



**Construcción e implementación de un
control robusto a un robot submarino tipo
ROV para aplicación de monitoreo**

Tesis profesional que para obtener el título de:

Ingeniero Mecatrónico

Presenta:

Elizarraraz Conriquez Paola Fernanda

Márquez Roa Victor Hugo

Director de Tesis:

Dr. Jesús Norberto Guerrero Tavares



Autorización de presentación de trabajo de titulación

Se autoriza a los estudiantes Elizarraraz Conriquez Paola Fernanda y Márquez Roa Victor Hugo inscritos en la Ingeniería Mecatrónica del Instituto Tecnológico Superior de Abasolo, con número de control AS19110005 y AS18110289 a defender su proyecto de trabajo de titulación Construcción e implementación de un control robusto a un robot submarino tipo ROV para aplicación de monitoreo ante el comité sinodal asignado.

La presente se expide en Abasolo Guanajuato al 26 de enero de 2024.

Dr. Jesús Norberto Guerrero Tavares

Presidente del sínodo

Dra. Dalyndha Aztatzi Pluma

(Secretario del sínodo)

Dr. Jesús Ignacio Castro Salazar

(Vocal del sínodo)

Resumen

En este trabajo de tesis, se presenta el diseño y construcción de un control robusto tipo Super-Twisting para un vehículo submarino tipo ROV (Vehículo Operado Remotamente, por sus siglas en inglés), con el propósito de implementarlo en misiones autónomas que demandan precisión y fiabilidad. Para validar su eficacia, se llevó a cabo una comparación con controles convencionales PD y PID en una plataforma experimental desarrollada en MATLAB, con el objetivo de evidenciar las ventajas que ofrece el control STA. Además, se construyó un prototipo experimental destinado al monitoreo de la calidad del agua mediante la integración de sensores, y se exponen los resultados obtenidos durante el monitoreo de la calidad del agua en sus aspectos de pH, TDS y temperatura en dos escenarios propuestos: uno semi-controlado, que consiste en una alberca de un balneario, y otro no-controlado, que corresponde a una presa expuesta a la intemperie sin tratamiento del agua. Y mediante experimentaciones en tiempo real con un ROV submarino de tipo Leonard, se analizó y validó la robustez de los controles propuestos en diversos escenarios, destacando su potencial en aplicaciones submarinas críticas.

Abstract

In this thesis work, the design and construction of a robust Super-Twisting control for an ROV-type underwater vehicle are presented, with the purpose of implementing it in autonomous missions that demand precision and reliability. To validate its effectiveness, a comparison was conducted with conventional PD and PID controls on an experimental platform developed in MATLAB, aiming to highlight the advantages offered by the STA control. Additionally, an experimental prototype was built for monitoring water quality through the integration of sensors, and the results obtained during water quality monitoring in terms of pH, TDS, and temperature are presented in two proposed scenarios: a semi-controlled one, consisting of a pool at a resort, and an uncontrolled one, corresponding to an exposed untreated water reservoir. Through real-time experiments with a Leonard-type underwater ROV, the robustness of the proposed controls was analyzed and validated in various scenarios, emphasizing their potential in critical underwater applications.

Índice

INTRODUCCIÓN	1
Capítulo 1: MARCO TEORICO	1
1.1 Conceptos básicos.....	2
1.1.1 PH.....	2
1.1.2 TDS	2
1.1.3 Temperatura	3
1.1.4 Vehículo submarino no tripulado	3
1.1.5 Aplicaciones.....	5
1.1.6 Control	6
1.1.7 Modelo matemático	9
2 Capítulo 2: GENERALIDADES DEL PROYECTO	11
2.1 Cronograma de actividades	12
2.2 Recursos materiales y humanos	¡Error! Marcador no definido.
3 Capítulo 3: III. DESARROLLO O METODOLOGÍA	17
3.1 Modelo dinámico.	18
3.1.1 Matriz de inercia	19
3.1.2 Matriz de Coriolis	20
3.1.3 Matriz de Amortiguamiento	22
3.1.4 Matriz de Gravedad	23
3.2 Diseño e implementación del control.....	23
3.2.1 Diseño del control STA.	24
3.2.2 Análisis de estabilidad.	27

3.3	Escenarios de prueba propuestos.....	31
	<i>Estabilización.</i>	31
	<i>Regulación.</i>	31
	<i>Seguimiento de trayectorias.</i>	31
3.4	Casos de experimentación.....	31
	<i>Caso nominal.</i>	31
	<i>Caso con perturbaciones constantes.</i>	32
	<i>Caso con perturbaciones variantes en el tiempo.</i>	32
3.5	Simulaciones.....	32
	3.5.1 Escenario 1.....	32
	3.5.2 Escenario 2.....	33
	3.5.3 Escenario 3.....	33
3.6	Experimentos en tiempo real.....	34
	<i>Caso nominal.</i>	34
	<i>Caso con incertidumbres paramétricas.</i>	34
	<i>Caso con masa agregada.</i>	35
3.7	Criterio de desempeño.....	35
	3.7.1 Error medio cuadrático (RMSE).....	35
	3.7.2 Índice de entrada del control	35
3.8	Adaptación y experimentación en un medio establecido.....	35
	3.8.1 Activación del robot submarino.....	36
3.9	Instrumentos de medición	37
	3.9.1 Sensor de temperatura	37
	3.9.2 Sensor de Total de Sólidos Disueltos	38

3.9.3	Sensor de pH.....	39
4	Capítulo 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	42
4.1	Activación del robot submarino	43
4.2	Configuración del software.....	43
4.3	Adaptación y experimentación en un medio semi-controlado	47
4.4	Simulaciones.....	49
4.4.1	<i>Escenario 1.1</i> Estabilización caso nominal.....	49
4.4.2	<i>Escenario 1.2</i> Estabilización con perturbaciones constantes	51
4.4.3	<i>Escenario 1.3</i> Estabilización con perturbaciones variantes en el tiempo.....	53
4.4.4	<i>Escenario 2.1</i> Regulación caso nominal.....	55
4.4.5	<i>Escenario 2.2</i> Regulación con perturbaciones constantes	57
4.4.6	<i>Escenario 2.3</i> Regulación con perturbaciones variantes en el tiempo.....	59
4.4.7	<i>Escenario 3.1</i> Seguimiento de trayectorias caso nominal	61
4.4.8	<i>Escenario 3.2</i> Seguimiento de trayectorias con perturbaciones constantes.....	62
4.4.9	<i>Escenario 3.3</i> Seguimiento de trayectorias con perturbaciones variantes en el tiempo	63
4.5	Criterio de desempeño de las simulaciones.....	64
4.6	Experimentos en tiempo real.....	65
4.6.1	<i>Caso nominal</i>	66
4.6.2	<i>Caso con incertidumbres paramétricas</i>	67
4.6.3	<i>Caso con masa agregada</i>	68
4.6.4	Criterio de desempeño	68

4.7	Pruebas en tiempo real en un medio externo.....	70
4.7.1	Medio semi-controlado	70
4.7.2	Medio no-controlado.....	73
4.8	Circuito integrado con los módulos de los sensores	77
5	CONCLUSIÓN	78
6	Bibliografía	¡Error! Marcador no definido.
7	ANEXOS	91
7.1.1	Algoritmo del control PD para simulaciones en Matlab.....	92
7.1.2	Algoritmo del control PID para simulaciones en Matlab.....	97
7.1.3	Algoritmo del control Super-Twisting para simulaciones en Matlab.	102
7.1.4	Algoritmo para calibración del sensor de Ph	108
7.1.5	Algoritmo para la obtención de muestreos de los sensores integrados.....	109

Índice de tablas

Tabla 1.1- Escala de medición para los sólidos disueltos en el agua.....	3
Tabla 1.2- Nomenclatura del movimiento de vehículos submarinos	10
Tabla 3.1- Recursos materiales.....	18
Tabla 3.2- Especificaciones del sensor de temperatura.....	37
Tabla 3.3- Especificaciones del sensor de TDS.....	38
Tabla 3.4- Especificaciones del sensor de pH.....	39
Tabla 3.5- Resultados obtenidos de la medición de buffers definidos sometiendo el sensor de pH con la función obtenida.	41
Tabla 4.1- RMSE obtenido en cada uno de los escenarios sometidos a simulación.	64
Tabla 4.2- Criterio de desempeño de los controles en el caso nominal.	69
Tabla 4.3- Criterio de desempeño de los controles en el caso con incertidumbres paramétricas.....	69
Tabla 4.4- Criterio de desempeño de los controles en el caso con masa agregada.	69

Índice de figuras

Figura 1.1- Escala de pH, 0 a 14.....	2
Figura 1.2- ROV 'ISIS' capaz de sumergirse hasta 6500 metros	4
Figura 1.3- Diagrama de bloques de un sistema en lazo cerrado	7
Figura 1.4- Vehículo submarino con el marco fijo inercial	9
Figura 1.5- Marcos de referencia fijo en el cuerpo y fijo en tierra.....	10
Figura 3.1- Robot submarino tipo BlueROV2 de BlueRobotics	36
Figura 3.2- Función que describe el comportamiento del sensor de pH en las soluciones buffer de apoyo.....	40
Figura 4.1- Conexión robot-computadora.....	44
Figura 4.2- Establecimiento de la dirección IP del robot submarino	44
Figura 4.3- Actualización de los firmwares	45
Figura 4.4- Calibración de la brújula del robot.....	45
Figura 4.5- Calibración de la brújula del robot.....	46
Figura 4.6- Calibración de los motores del robot.....	46
Figura 4.8- Zona a evaluar, circuito con los sensores y robot submarino	47
Figura 4.9- Pruebas de control de vehículo.....	48
Figura 4.10- Resultados de simulación para el Escenario 1.1.....	50
Figura 4.11- Resultados de simulación para el Escenario 1.2.....	52
Figura 4.12- Resultados de simulación para el Escenario 1.3.....	54
Figura 4.13- Resultados de simulación para el Escenario 2.1.....	56
Figura 4.14- Resultados de simulación para el Escenario 2.2.....	58
Figura 4.15- Resultados de simulación para el Escenario 2.3.....	60
Figura 4.16- Resultados de simulación para el Escenario 3.1.....	61

Figura 4.17- Resultados de simulación para el Escenario 3.2.....	62
Figura 4.18- Resultados de simulación para el Escenario 3.3.....	63
Figura 4.19.- Colaboración con el Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier en Francia para el control de robots submarinos tipo AUVs	65
Figura 4.20- Resultados de experimentación en Caso nominal	66
Figura 4.21- Resultados de experimentación en Caso con incertidumbres paramétricas.....	67
Figura 4.22- Resultados de experimentación en Caso con masa agregada	68
Figura 4.23- Gráfica de pH para ambiente semi-controlado.....	70
Figura 4.24- Comprobación de las mediciones de pH mediante el uso de papel indicador.....	71
Figura 4.25- Gráfica de TDS para ambiente semi-controlado	72
Figura 4.26.- Gráfica de temperatura para ambiente semi-controlado	72
Figura 4.27- Presa sometida a prueba como medio no-controlado.....	73
Figura 4.28- Recorrido del vehículo submarino en la superficie de la presa.	74
Figura 4.29- Gráfica de pH para ambiente no-controlado	75
Figura 4.30- Comprobación de las mediciones de pH con el papel indicador y su combinación correspondiente a cada valor de PH	75
Figura 4.31- Gráfica de TDS para ambiente no-controlado.....	76
Figura 4.32- Gráfica de temperatura para ambiente no-controlado.....	77
Figura 4.33- Circuito implementado en el vehículo submarino.....	77

INTRODUCCIÓN

La Tierra está compuesta en un 70% de agua en su superficie y, según la National Oceanic and Atmospheric Administration más del 80% de esta área marítima no ha sido explorada todavía (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2023). Además del mapeo topográfico, la investigación y exploración marítima posibilitan el monitoreo, la gestión responsable y la preservación de los recursos naturales procedentes de los océanos y demás cuerpos de agua del planeta. No obstante, este tipo de misiones demandan el uso de equipos científicos que suelen ser costosos, lo que representa un gran desafío económico y tecnológico (Anta, 2022).

Es fundamental resaltar la importancia del análisis de la calidad del agua, ya que este recurso natural desempeña un papel sumamente significativo en la vida de los seres humanos. El pH, los sólidos disueltos (TDS) y la temperatura son algunas de las propiedades más destacadas del agua. A pesar de que los Modelos de Sistemas de Información Geográfica y las Técnicas de Percepción Remota han sentado las bases para abordar los desafíos inherentes a las características naturales del agua, optimizar estos aspectos no solo facilitaría la monitorización, sino que también aceleraría la detección temprana de cambios anormales en las propiedades del agua. Esto, a su vez, proporcionaría una ayuda crucial en la toma de medidas preventivas y correctivas, contribuyendo directamente a la protección de la salud pública y del medio ambiente.

La disponibilidad y calidad del agua influye de manera directa en el bienestar humano y desarrollo económico de los países de todo el mundo. Esta disponibilidad es afectada por múltiples factores sociales, económicos y ambientales (Menchaca Dávila, 2017). Según la Organización de las Naciones Unidas (ONU), el cambio climático representa un factor que intensifica la escasez y disminuye la calidad del agua; también aumenta los riesgos asociados a fenómenos naturales en los cuales este recurso juega un papel fundamental (Organización de las Naciones Unidas, 2023).

De igual manera, la ONU establece que el deterioro de la calidad del agua es ahora un motivo de preocupación a nivel global, según los datos recabados por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) de la mano con el Sistema Global de Monitoreo del Medio Ambiente (GEMS, por sus siglas en inglés), acerca de los cambios de la calidad del agua entre 1990 y 2007, esta calidad ha disminuido considerablemente a lo largo de los años con el crecimiento de la población humana, la expansión del sector industrial y agrícola, y la constante amenaza del cambio climático (Organización de las Naciones Unidas, 2014).

Los vehículos submarinos autónomos (AUV, por sus siglas en inglés) son una alternativa para dar solución a dicha problemática dado que su implementación a estas exploraciones suele tener una lista de ventajas tales como la eficiencia operacional, la movilidad, y el bajo costo.

A pesar de que los vehículos submarinos no tripulados poseen cualidades específicas, como la autonomía, también enfrentan complicaciones en su operación debido a la exposición a cambios en los parámetros del sistema, como la adición de dispositivos o elementos complementarios que representan cambios en la dinámica del sistema, mejoras en los sistemas de navegación y propulsión.

Así mismo, deben lidiar con perturbaciones externas causadas por la influencia de las corrientes oceánicas, variaciones en la salinidad, la temperatura del agua, entre otros factores ambientales que pudieran impactar la estabilidad, capacidad de navegación y desempeño del vehículo.

Por consiguiente, la implementación de un control que aborde esta problemática durante las misiones marítimas resulta crucial para garantizar un funcionamiento efectivo y seguro. Dado que el sistema dinámico de estos vehículos submarinos es complejo, altamente no lineal y con dinámicas acopladas, el diseño del control no es una tarea simple. La necesidad de gestionar múltiples variables, interacciones entre componentes y las influencias ambientales hace que el diseño del control sea un desafío técnico considerable en la operación de estos vehículos.

Capítulo 1: MARCO TEÓRICO

1.1 Conceptos básicos

1.1.1 PH

El pH es una medida de la acidez o basicidad de una solución. El pH es la concentración de iones o cationes hidrógeno [H+] presentes en determinada sustancia.

El pH típicamente va de 0 a 14 en disolución acuosa, siendo ácidas las disoluciones con pH menores a 7, y básicas las que tienen pH mayores a 7. El pH = 7 indica la neutralidad de la disolución (Química.es, s.f.). La representación gráfica de la escala puede observarse en la Figura 1.1.



Figura 1.1- Escala de pH, 0 a 14 (Carbotecnia, 2022).

1.1.2 Total de sólidos disueltos

TDS (por sus siglas en inglés Total Dissolved Solids), también conocido como porcentaje de residuo seco, engloba sales inorgánicas y pequeñas cantidades de materia orgánica disueltas en el agua. Los principales constituyentes de TDS son los cationes de calcio, magnesio, sodio, potasio y los aniones de carbonato, bicarbonato, cloro, sulfato y, especialmente en aguas subterráneas, nitrato. TDS se expresa en unidades de mg por unidad de volumen de agua (mg/L) o como partes por millón (ppm) (Jern, 2022).

Los sólidos disueltos totales se consideran en las Directrices de la OMS para la calidad del agua potable (GDWQ) y son medidos de acuerdo con los márgenes establecidos en la Tabla 1.1 (World Health Organization, s.f.).

Tabla 1.1- Escala de medición para los sólidos disueltos en el agua.

Condición del agua	Ppm (mg/L)
Excelente	<300
Bueno	300-600
Regular	600-900
Pobre	900-1200
Inaceptable	>1200

1.1.3 Temperatura

La temperatura es una medida de la energía cinética media de las moléculas de agua. Se mide en una escala lineal de grados Centígrados o grados Fahrenheit.

El pH del agua se afecta directamente con la temperatura, éste es un resultado ligero pero medible. La temperatura afecta la química del agua y las funciones de los organismos acuáticos. Existen factores naturales, como la energía solar y la profundidad del agua, factores humanos, como la eliminación de vegetación riparia y aumento de escorrentía de aguas pluviales, que afectan a la temperatura del agua.

1.1.4 Vehículo submarino no tripulado

Los vehículos submarinos no tripulados, comúnmente conocidos como ROVs, suelen caracterizarse por su tamaño compacto y maniobrabilidad, como se ilustra en la Figura 1.2. Sin embargo, su escala reducida no limita la capacidad de integrar una amplia gama de componentes y dispositivos especializados. Entre estos elementos se incluyen una variedad de sensores, herramientas de manipulación, así como accesorios adicionales como faros luminosos que proporcionan iluminación adicional en las profundidades marinas. Esta versatilidad funcional, combinado con la capacidad de maniobra y exploración en entornos submarinos de difícil acceso, convierte a los ROVs en herramientas valiosas para la investigación y exploración acuática (CIENCIAUANL, 2019).

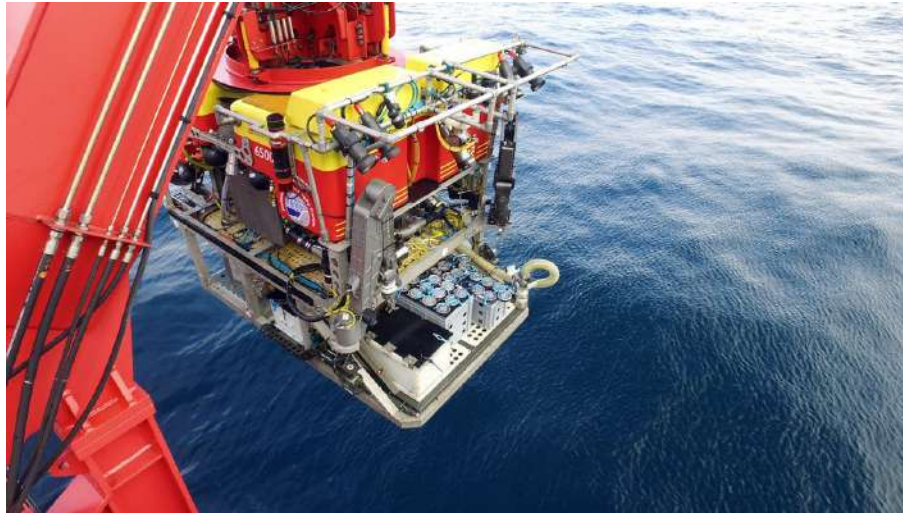


Figura 1.2- ROV 'ISIS' capaz de sumergirse hasta 6500 metros (CIENCIAUANL, 2019).

1.1.4.1 Clasificación

La clasificación de los robots submarinos constituye un criterio esencial para comprender y diferenciar las diversas plataformas utilizadas en operaciones subacuáticas. Esta categorización se fundamenta en tres aspectos fundamentales: en primer lugar, el nivel de autonomía, que determina la capacidad del vehículo para operar de manera independiente sin intervención humana directa; en segundo lugar, el tipo de misión que se propone llevar a cabo, lo cual define las capacidades y equipos específicos requeridos para cumplir con los objetivos preestablecidos; y finalmente, el sistema de propulsión implementado, que influye en la eficiencia y la versatilidad del desplazamiento del robot en el medio acuático.

La principal clasificación de los robots submarinos se centra en el primer criterio, su nivel de autonomía. Se distinguen robots completamente autónomos, los AUVs, y otros que requieren la intervención directa de un operador, los ROVs. Por otro lado, los robots IAUVs son dispositivos que se sitúan en un punto intermedio en cuanto a su grado de autonomía (Moreno et al., 2014).

Robots Submarinos Operados Remotamente

Un Robot Submarino Operado Remotamente, es un dispositivo móvil diseñado específicamente para llevar a cabo tareas en entornos acuáticos. El control remoto

de este sistema se efectúa comúnmente a través de cables de cobre o fibra óptica. El operador dirige el vehículo submarino mientras observa en una pantalla la transmisión de imágenes proporcionadas por una cámara instalada en el mismo. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la operación remota de estos dispositivos está limitada por la longitud de los cables que conectan el submarino a una estación de monitoreo ubicada fuera del agua (Chargoy Cortez, 2018).

Robots Submarinos Autónomos

Los vehículos autónomos, llevan a cabo las tareas sin requerir la supervisión ni el control directo de operadores. Estas tareas están preprogramadas en el vehículo submarino, lo que elimina las limitaciones asociadas al uso de cables, como ocurre en el caso de los ROV. La información recopilada por el vehículo se almacena en su memoria interna y puede ser posteriormente analizada o transmitida a través de dispositivos acústicos (Chargoy Cortez, 2018).

Robots Submarinos Autónomos para Intervenciones

El diseño de los Robots Submarinos Autónomos para Intervenciones se deriva de la necesidad de capacitar los dispositivos AUV para realizar tareas de manipulación y no solo de observación. Este tipo de robots no solo implicaría un costo de operación menor al de un dispositivo ROV, sino que también se beneficiaría de una mayor maniobrabilidad al no estar limitado por el cable de comunicación (Chargoy Cortez, 2018).

1.1.5 Aplicaciones

Los robots submarinos constituyen herramientas diseñadas con el propósito de desempeñar diversas funciones bajo el agua, dichas tareas pueden ser realizadas durante la navegación o al llegar a un lugar predestinado mediante un dispositivo manipulador.

1.1.5.1 Misiones de inspección

Las misiones de inspección son aquellas que se llevan a cabo durante la navegación del robot submarino. En este tipo de misiones no son requeridas herramientas o mecanismos de manipulación para interactuar con el entorno.

1.1.5.2 Misiones de manipulación

Las misiones de manipulación son aquellas en las que es necesaria la intervención de herramientas manipuladoras, además de la implementación de un sistema de visión que proporcione imágenes del entorno de operación en tiempo real al operador del robot submarino (Moreno et al., 2014).

1.1.6 Control

De manera general, el control se refiere al “estudio y manejo del comportamiento de los sistemas automatizados que son empleados en el área de las empresas industriales”, como lo indica Euroinnova International Online Education (Euroinnova International Online Education, s.f.).

1.1.6.1 Control en lazo cerrado

Los sistemas de control realimentados se denominan también sistemas de control en lazo cerrado. En un sistema de control en lazo cerrado, se alimenta al controlador la señal de error de actuación, que es la diferencia entre la señal de entrada y la señal de realimentación (que puede ser la propia señal de salida o una función de la señal de salida y sus derivadas y/o integrales), con el fin de reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor deseado. El término control en lazo cerrado siempre implica el uso de una acción de control realimentado, Figura 1.3, para reducir el error del sistema (Ogata, 2010).

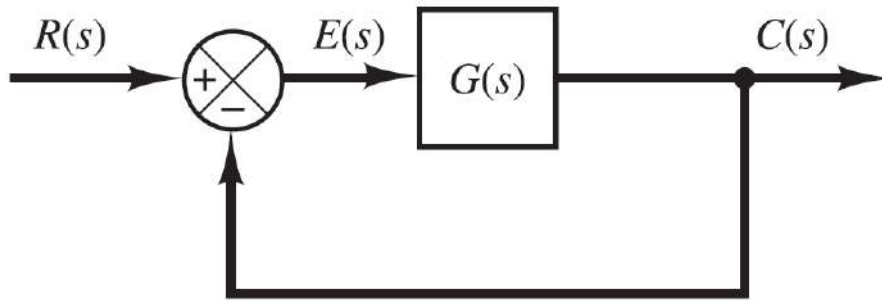


Figura 1.3- Diagrama de bloques de un sistema en lazo cerrado (Ogata, 2010).

En donde:

$R(s)$ es la señal de referencia

$E(s)$ es el error del sistema ($R(s) - G(s)$)

$C(s)$ es la salida del proceso

$G(s)$ es la salida del sensor instalada en el sistema

1.1.6.2 Control Proporcional-Derivativo (PD)

Basándose en el diagrama de la Figura 1.3, el control PD, que considera una acción proporcional junto a una derivativa, se define mediante:

$$u(t) = K_p e(t) + K_d T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

donde $u(t)$ es la salida del control, K_p, K_d son ganancias, $e(t)$ es la señal del error, definido como la diferencia entre el valor medido y el valor deseado, t es el tiempo y T_d es una constante que define el tiempo de derivación. Esta acción produce un control más rápido debido a su carácter de previsión, y al mismo tiempo provoca señales de ruido, lo cual puede provocar saturación en el actuador.

Al añadir una acción derivativa a una acción proporcional, se obtiene un controlador con aptitudes altas en sensibilidad, es decir, con capacidad de reacción correctiva y eficaz al error provocado en el sistema (Mazzone, Controladores PID, 2002).

1.1.6.3 Control Proporcional-Integral-Derivativo (PID)

Reunir las acciones PID combina las ventajas de cada una de las acciones en el ámbito del control. La ecuación que define al control tipo PID está dada por

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_i}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2)$$

donde $u(t)$ es la salida del control, K_p, K_i, K_d son ganancias, $e(t)$ es la señal del error, t es el tiempo y T_i, T_d son constantes que define el tiempo de integración y derivación, respectivamente. En comparación con el control PD, en el control PID se añade la acción integral que genera beneficios tales como la permanencia del error en régimen nulo, es decir, siempre tiende a ordenar un error con valor cero (Mazzone, Controladores PID, 2002).

1.1.6.4 Control Super-Twisting

Los sistemas que incorporan modos deslizantes poseen la capacidad de ser una herramienta eficaz para el control complejo de alto orden de plantas dinámicas no lineales que operan en condiciones inciertas, una problemática recurrente en numerosos procesos de tecnología moderna. Este hecho justifica el elevado nivel de actividad de investigación y publicación en esta área, así como el interés práctico de los ingenieros en el control de modos deslizantes a lo largo de las últimas dos décadas (Fridman, 2005).

El control super-twisting (Mazzone, Controladores PID, 2002) está dado por las ecuaciones siguientes:

$$u = c|\sigma|^{1/2} \text{sign}(\sigma) + v \quad (3)$$

$$\dot{v} = b \text{sign}(\sigma) \quad (4)$$

Donde:

u es la ley de control super-twisting

c, b son constantes ϵ^R

σ es la superficie de deslizamiento

1.1.7 Modelo matemático

Un modelo matemático es la expresión formal, en lenguaje matemático, de las relaciones entre los componentes de un modelo.

La construcción de un modelo implica la selección y cuantificación de los componentes, variables y relaciones presentes en el sistema para representarlo con el nivel de detalle requerido.

Un vehículo submarino dispone de seis grados de libertad (Degree of freedom, DOF), los cuales se refieren al conjunto de movimientos y giros autónomos que determinan la posición y dirección del vehículo, Figura 1.4. Cada movimiento ejecutado por el vehículo en sus respectivos ejes está asociado a un término específico (Narcizo-Nuci, 2021).

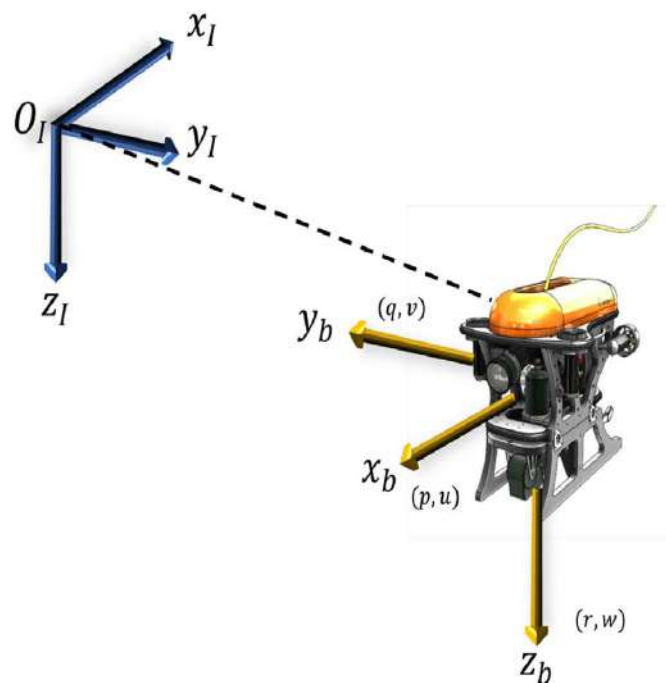


Figura 1.4- Vehículo submarino con el marco fijo inercial (O_I, x_I, y_I, z_I) y el marco fijo en el cuerpo (O_b, x_b, y_b, z_b) (Guerrero et al., 2019).

1.1.7.1 Nomenclatura

En la Tabla 1.2 se detalla la notación utilizada por la SNAME (Society of Naval Architects and Marine Engineers) para representar la posición, orientación del vehículo, así como las fuerzas que se ejercen sobre dicho dispositivo, Figura 1.5.

Tabla 1.2- Nomenclatura del movimiento de vehículos submarinos (SNAME, 1950).

Movimiento	Nombre		Posición	Velocidad	Fuerza
	Español	Inglés			
Traslación en x	Avance	Surge	x	u	X
Traslación en y	Balanceo	Sway	y	v	Y
Traslación en z	Arqueo	Heave	z	w	Z
Rotación en x	Alabeo	Roll	ϕ	p	K
Rotación en y	Cabeceo	Pitch	θ	q	M
Rotación en z	Guiñada	Yaw	ψ	r	N

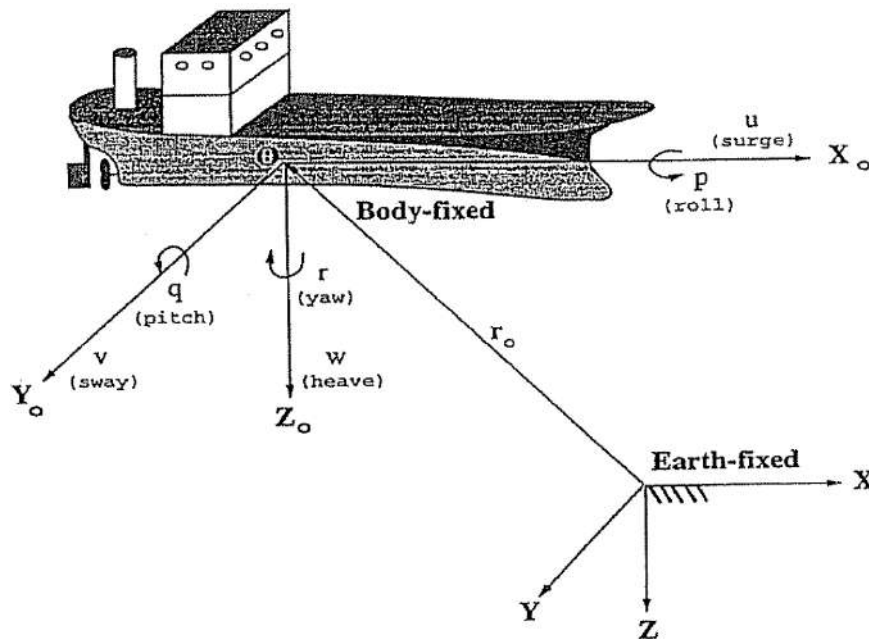


Figura 1.5- Marcos de referencia fijo en el cuerpo y fijo en tierra (Fossen T. I., 1994).

