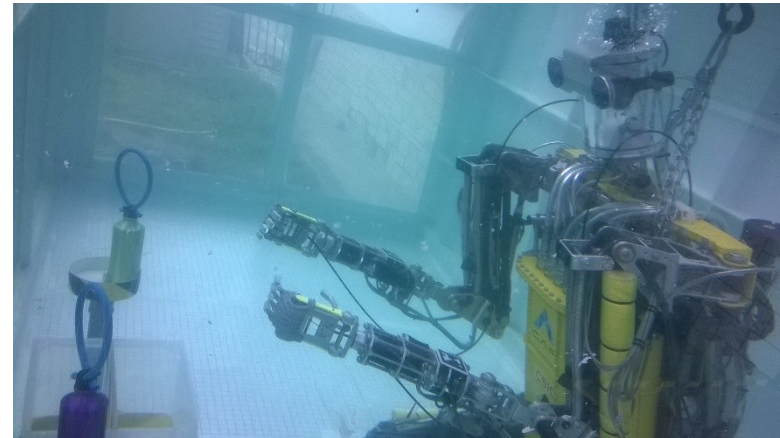
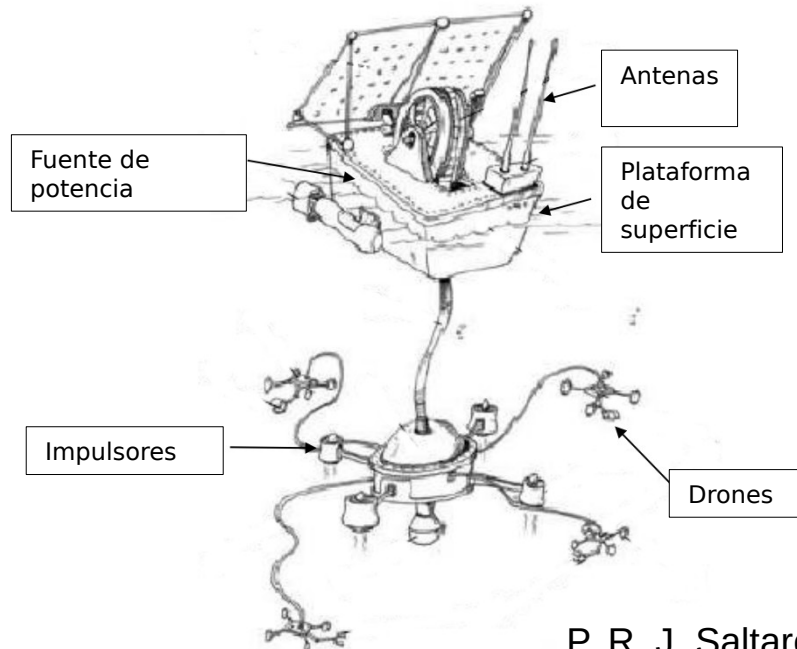
OceanOne



Girona 500

Justificación

- Basados en la experiencia del grupo de investigación en lo referente a robots subacuáticos, se propuso un sistema robótico heterogéneo.
- Problemas en:
 - La manipulación de pequeños objetos
 - Desplazamientos cortos



