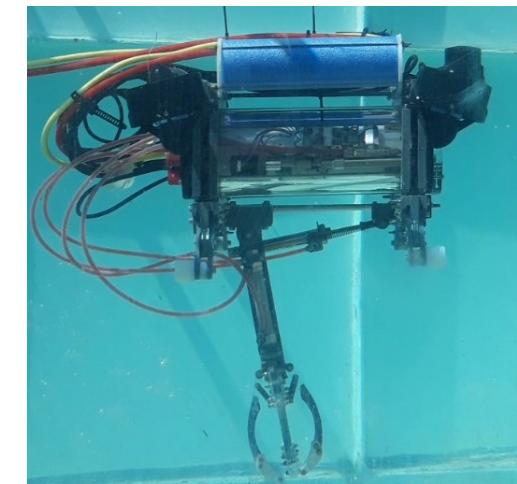
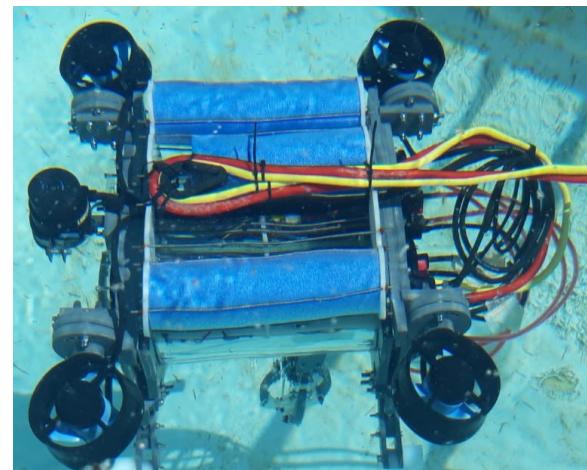


# MECATRÓNICA EN UN PROYECTO REAL

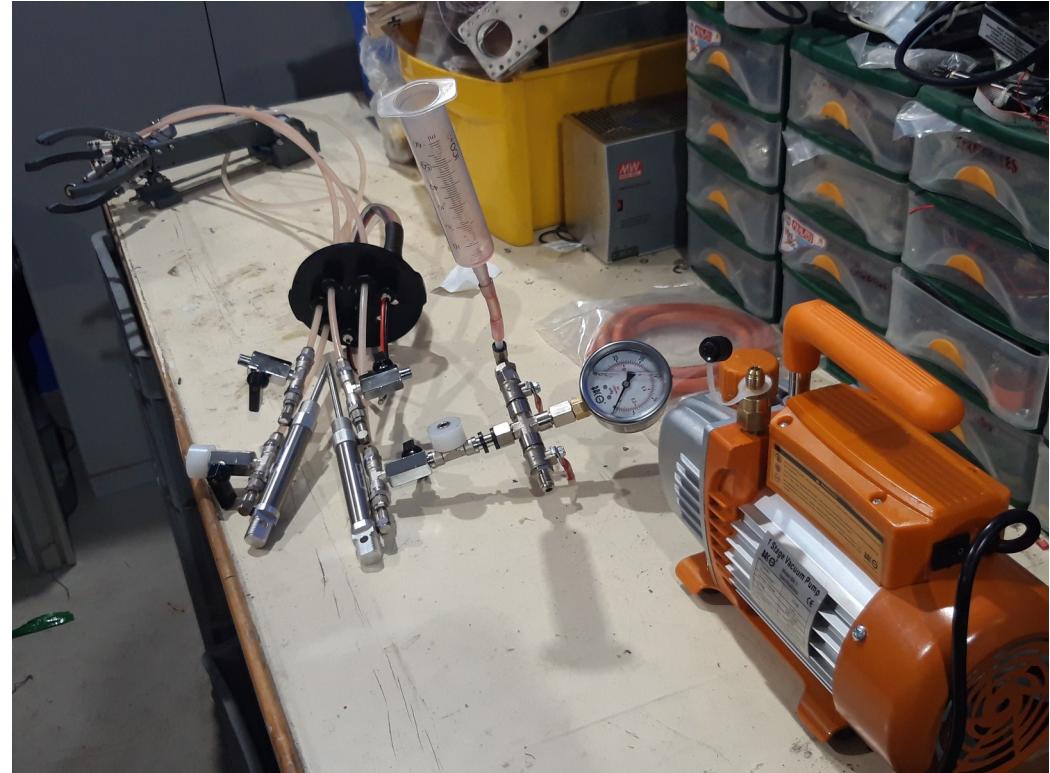
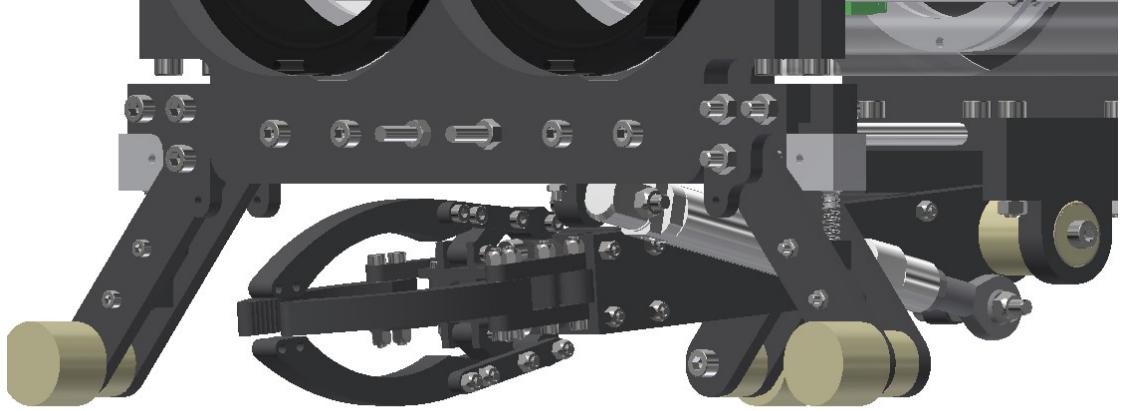


**PARTE III :**

**SISTEMA DE MANIPULACIÓN**

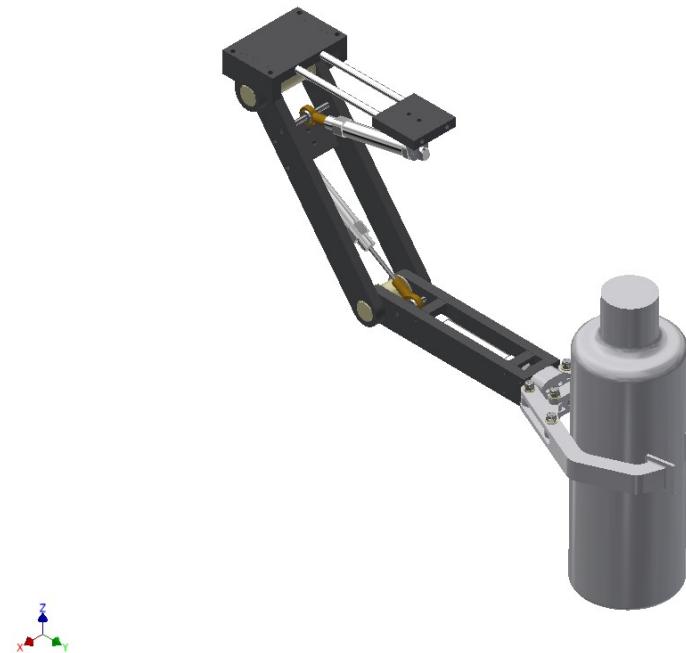
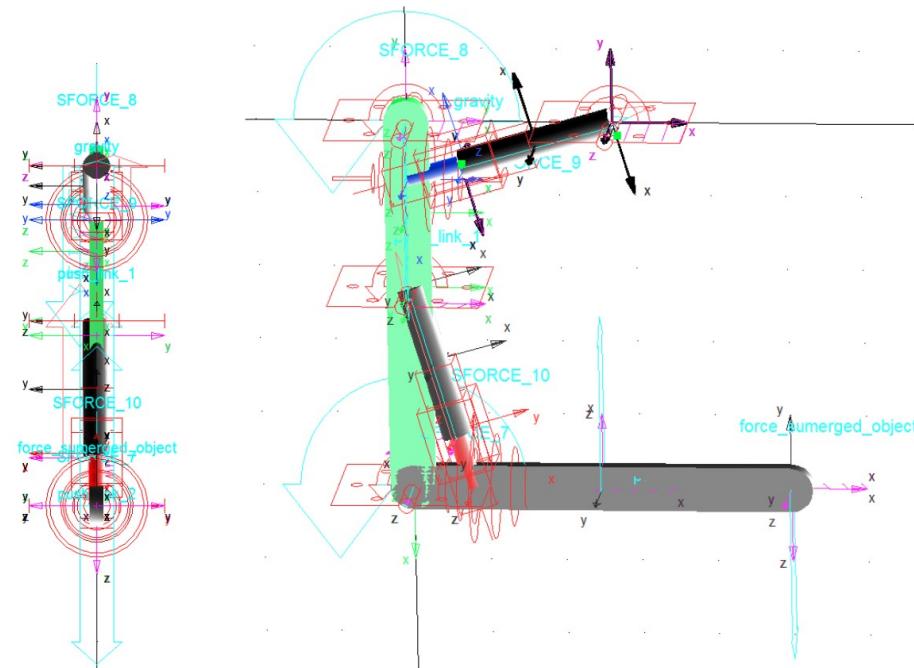
Asignatura: Mecatrónica  
Grado en Ingeniería de Robótica Software

# 5. SISTEMA DE MANIPULACIÓN



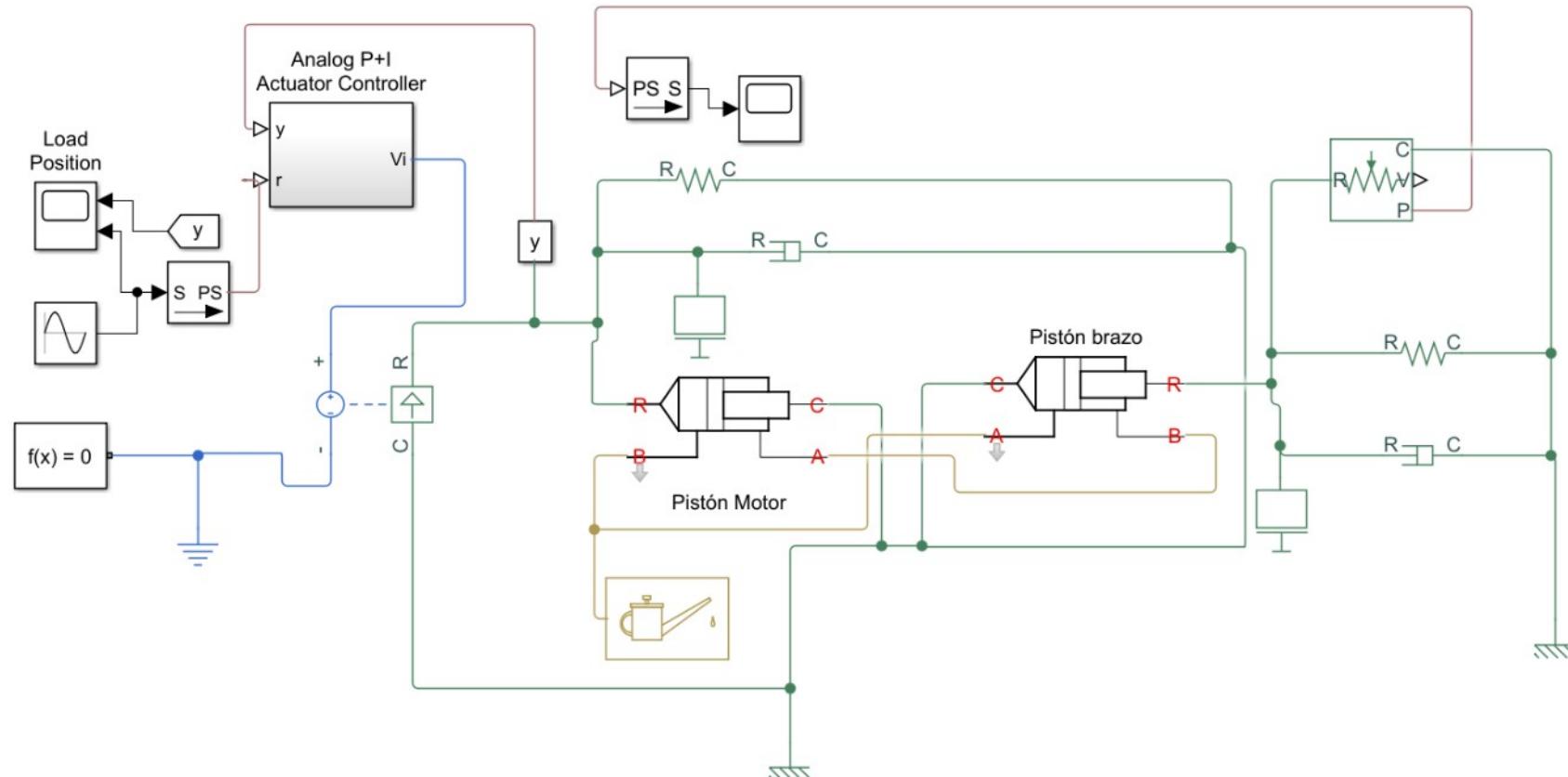
# Problemas de la transferencia de Potencia

- En la concepción del proyecto se ha propuesto un mecanismos de brazo robótico para ser acoplado en la parte inferior del robot. Esto permitiría dotar al robot de capacidades de manipulación. Sin embargo, los motores para cada articulación tendrían que estar expuestos al agua y a profundidades mayores a 5 metros durante periodos prolongados de tiempo.
- Es por esta razón que la transferencia de potencia en este caso se debería de hacer mediante un sistema que sea estanco y no permita que el agua acceda a su interior.