Capítulo 2: GENERALIDADES DEL PROYECTO

2.1 Planteamiento del problema

Analizar las cualidades del agua usualmente conlleva una serie de obstáculos, entre los más importantes son las irregularidades topológicas de las zonas de muestreo y la misma obtención de muestras, ya que actualmente la toma de muestras de la calidad del agua, para un posterior análisis, se llevan a cabo manualmente o con estaciones fijas en ciertos puntos de las cuencas hidrológicas (Universidad Politécnica de Cartagena).

La toma manual de muestras representa una serie de desventajas, complicando la eficacia en la obtención, entre las cuales están la inconsistencia, la limitación en la cantidad de datos y accesibilidad, un tiempo de respuesta lento, y costos y recursos elevados.

Las alteraciones internas y externas al vehículo submarino autónomo han provocado que las misiones submarinas no presenten los resultados esperados, dado que presentan dificultades que afectan directamente a su operación.

Entre las alteraciones internas, se pueden obtener problemáticas en el sistema por presentar deficiencias en la alimentación de energía, la implementación de control o en sus conexiones; algunas de las alteraciones externas pueden ser las perturbaciones que ocasiona la misma corriente de agua, los objetos y/o animales coexistentes en el medio, entre otros (Tamanaja, 2013).

La implementación de un control funcional también presenta un conflicto de elección. Los controles robustos se caracterizan por tener estructuras que mantienen un rendimiento acorde a las especificaciones y características de los sistemas, incluso ante la presencia de perturbaciones externas a las que están expuestos. La principal ventaja que tienen este tipo de controles, con respecto a los demás, es su capacidad de relacionar las incertidumbres paramétricas y considerar las dinámicas no modeladas de los sistemas. Debido a su complejidad y naturaleza subjetiva, el diseño de un control robusto para la aplicación de esta investigación representa un desafío técnico significativo (Tamanaja, 2013).

2.2 Justificación

El monitoreo eficiente de diversas zonas acuíferas se logra comúnmente mediante tecnologías de monitoreo automatizado, como sensores de calidad del agua y sistemas de muestreo automatizados. Estos sistemas ofrecen la ventaja de proporcionar datos más frecuentes y consistentes, reducir costos a largo plazo, y permitir un monitoreo continuo y en tiempo real de la calidad del agua en múltiples ubicaciones. Esta estrategia se vuelve especialmente crucial al gestionar y supervisar diversos recursos hídricos para asegurar su seguridad y sostenibilidad (Badger Meter, s.f.).

La integración de sensores en vehículos submarinos mejora significativamente la eficiencia y la eficacia de la recopilación de datos de calidad del agua. Este enfoque proporciona información en tiempo real y contribuye de manera importante a la comprensión y gestión de los entornos acuáticos, convirtiéndose en una herramienta valiosa para diversas aplicaciones, desde la investigación científica hasta la inspección de infraestructuras submarinas y la gestión ambiental. Las ventajas notables de esta aplicación incluyen el monitoreo en tiempo real, la eficiencia y automatización, la obtención de datos detallados y precisos, la amplia cobertura y representatividad, la garantía de la seguridad del vehículo submarino y de los operadores, y la gestión de recursos hídricos.

Existen dos tipos distintos de vehículos submarinos: el ROV, que requiere intervención humana para su manipulación, y el AUV que opera de manera totalmente autónoma sin necesidad de intervención humana.

Los vehículos submarinos pueden enfrentar problemas en su operación, resultando en irregularidades en su movimiento. La implementación de un control robusto ofrece una solución a estas perturbaciones, donde las señales de los sensores del submarino son redirigidas al centro de control, a través de una rama de realimentación, corrigiendo así los errores.

Implementar un tipo de control robusto en un vehículo submarino compensa eficazmente las perturbaciones que puedan surgir durante su actividad, optimizando

su comportamiento en cada misión. Estos vehículos pueden aplicarse en diversos campos de investigación, como la inspección científica de la flora y fauna marítima, la detección geográfica de irregularidades en los océanos, y aplicaciones militares, como la implementación de armamento autónomo, entre otros (Milenio, 2018).

2.3 Objetivos

Objetivos generales:

- Instrumentar e implementar sensores para monitoreo de la calidad del agua en el robot submarino.
- Diseñar e implementar un control robusto a un robot submarino tipo ROV para aplicación de monitoreo del agua.

Objetivos específicos:

- Calibrar los sensores de pH y TDS.
- Diseñar un programa que integre de los sensores de pH, TDS y temperatura para el monitoreo de la calidad del agua.
- Implementar los sensores de pH, TDS y temperatura al robot submarino.
- Activar el robot submarino con las especificaciones establecidas por el fabricante.
- Determinar el modelo matemático del robot submarino.
- Analizar las cualidades del agua en un medio semi-controlado.
- Analizar las cualidades del agua en un medio no-controlado.
- Diseñar un control robusto tipo Super-Twisting (STA) adaptado al modelo matemático del robot submarino.
- Adaptar el robot submarino a un medio específico.
- Implementar el control al robot submarino.

- Realizar pruebas de simulación para la comprobación del funcionamiento correcto del control diseñado.
- Realizar experimentaciones para la comprobación del funcionamiento del robot submarino con el control diseñado implementado.

2.4 Cronograma de actividades

El plan de trabajo se estructura en actividades mensuales a lo largo de un período de un año. Se han definido objetivos con énfasis en el trabajo de campo realizado con el robot submarino como prioridad durante la ejecución del proyecto.

Mes	Actividades por realizar
Etapa 1: investigación preliminar y diseño	
Enero	<ul style="list-style-type: none"> • Definición de metas y límites del proyecto. • Revisión bibliográfica sobre robótica submarina y control de ROV. • Identificación de problemas y oportunidades. • Adquisición de los componentes necesarios para desarrollar el proyecto.
Febrero	<ul style="list-style-type: none"> • Investigación sobre sensores para mediciones ambientales aplicables al ROV. • Marco teórico sobre generalidades de los vehículos submarinos, control robusto y aplicaciones en ROV. • Estudio del modelo dinámico del BlueROV2 y diseño preliminar del sistema de control.
Marzo	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluación y selección final de los componentes. • Documentación preliminar del proyecto.
Etapa 2: Implementación y pruebas de laboratorio	
Abril	<ul style="list-style-type: none"> • Ensamblaje de los componentes del ROV, configuración y conexión con los equipos de cómputo.

	<ul style="list-style-type: none"> • Programación de software para la integración de los sensores. • Calibración de los sensores.
Mayo	<ul style="list-style-type: none"> • Elaboración detallada del sistema de control. • Selección y programación del software de simulación. • Redacción de la metodología del proyecto.
Junio	<ul style="list-style-type: none"> • Realización de pruebas en entorno controlado. • Pruebas de funcionamiento de los sensores. • Ajustes y mejoras.
Etapla 3: Experimentación en entorno real y análisis de resultados	
Julio	<ul style="list-style-type: none"> • Pruebas preliminares de los sensores en un entorno real. • Recopilación y análisis de datos ambientales obtenidos. • Simulación del sistema de control diseñado en SIMULINK.
Agosto	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluación del desempeño del submarino y de los sensores al implementarse en condiciones reales. • Ajustes y mejoras. • Pruebas del BlueROV2 con los sensores en un entorno real.
Septiembre	<ul style="list-style-type: none"> • Procesamiento avanzado de los datos ambientales.
Etapla 4: Documentación y escritura	
Octubre	<ul style="list-style-type: none"> • Redacción de los capítulos 1,2 y 3 de la tesis. • Revisión y corrección del contenido.
Noviembre	<ul style="list-style-type: none"> • Redacción de los resultados. • Revisión y corrección del contenido.
Diciembre	<ul style="list-style-type: none"> • Redacción de las conclusiones. • Revisión y corrección del contenido. • Finalización de la redacción del documento de tesis.

Capítulo 3: DESARROLLO O METODOLOGÍA

3.1 Recursos materiales

Para un mayor entendimiento, se ha decidido expresar los recursos con los que se desarrolló el proyecto en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1- Recursos materiales.

Materiales	Cantidades	Componentes
BlueROV2	1	1 BlueROV2 1 Anclaje Fathom ROV 1 Interfaz de anclaje 1 Fathom-X 1 Batería de litio 1 Cargador de batería 2 Luces 10 Hélices 1 Tarjeta ArduSub
Computadores	2	Software QGroundControl
Alberca de pruebas	1	
Arduino Nano	1	
Sensor de pH	1	Ph-4502c
Sensor de temperatura	1	Celsius Fast-Response, $\pm 0.1^\circ\text{C}$ Temperature Sensor (I2C) de Bluerobotics
Sensor de TDS	1	CQRSENTDS01-TDS

3.2 Modelo dinámico.

El modelo matemático de un robot submarino se describe tomando en cuenta la relación del marco fijo en tierra y el marco de referencia fijado en el cuerpo del robot.

Las ecuaciones de movimiento para un robot submarino (Fossen T. I., 1994) están descritas en la siguiente ecuación:

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau \quad (5)$$

donde

v es el vector de velocidad del robot submarino

\dot{v} es el vector de aceleración del robot submarino

M es la matriz de masa inercial, o añadida

$C(v)$ es la matriz de coeficientes de Coriolis y centrípetos

$D(v)$ es la matriz de Damping, o de amortiguamiento

$g(\eta)$ es el vector de fuerzas gravitatorias

τ es el vector de entradas del control

3.2.1 Matriz de inercia

La matriz de inercia M está compuesta por dos elementos, el primero es la matriz de masa e inercia del cuerpo rígido, M_{RB} , y el segundo es la matriz de masa hidrodinámica añadida, M_A . Entonces la matriz de inercia de un vehículo submarino se expresa como la suma de ambas matrices, es decir:

$$M = M_{RB} + M_A \quad (6)$$

3.2.1.1 Matriz de masa e inercia del cuerpo rígido

La matriz de masa e inercia de cuerpo rígido M_{RB} del vehículo submarino está definida por la siguiente ecuación:

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} mI_{3 \times 3} & -mS(r_g^b) \\ mS(r_g^b) & I_b \end{bmatrix} \quad (7)$$

De tal manera que, sustituyendo los valores genéricos que toman cada una de las posiciones de la matriz de inercia, la ecuación (7) puede ser descrita como sigue (Fossen T. I., 1994):

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_g & -my_g \\ 0 & m & 0 & -mz_g & 0 & -mx_g \\ 0 & 0 & m & my_g & -mx_g & 0 \\ 0 & -mz_g & my_g & I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ mz_g & 0 & -mx_g & -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ -my_g & mx_g & 0 & -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{bmatrix} \quad (8)$$

donde

$S(r_g)$ es la matriz antisimétrica de las distancias desde el origen del marco fijo en el cuerpo hasta el centro de gravedad.

m es la masa del vehículo submarino.

I_x, I_y, I_z son los momentos de inercia sobre los ejes x_b, y_b y z_b respectivamente

$I_{xy} = I_{yx}, I_{xz} = I_{zx}, I_{yz} = I_{zy}$ son los productos de inercia (Narcizo-Nuci, 2021).

3.2.1.2 Matriz de masa hidrodinámica añadida

La matriz de masa añadida representa la cantidad de flujo desplazado por el movimiento de un vehículo subacuático. Esta matriz se encuentra estrechamente ligada a la geométrica del vehículo en cuestión. La definición formal de la matriz de masa añadida es la siguiente:

$$M_A = - \begin{bmatrix} X\dot{u} & X\dot{v} & X\dot{w} & X\dot{p} & X\dot{q} & X\dot{r} \\ Y\dot{u} & Y\dot{v} & Y\dot{w} & Y\dot{p} & Y\dot{q} & Y\dot{r} \\ Z\dot{u} & Z\dot{v} & Z\dot{w} & Z\dot{p} & Z\dot{q} & Z\dot{r} \\ K\dot{u} & K\dot{v} & K\dot{w} & K\dot{p} & K\dot{q} & K\dot{r} \\ M\dot{u} & M\dot{v} & M\dot{w} & M\dot{p} & M\dot{q} & M\dot{r} \\ N\dot{u} & N\dot{v} & N\dot{w} & N\dot{p} & N\dot{q} & N\dot{r} \end{bmatrix} \quad (9)$$

En el caso de vehículos que se sumergen por completo en el fluido la matriz de masa añadida se simplifica a una matriz diagonal (Chargoy Cortez, 2018), por consiguiente, se expresa de la siguiente manera:

$$M_A = - \begin{bmatrix} X\dot{u} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y\dot{v} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z\dot{w} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K\dot{p} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M\dot{q} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N\dot{r} \end{bmatrix} \quad (10)$$

3.2.2 Matriz de Coriolis

La fuerza de Coriolis es una fuerza inercial que se manifiesta de manera perpendicular a la dirección del desplazamiento de un objeto. Su magnitud está directamente relacionada tanto con la velocidad del cuerpo como con la rotación del

sistema de coordenadas del vehículo en relación con el sistema de referencia (Chargoy Cortez, 2018).

3.2.2.1 Matriz de Coriolis de cuerpo rígido

La matriz de Coriolis de cuerpo rígido con coincidencia en el centro de gravedad y el de flotación se define de la siguiente manera (Fossen T. I., 1994):

$$C_{RB}(v) = - \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ 0 & 0 & 0 & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ 0 & 0 & 0 & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & 0 & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & 0 & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Donde:

$$C_{14} = m(y_g q + z_g r)$$

$$C_{45} = -I_{yz} q - I_{xz} p + I_z r$$

$$C_{15} = -m(x_g q - w)$$

$$C_{46} = I_{yz} r + I_{xy} p - I_y q$$

$$C_{16} = -m(x_g r + v)$$

$$C_{51} = m(x_g q - w)$$

$$C_{24} = -m(y_g p + w)$$

$$C_{52} = -m(z_g r + x_g p)$$

$$C_{25} = m(z_g r + x_g p)$$

$$C_{53} = -m(x_g p + y_g q)$$

$$C_{26} = -m(y_g r + v)$$

$$C_{54} = I_{yz} q + I_{xz} p - I_z r$$

$$C_{34} = -m(z_g p - v)$$

$$C_{56} = -I_{xz} r - I_{xy} q + I_x p$$

$$C_{35} = -m(z_g q + u)$$

$$C_{61} = m(x_g r + v)$$

$$C_{36} = m(x_g p + y_g q)$$

$$C_{62} = m(y_g r - u)$$

$$C_{41} = -m(y_g q + z_g r)$$

$$C_{63} = -m(x_g p + y_g q)$$

$$C_{42} = m(y_g p + w)$$

$$C_{64} = -I_{yz} r - I_{xy} p + I_y q$$

$$C_{43} = m(z_g p - v)$$

$$C_{65} = -I_{yz} r - I_{xy} p + I_y q$$

3.2.2.2 Matriz de Coriolis de masa agregada

La matriz de Coriolis de masa agregada $C_A(v)$ está compuesta como se muestra a continuación (Fossen T. I., 1994):

$$C_A(v) = - \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -Z_{\dot{w}}w & Y_{\dot{v}}v \\ 0 & 0 & 0 & Z_{\dot{w}}w & 0 & -X_{\dot{u}}u \\ 0 & 0 & 0 & -Y_{\dot{v}}v & X_{\dot{u}}u & 0 \\ 0 & -Z_{\dot{w}}w & Y_{\dot{v}}v & 0 & -N_{\dot{r}}r & M_{\dot{q}}q \\ Z_{\dot{w}}w & 0 & -X_{\dot{u}}u & N_{\dot{r}}r & 0 & -K_{\dot{p}}p \\ -Y_{\dot{v}}v & X_{\dot{u}}u & 0 & -M_{\dot{q}}q & K_{\dot{p}}p & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

3.2.3 Matriz de Amortiguamiento

La representación de la fuerza de amortiguamiento hidrodinámico puede ser simplificada mediante la formulación de una matriz que incorpora los componentes lineales y cuadráticos de las ecuaciones de fuerza de arrastre sobre los ejes, la ecuación siguiente expresa dicha fuerza (Chargoy Cortez, 2018):

$$D(v) = D_L + D_Q|V_k| \quad (13)$$

donde:

$D_L = [X_u \ Y_v \ Z_w \ K_p \ M_q \ N_r]$ son los términos lineales de la fuerza de fricción

$D_Q = [X_{u|u|} \ Y_{v|v|} \ Z_{\omega|\omega|} \ K_{p|p|} \ M_{q|q|} \ N_{r|r|}]$ son los términos cuadráticos de la fuerza ascensional o sustentación. Cabe mencionar que para velocidades bajas el término M_q se iguala a cero, y la única matriz que se toma en cuenta es la matriz D_L .

Entonces, la fuerza de amortiguamiento queda expresada por la siguiente ecuación matricial (Fossen T. I., 1994):

$$D(v) = \begin{bmatrix} X_u & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_v & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_w & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_r \end{bmatrix} \quad (14)$$

3.2.4 Matriz de Gravedad

La matriz que representa los efectos de la gravedad y flotación en el vehículo submarino se estructura como se muestra a continuación:

$$g(\eta) = \begin{bmatrix} f_B + f_G \\ r_B \times f_B + r_G \times f_G \end{bmatrix} \quad (15)$$

Donde:

f_G es la fuerza de gravedad.

f_B es la fuerza de flotación.

r_G es el centro de gravedad.

r_B es el centro de flotación.

$r_B \times f_B$ es el producto cruz del centro de flotación y la fuerza de flotación.

$r_G \times f_G$ es el producto cruz del centro de gravedad y la fuerza de gravedad.

Por tanto, la estructura de la matriz de gravedad del vehículo submarino es la que se muestra a continuación:

$$g(\eta) = \begin{bmatrix} (W - B) \text{sen } \theta \\ -(W - B) \text{cos } \theta \text{sen } \phi \\ -(W - B) \text{cos } \theta \text{cos } \phi \\ -(y_g W - y_b B) \text{cos } \theta \text{cos } \phi + (z_g W - z_b B) \text{cos } \theta \text{sen } \phi \\ (z_g W - z_b B) \text{sen } \theta + (x_g W - x_b B) \text{cos } \theta \text{cos } \phi \\ -(x_g W - x_b B) \text{cos } \theta \text{sen } \phi - (y_g W - y_b B) \text{sen } \phi \end{bmatrix} \quad (16)$$

3.3 Diseño e implementación del control.

Es importante determinar de manera correcta el modelo matemático del robot submarino, considerando todas las variables que pueda contener y que afecten al funcionamiento de este, como lo son las hélices, la fuente de alimentación, el peso, entre otros.

En esta etapa se construye matemáticamente y en programación el control elegido.

3.3.1 Diseño del control STA.

La dinámica de un vehículo submarino implica dos marcos de referencia: el marco fijo en el cuerpo y el marco fijo en tierra, o mayormente conocidos por sus homólogos en inglés *body-fixed frame* y *earth-fixed frame* respectivamente. Considerando las fuerzas generalizadas de inercia, los efectos hidrodinámicos, las contribuciones de la gravedad y de la flotabilidad, así como la fuerza de los actuadores, la forma matricial del modelo dinámico de un vehículo submarino, usando la notación SNAME y la representación presentada en (Fossen T. I., 1994), puede ser escrito como sigue:

$$\begin{aligned} M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) &= \tau + \omega_e(t) \\ \dot{\eta} &= J(\eta)v \end{aligned} \quad (17)$$

Donde $v = [u, w, v, p, q, r]^T$ es el vector de estado de la velocidad relativa en el marco fijo en el cuerpo, y $\eta = [x, y, z, \phi, \theta, \psi]^T$ representa el vector de posición y orientación. La matriz de la transformación espacial entre el marco inercial y el marco del cuerpo rígido y puede ser representada como $J(\eta) \in R^{6 \times 6}$. $M \in R^{6 \times 6}$ es la matriz de inercia donde son incluidos los efectos de la masa añadida, $C \in R^{6 \times 6}$ es la matriz de Coriolis-centrípeta, $D \in R^{6 \times 6}$ representa la matriz de amortiguamiento hidrodinámico, $g(\eta) \in R^6$ es el vector de fuerzas y momentos gravitacionales-flotabilidad. Finalmente, $\tau \in R^6$ es el vector del control y $\omega_e(t) \in R^6$ define el vector de perturbaciones externas.

La formulación presentada de la dinámica para un AUV está expresada en el marco fijo en el cuerpo y puede ser transformada al marco fijo en tierra mediante la matriz de transformación J . Relacionando las ecuaciones de (1), se obtienen las siguientes matrices:

$$M_\eta(\eta) = J^{-T}(\eta)MJ^{-1}(\eta)$$

$$C_\eta(v, \eta) = J^{-T}(\eta)[C(v) - MJ^{-1}(\eta)\dot{J}(\eta)]J^{-1}(\eta)$$

$$D_\eta(v, \eta) = J^{-T}(\eta)D(v)J^{-1}(\eta)$$

$$g_\eta(\eta) = J^{-1}(\eta)g(\eta)$$

$$\tau_\eta = J^{-T}(\eta)\tau$$

Donde J^{-T} es la matriz de transformación espacial inversa y transpuesta.

El sistema (17) puede, por tanto, ser representado en el marco fijo en tierra como:

$$M_\eta(\eta)\ddot{\eta} + C_\eta(v, \eta)\dot{\eta} + D_\eta(v, \eta)\dot{\eta} + g_\eta(\eta) = \tau_\eta(\eta) + \omega_\eta(t) \quad (18)$$

Las cargas hidrodinámicas dominan la dinámica del AUV, y es difícil medir o estimar con precisión los coeficientes hidrodinámicos que son válidos para todas las condiciones de funcionamiento del vehículo. Por tanto, el sistema dinámico $f(\eta, v)$ dado en (18) puede ser escrito como la suma de la dinámica estimada $\hat{f}(\eta, v)$ y la dinámica desconocida $\tilde{f}(\eta, v)$ como sigue:

$$f(\eta, v) = M_\eta(\eta)\ddot{\eta} + C_\eta(v, \eta)\dot{\eta} + D_\eta(v, \eta)\dot{\eta} + g_\eta(\eta) = \hat{f}(\eta, v) + \tilde{f}(\eta, v) \quad (19)$$

Donde:

$$\hat{f}(\eta, v) = \hat{M}_\eta(\eta)\ddot{\eta} + \hat{C}_\eta(v, \eta)\dot{\eta} + \hat{D}_\eta(v, \eta)\dot{\eta} + \hat{g}_\eta(\eta) \quad (20)$$

$$\tilde{f}(\eta, v) = \tilde{M}_\eta(\eta)\ddot{\eta} + \tilde{C}_\eta(v, \eta)\dot{\eta} + \tilde{D}_\eta(v, \eta)\dot{\eta} + \tilde{g}_\eta(\eta) \quad (21)$$

Por otra parte, las matrices del vector de la dinámica desconocida $\tilde{f}(\eta, v)$ son definidas como $\tilde{M}_\eta = M_\eta - \hat{M}_\eta$, $\tilde{C}_\eta = C_\eta - \hat{C}_\eta$, $\tilde{D}_\eta = D_\eta - \hat{D}_\eta$, y $\tilde{g}_\eta = g_\eta - \hat{g}_\eta$.

Rescribiendo el sistema (18) en las dinámicas estimadas y desconocidas dadas en (19), se tiene:

$$\hat{M}_\eta(\eta)\ddot{\eta} + \hat{C}_\eta(v, \eta)\dot{\eta} + \hat{D}_\eta(v, \eta)\dot{\eta} + \hat{g}_\eta(\eta) = \tau_\eta(\eta) + \omega(t) \quad (22)$$

donde $\omega(t) = \omega_\eta(t) - \tilde{f}(\eta, v)$.

3.3.1.1 Diseño del control robusto STA

Para facilitar la propuesta de control, se definen las siguientes variables de estado:

$$x_1 = \eta$$

$$x_2 = \dot{\eta}$$

Rescribiendo el modelo (22) como sigue:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \hat{F}(x) + \hat{G}(x)u + \omega(t)\end{aligned}\quad (23)$$

Donde:

$$\begin{aligned}\hat{F}(x) &= -\hat{M}_\eta(\eta)^{-1}[\hat{C}_\eta(v, \eta)\dot{\eta} + \hat{D}_\eta(v, \eta)\dot{\eta} + \hat{g}_\eta(\eta)] \\ \hat{G}(x) &= \hat{M}_\eta(\eta)^{-1}J^{-T}(\eta) \\ u &= \tau_\eta(\eta)\end{aligned}$$

En este punto, el objetivo de control es que el estado x_1 siga una trayectoria deseada $x_1^d(t) = [x_d(t), y_d(t), z_d(t), \phi_d(t), \theta_d(t), \psi_d(t)]^T$ en tiempo finito. Ahora, antes de proponer la ley de control se requiere hacer las siguientes suposiciones:

Suposición 1. La primera y la segunda derivada de las trayectorias deseadas están acotadas.

Suposición 2. La perturbación $\omega(t)$ es una señal continua Lipschitz.

Suposición 3. Los ángulos *roll* (ϕ), *pitch* (θ), y *yaw* (ψ) están limitados por $(-\frac{\pi}{2} < \phi < \frac{\pi}{2})$, $(-\frac{\pi}{2} < \theta < \frac{\pi}{2})$ y $(-\pi < \psi < \pi)$.

De acuerdo con las suposiciones 1 y 2, los términos de perturbaciones externas $\omega(t)$ están acotadas

$$\|\omega_i(t)\|_2 \leq \delta_i, i = \overline{1,6} \quad (24)$$

también, satisfaciendo la desigualdad siguiente:

$$\|\dot{\omega}_i(t)\|_2 \leq L_i, i = \overline{1,6}.$$

De acuerdo con la suposición 3, la matriz $G(x)$ no es singular, por lo tanto, su inversa existe.

El control *Super Twisting* actúa sobre la dinámica del error. De la ecuación (23) es posible proponer una superficie de deslizamiento en función del error que fuerza el modo deslizante en el manifold de la siguiente manera:

$$\sigma = \dot{e} + \Lambda e \quad (25)$$

donde $e = x_1^d - x_1$, $\dot{e} = x_2^d - x_2 = \dot{x}_1^d - \dot{x}_1$ y $\Lambda = [\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6] \in R^{6 \times 6}$ es una matriz diagonal positiva definida.

Observación 1. La superficie de deslizamiento propuesta σ es de fase mínima y tiene un grado relativo 1.

La ley de control propuesta se muestra a continuación:

$$u = J^T M_\eta(\eta) [\ddot{x}_1^d + \Lambda \dot{e} - \hat{F}(x) - u_{ST}] \quad (26)$$

Donde el control *Super-Twisting*, u_{ST} , es definida como sigue:

$$\begin{aligned} u_{ST} &= -K_1 |\sigma|^{\frac{1}{2}} \text{sgn}(\sigma) + \dot{\varphi} \\ \dot{\varphi} &= -\frac{1}{2} K_2 \text{sgn}(\sigma) \end{aligned} \quad (27)$$

Las matrices de ganancias $K_1 = \text{diag}(k_{11}, k_{12}, k_{13}, k_{14}, k_{15}, k_{16})$ y $K_2 = \text{diag}(k_{21}, k_{22}, k_{23}, k_{24}, k_{25}, k_{26})$ son positivas definidas.

3.3.2 Análisis de estabilidad.

Para formalizar el análisis de estabilidad del control propuesto para seguimiento robusto de la trayectoria del AUV basado en la teoría por modos deslizantes se sintetiza en el siguiente teorema.

Teorema 1. Considerando el sistema (22) y el Algoritmo Super-Twisting con términos de perturbación (27) en la dinámica del error en lazo cerrado dado por (26). Asuma que los términos de perturbación del sistema [16] son globalmente acotadas por algunas constantes positivas $\delta_1, \dots, \delta_6$. Entonces las ganancias k_1 y k_2 pueden ser seleccionadas lo suficientemente altas tal que el origen es un punto de equilibrio

que es fuerte asintótica y globalmente estables, y todas las trayectorias convergen en tiempo finito hacia el origen.

Prueba. Para (25) y (26), la dinámica en lazo cerrado está dada por:

$$\dot{\sigma} = -k_1|\sigma|^{\frac{1}{2}}\text{sgn}(\sigma) - \frac{1}{2}k_2 \int_0^t \text{sgn}(\tau)d\tau + \omega(t) \quad (28)$$

Seleccionando el siguiente cambio de variable:

$$s_{1i} = \sigma_i$$

$$s_{2i} = -\frac{1}{2}k_{2i} \int_0^t \text{sgn}(\tau)d\tau + \omega(t)$$

$$\dot{\omega}_i(t) = \beta_i(t)$$

Entonces (14) puede ser rescrita en forma escalar ($i = \overline{1,6}$) como:

$$\dot{s}_{1i} = -k_{1i}|s_{1i}|^{\frac{1}{2}}\text{sgn}(s_{1i}) + s_{2i}$$

$$\dot{s}_{2i} = -\frac{1}{2}k_{2i}\text{sgn}(s_{1i}) + \beta_i(t)$$

Sin pérdida de generalidad, el sistema puede ser presentado con notación simplificada:

$$\begin{aligned} \dot{s}_1 &= -k_1|s_1|^{\frac{1}{2}}\text{sgn}(s_1) + s_2 \\ \dot{s}_2 &= -\frac{1}{2}k_2\text{sgn}(s_1) + \beta(t) \end{aligned} \quad (29)$$

Se propone la siguiente función candidata de Lyapunov:

$$V = \zeta^T P \zeta \quad (30)$$

Con:

$$\zeta = \begin{bmatrix} |s_1|^{\frac{1}{2}}\text{sgn}(s_1) \\ s_2 \end{bmatrix} \quad (31)$$

Donde la función P es una matriz simétrica y positiva definida. Note que la función es cuadrática y por tanto, la función candidata de Lyapunov es positiva definida y radialmente desacetada.

