

# UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO



## FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS, ELECTRÓNICA E INDUSTRIAL

### MAESTRÍA EN AUTOMATIZACIÓN Y SISTEMAS DE CONTROL

**Tema:**

---

“MODELACIÓN MATEMÁTICA Y SIMULACIÓN 3D DE LA  
NAVEGACIÓN AUTÓNOMA Y TELE OPERACIÓN PARA UN VEHÍCULO  
SUBMARINO NO TRIPULADO”

---

Trabajo de Investigación, previo la obtención del Grado Académico de Magister  
en Automatización y Sistemas de Control.

**Autor:** Ing. Leandro Tomás Núñez Cuesta

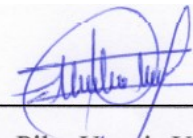
**Director:** Ing. Patricio Germán Encalada Ruiz MSc.

Ambato – Ecuador

2018

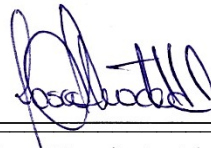
A la Unidad Académica de Titulación de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial.

El Tribunal receptor del Trabajo de Investigación presidido por la Ingeniera Elsa Pilar Urrutia Urrutia, Mg., e integrado por la Ingeniera Rosa Estefanía Almache Hernández, Mg., Ingeniero Marcelo Vladimir García Sánchez Dr., Ingeniero Carlos Diego Gordón Gallegos, Dr., e designados por la Unidad Académica de Titulación de la Universidad Técnica de Ambato, para receptor el Trabajo de Investigación con el tema: “Modelación matemática y simulación 3D de la navegación autónoma y tele operación para un vehículo submarino no tripulado”, elaborado y presentado por el Ingeniero Leandro Tomás Núñez Cuesta, para optar por el Grado Académico de Magister en Automatización y Sistemas de Control; una vez escuchada la defensa oral del Trabajo de Investigación el Tribunal aprueba y remite el trabajo para uso y custodia en las bibliotecas de la UTA.



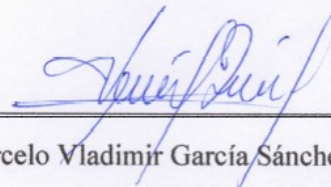
Ing. Elsa Pilar Urrutia Urrutia Mg.

**Presidente del Tribunal**




Ing. Rosa Estefanía Almache Hernández, Mg.

**Miembro del Tribunal**



Ing. Marcelo Vladimir García Sánchez Dr.

**Miembro del Tribunal**



Ing. Carlos Diego Gordón Gallegos Dr.

**Miembro del Tribunal**

## AUTORÍA DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

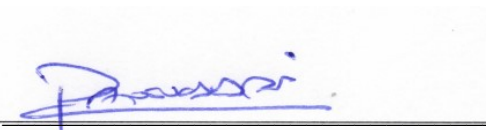
La responsabilidad de las opiniones, comentarios y críticas emitidas en el Trabajo de Investigación presentado con el tema: “MODELACIÓN MATEMÁTICA Y SIMULACIÓN 3D DE LA NAVEGACIÓN AUTÓNOMA Y TELE OPERACIÓN PARA UN VEHÍCULO SUBMARINO NO TRIPULADO”, le corresponde exclusivamente al Ingeniero Leandro Tomas Núñez Cuesta, Autor bajo la Dirección del Ingeniero Patricio Germán Encalada Ruiz MSc., Director del Trabajo de Investigación; y el patrimonio intelectual a la Universidad Técnica de Ambato.



Ing. Leandro Tomás Núñez Cuesta

CC: 180387466-6

AUTOR



Ing. Patricio Germán Encalada Ruiz MSc.

CC: 180388193-5

DIRECTOR

## **DERECHOS DE AUTOR**

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que el Trabajo de Investigación, sirva como un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos de mi trabajo, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este, dentro de las regulaciones de la Universidad.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Leandro Tomás Núñez Cuesta', written over a horizontal line.

Ing. Leandro Tomas Núñez Cuesta

CC: 180387466-6

**AUTOR**



## DEDICATORIA

*La presente tesis va dedicada a **Dios**, quien me supo guiar y brindar todos los recursos necesarios para afrontar este gran reto y llegarlo a terminar.*

*A mí **Padre** que desde el cielo me ayudo a superar las etapas de este proyecto, quien me supo inculcar muchas virtudes desde niño y las cuales sirven en cada etapa de mi vida.*

*A mí **Madre**, quien está presente en todo, la que forja cada amanecer con su paciencia y amor, quien ilumina y alegra con su luz cada paso que doy.*

*A mis **Hermanos** por sus palabras de confianza con los quienes hemos compartido momentos felices y tristes, tantas risas y complicidades que han hecho que la vida valga la pena vivirla cada segundo a su lado.*

## AGRADECIMIENTO

Mi profundo agradecimiento a Dios, que con su sabiduría infinita me permitió llegar a concluir un objetivo más en vida.

A mi familia por toda su ayuda brindada, por su apoyo y respaldo, por sus palabras de aliento para seguir y seguir hasta llegar a la meta.

A mis Amigos de Operación de la Central San Francisco que me brindaron su tiempo libre para cubrirme los fines de semana cuando lo necesitaba, sin su apoyo no hubiese podido culminar esta Maestría.

Al Ingeniero Patricio Encalada quien transmitió sus conocimientos con sus recomendaciones que significaron mucho para la culminación de este proyecto.

***Gracias muchas Gracias Dios se los pague!***

## ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

PORTADA.....	i
A LA UNIDAD ACADÉMICA DE TITULACIÓN.....	ii
AUTORÍA DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN.....	iii
DERECHOS DE AUTOR .....	iv
DEDICATORIA .....	v
AGRADECIMIENTO .....	vi
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE TABLAS .....	xv
RESUMEN EJECUTIVO .....	xvi
EXECUTIVE SUMMARY.....	xviii
INTRODUCCIÓN .....	xx
1. CAPÍTULO I.....	1
EL PROBLEMA .....	1
1.1. Tema de investigación.....	1
1.2. Planteamiento del problema .....	1
1.2.1. Contextualización.....	1
1.2.2. Árbol del problema .....	2
1.2.3. Análisis crítico .....	2
1.2.4. Prognosis .....	3
1.2.5. Formulación del problema .....	3
1.2.6. Preguntas directrices .....	4
1.2.7. Delimitación del problema.....	4
1.3. Justificación.....	4
1.4. Objetivos .....	5
1.4.1. Objetivo general .....	5
1.4.2. Objetivos específicos .....	6
2. CAPÍTULO II .....	7
MARCO TEÓRICO.....	7
2.1. Antecedentes investigativos .....	7

2.2.	Categorías fundamentales.....	9
2.2.1.	Redes de inclusiones conceptuales.....	9
2.2.2.	Constelación de ideas.....	9
2.2.3.	Sistema de control.....	10
2.2.4.	Robótica.....	12
2.2.5.	Robótica Submarina.....	14
2.2.6.	Navegación de vehículos robóticos.....	18
2.2.7.	Modelación matemática de sistemas físicos.....	20
2.2.8.	Modelación cinemática.....	21
2.2.9.	Simulación de sistemas.....	24
2.2.10.	Tele-robótica.....	32
2.2.11.	Tele-operación.....	33
2.3.	Hipótesis.....	34
2.4.	Señalamiento de variables de la hipótesis.....	34
3.	CAPITULO III.....	35
	METODOLOGÍA.....	35
3.1.	Enfoque de la Investigación.....	35
3.2.	Modalidad de la Investigación.....	35
3.2.1.	Investigación Bibliográfica – Documental.....	35
3.3.	Niveles de Investigación.....	35
3.4.	Población y muestra.....	36
3.5.	Operacionalización de variables.....	37
3.6.	Recolección de información.....	39
3.7.	Procesamiento y análisis.....	39
4.	CAPITULO IV.....	40
	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	40
4.1.	Estudio de la Modelación matemática.....	40
4.1.1.	Representación de modelos matemáticos.....	40
4.1.2.	Modelado de vehículos submarinos.....	41

4.1.3.	Modelado de comunicación submarina.....	48
4.2.	Estudio de la simulación de sistemas físicos.....	50
4.2.1.	Tipos de sistemas físicos.....	50
4.2.2.	Entornos de simulación de sistemas físicos .....	51
4.3.	Estudio de la validación de un modelo.....	53
4.3.1.	Parámetros de un modelo matemático .....	53
4.3.2.	Validación de un modelo matemático.....	53
4.4.	Estudio de la navegación autónoma .....	54
4.4.1.	Parámetros de simulación de un entorno .....	54
4.4.2.	Simulación de un vehículo submarino no tripulado.....	56
4.4.3.	Control autónomo de un vehículo submarino no tripulado.....	56
4.5.	Estudio de la navegación tele-operada .....	57
4.5.1.	Control tele-operado de un vehículo submarino no tripulado.....	57
4.6.	Verificación de hipótesis .....	58
5.	CAPÍTULO V .....	60
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	60
5.1.	Conclusiones .....	60
5.2.	Recomendaciones .....	61
6.	CAPÍTULO VI.....	62
	LA PROPUESTA .....	62
6.1.	Tema de la propuesta.....	62
6.2.	Datos informativos .....	62
6.3.	Antecedentes de la propuesta .....	62
6.4.	Justificación.....	63
6.5.	Objetivos .....	63
6.5.1.	Objetivo General .....	63
6.5.2.	Objetivos Específicos.....	64
6.6.	Análisis de factibilidad.....	64
6.6.1.	Factibilidad técnica .....	64

6.6.2.	Factibilidad Operativa.....	64
6.6.3.	Factibilidad Económica.....	64
6.7.	Fundamentación científico-técnica.....	65
6.7.1.	Análisis Cinemático .....	65
6.7.2.	Control de movimiento .....	65
6.7.3.	Sintonización PID .....	66
6.8.	Metodología.....	68
6.8.1.	Modelo matemático del submarino.....	71
6.8.2.	Control de Submarino .....	89
6.8.3.	Control de profundidad .....	95
6.8.4.	Tele operación.....	97
6.8.5.	Simulador virtual.....	102
6.8.6.	Pruebas de simulación.....	105
6.9.	Administración .....	121
6.9.1.	Recursos humanos.....	121
6.9.2.	Recursos Materiales .....	121
6.9.3.	Recursos Económicos .....	121
6.10.	Conclusiones y recomendaciones.....	122
6.10.1.	Conclusiones .....	122
6.10.2.	Recomendaciones.....	124
	REFERENCIAS.....	125
	ANEXOS .....	130
	Anexo A: Código en Matlab del modelo cinemático.....	131
	Anexo B: Código en Matlab del modelo dinámico.....	133
	Anexo C: Código en Matlab del modelo de restitución.....	135
	Anexo D: Código en Matlab del modelo de comunicación .....	136
	Anexo E: Código en Matlab del control de posición por cinemática inversa.....	137
	Anexo F: Código en Matlab del control PID de velocidades .....	139
	Anexo G: Código en Matlab del control de lastre .....	142
	Anexo H: Conexión entre Matlab y V-rep.....	144
	Anexo I: Construcción del Submarino en 3D .....	147

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1 Árbol del problema .....	2
Fig. 2.1: Variables dependientes e independientes de las categorías fundamentales .....	9
Fig. 2.2: Constelación de ideas de la Variable independiente .....	9
Fig. 2.3: Constelación de ideas de la Variable dependiente.....	10
Fig. 2.4: Sistema de control retroalimentado .....	10
Fig. 2.5: Tipos de estabilidad en sistemas: a) estable, b) estabilidad limitada y c) totalmente inestable.....	12
Fig. 2.6: Características de los robots .....	13
Fig. 2.7: Robots acuáticos: a) Manipulador submarino, b) Submarino con dos hélices.....	14
Fig. 2.8: Clasificación de los robots submarinos .....	15
Fig. 2.9: Simulación del comportamiento de un brazo a través de su modelo matemático .....	24
Fig. 2.10: Entornos de simulación: a) Simulación de posicionamiento, b) detección de obstáculos.....	27
Fig. 2.11: Captura del simulador emulando un Pioneer3DX: a) Espacio cerrado, b) Espacio abierto .....	28
Fig. 2.12: Marilou Robotics Studio: a) Simulación de múltiples robots, b) Simulación de robots en entornos, c) simulación de un manipulador.....	30
Fig. 2.13: Simulaciones 3D en Matlab: a) Helicóptero, b) manipulador con 2 DOF, c) Manipulador con 3 DOF .....	31
Fig. 2.14 Control tele-operado de un robot en medicina.....	32
Fig. 2.15 Tele-operación de robots .....	33
Fig. 4.1 Sistema de referencia inercial.....	42
Fig. 4.2 Sistema de referencia local.....	43
Fig. 4.3 Rotaciones de submarino respecto al sistema de referencia local .....	44
Fig. 4.4 Simulación de ambientes acuáticos .....	51
Fig. 4.5: Entorno de simulación de Gazebo .....	51

Fig. 4.6 Entorno de simulación de V-rep .....	52
Fig. 4.7 Tipos de Joystick .....	55
Fig. 6.1 Esquema general de control de movimiento.....	66
Fig. 6.2 Respuesta oscilante de un sistema en lazo cerrado.....	68
Fig. 6.3 Esquema de navegación autónoma.....	69
Fig. 6.4 Esquema de tele-operación .....	70
Fig. 6.5 Sistema de referencia del submarino.....	71
Fig. 6.6 Parámetros de simulación del modelo cinemático.....	73
Fig. 6.7 Evolución cinemática el ángulo $\theta_z$ .....	73
Fig. 6.8 Velocidad lineal $\dot{P}_{Cx}$ del modelo cinemático .....	74
Fig. 6.9 Velocidad lineal $\dot{P}_{Cy}$ del modelo cinemático .....	74
Fig. 6.10 Movimiento cinemático del submarino .....	74
Fig. 6.11 Parámetros dinámicos del submarino .....	75
Fig. 6.12 Parámetros de simulación del modelo dinámico .....	78
Fig. 6.13 Perturbación randomica $w_{v1}$ .....	79
Fig. 6.14 Perturbación randomica $w_{v2}$ .....	79
Fig. 6.15 Aceleración del submarino $a_{v1}$ .....	80
Fig. 6.16 Aceleración del submarino $a_{v2}$ .....	80
Fig. 6.17 Evolución de la velocidad $v_1$ del modelo dinámico. ....	81
Fig. 6.18 Evolución de la velocidad $v_2$ del modelo dinámico. ....	81
Fig. 6.19 Velocidad lineal $\dot{P}_{Cx}$ del modelo dinámico.....	82
Fig. 6.20 Velocidad lineal $\dot{P}_{Cy}$ del modelo dinámico.....	82
Fig. 6.21 Evolución del ángulo $\theta_z$ del modelo dinámico.....	82
Fig. 6.22 Movimiento de submarino debido a la respuesta dinámica.....	83
Fig. 6.23 Parámetros de simulación del modelo dinámico de restitución.....	84
Fig. 6.24 Perturbación randómica $w_z$ .....	85
Fig. 6.25 Aceleración del submarino $a_z$ .....	85
Fig. 6.26 Evolución de la velocidad $v_z$ del modelo dinámico vertical.....	85
Fig. 6.27 Movimiento vertical de submarino debido a la respuesta dinámica.....	86
Fig. 6.28 Esquema del canal de comunicación .....	87
Fig. 6.29 Distribuciones gamma de latencia.....	87



Fig. 6.30 Retardos generados por el modelo de comunicación respecto a la distancia.....	88
Fig. 6.31 Parámetros de la navegación autónoma del submarino .....	89
Fig. 6.32 Velocidad lineal del submarino determinada por el control de navegación.....	90
Fig. 6.33 Velocidad angular del submarino determinada por el control de navegación.....	90
Fig. 6.34 Movimiento del submarino debido al control de navegación.....	91
Fig. 6.35 Esquema de la compensación PID de velocidades .....	91
Fig. 6.36 Torque $\tau_{v_2}$ de la sintonización del PID.....	92
Fig. 6.37 Velocidad $v_2$ de respuesta en la sintonización del PID .....	93
Fig. 6.38 Velocidad $v_1$ de respuesta con el controlador PID .....	93
Fig. 6.39 Velocidad $v_2$ de respuesta con el controlador PID .....	94
Fig. 6.40 Fuerza $f_{v_1}$ generada por el controlador PID.....	94
Fig. 6.41 Torque $\tau_{v_2}$ generado por el controlador PID .....	95
Fig. 6.42 Errores de velocidad .....	95
Fig. 6.43 Respuesta de profundidad $z$ del submarino para sintonizar el PID. ....	96
Fig. 6.44 Respuesta de profundidad del submarino con el control PID.....	97
Fig. 6.45 Cambios de masa generados por el controlador de profundidad .....	97
Fig. 6.46 Esquema de tele operación unilateral propuesto.....	98
Fig. 6.47 Esquema de acomodación activa remota .....	99
Fig. 6.48 Respuesta de velocidad lineal del submarino aplicando la acomodación activa remota. ....	99
Fig. 6.49 Respuesta de velocidad angular del submarino aplicando la acomodación activa remota.....	100
Fig. 6.50 Diagrama de Nyquist de la respuesta en la velocidad lineal del submarino.....	101
Fig. 6.51 Diagrama de Nyquist de la respuesta en la velocidad angular del submarino.....	101
Fig. 6.52 Submarino de 3D .....	103
Fig. 6.53 Entorno virtual .....	103
Fig. 6.54 Joystick Logitech Extreme 3D Pro .....	104