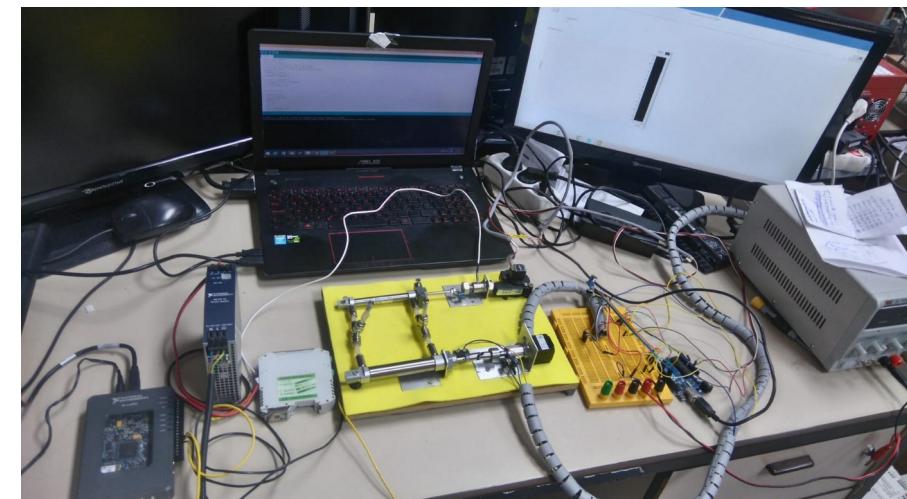
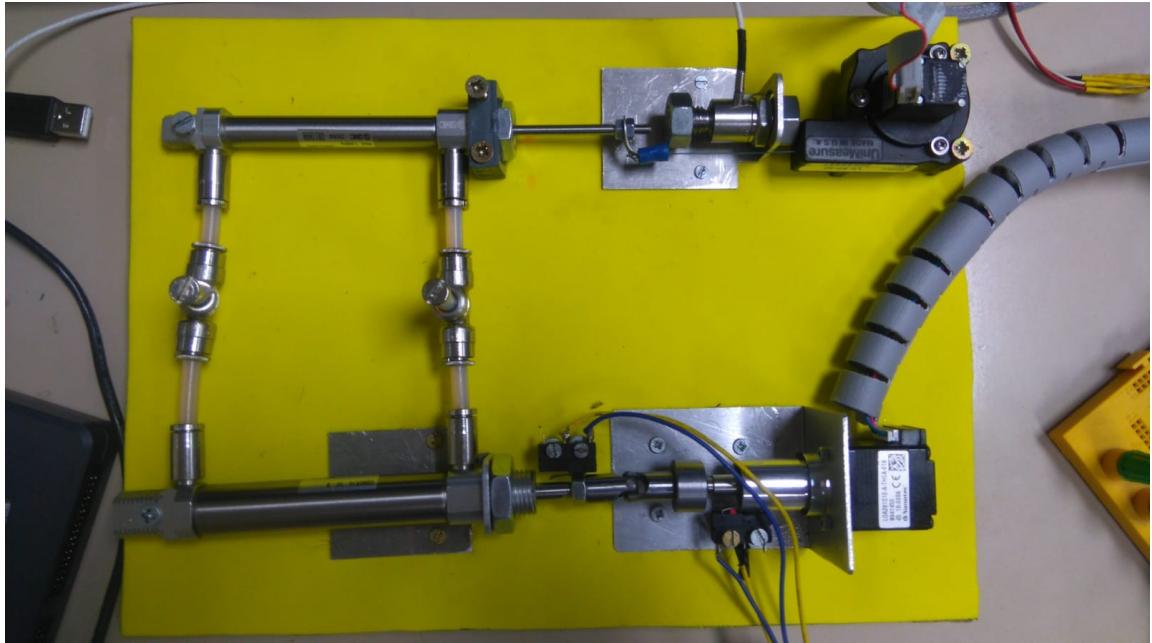
# Sistema Propuesto

- Se ha propuesto un sistema donde un motor eléctrico de desplazamiento lineal transfiera la potencia a un actuador hidráulico. El desplazamiento del fluido no comprensible se ve reflejado en un actuador hidráulico conectado al otro lado del conducto de aceite, donde dicho actuador está ejerciendo un movimiento a una carga previamente configurada.



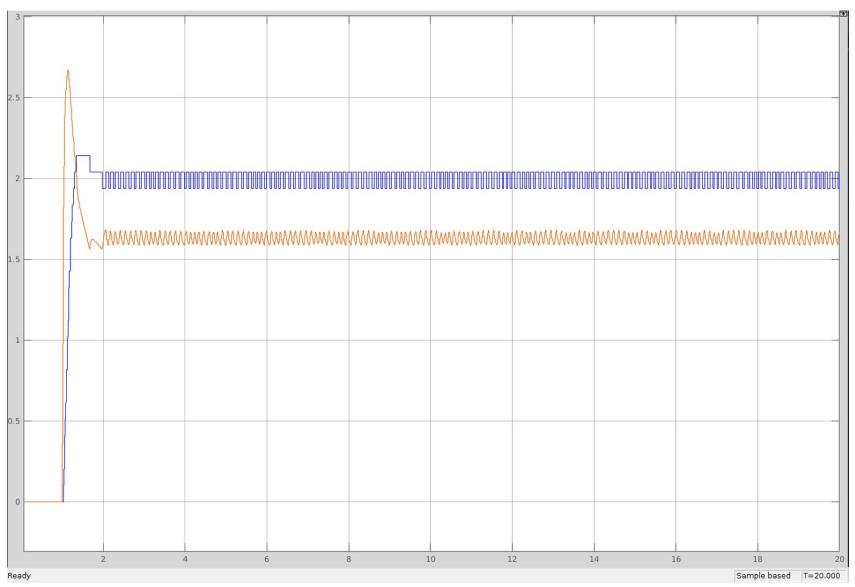
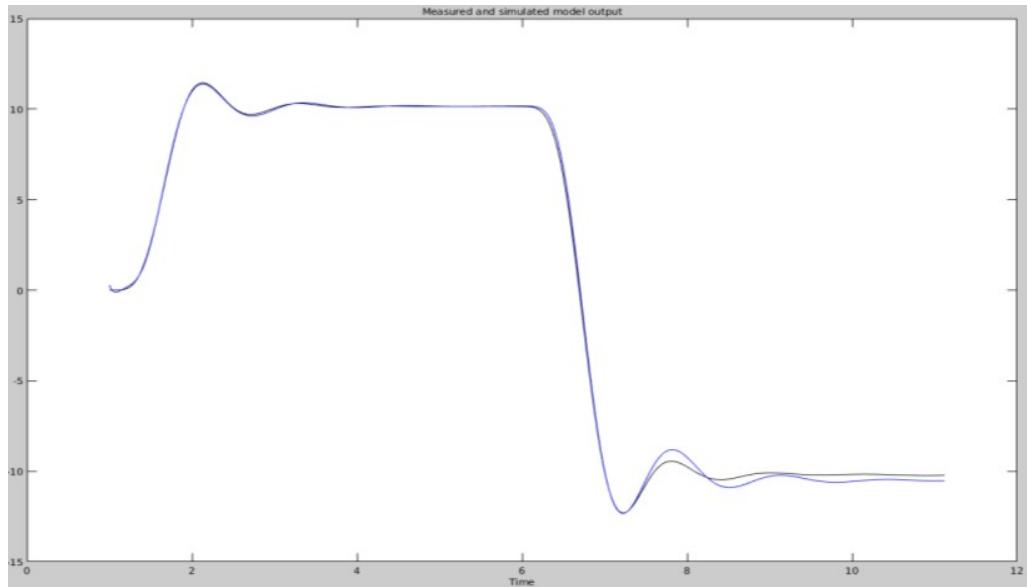
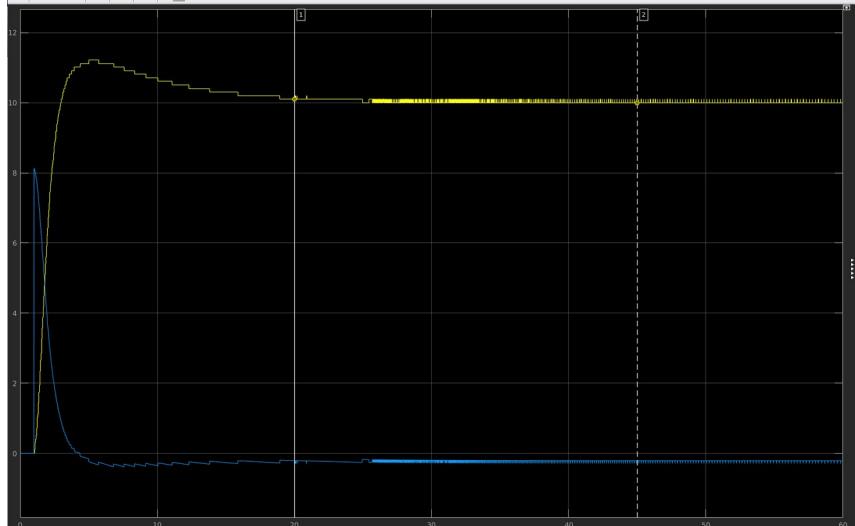
# Testbench y Validación

- Se propuso como una plataforma de validación un esquema donde los cilindros están conectados por dos líneas hidráulicas
- Un motor de desplazamiento longitudinal transfiere el movimiento al cilindro de entrada. Un sensor de longitud mide el desplazamiento del vástago del cilindro de salida. A su vez dicho motor contacta con una celda de carga para medir fuerza.
- El motor es gestionado por una tarjeta Arduino que envía señales a un driver propio del motor a pasos.
- El valor de la fuerza ejercida por el cilindro de salida es medido por una celda de carga que se mide usando una tarjeta de adquisición de voltaje diferencial, este es conectada a una MyRio de Ni. La cual es visualizada en Labview.



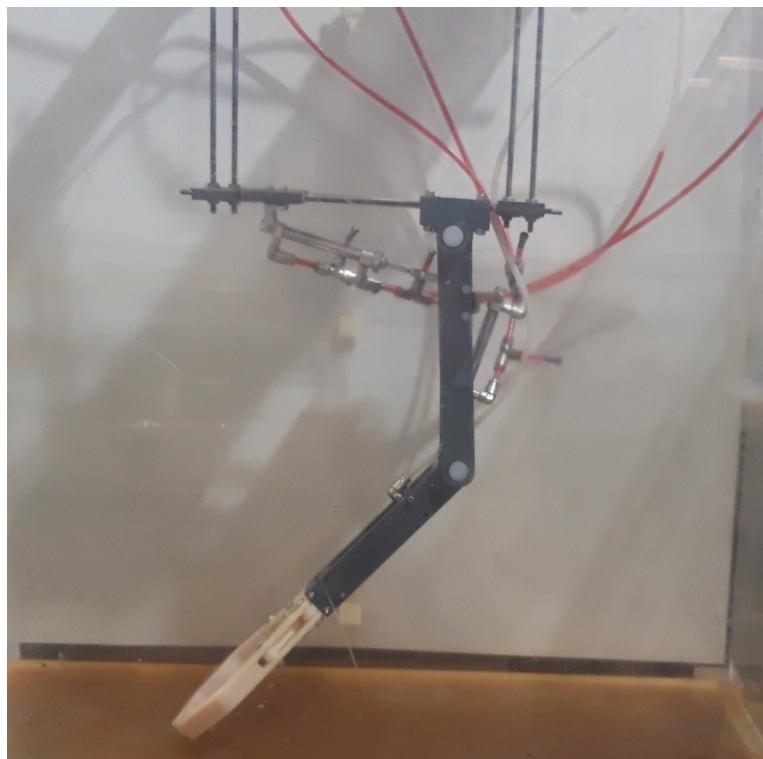
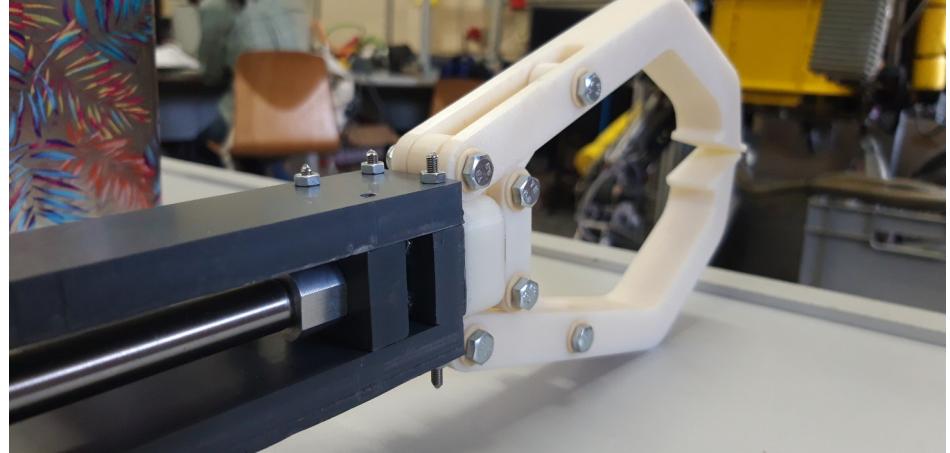
# Identificación del Sistema

- El proceso de identificación se baso no solo en los desplazamientos de salida respecto a los de entrada, sino en la relación entre el desplazamiento en la entrada y la fuerza que se realiza en la salida.
- El sistema identificado es un sistema de segundo orden con sobre impulso que fue controlado con un controlador del tipo PD.