La derivada temporal de la función candidata de Lyapunov se expresa como sigue:

$$\dot{V} = \zeta^T P \dot{\zeta} \quad (32)$$

Tomando en cuenta la ecuación (31), se tiene que:

$$\dot{\zeta} = \begin{bmatrix} \dot{\zeta}_1 \\ \dot{\zeta}_2 \end{bmatrix} \quad (33)$$

O bien:

$$\dot{\zeta} = \begin{bmatrix} \frac{\dot{s}_1}{2|s_1|^{1/2}} \\ \dot{s}_2 \end{bmatrix} \quad (34)$$

Simplificando tenemos que:

$$\dot{\zeta} = \frac{1}{2|s_1|^{1/2}} \begin{bmatrix} \dot{s}_1 \\ \dot{s}_2 \end{bmatrix} \quad (35)$$

Sustituyendo las variables de estado \dot{s}_1 y \dot{s}_2 , se obtiene:

$$\dot{\zeta} = \frac{1}{2|s_1|^{1/2}} \begin{bmatrix} -k_1|\sigma|^{1/2} \text{sgn}(\sigma) + s_2 \\ -2k_2|s_1|^{1/2} \text{sgn}(s_1) + 2|s_1|^{1/2} \dot{w}(t) \end{bmatrix} \quad (36)$$

O bien:

$$\dot{\zeta} = \frac{1}{|s_1|^{1/2}} \begin{bmatrix} -k_1 & 1 \\ -2k_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} |s_1|^{1/2} \text{sgn}(s_1) \\ s_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \dot{w}(t) \quad (37)$$

Sustituyendo los valores como:

$$A = \begin{bmatrix} -k_1 & 1 \\ -2k_2 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\zeta = \begin{bmatrix} |s_1|^{1/2} \text{sgn}(s_1) \\ s_2 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

La ecuación (37) se puede escribir como:

$$\dot{\zeta} = \frac{1}{|s_1|^2} [A\zeta + B\dot{w}(t)] \quad (38)$$

Despejando $\dot{\zeta}$ de la ecuación (38) y sustituyendo en la ecuación (32), se obtiene que:

$$\dot{V} = \frac{2}{|s_1|^2} \zeta^T P [A\zeta + B\dot{w}(t)] \quad (39)$$

Y por propiedad $2PA = PA + A^T P^T$, se obtiene:

$$\dot{V} = \frac{1}{|s_1|^2} [2\zeta^T PA\zeta + 2\zeta^T PB\dot{w}(t)] \quad (40)$$

O bien:

$$\dot{V} = \frac{1}{|s_1|^2} [\zeta \quad \dot{w}] \begin{bmatrix} PA + A^T P^T & PB \\ B^T P & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \zeta \\ \dot{w} \end{bmatrix} + w(\cdot) \quad (41)$$

Donde $w(\cdot)$ es la perturbación agregada, definida como:

$$w(\cdot) = -\dot{w}^2 + \delta^2 \zeta_1^2 \geq 0 \quad (42)$$

Se elige a $w(\cdot) \geq 0$ para que:

$$\dot{V} = \frac{1}{|s_1|^{1/2}} [\zeta \quad \dot{w}] \begin{bmatrix} PA + A^T P^T + \delta^2 C^T C & PB \\ B^T P & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \zeta \\ \dot{w} \end{bmatrix} + \varepsilon V - \varepsilon V \quad (43)$$

Teniendo que:

$$\dot{V} \leq \frac{-\varepsilon}{|\zeta_1|^2} \zeta^T P \zeta = \frac{-\varepsilon}{|\zeta_1|} V \quad (44)$$

Por lo anterior, se satisface la siguiente relación:

$$\dot{V} \leq -\alpha V^{\frac{1}{2}} \quad (45)$$

Donde

$$\alpha = \varepsilon \lambda_{min}^{\frac{1}{2}}(P)$$

Donde ϵ es una constante positiva y $\lambda_{\min}^{\frac{1}{2}}(P)$ es el eigenvalor mínimo de la matriz P .

Finalmente, se puede concluir que el vector ζ convergerá al origen en tiempo finito.

Esto significa que si $\zeta \rightarrow 0$, entonces $s \rightarrow 0$, por tanto $\sigma \rightarrow 0$, por lo que el error de seguimiento $e \rightarrow 0$ y, finalmente, $\eta \rightarrow \eta_d$ en tiempo finito.

3.4 Escenarios de prueba propuestos

Dentro del control de sistemas existen tres grandes escenarios a resolver, los cuales exigen un diseño y sintonización óptimo del control para el enfrentamiento de los retos que dichos escenarios proponen. A continuación, se describen cada uno de ellos:

Estabilización.

Es el proceso de hacer que un sistema dinámico converja a un estado de equilibrio deseado después de haber experimentado cambios en sus condiciones iniciales.

Regulación.

Implica controlar el comportamiento de un sistema dinámico para que alcance su convergencia hasta un estado deseado.

Seguimiento de trayectorias.

Es la capacidad de un sistema dinámico para seguir una trayectoria deseada a lo largo del tiempo.

3.5 Casos de experimentación

Los sistemas dinámicos interactúan con múltiples escenarios que pueda haber en su entorno, y cada uno de estos presenta desafíos específicos para el diseño y aplicación del control.

Caso nominal.

Este escenario considera que el sistema opera en condiciones ideales, sin la presencia de perturbaciones externas que puedan afectar su comportamiento.

Caso con perturbaciones constantes.

En este escenario, el sistema es sometido a perturbaciones constantes en el tiempo que pueden provenir de factores ajenos al sistema y afectan de manera continua.

Caso con perturbaciones variantes en el tiempo.

Este escenario somete al sistema a experimentar perturbaciones externas que varían en el tiempo, las cuales pueden cambiar en su magnitud, frecuencia o naturaleza, y como consecuencia exige al sistema a adaptarse a dichas alteraciones.

3.6 Simulaciones.

El modelo dinámico del BlueROV3 fue sometido a prueba a manera de simulación en la plataforma de programación y cálculo numérico MATLAB (MathWorks, s.f.), en el cual se han comparado las tres leyes de control PD, PID y STA (Super-Twisting), presentadas en las secciones 1.1.6.2-1.1.6.4.

Cabe mencionar que, por cuestiones de espacio, para los casos en los que se somete a perturbaciones sólo se muestran resultados para los desplazamientos sobre los ejes XYZ que corresponden a los primeros tres grados de libertad.

En la Tabla 4.1 se presentan las ganancias sintonizadas en cada uno de los controles para todos los casos que se presentan a continuación.

Sabiendo el comportamiento que se debe de seguir en cada uno de los casos propuestos en la sección 3.5, se sometieron a simulación los siguientes escenarios:

3.6.1 Escenario 1

Estabilización con las posiciones iniciales en $p_0 = [1.2, 1.4, 1.6, 1.0, 0.8, 0.6]$.

Escenario 1.1.

Estabilización caso nominal.

Escenario 1.2.

Estabilización con perturbaciones constantes descritas por $\omega = [30,30,30,0,0,0]$ en un tiempo $t \in [4,10]$.

Escenario 1.3.

Estabilización con perturbaciones variantes en el tiempo descritas por $\omega = [10 \sin(5t), 10 \cos(5t), 10 \sin(5t), 0,0,0]$ en un tiempo $t \in [4,10]$.

3.6.2 Escenario 2

Regulación con las posiciones iniciales en $p_0 = [0,0,0,0,0,0]$, y las posiciones deseadas como $p_d = [1,1.5,2.0,0,0,0]$.

Escenario 2.1.

Regulación caso nominal.

Escenario 2.2.

Regulación con perturbaciones constantes descritas por $\omega = [30,30,30,0,0,0]$ en un tiempo $t \in [4,10]$.

Escenario 2.3.

Regulación con perturbaciones variantes en el tiempo descritas por $\omega = [10 \sin(5t), 10 \cos(5t), 10 \sin(5t), 0,0,0]$ en un tiempo $t \in [4,10]$.

3.6.3 Escenario 3

Seguimiento de trayectorias con las posiciones iniciales en $p_0 = [0,0,0,0,0,0]$, y las posiciones deseadas como $p_d = [\sin(2\pi ft), \cos(2\pi ft) - 1, t, 0,0,0]$, en donde f está definida como $1/T$ y $T = 5$, y t es el tiempo de muestreo.

Escenario 3.1.

Seguimiento de trayectorias caso nominal.

Escenario 3.2.

Seguimiento de trayectorias con perturbaciones constantes descritas por $\omega = [30,30,30,0,0,0]$ en un tiempo $t \in [4,10]$.

Escenario 3.3.

Seguimiento de trayectorias con perturbaciones variantes en el tiempo descritas por $\omega = [10 \sin(5t), 10 \cos(5t), 10 \sin(5t), 0,0,0]$ en un tiempo $t \in [4,10]$.

3.7 Experimentos en tiempo real.

Las experimentaciones fueron llevadas a cabo en un vehículo submarino Leonard, el cual es un vehículo submarino no tripulado (UUV, por sus siglas en inglés, Unmanned Underwater Vehicle) diseñado por el laboratorio LIRMM de la Universidad de Montpellier, Francia. Este robot submarino también es clasificado como un robot umbilical, con dimensiones de 75 x 55 x 45 cm y un peso de 28 kg. Se impulsa mediante seis propulsores, lo que le confiere la capacidad de ser un vehículo holonómico totalmente controlado.

En cada caso, se presenta el comportamiento del vehículo submarino durante la prueba de seguimiento de trayectoria, con la implementación de los controles PD, PID y STA.

De igual manera, se han propuesto tres escenarios a evaluar, los cuales se definieron como:

Caso nominal.

Esta prueba se considera el caso sin perturbaciones externas, donde el robot interactúa en un ambiente ideal.

Caso con incertidumbres paramétricas.

En esta prueba, se añade un flotador y una placa plástica con el propósito de afectar la flotabilidad del vehículo, modificando así la matriz de amortiguamiento. En otras palabras, se introducen incertidumbres paramétricas.

Caso con masa agregada.

En este escenario, se agrega masa al vehículo, emulando la ejecución de una tarea autónoma en la que el submarino levanta un objeto del suelo. Esto se realiza para estudiar el comportamiento del vehículo y verificar la idoneidad del control para ser implementado en tareas autónomas.

3.8 Criterio de desempeño

3.8.1 Error medio cuadrático (RMSE)

El error medio cuadrático o RMSE (por sus siglas en inglés de Root Mean Square Error), es una medida utilizada para evaluar la precisión de las diferentes estrategias de control, comparando las salidas generadas por el sistema. Se considera más efectivo a aquel control que posea un RMSE más bajo.

La fórmula para obtener esta medida está dada por:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{T_f} \int_0^{T_f} \|e(t)\|^2 dt} \quad (46)$$

donde T_f determina la duración de la prueba experimental, y $e(t)$ es el error.

3.8.2 Índice de entrada del control

Para evaluar el consumo de energía se propone el uso de la integral del índice de entrada del control, dada por:

$$INT = \int_{t_i}^{t_f} |\tau(t)| dt \quad (47)$$

donde $\tau(t)$ es el vector de entrada de control de posición. Los términos t_i y t_f representan el tiempo inicial y final de la experimentación, respectivamente.

3.9 Adaptación y experimentación en un medio establecido.

Una vez implementado el control al robot submarino, se procede a adaptar y experimentar su rendimiento en el medio que se ha elegido, el cual tiene que ser en un medio acuático.

Este proceso puede determinar la validez y efectividad del control dado que se someterá a pruebas predeterminadas que pondrán en modo de análisis la estabilidad del robot submarino.

3.9.1 Activación del robot submarino

La alimentación de energía del robot submarino es sumamente delicada, ya que es un pilar para un correcto funcionamiento, tomando en cuenta también que esta alimentación forma parte de las variables a considerar para el diseño del control.

El robot submarino tipo BlueROV2, mostrado en la Figura 3.1, según su datasheet (hoja de datos), funciona con una batería recargable de polímero de litio de cuatro celdas que ofrecen 10000 mA con 14.8 V, (BluerRobotics, s.f.).



Figura 3.1- Robot submarino tipo BlueROV2 de BlueRobotics (BlueRobotics, s.f.).

3.9.1.1 Enlace entre el submarino y la computadora

Para inicializar la conexión entre el servidor, en este caso una computadora portátil, y el robot submarino se deben llevar a cabo una serie de pasos establecidos por el mismo fabricante (Rusty et al., s.f.).

El interfaz FXTI es el componente central y esencial para la configuración de la parte superior del submarino ya que este es quien permitirá la comunicación robot-computador.

El software QGroundControl (QGroundControl, s.f.), ofrece una alternativa para el control de vuelo y/o la planificación de misiones para cualquier dron habilitado con MAVLink. Este software posee facilidad de trabajar ya que es de código abierto, lo cual consiste en una libre manipulación por parte del usuario.

Como parte de esta serie de configuraciones está la configuración de la red, en la cual se declara el interfaz FXTI como un dispositivo Ethernet dentro del centro de redes del computador.

El robot submarino BlueROV2 tiene la propiedad de ser manipulado inalámbricamente mediante un controlador Xbox (Xbox, s.f.).

3.10 Instrumentos de medición

3.10.1 Sensor de temperatura

El sensor de temperatura Celsius es un dispositivo de alta precisión y rápida respuesta diseñado para trabajar en ambientes submarinos debido a su sellado hermético. Posee una precisión de $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ y se comunica mediante el protocolo I2C. Está protegido por una jaula de aluminio anodizado para salvaguardarlo de posibles daños. Equipado con un conector JST GH, este sensor exhibe una respuesta rápida con una constante de tiempo de respuesta de 1 segundo en flujos de 0.5m/s, y de 2 segundos en condiciones de agua tranquilas. En la Tabla 3.2 se enlistan las especificaciones eléctricas, físicas, de precisión e interacción del sensor de temperatura (Celsius Fast-Response, 2023).

Tabla 3.2- Especificaciones del sensor de temperatura.

Parámetros	Valor
Voltaje de alimentación	3.3 a 5.5 V
Tensión lógica I2C	3.3 V

Corriente máxima	1.4 mA	
Temperatura de funcionamiento	-40 a +125°C	-40 a 257°F
Temperatura de almacenamiento	-55 a +150°C	-67 a 302°F
Precisión absoluta	Entre -5 y 50°C	
	±0.1°C	±0.18°F
	Entre -40 y 125°C	
	±0.5°C	±0.9°C
Profundidad operativa	0 a 975 m	0 a 3200 pies
Tamaño recomendado del orificio pasante	10.2 mm	13/32"

3.10.2 Sensor de Total de Sólidos Disueltos

El sensor TDS (Total de Sólidos Disueltos) es un dispositivo capaz de indicar la cantidad, en miligramos, de sólidos disueltos que se disuelven en un litro de agua. Su función primordial es evaluar la calidad del agua y determinar, en función a la cantidad de sólidos detectados, que tan limpia o pura es. El módulo TDS es un plug and play, la fuente de alimentación utiliza señales de corriente alterna (AC). Además, la sonda del sensor está diseñada para sumergirse directamente en el agua con el objetivo de obtener mediciones más precisas. En la Tabla 3.3 se enlistan las especificaciones eléctricas y físicas del módulo TDS (YouQian, 2023).

Tabla 3.3- Especificaciones del sensor de TDS.

Parámetros	Valor
Voltaje de alimentación	3.3 a 5.5 V
Rango de señal de salida	0 a 2.3 V
Rango de medición	0 a 1000ppm

Corriente de trabajo	3 a 6 mA
Precisión	±5% F.S (25°C)
Tamaño del módulo	42 mm x 31.2 mm

3.10.3 Sensor de pH

El sensor de pH es un módulo analógico diseñado para trabajar con Arduino y medir la alcalinidad o acidez de una solución. Este dispositivo proporciona una señal de salida análoga directamente proporcional a la medición del pH mediante un conector BNC. El electrodo de vidrio pH está compuesto de plata y cloruro de plata, estos elementos son la referencia para determinar los valores de pH en las soluciones acuosas. La precisión del módulo es de ± 0.1 pH con un tiempo de respuesta aproximado de ≤ 1 minuto. En la Tabla 3.4 muestran las especificaciones del sensor de pH (Mendoza Salazar, 2017).

Tabla 3.4- Especificaciones del sensor de pH.

Parámetros	Valor
Voltaje de alimentación	5.0 V
Rango de señal de salida	0 a 2.3 V
Rango de medición	0 a 14 pH
Temperatura de medición	0 a 60°C
Precisión	±0.1pH (25°C)
Tamaño del módulo	43 mm x 32 mm

3.10.3.1 Instrumentación

La calibración del sensor de pH se presentó como un proceso exigente, ya que resultó imposible llevarlo a cabo con el apoyo directo de los potenciómetros incluidos en el módulo del sensor. Como consecuencia de esta limitación, se optó por instrumentarlo mediante la utilización de tres buffers con valores de pH preestablecidos: 4.00, 7.01 y 10.01.

El procedimiento implicó la construcción de dos vectores: uno que contenía los valores de pH correspondientes a cada buffer y otro de registro de los voltajes medidos por la sonda cuando estaba expuesta a cada uno de los líquidos. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

$$PH = [4.00; 7.01; 10.01] \quad V = [3.79; 3.46; 3.19]$$

Con la aplicación Curve Fitting de Matlab, se generó la función presentada en (48) que describe la curva resultante. La ilustración correspondiente se presenta en la Figura 3.2:

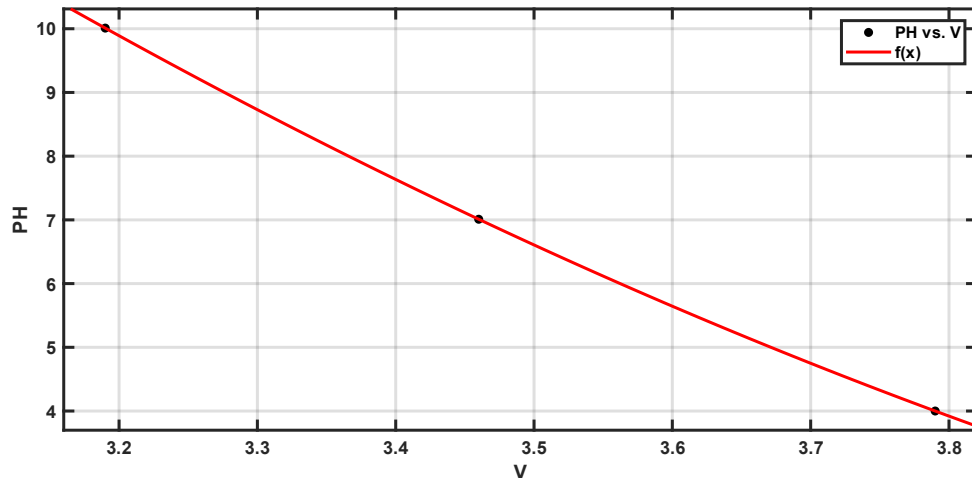


Figura 3.2- Función que describe el comportamiento del sensor de pH en las soluciones buffer de apoyo.

$$f(x) = p_1 \cdot V^2 + p_2 \cdot V + p_3 \quad (48)$$

donde $p_1 = 3.316$, $p_2 = -33.17$ y $p_3 = 82.06$, y V es el voltaje que genera cada sustancia sometida a prueba.

Una vez instrumentado el sensor, se llevaron a cabo pruebas utilizando cinco buffers para confirmar el correcto funcionamiento del código con la función (48) implementada. Los resultados de estas pruebas se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 3.5- Resultados obtenidos de la medición de buffers definidos sometiendo el sensor de pH con la función obtenida.

pH de Buffer	pH obtenido
4.00	4.27
6.86	6.49
7.01	7.75
9.18	8.61
10.01	10.63

Es importante destacar que las lecturas obtenidas en las pruebas de la sección 1 puedan tener un margen de error similar a los presentados en la Tabla 3.5.

Capítulo 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Activación del robot submarino

La batería específica para el robot submarino BlueROV2 de BlueRobotics, es una batería de iones de litio (14,8 V, 15,6 Ah), es un paquete de baterías personalizado de alta capacidad fabricado con 18650 celdas de iones de litio (BlueRobotics, s.f.). Esta batería se carga mediante el cargador H6 PRO fabricado por el mismo proveedor (BlueRobotics, s.f.), el cual tiene la capacidad integrada de equilibrio y descarga de baterías.

Antes de implementar la batería al robot submarino, es necesario realizar una prueba de calibración. Esto mediante la interacción con la interfaz del cargador, la cual ofrece un menú en el que se pueden seleccionar diversas configuraciones para la batería conectada, entre estas la calibración. Una vez calibrada la batería, es necesario conectarla al submarino para proceder con su activación.

4.2 Configuración del software

Uno de los pasos más importantes de la inicialización del robot submarino es la configuración del software que posee, ya que esto es indispensable para la comunicación robot-computadora.

La conexión umbilical entre el robot y la computadora (Figura 4.1) se lleva a cabo mediante el interfaz Fathom-X de BlueRobotics (BlueRobotics, s.f.). Este componente contiene un convertidor de cable Ethernet a USB, mediante el cual es posible la conexión al computador, y también contiene una placa de interfaz de anclaje Fathom-X (BlueRobotics, s.f.), la cual proporciona una conexión Ethernet de alta velocidad.



Figura 4.1- Conexión robot-computadora.

Los pasos por seguir para la configuración del software, para el BlueROV2, están dados por el fabricante (BlueRobotics, s.f.).

Algunos de los aspectos más importantes dentro de esta configuración son: el direccionamiento IP del robot (Figura 4.2), la actualización de los firmwares tanto de la computadora Raspberry como del piloto automático Pixhawk (Figura 4.3), y la calibración de los sensores (Figuras 4.4-4.6).

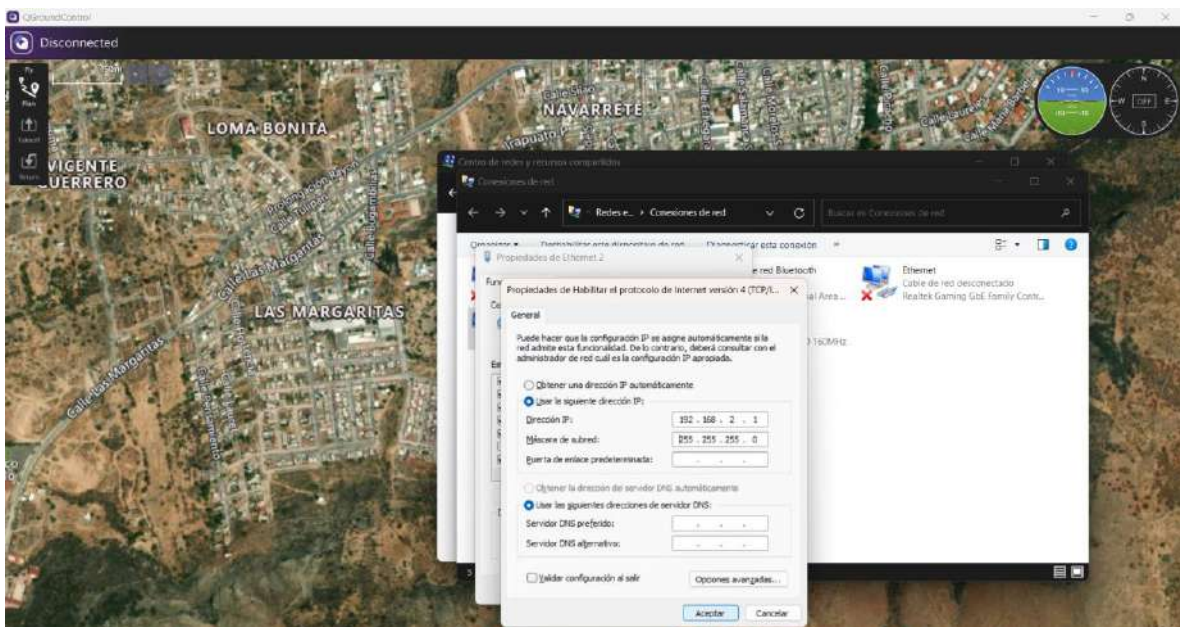


Figura 4.2- Establecimiento de la dirección IP del robot submarino.

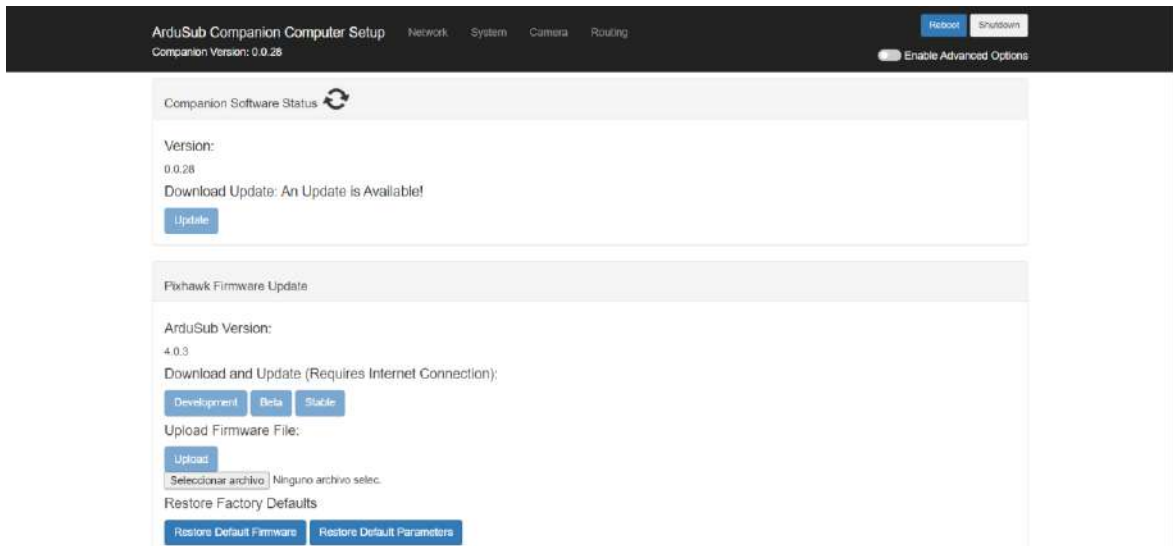


Figura 4.3- Actualización de los firmwares.

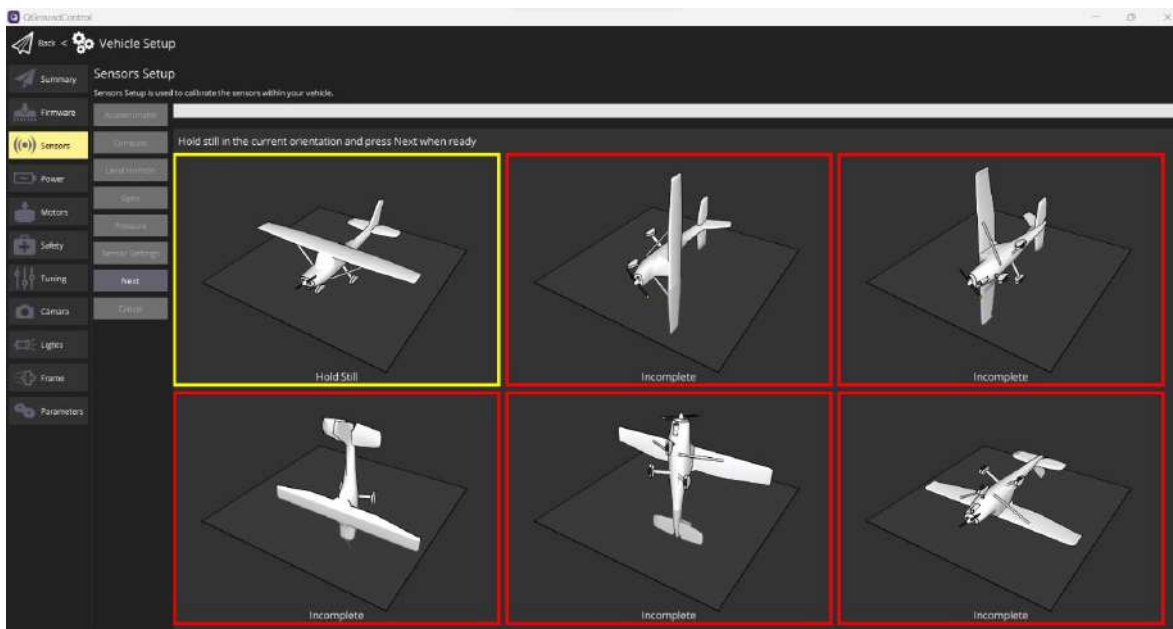


Figura 4.4- Calibración de la brújula del robot

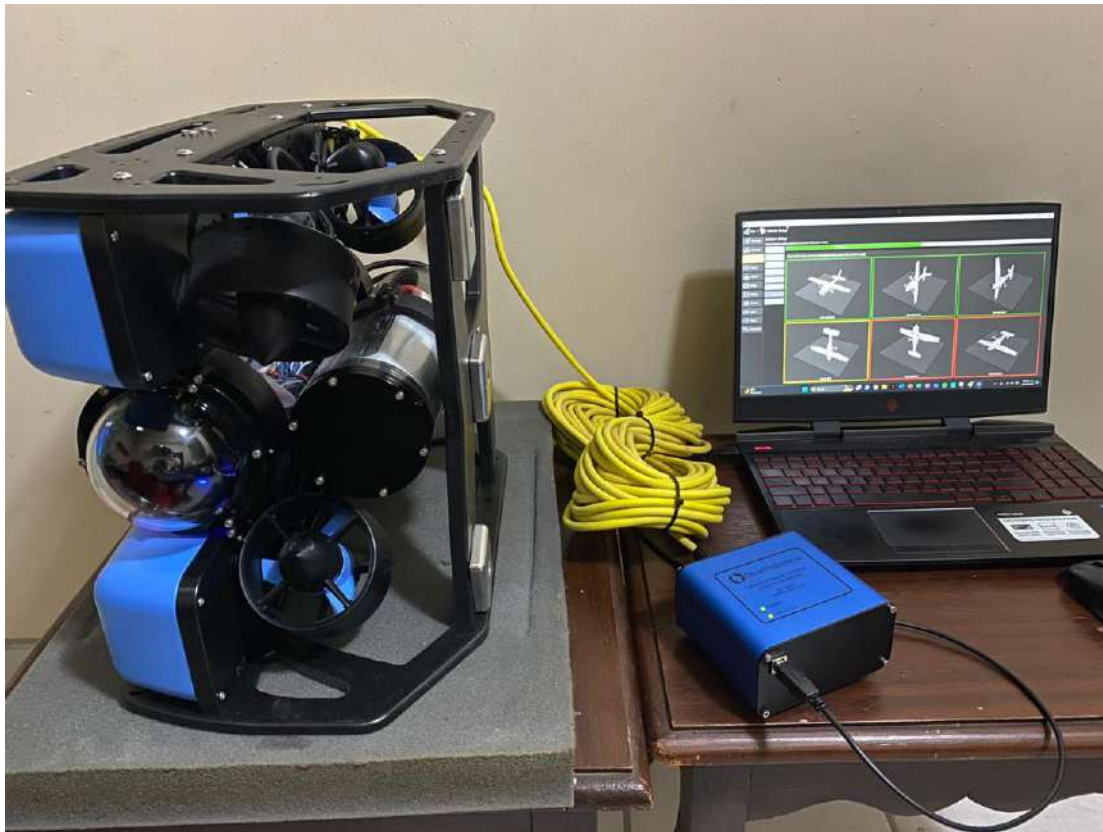


Figura 4.5- Calibración de la brújula del robot

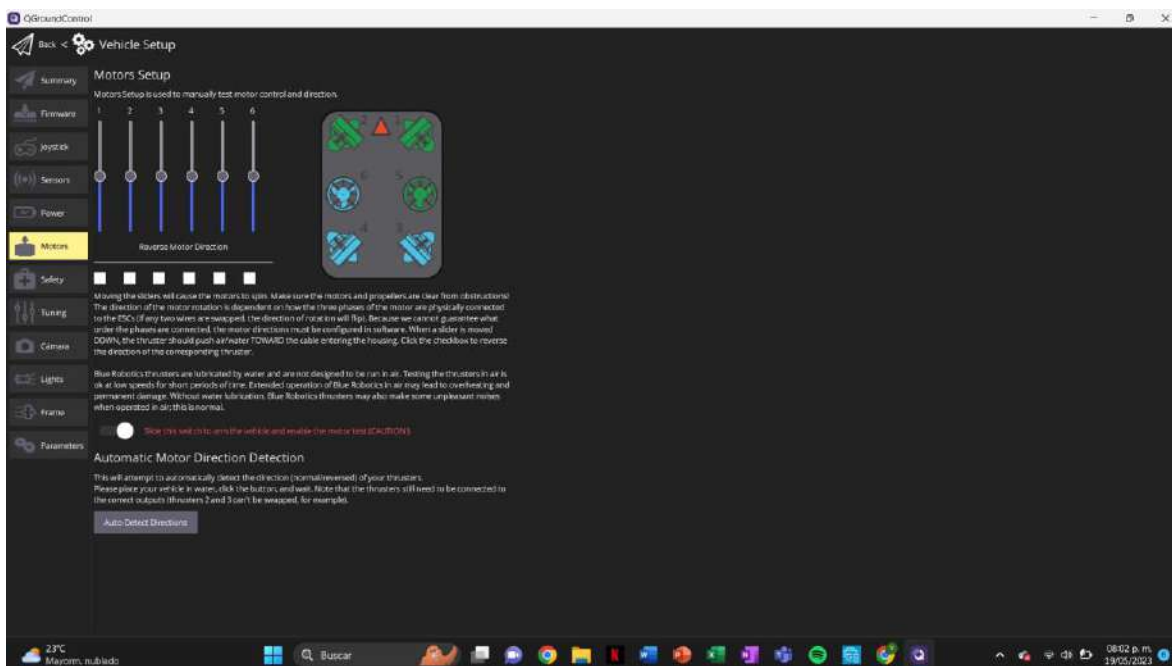


Figura 4.6- Calibración de los motores del robot

4.3 Adaptación y experimentación en un medio semi-controlado

Para las pruebas de un medio semi-controlado se tuvo la oportunidad de trabajar en una alberca del balneario La Crucita, ubicado en Abasolo, Guanajuato,