Fig. 6.55 Cámara ubicada en el submarino virtual.....	104
Fig. 6.56 Vista de la transmisión de imagen al sitio local.....	105
Fig. 6.57 Simulación virtual de la navegación autónoma del submarino. ....	105
Fig. 6.58 Ruta de submarino en la navegación autónoma.....	106
Fig. 6.59 Fuerza de empuje lineal del submarino en la navegación autónoma...	106
Fig. 6.60 Torque de rotación del submarino en la navegación autónoma.....	107
Fig. 6.61 Aceleración lineal del submarino en la navegación autónoma.....	107
Fig. 6.62 Aceleración angular del submarino en la navegación autónoma.....	108
Fig. 6.63 Velocidad lineal del submarino en la navegación autónoma.....	108
Fig. 6.64 Velocidad angular del submarino en la navegación autónoma.....	108
Fig. 6.65 Simulación virtual de la tele-operación del submarino. ....	109
Fig. 6.66 Fuerza de empuje lineal del submarino en la tele-operación.....	110
Fig. 6.67 Torque de rotación del submarino en la tele-operación.....	110
Fig. 6.68 Aceleración lineal del submarino en la tele-operación.....	111
Fig. 6.69 Aceleración angular del submarino en la tele-operación.....	111
Fig. 6.70 Velocidad lineal del submarino en la tele-operación.....	112
Fig. 6.71 Velocidad angular del submarino en la tele-operación.....	112
Fig. 6.72 Velocidad lineal del submarino en la tele-operación.....	112
Fig. 6.73 Velocidad angular del submarino en la tele-operación.....	113
Fig. 6.74 Profundidad del submarino en la tele-operación. ....	113
Fig. 6.75 Latencia de la comunicación en la tele-operación del submarino. ....	114
Fig. 6.76 Relación de la salinidad y la densidad del agua de mar.....	115
Fig. 6.77 Respuestas de velocidad lineal del submarino con diferentes valores de densidad.....	115
Fig. 6.78 Acercamiento a las respuestas de velocidad lineal del submarino con cambios de densidad. ....	116
Fig. 6.79 Respuestas de velocidad angular del submarino con diferentes valores de densidad.....	116
Fig. 6.80 Acercamiento a las respuestas de velocidad angular del submarino con cambios de densidad .....	117
Fig. 6.81 Control autónomo vs tele operado 1: Movimiento del submarino .....	118
Fig. 6.82 Control autónomo vs tele operado 1: velocidad lineal del submarino.	118

Fig. 6.83 Control autónomo vs tele operado 1: velocidad angular del submarino. .....	119
Fig. 6.84 Control autónomo vs tele operado 2: Movimiento del submarino .....	119
Fig. 6.85 Control autónomo vs tele operado 1: velocidad lineal del submarino.	120
Fig. 6.86 Control autónomo vs tele operado 2: velocidad angular del submarino .....	120

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-1: Variable Independiente:</b> Modelación matemática y simulación .....	37
<b>Tabla 1-2: Variable dependiente:</b> Navegación autónoma y tele operada de un USV.....	38
<b>Tabla 6-1:</b> Parámetros de simulación del modelo cinemático. ....	73
<b>Tabla 6-2:</b> Parámetros de simulación del modelo dinámico .....	79
<b>Tabla 6-3:</b> Parámetros de simulación del modelo dinámico de restitución .....	84
<b>Tabla 6-4:</b> Constantes de sintonización por Ziegler y Nichols .....	91
<b>Tabla 6-5:</b> Índices de pasividad .....	102
<b>Tabla 6-5:</b> Recursos Económicos del Proyecto .....	121

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO**

**FACULTAD DE INGENIERIA EN SISTEMAS, ELECTRÓNICA E  
INDUSTRIAL / DIRECCIÓN DE POSGRADO**

**MAESTRÍA EN AUTOMATIZACIÓN Y SISTEMAS DE CONTROL**

**TEMA:**

**MODELACIÓN MATEMÁTICA Y SIMULACIÓN 3D DE LA NAVEGACIÓN  
AUTÓNOMA Y TELE OPERACIÓN PARA UN VEHÍCULO SUBMARINO  
NO TRIPULADO**

**AUTOR:** ING. LEANDRO TOMÁS NÚÑEZ CUESTA

**DIRECTOR:** ING. PATRICIO GERMÁN ENCALADA RUIZ MSC.

**FECHA:** SEPTIEMBRE, 2018

**RESUMEN EJECUTIVO**

Con el creciente desarrollo de la investigación a nivel nacional e internacional en el ámbito de los sistemas de control y la robótica, el desarrollo de modelos de matemáticos y la implementación de simuladores se convierten en herramientas de importancia y útiles para contribuir en las bases sólidas de nuevos resultados de investigación.

La robótica presenta un campo muy diversificado, sobre todo en el campo de la robótica móvil, donde se tiene tres medios para la locomoción, siendo el medio acuático una de las áreas menos explorada en investigación, lo que se debe a las dificultades que presenta trabajar con este tipo de robots y lo complejo de su conducta, para lo cual se requieren modelos matemáticos que consideren los factores propios del sistema y que sean simulados en ambientes virtuales.

Este trabajo de graduación presenta la modelación matemática de un submarino de dos grados de libertad, donde se determinan en primera instancia la cinemática del vehículo subacuático y luego se deduce un modelo dinámico que interprete su comportamiento considerando los factores internos y externos al submarino, además, se incluye un modelo probabilístico de la comunicación que determina

los retardos de comunicación entre el sitio local en la superficie y el sitio remoto en el área subacuática.

Los modelos matemáticos encontrados se utilizan para diseñar controladores con dos objetivos primordiales, la navegación autónoma y la tele-operación del submarino, para cual se desarrolla un control de posición mediante la cinemática inversa del robot submarino y un controlador PID para regular las velocidades del vehículo subacuático. Para este último controlador se obtienen las constantes proporcional, integral y derivativa mediante sintonización por el método de Ziegler y Nichols.

Adicional, se implementa un entorno de simulación virtual en 3D en el software de simulación V-Rep, en el cual se construye el ambiente subacuático y el modelo del submarino de dos grados de libertad, este simulador está conectado a Matlab para resolver los modelos matemático y generar las acciones de control que rigen el comportamiento del simulador.

Finalmente, se concluye con pruebas de simulación de los sistemas de navegación autónoma y tele-operación del vehículo submarino no tripulado, observando el correcto funcionamiento de todos los elementos diseñados en este trabajo de investigación.

**Descriptores:** Modelación matemática, robot, vehículo submarino, V-REP, Matlab control PID, simulación de robot, control autónomo, tele-operación, ambiente subacuático.

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS ELECTRÓNICA E**  
**INDUSTRIAL /DIRECCIÓN DE POSGRADO**  
**MAESTRÍA EN AUTOMATIZACIÓN Y SISTEMAS DE CONTROL**

**THEME:**

MATHEMATICAL MODELING AND 3D SIMULATION OF THE  
AUTONOMOUS NAVIGATION AND TELEOPERATION FOR A NOT  
TRIPULATE SUBMARINE VEHICLE

**AUTHOR:** ING. LEANDRO TOMÁS NÚÑEZ CUESTA

**DIRECTED BY:** ING. PATRICIO GERMÁN ENCALADA RUIZ MSC.

**DATE:** SEPTEMBER, 2018

**EXECUTIVE SUMMARY**

With the growing development of national and international research in the field of control systems and robotics, the development of mathematical models and the implementation of simulators become important and useful tools to contribute to the foundations of new research results.

Robotics presents a diversified field, especially in the field of mobile robotics, where there are three means for locomotion, with the aquatic environment being one of the areas least explored in research due to the difficulties of working with this type of robots and the complexity of their behaviour. For which, mathematical models are required to consider the factors of the system in order to simulate them in virtual environments.

This work presents the mathematical modelling of a submarine of two degrees of freedom, where the kinematics and the dynamic model of the underwater vehicle are developed in order to simulate its behaviour considering the internal and external factors of the submarine. In addition, a probabilistic model of communication which determines the delays between the local site on the surface and the remote site in the underwater area is included.

The mathematical models are used to design controllers with two primary objectives, autonomous navigation and teleoperation of the submarine, for which a position control is developed through the inverse kinematics of the submarine robot and a PID controller to regulate the vehicle speeds underwater. For this, proportional, integral, and derivative constants are obtained by tuning by the Ziegler and Nichols method.

Additionally, a 3D virtual simulation environment is implemented in V-rep simulation software, in which the underwater environment and the submarine model of two degrees of freedom are constructed. This simulator is connected to Matlab to solve the mathematical models and generate the control actions which govern the behaviour of the simulator.

Finally, simulation tests of the autonomous navigation and teleoperation systems of the unmanned submarine vehicle are included, assuring the correct functioning of all the elements designed in this research work.

**Keywords:** Mathematical modelling, submarine vehicle, robot, PID control, robot simulation, Matlab, V-REP, autonomous control, teleoperation, underwater environment.

## INTRODUCCIÓN

El trabajo de titulación presentado a continuación tiene por tema: MODELACIÓN MATEMÁTICA Y SIMULACIÓN 3D DE LA NAVEGACIÓN AUTÓNOMA Y TELE OPERACIÓN PARA UN VEHÍCULO SUBMARINO NO TRIPULADO, el cual está enfocado al estudio bibliográfico de los recursos necesarios para resolverlo y luego proponer una metodología que permita alcanzar los objetivos planteados en la investigación.

En contenido se organiza en capítulos de la siguiente manera:

En el Capítulo I, se aborda EL PROBLEMA de la investigación mediante un análisis de la simulación de vehículos submarino en el contexto local e internacional y se plantean los objetivos de la investigación.

En el Capítulo II, se desarrolla un MARCO TEÓRICO con información bibliográfica referente a la investigación, detallando trabajos similares y describiendo contenidos teóricos que respaldan el desarrollo de este proyecto.

En el Capítulo III, se expone la METODOLOGÍA a utilizar para resolver el problema y se detallan los componentes que serán sometidos a análisis.

En el Capítulo IV, se realiza el ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LA INFORMACIÓN encontrada mediante el método bibliográfico que permite describir las herramientas existentes para dar una posible solución al problema.

En el Capítulo V, se presentan la CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES obtenidas del análisis bibliográfico realizado y que permiten proponer una solución al tema de investigación.

Finalmente, el Capítulo VI describe LA PROPUESTA mediante soluciones para cada uno de los elementos que forman parte del problema de investigación, para lo cual se desarrolla la modelación del sistema conformado por el submarino y el canal de comunicación, luego se diseñan los controladores para cumplir con las tareas planteadas y se realiza un entorno de simulación, donde se examinan los resultados finales.



# CAPÍTULO I

## EL PROBLEMA

### 1.1. Tema de investigación

MODELACIÓN MATEMÁTICA Y SIMULACIÓN 3D DE LA NAVEGACIÓN AUTÓNOMA Y TELE OPERACIÓN PARA UN VEHÍCULO SUBMARINO NO TRIPULADO

### 1.2. Planteamiento del problema

#### 1.2.1. Contextualización

El propósito de muchos trabajos en robótica ha sido incrementar el grado de autonomía de vehículos terrestres, aéreos y marinos. Poniendo en contexto el primer grupo, diversos tipos de control embebido y métodos de control remoto han sido desarrollados (Sira-Ramírez, López-Uribe, & Velasco-Villa, 2013). De manera similar y especialmente en la última década, diversos trabajos investigativos orientados a vehículos aéreos han sido desarrollados dada la gran cantidad de aplicaciones mostradas por este tipo de robots (Nägeli, Meier, Domahidi, Alonso-Mora, & Hilliges, 2017). Sin embargo, el estudio de vehículos submarinos no tripulados ha sido limitado por la cantidad de parámetros a controlar, por el costo que involucra el diseño de uno de estos prototipos o por las puntuales aplicaciones presentadas por estos robots holonómicas (Tsingas, y otros, 2017).

El estudio de aguas lénticas naturales o artificiales es posible con robots no tripulados submarinos. Aplicaciones para el monitoreo de cableado submarino, industria del petróleo, estudio de fauna marina, supervisión de estructuras en represas hidroeléctricas y otras se facilitan al contar con el prototipo robótico adecuado. Específicamente para el área industrial, la implementación de este tipo

de robots podría disminuir considerablemente el costo que involucra enviar personal humano a la supervisión de averías en cables o estructura física dependiendo de la aplicación. Puntualmente en el área local a modo de ejemplo, el monitoreo de represas hidroeléctricas se realiza frecuentemente vaciando completamente los reservorios para detectar anomalías estructurales.

Sin embargo, factores como el costo que involucra la adquisición de un robot submarino comercial muchas de las veces resulta sobredimensionado para la aplicación específica a cumplir. Adicionalmente, la construcción de uno de estos prototipos requiere una previa simulación de su comportamiento, situación no resuelta o difícil de encontrar por parte de soluciones comerciales.

### 1.2.2. Árbol del problema

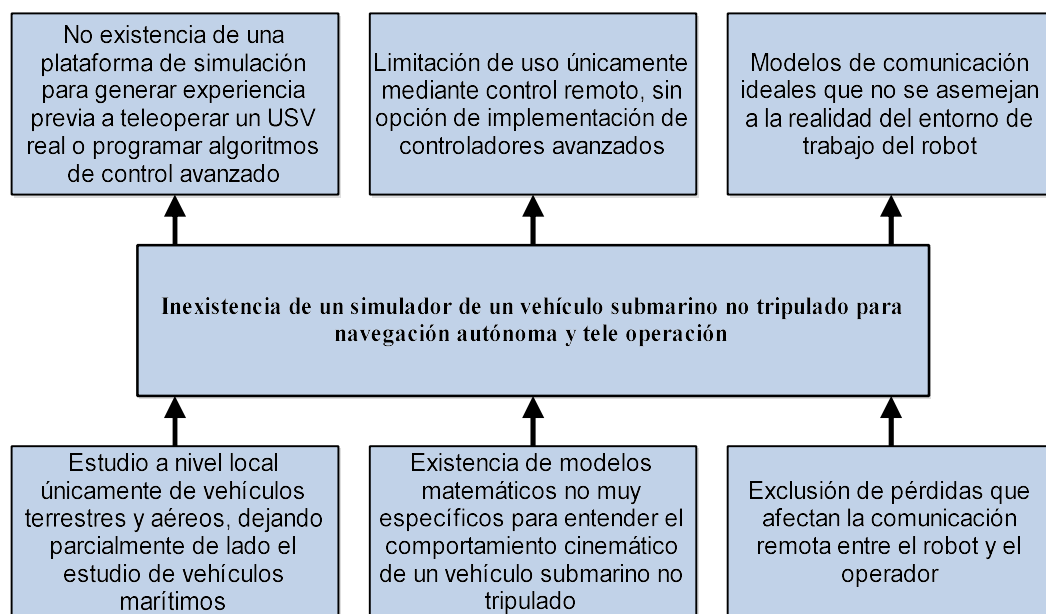


Fig. 1.1 Árbol del problema

Elaborado por: Tomás Núñez

### 1.2.3. Análisis crítico

La complejidad al estudiar este tipo de vehículos ha provocado la falta de bibliografía al momento de intentar entender su funcionamiento. Debido a esto, la carencia de trabajos investigativos sobre el comportamiento de vehículos submarinos no tripulados limita la construcción de los mismos. El enfoque de

construcción de este tipo de vehículos parte de un análisis previo de todas las características y parámetros que influyen en el modelo matemático que lo describe. Al no contar con este punto de partida, la implementación de un prototipo físico puede tener resultados no satisfactorios cuando se trate de implementar controladores autónomos.

Asimismo, la cantidad limitada de trabajos en simulación de vehículos submarinos impide entender el comportamiento de este robot en ambientes reales, así como el estudio de las pérdidas de transmisión producidas por las características del medio acuático. Esto limita a usuarios que intentan ganar experiencia previa al manejo de un prototipo real o a entender la realidad de cómo funciona el sistema de comunicación en un entorno de trabajo real.

Debido a esto, es necesario desarrollar un estudio para obtener el modelo matemático equivalente de la cinemática de un USV, simular su comportamiento considerando todas las variables que influyen en él y plantear algún tipo de controlador para tareas donde se requiera autonomía de funcionamiento.

#### **1.2.4. Prognosis**

El poco énfasis en el estudio del comportamiento de vehículos submarinos no tripulados impide una construcción adecuada de los mismos cuando así se requiriere. Bajo esta problemática, el mercado local está atado a la compra de este tipo de robots para aplicaciones prácticas, limitando el crecimiento de la economía nacional o impidiendo la diversificación de la matriz productiva ecuatoriana. Adicionalmente, al no tener un simulador del comportamiento de USVs, los técnicos se ven limitados a generar experiencia en el manejo de los mismos a través de posibles daños a la integridad de vehículos reales, lo cual no es económicamente viable.

#### **1.2.5. Formulación del problema**

¿Es posible obtener un modelo matemático, simular en 3D y tele-operar en simulación un vehículo submarino no tripulado considerando su cinemática y las pérdidas de transmisión en la comunicación dadas por el entorno de trabajo del robot?

### **1.2.6. Preguntas directrices**

¿Cómo se determina un modelo matemático?

¿Qué parámetros se consideran para obtener un modelo matemático?

¿Qué tipo de controles se usa para la navegación autónoma en trayectorias predeterminadas?

¿Cuál es la ventaja de simular la tele operación de un vehículo acuático?

¿Cuáles son las pérdidas en comunicación producidas por el entorno de trabajo?

### **1.2.7. Delimitación del problema**

#### **1.2.7.1. Límite del contenido**

*Área Académica:* Sistemas de Control

*Línea de investigación:* Control y Programación de robots.

#### **1.2.7.2. Limite espacial**

Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, de la Universidad Técnica de Ambato.

#### **1.2.7.3. Límite Temporal**

La presente investigación se realizará en un periodo de 6 meses, iniciando posteriormente a la aprobación del Honorable Consejo Académico de la Facultad de ingeniería en Sistema, Electrónica e Industrial de la Universidad Técnica de Ambato.

### **1.3. Justificación**

El auge de los entornos de simulación en la investigación moderna ha sido inminente. Tanto para actividades de educación, entrenamiento, capacitación y otras, la simulación se muestra actualmente como una parte fundamental del mercado industrial y de consumo. Dentro de esta perspectiva, la simulación en

robótica puede facilitar el entendimiento del control de vehículos terrestres, aéreos o submarinos, ya que no requiere de una construcción física de los prototipos.