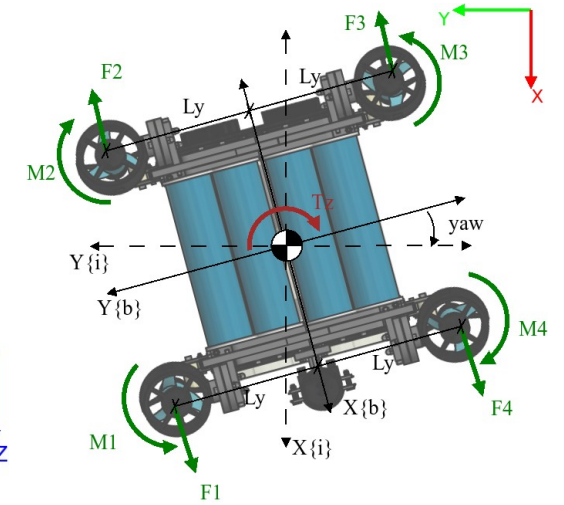
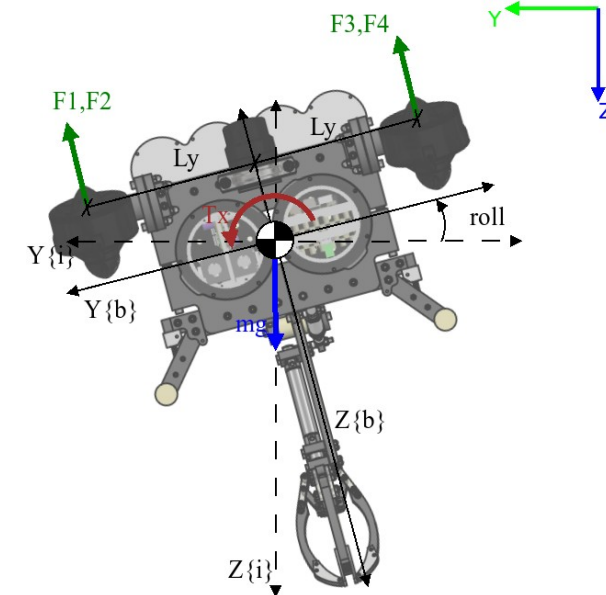
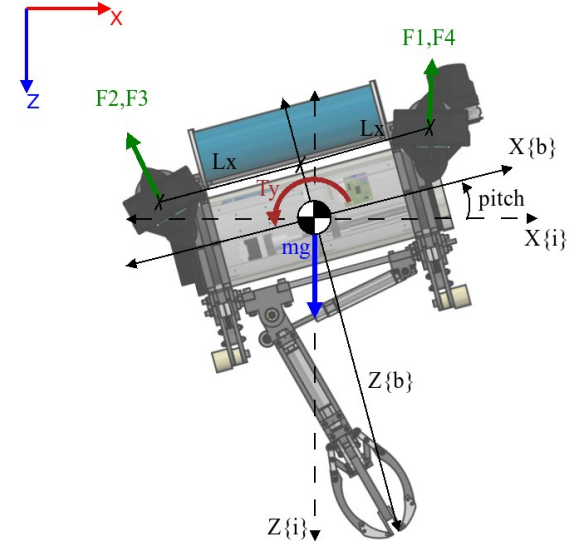
Objetivos

- Diseño y construcción de un robot submarino y subactuado para tareas de manipulación y supervisión.
- Obtención del modelo dinámico de un robot submarino subactuado para el análisis de estabilidad y controlabilidad con su posterior validación.
- Diseño e implementación de estrategias de control de profundidad y orientación para un robot subactuado.
- Diseño e implementación de estrategias de control para lograr agarrar objetos bajo el agua.
- Implementar una estrategia de control y supervisión del robot a través de internet

Metodología

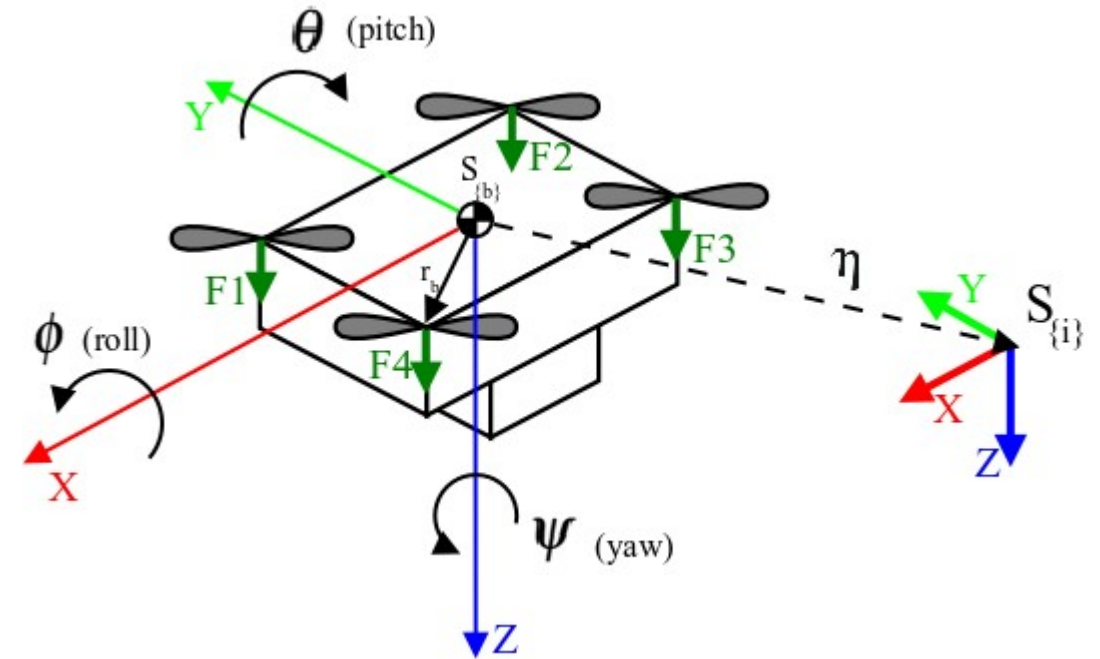
- **Metodología en ingeniería:** Se llevo a cabo el desarrollo experimental usando la metodología Top-Down. Dicha metodología es ampliamente usada en proyectos de desarrollo en los cuales a medida que se van alcanzando metas de desarrollo se van generando nuevos problemas a solucionar.
- **Metodología científica:** Para este caso se tiene un planteamiento donde se plantea una hipótesis frente a si el uso de un modelo más cercano al modelo real del robot se puede desarrollar técnicas de control con mejores prestaciones. Con ello desarrollando un experimentos para validar aproximaciones desde lo teórico permitirá validar dicha hipótesis.