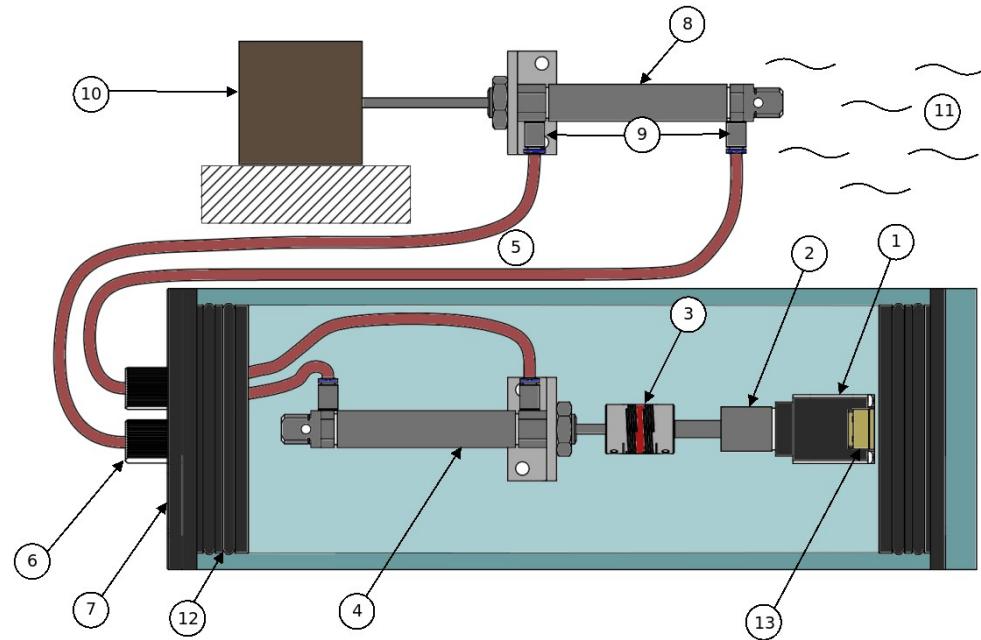
# Resultado y Análisis

- Encontramos que los movimientos de los motores eléctricos podían desplazar el aceite en las líneas hidráulicas y así transferir la potencia mecánica al actuador distante.
- Esto nos abrió la posibilidad de proponer esta metodología como una nueva forma de transferir potencia en mecanismos bajo el agua.
- El poseer dos grados de libertad más la garra era sobre-dimensionado, por lo que se tiene que reducir un grado para el sistema final.
- Las burbujas en las líneas hidráulicas generan perdidas de potencia ya que el aire en ellas es compresible. Se tiene que garantizar un sellado hidráulico además de si es posible contar con acumuladores en cada línea.



# Patente

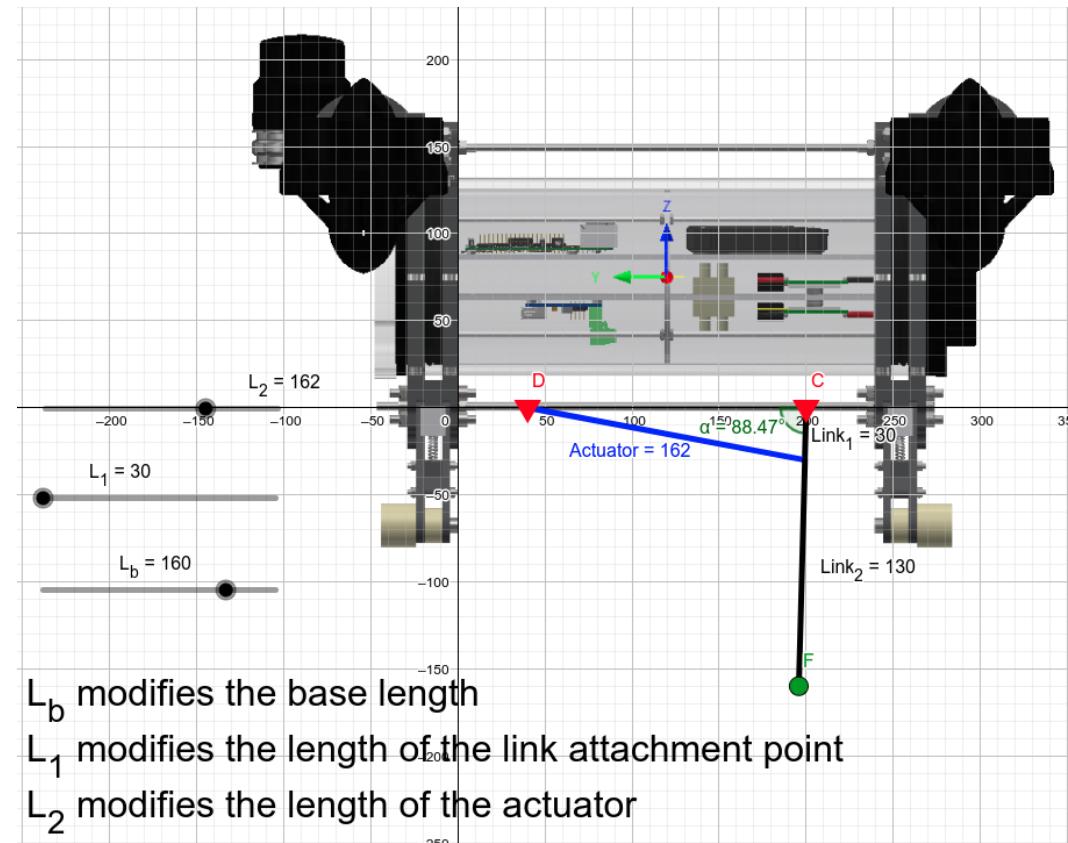
- En vista que se evidencio la utilidad del sistema propuesto para ser utilizado en condiciones subacuáticas. Se propuso hacer una patente para así proteger la nueva creación.
- Aunque el sistema conserva cierta similitud con los que suelen usar los sistemas de las grúas o de las máquinas de la construcción, la ventaja es que no se requiere un sistema que garantice la presión en la linea hidráulica



1. Motor eléctrico 2. Reductor 3. Acople de ejes 4. Actuador Hidráulico de entrada 5. Conductos hidráulicos 6. Penetradores 7. Tapas para los cilindros 8. Actuador de salida 9. Conectores roscados estancos 10. Carga a mover 11. Ambiente peligroso 12. Toroides

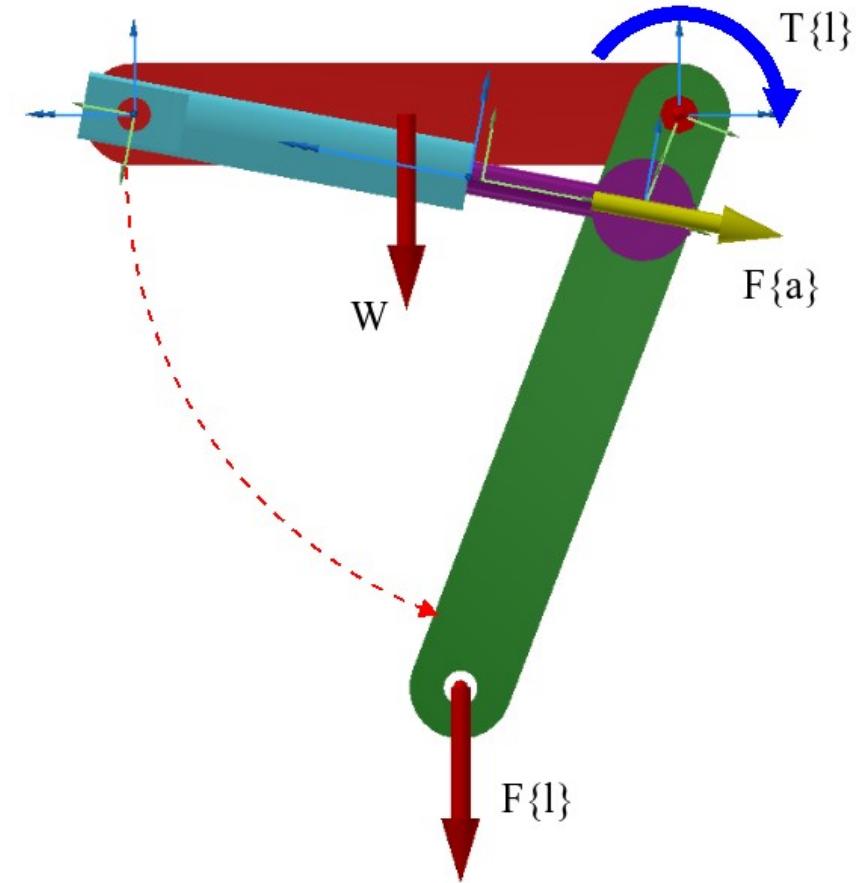
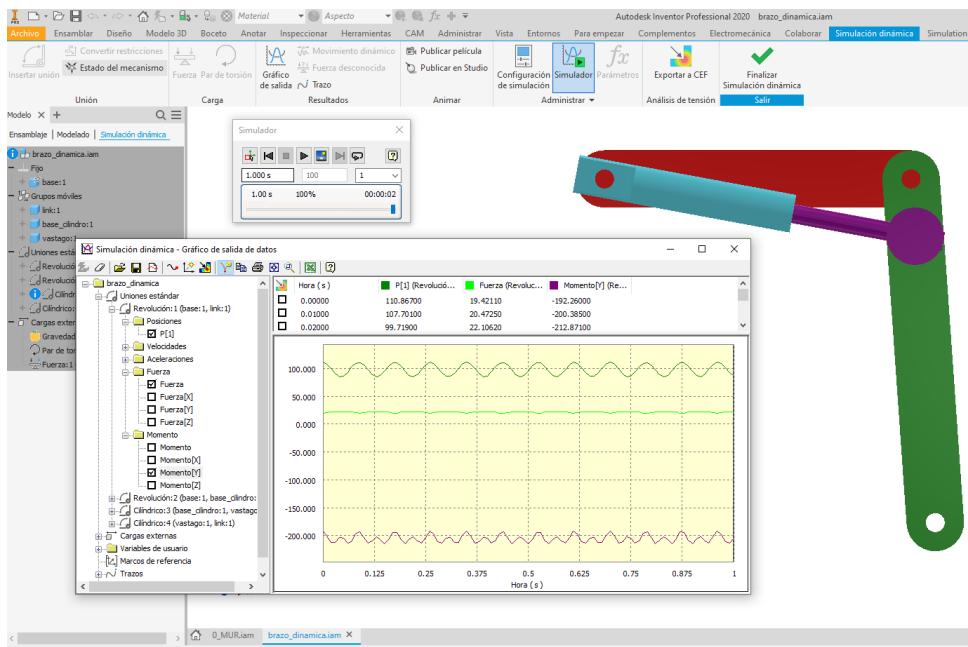
# Dimensionamiento

- Las longitudes se eligieron de acuerdo a un dimensionamiento realizado en el software Geogebra. Con ello se realizaron varias pruebas respecto a la a los ángulos y longitudes requeridas.
- Las diferentes configuraciones de longitudes permitían elegir unas longitudes que satisfacen lo deseado en términos de operatividad.
- Este dimensionamiento solo permite elegir unas distancias y visualizar unos ángulos, pero en ningún momento es posible determinar fuerzas.



# Dinámica del Mecanismo

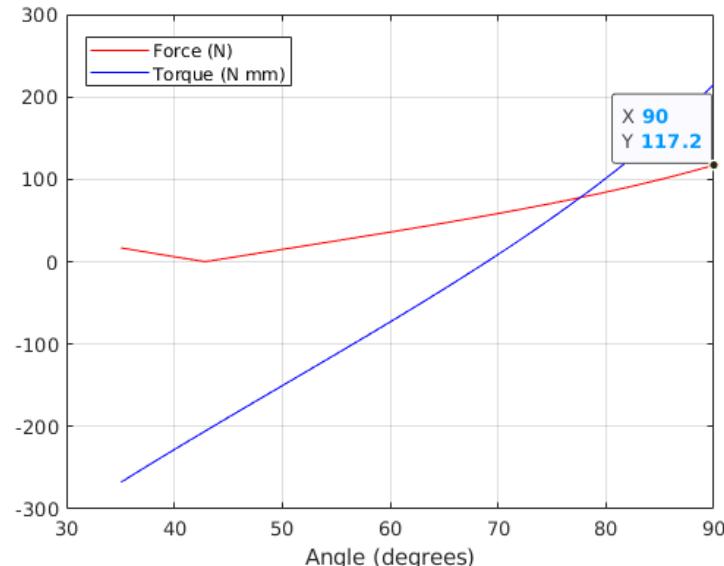
- Para realizar el diseño geométrico del brazo, se optó por hacer una simulación dinámica y así dimensionar los motores, dicha simulación se realizó con el componente dinámico de Inventor Autodesk.