Un simulador para vehículos submarinos autónomos se compone de un entorno simulado bajo agua (con interferencias aleatorias que imiten el comportamiento del medio), un prototipo virtual de USV y los modelos cinemáticos de respuesta del sistema. La unión de estos elementos posibilita la evaluación de los modelos característicos del robot, así como del control remoto. La etapa de interacción entre el vehículo submarino simulado y el operador humano brinda facilidades adicionales que pueden ser explotadas en trabajos investigativos similares; de esta manera, es posible afirmar que un simulador de control y operación remota para un vehículo submarino autónomo permitirá obtener una plataforma de evaluación para nuevos algoritmos de control con importancia teórica y experimental, además de ser usada para capacitar personal interesado en la operación remota de USVs.

Se plantea el desarrollo de un simulador de control y tele operación de un USV a partir de la modelación cinemática de un vehículo submarino ya que son tópicos no estudiados a profundidad en investigaciones similares. En todos los trabajos desarrollados en el ámbito local, la modelación matemática no es considerada, negando la posibilidad de que el vehículo simulado sea capaz de seguir trayectorias pre establecidas de manera autónoma. Asimismo, evadir el análisis de la modelación impide conocer el comportamiento de diversos factores como el modo de control. De manera simulada, se plantea que los resultados sean presentados gráficamente para mostrar la eficiencia en los dos tipos de control. Como consideración adicional, este trabajo pretende ser el punto de partida en la construcción de un prototipo real para investigaciones futuras.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo general**

Modelar matemáticamente y simular en 3D un vehículo submarino no tripulado para navegación autónoma y tele operada a través del análisis de su comportamiento cinemático.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Obtener el modelo matemático del USV para determinar el comportamiento del mismo en el espacio de trabajo establecido.
- Modelar el comportamiento de la comunicación para un área limitada de trabajo, considerando las pérdidas producidas por transmisión debido al ambiente.
- Diseñar un controlador para la navegación autónoma del USV en trayectorias predeterminadas en ambientes estructurados.
- Crear un entorno de simulación para la tele operación y el control autónomo del USV a través del uso de software apropiado tanto para implementación de controladores no lineales.
- Ejecutar diversas pruebas para validar el control autónomo de navegación y tele-operación del USV utilizando el simulador desarrollado.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Antecedentes investigativos

Temas relacionados con el trabajo investigativo planteado se han desarrollado mayormente en el ámbito internacional. En este aspecto, esta sección presenta un conjunto de trabajos que muestran una orientación similar a la propuesta. De forma teórica, (Bhopale P. , Bajaria, Singh, & Kazi, 2017) propone el filtrado de señales adquiridas por los sensores de navegación inercial de un USV. Partiendo del fundamento que toda la navegación se basa en los datos adquiridos de un sistema de navegación (los cuales están expuestos continuamente a ruido), el trabajo plantea el uso de un filtro extendido de Kalman para suprimir el ruido receptado en la adquisición de información. Asimismo, (Pshikhopov, Medvedev, & Gurenko, 2014) presentan el desarrollo de un controlador de posición y la implementación de un prototipo pequeño de submarino. Sin embargo, no se desarrolla el análisis completo de todos los parámetros que intervienen en la cinemática del vehículo.

(Bhopale P. S., Bajaria, Kazi, & Singh, 2016) analizan todos los parámetros que influyen en el modelo matemático de un USV, considerando un control basado en desigualdad matricial lineal. Las pruebas llevadas a cabo no contienen la simulación de entornos ni del vehículo propuesto. Similarmente, (Vervoort, 2008) incluye un análisis matemático de la cinemática de un vehículo submarino. A pesar de no contar con resultados experimentales ni simulados, la base teórica se muestra de gran soporte para el entendimiento del comportamiento del vehículo. De manera aplicativa, (West, Schmidt, & Spears, 2015) presentan el desarrollo de un vehículo submarino no tripulado pequeño y modular, dotado de sensores y cámaras para el estudio de especies en la Antártica. Aunque se presentan

resultados de capturas de imagen de este proyecto, no se muestra sustento matemático para navegación autónoma ya que la orientación es completamente tele operada. De igual manera, (Bryson, Johnson-Roberson, Pizarro, & Williams, 2015) presentan la aplicación de este tipo de robots para reconstrucción de escenarios 3D de vida marina, considerando corrección de color para mejorar la formación de modelos de imagen acuática. El trabajo se centra mayormente en el mejoramiento de captura de imagen, teniendo al vehículo como un medio de adquisición de información. En el mismo ámbito, el artículo científico de (Encarnacao & Pacoal, 2000) se centra un buscar un controlador para el seguimiento autónomo de un vehículo submarino. El trabajo se centra en obtener un modelo cinemático equivalente del vehículo, adicional de parámetros dinámicos dimensionados para el tema de investigación. Los resultados del controlador basado en Lyapunov se muestran detalladamente, considerando condiciones ideales para la navegación. La modelación cinemática y dinámica es considerada en el trabajo de (Red Calvo, 2015), donde se presenta el diseño de un simulador con distintos tipos de vehículos submarinos. Sin embargo, no se presentan resultados concisos de las respuestas del controlador frente al seguimiento de una trayectoria dada ni se incluyen métodos de control tele-operado.

A nivel nacional, (Cabrera & Soria, 2012) plantean el desarrollo de un vehículo sumergible controlado remotamente para tareas de adquisición de información de vida marina y del ambiente acuático. El trabajo se centra completamente en el diseño e implementación del vehículo, sin tomar en cuenta navegación autónoma. En otro enfoque, (Llerena Villa & Medina Moreira, 2002) desarrollan un sistema de comunicación para submarinos, reemplazando sistemas obsoletos de transmisión de información. Sin embargo, el estudio se desarrolla sobre un submarino construido y no se centra en su funcionamiento, sino plenamente en el modo de comunicación. Finalmente, (Chopitea Cantos & Ayala, 2010) propone la construcción de un vehículo submarino no tripulado para la inspección de cascos de buques, el cual es controlado remotamente sin analizar fundamento matemático ni métodos autónomos de control.



## 2.2. Categorías fundamentales

### 2.2.1. Redes de inclusiones conceptuales

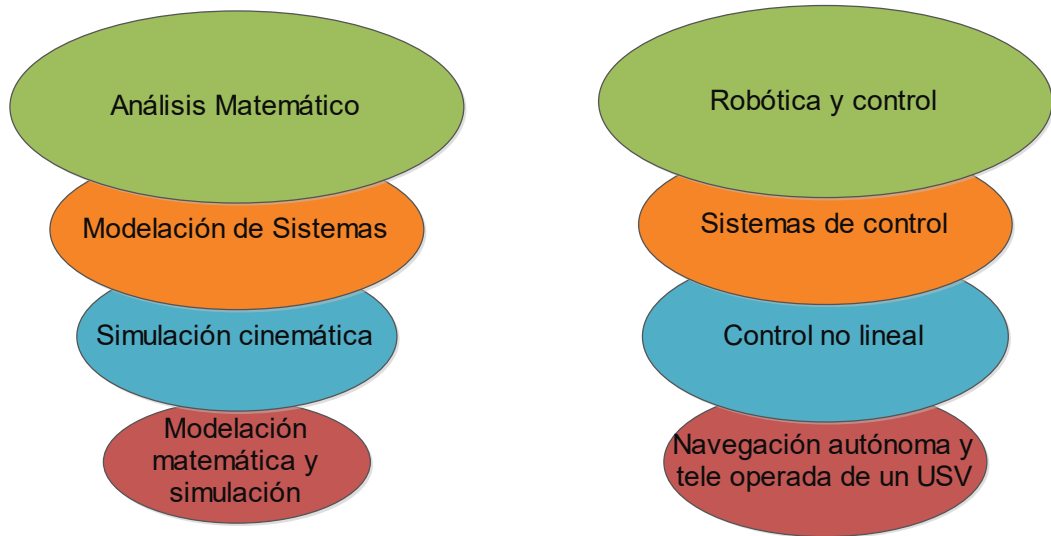


Fig. 2.1: Variables dependientes e independientes de las categorías fundamentales

Elaborado por: Tomás Núñez

### 2.2.2. Constelación de ideas

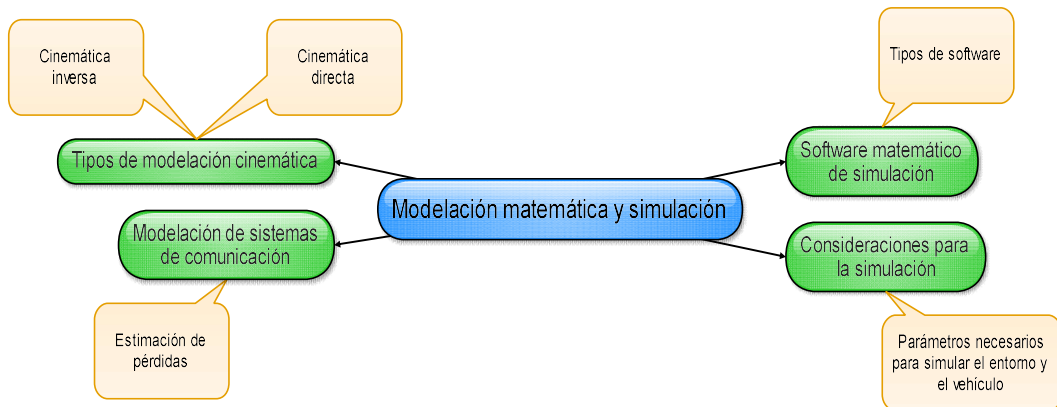


Fig. 2.2: Constelación de ideas de la Variable independiente

Elaborado por: Tomás Núñez

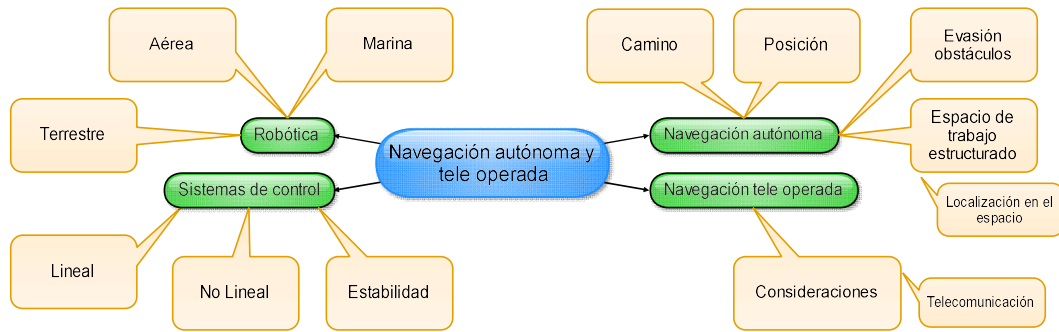


Fig. 2.3: Constelación de ideas de la Variable dependiente

Elaborado por: Tomás Núñez

### 2.2.3. Sistema de control

Un sistema de control es un conjunto de elementos que regulan el comportamiento de otro sistema o de sí mismo para cumplir una tarea o un objetivo. El principio de todo sistema de control es la aplicación de retroalimentación, que consiste en obtener información del estado actual de la variable que se está controlando para ejecutar acciones correctivas sobre ésta (Fig. 2.4) (Kuo, 1996).

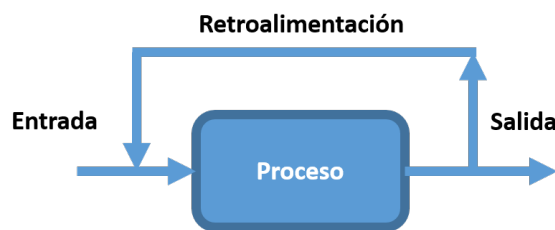


Fig. 2.4: Sistema de control retroalimentado

Elaborado por: Tomás Núñez

El elemento principal de un sistema de control es el lazo de control retroalimentado, que no es más que una trayectoria cerrada conformada por un sensor, un controlador y un elemento final de control.

La teoría de sistemas de control se ocupa del análisis y el diseño de componentes interactuantes de un sistema en una configuración que proporcione a un comportamiento deseado. La configuración esencial usada en teoría de sistemas de control se basa en el concepto fundamental de realimentación, que consiste en el proceso de medir las variables de interés en el sistema y usar esa información

para controlar su comportamiento. La teoría y la práctica del control tienen un amplio rango de aplicaciones en los campos de la ingeniería aeronáutica, química, mecánica, ambiental, civil y eléctrica, así como en muchas otras disciplinas no ingenieriles. Las ventajas del control eficiente en la industria son inmensas, e incluyen mejoras en la calidad de los productos, reducción en el consumo de energía, minimización del material de desecho, mayores niveles de seguridad y reducción de la contaminación.

Los sistemas de control con retroalimentación se pueden clasificar de diversas maneras, esto depende del propósito al que se les dé, es decir de acuerdo con el método de análisis y diseño los sistemas se clasifican en sistemas lineales y no lineales. (Ogata, 1998)

#### **2.2.3.1. Sistema de control lineal**

Los sistemas lineales son los que poseen ecuaciones de modelo lineales. Una ecuación diferencial es lineal si sus coeficientes son constantes o funciones únicamente de la variable independiente, por concepto matemático un sistema lineal cuenta con propiedades de superposición y homotecia, en la práctica no existen este tipo de sistemas ya que los sistemas físicos son no lineales en cierto grado.

#### **2.2.3.2. Sistema de control no lineal**

Los sistemas no lineales son aquellos que cuentan con ecuaciones no lineales. En estos sistemas no se aplica el método de superposición, en general los procedimientos para hallar soluciones de problemas que involucran sistemas no lineales, son extremadamente complejos.

#### **2.2.3.3. Estabilidad en sistemas**

Un sistema es estable si responde en forma limitada a una excitación limitada y en que los transitorios decaen, es decir, la respuesta transitoria desaparece para valores crecientes del tiempo (Kuo, 1996). Las formas de estabilidad de los sistemas se presentan en el Fig. 2.5.

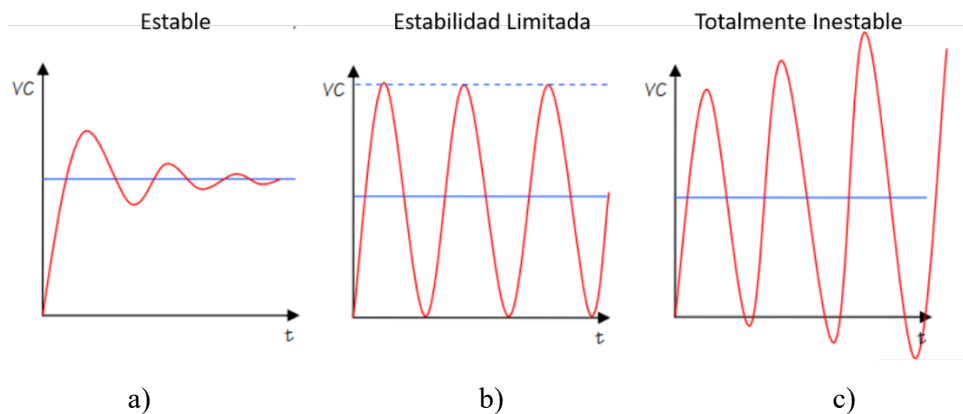


Fig. 2.5: Tipos de estabilidad en sistemas: a) estable, b) estabilidad limitada y c) totalmente inestable

**Fuente:** Teoría de Estabilidad y Control (García, 2005)

#### 2.2.4. Robótica

La robótica es una ciencia o rama de la tecnología, que estudia el diseño y construcción de máquinas capaces de desempeñar tareas realizadas por el ser humano o que requieren del uso de inteligencia. Las ciencias y tecnologías de las que deriva podrían ser: el álgebra, los autómatas programables, las máquinas de estados, la mecánica, la informática, entre otras. (Ollero, 2001)

La robótica tiene evidentes características diversas para que se puedan desarrollar y aplicar la tarea la cual piensan hacer; de ellas las características de los robots se presentan en la Fig. 2.6.