3. MODELADO



Nomenclatura

- Para el caso de un robot con forma de drone, se define unos sistemas de referencia y unos valores de los estados asociados a posiciones y velocidades referentes a un sistema de referencia dado(cuerpo, inercial).



DOF		Fuerzas y Momentos	Velocidades	Posiciones y ángulos
1	Movimiento en dirección x (surge)	X	u	x
2	Movimiento en dirección y (sway)	Y	v	y
3	Movimiento en dirección z (heave)	Z	w	z
4	Rotación en torno al eje x (roll, heel)	K	p	ϕ
5	Rotación en torno al eje y (pitch, trim)	M	q	θ
6	Rotación en torno al eje z (yaw)	N	r	ψ

Cinemática

- Para describir la cinemática de este solido se hace el uso de la nomenclatura SNAME.
- Las posiciones y orientaciones están basadas en el sistema de referencia inercial.
- Las velocidades en el sistema de referencia del cuerpo.

$$\eta_1 = [x, y, z]^T$$

$$\nu_1 = R_I^B \dot{\eta}_1$$

$$R_I^B(\eta_2) = \begin{bmatrix} c_\psi c_\theta & s_\psi c_\theta & -s_\theta \\ -s_\psi c_\phi + c_\psi s_\theta s_\phi & c_\psi c_\phi + s_\psi s_\theta s_\phi & s_\phi c_\theta \\ s_\psi s_\phi + c_\psi s_\theta c_\phi & -c_\psi s_\phi + s_\psi s_\theta c_\phi & c_\phi c_\theta \end{bmatrix}$$

$$\eta_2 = [\phi, \theta, \psi]^T$$

$$\nu_2 = T(\eta_2) \dot{\eta}_2$$

$$T(\eta_2) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin(\theta) \\ 0 & \cos(\phi) & \cos(\theta) \sin(\phi) \\ 0 & -\sin(\phi) & \cos(\theta) \cos(\phi) \end{bmatrix}$$

$$T^{-1}(\eta_2) = \frac{1}{\cos(\theta)} \begin{bmatrix} 1 & \sin(\phi) \sin(\theta) & \cos(\phi) \sin(\theta) \\ 0 & \cos(\theta) \cos(\phi) & -\cos(\theta) \sin(\phi) \\ 0 & \sin(\phi) & \cos(\phi) \end{bmatrix}$$

Cinemática 6DOF - I

- La combinación de los elementos de posición y velocidad permiten tener una expresión que relacione los 6 grados de libertad.
- Las matrices son matrices cuadradas de ceros de orden 3.
- La inversa de la matriz T tiene una singularidad en η^{-1} cuando

$$J(R_I^B) = \begin{bmatrix} R_I^B(\eta_2) & O_{3 \times 3} \\ O_{3 \times 3} & T(\eta_2) \end{bmatrix} \quad \nu = J(R_I^B) \dot{\eta}$$

$$\dot{\eta} = J^{-1}(R_B^I) \nu = \begin{bmatrix} R_B^I(\eta_2) & O_{3 \times 3} \\ O_{3 \times 3} & T(\eta_2)^{-1} \end{bmatrix} \nu$$

Nota: Para evitar las singularidades, se debería usar una notación diferente de la orientación, por ejemplo Cuaternios.

Cinemática 6DOF - II

- Al hacer uso de Cuaternios, la cinemática se para 6 DOF se tiene que reescribir.
- Con esto se asegura que no se tengan singularidades pero ahora la representación no queda de rango 6x6
- Una vez se tenga la representación en Cuaternios se puede seguir con el desarrollo normal del modelo.