Figura 4.7- Zona a evaluar, circuito con los sensores y robot submarino

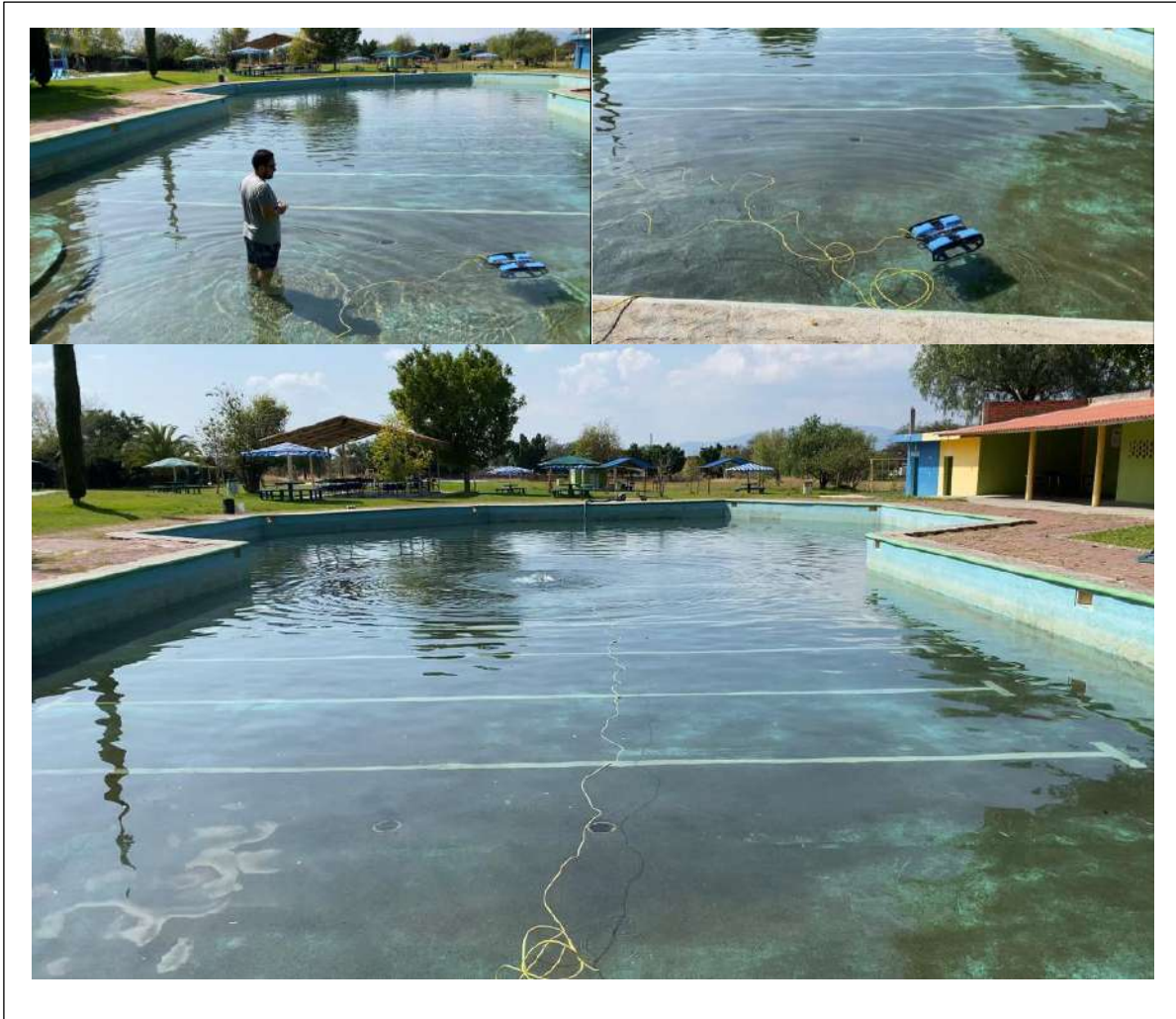


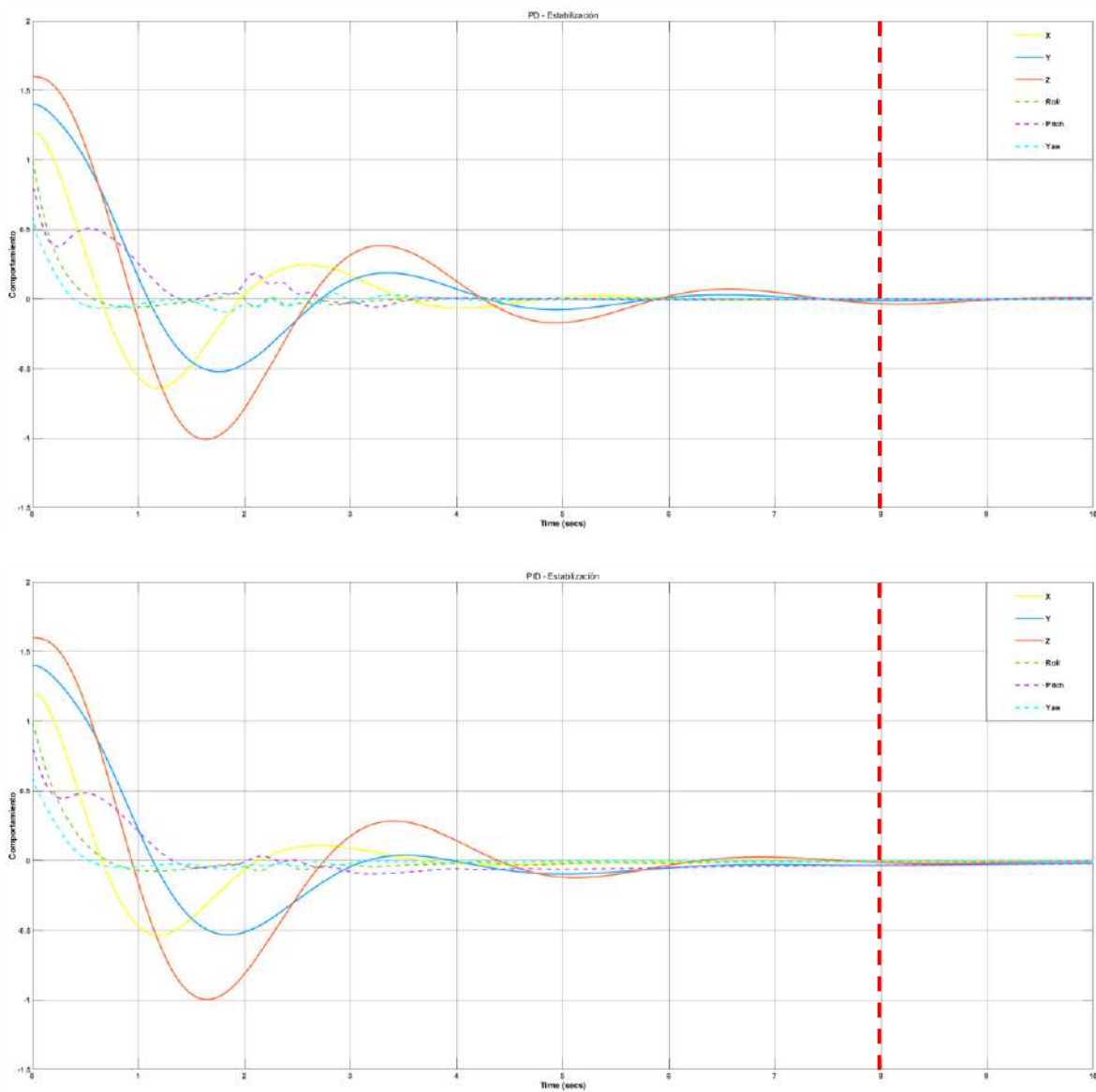
Figura 4.8- Pruebas de control de vehículo.

Durante esta etapa, se comprobó el correcto funcionamiento del robot submarino mediante una serie de experimentaciones que validaron su aislamiento, el correcto funcionamiento de los sensores, y la respuesta al control manipulador.

4.4 Simulaciones

4.4.1 Escenario 1.1 Estabilización caso nominal

En este escenario de estabilización en caso nominal, es destacable que los tres controles convergieron al sistema en la posición deseada. Sin embargo, a comparación de los controles PD y PID que convergieron en tiempos similares, el control Super-Twisting demostró una mayor eficacia en su comportamiento, ya que convergió con mayor rapidez, como se puede observar en la guía punteada de color rojo en la Figura 4.9.



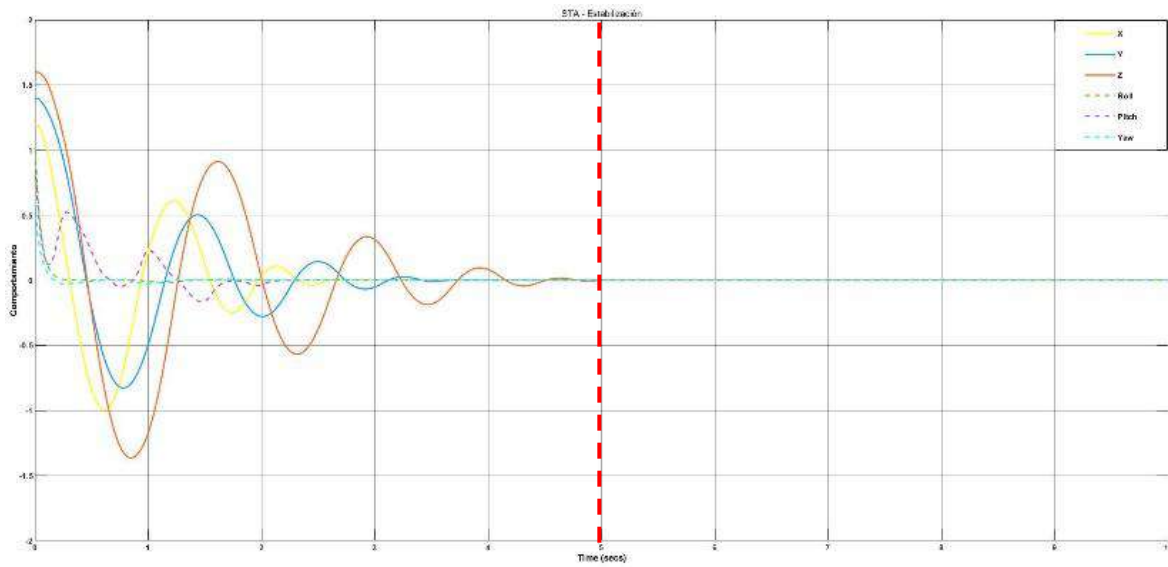
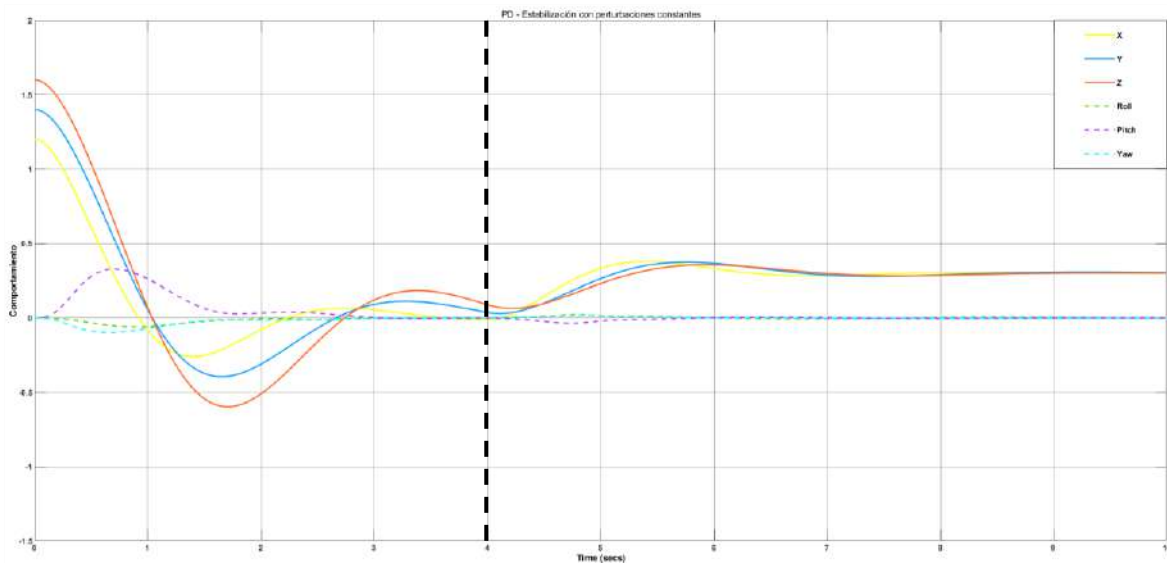


Figura 4.9- Resultados de simulación para el Escenario 1.1: a) PD b) PID c) STA.

4.4.2 Escenario 1.2 Estabilización con perturbaciones constantes

Las perturbaciones constantes se han aplicado desde el tiempo $t = 4$, como se puede observar en la guía punteada de color negro en la Figura 4.10. En dicho momento, los controles estaban a punto de converger en la posición deseada, pero estas perturbaciones lo impidieron para los primeros dos controles expuestos. A pesar de las irregularidades, el control PID, a lo largo del tiempo, intentó estabilizar el sistema, aunque sin lograr un comportamiento óptimo similar al control STA. Este último, por otro lado, demostró ser el más efectivo al generar la mejor respuesta en este escenario.



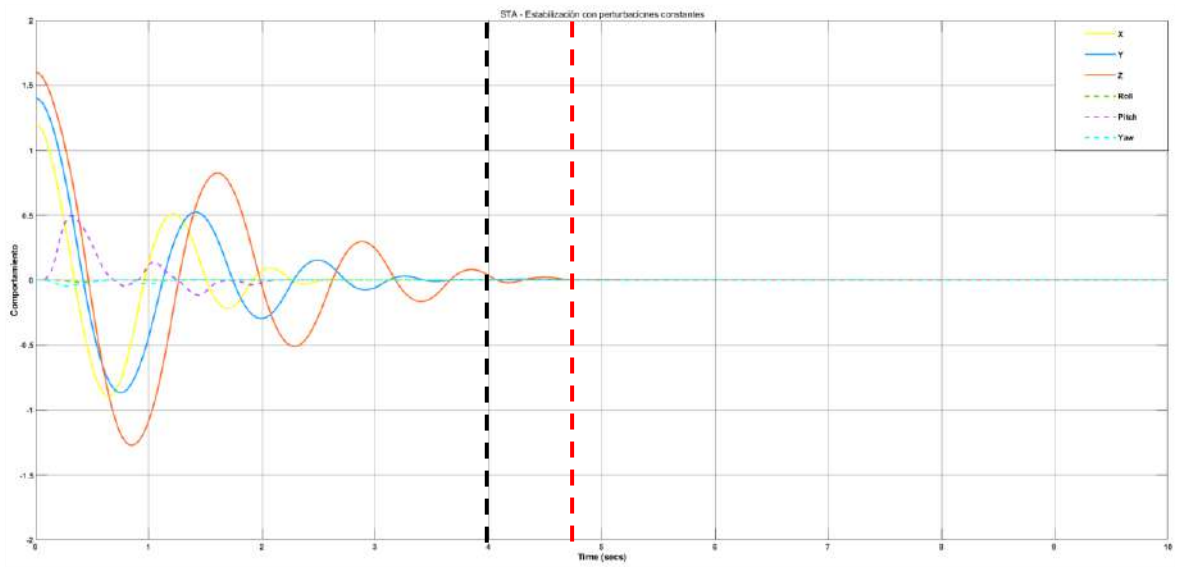
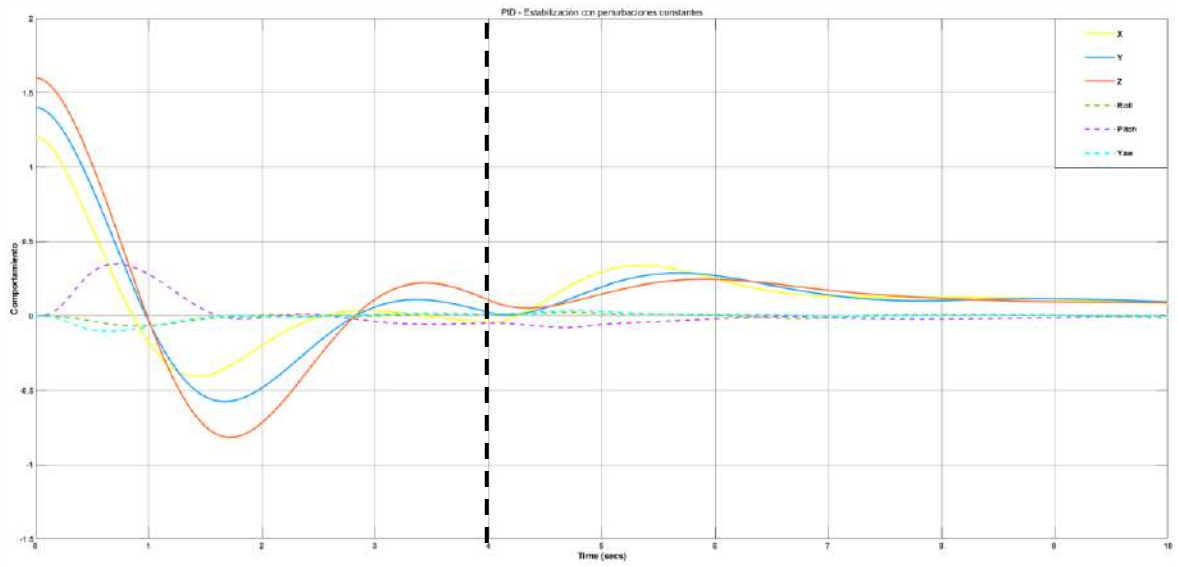
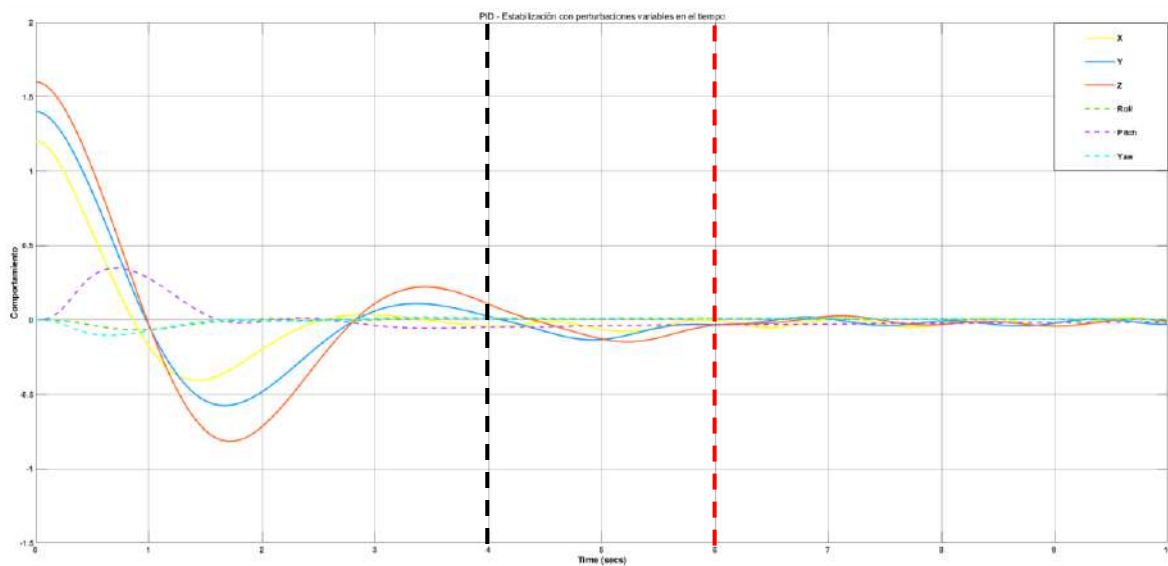
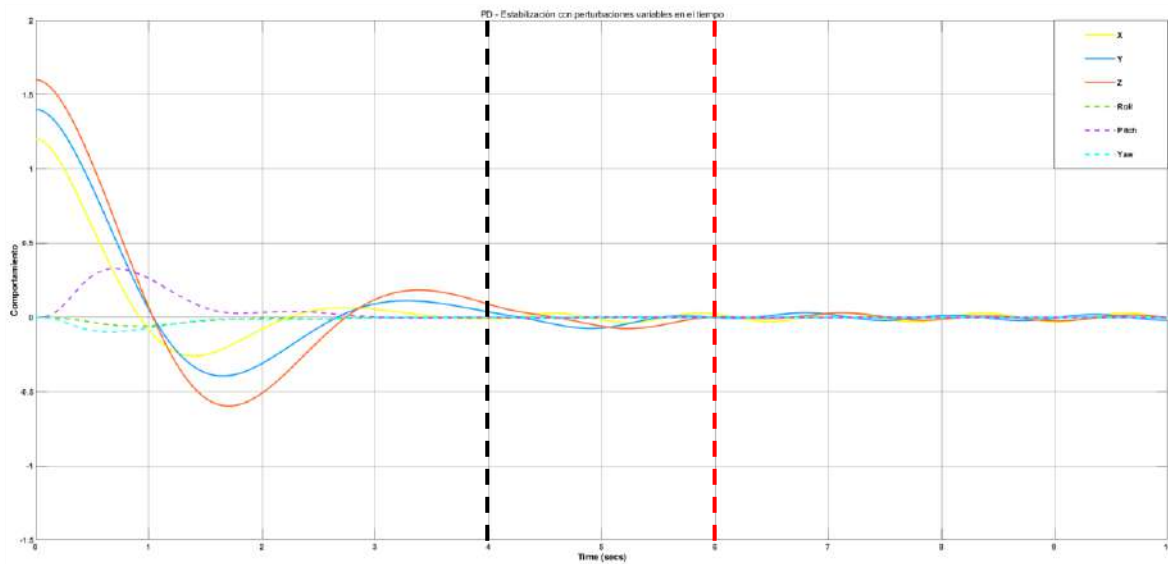


Figura 4.10- Resultados de simulación para el Escenario 1.2: a) PD b) PID c) STA.

4.4.3 Escenario 1.3 Estabilización con perturbaciones variantes en el tiempo

A diferencia del caso anterior, en esta situación, las perturbaciones variantes en el tiempo no provocaron una alteración significativa en el comportamiento de los tres controles, ya que todos convergieron a la posición deseada. Los controles PD y PID adoptaron comportamientos muy similares ya que convergieron en tiempos similares. Sin embargo, es importante destacar que el control STA mostró el mejor rendimiento, con una diferencia notable en el tiempo de estabilización, como se puede apreciar en la guía punteada de color rojo en la Figura 4.11.



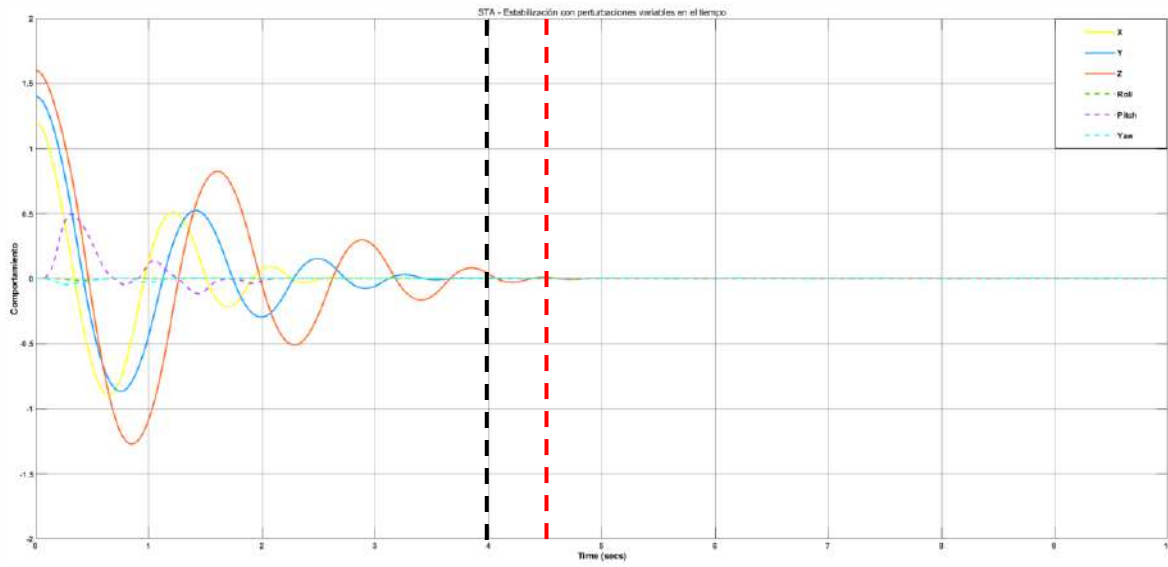
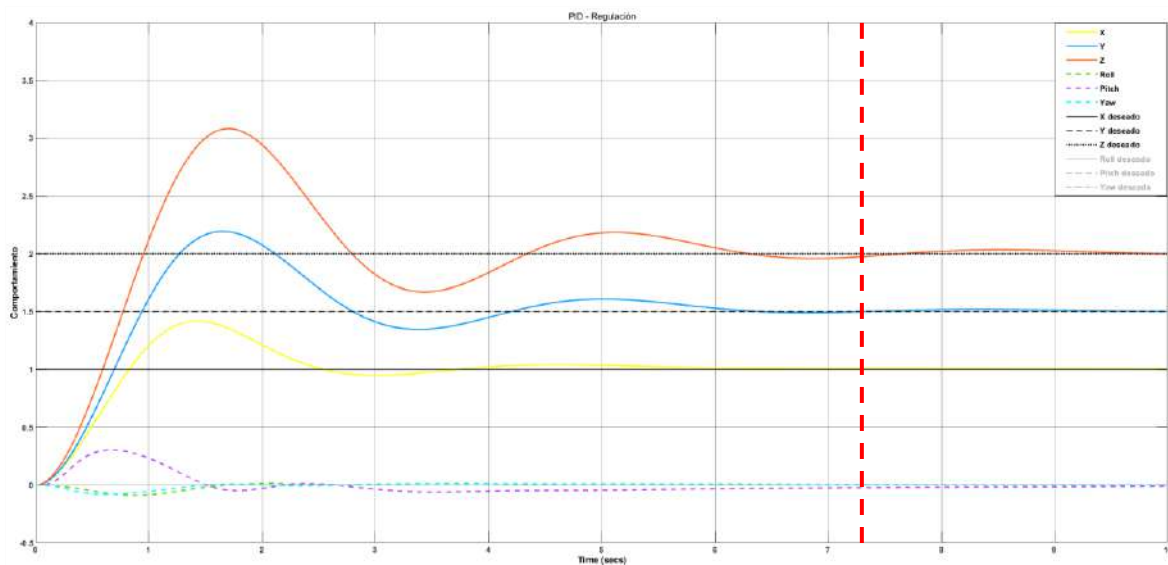
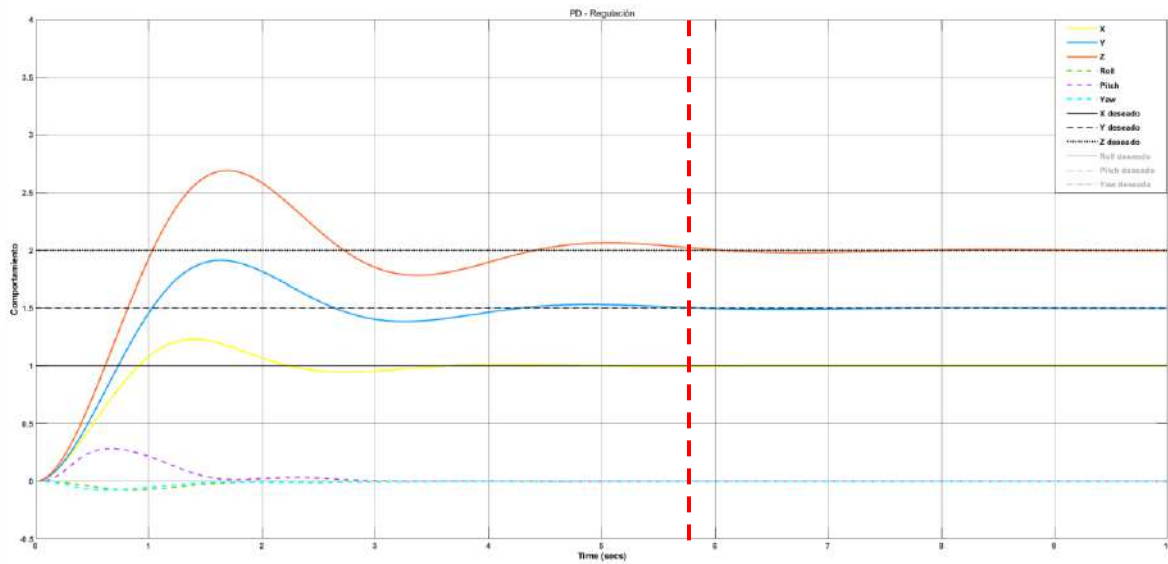


Figura 4.11- Resultados de simulación para el Escenario 1.3: a) PD b) PID c) STA.