Existen diversos tipos de robots dependiendo de la variedad de sus aplicaciones: andróides, robots móviles, poli articulados, entre otros. Los más comunes en la actualidad son los robots poli articulados y los robots móviles. Los robots poli articulados son ampliamente utilizados en aplicaciones industriales, en procesos de manipulación y fabricación, se trata de robots cuya posición es fija o que permiten desplazamientos limitados en torno a ésta, formados por un brazo articulado en cuyo extremo se sitúa la herramienta utilizada para realizar el trabajo y que el robot puede mover y colocar en distintas posiciones y orientaciones. Los robots móviles, por su parte, son vehículos autónomos capaces de desplazarse en entornos desconocidos o parcialmente conocidos. En la actualidad, existen robots

móviles aéreos, terrestres o acuáticos, espaciales, según el medio por el que se desplacen. (Martín Hernández Ordoñez, 2015)

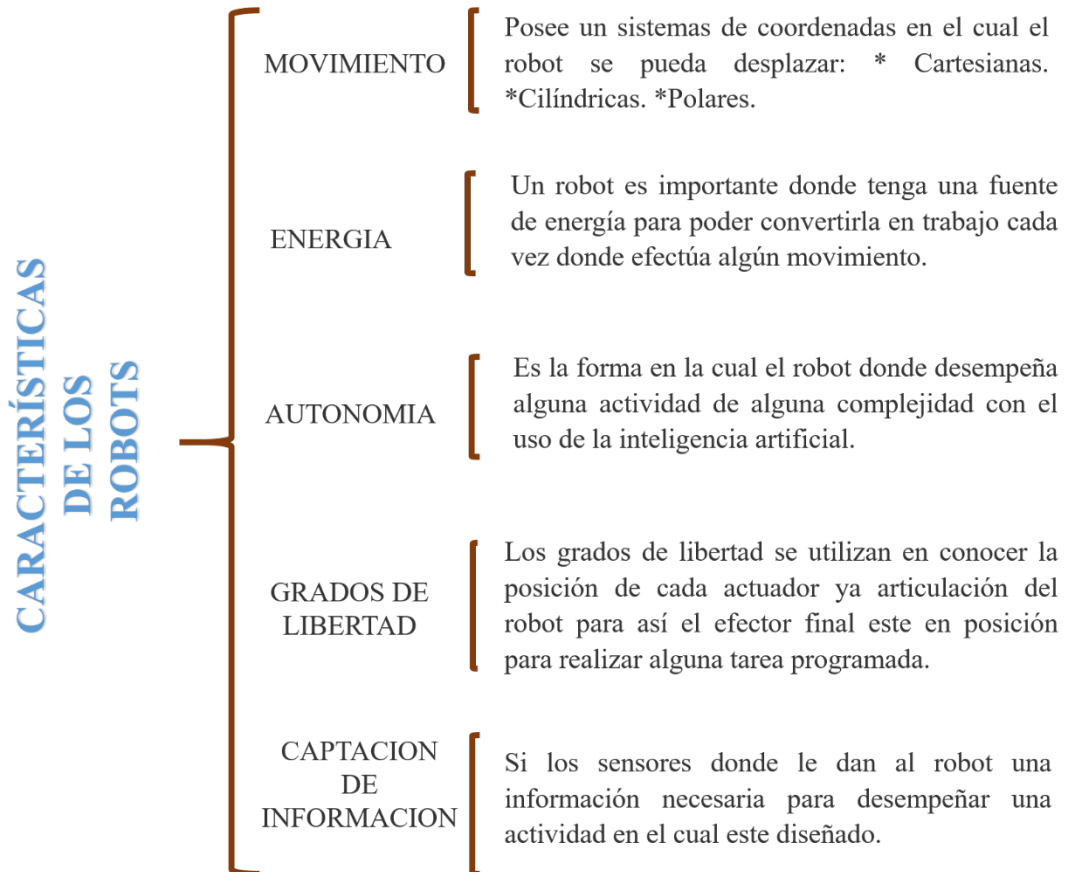


Fig. 2.6: Características de los robots

Elaborado por: Tomás Núñez

#### 2.2.4.1. Robótica Marina

Los robots acuáticos o marinos (Fig. 2.9) son capaces de desarrollar tareas en entornos acuáticos, dentro de este campo de la robótica tenemos algunos tipos de robot como los: ROV (Remotely Operated Vehicle) vehículo acuático físicamente ligado a la superficie, es de tipo semi-autónomo. El AUV (Autonomous Underwater Vehicles) es un tipo de robot totalmente autónomo, UUV (Unmanned Underwater Vehicles), es de nivel avanzado de los UAV, y los UVMS (Underwater Vehicle-Manipulator System) este tipo de robot incluyen manipuladores para interactuar con el entorno. Cada uno de estos robots tienen tareas específicas que pueden cumplir dentro del agua, permitiendo la detección,

rescate, exploración, transporte o manipulación de objetos, entre otras, sin tener problemas al momento de sumergirse o trasladarse en el agua (Oliviera, 2017).

a)



b)



Fig. 2.7: Robots acuáticos: a) Manipulador submarino, b) Submarino con dos hélices

**Fuente:** Robots acuáticos (Pesquisa, 2017)

## 2.2.5. Robótica Submarina

La robótica submarina se encarga de diseñar vehículos para realizar tareas bajo el agua. Estas tareas las puede realizar en movimiento (navegación) o en posición estática al llegar a su destino, este último generalmente incluye un manipulador.

### 2.2.5.1. Clasificación de los Robots Submarino

Los robots submarinos pueden clasificarse mediante diferentes criterios como pueden ser: según el tipo de misión que realiza, por su autonomía y por el sistema de propulsión que posee, ver la figura 2.11.

#### A. Según el tipo de misión

**Inspección.-** Estas misiones son realizadas en movimiento (navegación) y no requieren de un brazo robótico manipulador, debido a que el submarino no

interactúa con el entorno. Un ejemplo sería recoger imágenes con una o más cámaras de video, cuando el robot está navegando en el entorno subacuático. En la práctica se utilizan para revisión de instalaciones submarinas, como son construcciones metálicas, tuberías, cables, y otros.

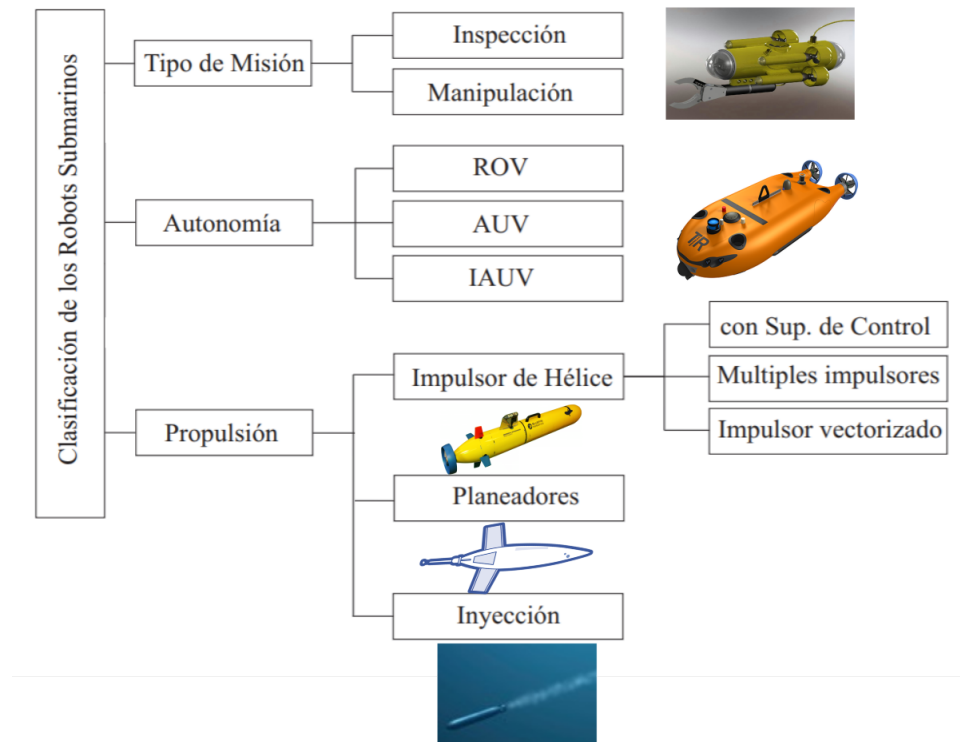


Fig. 2.8: Clasificación de los robots submarinos

**Fuente:** Robots submarinos (Moreno, 2013)

**Manipulación.-** En estas misiones el robot submarino posee herramientas de manipulación, como pueden ser brazos robóticos. Para que un operador puede interactuar con el ambiente, se requiere transmitir imágenes en tiempo real hacia el sitio local. En la aplicación, estos robots se usan para el mantenimiento de estructuras acuáticas, desactivar minas, armado y desarmado de piezas, recolección de especímenes arqueológicos, corrección de desastres en fuga de materiales peligrosos y contaminantes.

## **B. Por su Autonomía**

**Robots Submarinos Operados Remotamente** (ROVs en inglés).- estos prototipos están enlazados a la superficie por un medio cableado, así, se transmiten datos y se entrega energía al robot. De esta forma, el ordenador ubicado en la superficie envía las señales de control hacia el ROV, y el computador a bordo de robot devuelve los datos de los sensores que contiene, para que el operador este actualizados de los estados de robot y el ambiente.

**Robots Submarinos Autónomos** (AUVs en inglés).- Estos robot integran un sistema de control que le permite al vehículo interactuar con el ambiente sin intervención de un operador, así también, incluye su propia fuente de energía recargable. En su mayoría, estos vehículos submarinos no se comunican con la superficie, pero si se configuran tareas autónomas, para rutas pre especificadas por el usuario. Se usan en experimentación científica, muestreo oceanográfico, arqueología submarina y exploración bajo hielo. Los datos obtenidos por el vehículo se almacenan en su memoria interna para posteriormente ser analizados.

**Robots Submarinos Autónomos para Intervenciones** (IAUVs en inglés).- Son vehículos submarinos diseñados para intervenciones, sobre todo manipulación. Son de menor costo si los comparamos con los ROVs y con ventajas de maniobrabilidad debido a que no posee comunicación cableada con la superficie.

## **C. Por el Sistemas de Propulsión**

Los sistemas de propulsión son los actuadores que hacen que los vehículos submarinos se desplacen por el medio acuático. Siendo parte del sistema de propulsión, los componentes que producen fuerzas y los elementos que modifican la dirección de dichas fuerzas.

### **Impulsores de Hélice**

Un sistema impulsado con hélice-motor es el comúnmente utilizado para la mayoría de submarinos. Se compone principalmente en un actuador eléctrico, acoplado a una hélice. La rotación de esta hélice genera el empuje desplazando al fluido de adelante hacia atrás, causado por la diferencia de presión.



**-Impulsor y superficies de control.-** Estos sistemas de propulsión son los mayormente usados para submarinos de gran tamaño y submarinos autónomos. Se basan en aletas que poseen un grado de libertad para lograr los movimientos pitch, yaw y roll. Aunque estos sistemas son muy simples su maniobrabilidad es limitada, aún más en bajas velocidades.

**-Múltiples impulsores.** Estos sistemas se usan en robot tele-operados (ROVs). Funciona mediante un número de impulsores para lograr la maniobrabilidad y los grados de libertad deseados. Los impulsores se colocan de diferentes maneras, y no existen reglas para su posición y orientación, aunque en su mayoría son colocados en parte trasera y a los lados.

**-Impulsor vectorial.** La impulsión vectorial implica que el robot submarino tiene la posibilidad de orientar o ubicar un impulsor para controlar todo su movimiento. Los impulsores deben ir colocados en la parte de atrás.

### **Planeador Acuático**

Los planeadores submarinos no tienen un impulsor y tampoco una aleta móvil. Su funcionamiento se basa en deslizarse desde la superficie hasta alcanzar una profundidad dada, para luego modificar su flotabilidad y cabeceo, logrando tener un ascenso hasta llegar a otro punto prefijado para volver a descender, sucesivamente. Para avanzar del robot debe cambiar su flotabilidad combinado variaciones de su posición y fuerza, como resultado se obtiene cambios de la inclinación de las aletas con un mínimo gasto energético.

### **Impulsor de Inyección**

Los robots submarinos que tiene un sistema de propulsión por inyección, recogen y retienen el agua en un depósito, para usar una bomba y expulsar el agua, la cual es inyectada usando una embocadura colocada en un tubo. El agua sale a una alta presión y la fuerza de empuje es equivalente a la reacción de dicha presión, con lo que se obtiene el movimiento del vehículo. Para direccionar la fuerza de empuje se debe rotar el tubo que inyecta el agua.

### **2.2.5.2. Sensores**

Un robot submarino debe ser provisto de varios sensores para obtener su localización, velocidad y aceleración. Las cámaras también permiten obtener estos datos del robot y de los objetos respecto al robot. Estos dispositivos hacen posible controlar los desplazamientos del vehículo, permitiendo cumplir las misiones asignadas. Podemos clasificarlos como:

#### **A. Sensores Propioceptivos.**

Son los sensores que permiten conocer la posición, orientación, velocidad y aceleración del submarino respecto a un sistema de referencia. Ejemplos de estos sensores son: GPS, IMU, el Velocímetro Doppler, el Sensor de profundidad, Sistemas de Posicionamiento Acústico y más.

#### **B. Sensores Internos**

Estos sensores ayudan a determinar el gasto energético del robot, posibles inundaciones, temperatura interna y otras. Así podemos medir voltaje, corriente, potencia.

#### **C. Medición del ambiente.**

Son los sensores que se utilizan para conocer detalles del agua externa, las variables de interés pueden ser: conductividad, densidad, pH, turbulencia del agua, oxígeno disuelto, temperatura externa, detección de materiales y otros.

### **2.2.6. Navegación de vehículos robóticos**

#### **2.2.6.1. Navegación y control autónomo**

El objetivo de la navegación autónoma es satisfacer el seguimiento de una trayectoria descrita por su posición o perfil de velocidad parametrizado o no en el tiempo. Dentro de la navegación por control autónomo, se pueden establecer distintos tipos de seguimiento: trayectoria, camino y posición.

#### **D. Trayectoria**

Se define como el seguimiento de un conjunto ordenado de puntos parametrizados en el tiempo. En este caso, el robot puede modificar su velocidad de desplazamiento dependiendo de la ruta a seguir y de los objetivos establecidos.

#### **E. Camino**

El problema de seguimiento de camino busca mantener al robot dentro de un conjunto de puntos no dependientes del tiempo, donde el vehículo se desplaza a una velocidad deseada constante.

#### **F. Posición**

Posicionamiento del vehículo con una orientación establecida en algún punto del espacio. Cuando el vehículo alcanza el punto deseado, las acciones de control tratan de mantenerlo estático sobre el grupo de coordenadas deseadas.

#### **2.2.6.2. Navegación tele-operada**

La navegación tele operada es usada cuando no es conveniente el empleo de personas para desarrollar ciertas labores debido al riesgo que podrían exponer. El desarrollo de robots tele-operados hace uso de distintos campos de la ingeniería: electrónica, comunicaciones, informática y algún tipo de control. La navegación tele operada por tanto se define como el control de robots a distancia desde una estación remota, suponiendo una ventaja al proteger la integridad del operario humano.

Un sistema tele operado está conformado por una estación de tele operación, un sistema de comunicación y un esclavo robótico. El esclavo robótico es el sistema que se encuentra en un entorno remoto y es controlado a distancia, donde el operario obtiene información del ambiente mediante sensores y ejecuta acciones de control para poder llevar a cabo la tarea establecida. (Siciliano B. S., 2009)

### **2.2.7. Modelación matemática de sistemas físicos**

Muchos sistemas ya sean mecánicos, eléctricos, hidráulicos, entre otros, pueden ser caracterizados por un sistema de ecuaciones, donde se puede obtener la respuesta de un sistema dinámico a una entrada o una función excitadora, si se encuentra las soluciones a ese sistema de ecuaciones diferenciales. Para obtener las ecuaciones se utilizan las leyes físicas que gobiernan un sistema, por ejemplo, leyes de Newton para sistemas mecánicos, leyes de Kirchoff para circuitos eléctricos, entre otras.

#### **2.2.7.1. Modelos matemáticos**

La descripción matemática de las características cinemáticas o dinámicas de un sistema es conocida como modelo matemático. Para poder analizar un sistema en primer plano hay que tener el modelo matemático, ya que es una parte fundamental e importante en todo análisis de comportamiento de un sistema. El modelo matemático de cada sistema es diferente ya que las propiedades dinámicas o cinemáticas varían en cada uno de ellos. Por esta razón, el modelo matemático puede tomar diferentes formas, unas más complejas que otras.

Si se obtiene ya un modelo matemático, se puede utilizar herramientas computacionales para analizar el comportamiento del sistema mediante la simulación del mismo. (Ordoñez, 2015)

#### **2.2.7.2. Elaboración de modelos**

Aplicando leyes físicas, es posible crear un modelo matemático que describa al sistema, este modelo es teóricamente aproximado al real. A veces es imposible desarrollar un modelo teórico, entonces se somete al sistema a un conjunto de entradas conocidas y se miden sus salidas, obteniéndose así un modelo experimental, es decir se calcula el modelo a partir de las relaciones entrada-salida. Ningún modelo matemático puede representar al sistema con precisión, siempre involucra suposiciones y aproximaciones.

## **A. Procedimientos para la obtención de un modelo**

Aunque varían dependiendo del modelador, frecuentemente los pasos para obtener un modelo matemático son los mostrados a continuación:

1. Dibujar un diagrama esquemático del sistema y definir las variables de entrada y salida.
2. Utilizando leyes físicas, escribir ecuaciones para cada componente, combinándolas de acuerdo con el diagrama del sistema y obtener el modelo.
3. Para verificar la validez del modelo, la predicción del funcionamiento obtenida al resolver las ecuaciones del modelo se compara con los resultados experimentales (la validez del modelo se verifica mediante un experimento). Si el experimento se aleja de la predicción, se debe modificar el modelo y se repite el proceso.

## **B. Validación del modelo**

Una vez realizado el análisis teórico y el análisis experimental para obtener el modelo, es importante saber su coincidencia con el modelo teórico real. Para este caso existe la validación del modelo obtenido, empleando uno de los siguientes métodos:

- Analizar la respuesta del modelo (al escalón, al impulso, entre otros).
- Análisis de polos y ceros del sistema.
- Calcular determinadas relaciones estadísticas.
- Investigar las variaciones de aquellas magnitudes que sean especialmente sensibles a cambios en los parámetros del modelo.

### **2.2.8. Modelación cinemática**

La modelación de cualquier tipo de sistema permite determinar de manera factible el comportamiento del mismo ante diversas entradas. Para cada tipo de sistema existen diferentes métodos de modelación, es decir, para los sistemas lineales se puede obtener la función de transferencia, el modelado por punto de equilibrio y variable incremental, linealización de ecuaciones, simplificación de diagramas de

bloques, entre otros. Para el caso de sistemas no lineales existen maneras complejas de solucionar estos sistemas, por ejemplo, analizando el comportamiento desde la parte cinemática del sistema o la dinámica del mismo (Ordoñez, 2015).

### **2.2.8.1. Cinemática**

La cinemática es una rama de la física que se encarga de estudiar el movimiento de un cuerpo sin considerar las fuerzas o pares que lo causan, es decir, estudia las leyes de movimiento sin tener en cuenta aspectos de dinámica como: masas e inercias en un cuerpo. Está delimitada al estudio de la trayectoria que tiene un robot a lo largo del tiempo, considerando tan solo la posición, la velocidad, en algunas ocasiones la aceleración, en fin. La cinemática se trata de una descripción analítica del movimiento espacial de un robot como una función del tiempo.