$$\mathbb{Q} = [\eta, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3],$$

$$\begin{aligned} \varepsilon &= k \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \\ \eta &= \cos\left(\frac{\delta}{2}\right) \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\varepsilon} \\ \dot{\eta} \end{bmatrix} = T(\mathbb{Q})\nu_2 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \eta & -\varepsilon_3 & \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 & \eta & -\varepsilon_1 \\ -\varepsilon_2 & \varepsilon_1 & \eta \\ -\varepsilon_1 & -\varepsilon_2 & -\varepsilon_3 \end{bmatrix} \nu_2$$

$$R_I^B(\mathbb{Q}) = \begin{bmatrix} 1 - 2(\varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2) & 2(\varepsilon_1\varepsilon_2 + \varepsilon_3\eta) & 2(\varepsilon_1\varepsilon_3 - \varepsilon_2\eta) \\ 2(\varepsilon_1\varepsilon_2 - \varepsilon_3\eta) & 1 - 2(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_3^2) & 2(\varepsilon_2\varepsilon_3 + \varepsilon_1\eta) \\ 2(\varepsilon_1\varepsilon_3 + \varepsilon_2\eta) & 2(\varepsilon_2\varepsilon_3 - \varepsilon_1\eta) & 1 - 2(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2) \end{bmatrix}$$

Dinámica - I

- Para obtener los valores de las fuerzas se define la implicación de los valores de las velocidades longitudinales y las orientaciones respecto a los centros de masa.

$$f = m \frac{d}{dt} [R_B^I (\nu_1 + \nu_2 \times r_c^b)]$$

- Se puede hacer una representación usando combinaciones de las velocidades del cuerpo.

$$\tau_1 = m\dot{\nu}_1 + m\dot{\nu}_2 \times r_c^b + m\nu_2 \times \nu_1 + m\nu_2 \times (\nu_2 \times r_c^b)$$

- Para el caso de los pares también se puede generalizar de dicha manera

$$\tau_2 = I_c^b \dot{\nu}_2 + \nu_2 \times (I_c^b \nu_2) + m\nu_2 \times (\nu_1 \times r_c^b) + m\dot{\nu}_1 \times r_c^b$$

Dinámica - II

- Se puede hacer la representación de fuerzas y pares en una forma canónica en la cual se agrupan valores de acuerdo a componentes de masa y de efecto Coriollis.

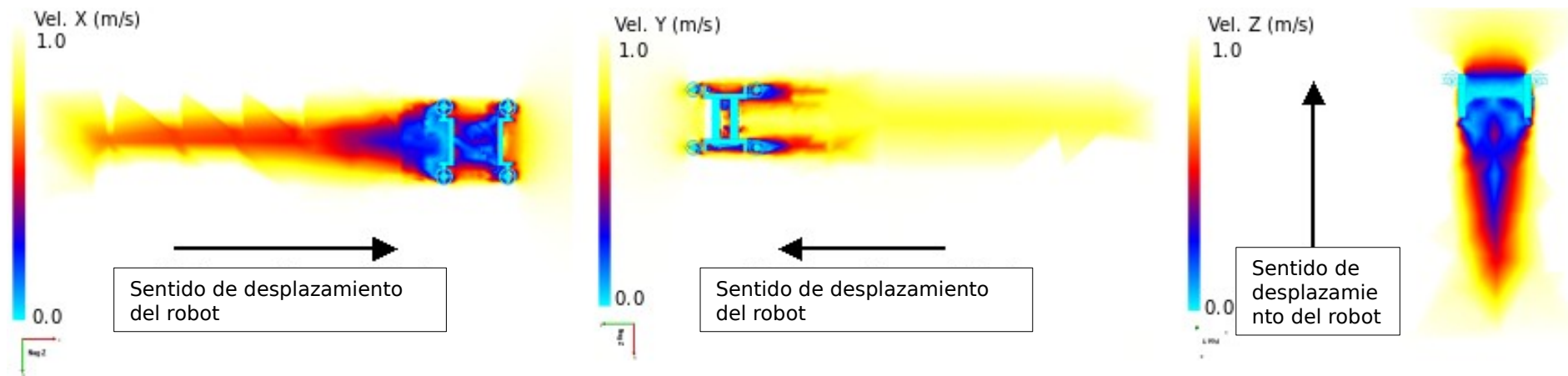
$$M_{RB}\dot{\nu} + C_{RB}(\nu)\nu = \tau \quad M_{RB} = \begin{bmatrix} mI_3 & -mS(r_c^b) \\ mS(r_c^b) & I_o \end{bmatrix}$$

- La matriz de masas debe ser definida positiva.
- La matriz de Coriollis estará en función de parámetros de la matriz de masas.

$$M = M^T = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} > 0 \quad C_{RB}(\nu) = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & -S(M_{11}\nu_1 + M_{12}\nu_2) \\ -S(M_{11}\nu_1 + M_{12}\nu_2) & -S(M_{21}\nu_1 + M_{22}\nu_2) \end{bmatrix}$$

Coeficientes Hidrodinámicos - I

- Existen varios efectos hidrodinámicos que afectan a los cuerpos rígidos sumergidos en el agua.
- Para este caso se tratarán el efecto de la masa añadida y el de el coeficiente de fricción viscosa.
- En una simulación CFD se puede determinar parámetros de este tipo, sin embargo están supeditados a la geometría del cuerpo.