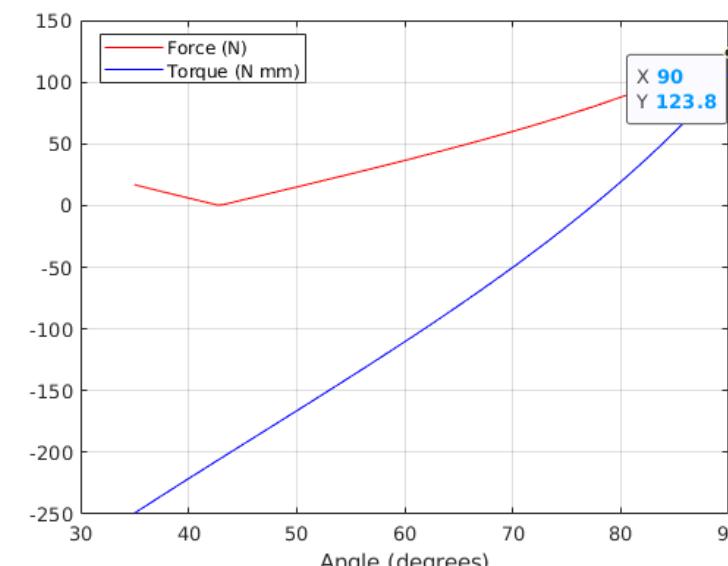
# Selección de Motores

- La selección de motores estuvo basada en los valores más elevados del par que debería realizar cada uno de las articulaciones en el modelo dinámico aproximado.
- Para obtener los valores de más elevados se puede realizar de varias formas, siendo la de movimientos en situaciones extremos la usada para este caso. No es valido solo contemplar los valores estáticos

Motor Garra

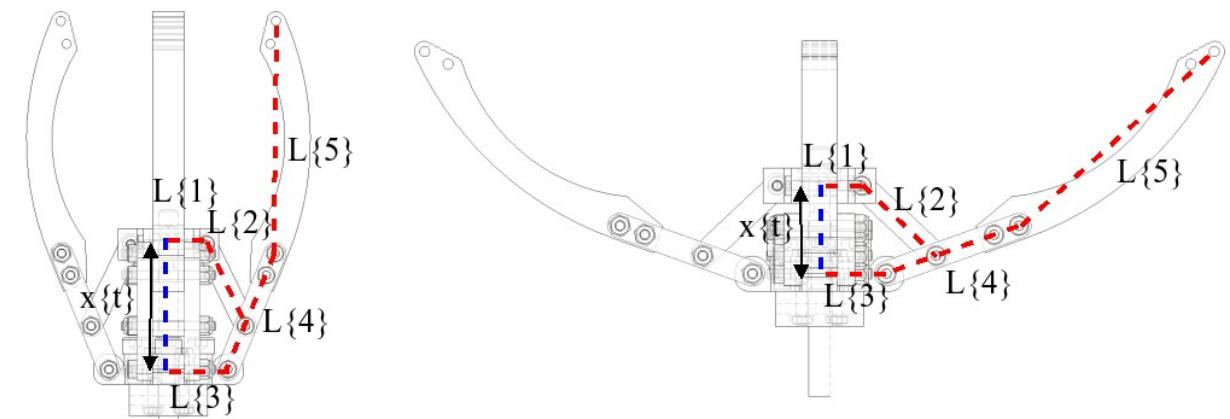
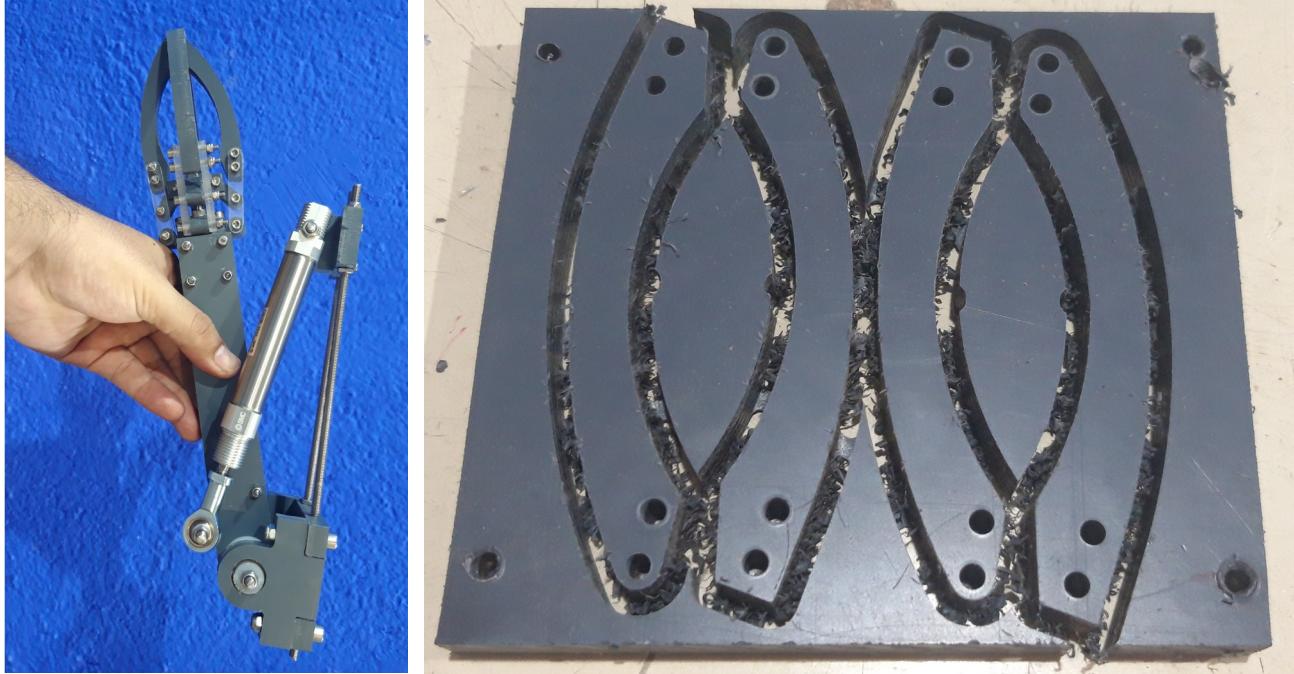


Motor Base



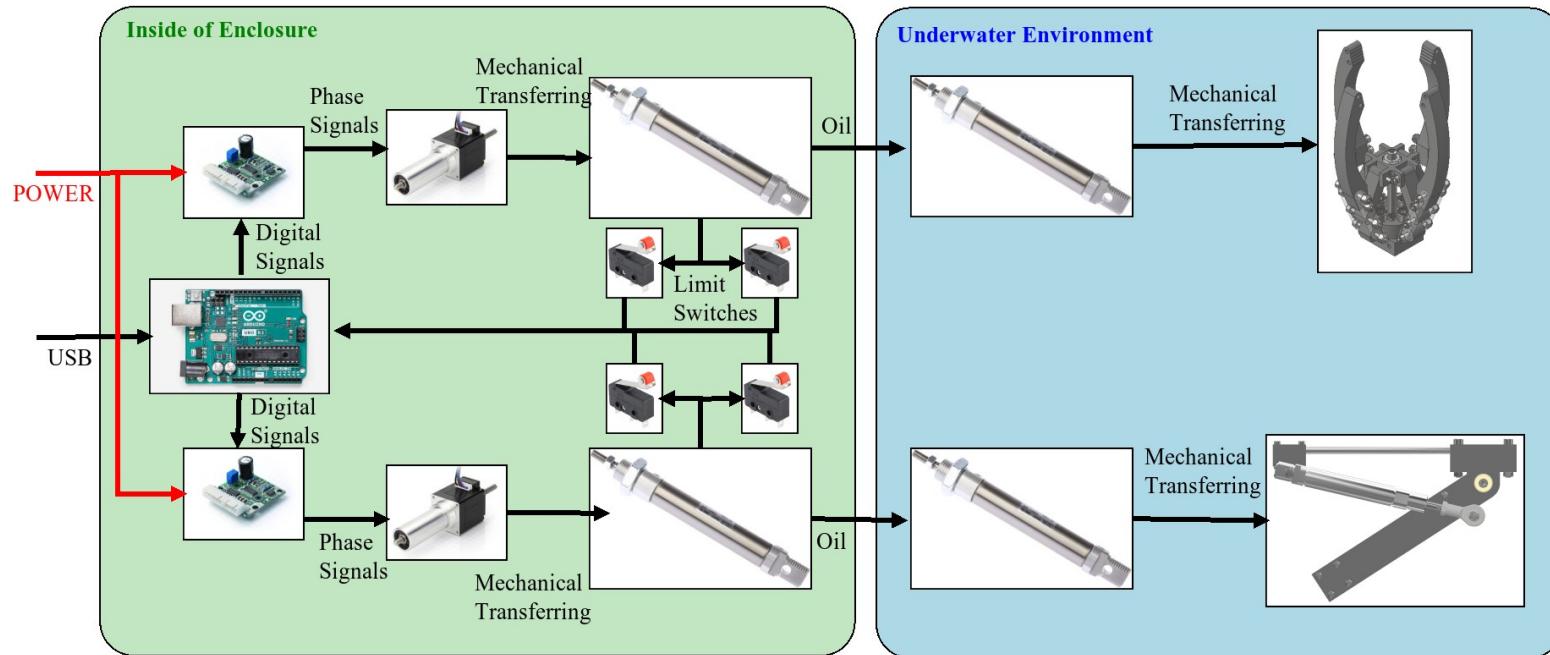
# Diseño mecánico

- Para este caso el diseño propuesto estuvo restringido a los valores estimados en la simulación dinámica. Sin embargo, fue un proceso iterativo con minimas correcciones.
- Los valores de la longitud de cada uno de los eslabones de la garra fueron pensados para que pudiera agarrar una esfera de 8 cm diámetro, el cual es un valor que coincide con los estándares de la ergonomía.



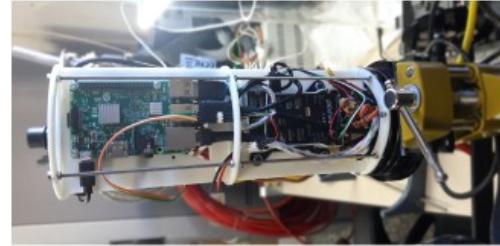
# Diseño Electrónico

- Esquema donde se visualiza que componentes se encuentran dentro del cilindro de manipulación y cuales se encuentran en el exterior del robot.

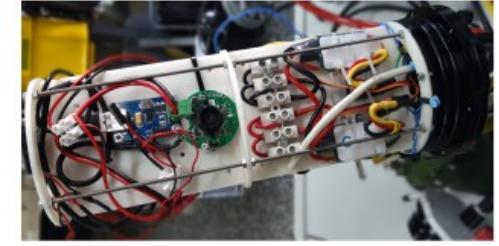


# Fabricación y Montaje

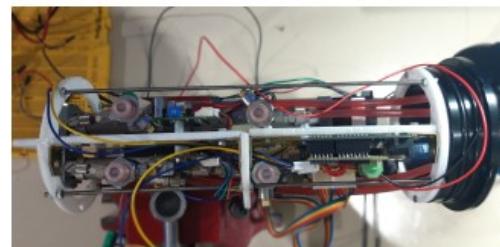
- a) Vista superior del cilindro principal
- b) Vista inferior del cilindro principal
- c) Vista superior del cilindro de la manipulación
- d) Vista Lateral del cilindro de la manipulación
- e) Brazo y garra antes de ser instalados en el robot.



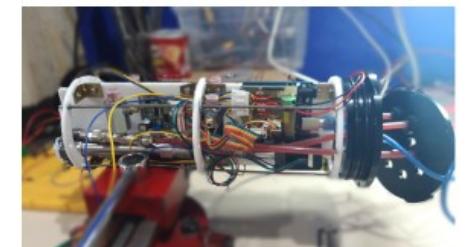
a)



b)



c)

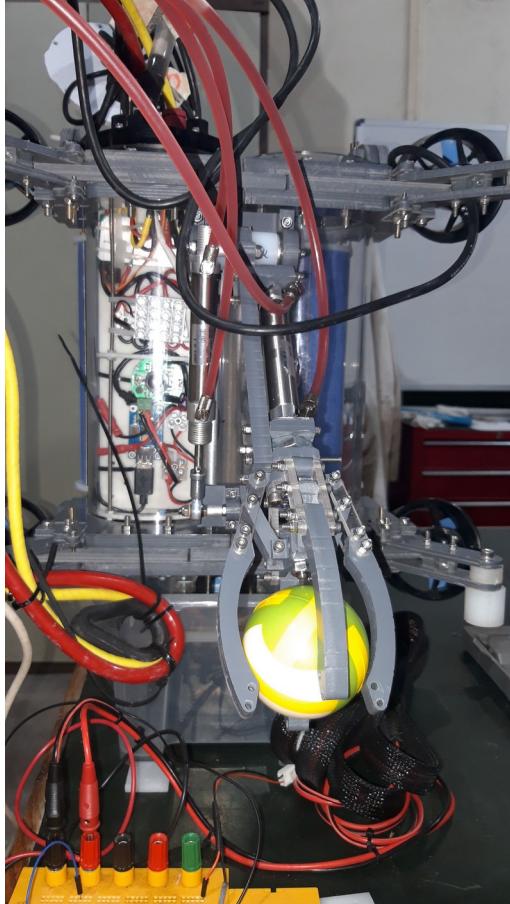


d)



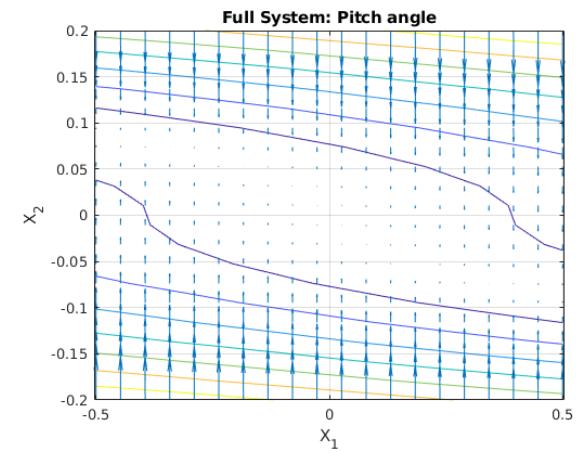
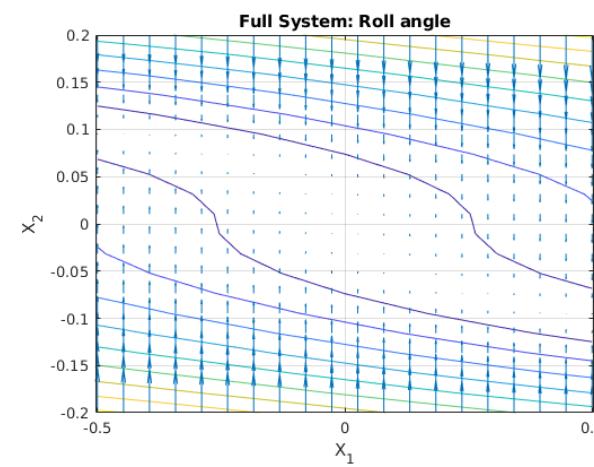
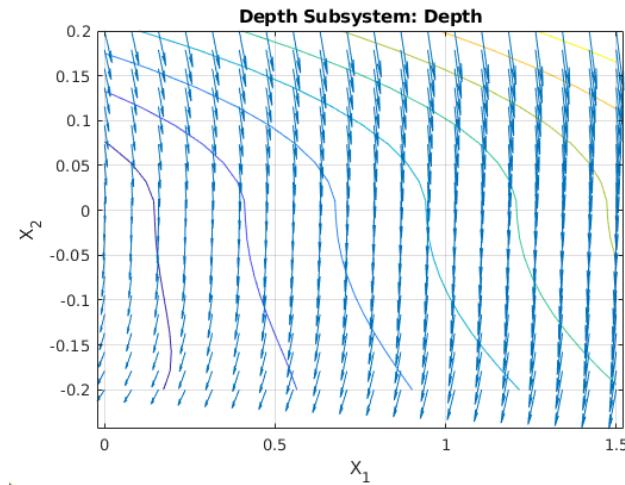
e)