4.4.4 Escenario 2.1 Regulación caso nominal

En la Figura 4.12 se puede observar que el control STA generó alteraciones mayores en sus grados en la prueba previa a su estabilización en las posiciones deseadas; no obstante, proporciona una respuesta más rápida. A su vez, los controles PD y PID generaron menores alteraciones en su etapa de estabilización, y aunque también convergieron a las posiciones deseadas, esto fue con una diferencia de tiempo de 1 a 3 segundos después del control STA.



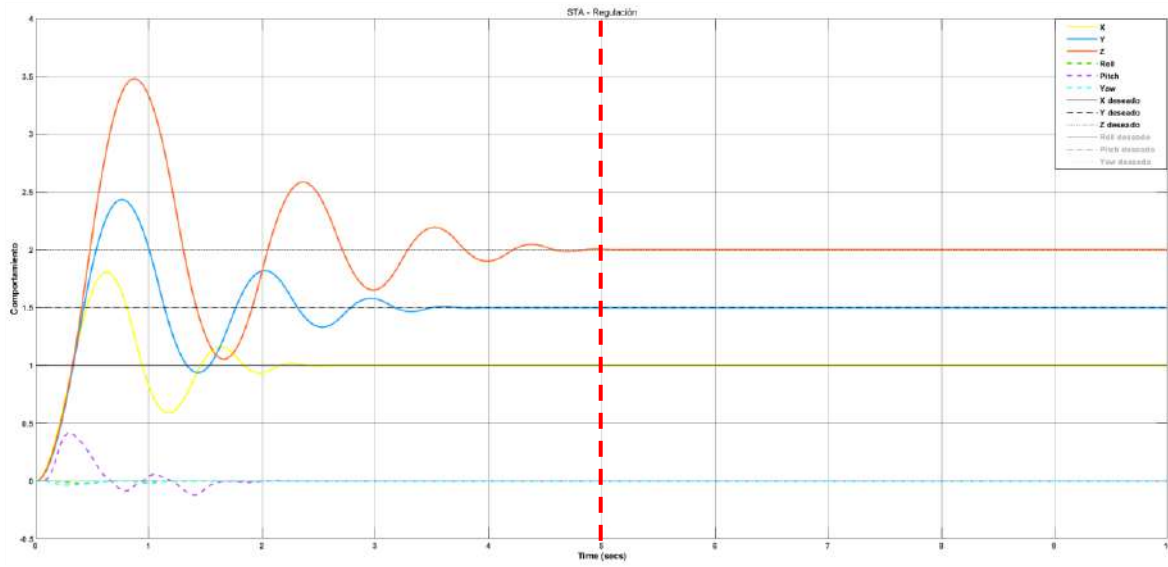
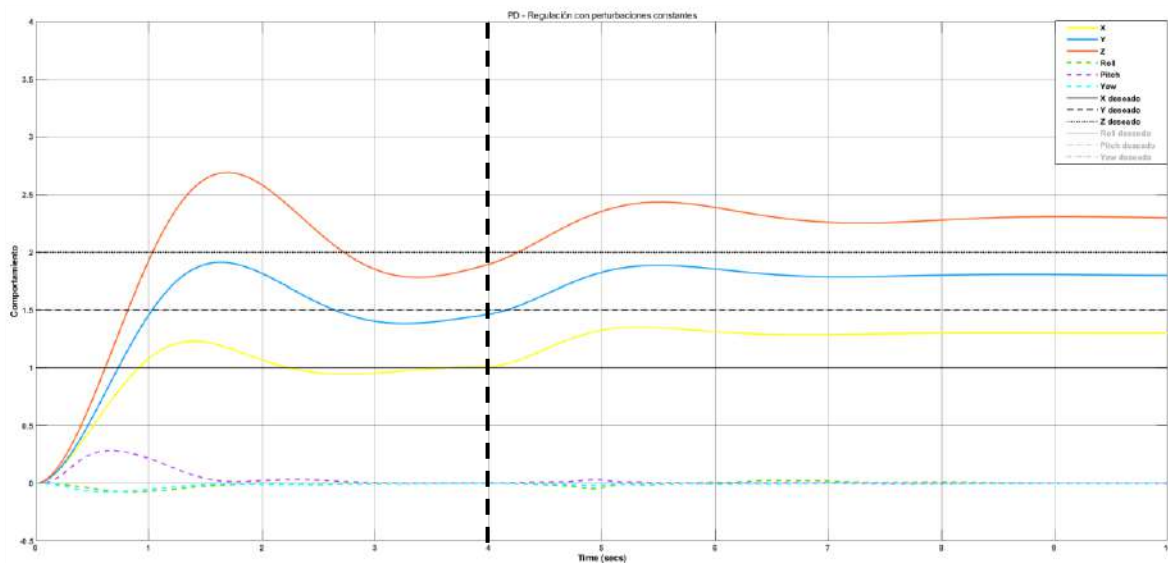


Figura 4.12- Resultados de simulación para el 33Escenario 2.1: a) PD b) PID c) STA.

4.4.5 Escenario 2.2 Regulación con perturbaciones constantes

En esta prueba, el control PD obtuvo afectaciones considerables derivadas de las perturbaciones, ya que éstas le impidieron adoptar un comportamiento de convergencia hacia la posición deseada. El control PID, en cambio, a pesar de sufrir las perturbaciones constantes, y como puede observarse, a lo largo del tiempo posee la tendencia a converger. Al igual que en el escenario anterior, el control STA presentó mayores oscilaciones en sus grados durante el tiempo previo a la estabilización. Es importante recordar que este control es robusto ante perturbaciones externas, como se evidencia en la Figura 4.13. Aunque las perturbaciones fueron aplicadas desde el tiempo $t = 4$, el control STA es el único que ofreció una regulación precisa, estabilizándose en las posiciones deseadas en un tiempo considerable, como se muestra en la guía punteada de color rojo.



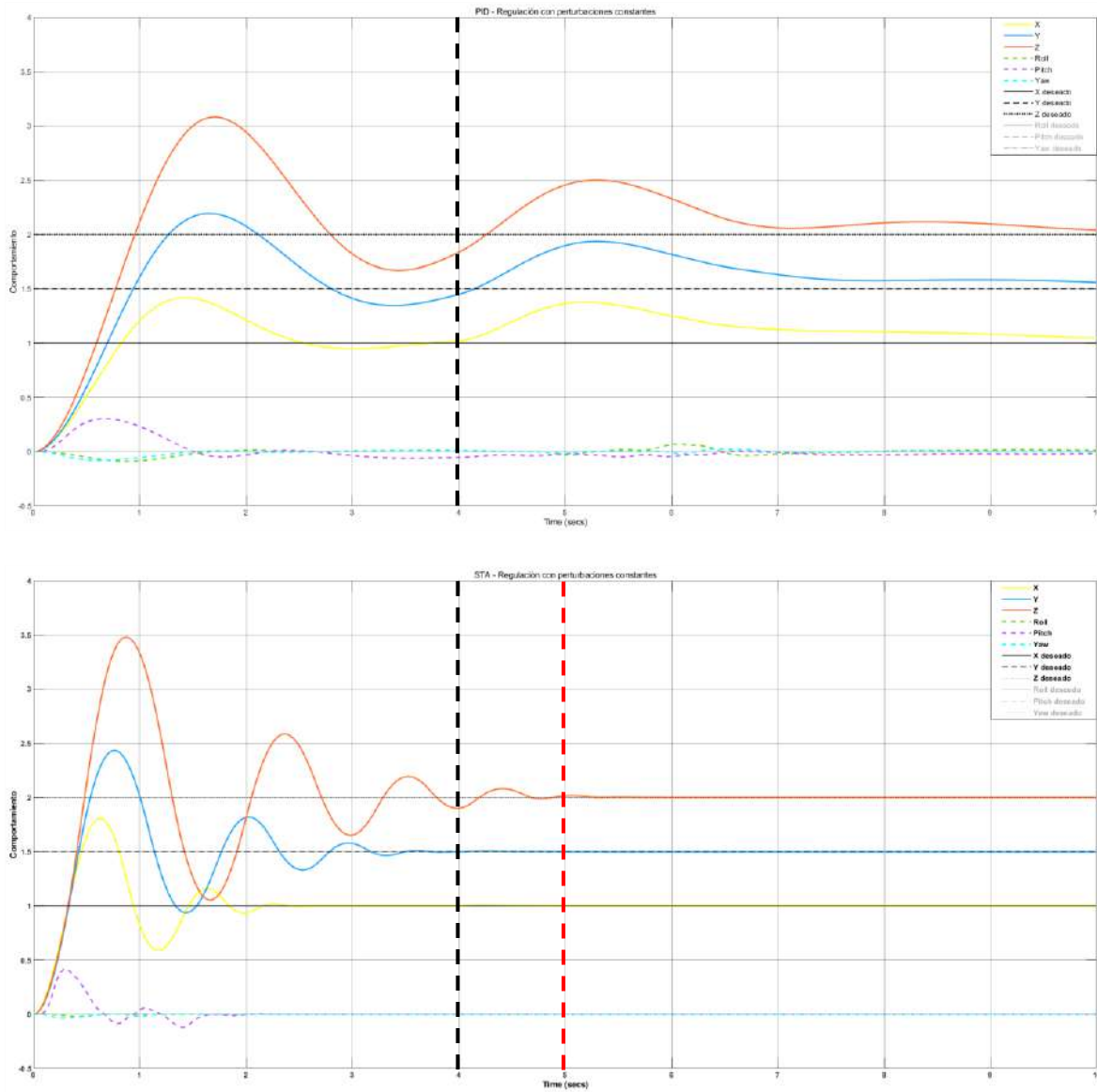
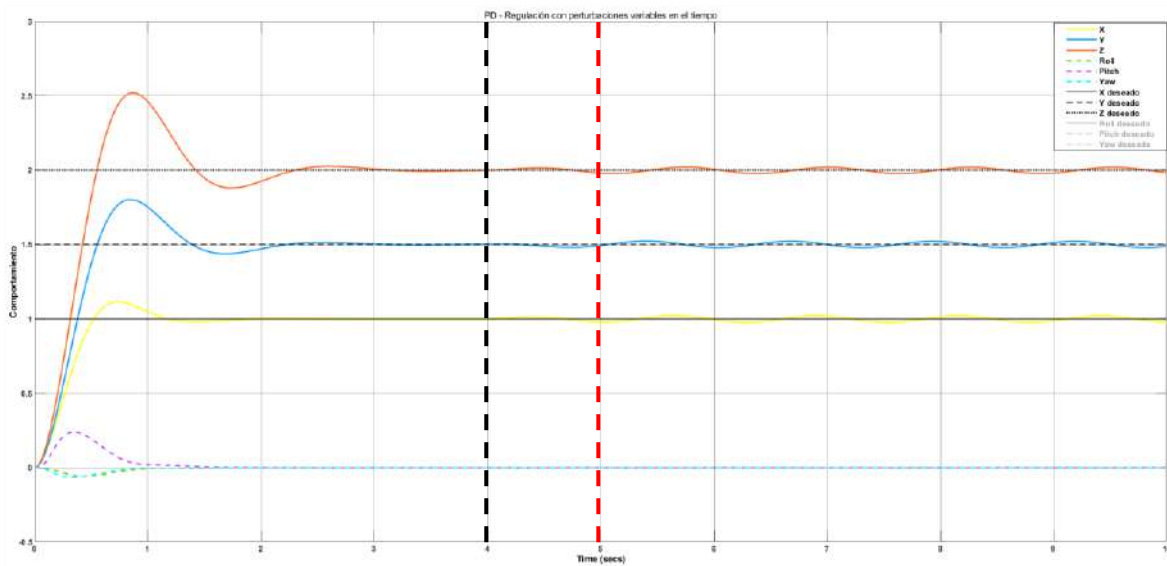


Figura 4.13- Resultados de simulación para el Escenario 2.2: a) PD b) PID c) STA.

4.4.6 Escenario 2.3 Regulación con perturbaciones variantes en el tiempo

Al igual que en el Escenario 1.3, las perturbaciones variantes en el tiempo propuestas causaron irregularidades de menor magnitud que las propuestas en el escenario anterior. Como puede observarse en la Figura 4.14, los controles PD y PID adoptaron comportamientos muy similares, siendo el primero quien obtuvo menores irregularidades desde su convergencia en la posición deseada. Los tres controles sometidos a prueba generaron un comportamiento aceptable en el sistema, aunque destaca el rendimiento sobresaliente del sistema con el control STA, ya que se estabilizó antes de las perturbaciones y, a pesar de estas, se ha mantenido estable en todo momento.



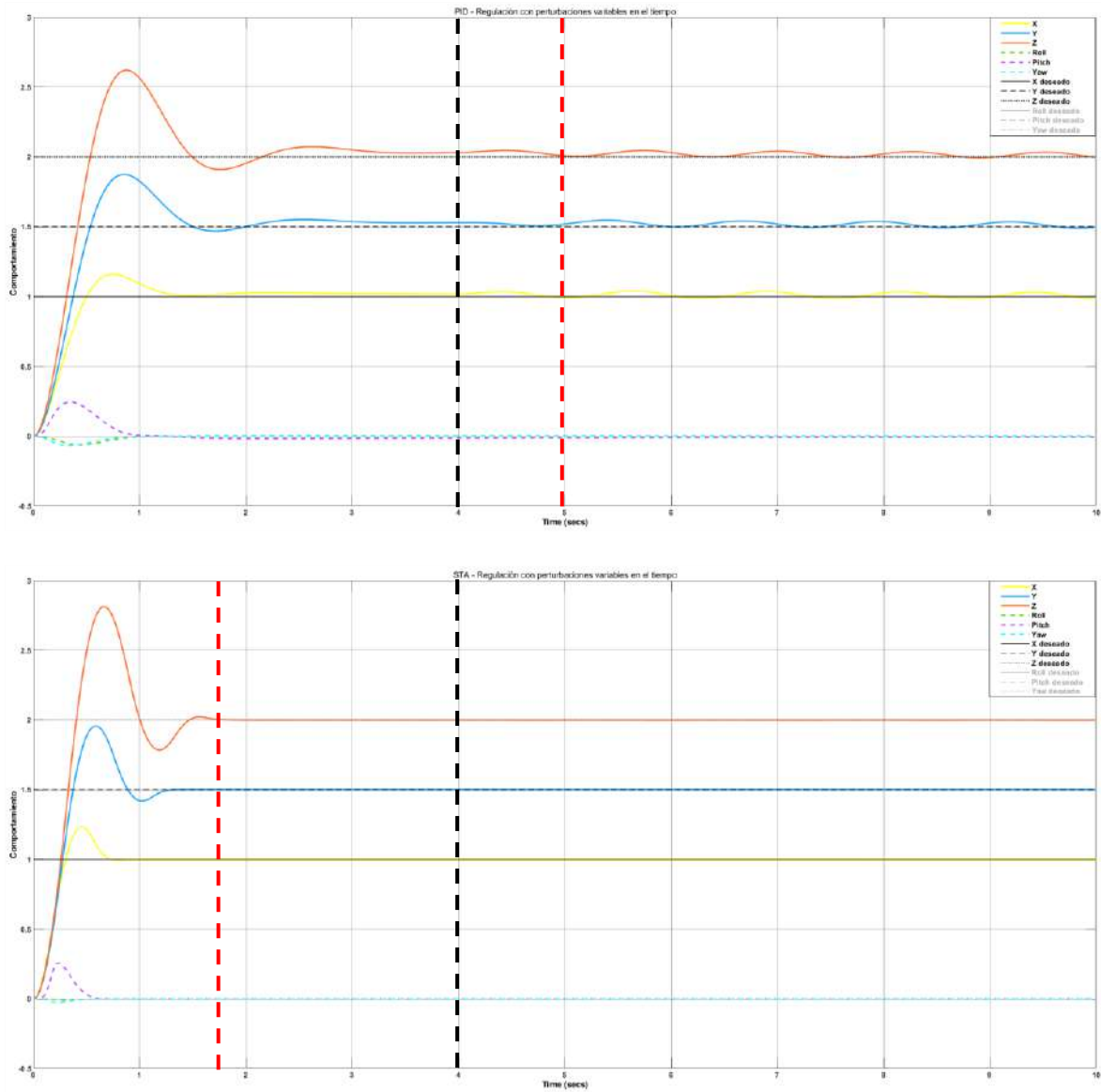


Figura 4.14- Resultados de simulación para el Escenario 2.3: a) PD b) PID c) STA.

4.4.7 Escenario 3.1 Seguimiento de trayectorias caso nominal

Como se muestra en la Figura 4.15, la trayectoria a seguir está definida por la línea punteada de color negro llamada "Referencia". A partir de esta referencia, es evidente que los controles PD y PID presentan un error mínimo en estado estacionario ya que no logran seguir con precisión la trayectoria propuesta.

Si bien el comportamiento del sistema sometido a los tres controles fue aceptable, el control STA adoptó de mejor manera la trayectoria deseada, ya que prácticamente generó el mismo resultado de la referencia, como se puede observar en su línea de comportamiento de color rojo.

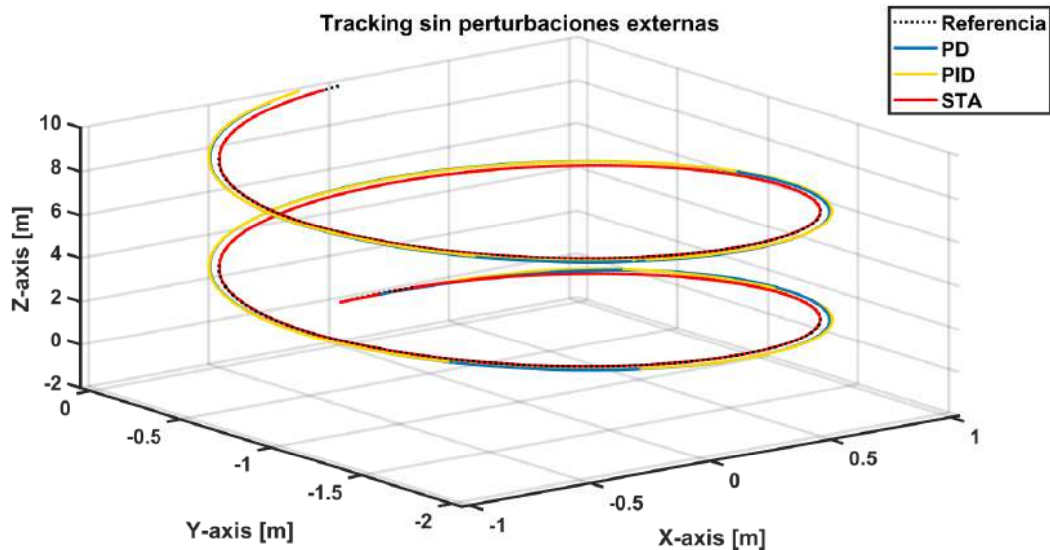


Figura 4.15- Resultados de simulación para el Escenario 3.1.

4.4.8 Escenario 3.2 Seguimiento de trayectorias con perturbaciones constantes

En este escenario, al igual que en los anteriores sometidos a perturbaciones, se llevó a cabo desde el tiempo $t = 4$, lo cual puede identificarse en el eje Z. El comportamiento fue aceptable para los tres controles; sin embargo, es importante señalar que los controles PD y PID mostraron mayores irregularidades debido a las perturbaciones, y también se observó la presencia de un error en estado estacionario. Sin embargo, en concordancia con la afirmación de que el control STA es robusto ante perturbaciones, este fue el que adoptó de mejor manera el comportamiento deseado, como se puede observar en la Figura 4.16.

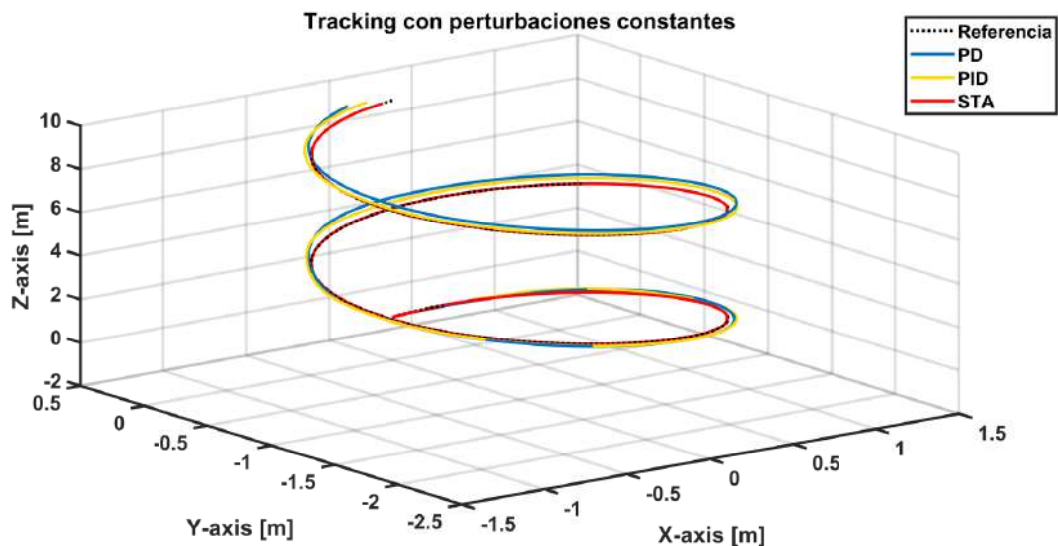


Figura 4.16- Resultados de simulación para el Escenario 3.2.

4.4.9 Escenario 3.3 Seguimiento de trayectorias con perturbaciones variantes en el tiempo

En este escenario final, el seguimiento de trayectoria ante perturbaciones variables en el tiempo no mostró resultados distintos a los previamente mencionados; es decir, se observaron alteraciones menores en comparación con perturbaciones constantes. No obstante, en el comportamiento de los controles PD y PID se identificó la presencia de un error que les impide seguir con precisión la trayectoria definida por la referencia, Figura 4.17, lo que representa una clara desventaja en relación con el control STA. Este escenario refuerza la evidencia, mostrando que el control STA fue el más eficiente en cada uno de los escenarios evaluados.

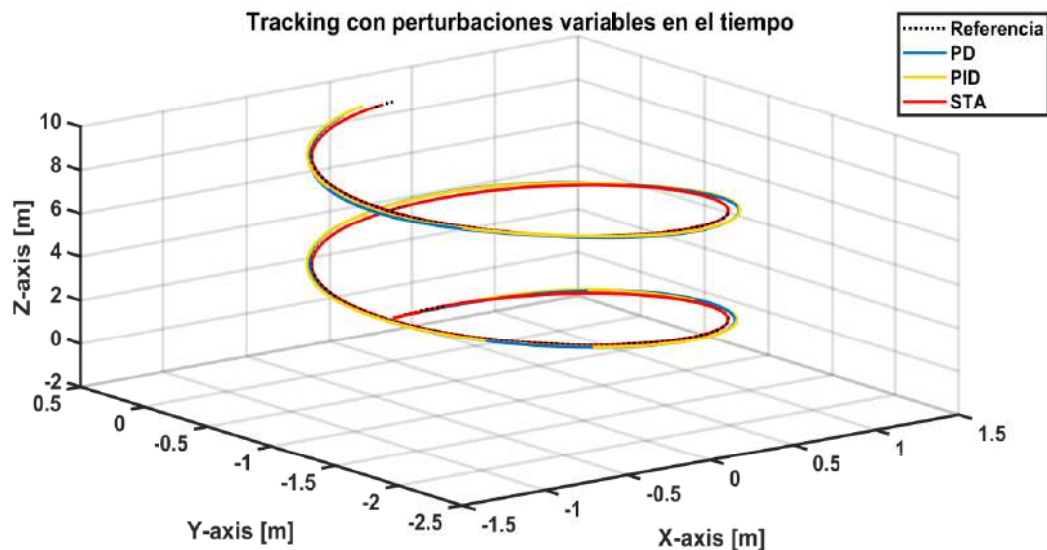


Figura 4.17- Resultados de simulación para el Escenario 3.3.

Se corroboró la proposición de que el control STA generó mejor comportamiento que los controles PD y PID en todos los escenarios propuestos mediante la medición de su error medio cuadrático, presentado en la siguiente sección.

4.5 Criterio de desempeño de las simulaciones

La Tabla 4.1 almacena todos los datos sometidos y generados en las diferentes pruebas de simulación. Los datos de interés en este punto se encuentran en la columna llamada RMSE. En esta columna, se resaltan en color rojo los resultados que generaron un error medio cuadrático menor y, para todos los escenarios, el control STA obtuvo el mejor comportamiento. Con esto, se puede concluir que el control propuesto es el que genera un mejor comportamiento para el robot submarino en todos los problemas a enfrentar, ya sea estabilización, regulación o seguimiento de trayectoria.

Tabla 4.1- RMSE obtenido en cada uno de los escenarios sometidos a simulación.

Problema	Escenario	Control	Condiciones iniciales							Ganancias			RMSE										
			x_d	y_d	z_d	ϕ_d	θ_d	ψ_d	x	y	z	ϕ	θ	ψ	$kp/k1$	$ki/k2$	kd/λ	x [m]	y [m]	z [m]	ϕ [rad]	θ [rad]	ψ [rad]
Estabilización	Nominal	PD	0	0	0	0	0	0	1.2	1.4	1.6	1	0.8	0.6	100		200	0.4144	0.5206	0.6461	0.2553	0.2473	0.1508
		PID	0	0	0	0	0	0	1.2	1.4	1.6	1	0.8	0.6	100	200	200	0.4255	0.5517	0.691	0.257	0.2494	0.1523
		STA	0	0	0	0	0	0	1.2	1.4	1.6	1	0.8	0.6	90	20	20	0.2447	0.2896	0.4045	0.0543	0.0983	0.0311
	Pert. Constantes	PD	0	0	0	0	0	0	1.2	1.4	1.6	0	0	0	100		300	0.4095	0.4836	0.555	0.0174	0.09	0.0271
		PID	0	0	0	0	0	0	1.2	1.4	1.6	0	0	0	100	200	300	0.3787	0.4648	0.5517	0.0199	0.0985	0.0299
		STA	0	0	0	0	0	0	1.2	1.4	1.6	0	0	0	90	20	20	0.2715	0.3186	0.3899	0.0003	0.015	0.0017
	Pert. Variantes	PD	0	0	0	0	0	0	1.2	1.4	1.6	0	0	0	100		300	0.3454	0.4328	0.5137	0.0165	0.0896	0.0268
		PID	0	0	0	0	0	0	1.2	1.4	1.6	0	0	0	100	200	300	0.3539	0.4495	0.5406	0.0185	0.0978	0.0288
		STA	0	0	0	0	0	0	1.2	1.4	1.6	0	0	0	90	20	20	0.2717	0.3189	0.3902	0.0003	0.015	0.0017
Regulación	Nominal	PD	1	1.5	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100		300	0.2871	0.459	0.6312	0.0206	0.0789	0.0206
		PID	1	1.5	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	300	300	0.3015	0.487	0.6806	0.0247	0.0892	0.0227
		STA	1	1.5	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	90	20	20	0.146	0.2229	0.3356	0.0005	0.0146	0.0014
	Pert. Constantes	PD	1	1.5	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100		300	0.3565	0.5013	0.6564	0.023	0.0769	0.0205
		PID	1	1.5	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	300	300	0.3287	0.498	0.6772	0.0291	0.0853	0.0222
		STA	1	1.5	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	90	20	20	0.1453	0.2218	0.3341	0.0005	0.0145	0.0014
	Pert. Variantes	PD	1	1.5	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	400		800	0.4428	0.6904	0.9305	0.021	0.0885	0.0235
		PID	1	1.5	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	400	600	800	0.434	0.6788	0.9171	0.0215	0.0892	0.0236
		STA	1	1.5	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	200	20	10	0.101	0.1591	0.2324	0.0004	0.007	0.0006
Tracking	Nominal	PD	f	f	f	0	0	0	0	0	0	0	0	0	400		800	0.1883	0.2039	0.2074	0.0044	0.0379	0.0095
		PID	f	f	f	0	0	0	0	0	0	0	0	0	800	700	800	0.098	0.1019	0.0771	0.0022	0.0214	0.0053
		STA	f	f	f	0	0	0	0	0	0	0	0	0	200	20	20	0.0448	0.0441	0.0505	0.00000007	0.00016	0.00000017
	Pert. Constantes	PD	f	f	f	0	0	0	0	0	0	0	0	0	400		800	0.1806	0.2187	0.1669	0.0091	0.0222	0.011
		PID	f	f	f	0	0	0	0	0	0	0	0	0	800	700	800	0.0935	0.103	0.0665	0.0038	0.014	0.0064
		STA	f	f	f	0	0	0	0	0	0	0	0	0	200	20	20	0.0446	0.0441	0.0505	0.00000004	0.00016	0.00000017
	Pert. Variantes	PD	f	f	f	0	0	0	0	0	0	0	0	0	400		800	0.192	0.2103	0.209	0.0072	0.0692	0.0165
		PID	f	f	f	0	0	0	0	0	0	0	0	0	800	700	800	0.0978	0.1055	0.0741	0.0032	0.0295	0.0075
		STA	f	f	f	0	0	0	0	0	0	0	0	0	200	20	20	0.0447	0.0441	0.0505	0.00000004	0.00015	0.00000017

4.6 Experimentos en tiempo real.

El interés en instrumentar este tipo de vehículos ha experimentado un notable aumento con el transcurso de los años. Las ventajas proporcionadas por su utilización han captado la atención de países líderes en tecnología.

Es relevante destacar que se colaboró con el Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier (LIRMM) en Francia, con el objetivo de optimizar la manipulación y el respaldo de estos recursos tecnológicos Figura 4.18.

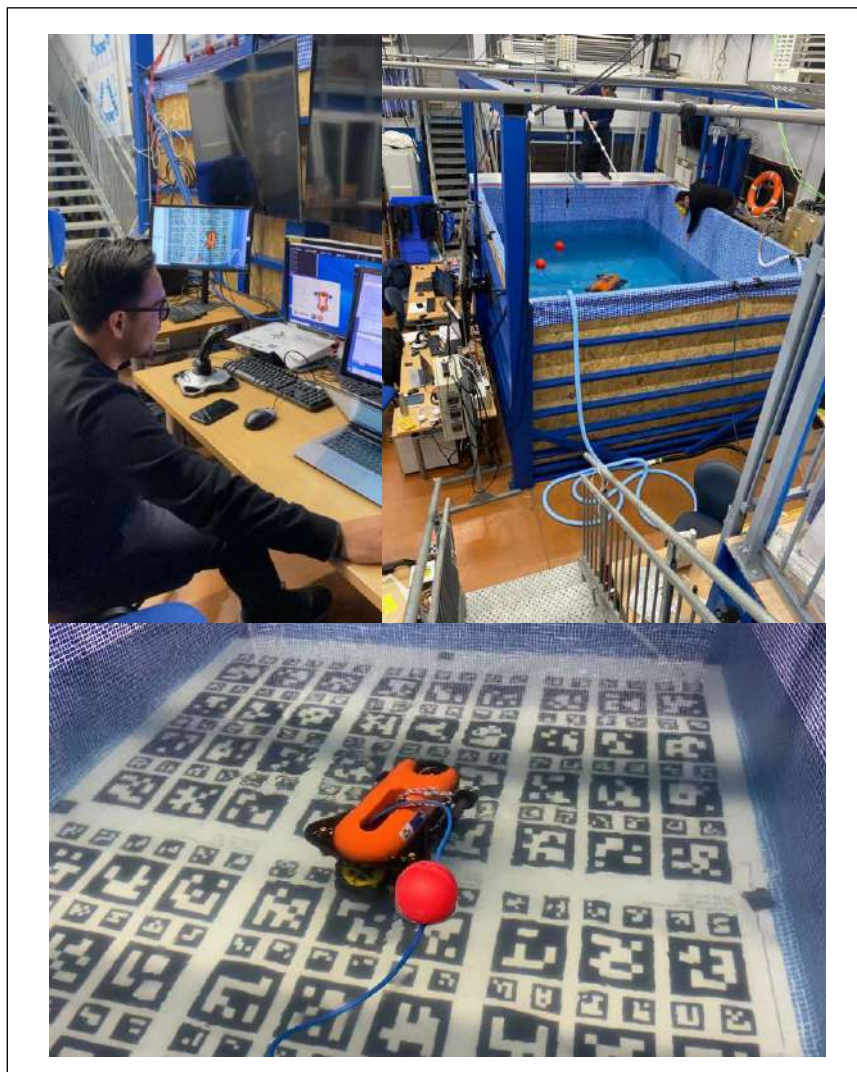


Figura 4.18.- Colaboración con el Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier en Francia para el control de robots submarinos tipo AUVs.