Coeficientes Hidrodinámicos - II

- Los efectos hidrodinámicos pueden ser modelados a partir de los efectos de la masa añadida, los efectos de Coriolis añadido y el coeficiente de fricción viscoso del fluido.

$$\tau_{hyd} = M_A \dot{\nu} + C_A(\nu)\nu + D(\nu)\nu$$

- La **masa añadida** es un componente de los efectos hidrodinámicos en los cuales el agua circundante al cuerpo ejerce un efecto análogo a como si se tuviera una masa de más en el desplazamiento.

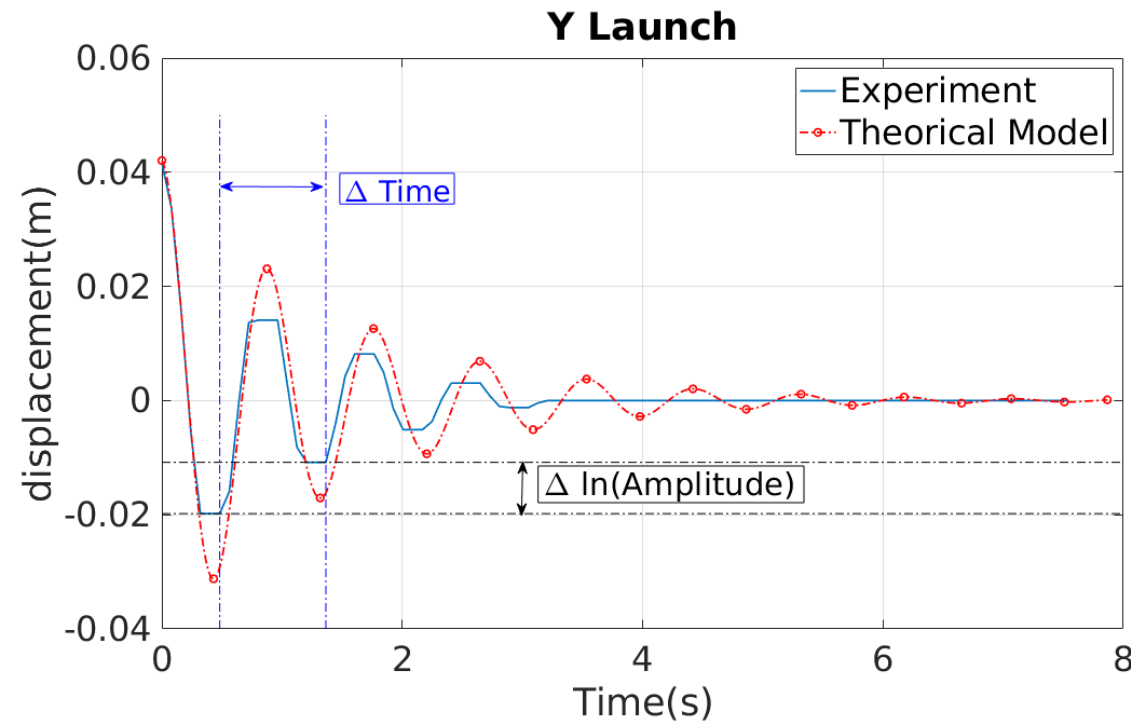
$$M_{A_{xyz}} = \begin{bmatrix} C_{mx}\rho\nabla & 0 & 0 \\ 0 & C_{my}\rho\nabla & 0 \\ 0 & 0 & C_{mz}\rho\nabla \end{bmatrix}$$

- El **coeficiente de fricción viscoso** genera unas no linealidades al ser un valor que se encuentra en función del cuadrado de la velocidad, también puede ser modelado como la combinación lineal de dos componentes de fricción.

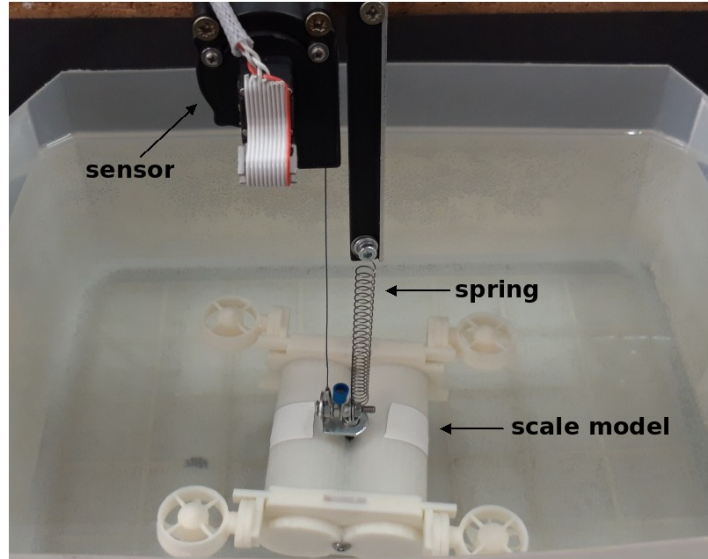
$$D(\nu) = D + D_n(\nu) \quad \tau_v = D\nu + D_n\nu|\nu|$$