# Validación



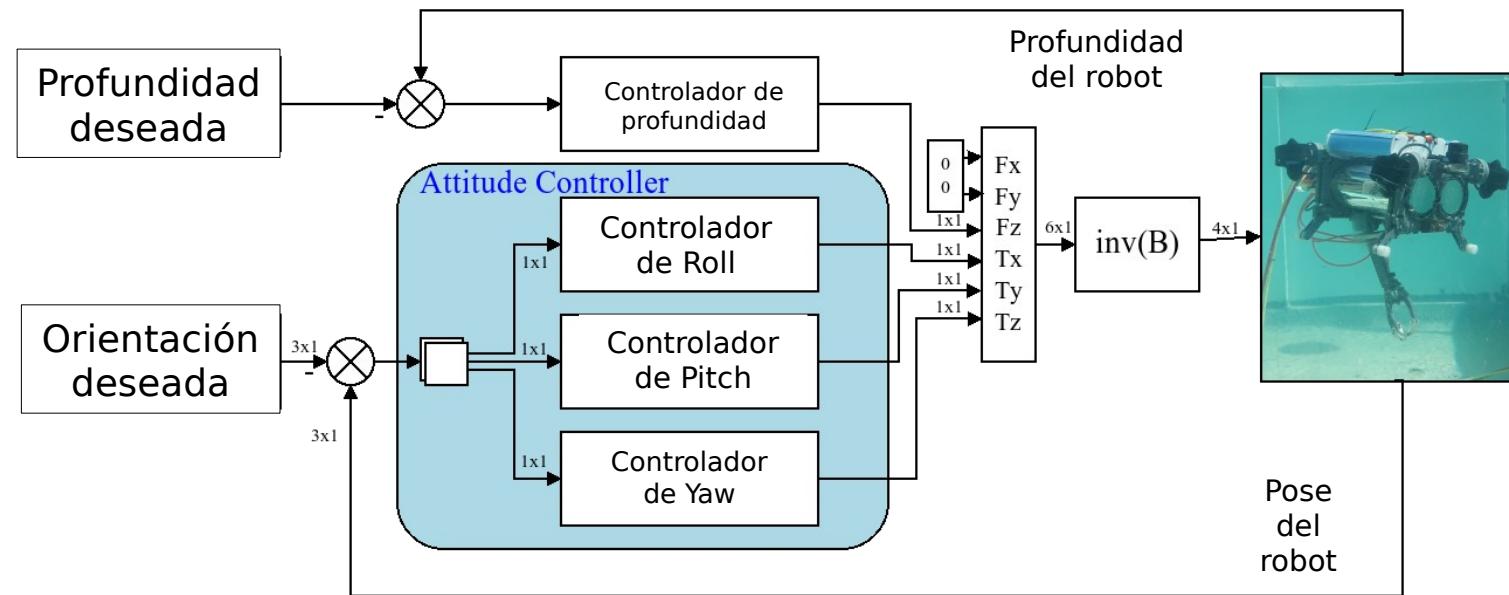
- Se logró hacer la implementación en el robot. Esto requirió insertar en el tubo dedicado a la tecnología del brazo toda la electrónica y sistemas de transmisión de potencia.
- El sistema permitía hacer los desplazamientos proyectados, lo que permitiría hacer la puesta en marcha de las pruebas en el tanque.

# 6. SISTEMA DE CONTROL



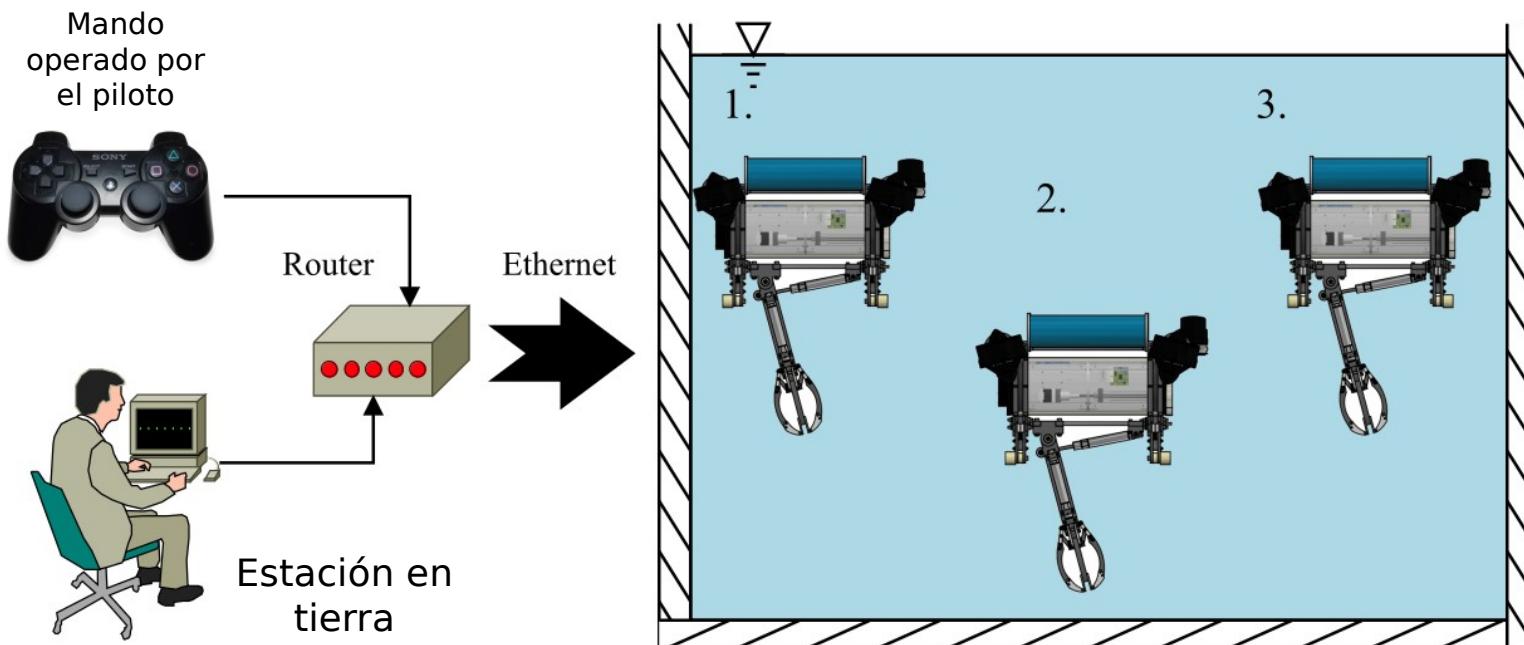
# Definición de pruebas

- Como un esquema general se planteo hacer un controlador desacoplado, ya que cada uno de los subsistemas obtenidos lo permite.
- Para el caso del Control Geométrico la implementación se hace solo en dos subsistemas.



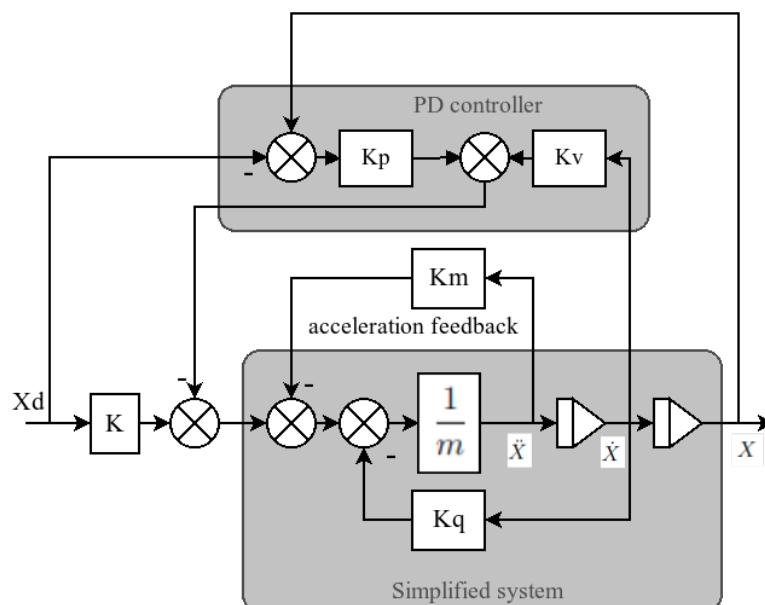
# Metodología

- Se plantearon dos metodologías para validar cada controlador.
  1. Como reacciona frente a una perturbación.
  2. Como es capaz de seguir trayectoria para cada estado.
- A su vez cada metodología consistía en 3 pasos (Inicio, Ejecución y Fin), cada uno con tiempos delimitados.



# Acceleration Feedback Controller - I

- El controlador por realimentación de la aceleración consiste en un controlador de tipo Proporcional-Derivativo con una realimentación de aceleración y una compensación de la entrada.
- Este controlador no es aplicable a modelos con efectos cruzados.



$$\tau = \tau_{PID} - \kappa_m \ddot{x}$$

$$\tau = \kappa x_d - (\kappa_p \tilde{x} + \kappa_d \dot{x}) - \kappa_m \ddot{x}$$

$$(m + K_m)\ddot{x} + K_q\dot{x}|\dot{x}| + A_{wo}x = \tau_{PID}$$

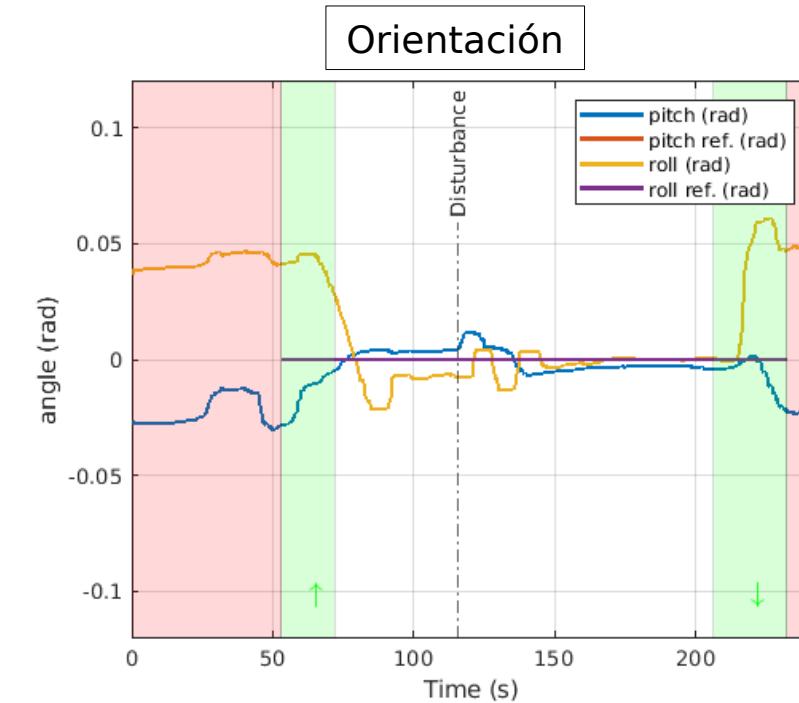
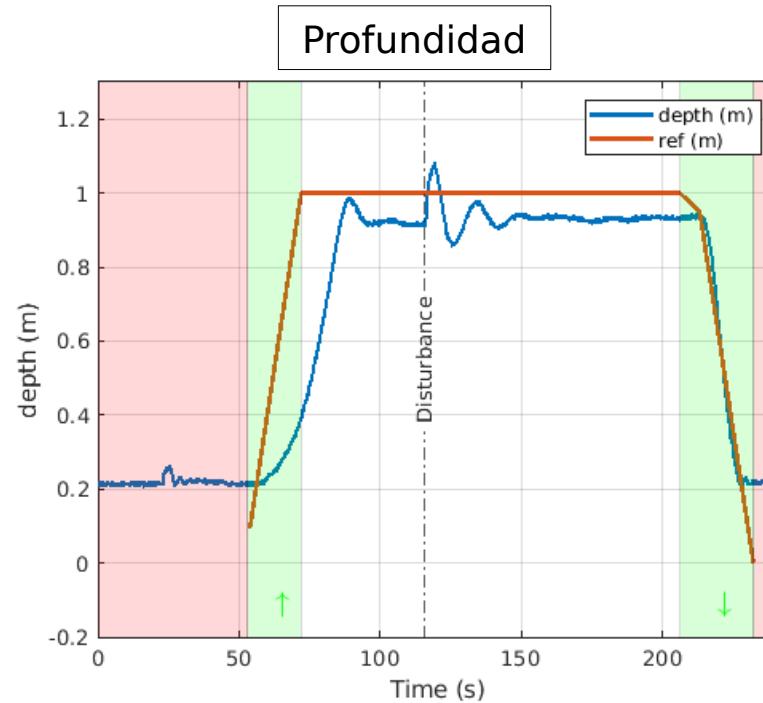
$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{1 - 2\zeta^2 + \sqrt{4\zeta^4 - 4\zeta^2 + 2}}} \omega_b$$