En robótica, la cinemática consiste en estudiar el movimiento de un robot con respecto a un sistema de referencia que determina las relaciones entre la posición y orientación del punto operativo del robot (localización) y los valores de sus coordenadas articulares. (Ordoñez, 2015)

#### **A. Cinemática directa**

La cinemática directa son modelos matemáticos que permiten calcular la posición de eslabones de un robot a partir de sus componentes fijas y la configuración de las articulaciones. La cinemática directa es el uso de ecuaciones para determinar la posición del punto operativo en un robot a partir de los ángulos y/o desplazamientos de las articulaciones o de la posición y orientación de la base de un robot móvil a partir de las velocidades de las ruedas. Existen tipos de robots que disponen de modelos cinemáticos directos que permiten calcular la posición y orientación de determinados elementos del robot a partir de sus variables de actuación (Ollero, 2001).

#### **B. Cinemática inversa**

La cinemática inversa es el proceso adverso por el cual se obtienen modelos matemáticos que permiten, a partir de una posición específica del efector final, calcular la posición (ángulos) y/o desplazamientos de los actuadores. Es decir, determina el movimiento de un robot de tal manera que su efector final logra una tarea deseada, esto es conocido como planificación de movimientos. En general,

se puede encontrar configuraciones que no son factibles, es decir, que no son alcanzables, configuraciones singulares que requieren una dirección de movimiento no-holónoma o incluso soluciones múltiples, típicamente soluciones de codo arriba o codo abajo en los brazos robots articulados.

En la gran mayoría de problemas, la cinemática inversa emplea métodos aproximados para el cálculo de las variables de articulaciones, por ejemplo, a partir de la pseudo-inversa de la matriz Jacobiana (para el caso de un robot articulado con varios grados de libertad)

### **C. Matriz Jacobiana**

Es una matriz conformada por los derivados parciales de primer orden de una función. La aplicación de esta matriz permite aproximar linealmente a la función en un punto, en este caso representa la derivada de una función multi-variable. Dependiendo de la cinemática con que se esté trabajando, la matriz Jacobiana puede tener distinto significado:

**Matriz Jacobiana en cinemática directa:** permite conocer las velocidades del extremo operativo de un robot a partir de los valores de las velocidades de cada articulación.

**Matriz Jacobiana en cinemática inversa:** permite conocer las velocidades de cada articulación a partir de las velocidades del extremo operativo del robot (Ordoñez, 2015).

#### **2.2.8.2. Cinemática y animación**

Unas de las aplicaciones de la cinemática inversa se reflejan en la programación de juegos y animación en 3D, donde se utiliza para conectar físicamente los personajes del juego en relación al mundo, tales como recepción de pies firmemente en la parte superior del terreno. Una figura animada se modela con un esqueleto de segmentos rígidos conectados con las articulaciones, llamada cadena cinemática. Las ecuaciones cinemáticas definen la relación entre los ángulos de las articulaciones y su pose o configuración. El problema de la animación de cinemática directa es que utiliza las ecuaciones cinemáticas para determinar la postura dado los ángulos articulares. A diferencia, la cinemática inversa calcula los ángulos requeridos en cada articulación para alcanzar una posición deseada (Piziadas, 2017). Por ende, la cinemática inversa se utiliza en los sistemas de

diseño asistido por ordenador para animar y simular los ensamblajes basados en datos de posición. El conjunto se modela como eslabones rígidos conectados por articulaciones que se definen como compañeros o restricciones geométricas (Fig. 2.11) (Maraver, 2015).

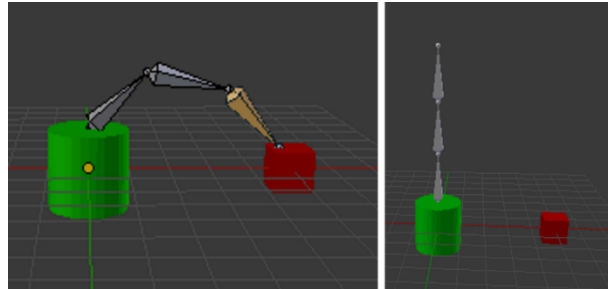


Fig. 2.9: Simulación del comportamiento de un brazo a través de su modelo matemático

**Fuente:** Animación: ¿Qué es la cinemática inversa? (Piziadas, 2017)

### 2.2.8.3. Modelación de sistemas de comunicación

Cuando el canal de comunicación no es un medio cableado, el modelo de atenuación y ruido es diferente al obtenido con medios guiados. Dada la complejidad al modelar la propagación de señales en el aire debido a la reflexión, distorsión o absorción producidas por los distintos ambientes de trabajo, se puede obtener un modelo simplificado que represente estas pérdidas. A través del desarrollo teórico y medidas de campo, un modelo simplificado se ajusta a la forma:

$$L(x) = L(x_0) \left( \frac{x}{x_0} \right)^\sigma$$

Siendo  $x_0$  una distancia de referencia donde la atenuación es  $L(x_0)$ .

Este modelo simplificado se ajusta a diversos ambientes mediante el ajuste de medidas en campo para determinar el  $\sigma$  más adecuado.

### 2.2.9. Simulación de sistemas

El desarrollo de nuevas tecnologías en el área de la computación ha traído innovaciones igualmente importantes en la toma de decisiones y el diseño de



procesos y productos. En este sentido una de las técnicas de mayor impacto es la simulación.

La simulación es una técnica experimental que permite la resolución de problemas, además de proporcionar datos teóricos de un sistema o un proceso en base a su modelo matemático. La simulación de un sistema es la representación analítica de sistemas apoyados en herramientas matemáticas y computacionales que permiten evaluar el impacto de cambios en diferentes variables, así como la elección de los recursos óptimos para el proceso analizado. La simulación se emplea cuando:

- No exista un sistema real, sea costoso, peligroso o sea imposible construir y/o manipular.
- Exista la necesidad de estudiar el pasado, presente y futuro de un sistema en tiempo real, expandido o contraído (control de sistemas en tiempo real, cámara lenta, crecimiento de poblaciones, efectos colaterales de fármacos, entre otros.)
- Exista un paradigma al analizar sistemas complejos. La idea es obtener una representación simplificada de algún aspecto de interés de la realidad.
- La modelación matemática del sistema es imposible (meteorología, sismología, conflictos internacionales, robótica, entre otros.)
- Los modelos matemáticos carecen de soluciones analíticas o numéricas (Ecuaciones diferenciales No lineales, problemas estocásticos, etc.)
- Cuando sea posible validar los modelos y sus soluciones de una forma satisfactoria.
- Cuando la precisión esperada por la simulación sea consistente con los requisitos de un problema concreto. (Sam, 2011)

#### **2.2.9.1. Características de simulación**

Basándose en distintas bibliografías, la simulación de sistemas puede definirse de las siguientes maneras:

- La simulación de sistemas no es una ciencia ni un arte, es una combinación de ambas.

- Forma experimental e iterativa de probar modelos o sistemas.
- Es costosa en términos de mano de obra y tiempo computacional.
- Proporciona soluciones sub óptimas.

El entorno de simulación de robots es una herramienta para simular y validar experimentalmente un control implementado en cualquier tipo de robot. Ya sea industrial o de servicio, la simulación es capaz de hacer las siguientes tareas:

- Configurar un entorno de simulación con un robot y sus piezas de trabajo.
- Crear y cubrir trayectorias
- Descomponer características de una pieza de CAD en una trayectoria.
- Simular el movimiento y la accesibilidad del robot.
- Exportar la trayectoria a un archivo del programa del robot.

Existen dos tipos de entornos de simulación, estos pueden ser 2D y 3D. En la mayoría de casos se emplea una simulación 3D para plataformas que tiene que ver con desplazamientos dentro de un espacio de trabajo amplio. Las simulaciones en entornos gráficos 2D sirven más para observar datos relevantes y más no observar desplazamientos de objetos, piezas, entre otras, cumpliendo en si con la tarea programada. En el mercado existen varias plataformas en las cuales se puede simular sistemas, algoritmos, movimiento de articulación, simulaciones robóticas o automatización de proceso, entre otras.

#### **2.2.9.2. Herramientas de simulación**

La simulación de sistemas complejos puede ayudar a entender mejor la operación del sistema, a detectar las variables más importantes que interactúan en la planta y a entender mejor las interrelaciones entre estas variables. La técnica de simulación puede ser utilizada para experimentar con nuevas situaciones, sobre las cuales tiene poca o ninguna información. A través de esta experimentación se puede anticipar mejor a posibles resultados no previstos.

A continuación, se mencionan los simuladores más conocidos que se pueden utilizar en robótica. Existen muchos tipos de ellos, unos sólo sirven para robots específicos, en otros pueden diseñarse todo tipo de robots, pueden ser más o

menos realistas, gratuitos o de pago, más sencillos o más difíciles de manejar para el usuario (Elena López, 2007)

### A. Player & Stage

Software de simulación gratuito que permite la investigación en robots y sistemas de sensores. Player, Stage son piezas de software que fueron desarrolladas originalmente en el laboratorio de robótica de investigación USC (University of South California, ahora están en SourceForge.net). Player es probablemente el más utilizado en el control de robots junto con sus generadores de simulación Stage y Gazebo. En gran parte se debe a que es publicado bajo la Licencia Pública General de GNU – licencia creada por Free Software Foundation, orientada principalmente a proteger la libre distribución, modificación y uso de software cuyo propósito es evitar los intentos de apropiación de los mismos- por lo cual el código completo de Player Stage Gazebo es libre de utilizar, distribuir y modificar.

**PLAYER:** Player es un interfaz para dispositivos robóticos. Pone a disposición de los usuarios unos mecanismos de transporte que permiten a los datos ser intercambiados entre los drivers y los programas de control que están siendo ejecutados en máquinas distintas. El método de transporte más común en uso hoy en día es un transporte cliente/servidor basado en sockets TCP. Dispone de varios simuladores que emulan un robot auténtico en entornos tanto de dos dimensiones como de tres dimensiones. (playerstage, 1998)

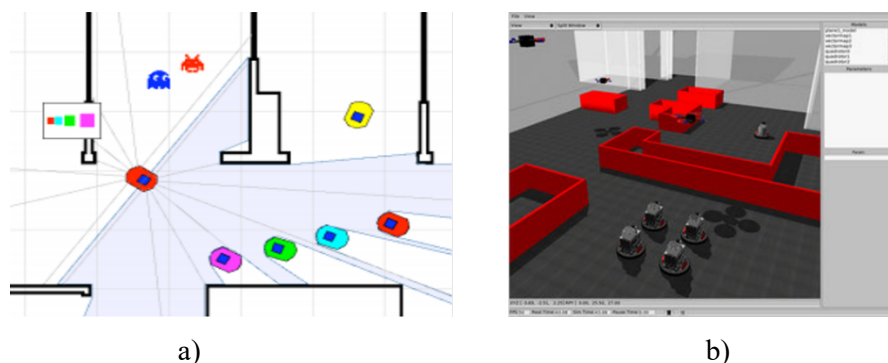


Fig. 2.10: Entornos de simulación: a) Simulación de posicionamiento, b) detección de obstáculos

**Fuente:** Player, Stage (Playerstage, 2017)

**STAGE:** Simula robots móviles en el plano bidimensional (también usado como biblioteca automática). Proporciona varios modelos de sensores y actuadores, incluyendo sensores del tipo sonar e infrarrojos. Stage ha sido diseñado para apoyar la investigación en sistemas autónomos de múltiples agentes, proporciona modelos sencillos de una gran cantidad de dispositivos simultáneamente en lugar de intentar emular cualquiera de ellos con gran fidelidad (Fig. 2.12). Además, se diseñó de manera suficientemente realista para permitir a los usuarios usar los mismos programas de control entre los robots de Stage (creados por el usuario en el programa) y los del mundo real, y a la vez que sea posible simular con velocidad suficiente grandes conjuntos de robots. (Vaughan, 2009)

## B. Microsoft Robotics Studio

Al ser una aplicación de Microsoft, los lenguajes que utiliza son los que desarrolla en sus propios entornos de desarrollo (Visual Studio). Los lenguajes con los que trabaja son C#, VB.NET, Microsoft Iron Python y otros lenguajes desarrollados por usuarios ajenos a la empresa basados en la arquitectura de servicios de Microsoft Robotics Studio.

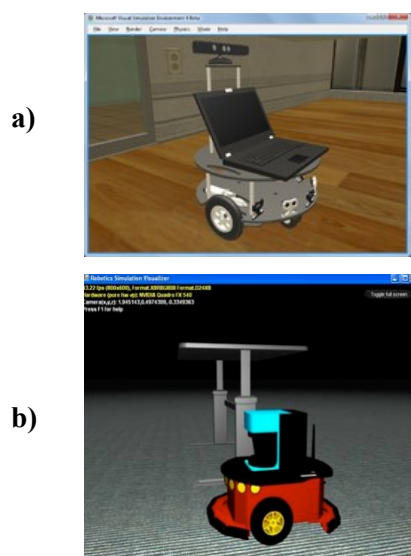


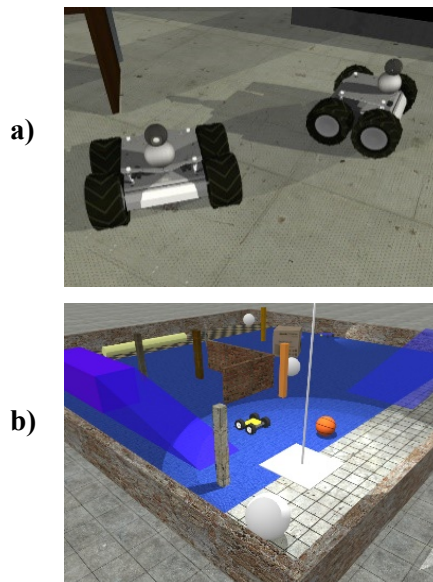
Fig. 2.11: Captura del simulador emulando un Pioneer3DX: a) Espacio cerrado, b) Espacio abierto

**Fuente:** Welcome to Robotics Developer Studio (Microsoft, 2017)

Para desarrollar aplicaciones robóticas, tanto simuladas como reales, Microsoft Robotics Studio incluye una aplicación llamada Microsoft Visual Programming Language (VPL). Se trata de un entorno de desarrollo basado en un modelo de flujo de datos gráfico. Este modelo resulta especialmente útil para programación distribuida. Al ser gráfico resulta más sencillo para programadores no expertos. El VPL permite crear programas con sólo arrastrar y soltar bloques que representan servicios, además, como se ha podido observar, incluye código de modelos genéricos de motores, sensores, algún modelo estándar de robot como el “Arcos Core” o varios modelos de “Lego”, etc. El VPL incorpora la tecnología “Concurrency and Coordination Runtime” (CCR) gracias a la cual se simplifica la escritura de programas para controlar sensores, motores, entre otros (Fig. 2.14) (Elena López, 2007).

### C. Marilou Robotics Studio

Marilou Robotics Studio (Fig. 2.15) es un entorno de modelado y simulación de robots móviles, humanoides, brazos articulados y robots paralelos que funciona teniendo en cuenta las condiciones del mundo real y respetando las leyes de la física.



c)



Fig. 2.12: Marilou Robotics Studio: a) Simulación de múltiples robots, b) Simulación de robots en entornos, c) simulación de un manipulador

**Fuente:** Simulating your robotics applications (AnyKode, 2017)

Este simulador permite diseñar escenarios complejos para crear y probar algoritmos sobre un modelo del robot bajo estudio sin tener que invertir en hardware y sin correr riesgos debidos a la realización de pruebas con el sistema real. Permite tanto la simulación en tiempo real como poder ajustar la velocidad obteniendo así una simulación acelerada o ralentizada según se necesite. Hay que destacar también que se consigue una reproducción muy fiel de la realidad. (Elena López, 2007)

#### **D. Matlab**

Matlab es una herramienta software no precisamente de simulación de robots. Usa un lenguaje de programación creado en 1970 para proporcionar un sencillo acceso al software de matrices LINPACK y EISPACK sin tener que usar Fortran. También tiene su propio compilador. Recientemente, los creadores de Matlab, Mathworks emprendieron una línea clara de ampliación de su mercado hacia la conexión de hardware con el PC, distribuyendo toolboxes para el control de tarjetas de adquisición, generación de código y emulación de DSPs, xPC (control remoto de PCs para operación en tiempo real), adquisición de imágenes, etc. Un grupo de ejemplos de simulación en Matlab son presentados en la Fig. 2.16 (Elena López, 2007).

Usando el simulador de Matlab, Simulink, el proceso de simulación se basa en realizar simulaciones interactivas de una duración determinada, tomando como respuestas del sistema el último resultado de este intervalo, además gracias a su

sistema computación se puede experimentar controladores con algoritmos complejos propuestos. Simulink nos da la posibilidad de estructurar nuestro sistema (Robot), en cuanto entradas, salidas, señales, motores, sensores y ver cómo se comportan y se realimentan sin tener que usar el hardware.

El simulador está programado con una estructura completamente modular la cual posibilita la realización de modificaciones y posibles ampliaciones. A la hora de tratamiento de datos y realización de algoritmos la herramienta Matlab es muy potente y nos puede ser muy útil en cualquiera de los aspectos en los que un robot haga uso de estos, con independencia de la simulación.