Las gráficas se distribuyen en tres secciones distintas para representar diferentes aspectos, cabe destacar que las gráficas ubicadas en la parte izquierda ilustran los resultados obtenidos en cuanto a la profundidad. Por otro lado, las gráficas situadas en la parte derecha muestran los resultados en yaw, es decir, las mediciones relacionadas con la rotación en torno al eje z. Para comprender las secciones de mejor manera, se describe que: en la parte superior se muestra el resultado de la prueba, es decir, qué tan bien se comportó el vehículo en el seguimiento de la trayectoria. En la sección intermedia, se presentan los errores en el seguimiento, los cuales idealmente deberían tender a cero. Finalmente, en la parte inferior se muestra la evolución del control a lo largo del tiempo, indicando la cantidad de fuerza requerida por los actuadores para su accionamiento. Este último aspecto es de relevante importancia, ya que permite comprobar la funcionalidad del control.

4.6.1 Caso nominal

En la Figura 4.19 se puede observar que, en cada uno de los aspectos evaluados, el control STA demostró un mejor comportamiento. Es importante resaltar los resultados obtenidos con los controles PD y PID, ya que también proporcionaron respuestas óptimas con un requerimiento de torque reducido.

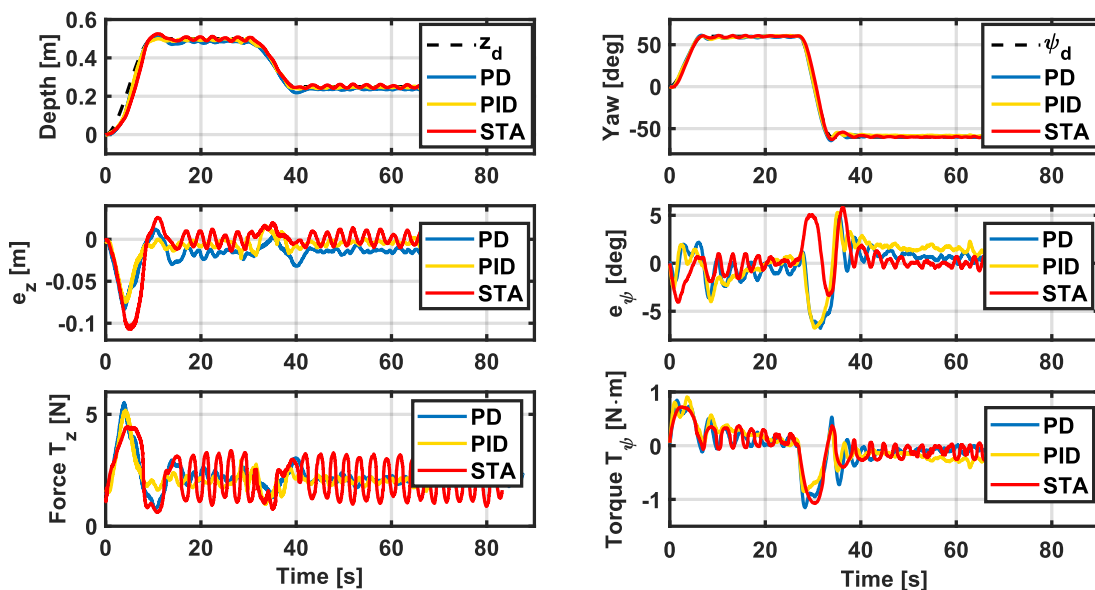


Figura 4.19- Resultados de experimentación en Caso nominal (Guerrero et al., 2024).

4.6.2 Caso con incertidumbres paramétricas

Un aspecto destacado en la evaluación de los controles en presencia de incertidumbres paramétricas, Figura 4.20, o cualquier otra perturbación, es que el control STA, además de converger a la referencia deseada de manera más rápida, demuestra un comportamiento óptimo en la anulación del error.

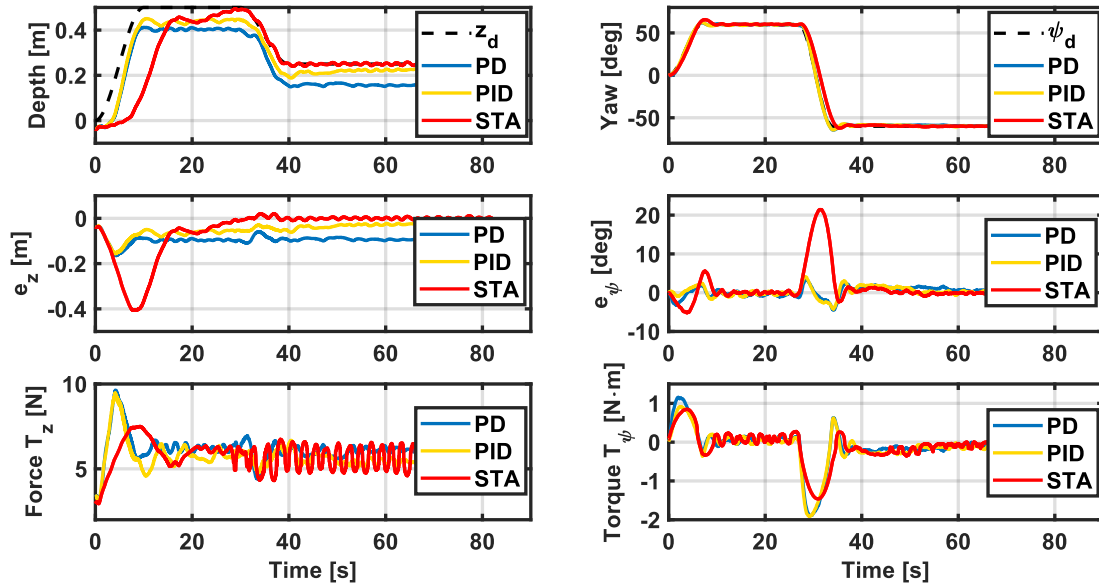


Figura 4.20- Resultados de experimentación en Caso con incertidumbres paramétricas (Guerrero et al., 2024).

4.6.3 Caso con masa agregada

De igual manera, en la Figura 4.21, correspondiente a la prueba de agregar masa al vehículo submarino, el control STA exhibe un comportamiento ligeramente mejor, ya que converge a la referencia anulando el error tanto en la profundidad como en la rotación.

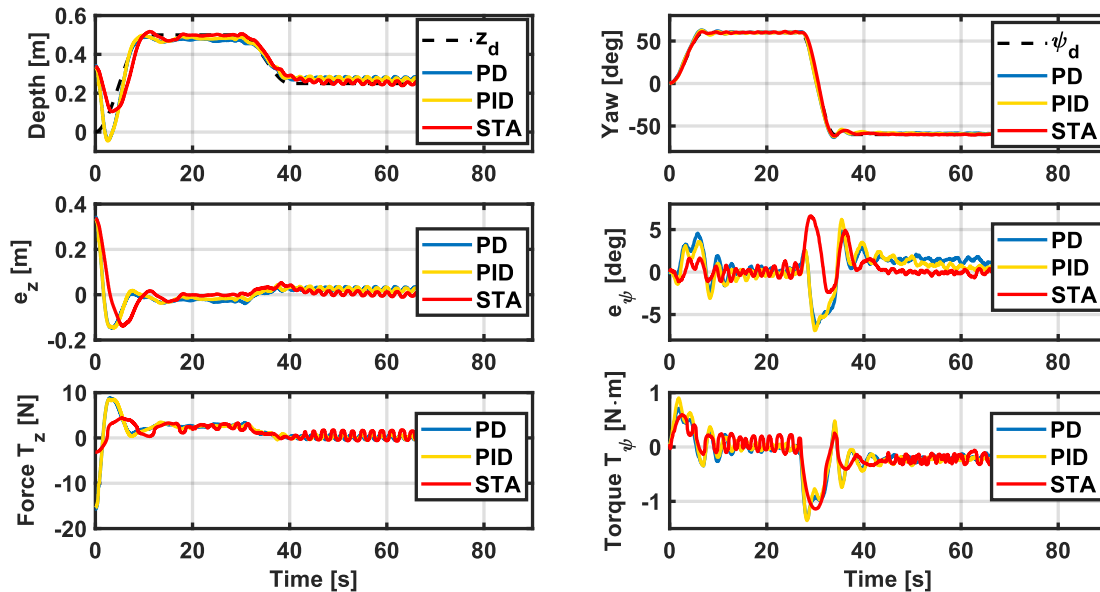


Figura 4.21- Resultados de experimentación en Caso con masa agregada (Guerrero et al., 2024).

4.6.4 Criterio de desempeño

Para evaluar el desempeño de los controles en cada uno de los casos propuestos, se han creado las Tablas 4.2-4.4. En estas tablas se muestran los criterios de desempeño obtenidos del comportamiento del vehículo submarino en cada uno de los escenarios de las experimentaciones en tiempo real, comparando la efectividad de los controles PD, PID y STA. Se han resaltado en color rojo los resultados que generaron un error medio cuadrático y/o un índice de entrada de control menor.

Caso nominal.

Tabla 4.2- Criterio de desempeño de los controles en el caso nominal.

	PD	PID	STA
$RMSE_z$ [m]	0.0166	0.0083	0.0045
$RMSE_\psi$ [grados]	0.0913	0.2964	0.1650
INT_z [m]	3.9013e+03	2.9768e+03	3.6946e+03
INT_ψ [grados]	333.1436	388.4458	353.0541

Caso con incertidumbres paramétricas.

Tabla 4.3- Criterio de desempeño de los controles en el caso con incertidumbres paramétricas.

	PD	PID	STA
$RMSE_z$ [m]	0.0947	0.0470	0.0496
$RMSE_\psi$ [grados]	0.3785	0.2542	1.1364
INT_z [m]	1.0005e+04	9.3333e+03	9.4860e+03
INT_ψ [grados]	446.3820	453.3243	419.8358

Caso con masa agregada.

Tabla 4.4- Criterio de desempeño de los controles en el caso con masa agregada.

	PD	PID	STA
$RMSE_z$ [m]	0.0054	0.0070	0.0060
$RMSE_\psi$ [grados]	0.7732	0.3230	0.3985
INT_z [m]	2.6071e+03	2.5469e+03	2.3137e+03
INT_ψ [grados]	388.6480	421.0313	375.7322

4.7 Pruebas en tiempo real en un medio externo

4.7.1 Medio semi-controlado

En estas pruebas, se han realizado alrededor de 220 muestreos en el escenario mostrado en 4.3, obteniendo los siguientes resultados.

PH.

Después de una serie de muestreos se determinó que el pH promedio del agua en valoración es de 11. La gráfica presentada en la Figura 4.22 expone los datos obtenidos en calidad de pH durante los muestreos.

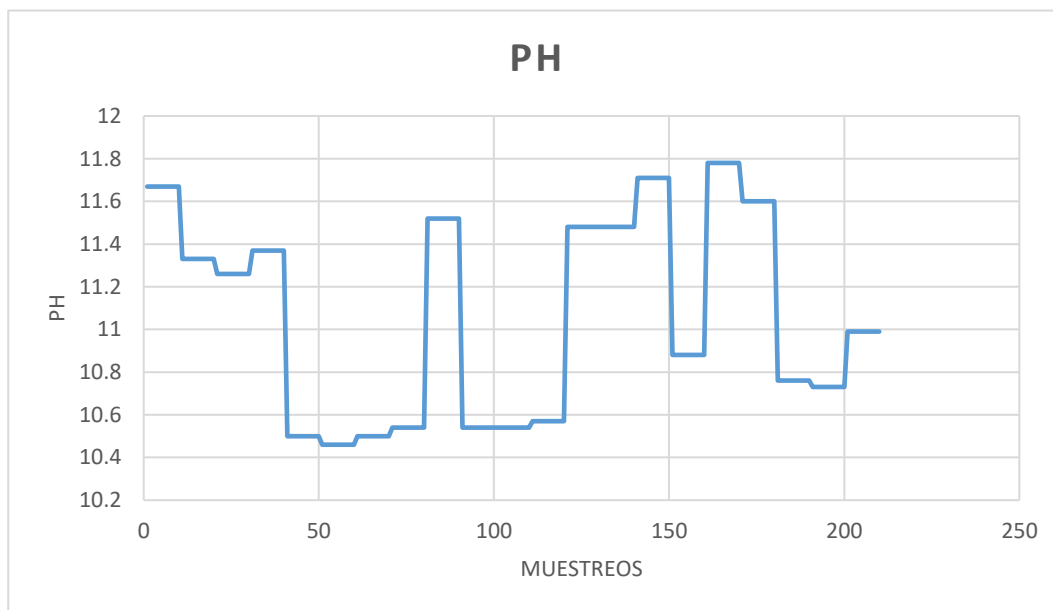


Figura 4.22- Gráfica de pH para ambiente semi-controlado.

Las pruebas anteriores se comprobaron mediante el uso de papel indicador de pH en tiras de plástico, las cuales ofrecen combinación simple de un solo color para cada uno de los valores de pH, Figura 4.23.



Figura 4.23- Comprobación de las mediciones de pH mediante el uso de papel indicador: a) Papel indicador sometido al medio semi-controlado b) Escala de pH del papel indicador.

TDS.

Mediante una serie de muestreos se determinó que el total de sólidos disueltos promedio del agua en valoración es de 495.51 ppm. La gráfica presentada en la Figura 4.24 demuestra los datos obtenidos en calidad de TDS durante los muestreos.

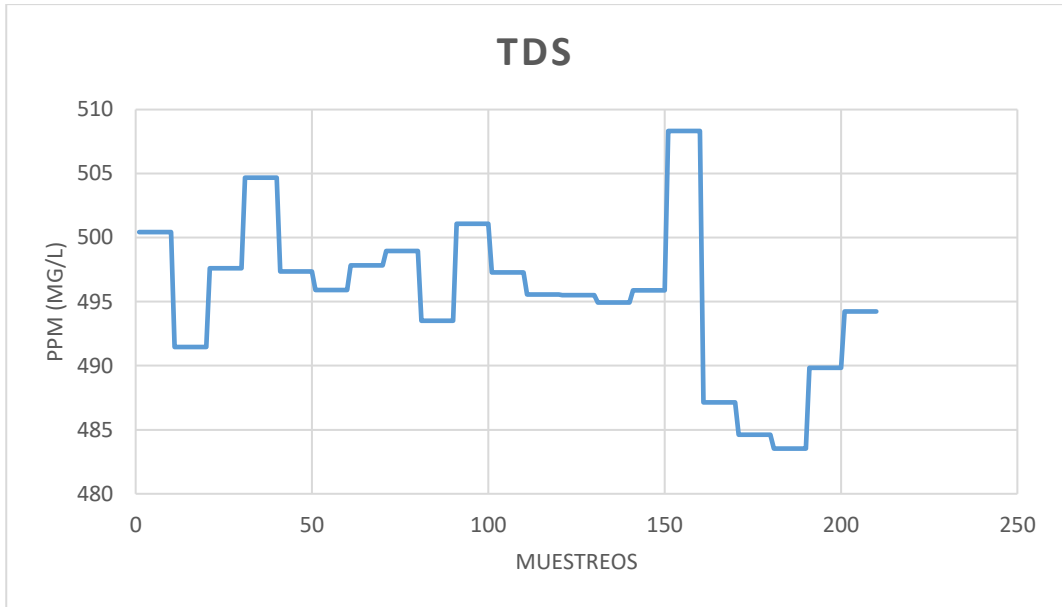


Figura 4.24- Gráfica de TDS para ambiente semi-controlado.

Temperatura.

Derivado de una serie de muestreos se determinó que la temperatura promedio del agua en valoración es de 33.63 °C. La siguiente gráfica, Figura 4.25, representa los datos obtenidos en calidad de temperatura durante los muestreos.

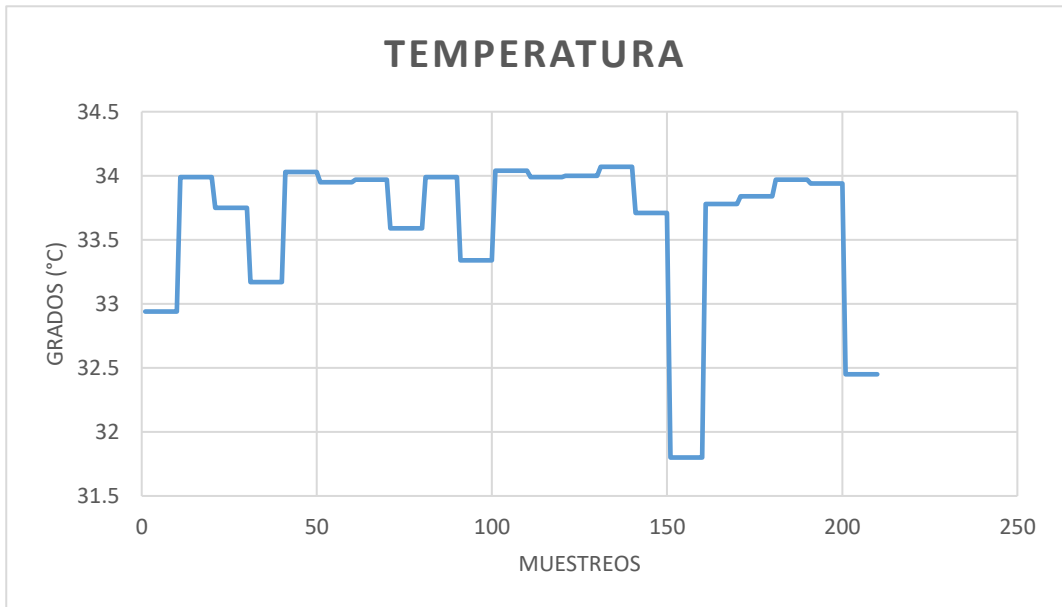


Figura 4.25.- Gráfica de temperatura para ambiente semi-controlado.

4.7.2 Medio no-controlado

Se llevó a cabo una prueba del funcionamiento tanto del vehículo submarino como de los sensores implementados en un ambiente acuático no controlado, como es el caso de una presa, Figura 4.26, con el propósito de validar la fiabilidad de la implementación.



Figura 4.26- Presa sometida a prueba como medio no-controlado.

Se realizó un recorrido circular en la superficie de la presa con el fin de tomar muestras del área más extensa posible, buscando obtener resultados más generales en relación con las características del agua contenida, Figura 4.27.

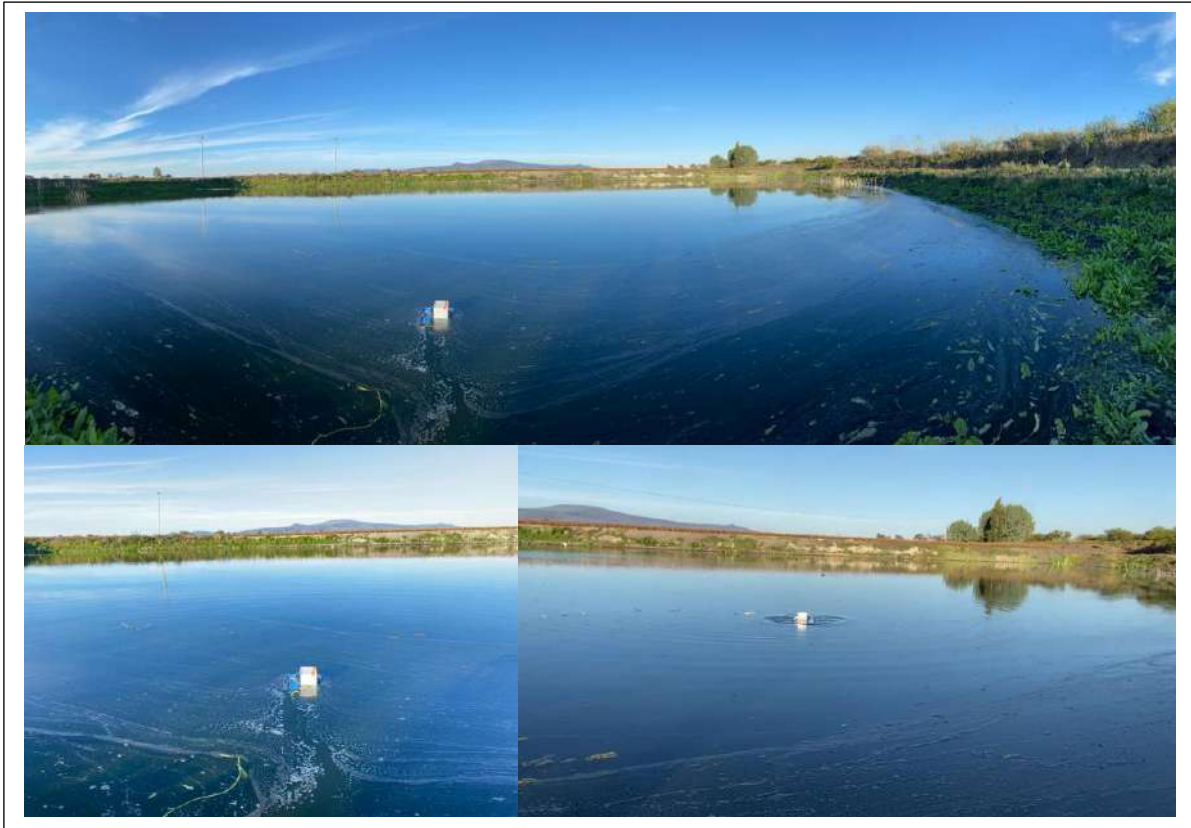


Figura 4.27- Recorrido del vehículo submarino en la superficie de la presa.

Asimismo, se evaluó la calidad del agua en términos de sus tres características de interés: pH, TDS y temperatura. Obteniendo los siguientes resultados:

PH.

Después de realizar una serie de más de 400 muestreos, se determinó que el pH promedio del agua es de 8.4 pH. La gráfica presentada en la Figura 4.28 expone los datos obtenidos en cuanto a la calidad del pH durante los muestreos.

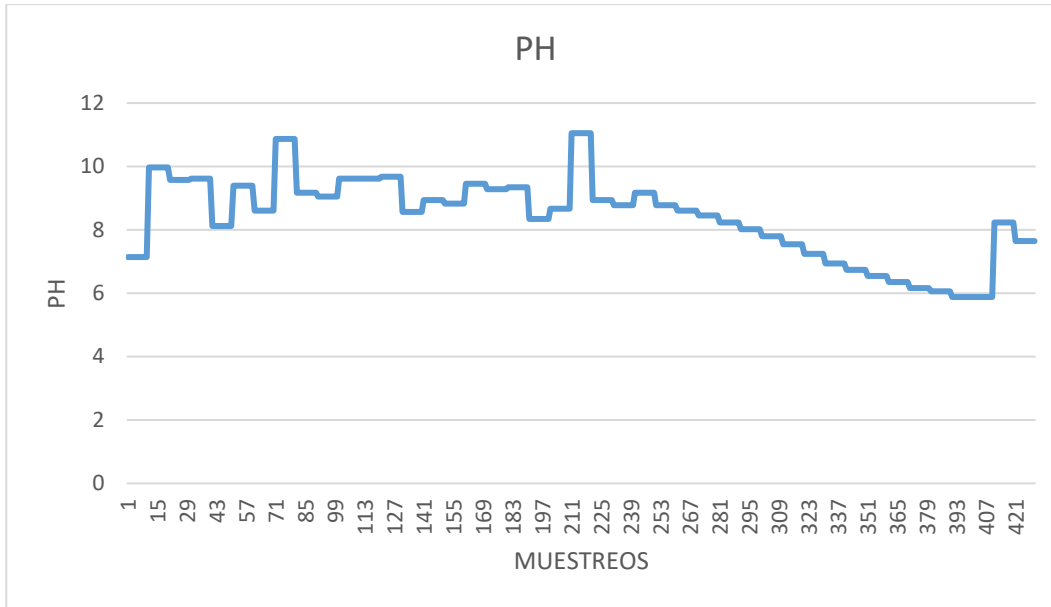


Figura 4.28- Gráfica de pH para ambiente no-controlado.

Las pruebas expuestas anteriormente fueron confirmadas mediante el uso de papel indicador de pH en tiras de plástico. Estas tiras proporcionan una representación visual sencilla correspondiente a cada valor de pH, como se muestra en la Figura 4.29.

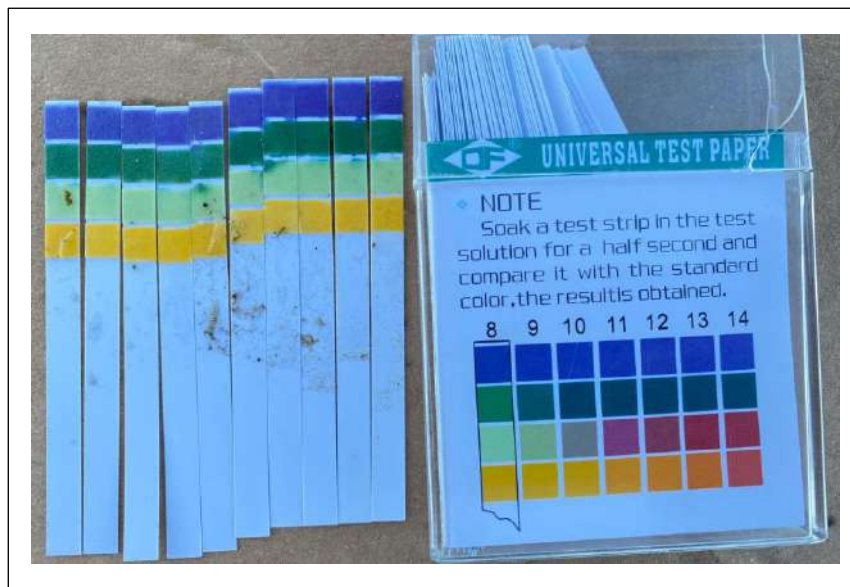


Figura 4.29- Comprobación de las mediciones de pH con el papel indicador y su combinación correspondiente a cada valor de PH.

TDS.

A través de una serie de muestreos, se determinó que el promedio total de sólidos disueltos en el agua es de 951.25 ppm. La gráfica presentada en la Figura 4.30 exhibe los datos obtenidos en cuanto a la calidad de TDS durante los muestreos.

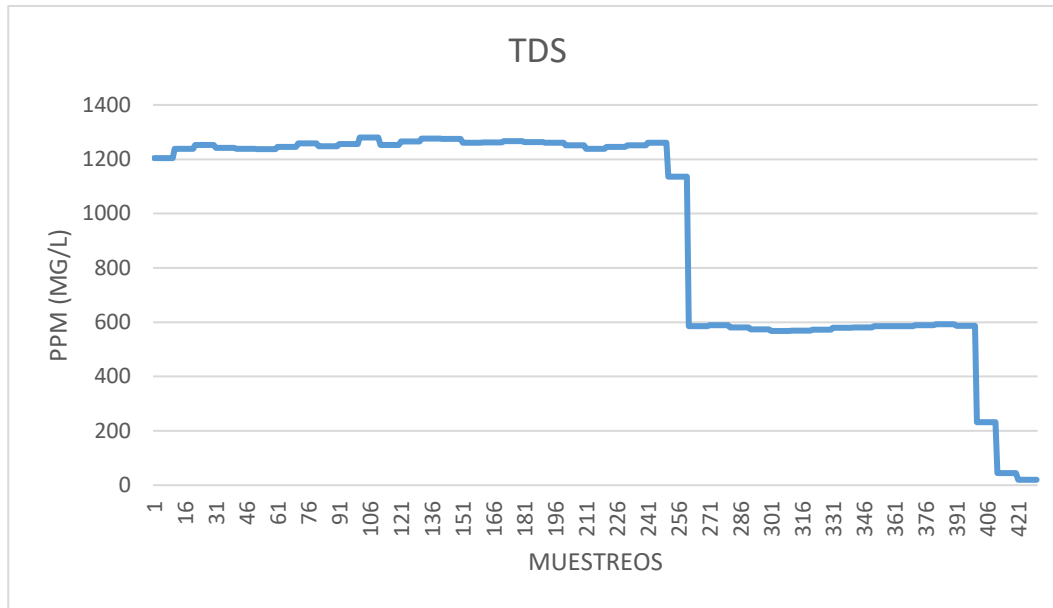


Figura 4.30- Gráfica de TDS para ambiente no-controlado.

Temperatura.

Como resultado de una serie de muestreos, se determinó que la temperatura promedio del agua es de 20.02 °C. La gráfica que sigue, Figura 4.31, ilustra los datos obtenidos en relación con la temperatura durante los muestreos.

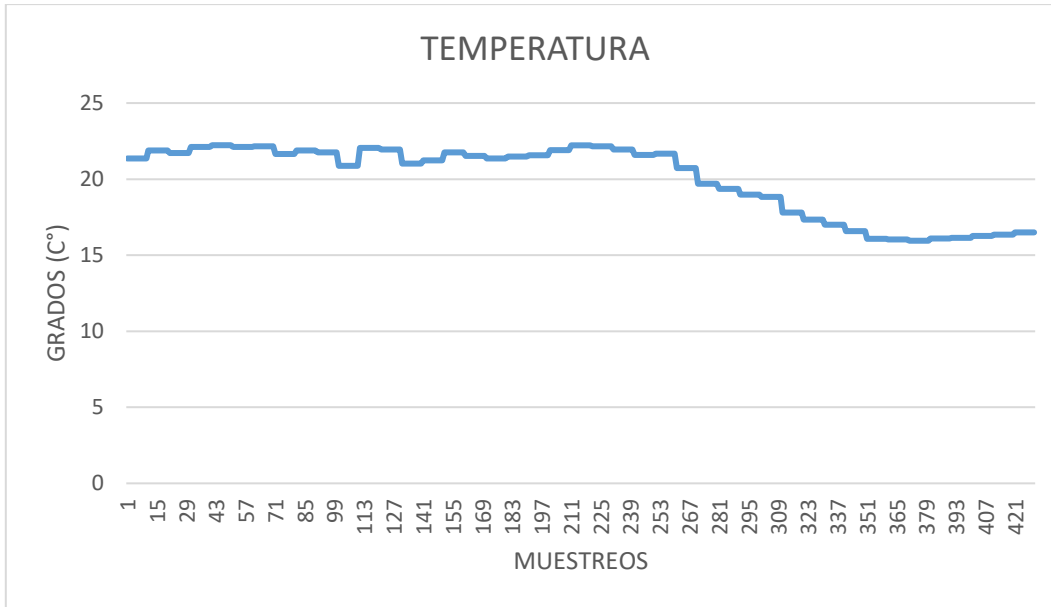


Figura 4.31- Gráfica de temperatura para ambiente no-controlado.