Obtención de Coeficientes

- Para el proceso de obtención de coeficientes hidrodinámicos se hace una captura de datos con modelos a escala, en dos tipos diferentes de experimentos. Haciendo un ajuste a un modelo teórico aproximado y así obteniendo los coeficientes.

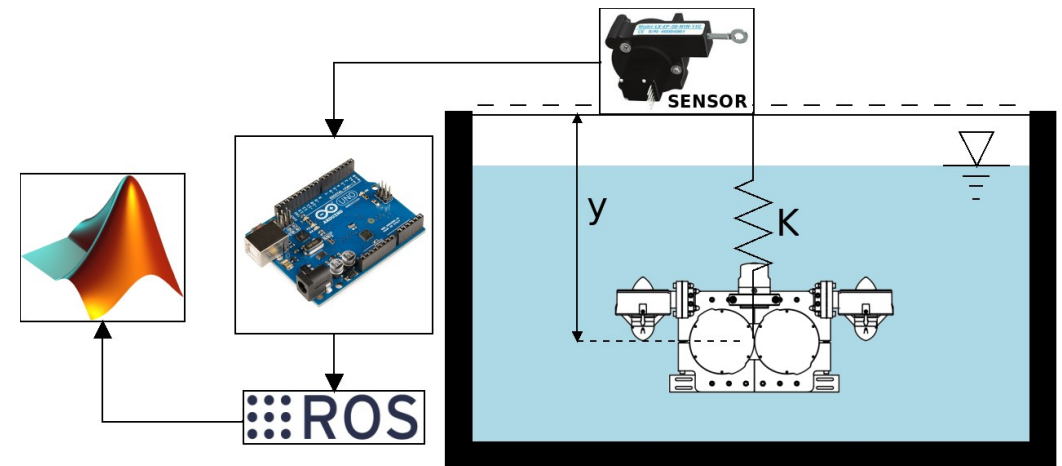


Free Decay - Muelle

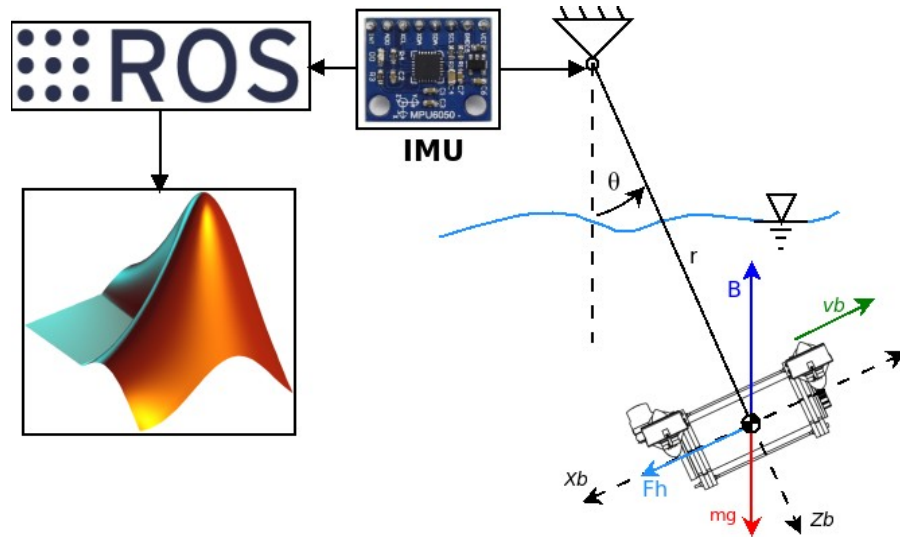


La respuesta a esta caída libre amortiguada respondía a una dinámica de segundo orden con un coeficiente no lineal. Esta identificación permitió la obtención de los coeficientes hidrodinámicos.

Se elaboraron unos bancos de pruebas para la obtención de los coeficientes a partir de modelos a escala. Los bancos de pruebas estaban basados en experimentos de caída libre amortiguada. La posición del modelo a escala representaba una posición que era descrita por un modelo deseado y así se permitía hacer el proceso de identificación.