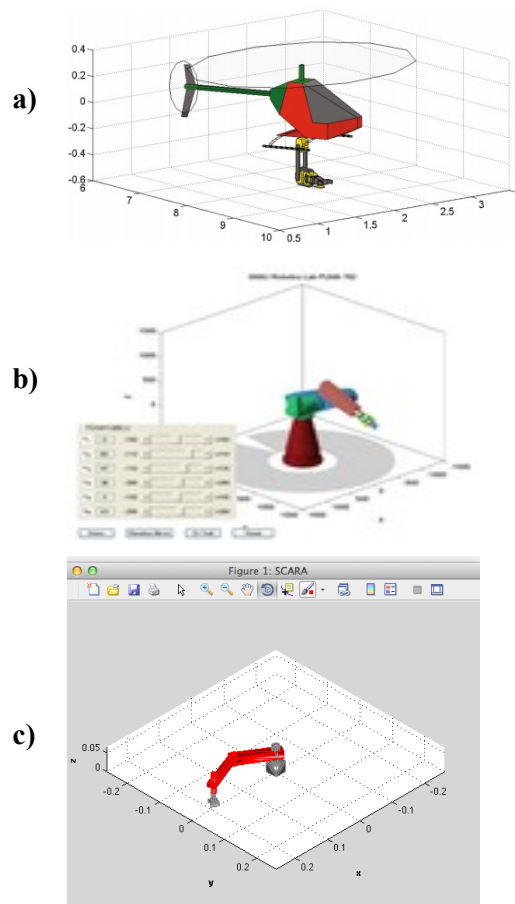


Fig. 2.13: Simulaciones 3D en Matlab: a) Helicóptero, b) manipulador con 2 DOF, c) Manipulador con 3 DOF

**Fuente:** Robotics and Autonomous Systems (Mathworks, 2017)

El problema del simulador de sistemas que nos proporciona Matlab es genérico, no está especializado en robot. La aplicación de Matlab en los robots móviles suele ser muy específica. Carece de una interfaz para simulación de estas aplicaciones limitado. Además, si queremos usar de la potencia algorítmica de Matlab para comunicar datos al robot hace falta de otros sistemas de captura de datos. (MathWorks, 2014).

### 2.2.10. Tele-robótica

La tele-robótica es un aspecto muy relevante de la robótica. Sin necesidad de que el operador se encuentre muy lejano al robot, los sistemas tele robóticos se encuentran por lo menos separados en dos sitios: el operador humano y todos los elementos necesarios que ayudan a la comunicación con el robot: joysticks, sensores, monitores, sistemas de comunicaciones y demás dispositivos de entrada/salida.

La primera idea o concepto al hablar de tele-robótica es relacionar a un robot con un controlador humano cerrando un lazo de control, donde las acciones de control son directamente tomadas por el operario humano, mientras que el robot ejecuta una tarea física en un área lejana que podría contener un escenario peligroso para el operador. En resumen, el controlador principal o cerebro del proceso está alejado del cuerpo ejecutor (Siciliano & Khatib, Handbook of Robotics, 2008).

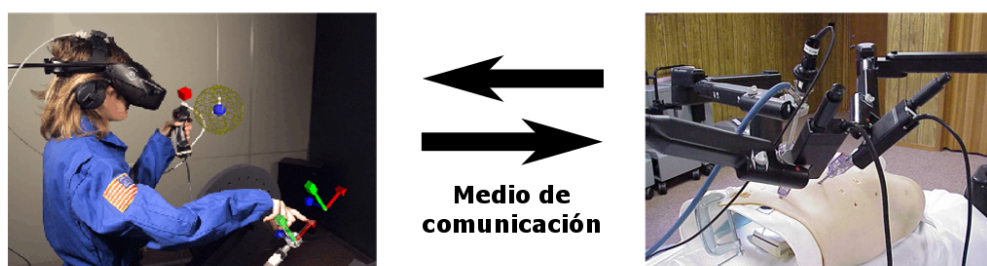


Fig. 2.14 Control tele-operado de un robot en medicina.

**Fuente:** Tele-robótica (Siciliano & Khatib, Handbook of Robotics, 2008)

El concepto de tele-robótica incluye el término tele, que describe la distancia existente entre el /controlador y el sistema controlado. Actualmente, tendencias y líneas de investigación de organismos como la NASA apuntan a usar la tele-



robótica en aplicaciones ambiciosas como telemedicina, donde los pacientes puedan estar en lugares tan alejados como plataformas petrolíferas en alta mar, otro continente o inclusive estaciones espaciales.

### 2.2.11. Tele-operación

La inclusión de un operario humano a un sistema robótico ubicado a distancia se muestra como una alternativa muy atractiva a la aplicación de cualquier tipo de robots en ambientes estructurados y no estructurados. En efecto, las aplicaciones para este tipo de configuraciones son diversas, desde enfoques en búsqueda y rescate, sistemas médicos y métodos de rehabilitación.

Aplicaciones como búsqueda, rescate, sistemas médicos, monitoreo de ambientes peligrosos, entre otros, pueden ser llevados a cabo solo con métodos de control a distancia. La ventaja de incluir un humano para tareas que no puedan ejecutar los robots a través de sus sensores se muestran atractivas en la operación de tareas en ambientes estructurados y no estructurados.

En la tele-operación, se tiene un robot que ejecuta tareas (robot esclavo) y otro que envía las señales para ejecutar dichas ejecuciones (robot maestro). Con el objetivo de proveer control directo y sin compensaciones, el robot esclavo puede ser programado para seguir los mismos movimientos generados por el robot maestro. En este aspecto, el robot maestro es controlado por el usuario, el cual puede ser un joystick, un teclado o algún otro mecanismo, incluso uno similar al robot ubicado en el entorno de trabajo final (Fig. 2.17).



Fig. 2.15 Tele-operación de robots

**Fuente:** Arquitectura de Control Bilateral (National Instruments, 2017)

Dependiendo de la aplicación, algunos sistemas maestro-esclavo proveen fuerzas de retroalimentación para proveer información del entorno al usuario ejecutor, por tanto, el robot maestro no solo permite inyectar velocidades al robot tele-operado sino también generar fuerzas hacia el usuario, obteniéndose un control bilateral (Emmanuel Nuño Ortega, 2004).

### **2.3. Hipótesis**

El análisis de la cinemática incluyendo los retardos de comunicación en el entorno de trabajo del robot permite obtener un modelo matemático equivalente del sistema y simularlo a través de un software de programación.

### **2.4. Señalamiento de variables de la hipótesis**

*Variable Independiente:* Modelación matemática y simulación

*Variable Dependiente:* Navegación autónoma y tele operada de un USV

## CAPITULO III

### METODOLOGÍA

#### 3.1. Enfoque de la Investigación

De acuerdo al tema investigado, el enfoque de investigación puede plantearse a través de los dos tipos de metodologías:

- *Investigación predominante cualitativa:* Ya que el trabajo investigativo se basa en el estudio de casos en un contexto.
- *Investigación predominante cuantitativa:* Debido a que el presente trabajo busca las causas y la explicación del proceso que se estudia, además de que está orientado a la comprobación de la hipótesis.

#### 3.2. Modalidad de la Investigación

##### 3.2.1. Investigación Bibliográfica – Documental

El trabajo se sustenta en la recolección de información provista por autores con temas investigativos similares. El entendimiento y el aporte que el investigador proveerá quedará adicionalmente plasmado sobre teoría que puede ser usada posteriormente.

#### 3.3. Niveles de Investigación

El nivel de investigación alcanzado será el explicativo, ya que se comprobarán las hipótesis hasta descubrir las causas y los efectos del problema. El estudio del modelo matemático y de la simulación será altamente estructurado para entender su comportamiento y generar nuevo conocimiento.

### **3.4. Población y muestra**

El análisis de poblaciones o muestras de poblaciones no es tomado en cuenta en este trabajo, ya que el enfoque esta direccionado a otro campo de investigación.

### 3.5. Operacionalización de variables

**Tabla 1-1: Variable Independiente:** Modelación matemática y simulación

Conceptualización	Dimensión	Indicador	Ítems Básicos	Técnica/ Instrumento
Modelación matemática es la descripción de un fenómeno real en términos matemáticos a través de sus parámetros de operación, la cual permite simular un sistema para conocer la respuesta a una entrada dada.	-Modelación matemática  -Simulación de sistemas físicos  -Parámetros usados para obtener un modelo matemático	Formas de obtener un modelo  Tipos de sistemas físicos  Parámetros necesarios para modelación  Maneras de validar un modelo	¿Cuáles son las maneras con las cuales se puede obtener un modelo matemático?  ¿Cuáles son los tipos de sistemas físicos?  ¿Qué parámetros son requeridos para obtener un modelo matemático equivalente del sistema?  ¿De qué manera se puede validar un modelo matemático?	Técnica: Documental    Instrumento: Ficha Bibliográfica

Elaborado por: Tomás Núñez

**Tabla 1-2: Variable dependiente: Navegación autónoma y tele operada de un USV**

Conceptualización	Dimensión	Indicador	Ítems Básicos	Técnica/ Instrumento
Es el conjunto de técnicas y procedimientos que permiten desarrollar tareas ya sea de manera automática, controlada de manera remota o una mezcla de ambas, basándose muchas de las veces en el modelo matemático equivalente del sistema.	-Navegación autónoma	Parámetros del entorno a simular	¿Cuáles son los parámetros que se deben tomar en cuenta antes de simular el entorno de trabajo?	Técnica: Observación
	-Navegación tele operada	Características del USV	¿Qué características tiene el vehículo submarino no tripulado simulado?	
		Modelación del USV y de la comunicación	¿Cuáles son los pasos para obtener el modelo matemático del USV y de la comunicación?	
	-Modelo matemático	Control autónomo	¿Cómo se determina un control autónomo?	Instrumento: Ficha bibliográfica
	Control tele operado	¿Cuáles son los requisitos para un control tele operado?		

Elaborado por: Tomás Núñez

### **3.6. Recolección de información**

Este trabajo se sustenta en la interpretación de toda la información actualizada de trabajos similares. Posterior a la primera recolección, la información adquirida necesita ser revisada y depurada. En caso de carencia de cierta bibliografía, una nueva recolección es necesaria para obtener una base teórica adecuada.

### **3.7. Procesamiento y análisis**

El estado del arte del trabajo servirá de base investigativa para desarrollar el presente proyecto. Una vez adquirida toda la información necesaria, la fundamentación matemática y de programación para elaborar la modelación y el simulador se estima estarán acorde a la resolución del problema. De esta manera, los resultados serán interpretados en base al marco teórico para contrastar con la hipótesis establecida. Las conclusiones y recomendaciones están ligadas directamente con los resultados y su análisis definirá si se han logrado o no los objetivos propuestos.

## CAPITULO IV

### ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

#### 4.1. Estudio de la Modelación matemática

##### 4.1.1. Representación de modelos matemáticos

**Pregunta directriz:** ¿Cuáles son las maneras con las cuales se puede obtener un modelo matemático?

Existen varios métodos de modelación que se pueden revisar en la bibliografía encontrada (Esfandiari & Lu, 2014), lo que resulta en formas de representar el modelo matemático encontrado. Así un modelo puede ser hallado y representado de las siguientes formas:

##### 4.1.1.1. Representación por la configuración

Este formato de modelación se deriva de las ecuaciones diferenciales obtenidas del análisis físico-matemático que expresan su comportamiento, el cual se describe mediante coordenada generalizadas necesarias para definir su comportamiento, entiéndase coordenadas generalizadas como el nuevo de estados vectoriales necesarios para describir su comportamiento.

En este método de expresión las ecuaciones tienen al lado izquierdo de la ecuación las variables con mayor grado de la ecuación diferencial y al lado derecho el resto de componentes de la ecuación diferencial. En la ecuación 4.1 se puede observar un ejemplo generalizados de la representación por la configuración del modelo.

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{q}_1 = f_1(q_1, q_2, \dots, q_n, \dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_n, t) \\ \ddot{q}_2 = f_2(q_1, q_2, \dots, q_n, \dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_n, t) \\ \vdots \\ \ddot{q}_n = f_n(q_1, q_2, \dots, q_n, \dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_n, t) \end{array} \right\} \quad (4.1)$$



#### 4.1.1.2. Representación en matrices de segundo orden

De forma general, los modelos dinámicos son sistema n dimensiones expresados en ecuaciones diferenciales de segundo orden, lo que permite agrupar matricialmente sus variables.

Para esta representación la ecuación matricial del modelo tiene a la derecha de la ecuación las causantes de la dinámica del sistema, mientras que a la izquierda se ubican los vectores de las variables de efectos con sus respectivas matrices. La ecuación 4.2 presenta el formato de un modelo matricial de segundo orden.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{f} \quad (4.2)$$

#### 4.1.1.3. Representación en espacios de estados

Aunque los modelos matemáticos en general se obtienen en ecuaciones diferenciales de segundo orden, existe un método de representación matricial de modelo generalizado de primer orden, que es la representación en espacios de estados, el cual se utiliza para analizar la dinámica de un sistema.

En esta representación se utiliza un sistema de ecuaciones matriciales, donde tenemos 4 matrices y se distinguen tres tipos de variables: las conocidas variables de estados ( $\mathbf{x}$ ) que incluyen todos los efectos de la dinámica del sistema e incluso algunas salidas del sistema; las entradas del sistema ( $\mathbf{u}$ ) que son los elementos que causan cambios en la dinámica; y las salidas de sistema ( $\mathbf{y}$ ). En la ecuación 4.3 se tiene la forma general para representar un modelo en espacios de estados.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (4.3)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{u}$$

#### 4.1.2. Modelado de vehículos submarinos

**Pregunta directriz:** ¿Cuáles son los pasos para obtener el modelo matemático del USV?

Resumiendo los contenidos revisados de la modelación de vehículos submarinos no tripulados (Moreno, 2013), se pueden identificar los siguientes elementos para su modelamiento:

#### 4.1.2.1. Sistema de referencia Inercial

Este sistema de referencia es conocido como global y generalmente se ubica en la superficie de la tierra. En el cual tenemos el eje X apuntando al Norte terrestre, el eje Y hacia el Este, y el eje Z indica hacia abajo. Es necesario considerar que el eje Z es ortogonal a la superficie terrestre y el plano XY es tangente a la misma superficie.

El origen de este sistema de referencia se lo ubica a conveniencia, y según la aplicación del modelo, para delimitar el espacio de trabajo del vehículo o robot submarino. En la figura 4.1 se puede observar la generalización del sistema de referencia inercial.

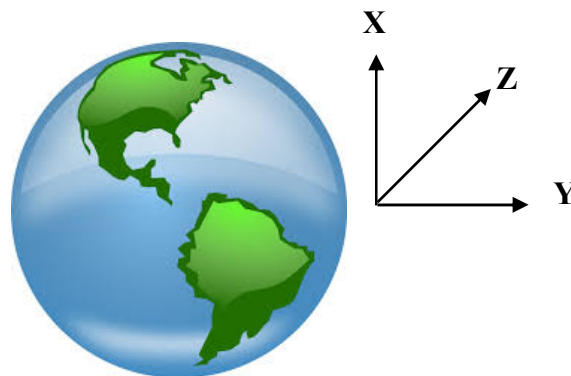


Fig. 4.1 Sistema de referencia inercial.

**Elaborado por:** Tomás Núñez

El sistema de referencia inercial se utiliza para expresar la ubicación lineal y angular del submarino, así como para determinar las posiciones de todos los elementos que conformen el sistema a controlar.

#### 4.1.2.2. Sistema de referencia local

Este sistema de referencia está fijo y ubicado en el robot submarino, en algún lugar a conveniencia del modelo, es útil para expresar sus velocidades lineales y angulares. En forma general se hace coincidir el origen del sistema de referencia local con el centro de gravedad o con el punto de control, donde se ubica un manipulador o cámara.

La dirección de los ejes de referencia debe coincidir con los del sistema inercial, para mayor comodidad el eje de longitud del submarino es el eje  $X'$  (de la cola a la frente); el eje  $X'$  es transversal (de un lado hacia el otro); y, el eje  $Z'$  hacia abajo. En la figura 4.2 se observa la ubicación del sistema de referencial local sobre la forma común del submarino.

Este sistema de referencia local generalmente sirve para expresar las velocidades lineales y angulares del submarino, así también, las fuerzas y torque que se producen respecto a este marco de referencia, de esta manera el posible analizar su comportamiento cinemático-dinámico y posicionarlo en el tiempo.

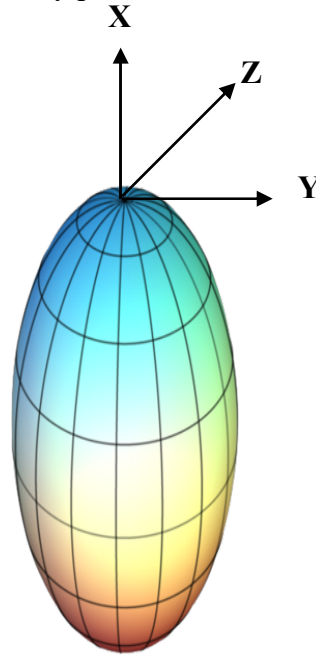


Fig. 4.2 Sistema de referencia local.

**Elaborado por:** Tomás Núñez

#### 4.1.2.3. Transformaciones por matrices de rotación

Las matrices de rotación son ampliamente utilizadas para describir el movimiento de un cuerpo en el espacio, pero, a nivel de modelación matemática, las matrices de rotación son aplicadas para realizar transformaciones lineales entre espacios vectoriales. Estas matrices se definen matemáticamente según las ecuaciones de 4.4, 4.5 y 4.6.

$$R_x(\theta_x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_x) & -\sin(\theta_x) \\ 0 & \sin(\theta_x) & \cos(\theta_x) \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$$R_y(\theta_y) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_y) & 0 & \sin(\theta_y) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta_y) & 0 & \cos(\theta_y) \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$R_z(\theta_z) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_z) & -\sin(\theta_z) & 0 \\ \sin(\theta_z) & \cos(\theta_z) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Recordemos que un submarino en movimiento posee un sistema de referencial local que se encuentra desplazado de forma lineal y angular respecto al sistema de referencia global o inercial. Por lo cual, una matriz de rotación que considere los grados de libertad del submarino puede describir esta transformación de variables. La figura 4.3 presenta las rotaciones respecto a los 3 ejes del sistema de referencia local.