$$\kappa_p = (m + K_m)\omega_n^2 - \kappa - A_{wp}$$

$$\kappa_d = 2\omega_n(m + K_m)\zeta - 2K_q$$

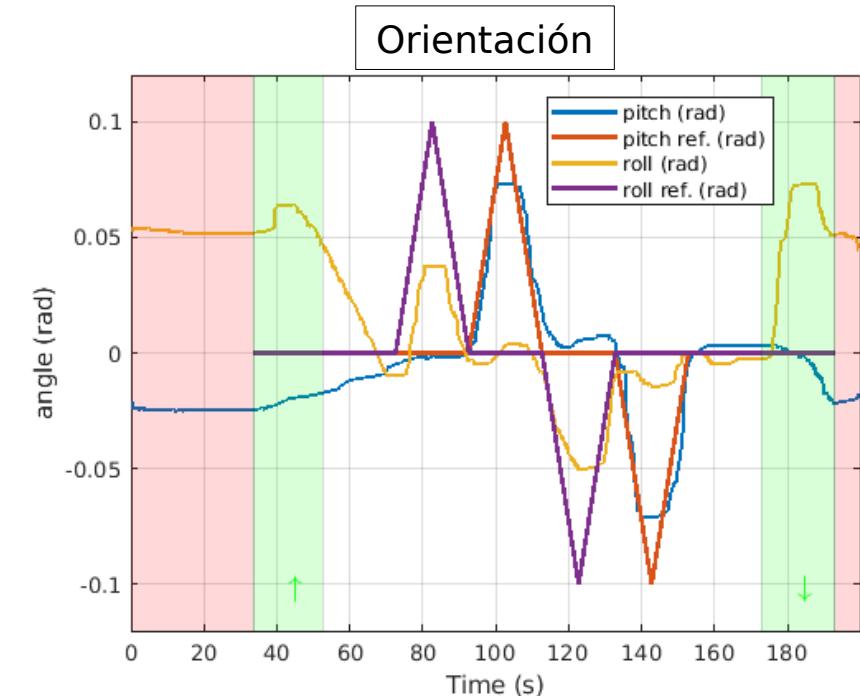
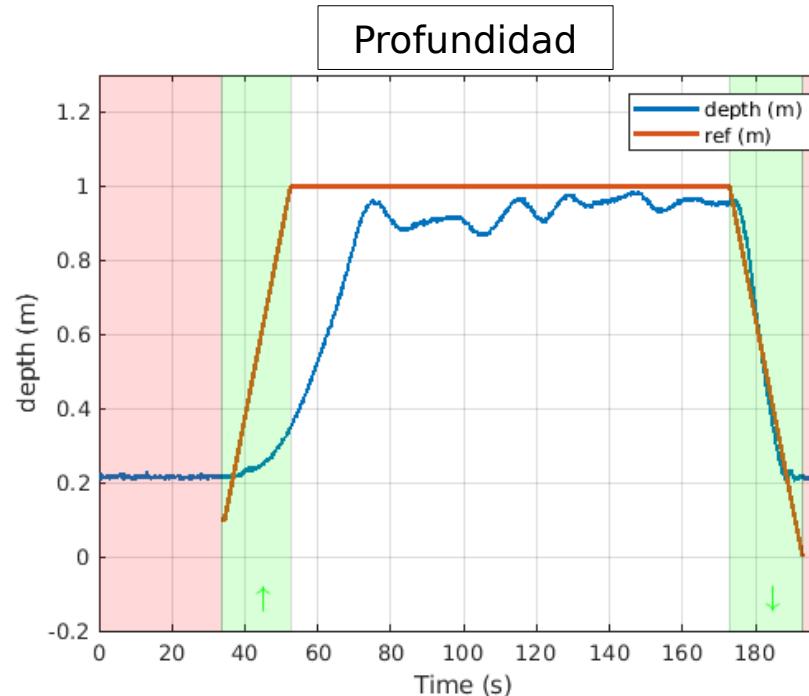
# Acceleration Feedback Controller - II

- RESULTADOS PARA ESTABILIDAD



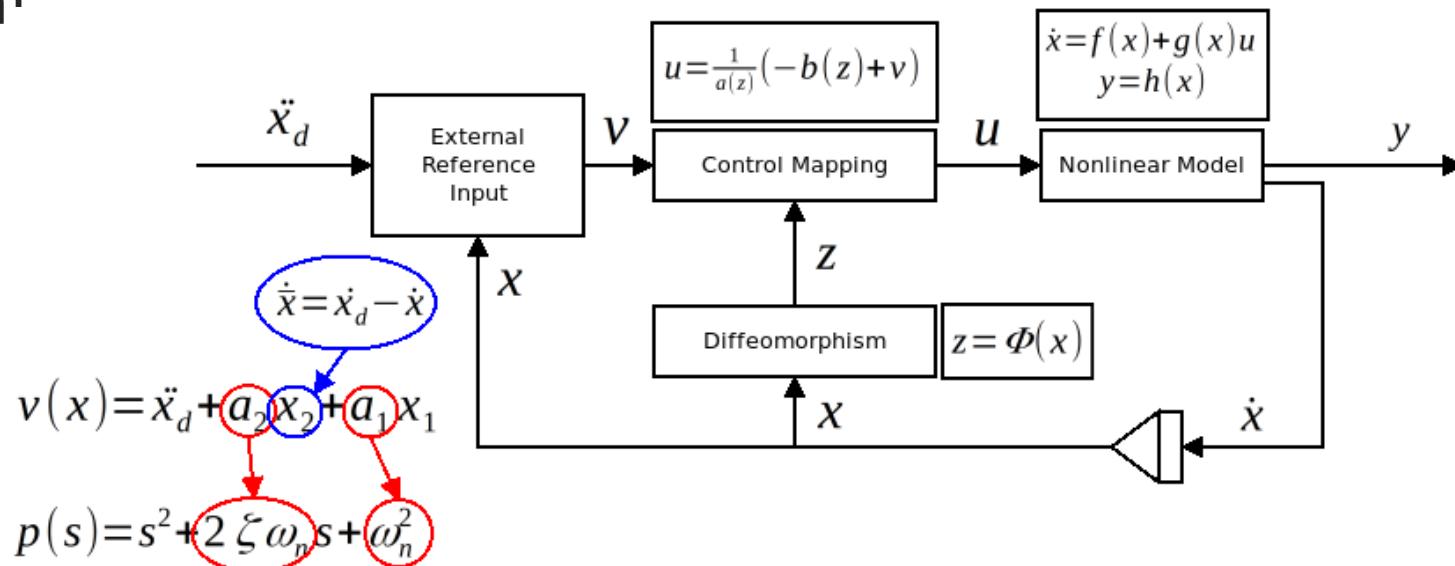
# Acceleration Feedback Controller - III

- RESULTADOS PARA SEGUIMIENTO



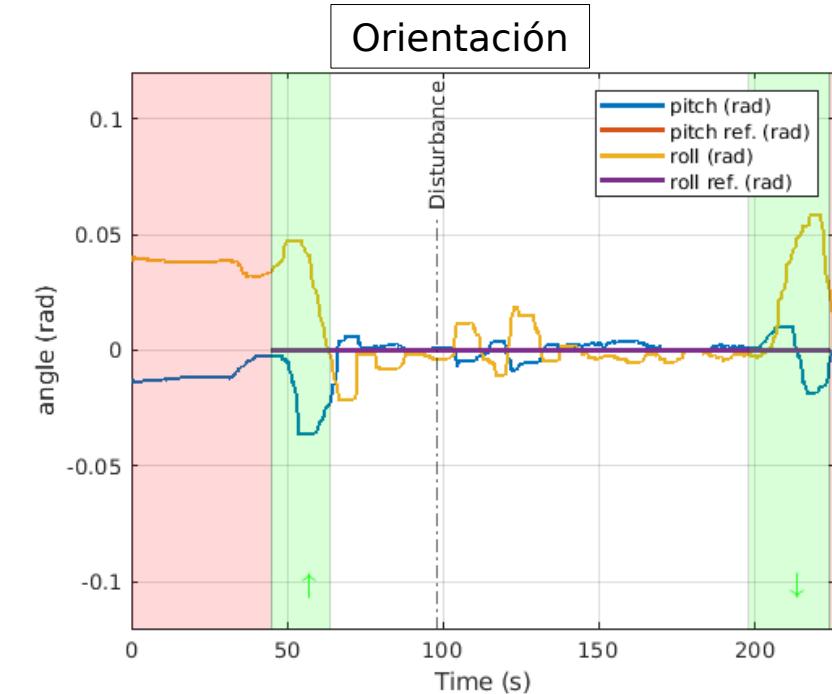
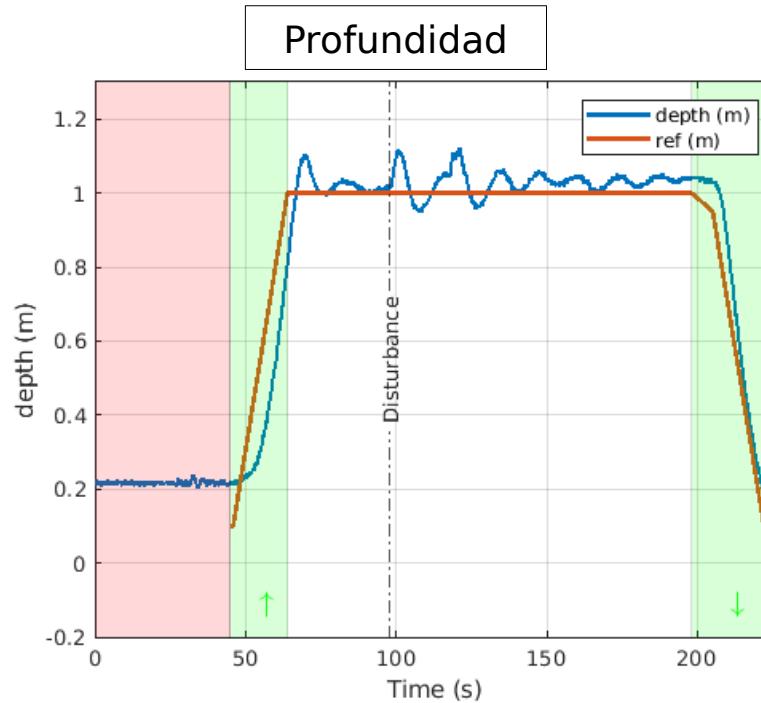
# Feedback Linearisation Controller - I

- El control por realimentación de la linealización o también conocido en la robótica como control de par calculado.
- Teniendo el modelo en una forma canónicamente controlable se desea llevar la derivada del estado de mayor orden a una dinámica deseada.
- Convergencia del controlador se evalúa por el teorema de Barbala<sup>+</sup>



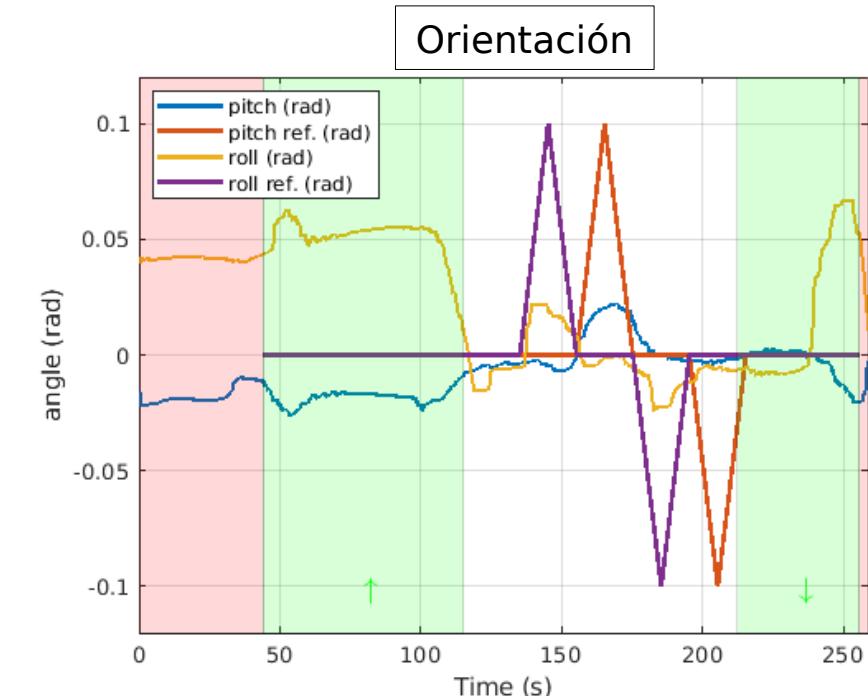
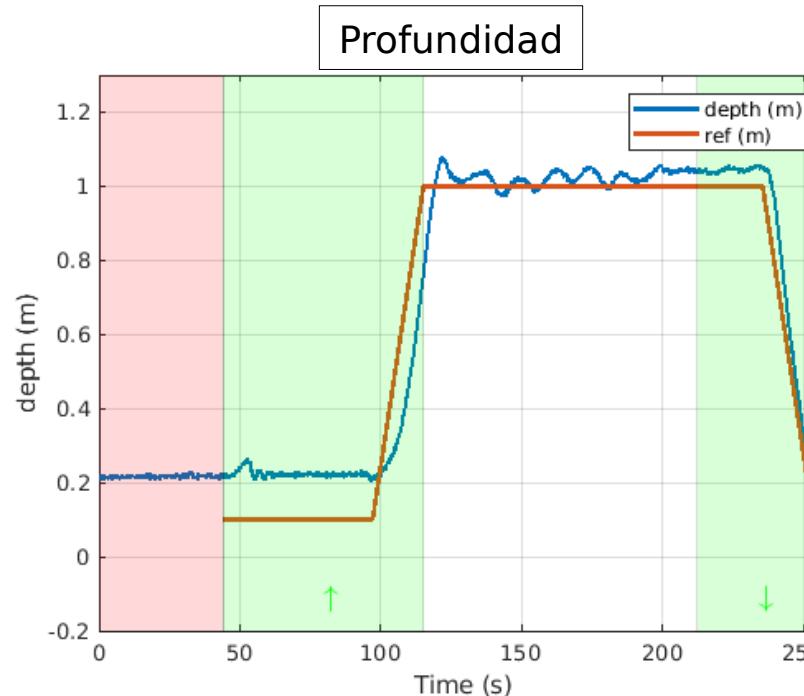
# Feedback Linearisation Controller - II