4.8 Circuito integrado con los módulos de los sensores

Se diseñó un circuito con el objetivo de integrar y recopilar mediciones provenientes de todos los sensores empleados, Figura 4.32. Mediante la implementación de un único código programado, se logró centralizar la captura de datos de manera eficiente. Este código gestionó la escritura de las mediciones en una tarjeta microSD, facilitando así el posterior procesamiento y análisis de datos, y permitiendo la elaboración de las gráficas presentadas en la sección 4.7.

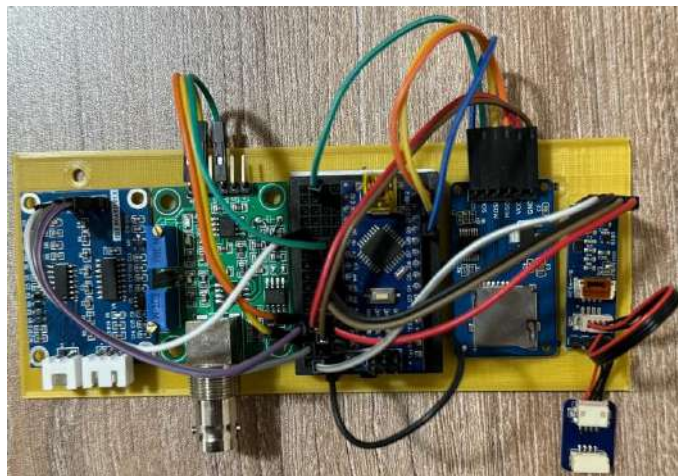


Figura 4.32- Circuito implementado en el vehículo submarino.

CONCLUSIÓN

La presente investigación se ha enfocado en el diseño e implementación de un control robusto para un vehículo submarino tipo ROV, con el objetivo de mejorar su estabilidad y operabilidad para su aplicación en misiones de monitoreo. Además, se ha presentado una alternativa para el monitoreo de la calidad del agua mediante el BlueROV2, equipado con diversos sensores que posibilitan la obtención de lecturas de temperatura, pH y TDS.

Se llevó a cabo la configuración y vinculación del BlueROV2 con el equipo de cómputo, siguiendo minuciosamente las instrucciones proporcionadas por el fabricante. Durante las pruebas de funcionamiento, la manipulación del vehículo se realizó mediante un control inalámbrico de la marca Xbox.

En esta investigación, se exploraron controles de tipo PD, PID y STA, sometiéndolos a simulaciones y experimentos en tiempo real, en tres escenarios diferentes: estabilización, regulación y seguimiento de trayectorias. En cada escenario, se contemplaron tres casos de experimentación: el caso nominal, que considera que el sistema opera en condiciones ideales; un caso con perturbaciones constantes y otro caso con perturbaciones variantes en el tiempo.

La instrumentación de medición se implementó con el fin de proporcionar una alternativa viable para obtener mediciones relacionadas con las propiedades ambientales del agua para determinar su calidad. Se enfrentó un desafío significativo durante la calibración del sensor de pH, superado mediante el uso de tres buffers con valores de pH conocidos y estables. Estas mediciones se introdujeron en la herramienta de ajuste de curvas de Matlab para obtener una función que describiera el comportamiento del sensor. La función resultante se incorporó al código de funcionamiento del sensor para obtener mediciones más precisas.

La fase final del trabajo de investigación comprendió el procesamiento de los datos obtenidos de las simulaciones de los sistemas de control, los experimentos en

tiempo real y la información recopilada durante los muestreos en los entornos de experimentación.

En conclusión, los resultados señalan que el control STA demostró un rendimiento superior en comparación con los controles PD y PID. El análisis detallado de cada caso experimental, tanto en los escenarios de simulación como en los experimentos en tiempo real, reveló que el control STA propuesto en este trabajo exhibió una mayor capacidad para mantener la estabilidad del vehículo y seguir las referencias deseadas, incluso en presencia de perturbaciones constantes o variables en el tiempo, destacando así la robustez y eficacia del control STA propuesto. Estos resultados respaldan la viabilidad y aplicabilidad práctica del control STA para mejorar la estabilidad y operabilidad de vehículos submarinos, especialmente en misiones de monitoreo en entornos complejos.

Posteriormente, tras las misiones de monitoreo de la calidad del agua en ambos entornos experimentales, los datos recabados por los sensores indicaron que la calidad del agua del medio semi-controlado es buena, pero no alcanza el nivel de potabilidad. Por otro lado, la calidad del agua del medio no-controlado es deficiente, y no se recomienda para consumo humano.

También es importante resaltar que la implementación de robots submarinos en este tipo de aplicaciones presenta ventajas significativas en comparación con el método manual actualmente empleado para la toma de muestreos. Entre estas ventajas se incluyen la eficiencia operativa, la rapidez en la ejecución del proceso, además de la capacidad de obtener más mediciones y cubrir áreas más extensas. La automatización proporcionada por los robots submarinos no solo mejora la eficiencia en la toma de muestreo, sino que también reduce los riesgos asociados con la intervención humana, haciendo que estos procesos sean más seguros y fiables.

Bibliografía

- ABIS®. (2018). *ABIS online - Bacterial identification*. Retrieved 02 de Febrero de 2018, from http://www.tgw1916.net/bacteria_logare_desktop.html
- Abril, V. L. (2016). Análisis comparativo de la velocidad de degradación de cromo VI aplicando fitorremediación en medio físicos distintos: suelo y agua. Riobamba, Ecuador. Retrieved 02 de Abril de 2018, from Repositorio Institucional de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo: <http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/4892>
- Anta, R. (18 de Febrero de 2022). *El imperativo de la exploración marina*. (Banco Interamericano de Desarrollo) Retrieved 2023, from <https://blogs.iadb.org/innovacion/es/el-imperativo-de-la-exploracion-marina-retos-y-oportunidades-en-el-caribe/>
- Ardila, F. L. (2012). *Medición de la capacidad de *Chlorella vulgaris* y *Scenedesmus acutus* para la remoción de cromo de aguas de curtiembre*. Retrieved 01 de Enero de 2018, from <http://www.bdigital.unal.edu.co/10276/>
- ArduSub. (s.f.). *ArduSub and the ArduPilot Project*. (ArduSub) Retrieved febrero de 2023, from <https://www.ardusub.com/>
- Arrieta, Oliva, H. I., Aguilar, Casas, M., Corrales, Escobosa, A. R., Romo, Rodríguez, P., Figueroa, Aguilar, G. A., Jácome, Galarza, I. E., & Gutiérrez, Corona, F. (2014). Caracterización de un aislado de bacillus simplex nativo de residuos industriales contaminados con cromo hexavalente. *Ciencia en la Frontera*, 12(3), 45-53. Retrieved 03 de Abril de 2018, from <http://www.uacj.mx/DGDCDC/SP/Paginas/CienciaenlaFrontera.aspx>
- Azario, R. R., Salvarreza, S. A., Ibarra, A., & García, M. d. (2010). Efecto del Cromo Hexavalente y Trivalente sobre el Crecimiento de *Escherichia coli* ATCC 35218. *Información Tecnológica*, 21(1), 51-56. Retrieved 01 de Enero de 2018, from https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642010000100009&lng=en&nrm=iso&tlng=en

- Badger Meter. (s.f.). *Badger Meter*. (Badger Meter) Retrieved 15 de Noviembre de 2023, from <https://www.badgermeter.com/es-us/monitoreo-de-la-calidad-del-agua/>
- Benitez, C. N. (2011). PRODUCCIÓN LIMPIA Y BIORREMEDIACIÓN PARA DISMINUCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN POR CROMO EN LA INDUSTRIA . *Ambiente y Sostenibilidad*, 1, 25-31. Retrieved 02 de Abril de 2018, from <http://revistaingenieria.univalle.edu.co/index.php/ays/article/view/4335>
- BlueRobotics. (s.f.). *BlueRobotics*. (BlueRobotics) Retrieved febrero de 2023, from <https://bluerobotics.com/store/rov/bluerov2/>
- BlueRobotics. (s.f.). *BlueRobotics*. (BlueRobotics) Retrieved Abril de 2023, from <https://bluerobotics.com/store/comm-control-power/powersupplies-batteries/battery-li-4s-15-6ah/>
- BlueRobotics. (s.f.). *BlueRobotics*. (BlueRobotics) Retrieved Abril de 2023, from <https://bluerobotics.com/store/comm-control-power/powersupplies-batteries/battery-charger-h6pro-r1/>
- BlueRobotics. (s.f.). *BlueRobotics*. (BlueRobotics) Retrieved Abril de 2023, from <https://bluerobotics.com/store/rov/bluerov2-accessories/fxti-asm-r1-rp/>
- BlueRobotics. (s.f.). *BlueRobotics*. (BlueRobotics) Retrieved Abril de 2023, from <https://bluerobotics.com/store/comm-control-power/tether-interface/fathom-x-tether-interface-board-set-copy/>
- BlueRobotics. (s.f.). *BlueRobotics*. (BlueRobotics) Retrieved Abril de 2023, from https://bluerobotics-com.translate.google.com/learn/bluerov2-software-setup-r3-and-older/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=sc
- BluerRbotics. (s.f.). *BluerRbotics*. (BluerRbotics) Retrieved febrero de 2023, from <https://bluerobotics.com/store/rov/bluerov2/>
- Bustos, M. I. (2012). *Diseño del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales de las Etapas Ribera y Curtido para la Tenería San José*. Retrieved 17 de Enero

de 2017, from Repositorio Institucional de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/2025>

Camarena, Pozos, D. A., Pacheco, Aguilar, J. R., Mauricio, Gutiérrez, A., Maldonado, Vega, M., & Peña, Cabriales, J. J. (2012). *MICROORGANISMOS PRESENTES EN AGUA Y SUELOS AFECTADOS POR CONTAMINANTES PROVENIENTES DE ACTIVIDADES INDUSTRIALES EN GUANAJUATO*. Retrieved 03 de Abril de 2018, from <http://ecologia.guanajuato.gob.mx/sitio/biodiversidad/146/La-Biodiversidad-de-Guanajuato-Estudio-de-Estado>

Carbotecnia. (18 de Abril de 2022). *Carbotecnia*. Retrieved 2023 de Octubre de 2023, from <https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/quimica-del-agua/que-es-el-ph-del-agua/>

Cardenaz, González, J. F., Martínez, Juárez, V. M., & Acosta, Rodríguez, I. (2011). Remoción de Cromo (VI) por una Cepa de *Paecilomyces* sp Resistente a Cromato. *Información Tecnológica*, 22(4), 43-50. Retrieved 18 de Enero de 2018, from https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642011000400006&lng=en&nrm=iso&tlng=en

Carrillo, G. G., Aleida, A. A., y Cervantes Torre-Marín, G. (2017). Innovación tecnológica y curtiduría en el estado de Guanajuato. *Economía Informa*, 402, 66-79. Retrieved 13 de Febrero de 2018, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0185084917300051>

Celsius Fast-Response. (2023). Retrieved 20 de Octubre de 2023, from <https://bluerobotics.com/store/sensors-sonars-cameras/sensors/celsius-sensor-r1/>

Chargoy Cortez, A. Z. (2018). *Control de un Vehículo Submarino No Tripulado: Análisis y Experimentos*. Tesis, Instituto Tecnológico de La Paz, División de Estudios de Posgrado e Investigación.

- Chávez, P. Á. (2010). Descripción de la nocividad del cromo proveniente de la industria curtiembre y de las posibles formas de removerlo. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 9(17), 41-49. Retrieved 18 de Enero de 2017, from <http://revistas.udem.edu.co/index.php/ingenierias/article/view/6>
- CIENCIAUANL. (13 de Agosto de 2019). *Revista de divulgación científica y tecnológica de la Universidad Autónoma de Nuevo León*. (Universidad Autónoma de Nuevo León) Retrieved Febrero de 2023, from <https://cienciauanl.uanl.mx/?p=9164>
- dademuchconnection. (9 de Agosto de 2020). *Función de transferencia a lazo abierto y lazo cerrado: dademuchconnection*. (dademuchconnection) Retrieved Febrero de 2023, from <https://dademuch.com/2020/08/09/funcion-de-transferencia-a-lazo-abierto-y-lazo-cerrado-ejemplos/>
- Díaz, Martínez, M. E., Alarcón, A., Ferrera, Cerrato, R., Almaraz, Suarez, J. J., & García, Barradas, O. (2013). Crecimiento de Casuarina equisetifolia (Casuarinaceae) en suelo con diésel, y aplicación de bioestimulación y bioaumentación. *Biología Tropical*, 61(3), 1039-1052. Retrieved 03 de Abril de 2018, from http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-77442013000400005&lng=en&tlng=es.
- Euroinnova International Online Education. (s.f.). *Qué es control en ingeniería: Euroinnova*. (Euroinnova International Online Education) Retrieved Febrero de 2023, from <https://www.euroinnova.edu.es/blog/que-es-control-en-ingenieria#:~:text=Ingenier%C3%ADa%20de%20Control-,%C2%BFQu%C3%A9%20es%20control%20en%20ingenier%C3%ADa%3F,%C3%A1rea%20de%20las%20empresas%20industriales>.
- Fertilab®. (2018). Informe de resultados: Diagnostico de la fertilidad del suelo. Celaya, Guanajuato, México.
- Fossen, T. I. (1994). *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. Trondheim: John Wiley & Sons.

- Fossen, T. I. (1994). Modeling of Marine Vehicles. En *Guidance and Control of Ocean Vehicles* (págs. 5-92). Chichester: John Wiley & Sons.
- Fridman, D. L. (4 de Marzo de 2005). Introducción al control por modos deslizantes. Ciudad de México: UNAM. Retrieved 22 de Junio de 2023, from <http://verona.fi-p.unam.mx/~lfridman/modos.php>
- García, S. E. (2008). Economía ecológica frente a economía industrial. El caso de la industria de la curtiduría en México. *SciELO*, 21(56), 55-71. Retrieved 13 de Febrero de 2018, from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57952008000100004&lng=es&tlng=es.
- Gómez, W., Gaviria, J., & Cardona, S. (2009). EVALUACIÓN DE LA BIOESTIMULACIÓN FRENTE A LA ATENUACIÓN NATURAL Y LA BIOAUMENTACIÓN EN UN SUELO CONTAMINADO CON UNA MEZCLA DE GASOLINA - DIESEL. *Dyna*, 76(160), 83-93. Retrieved 03 de Abril de 2018, from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532009000400008&lng=en&tlng=es.
- Gordillo Moreno, G. E., & Toledo Duque, C. E. (Marzo de 2013). *Técnicas ambientales de Producción Más Limpia en la industria de curtiembre*. Retrieved 12 de Enero de 2018, from REPOSITORIO DIGITAL: <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/1371>
- Guerrero, J., Chemori, A., Torres, J., & Creuze, V. (Marzo de 2024). STA-based design of an adaptive disturbance observer for autonomous underwater vehicles: From concept to real-time validation. *Elsevier*, 144.
- Guerrero, J., Torre, J., Creuze, V., & Ahmed, C. (2019). Trajectory tracking for autonomous underwater vehicle: An adaptive approach. *El Sevier*(172), 511-522.

- Higuera, C. O., Arroyave, L. J., & Florez, G. L. (2009a). DISEÑO DE UN BIOFILTRO PARA REDUCIR EL ÍNDICE DE CONTAMINACIÓN POR CROMO GENERADO EN LAS INDUSTRIAS DEL CURTIDO DE CUEROS. *DYNA*, 76(160), 107-119. Retrieved 18 de Enero de 2017, from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49612068001>
- Higuera, C. O., Arroyave, L. J., & Florez, G. L. (2009b). Estudio de la biosorción de cromo con hoja de café. *Ingeniería e Investigación*, 29(2), 59-64. Retrieved 18 de Enero de 2017, from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-56092009000200009&lng=en&tlng=es
- Jern, M. (14 de Enero de 2022). *Tappwater*. Retrieved 12 de Octubre de 2023, from <https://tappwater.co/es/blog/tds-medir-calidad-agua/>
- Levant, A., Fridman, L., Edwards, C., & Shtessel, Y. (2014). *Sliding Mode Control and Observation*. Maryland: Birkhauser.
- Lora, Silva, R., & Bonilla, Gutiérrez, H. (2010). REMEDIACIÓN DE UN SUELO DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO BOGOTÁ CONTAMINADO CON LOS METALES PESADOS CADMIO Y CROMO. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 13(2), 61-70. Retrieved 12 de Enero de 2017, from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-42262010000200008&lng=en&tlng=es
- MacFaddin, J. F. (2003). *Pruebas bioquímicas para la identificación de bacterias de importancia clínica* (3 ed ed.). D.F., México: Editorial Medica Panamericana. Retrieved 05 de Septiembre de 2017.
- Martínez, Cardozo, L. A., & Vargas, Peña, Y. A. (2017). Evaluación de la contaminación en el suelo por plomo y cromo y planteamiento de alternativa de remediación en la represa del Muña, municipio de Sibaté-Cundinamarca. Bogotá, Colombia. Retrieved 02 de Abril de 2018, from <http://repository.lasalle.edu.co/handle/10185/20512>

- Martínez, G. F., Ojeda, B. D., Hernández, R. O., Martínez, T. J., & De la O, Q. G. (2011). EL EXCESO DE NITRATOS: un problema actual en la agricultura. *SynthesiS*, 11-16. Retrieved 05 de Enero de 2017, from http://www.uach.mx/extension_y_difusion/synthesis/2011/08/29/synthesis_no_57/
- MathWorks. (s.f.). *MathWorks*. (MathWorks) Retrieved 20 de Octubre de 2023, from <https://la.mathworks.com/products/matlab.html>
- Mazzone, V. (2002). Controladores PID. *Universidad Nacional de Quilmes, I*, 1-12.
- Mazzone, V. (2002). Controladores PID. Quilmes: Universidad Nacional de Quilmes.
- Menchaca Dávila, S. (12 de Septiembre de 2017). Actividades humanas y el agua. *Diario Xalapa, Universidad Veracruzana*.
- Mendoza Salazar, M. J. (2017). *IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED INALÁMBRICA DE SENSORES INTELIGENTES, CON NODOS ROBOTIZADOS PARA LA SUPERVISIÓN EN LÍNEA DEL ECOSISTEMA Y CONTAMINACIÓN DEL AGUA PRESENTE EN LAGOS Y LAGUNAS*. Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Microrao®. (10 de Junio de 2006). *Microrao.com*. Retrieved 09 de Mayo de 2018, from <http://www.microrao.com/index.html>
- Milenio. (5 de Abril de 2018). *Aplicaciones de la robótica submarina en México*. (Milenio) Retrieved Febrero de 2023, from <https://www.milenio.com/opinion/varios-autores/universidad-politecnica-de-tulancingo/aplicaciones-de-la-robotica-submarina-en-mexico>
- Molina, M. N., Aguilar, C. P., & Cordovez, W. C. (2010). Plomo, cromo III y cromo VI y sus efectos sobre la salud humana. *Ciencia & Tecnología Para La Salud Visual Y Ocular*, 8(1), 77-88. Retrieved 18 de Enero de 2017, from <https://revistas.lasalle.edu.co/index.php/sv/article/view/831>

- Moreno, H. A., Saltarén, R., Puglisi, L., Carrera, I., Cárdenas, P., & Álvarez, C. (2014). Robótica Submarina: Conceptos, Elementos, Modelado y Control. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 11(1), 3-19.
- Muñoz, Gómez, L. A., & Infante, Moreno, M. G. (2016). Reducción de cromo hexavalente de las aguas de tenerías mediante un consorcio mixto. Síloa de la Victoria, Guanajuato, México. Retrieved 02 de Abril de 2018, from <http://tesis.ipn.mx:8080/xmlui/handle/123456789/18564>
- Narcizo-Nuci, N. A. (2021). *Synthesis of a Finite-Time Convergence Controller for Trajectory Tracking of Unmanned Underwater Vehicles*. Tesis, Tecnológico de Monterrey.
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (Febrero de 2023). *Ocean & Coasts: National Oceanic and Atmospheric Administration*. National Oceanic and Atmospheric Administration U.S. Department of Commerce: <https://www.noaa.gov/ocean-coasts>
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (Febrero de 2023). *Ocean & Coasts: National Oceanic and Atmospheric Administration*. Ocean & Coasts: National Oceanic and Atmospheric Administration: <https://www.noaa.gov/ocean-coasts>
- Navas, V. J. (2016). *Obtención de un material compuesto a partir de matriz de PVC y virutas de "Wet-Blue" provenientes de la etapa de rebajado en el proceso de curtición*. Retrieved 18 de Enero de 2018, from Repositorio Digital - EPN: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/16879>
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderno*. Madrid: Pearson Educación.
- Organización de las Naciones Unidas. (2014). *Calidad del agua*. (Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de las Naciones Unidas) <https://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/quality.shtml>
- Organización de las Naciones Unidas. (2023). *El agua: en el centro de la crisis climática*. (Naciones Unidas)

[https://www.un.org/es/climatechange/science/climate-issues/water#:~:text=El%20cambio%20clim%C3%A1tico%20afecta%20al,aqua%20\(ONU%2DAgua\).](https://www.un.org/es/climatechange/science/climate-issues/water#:~:text=El%20cambio%20clim%C3%A1tico%20afecta%20al,aqua%20(ONU%2DAgua).)

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2017). *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura*. Retrieved 16 de Diciembre de 2017, from <http://www.fao.org/soils-portal/about/definiciones/es/>

Plata, Q. L. (27 de 01 de 2015). *Evaluación teórica de la remoción y tiempo de acción de tres técnicas de biorremediación, para tratamiento de suelos contaminados con hidrocarburos*. Retrieved 03 de Abril de 2018, from <https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/2075>

Prieto, M. J., González, R. C., Román, G. A., y Prieto, G. F. (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10(1), 29-44. Retrieved 08 de Enero de 2017, from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93911243003>

QGroundControl. (s.f.). *QGroundControl*. (QGroundControl) Retrieved 16 de Febrero de 2023, from https://qgroundcontrol-com.translate.google/?_x_tr_sch=http&_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=sc

Química.es. (s.f.). *química.es*. Retrieved 12 de Octubre de 2023, from <https://www.quimica.es/enciclopedia/PH.html>

Ramírez, D. M., Riveros, R. H., Campos, G. J., y Cervantes, C. (2009). REDUCCIÓN BACTERIANA DE CROMO HEXAVALENTE: MECANISMOS Y APLICACIONES. *Revista de Educación Bioquímica*, 28(3), 73-79. Retrieved 24 de Febrero de 2018, from <http://www.medigraphic.com/cgi-bin/new/contenido.cgi?IDPUBLICACION=3946>

ROVSEA Marine Services. (s.f.). *ROV*. (ROVSEA Marine Services) Retrieved Febrero de 2023, from <https://www.rovseams.com/rov-submarino/>

- Rusty, Kevin, & Daniel. (s.f.). *Configuración del software BlueROV2*. (BlueRobotics) Retrieved 16 de Febrero de 2023, from https://bluerobotics-com.translate.goog/learn/bluerov2-software-setup/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=sc#installing-qgroundcontrol
- SEMARNAT. (1998). NOM-002-SEMARNAT-1996. Retrieved 10 de Junio de 2017, from <http://www.semarnat.gob.mx/leyes-y-normas/nom-agua>
- SEMARNAT. (2002). NOM-021-SEMARNAT-2000. Retrieved 04 de Junio de 2018, from <http://www.semarnat.gob.mx/leyes-y-normas/nom-suelos>
- SEMARNAT. (2006). NMX-AA-132-SCFI-2006. Retrieved 04 de Junio de 2017, from <http://www.semarnat.gob.mx/leyes-y-normas/nmx-suelo>
- SEMARNAT. (2007). NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. Retrieved 04 de Junio de 2018, from <http://www.semarnat.gob.mx/leyes-y-normas/nom-conjunta>
- SIDMAR. (s.f.). *Instrumentación oceanográfica: SIDMAR*. (SIDMAR Estudios y Servicios Oceanográficos) Retrieved Febrero de 2023, from <https://www.sidmar.es/auvs.html>
- Sistema de Agua Potable y Alcantarillado de León [SAPAL]. (26 de Mayo de 2016). SAPAL. Retrieved 14 de Marzo de 2018, from <http://www.sapal.gob.mx/noticia/261/185>
- SNAME. (1950). *Nomenclature for Treating the Motion of a Submerged Body Through a Fluid*. The Society of Naval Architects and Marine Engineers.
- Tamanaja, I. T. (2013). *Navegación y control de un mini vehículo submarino autónomo*. Ciudad de México: CINVESTAV.
- Trinidad, M. J. (23 de Octubre de 2016). *am*. Retrieved 14 de Marzo de 2018, from <https://www.am.com.mx/2016/10/22/leon/local/van-sapal-contra-tenerias-321454>

Universidad Politécnica de Cartagena. (s.f.). *Análisis de aguas*. Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena.

World Health Organization. (s.f.). *Agua Saneamiento y Salud*. Retrieved 12 de Octubre de 2023, from <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/water-sanitation-and-health/chemical-hazards-in-drinking-water/total-dissolved-solids>

Xbox. (s.f.). *Conectar un mando inalámbrico Xbox a un dispositivo Windows*. (Microsoft) Retrieved 19 de Febrero de 2023, from <https://support.xbox.com/es-MX/help/hardware-network/controller/connect-xbox-wireless-controller-to-pc>

YouQian. (2023). *AliExpress*.
https://es.aliexpress.com/item/1005005119457797.html?spm=a2g0o.productlist.main.11.91eb2a7fx9bAPe&algo_pvid=3d9ce332-7b8f-46c7-a80f-5b0ecaa1b540&aem_p4p_detail=202306161055442060660575872430005509604&algo_exp_id=3d9ce332-7b8f-46c7-a80f-5b0ecaa1b540-6&pdp_

ANEXOS

7.1.1 Algoritmo del control PD para simulaciones en Matlab

```
%% Parámetros del sistema
u = nu(1);
v = nu(2);
w = nu(3);
p = nu(4);
q = nu(5);
r = nu(6);

phi = eta(4);
th = eta(5);
psi = eta(6);

J11 = cos(psi)*cos(th);
J12 = -sin(psi)*cos(phi)+cos(psi)*sin(th)*sin(phi);
J13 = sin(psi)*sin(th)+cos(psi)*cos(phi)*sin(th);
J14 = 0;
J15 = 0;
J16 = 0;
J21 = sin(psi)*cos(th);
J22 = cos(psi)*cos(phi)+sin(phi)*sin(th)*sin(psi);
J23 = -cos(psi)*sin(phi)+sin(th)*sin(psi)*cos(phi);
J24 = 0;
J25 = 0;
J26 = 0;
J31 = -sin(th);
J32 = cos(th)*sin(phi);
J33 = cos(th)*cos(phi);
J34 = 0;
J35 = 0;
J36 = 0;
J41 = 0;
J42 = 0;
J43 = 0;
J44 = 1;
J45 = sin(phi)*tan(th);
J46 = cos(phi)*tan(th);
J51 = 0;
J52 = 0;
J53 = 0;
J54 = 0;
J55 = cos(phi);
J56 = -sin(phi);
J61 = 0;
J62 = 0;
J63 = 0;
J64 = 0;
J65 = sin(phi)/cos(th);
J66 = cos(phi)/cos(th);

m = 10.5;
g = 9.81;
wht = m*g;
```

```

W = m*g;
Bn = 0.2;
B = Bn + wht;
Ix = 0.16;
Ixy = 0;
Ixz = 0;
Iy = 0.16;
Iyx = Ixy;
Iyz = 0;
Iz = 0.16;
Izx = Ixz;
Izy = Iyz;
xG = 0.02;
yG = 0.02;
zG = 0.02;
Xup = -5;
Yvp = -12.7;
Zwp = -14.57;
Kpp = -0.12;
Mqp = -0.12;
Nrp = -0.12;
Xu = -4.03;
Yv = -6.22;
Zw = -5.18;
Kp = -0.07;
%   M_q = -0.07;
Nr = -0.07;

St = sin(th);
Ct = cos(th);
Tt = tan(th);
SCt = sec(th);
dtheta = eta_dot(5);
Cps = cos(psi);
Sps = sin(psi);
dpsi = eta_dot(6);
Sph = sin(phi);
Cph = cos(phi);
dphi = eta_dot(4);

Jp11 = -St*Cps*dtheta-Ct*Sps*dpsi;
Jp12 = (St*Cph*Cps+Sph*Sps)*dphi+(Ct*Sph*Cps)*dtheta-
(St*Sph*Sps+Cph*Cps)*dpsi;
Jp13 = -(Cps*Sph*St)*dphi+(Sps*Ct+Cps*Cph*Ct)*dtheta+(Cps*St-
Sps*Cph*St)*dpsi;
Jp14 = 0;
Jp15 = 0;
Jp16 = 0;
Jp21 = -St*Sps*dtheta+Ct*Cps*dpsi;
Jp22 = Ct*Sph*Sps*dtheta+(St*Cph*Sps-Sph*Cps)*dphi-(St*Sph*Cps-
Cph*Sps)*dpsi;
Jp23 = Ct*Cph*Sps*dtheta-
(Cph*Cps+St*Sph*Sps)*dphi+(Sph*Sps+St*Cph*Cps)*dpsi;
Jp24 = 0;
Jp25 = 0;

```

```

Jp26 = 0;
Jp31 = -Ct*dtheta;
Jp32 = -St*Sph*dtheta+Ct*Sph*dphi;
Jp33 = -St*Cph*dtheta-Ct*Sph*dphi;
Jp34 = 0;
Jp35 = 0;
Jp36 = 0;
Jp41 = 0;
Jp42 = 0;
Jp43 = 0;
Jp44 = 0;
Jp45 = Cph*Tt*dphi+(Sph*(Sct^2))*dtheta;
Jp46 = -Sph*Tt*dphi+Cph*(Sct^2)*dtheta;
Jp51 = 0;
Jp52 = 0;
Jp53 = 0;
Jp54 = 0;
Jp55 = -Sph*dphi;
Jp56 = -Cph*dphi;
Jp61 = 0;
Jp62 = 0;
Jp63 = 0;
Jp64 = 0;
Jp65 = (Ct*Cph*dphi+St*Sph*dtheta)/Ct^2;
Jp66 = (St*Cph*dtheta-Ct*Sph*dphi)/Ct^2;

%Matriz de Transformación
J = [J11 J12 J13 J14 J15 J16;
     J21 J22 J23 J24 J25 J26;
     J31 J32 J33 J34 J35 J36;
     J41 J42 J43 J44 J45 J46;
     J51 J52 J53 J54 J55 J56;
     J61 J62 J63 J64 J65 J66];

J_dot = [Jp11 Jp12 Jp13 Jp14 Jp15 Jp16;
         Jp21 Jp22 Jp23 Jp24 Jp25 Jp26;
         Jp31 Jp32 Jp33 Jp34 Jp35 Jp36;
         Jp41 Jp42 Jp43 Jp44 Jp45 Jp46;
         Jp51 Jp52 Jp53 Jp54 Jp55 Jp56;
         Jp61 Jp62 Jp63 Jp64 Jp65 Jp66];

Jinv = pinv(J);
JinvT = Jinv';

% Matrices de masa e inercia

M_RB = [m 0 0 0 m*zG -m*yG;
        0 m 0 -m*zG 0 -m*xG;
        0 0 m m*yG -m*xG 0;
        0 -m*zG m*yG Ix -Ixy -Ixz;
        m*zG 0 -m*xG -Iyx Iy -Iyz;
        -m*yG m*xG 0 -Izx -Izy Iz];

M_A = [Xup Yvp Zwp Kpp Mqp Nrp];