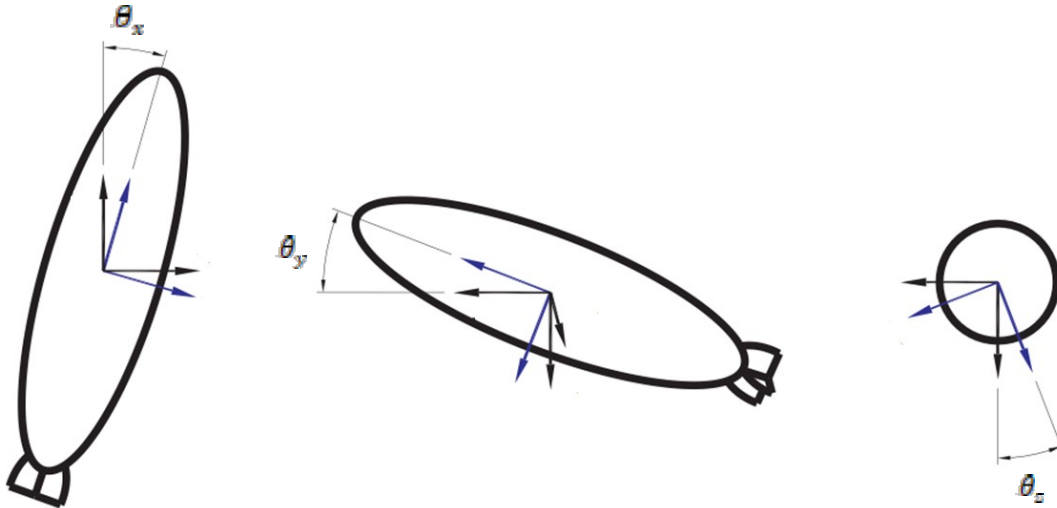


Fig. 4.3 Rotaciones de submarino respecto al sistema de referencia local

Fuente: (Moreno, 2013)

#### 4.1.2.4. Dinámica de un submarino

Una vez analizado los movimientos de submarino mediante un modelo cinemático, se requiere analizar las fuerzas que producen estos movimientos mediante un modelo dinámico. La dinámica de cuerpos sumergidos se puede representar en matrices de segundo orden, según la ecuación 4.7 desarrollada por (Fossen, 2002).

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} + (\mathbf{C} + \mathbf{D})\mathbf{v} + \mathbf{g} = \boldsymbol{\tau} + \mathbf{g}_o + \mathbf{w} \quad (4.7)$$

Donde cada matriz o vector contiene una parte del comportamiento dinámico de submarino, así:

$\mathbf{M}$ , es una matriz que interpreta la inercia y los efectos de masa añadida;

$\mathbf{C}$ , consiste en la matriz de fuerzas centrífugas<sup>1</sup> y fuerzas de coriolis<sup>2</sup>, tanto del submarino, como las fuerzas hidrodinámicas de masa añadida;

<sup>1</sup> Fuerzas generada por el movimiento de un cuerpo debido a la rotación en un sistema de referencia dado.

$D$ , es la matriz que contiene las fuerzas hidrodinámicas de viscosidad;

$g$ , es el vector que contiene las fuerzas de restitución que se compone de las acciones producidas por la fuerza gravitacional y la fuerza de flotación;

$g_c$ , es el vector de fuerza que realiza el control de lastre<sup>3</sup>, es decir, controlar los cambios de profundidad del submarino;

$w$ , son fuerzas externas que perturban la dinámica del submarino, pueden ser, olas o corrientes marinas.

$\tau$ , contiene las fuerzas generadoras de impulso para cada grado de libertad del robot, respecto al sistema de referencia inercial, pero se puede complementar con la ecuación 4.8.

$$\tau = Bu \tag{4.8}$$

Donde,

$u$ , contiene las fuerzas generadas por cada actuador impulsor, y

$B$ , es la matriz que interpreta la configuración de los impulsores.

A continuación se describe los elementos que conforman la dinámica de un submarino según el estudio de (Fossen, 2002):

### A. Fuerzas Inerciales

Son aquellas fuerzas descritas por la segunda ley de newton para cuerpos rígidos, estas fuerzas son el resultado de la aceleración y velocidad del submarino (sistema de referencia local) respecto al sistema de referencia inercial, se representan en la ecuación 4.9.

$$F_i = M_i v + C_i v \tag{4.9}$$

---

<sup>2</sup> Fuerza producida por el efecto que se presenta en un sistema de referencia en rotación cuando un cuerpo se encuentra en movimiento respecto de dicho sistema de referencia.

<sup>3</sup> Consiste en el *control* de nivelación y profundidad del submarino.

Con las matrices de la ecuaciones 4.10 y 4.11:

$$M_i = \begin{bmatrix} mI_3 & -mS(r_g^b) \\ mS(r_g^b) & I_0 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

$$C_i = \begin{bmatrix} O_3 & -S(M_{i11}v_1 + M_{i12}v_2) \\ -S(M_{i11}v_1 + M_{i12}v_2) & -S(M_{i21}v_1 + M_{i22}v_2) \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Donde,

$m$ , es la masa intrínseca del submarino,

$I_3$ , es una matriz identidad de 3x3,

$r_g^b$ , es la posición del sistema de referencia local respecto al centro de gravedad,

$I_0$ , es la matriz de momentos de inercia de la forma geométrica del submarino

$O_3$  es una matriz de ceros de 3x3,

$v_1$  y  $v_2$  son la velocidades lineales y angulares de submarino, respectivamente.

Además,  $S(\alpha)$  es el operador de la ecuación 4.12:

$$S(\alpha) = \begin{bmatrix} 0 & -\alpha_3 & \alpha_2 \\ \alpha_3 & 0 & -\alpha_1 \\ -\alpha_2 & \alpha_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

## B. Fuerzas de masa añadida

La masa añadida se entiende como la cantidad de fluido que se rodea el cuerpo sumergido, por lo cual estas fuerzas dependen de la aceleración de dicho fluido y también de su velocidad. Los valores de estas masas son bastante complejos y no existe método matemático exacto para determinarlas, por lo que únicamente se puede analizar su comportamiento a través de la medición. Sin embargo, existen aproximaciones matemáticas para describir estas masas añadidas, que dependen de la forma de objeto

sumergido, en general las matrices de masa añadida se presentan en las ecuaciones 4.13 y 4.14. (Moreno Avalos, 2013)

$$M_a = \begin{bmatrix} M_{a11} & M_{a12} \\ M_{a21} & M_{a22} \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

$$C_a = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_3 & -S(M_{a11}v_1 + M_{a12}v_2) \\ -S(M_{a11}v_1 + M_{a12}v_2) & -S(M_{a21}v_1 + M_{a22}v_2) \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Combinando las matrices de fuerzas inerciales y de masa añadida según se muestra en las ecuaciones 4.15 y 4.16, se obtiene las matrices la ecuación 4.7.

$$M = M_i + M_a \quad (4.15)$$

$$C = C_i + C_a \quad (4.16)$$

### C. Fuerzas viscosas

Son las fuerzas que resultan de la fricción producida entre el fluido viscoso y la superficie del cuerpo rígido sumergido, de manera semejante a las fuerzas de masa añadida tienen alta complejidad y solo se puede asegurar mediante experimentación, sin embargo, es posible obtener un modelo aproximado de la ecuación 4.17 de Morrison. (Moreno Avalos, 2013)

$$f = -\frac{1}{2}\rho_a C_D A |u|u \quad (4.17)$$

Donde,

$\rho_a$ , es la densidad del agua,

$C_D$ , es el coeficiente arrastre,

$A$ , es el área proyectada en la dirección de la velocidad  $u$ .

De manera ideal la matriz de viscosidad tendría la representación de la ecuación 4.18.

$$D = -\frac{1}{2}\rho_a \begin{bmatrix} C_{D11}A_{11}|v_1| & 0 \\ 0 & C_{D22}A_{22}|v_2| \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

#### D. Fuerzas de restitución

Las fuerzas de restitución son la combinación de fuerzas gravitacionales y fuerzas de flotación. Para determinar la fuerza de gravedad se utiliza el peso del submarino de la ecuación 4.19, y para la flotación del cuerpo sumergido se utiliza el peso del líquido desplazado de la ecuación 4.20.

$$W = mg \quad (4.19)$$

$$B = \rho_{\alpha} g V \quad (4.20)$$

Entonces se puede definir el vector de fuerzas de restitución usando las componentes vectoriales de estas fuerzas, ver la ecuación 4.21.

$$\mathbf{g} = \begin{bmatrix} (W - B)\sin(\theta_y) \\ -(W - B)\cos(\theta_y)\sin(\theta_x) \\ -(W - B)\cos(\theta_y)\cos(\theta_x) \\ -(r_{g2}W - r_{f2}B)\cos(\theta_y)\cos(\theta_x) + (r_{g3}W - r_{f3}B)\cos(\theta_y)\sin(\theta_x) \\ -(r_{g3}W - r_{f3}B)\sin(\theta_y) + (r_{g1}W - r_{f1}B)\cos(\theta_y)\cos(\theta_x) \\ -(r_{g1}W - r_{f1}B)\cos(\theta_y)\sin(\theta_x) - (r_{g2}W - r_{f2}B)\sin(\theta_y) \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

Donde,

$\mathbf{r}_g$ , es el vector de posición del centro de gravedad del submarino, y

$\mathbf{r}_f$ , es la posición del centro de flotación del objeto sumergido.

Para estabilizar el submarino en una posición es necesario conseguir equilibrar las fuerzas de restitución mediante el control de lastre, expresado en la ecuación 4.22, esto mantendría estable el objeto sumergido bajo el agua.

$$\mathbf{g} - \mathbf{g}_0 = \mathbf{0} \quad (4.22)$$

#### 4.1.3. Modelado de comunicación submarina

**Pregunta directriz:** ¿Cuáles son los pasos para obtener el modelo de la comunicación?

Es importante resaltar que este trabajo únicamente buscar el modelo de los retardos de comunicación producidos en el entorno submarino, más no la modelación integral de un sistema de comunicación, por lo cual se realiza un estudio de los factores que inciden en



la latencia de comunicación y se analiza una posible solución al modelo mediante herramientas estocásticas o probabilísticas.

Un elemento importante en la tele operación de vehículos submarino es la comunicación entre el sitio local y el sitio remoto. La transmisión y recepción de datos en el campo subacuático es bastante compleja, debido a las pérdidas y el ruido presente en el medio acuífero. Por ello los ROV's optan por utilizar el medio alámbrico para comunicarse con el robot, sin embargo, las tareas de exploración en sitio muy alejados de la superficie o demasiado profundos, exige el uso de tecnología inalámbrica, que permite realizar la transmisión de información en ambientes poco favorables.

Según (I. Akyildiz, 2005), el problema del canal inalámbrico de comunicación radica en las características físico-químicas del medio, la temperatura, salinidad, densidad, inestabilidad temporal y de espacio, por lo que la transmisión de datos acuática requiere considerar los siguientes factores básicos:

**Atenuación.-** se presenta por la conversión de ondas acústicas en calor y cuando existe dispersión espacial de la energía acústica.

**Ruido.-** generado por el ambiente, debido a mareas, corrientes, tormentas y causados por la fauna.

**Retardo de propagación.-** retardo que es muy alto (cien mil veces mayor que para ondas de radio terrestre) y reduce la capacidad de comunicación.

**Interferencia entre portadoras.-** es producida por el efecto Doppler, cuya compensación en los receptores multi-portadora se hace más compleja para dispersiones de frecuencia Doppler.

#### 4.1.3.1. Modelo estocástico

En cuanto al modelo de un canal de comunicación inalámbrica por medio acuático, este puede ser aproximado con un modelo estocástico de densidad de probabilidad, según (Vega, 2012) un modelo suficiente es el de Ricean Shadowed de canal acústico subacuático de variaciones lentas mediante densidad de probabilidad de la distribución gamma, el cual se presenta en la ecuación 4.23.

$$p_x(x_t) = \frac{1}{b^a \Gamma(a)} x_t^{a-1} e^{-\frac{x_t}{b}} \quad (4.23)$$

Complementado con las ecuaciones 4.24 y 4.25.

$$a = \frac{\bar{x}_t^2}{\sigma} \quad (4.24)$$

$$b = \frac{\sigma}{\bar{x}_t} \quad (4.25)$$

Donde,

$x_t$  es el retardo de la comunicación,

$\bar{x}_t$  es la media de latencia en el espacio de trabajo,

$\sigma$  es la desviación estándar de latencia,

$\Gamma(a)$  es la función gamma de  $a$ ;

y  $p_x$  es la densidad de probabilidad.

## 4.2. Estudio de la simulación de sistemas físicos

**Pregunta directriz:** ¿Cuáles son los tipos de sistemas físicos?

En este estudio es necesario resaltar cuales son los tipos de ambiente simulados en entornos virtuales y seleccionar una software de simulación que favorezca el desarrollo de la propuesta.

### 4.2.1. Tipos de sistemas físicos

En simulación de sistemas físicos podemos distinguir tres ambiente de mayor relevancia para analizar comportamientos cinemáticos y dinámicos, así tenemos:

- ✓ Sistemas terrestres
- ✓ Sistemas aéreos
- ✓ Sistemas acuáticos

#### 4.2.1.1. Sistemas acuáticos

Estos simuladores recrean ambientes acuáticos y subacuáticos; son utilizados para entrenamiento de personal de operación y mantenimiento, evitando riesgos en el ambiente real. Permiten simular el manejo de instrumentos como sonares, control de profundidad, timón,

potencia de motores y de periscopio. En la figura 4.6 se observa el simulador de submarino ADICTACSUB.



Fig. 4.4 Simulación de ambientes acuáticos

**Fuente:** (Lagar, 2012)

#### 4.2.2. Entornos de simulación de sistemas físicos

Para desarrollar el simulador del ambiente submarino es necesario definir el entorno de simulación a utilizar para crear los componentes virtuales, así tenemos, dos herramientas informáticas de relevancia para instalar este tipo de sistemas de simulación virtual:

##### 4.2.2.1. Gazebo

Gazebo es un simulador de múltiples robots para espacios abiertos (Figura. 4.7). Es capaz de simular conjuntos de robots, sensores y objetos, pero en un mundo tridimensional. Además, reproduce de forma bastante real la reacción de sensores y la interacción entre dispositivos, incluyendo el comportamiento físico de objetos rígidos. A diferencia de Stage, Gazebo simula el comportamiento de los conjuntos de robots pequeños (menos de 10) con alta fidelidad. Su sistema operativo nativo es Linux – ROS.

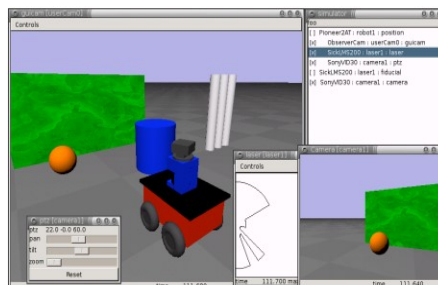


Fig. 4.5: Entorno de simulación de Gazebo

**Fuente:** Player, Stage and Gazebo (Playerstage, 2017)

#### 4.2.2.2. V-rep

Es un simulador de robots con entorno de desarrollo integrado, se basa en una arquitectura de control distribuido, es decir, cada modelo puede controlarse por separado a través de los siguientes métodos: código propio, un nodo ROS o BlueZero, un cliente remoto (API) o una aplicación personalizada. Esto hace que V-REP sea muy versátil y propicio para aplicaciones con varios robots. Dispone de varios modelos robóticos comerciales para simulación, ver figura 4.8. Los controladores se pueden escribir en C / C ++, Python, Java, Lua, Matlab u Octave. Permite su instalación en el sistema operativo Microsoft Windows, Linux, y Mac; y dispone una versión educativa completamente gratuita.

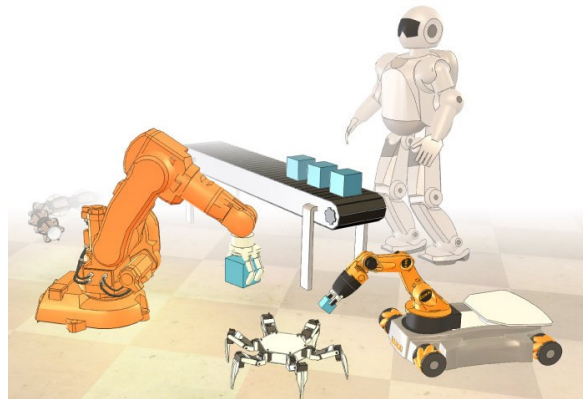


Fig. 4.6 Entorno de simulación de V-rep

**Fuente:** (Coppelia-Robotics, 2018)

#### 4.2.2.3. Comparación: Gazebo vs V-rep

Podemos destacar varias cosas de ambos simuladores, pero, un factor definitivo es la ventaja de V-rep de tener más experiencia en el sistema operativo Windows (sistema operativo manejado por el investigador), sin embargo, no es suficiente respaldo para descartar la otra opción.

Según un estudio realizado (Nogueira, 2014), V-REP es un simulador más intuitivo y fácil de usar, y con paquetes de mayor características. Mientras que Gazebo está más integrado en el marco ROS y es de código abierto, significa que permite un control completo sobre el simulador, pero necesita herramientas externas para alcanzar todas las funcionalidades de V-REP. Finalmente, Gazebo exige un hardware de mayores características computacionales que V-REP.

### **4.3. Estudio de la validación de un modelo**

#### **4.3.1. Parámetros de un modelo matemático**

**Pregunta directriz:** ¿Qué parámetros son requeridos para obtener un modelo matemático equivalente del sistema?

Un modelo matemático requiere los valores de todas las constantes y ganancias que lo conforman, por lo que se puede diferenciar estos parámetros según el modelo que lo requiere.

##### **4.3.1.1. Parámetros cinemáticos**

Estos parámetros están relacionados con la geometría del modelo y son generalmente distancias o longitudes de los eslabones o partes del sistema mecánico que conforman el sistema robótico, además, los modelos cinemáticos pueden requerir ángulos de desfase entre mecanismos, así como, condiciones iniciales necesarias para la evolución del simulador.