- RESULTADOS PARA ESTABILIDAD



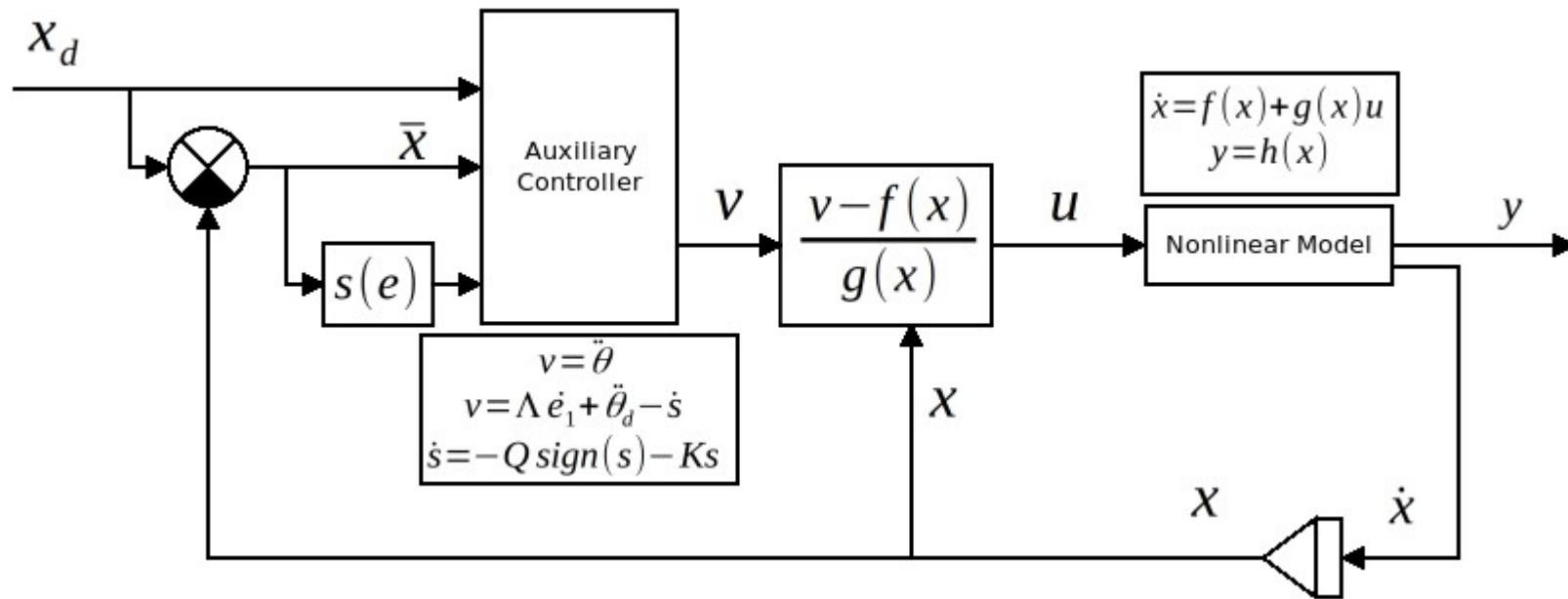
# Feedback Linearisation Controller - III

- RESULTADOS PARA SEGUIMIENTO



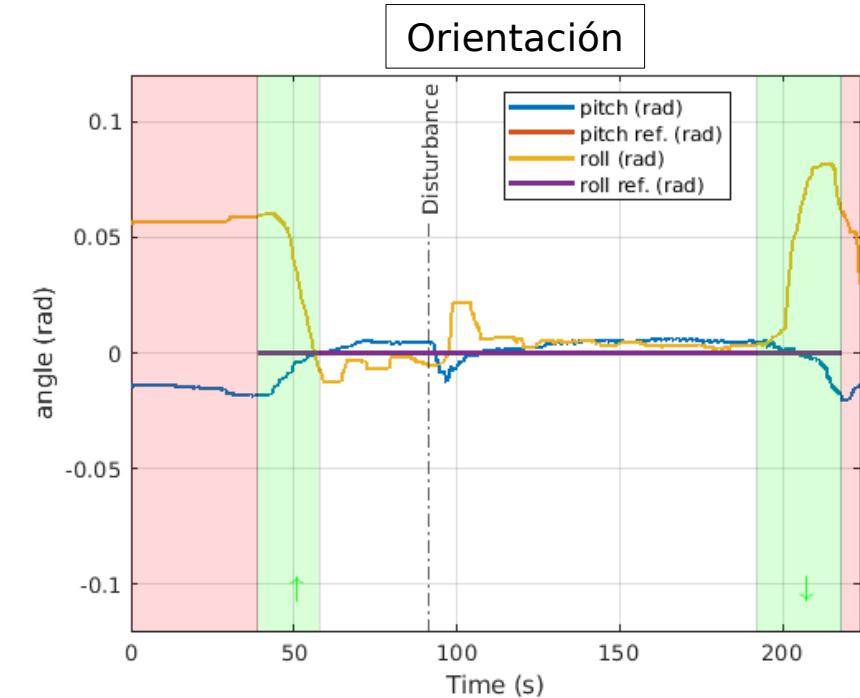
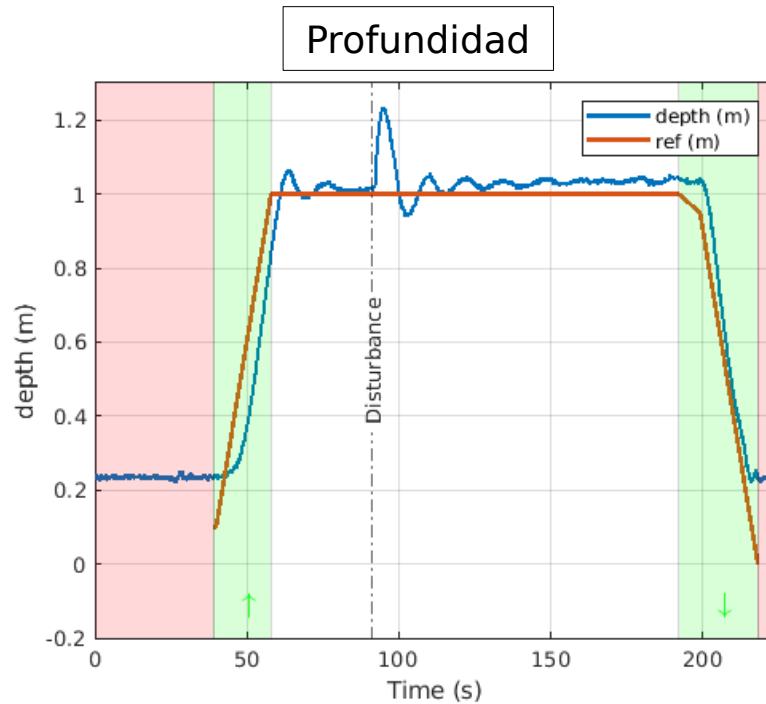
# Sliding Mode Control - I

- Controlador ampliamente usado en sistemas no lineales.
- Su funcionamiento se basa en llevar la dinámica del sistema a una representación geométrica conocida, superficie de deslizamiento
- El controlador tiene que cambiar su estructura de acuerdo a la fase que se encuentre.



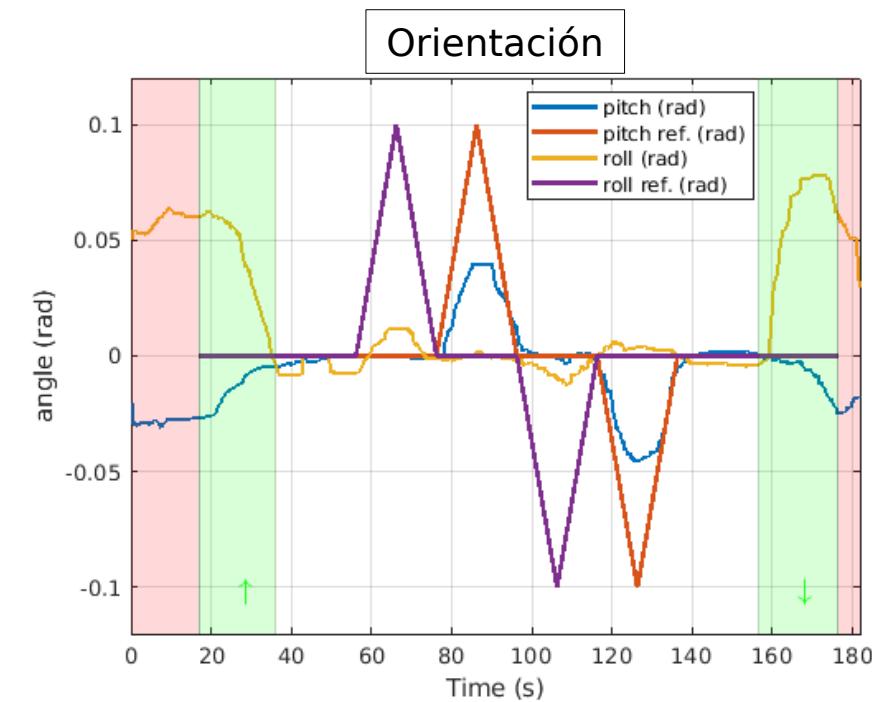
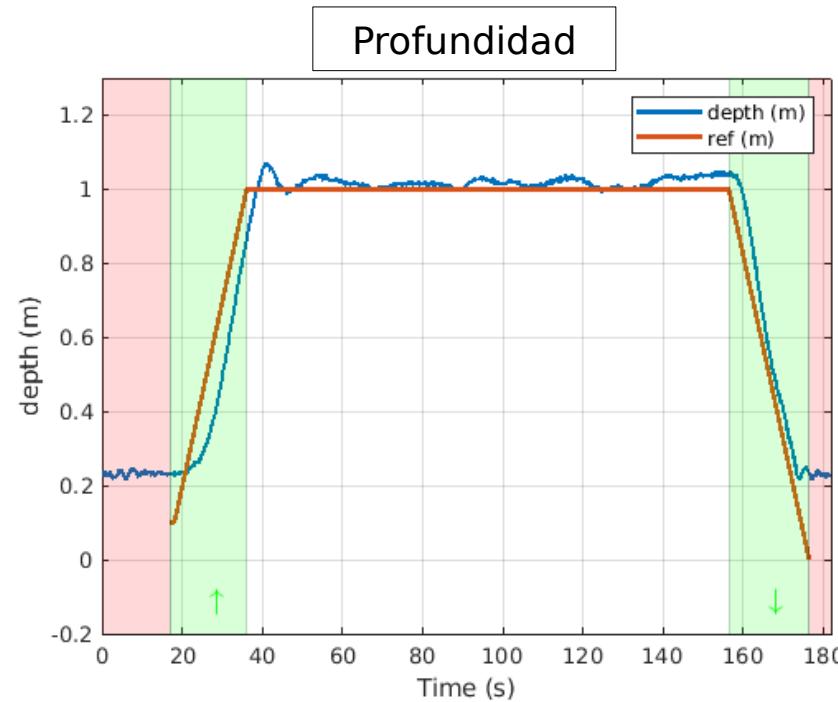
# Sliding Mode Control - II

- RESULTADOS PARA ESTABILIDAD



# Sliding Mode Control - III

- RESULTADOS PARA SEGUIMIENTO

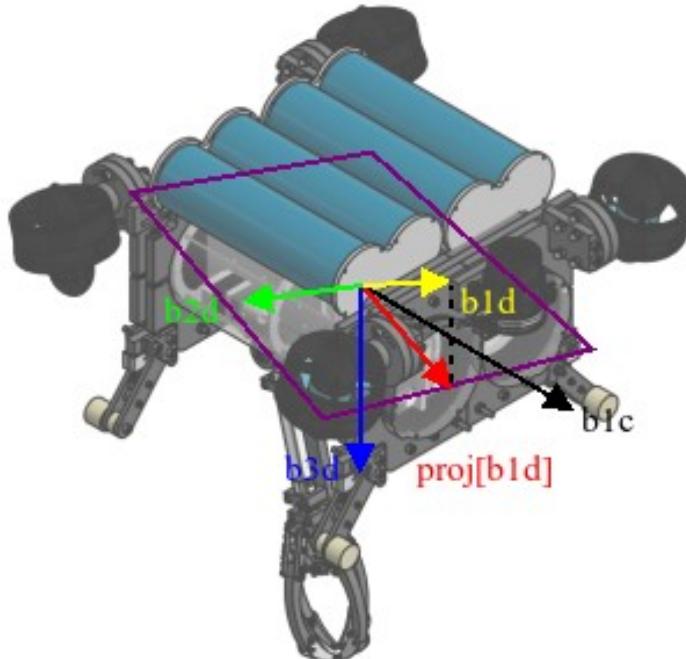


# Control Geométrico - I

- La formulación del control geométrico se basa en la proyección de un vector deseado de orientación al ser comparado con el vector actual del robot.
- Esta comparación se puede hacer de forma directa, sin embargo la relación que existe con la orientación del mismo no lo es debido a que
- Una manera general de ver esta relación es
- Para hacer la transformación se usa el operador  $\hat{}$  y el operador  $\vee$ , operadores más usados en el álgebra geométrica