```

```

M_A = -diag(M_A);

M = M_RB + M_A;

M_eta = JinvT*M*Jinv;

% Matriz de Coriolis
C_A = [0 0 0 0 -Zwp*w Yvp*v;
       0 0 0 Zwp*w 0 -Xup*u;
       0 0 0 -Yvp*v Xup*u 0;
       0 -Zwp*w Yvp*v 0 -Nrp*r Mqp*q;
       Zwp*w 0 -Xup*u Nrp*r 0 -Kpp*p;
       -Yvp*v Xup*u 0 -Mqp*q Kpp*p 0];
C_RB = [0 0 0 m*(yG*q+zG*r) -m*(xG*q-w) -m*(xG*r+v);
       0 0 0 -m*(yG*p+w) m*(zG*r+xG*p) -m*(yG*r+v);
       0 0 0 -m*(zG*p-v) -m*(zG*q+u) m*(xG*p+yG*q);
       -m*(yG*q+zG*r) m*(yG*p+w) m*(zG*p-v) 0 -Iyz*q-Ixz*p+Iz*r
Iyz*r+Ixy*p-Iy*q;
       m*(xG*q-w) -m*(zG*r+xG*p) -m*(xG*p+yG*q) Iyz*q+Ixz*p-Iz*r 0 -
Ixz*r-Ixy*q+Ix*p;
       m*(xG*r+v) m*(yG*r-u) -m*(xG*p+yG*q) -Iyz*r-Ixy*p+Iy*q
Ixz*r+Ixy*q-Ix*p 0];

C = C_A + C_RB;
C_eta = JinvT*(C-M*Jinv*J_dot)*Jinv;

% Matriz de Damping para bajas velocidades
D = [Xu Yv Zw Kp 0 Nr];
D = -diag(D);
D_eta = JinvT*D*Jinv;

% Matriz de Gravedad
g = [(W-B)*St;
     -(W-B)*Ct*Sph;
     -(W-B)*Ct*Cph;
     zG*W*Ct*Sph;
     zG*W*St;
     0];

g_eta = JinvT*g;

% Coeficientes del control PD
kp = 10*[1 0 0 0 0 0;
        0 1 0 0 0 0;
        0 0 1 0 0 0;
        0 0 0 1 0 0;
        0 0 0 0 1 0;
        0 0 0 0 0 1];

kd = 40*[0.1 0 0 0 0 0;
        0 0.1 0 0 0 0;
        0 0 0.1 0 0 0;
        0 0 0 0.1 0 0];

```

```

        0 0 0 0 0.1 0;
        0 0 0 0 0 0.1];

%% ESTABILIZACION
% x_des = 0;
% y_des = 0;
% z_des = 0;
% phi_des = 0;
% th_des = 0;
% psi_des = 0;
% eta_des = [x_des;y_des;z_des;phi_des;th_des;psi_des];

%% REGULACION
% x_des = 1;
% y_des = 1.5;
% z_des = 2;
% phi_des = 0;
% th_des = 0;
% psi_des = 0;
% x_des = 0;
% y_des = 0;
% z_des = 0;
% phi_des = 0.4;
% th_des = 0.6;
% psi_des = 0.8;
% eta_des = eta_des = [x_des;y_des;z_des;phi_des;th_des;psi_des];

%% TRACKING
T= 5;
f = 1/T;
% x_des = sin(2*pi*f*t);
% y_des = cos(2*pi*f*t) - 1;
% z_des = t;
% phi_des = 0;
% th_des = 0;
% psi_des = 0;
x_des = 0;
y_des = 0;
z_des = 0;
phi_des = 0.2*sin(2*pi*f*t);
th_des = 0.2*cos(2*pi*f*t)-1;
psi_des = t;

eta_des = [x_des;y_des;z_des;phi_des;th_des;psi_des];

%error = nu - nu_des;
error_eta = eta - eta_des;

    u_pert = [0;0;0;0;0;0];
    if (t>=4) && (t<=10)
%       u_pert = [30;30;30;0;0;0];
%       u_pert = [0;0;0;30;30;30];
%       u_pert = [0;0;0;3;3;3];
%       u_pert = [10*sin(5*t);10*cos(5*t);10*sin(5*t);0;0;0];

```

```

%      u_pert = [0;0;0;10*sin(5*t);10*cos(5*t);10*sin(5*t)];
      u_pert = [0;0;0;1*sin(5*t);1*cos(5*t);1*sin(5*t)];
      end

%% Control PD
tau = - kp*error_eta - kd*eta_dot;
tau_eta = (JinvT)*(tau);

      eta_2dot = pinv(M_eta) * (tau_eta - C_eta * eta_dot - D_eta * eta_dot
- g_eta + u_pert);
      nu_dot = pinv(M) * (tau - C*nu - D*nu - g);
end

```

7.1.2 Algoritmo del control PID para simulaciones en Matlab

```

%% Parámetros del sistema
u = nu(1);
v = nu(2);
w = nu(3);
p = nu(4);
q = nu(5);
r = nu(6);

phi = eta(4);
th = eta(5);
psi = eta(6);

J11 = cos(psi)*cos(th);
J12 = -sin(psi)*cos(phi)+cos(psi)*sin(th)*sin(phi);
J13 = sin(psi)*sin(th)+cos(psi)*cos(phi)*sin(th);
J14 = 0;
J15 = 0;
J16 = 0;
J21 = sin(psi)*cos(th);
J22 = cos(psi)*cos(phi)+sin(phi)*sin(th)*sin(psi);
J23 = -cos(psi)*sin(phi)+sin(th)*sin(psi)*cos(phi);
J24 = 0;
J25 = 0;
J26 = 0;
J31 = -sin(th);
J32 = cos(th)*sin(phi);
J33 = cos(th)*cos(phi);
J34 = 0;
J35 = 0;
J36 = 0;
J41 = 0;
J42 = 0;
J43 = 0;
J44 = 1;
J45 = sin(phi)*tan(th);
J46 = cos(phi)*tan(th);
J51 = 0;
J52 = 0;

```

```

J53 = 0;
J54 = 0;
J55 = cos(phi);
J56 = -sin(phi);
J61 = 0;
J62 = 0;
J63 = 0;
J64 = 0;
J65 = sin(phi)/cos(th);
J66 = cos(phi)/cos(th);

m = 10.5;
g = 9.81;
wht = m*g;
W = m*g;
Bn = 0.2;
B = Bn + wht;
Ix = 0.16;
Ixy = 0;
Ixz = 0;
Iy = 0.16;
Iyx = Ixy;
Iyz = 0;
Iz = 0.16;
Izx = Ixz;
Izy = Iyz;
xG = 0.02;
yG = 0.02;
zG = 0.02;
Xup = -5;
Yvp = -12.7;
Zwp = -14.57;
Kpp = -0.12;
Mqp = -0.12;
Nrp = -0.12;
Xu = -4.03;
Yv = -6.22;
Zw = -5.18;
Kp = -0.07;
%   M_q = -0.07;
Nr = -0.07;

St = sin(th);
Ct = cos(th);
Tt = tan(th);
SCt = sec(th);
dtheta = eta_dot(5);
Cps = cos(psi);
Sps = sin(psi);
dpsi = eta_dot(6);
Sph = sin(phi);
Cph = cos(phi);
dphi = eta_dot(4);

Jp11 = -St*Cps*dtheta-Ct*Sps*dpsi;

```



```

    Jp12 = (St*Cph*Cps+Sph*Sps)*dphi+(Ct*Sph*Cps)*dtheta-
    (St*Sph*Sps+Cph*Cps)*dpsi;
    Jp13 = -(Cps*Sph*St)*dphi+(Sps*Ct+Cps*Cph*Ct)*dtheta+(Cps*St-
    Sps*Cph*St)*dpsi;
    Jp14 = 0;
    Jp15 = 0;
    Jp16 = 0;
    Jp21 = -St*Sps*dtheta+Ct*Cps*dpsi;
    Jp22 = Ct*Sph*Sps*dtheta+(St*Cph*Sps-Sph*Cps)*dphi-(St*Sph*Cps-
    Cph*Sps)*dpsi;
    Jp23 = Ct*Cph*Sps*dtheta-
    (Cph*Cps+St*Sph*Sps)*dphi+(Sph*Sps+St*Cph*Cps)*dpsi;
    Jp24 = 0;
    Jp25 = 0;
    Jp26 = 0;
    Jp31 = -Ct*dtheta;
    Jp32 = -St*Sph*dtheta+Ct*Sph*dphi;
    Jp33 = -St*Cph*dtheta-Ct*Sph*dphi;
    Jp34 = 0;
    Jp35 = 0;
    Jp36 = 0;
    Jp41 = 0;
    Jp42 = 0;
    Jp43 = 0;
    Jp44 = 0;
    Jp45 = Cph*Tt*dphi+(Sph*(Sct^2))*dtheta;
    Jp46 = -Sph*Tt*dphi+Cph*(Sct^2)*dtheta;
    Jp51 = 0;
    Jp52 = 0;
    Jp53 = 0;
    Jp54 = 0;
    Jp55 = -Sph*dphi;
    Jp56 = -Cph*dphi;
    Jp61 = 0;
    Jp62 = 0;
    Jp63 = 0;
    Jp64 = 0;
    Jp65 = (Ct*Cph*dphi+St*Sph*dtheta)/Ct^2;
    Jp66 = (St*Cph*dtheta-Ct*Sph*dphi)/Ct^2;

```

%Matriz de Transformación

```

J = [J11 J12 J13 J14 J15 J16;
     J21 J22 J23 J24 J25 J26;
     J31 J32 J33 J34 J35 J36;
     J41 J42 J43 J44 J45 J46;
     J51 J52 J53 J54 J55 J56;
     J61 J62 J63 J64 J65 J66];

```

```

J_dot = [Jp11 Jp12 Jp13 Jp14 Jp15 Jp16;
         Jp21 Jp22 Jp23 Jp24 Jp25 Jp26;
         Jp31 Jp32 Jp33 Jp34 Jp35 Jp36;
         Jp41 Jp42 Jp43 Jp44 Jp45 Jp46;
         Jp51 Jp52 Jp53 Jp54 Jp55 Jp56;
         Jp61 Jp62 Jp63 Jp64 Jp65 Jp66];

```

```

Jinv = pinv(J);
JinvT = Jinv';

% Matrices de masa e inercia

M_RB = [m 0 0 0 m*zG -m*yG;
         0 m 0 -m*zG 0 -m*xG;
         0 0 m m*yG -m*xG 0;
         0 -m*zG m*yG Ix -Ixy -Ixz;
         m*zG 0 -m*xG -Iyx Iy -Iyz;
         -m*yG m*xG 0 -Izx -Izy Iz];

M_A = [Xup Yvp Zwp Kpp Mqp Nrp];
M_A = -diag(M_A);

M = M_RB + M_A;

M_eta = JinvT*M*Jinv;

% Matriz de Coriolis
C_A = [0 0 0 0 -Zwp*w Yvp*v;
        0 0 0 Zwp*w 0 -Xup*u;
        0 0 0 -Yvp*v Xup*u 0;
        0 -Zwp*w Yvp*v 0 -Nrp*r Mqp*q;
        Zwp*w 0 -Xup*u Nrp*r 0 -Kpp*p;
        -Yvp*v Xup*u 0 -Mqp*q Kpp*p 0];
C_RB = [0 0 0 m*(yG*q+zG*r) -m*(xG*q-w) -m*(xG*r+v);
         0 0 0 -m*(yG*p+w) m*(zG*r+xG*p) -m*(yG*r+v);
         0 0 0 -m*(zG*p-v) -m*(zG*q+u) m*(xG*p+yG*q);
         -m*(yG*q+zG*r) m*(yG*p+w) m*(zG*p-v) 0 -Iyz*q-Ixz*p+Iz*r
         Iyz*r+Ixy*p-Iy*q;
         m*(xG*q-w) -m*(zG*r+xG*p) -m*(xG*p+yG*q) Iyz*q+Ixz*p-Iz*r 0 -
         Ixz*r-Ixy*q+Ix*p;
         m*(xG*r+v) m*(yG*r-u) -m*(xG*p+yG*q) -Iyz*r-Ixy*p+Iy*q
         Ixz*r+Ixy*q-Ix*p 0];

C = C_A + C_RB;
C_eta = JinvT*(C-M*Jinv*J_dot)*Jinv;

% Matriz de Damping para bajas velocidades
D = [Xu Yv Zw Kp 0 Nr];
D = -diag(D);
D_eta = JinvT*D*Jinv;

% %Matriz de Gravedad
g = [(W-B)*St;
      -(W-B)*Ct*Sph;
      -(W-B)*Ct*Cph;
      zG*W*Ct*Sph;
      zG*W*St;
      0];

g_eta = JinvT*g;

```

```

% Coeficientes del control PD
kp = 10*[1 0 0 0 0 0;
        0 1 0 0 0 0;
        0 0 1 0 0 0;
        0 0 0 1 0 0;
        0 0 0 0 1 0;
        0 0 0 0 0 1];

ki = 30*[1 0 0 0 0 0;
        0 1 0 0 0 0;
        0 0 1 0 0 0;
        0 0 0 1 0 0;
        0 0 0 0 1 0;
        0 0 0 0 0 1];

kd = 40*[0.1 0 0 0 0 0;
        0 0.1 0 0 0 0;
        0 0 0.1 0 0 0;
        0 0 0 0.1 0 0;
        0 0 0 0 0.1 0;
        0 0 0 0 0 0.1];

%% ESTABILIZACION
% x_des = 0;
% y_des = 0;
% z_des = 0;
% phi_des = 0;
% th_des = 0;
% psi_des = 0;
% eta_des = [x_des;y_des;z_des;phi_des;th_des;psi_des];

%% REGULACION
% x_des = 1;
% y_des = 1.5;
% z_des = 2;
% phi_des = 0;
% th_des = 0;
% psi_des = 0;
% x_des = 0;
% y_des = 0;
% z_des = 0;
% phi_des = 0.4;
% th_des = 0.6;
% psi_des = 0.8;
% eta_des = eta_des = [x_des;y_des;z_des;phi_des;th_des;psi_des];

%% TRACKING
T= 5;
f = 1/T;
% x_des = sin(2*pi*f*t);
% y_des = cos(2*pi*f*t) - 1;
% z_des = t;

```

```

% phi_des = 0;
% th_des = 0;
% psi_des = 0;
x_des = 0;
y_des = 0;
z_des = 0;
phi_des = 0.2*sin(2*pi*f*t);
th_des = 0.2*cos(2*pi*f*t)-1;
psi_des = t;

eta_des = [x_des;y_des;z_des;phi_des;th_des;psi_des];

%error = nu - nu_des;
error_eta = eta - eta_des;

    u_pert = [0;0;0;0;0;0];
    if (t>=4) && (t<=10)
%       u_pert = [30;30;30;0;0;0];
%       u_pert = [0;0;0;30;30;30];
%       u_pert = [0;0;0;3;3;3];
%       u_pert = [10*sin(5*t);10*cos(5*t);10*sin(5*t);0;0;0];
%       u_pert = [0;0;0;10*sin(5*t);10*cos(5*t);10*sin(5*t)];
    u_pert = [0;0;0;1*sin(5*t);1*cos(5*t);1*sin(5*t)];
    end

%% Control PID
tau = - kp*error_eta -ki*int_error -kd*eta_dot;
tau_eta = (JinvT)*(tau);

    eta_2dot = pinv(M_eta) * (tau_eta - C_eta * eta_dot - D_eta * eta_dot
- g_eta + u_pert);
    nu_dot = pinv(M) * (tau - C*nu - D*nu - g);
end

```

7.1.3 Algoritmo del control Super-Twisting para simulaciones en Matlab

```

%% Parámetros del sistema
u = nu(1);
v = nu(2);
w = nu(3);
p = nu(4);
q = nu(5);
r = nu(6);

phi = eta(4);
th = eta(5);
psi = eta(6);

J11 = cos(psi)*cos(th);
J12 = -sin(psi)*cos(phi)+cos(psi)*sin(th)*sin(phi);
J13 = sin(psi)*sin(th)+cos(psi)*cos(phi)*sin(th);

```

```

J14 = 0;
J15 = 0;
J16 = 0;
J21 = sin(psi)*cos(th);
J22 = cos(psi)*cos(phi)+sin(phi)*sin(th)*sin(psi);
J23 = -cos(psi)*sin(phi)+sin(th)*sin(psi)*cos(phi);
J24 = 0;
J25 = 0;
J26 = 0;
J31 = -sin(th);
J32 = cos(th)*sin(phi);
J33 = cos(th)*cos(phi);
J34 = 0;
J35 = 0;
J36 = 0;
J41 = 0;
J42 = 0;
J43 = 0;
J44 = 1;
J45 = sin(phi)*tan(th);
J46 = cos(phi)*tan(th);
J51 = 0;
J52 = 0;
J53 = 0;
J54 = 0;
J55 = cos(phi);
J56 = -sin(phi);
J61 = 0;
J62 = 0;
J63 = 0;
J64 = 0;
J65 = sin(phi)/cos(th);
J66 = cos(phi)/cos(th);

St = sin(th);
Ct = cos(th);
Tt = tan(th);
Sct = sec(th);
dtheta = eta_dot(5);
Cps = cos(psi);
Sps = sin(psi);
dpsi = eta_dot(6);
Sph = sin(phi);
Cph = cos(phi);
dphi = eta_dot(4);
Jp11 = -St*Cps*dtheta-Ct*Sps*dpsi;
Jp12 = (St*Cph*Cps+Sph*Sps)*dphi+(Ct*Sph*Cps)*dtheta-
(St*Sph*Sps+Cph*Cps)*dpsi;
Jp13 = -(Cps*Sph*St)*dphi+(Sps*Ct+Cps*Cph*Ct)*dtheta+(Cps*St-
Sps*Cph*St)*dpsi;
Jp14 = 0;
Jp15 = 0;
Jp16 = 0;
Jp21 = -St*Sps*dtheta+Ct*Cps*dpsi;

```

```

Jp22 = Ct*Sph*Sps*dtheta+(St*Cph*Sps-Sph*Cps)*dphi-(St*Sph*Cps-
Cph*Sps)*dpsi;
Jp23 = Ct*Cph*Sps*dtheta-
(Cph*Cps+St*Sph*Sps)*dphi+(Sph*Sps+St*Cph*Cps)*dpsi;
Jp24 = 0;
Jp25 = 0;
Jp26 = 0;
Jp31 = -Ct*dtheta;
Jp32 = -St*Sph*dtheta+Ct*Sph*dphi;
Jp33 = -St*Cph*dtheta-Ct*Sph*dphi;
Jp34 = 0;
Jp35 = 0;
Jp36 = 0;
Jp41 = 0;
Jp42 = 0;
Jp43 = 0;
Jp44 = 0;
Jp45 = Cph*Tt*dphi+(Sph*(SCt^2))*dtheta;
Jp46 = -Sph*Tt*dphi+Cph*(SCt^2)*dtheta;
Jp51 = 0;
Jp52 = 0;
Jp53 = 0;
Jp54 = 0;
Jp55 = -Sph*dphi;
Jp56 = -Cph*dphi;
Jp61 = 0;
Jp62 = 0;
Jp63 = 0;
Jp64 = 0;
Jp65 = (Ct*Cph*dphi+St*Sph*dtheta)/Ct^2;
Jp66 = (St*Cph*dtheta-Ct*Sph*dphi)/Ct^2;

```

```

m = 10.5;
g = 9.81;
wht = m*g;
W = m*g;
Bn = 0.2;
B = Bn + wht;
Ix = 0.16;
Ixy = 0;
Ixz = 0;
Iy = 0.16;
Iyx = Ixy;
Iyz = 0;
Iz = 0.16;
Izx = Ixz;
Izy = Iyz;
xG = 0.02;
yG = 0.02;
zG = 0.02;
Xup = -5;
Yvp = -12.7;
Zwp = -14.57;
Kpp = -0.12;
Mqp = -0.12;

```

```

Nrp = -0.12;
Xu = -4.03;
Yv = -6.22;
Zw = -5.18;
Kp = -0.07;
%M_q = -0.07;
Nr = -0.07;

%Matriz de Transformación
J = [J11 J12 J13 J14 J15 J16;
      J21 J22 J23 J24 J25 J26;
      J31 J32 J33 J34 J35 J36;
      J41 J42 J43 J44 J45 J46;
      J51 J52 J53 J54 J55 J56;
      J61 J62 J63 J64 J65 J66];

J_dot = [Jp11 Jp12 Jp13 Jp14 Jp15 Jp16;
          Jp21 Jp22 Jp23 Jp24 Jp25 Jp26;
          Jp31 Jp32 Jp33 Jp34 Jp35 Jp36;
          Jp41 Jp42 Jp43 Jp44 Jp45 Jp46;
          Jp51 Jp52 Jp53 Jp54 Jp55 Jp56;
          Jp61 Jp62 Jp63 Jp64 Jp65 Jp66];

Jinv = pinv(J);
JinvT = Jinv';

% Matrices de masa e inercia
M_RB = [m 0 0 0 m*zG -m*yG;
         0 m 0 -m*zG 0 -m*xG;
         0 0 m m*yG -m*xG 0;
         0 -m*zG m*yG Ix -Ixy -Ixz;
         m*zG 0 -m*xG -Iyx Iy -Iyz;
         -m*yG m*xG 0 -Izx -Izy Iz];

M_A = [Xup Yvp Zwp Kpp Mqp Nrp];
M_A = -diag(M_A);

M = M_RB + M_A;

M_eta = JinvT*M*Jinv;

% Matriz de Coriolis
C_A = [0 0 0 0 -Zwp*w Yvp*v;
        0 0 0 Zwp*w 0 -Xup*u;
        0 0 0 -Yvp*v Xup*u 0;
        0 -Zwp*w Yvp*v 0 -Nrp*r Mqp*q;
        Zwp*w 0 -Xup*u Nrp*r 0 -Kpp*p;
        -Yvp*v Xup*u 0 -Mqp*q Kpp*p 0];

%% C_RB FOSSEN
C_RB = [0 0 0 m*(yG*q+zG*r) -m*(xG*q-w) -m*(xG*r+v);
        0 0 0 -m*(yG*p+w) m*(zG*r+xG*p) -m*(yG*r+v);
        0 0 0 -m*(zG*p-v) -m*(zG*q+u) m*(xG*p+yG*q);
        -m*(yG*q+zG*r) m*(yG*p+w) m*(zG*p-v) 0 -Iyz*q-Ixz*p+Iz*r
        Iyz*r+Ixy*p-Iy*q];

```

```

        m*(xG*q-w) -m*(zG*r+xG*p) -m*(xG*p+yG*q) Iyz*q+Ixz*p-Iz*r 0 -
Ixz*r-Ixy*q+Ix*p;
        m*(xG*r+v) m*(yG*r-u) -m*(xG*p+yG*q) -Iyz*r-Ixy*p+Iy*q
Ixz*r+Ixy*q-Ix*p 0];

```

```
C = C_A + C_RB;
```

```
C_eta = JinvT*(C-M*Jinv*J_dot)*Jinv;
```

```
% Matriz de Damping para bajas velocidades
```

```
D = [Xu Yv Zw Kp 0 Nr];
```

```
D = -diag(D);
```

```
D_eta = JinvT*D*Jinv;
```

```
%Matriz de Gravedad
```

```
g = [(W-B)*St;
      -(W-B)*Ct*Sph;
      -(W-B)*Ct*Cph;
      zG*W*Ct*Sph;
      zG*W*St;
      0];
```

```
g_eta = JinvT*g;
```

```
%% Coeficientes del control
```

```
k1 = 2*[1 0 0 0 0 0;
        0 1 0 0 0 0;
        0 0 1 0 0 0;
        0 0 0 1 0 0;
        0 0 0 0 1 0;
        0 0 0 0 0 1];
```

```
k2 = 0.2*[1 0 0 0 0 0;
          0 1 0 0 0 0;
          0 0 1 0 0 0;
          0 0 0 1 0 0;
          0 0 0 0 1 0;
          0 0 0 0 0 1];
```

```
lam1 = 1;
```

```
lam2 = 1;
```

```
lam3 = 1;
```

```
lam4 = 1;
```

```
lam5 = 1;
```

```
lam6 = 1;
```

```
lam = 2.5*[lam1 0 0 0 0 0;
           0 lam2 0 0 0 0;
           0 0 lam3 0 0 0;
           0 0 0 lam4 0 0;
           0 0 0 0 lam5 0;
           0 0 0 0 0 lam6];
```

```
%% Estabilización
```



```

% x_des = 0;
% y_des = 0;
% z_des = 0;
% phi_des = 0;
% th_des = 0;
% psi_des = 0;

%% Regulación
% x_des = 1;
% y_des = 1.5;
% z_des = 2;
% phi_des = 0;
% th_des = 0;
% psi_des = 0;
% x_des = 0;
% y_des = 0;
% z_des = 0;
% phi_des = 0.4;
% th_des = 0.6;
% psi_des = 0.8;

%% Tracking
T= 5;
f = 1/T;
% x_des = sin(2*pi*f*t);
% y_des = cos(2*pi*f*t) - 1;
% z_des = t;
% phi_des = 0;
% th_des = 0;
% psi_des = 0;

x_des = 0;
y_des = 0;
z_des = 0;
phi_des = 0.2*sin(2*pi*f*t);
th_des = 0.2*cos(2*pi*f*t)-1;
psi_des = t;

eta_des = [x_des;y_des;z_des;phi_des;th_des;psi_des];
% etap_des = [2*pi*f*cos(2*pi*f*t);-2*pi*f*sin(2*pi*f*t);1;0;0;0];
etap_des = [0;0;0;0;0;0];
% ddx1_d= [-4*pi^2*f^2*sin(2*pi*f*t);-
4*pi^2*f^2*cos(2*pi*f*t);0;0;0;0];
% etapp_des= [-4*pi^2*f^2*sin(2*pi*f*t);-
4*pi^2*f^2*cos(2*pi*f*t);0;0;0;0];

error_eta = eta - eta_des;
error_eta_p = eta_dot - etap_des;
%Al programar funciones, determinar las derivadas manualmente

sigma = error_eta_p + lam*error_eta;

ABS_SIGN = [0;0;0;0;0;0];
SIGN = [0;0;0;0;0;0];

```

```

for i=1:6
    ABS_SIGN(i) = (sqrt(abs(sigma(i))))*(sign(sigma(i)));
end

for i=1:6
    SIGN(i) = sign(sigma(i));
end

%% PERTURBACIONES
u_pert = [0;0;0;0;0;0];
if (t>=4) && (t<=10)
%     u_pert = [30;30;30;0;0;0];
%     u_pert = [0;0;0;30;30;30];
%     u_pert = [0;0;0;3;3;3];
%     u_pert = [10*sin(5*t);10*cos(5*t);10*sin(5*t);0;0;0];
%     u_pert = [0;0;0;10*sin(5*t);10*cos(5*t);10*sin(5*t)];
    u_pert = [0;0;0;1*sin(5*t);1*cos(5*t);1*sin(5*t)];
end

vp = -k2*SIGN;
STA = -k1*(ABS_SIGN) + vi;
tau_eta = (JinvT)*(STA); %Según Jguerrero pág. 3

%% Control STA
eta_2dot = pinv(M_eta) * (tau_eta - C_eta * eta_dot - D_eta *
eta_dot - g_eta + u_pert);
nu_dot = pinv(J)*(eta_2dot-J_dot*pinv(J)*eta_dot);
end

```

7.1.4 Algoritmo para calibración del sensor de Ph

```

#include <avr/wdt.h>
int pH_Value;
float Voltage;

float p1 = 3.316, p2 = -33.17, p3 = 82.06;
float PH;

void setup() {
    Serial.begin(9600);
    pinMode(pH_Value, INPUT);
}

void loop() {
    pH_Value = analogRead(A0);
    Voltage = pH_Value * (5.0 / 1023.0);
    PH = p1 * Voltage * Voltage + p2 * Voltage + p3;

for (int i = 1; i < 6; i++) {
    Serial.print(i);
    Serial.print(" ");
    Serial.print(Voltage);

```

```

    Serial.print(" V");
    Serial.print("===");
    Serial.print(PH);
    Serial.println(" pH");
    delay(1000);
}
if (millis() >= 5000) {
    wdt_enable(WDTO_1S);
    while (1) {}
}
}
}

```

7.1.5 Algoritmo para la obtención de muestreos de los sensores integrados

```

//////////RESET//////////
#include <avr/wdt.h>

//////////microSD//////////
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#define SSpin 9
File archivo;

//////////TEMP//////////
#include <Wire.h>
#include "TSYS01.h"
TSYS01 temp;

//////////TDS//////////
#include <EEPROM.h>
#include "GravityTDS.h"
#define TdsSensorPin A0
GravityTDS gravityTds;
float tdsValue = 0;

//////////pH//////////
int pH_Value;
float Voltage;
float p1 = 3.316, p2 = -33.17, p3 = 82.06;
float PH;

void setup() {
    Serial.begin(9600);
    Serial.println("Inicializando...");
    delay(1);

    Wire.begin();
    delay(1);

    ////////////TDS//////////
    gravityTds.setPin(TdsSensorPin);
    gravityTds.setAref(5.0);
    gravityTds.setAdcRange(1024);
}

```

```

gravityTds.begin();
delay(1);

//////////pH//////////
pinMode(pH_Value, INPUT);
delay(1);
pH_Value = analogRead(A1);
Voltage = pH_Value * (5.0 / 1023.0);
PH = p1 * Voltage * Voltage + p2 * Voltage + p3;

while (!temp.init()) {
  Serial.println("TSYS01 fallo en inicialización!");
  delay(2000);
}

if (!SD.begin(SSpin)) {
  Serial.println("fallo en inicializacion !");
  return;
}
Serial.println("inicializacion correcta");
archivo = SD.open("kr.txt", FILE_WRITE);
delay(1);

temp.read();

//////////TDS//////////
gravityTds.setTemperature(temp.temperature());
gravityTds.update();
tdsValue = gravityTds.getTdsValue();

if (archivo) {
  for (int i = 1; i < 11; i++) {

    archivo.print(i);
    archivo.print(",");
    archivo.print(temp.temperature());
    archivo.print(",");
    archivo.print(PH);
    archivo.print(",");
    archivo.println(tdsValue);

    Serial.print(i);
    Serial.print(",");
    Serial.print(temp.temperature());
    Serial.print(" C°");
    Serial.print(",");
    Serial.print(PH);
    Serial.print(" pH");
    Serial.print(",");
    Serial.print(tdsValue);
    Serial.println(" ppm");

    delay(900);
  }
}

```

```
    archivo.close()
    Serial.println("Escritura correcta");
}
else {
    Serial.println("Error en apertura de kr.txt");
}
}

void loop() {
    if (millis() >= 10000) {
        wdt_enable(WDTO_1S);
        while (1) {}
    }
}
```