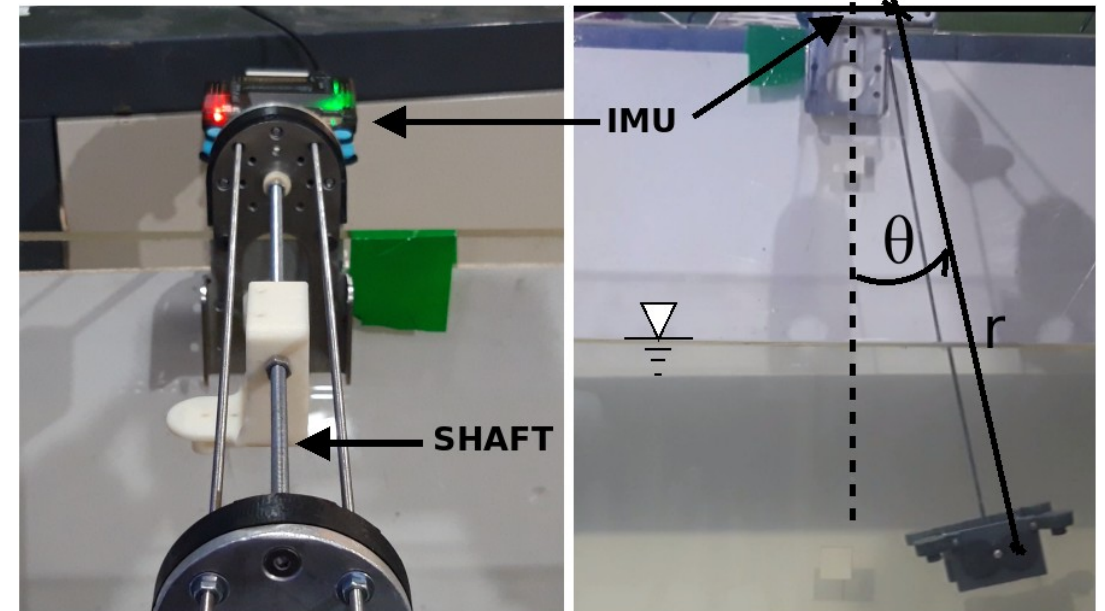


Free Decay - Péndulo



La experimentación tenía la captura de datos basada en comunicar los valores de los sensores, capturarlos y almacenarlos usando ROS, para finalmente post-procesarlos usando Matlab.

Otro experimento realizado para la obtención de los coeficientes uso otro banco de prueba basado en la caída libre de un péndulo. Con esta experimentación se obtenían los valores de los coeficientes hidrodinámicos.



Efectos Gravitatorios

- Dentro de los efectos gravitatorios, el más llamativo es el del peso. Sin embargo, cuando el cuerpo está sumergido en un fluido se genera otro efecto gravitatorio importante: la flotabilidad.
- Una forma de generalizar estos efectos es a partir de la implicación que tiene en el punto de aplicación.
- com = centro de masa
- cob = centro de flotación

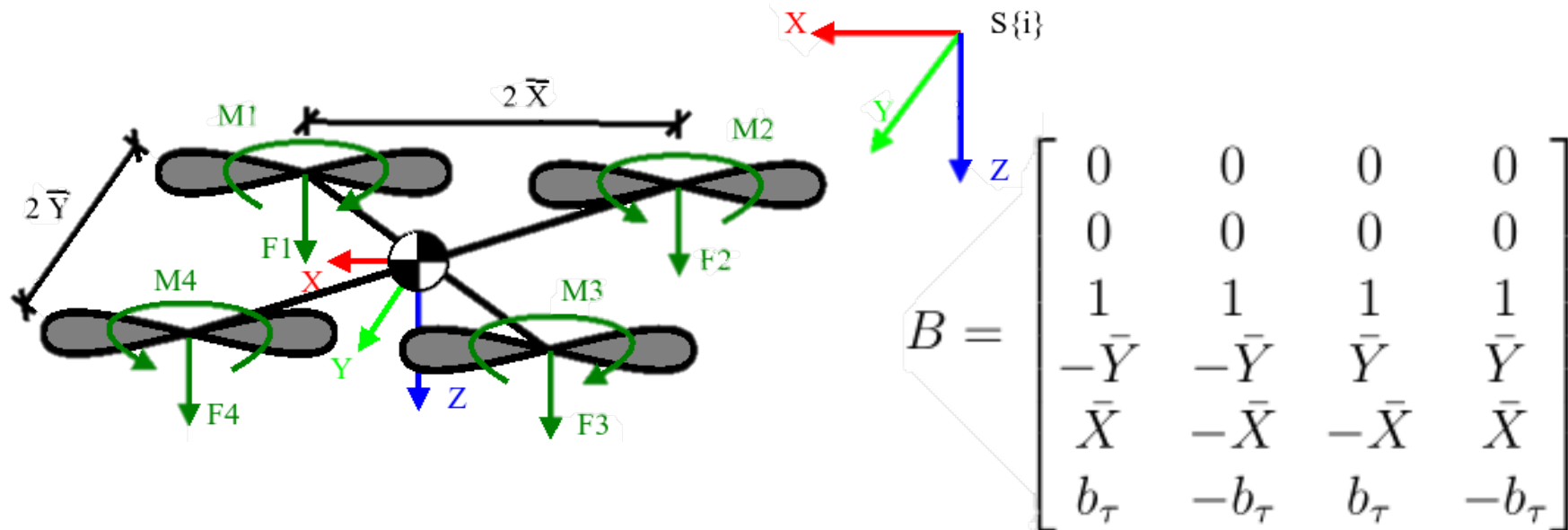
$$f_G(R_I^B) = R_I^B \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ W \end{bmatrix}$$