# Control Geométrico - II

- La formulación del controlador está dada por la obtención de la proyección de la orientación del robot



$$e_x = x - x_d$$

$$e_v = v - \dot{x}_d$$

$$F = -\kappa_x e_x - \kappa_v e_v + K_{qz} e_v |e_v| + A_{wo} e_x - k_g$$

$$b_{3d} = \frac{F}{\|F\|}$$

$$b_{1d} = [\theta_d \quad \phi_d \quad \psi_d]$$

$$b_{2d} = \frac{b_{3d} \times b_{1d}}{\|b_{3d} \times b_{1d}\|}$$

$$\text{proj}[b_{1d}] = b_{2d} \times b_{3d}$$

$$R_d = [\text{proj}[b_{1d}] \quad b_{2d} \quad b_{3d}]$$

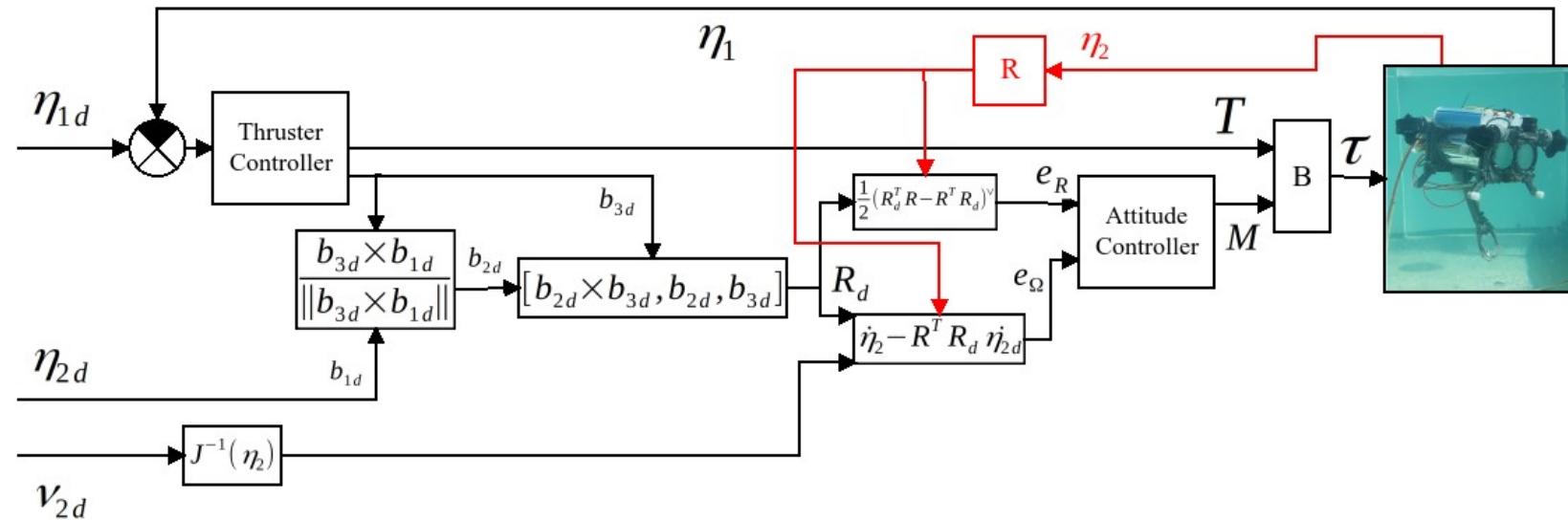
$$e_R = \frac{1}{2}(R_d^T R - R^T R_d)^\vee$$

$$e_\Omega = \nu_2 - R^T R_d \Omega_d$$

$$M = -\kappa_R e_r - \kappa_\Omega e_\Omega + e_\Omega^T D_n |e_\Omega| - K_g r_{gb}$$

# Control Geométrico - III

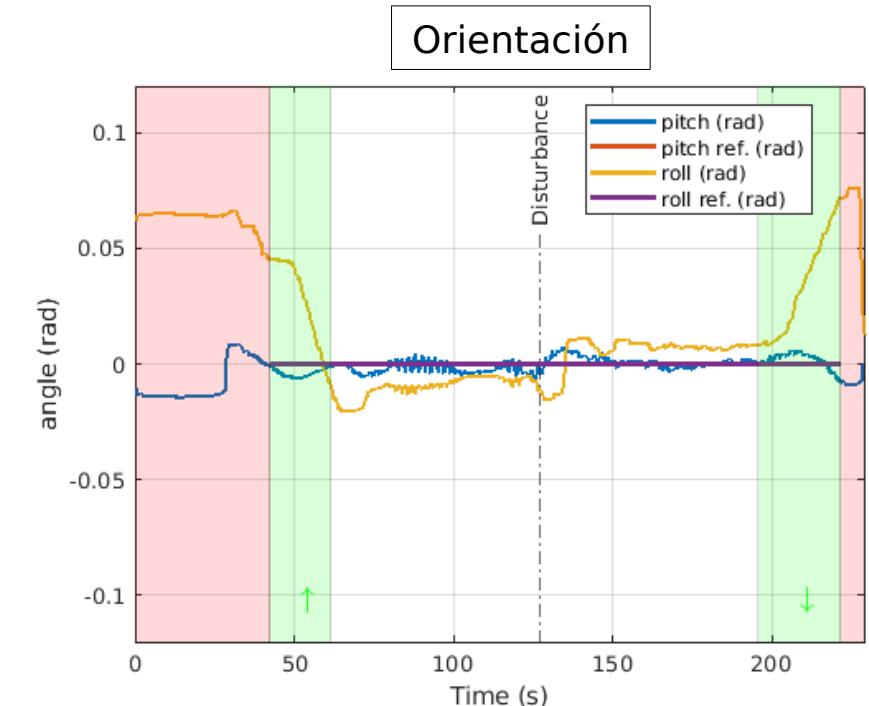
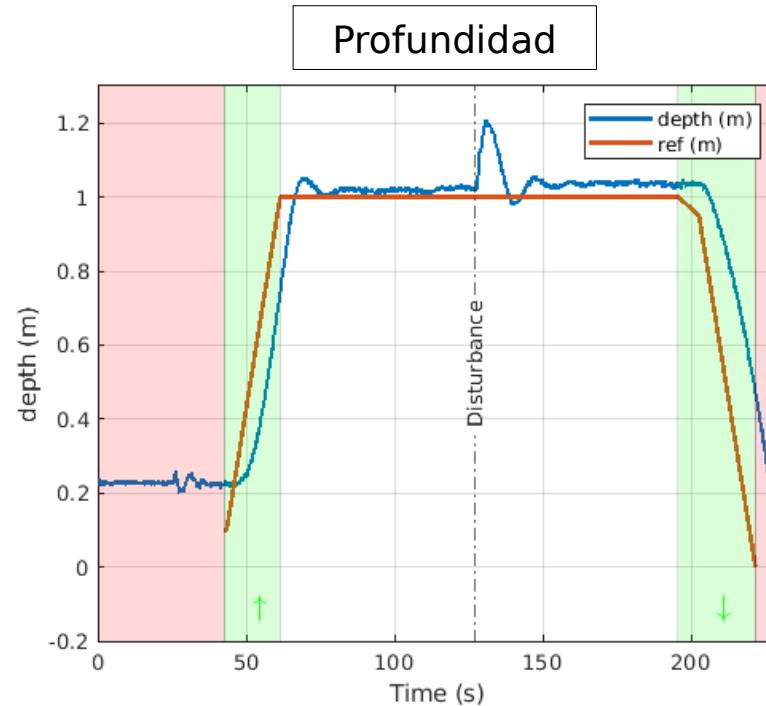
- Se puede representar un esquema de controlador aproximado de acuerdo



- El esquema no necesita modelos desacoplados, solo basta con unos parámetros del sistema en general.

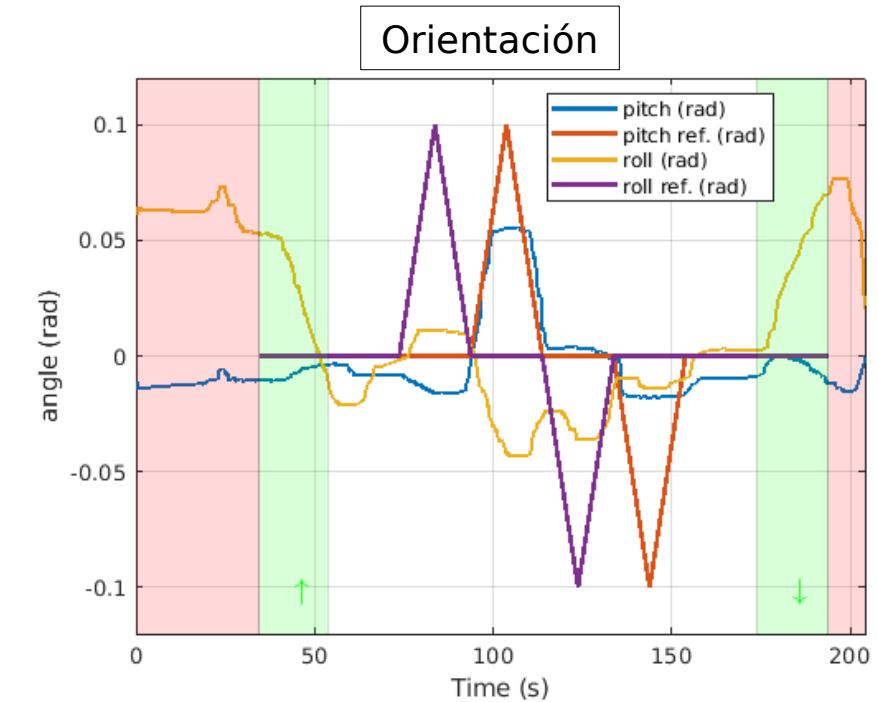
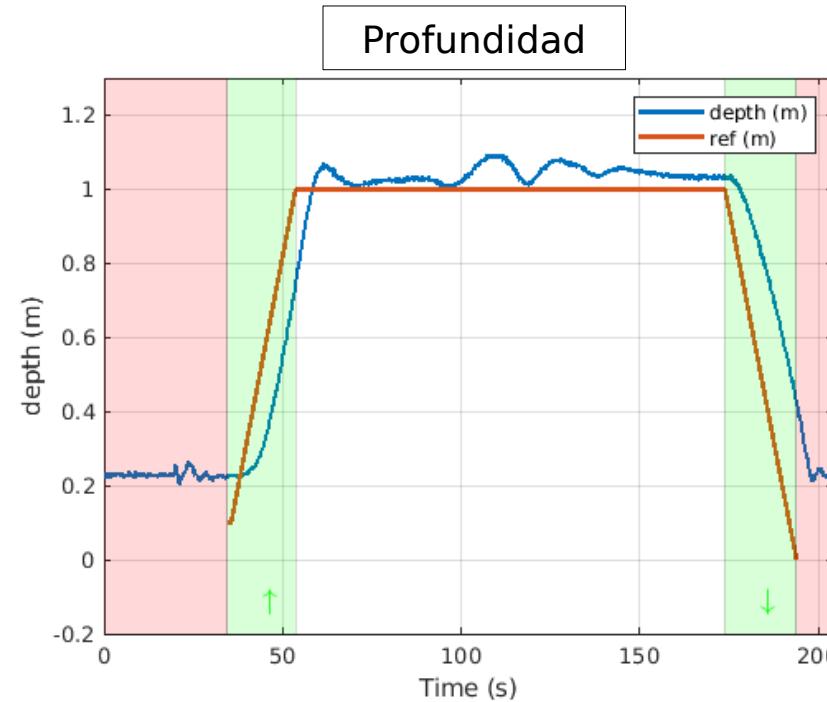
# Control Geométrico - IV

- RESULTADOS PARA ESTABILIDAD



# Control Geométrico - V

- RESULTADOS PARA SEGUIMIENTO

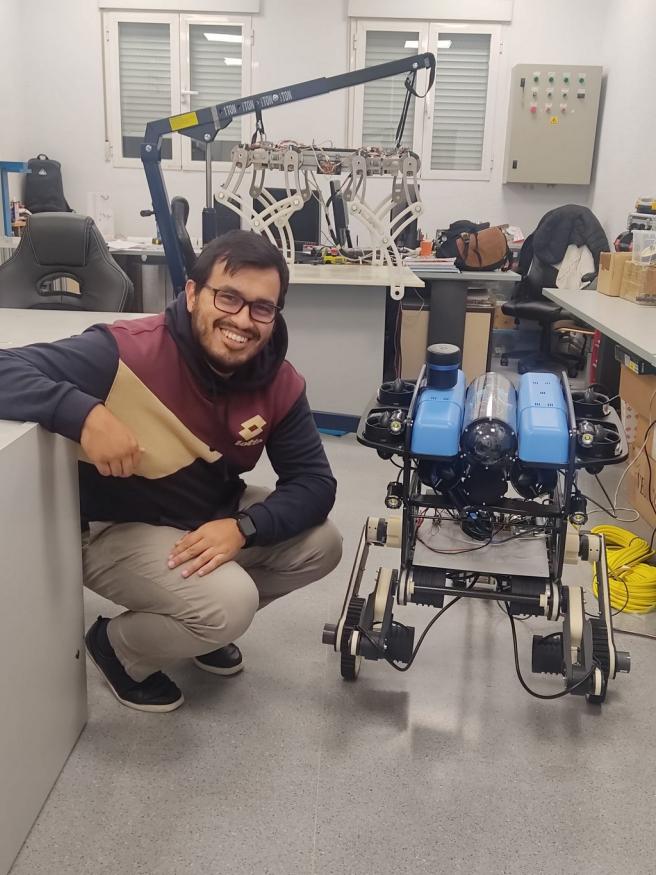


# Errores

- En la tabla de arriba se pueden visualizar los errores generados por las pruebas de perturbación del sistema.
- Esta prueba logra determinar la robustez respecto a otros controladores probados en los experimentos.
- En la tabla inferior están visibles los resultados para el seguimiento de trayectorias.
- Los valores aquí visualizados permiten inferir que tan capaz es el robot, usando cada uno de los controles, de seguir unos valores para cada coordenada asignada al mismo.

Controller	Perturbation time (s)	Depth Error (m)	Pitch Error (rad)	Roll Error (rad)
Acceleration Feedback	115	0.1765	0.0216	0.0309
Feedback Linearisation	100	0.0918	0.0157	0.029
SMC	90	0.1092	0.0208	0.0372
Geometric Controller	130	0.1607	0.0143	0.0385
Average:	108.75	0.1345	0.0181	0.0339

Controller	Test time (s)	Depth Error (m)	Pitch Error (rad)	Roll Error (rad)
Acceleration Feedback	200	0.2007	0.0153	0.0394
Feedback Linearisation	300	0.2238	0.0240	0.0404
SMC	200	0.099	0.0193	0.0417
Geometric Controller	200	0.1781	0.0202	0.0443
Average:	225	0.1754	0.0197	0.0414



**MUCHAS GRACIAS  
POR SU ATENCIÓN**

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