$$f_B(R_I^B) = R_I^B \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -B \end{bmatrix}$$

$$g_{RB}(R_I^B) = - \left[r_{com}^B \times f_G(R_I^B) + r_{cob}^B \times f_B(R_I^B) \right]$$

Matriz de Impulsores

- Permite relacionar la ubicación de impulsores con el sistema de referencia del robot.
- Relaciona los actuadores con parámetros geométricos del robot.
- La matriz de ubicación de los impulsores se conoce con otros nombres como *Control Mixer*, *Thruster Allocation matrix*



Modelo Matricial Completo

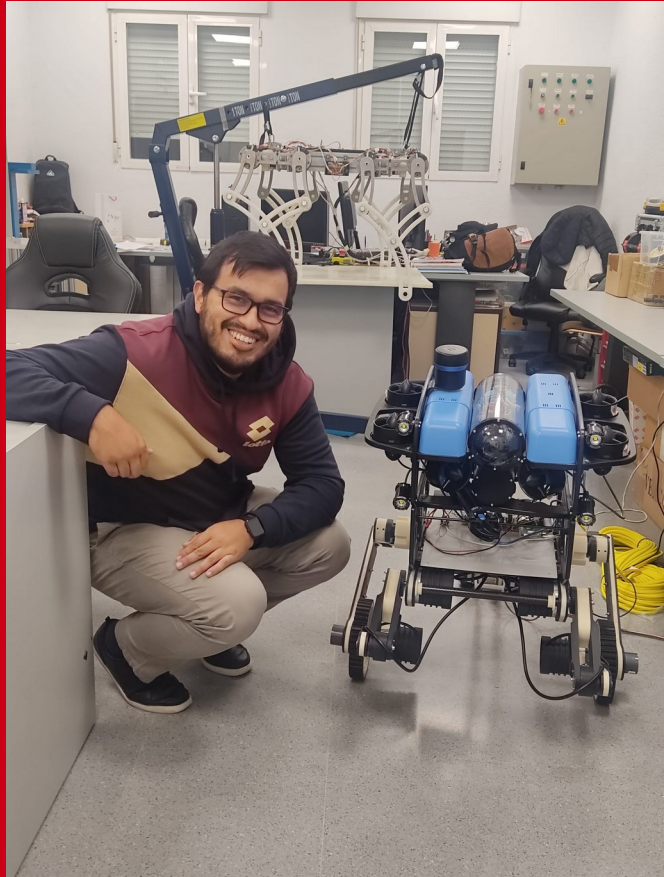
- Se puede concentrar la información del modelo en una expresión matricial que contenga todos sus componentes

$$\underbrace{M_{RB}\dot{\nu} + C_{RB}(\nu)\nu}_{\text{Dinámica de cuerpo rígido}} + \underbrace{M_A\dot{\nu} + C_A(\nu)\nu + D_n(\nu)\nu}_{\text{Efectos Hidrodinámicos}} + \underbrace{g_{RB}(R_I^B)}_{\text{Efectos Gravitacionales}} = \underbrace{Bu}_{\text{Entrada}}$$

$$M\dot{\nu} + C(\nu)\nu + D_n(\nu)\nu + g_{RB}(R_I^B) = Bu$$

- Si se desea se puede expresar de tal manera que este en función del sistema de referencia inercial

$$M^*\ddot{\eta} + C^*(\dot{\eta})\dot{\eta} + D_n^*(\dot{\eta})\dot{\eta} + g_{RB}^*(R_I^B) = \tau^*$$



**MUCHAS GRACIAS
POR SU ATENCIÓN**

Juan Sebastian Cely Gutierrez
Ph.D. en Automática y Robótica
Profesor Ayudante Doctor
juan.cely@urjc.es
<https://juanscelyg.github.io>
Fuenlabrada, Madrid, España