##### **4.3.1.2. Parámetros dinámicos**

Estos parámetros son más complejos que los parámetros cinemáticos, y están relacionados con la física del modelo, generalmente son masas, momentos de inercia, constantes físicas y de ganancia que conforman el sistema robótico, además, los modelos dinámicos pueden requerir fuerzas de constante o variables que impulsan el sistema, así como, condiciones iniciales necesarias para la evolución del simulador.

#### **4.3.2. Validación de un modelo matemático**

**Pregunta directriz:** ¿De qué manera se puede validar un modelo matemático?

Existen dos principales formas de evaluar un modelo matemático de robot, pero están limitados por los requerimientos y las características del sistema.

##### **4.3.2.1. Validación Experimental**

Es la forma más eficiente de validar un modelo y consiste en realizar pruebas reales con el sistema robótico modelado, para luego medir las variables de comportamiento y posteriormente comparar los resultados con el modelo obtenido.

El problema de la validación experimental radica en el hardware requerido, así como el ambiente de experimentación, en nuestro caso de experimentación submarina, es bastante difícil encontrar prototipos robóticos que permitan medir todas las variables

necesarias, y por otra parte el ambiente debe ser controlado para evitar fallos en el sistema.

#### **4.3.2.2. Validación simulada**

Todo modelo requiere ser validado por simulación, incluso cuando se tiene lo necesario para validar experimentalmente un modelo es necesario primero simular los resultados, consiste en realizar pruebas mediante un ambiente simulado y observa las posible respuesta obtenidas, y mediante análisis de las respuestas validar dicho modelo.

La ventaja de la validación simulada de modelos matemáticos es que son bastante eficientes, en nuestro caso de simulación submarina, es un problema de simulación poco desarrollado y tiene ejemplos en la comunidad científica, y por otra parte el ambiente requiere características especiales que deben ser controladas para una correcta simulación del sistema.

Matlab es una herramienta ampliamente utilizada para validar modelos y se ha hecho muy popular en la literatura científica, por lo que es una buena solución a la simulación de los modelos matemáticos a detallar en este trabajo.

### **4.4. Estudio de la navegación autónoma**

#### **4.4.1. Parámetros de simulación de un entorno**

**Pregunta directriz:** ¿Cuáles son los parámetros que se deben tomar en cuenta antes de simular el entorno de trabajo?

El entorno de trabajo de un simulador son todos los elementos que necesita el robot submarino para desenvolverse o funcionar, por esto el término implica componentes externos e internos, podemos resumir los parámetros de un entorno de simulación virtual en tres:

##### **4.4.1.1. Dispositivo de entrada**

El simulador requiere órdenes del operador para evaluar la tele operación del submarino, por lo es necesario un dispositivo de entrada que comande el robot, en una primera instancia este dispositivo puede ser el mouse o teclado del computador que aloja el simulador virtual, sin embargo, para efectos de realismo es necesario utilizar un dispositivo de mando o joystick, para lo que existe una gran variedad de equipos

comerciales en el mercado. La figura 4.9 muestra algunos dispositivos de control tipo joystick que pueden ser usados en el simulador.



Fig. 4.7 Tipos de Joystick

Fuente: (Universidad\_de\_Cádiz, 2011)

#### 4.4.1.2. Ambiente acuífero

El robot submarino necesita un espacio virtual de trabajo que sea realista y genere comodidad al operador de la simulación, por estas razones es importante construir un ambiente acuífero que incluya algunos detalles de un paisaje submarino agradable al operador, sin que esto implique pérdidas computacionales que servirían en el procesamiento de datos del objetivo principal del simulador.

Un elemento de relevancia en el espacio virtual de trabajo del robot submarino es el agua, por lo que es importante implementar efectos visuales que se asemejen a la presencia del agua en el ambiente acuífero de simulación.

#### 4.4.1.3. Dispositivo de visualización

Es el dispositivo visual de salida que permite monitorear los movimientos del vehículo submarino, está vinculado con las cámaras virtuales que se han implementado en el ambiente de simulación para captar los movimientos del robot y los detalles de la experiencia virtual.

Aunque un dispositivo especializado de visualización 3d ofrece una mayor experiencia en un simulador de tele operación, no es un elemento considerado de gran importancia para nuestro trabajo, además, exige equipos costosos, sin detallar los efectos en consumo computacional. Para observar los resultados de simulación en nuestro proyecto es suficiente un monitor display que muestre las imágenes al operador.

#### **4.4.2. Simulación de un vehículo submarino no tripulado**

**Pregunta directriz:** ¿Qué características tiene el vehículo submarino no tripulado simulado?

Un submarino virtual simulado en 3D debe imitar a un prototipo real, tanto en cuestiones visuales como en su comportamiento. Por ello requiere de sensores y actuadores que registren y modifiquen las variables de interés para sistema de control evaluado.

##### **4.4.2.1. Sensores virtuales**

El submarino virtual debe proveer a la estación de control todos los datos necesarios para cerrar el lazo de control y monitorear su estado de funcionamiento. En el simulador debe entregar toda su odometría, es decir, medir los datos de posición y velocidad del robot. Adicional, debe obtener los datos agentes externos, como son posibles colisiones, para corregir sus movimientos.

##### **4.4.2.2. Actuadores virtuales.**

Son los dispositivos que generan el movimiento en el submarino, pueden ser controlables tanto en velocidad como en torque, dependiendo de los requerimientos del controlador. En vehículos submarinos lo más común es usar motores de accionamiento eléctrico que están conectados a las hélices del impulsor, por lo que es necesario implementar las jerarquías de los mecanismos para su correcto funcionamiento.

#### **4.4.3. Control autónomo de un vehículo submarino no tripulado**

**Pregunta directriz:** ¿Cómo se determina un control autónomo?

En general los controladores autónomos de robots utilizan el modelo matemático para acoplar los movimientos y realizar tareas coordinadas. Esta técnica es utilizable cuando el modelo no es tan complejo ya requiere procesos matemáticos inversos. Por lo cual, analizaremos el método de la cinemática inversa, a continuación.

##### **4.4.3.1. Cinemática inversa**

El propósito de la cinemática inversa es encontrar los valores necesarios para lograr un objetivo específico de control, ya sea de posición o de velocidad. Matricialmente



hablando lo que se invierte es la matriz que contenga la transformación lineal de las variables de control. Así, un robot submarino necesita invertir las matrices de rotación que modelan su comportamiento cinemático para lograr que el vehículo subacuático logre sus objetivos de control.

A pesar de obtener los valores necesarios para realizar la tarea de control mediante la inversión de modelo, aún existen efectos no deseados propios de la dinámica del robot, para ello es necesario aplicar técnicas de corrección de error que aseguren el funcionamiento del sistema de control. Una técnica muy popular es el controlador PID que es una solución viable a la corrección de errores.

#### 4.4.3.2. Control PID

La técnica de corrección de errores mediante controladores Proporcional-Integral-Derivativo PID permite solucionar tres parámetros de repuesta de sistema de control, en la ecuación 4.26 se tiene el modelo general de un controlador PID. El elemento proporcional corrige el error de forma directa, reduciendo las acciones de control a medida que el error se acerca a cero; el componente integral acumula los errores obligando al sistema a actuar cuando los errores son muy pequeños y asegura un error de cero; y el elemento derivativo del error anticipa los excesos de acción en el control, evitando los sobre amortiguamientos en la respuesta del sistema.

$$PID = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad 4.26$$

### 4.5. Estudio de la navegación tele-operada

#### 4.5.1. Control tele-operado de un vehículo submarino no tripulado

**Pregunta directriz:** ¿Cuáles son los requisitos para un control tele operado?

La tele-operación de robot requiere tres componentes básicos, estos elementos garantizan el ciclo de operación remota y deben analizarse a detalle para distinguir sus características y rol en el sistema de control tele-operado.

##### 4.5.1.1. Sitio local

La estación local de control la conforma el operador humano, el dispositivo de mando, el dispositivo de visualización y el procesador de información local, en tele-operación

submarina estos elementos se localizan en la superficie terrestre y deben cumplir con las condiciones necesarias para que el operador realice su trabajo de manera correcta.

#### **4.5.1.2. Canal**

El canal de comunicación conecta entre sí al sitio local y al sitio remoto, permite la transmisión y recepción de información, y está conformada por los equipos de comunicación y el medio físico por el que se intercambia datos.

En canal de comunicación en medio subacuático es el agua, por lo que los equipos utilizados son especializados y de alto costo. En un simulador el canal está interpretado por un modelo estocástico de retardos entre la transmisión y recepción de información.

#### **4.5.1.3. Sitio remoto**

Es el lugar donde se encuentra el robot tele-operado, y se conforma por el robot físico con todos sus sensores y actuadores; y el procesador de datos ubicado dentro del vehículo submarino. En robots submarinos es bastante desfavorable el ambiente de trabajo, debido a que se encuentra sujeto a elevadas presiones y debe estar construido para soportar cualquier evento externo e interno.

En un simulador de tele-operación los sitios local y remoto se encuentran en el mismo procesador de información, y el sitio local es el entorno virtual donde se producen los eventos resultantes de los modelos de comportamiento.

### **4.6. Verificación de hipótesis**

Este trabajo requiere verificar la hipótesis mediante estudiar y determinar si existen los componentes científicos y técnicos para diseñar e implementar un simulador 3D para la navegación autónoma y el control remoto de un vehículo submarino, por lo cual se han revisado trabajos de investigación que analizan dichos componentes y son compatibles como el desarrollo de este proyecto.

Los elementos que demuestran la hipótesis: “El análisis de la cinemática incluyendo los retardos de comunicación en el entorno de trabajo del robot permite obtener un modelo matemático equivalente del sistema y simularlo a través de un software de programación”, se presentan a continuación:

- a) La cinemática de un vehículo submarino puede analizarse mediante matrices de rotación, que permiten modelar las velocidades del robot (sistema de referencia local) respecto al sistema de referencia global.
- b) Los retardos de comunicación para vehículos submarino pueden ser modelados mediante la densidad de probabilidad, estos es a través de una distribución gamma que determina la probabilidad mediante la media y la varianza de la latencia.
- c) El comportamiento del robot submarino puede analizarse mediante un simulador virtual en 3D, que incluya los modelos matemáticos inherentes a su respuesta cinemática y dinámica.

En definitiva el comportamiento de un robot submarino requiere un modelo matemático que interprete la respuesta de sus movimientos y considere el retardo de comunicación con la superficie, y es posible simular este comportamiento a través de un software programable de simulación.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. Conclusiones

- Es importante establecer el sistema de referencia inercial y el sistema de referencia local para expresar matemáticamente el comportamiento cinemático del robot mediante matrices de rotación.
- El modelo dinámico de un vehículo submarino puede representarse en matrices de segundo orden y permite conocer su comportamiento mediante fuerzas inerciales, hidrodinámicas y gravitacionales.
- Los retardos en comunicación inalámbrica de un canal submarino están sujetos a los factores de atenuación, retardo y efecto Doppler, y según estudios encontrados, su comportamiento puede aproximarse con un modelo estocástico probabilístico de distribución gamma.
- Un controlador de navegación autónoma para un robot submarino puede ser diseñado mediante la cinemática inversa y un controlador PID para corregir los errores dinámicos del sistema.
- El software de simulación robótico V-rep permite construir entornos virtuales de manera intuitiva, con altas prestaciones y bajo consumo computacional, además, permite realizar el código de programación en el software matemático Matlab y trabaja en el sistema operativo Windows.
- La respuesta del simulador 3D requiere manejar matrices de rotación, así como transformaciones inversas y varias operaciones matemáticas, por lo que es necesario un software matemático que realice estos cálculos.

- Para evaluar un sistema de control y tele-operación de un vehículo submarino se necesita implementar un simulador 3D, mediante la instalación de un sitio local, la programación de un canal de comunicación y la construcción de un entorno de simulación virtual.

## **5.2. Recomendaciones**

- Obtener el modelo cinemático y dinámico del vehículo submarino no tripulado considerando la características del robot.
- Realizar el diseño y la simulación del sistema de control para el robot submarino utilizando cinemática inversa y un controlador PID.
- Implementar el simulador 3D de un robot submarino no tripulado usando el software de simulación virtual V-rep.
- Para realizar los cálculos matemáticos de matrices y sus transformaciones se puede usar el software matemático Matlab.

## CAPÍTULO VI

### LA PROPUESTA

#### 6.1. Tema de la propuesta

IMPLEMENTACIÓN DE UN SIMULADOR 3D PARA LA NAVEGACIÓN AUTÓNOMA Y TELE OPERADA DE UN VEHÍCULO SUBMARINO NO TRIPULADO.

#### 6.2. Datos informativos

**Ejecutada por:** Ing. Tomás Núñez, tesista de la Maestría en Automatización y Sistemas de Control de la Universidad Técnica de Ambato.

**Beneficiarios:** Estudiantes afines a la Maestría en Automatización y Sistemas de Control de Universidad Técnica de Ambato.

**Ubicación:** Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, de la Universidad Técnica de Ambato.

#### **Responsables:**

- Ing. Tomás Núñez (Investigador)
- Ing. Patricio Encalda (Tutor)

**Tiempo de ejecución:** Marzo 2018 – Junio 2018

**Financiamiento:** Recursos propios del investigador.

#### 6.3. Antecedentes de la propuesta

Respecto a los antecedentes de este trabajo investigativo, se conocen pocos desarrollos relacionados al modelado y control de vehículos submarinos no tripulados, pero se puede destacar la tesis doctoral de Héctor Alonso Moreno Ávalos con el tema: “Modelado, Control y Diseño de Robots Submarinos de Estructura Paralela con

Impulsores Vectorizados” (Moreno, 2013), donde se estudia el robot submarino Remo2 de estructura paralela, partiendo de la modelación matemática que se utiliza para diversos esquemas de control, y se validan usando paquetes informático avanzados.

En cuanto a proyectos desarrollados en el ámbito local, no se registran propuestas de modelación y control autónomo de robots submarinos en el sector, y tampoco en la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, de la Universidad Técnica de Ambato.

#### **6.4. Justificación**

El creciente desarrollo investigativo a nivel mundial exige una constante evolución en el campo de la robótica, las bases de datos científicas están en constante expansión de información relacionada con el campo de los simuladores 3D y los sistemas de control, por lo que implementar este tipo de propuestas crea la oportunidad de ampliar las temáticas y generar productos valorados a nivel internacional.

En los últimos años, nuestro país ha tenido un gran crecimiento en la producción científica de todos los campos, es así, que el nivel investigativo de cada institución educativa se mide según sus productos científicos y de innovación, de esta manera, un proyecto que combina métodos matemáticos e informáticos para obtener un resultado terminado, es un aporte a las nuevas propuestas de desarrollo a nivel nacional.

Finalmente, la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, de la Universidad Técnica de Ambato está en constante mejora continua y en busca de la excelencia, por lo que el desarrollo de esta propuesta, incentiva a planteamientos similares y afines para continuar con nuevas investigaciones en el campo de la robótica.

#### **6.5. Objetivos**

##### **6.5.1. Objetivo General**

Implementar un simulador virtual 3D mediante el diseño de un controlador para la navegación autónoma a través de posiciones deseadas y la tele-operación considerando la latencia para un vehículo submarino no tripulado.

### **6.5.2. Objetivos Específicos**

- ✓ Deducir el modelo matemático de un vehículo submarino no tripulado mediante herramientas matemáticas para determinar su comportamiento de desplazamientos y comunicación en un área limitada de trabajo.
- ✓ Diseñar un controlador mediante sintonización PID para la navegación autónoma de un vehículo submarino no tripulado en trayectorias predeterminadas y tareas de tele operación.
- ✓ Construir el entorno de simulación 3D usando una herramienta informática que permita la navegación autónoma y tele operada de un vehículo submarino no tripulado.
- ✓ Experimentar en el simulador 3D implementado en tareas de navegación autónoma y tele operadas de un vehículo submarino no tripulado.

### **6.6. Análisis de factibilidad**

Esta propuesta tiene factibilidad de ejecución debida que existen los recursos técnicos, operativos y económicos para desarrollarlo.

#### **6.6.1. Factibilidad técnica**

Se poseen los conocimientos técnicos y científicos para implementar la presente propuesta, y existe la documentación necesaria para resolver cualquier inconveniente relacionado con el tema.

#### **6.6.2. Factibilidad Operativa**

Tenemos las herramientas matemáticas para evaluar los resultados y el paquete informático útil para realizar esta propuesta.

#### **6.6.3. Factibilidad Económica**

Esta propuesta requiere costos mínimos para su ejecución, por lo que el investigador autofinancia su implementación.



## 6.7. Fundamentación científico-técnica

### 6.7.1. Análisis Cinemático

Este trabajo de investigación requiere la navegación autónoma y tele-operada de un vehículo submarino no tripulado, lo que implica controlar las posiciones y velocidades del robot, es decir, se requiere un modelo cinemático que interprete dichas variables. Una solución a este inconveniente es obtener el modelo matemático diferencial, que se compone de las velocidades del sistema robótico y mediante un método de integración encontrar las posiciones del robot (Siciliano & Oussama, Handbook of Robotics, 2008).

El modelo cinemático diferencial está conformado por tres elementos:  $\dot{\mathbf{q}}$ , los estados de velocidades lineales y/o angulares del robot;  $\dot{\mathbf{h}}$ , los estados de velocidades lineales y/o angulares del sistema de referencia inercial (global); y  $\mathbf{J}$ , la matriz de transformación que relaciona los dos estados anteriores, conocida como matriz Jacobiana. La ecuación 6.1 muestra la expresión que los relaciona.

$$\dot{\mathbf{h}} = \mathbf{J}\dot{\mathbf{q}} \quad (6.1)$$

Este modelo permite obtener la posición de un robot en todo instante de tiempo, lo que es importante para simular sus movimientos a partir de las velocidades que experimenta el robot, pero para propósitos de control se necesita calcular la velocidades del robot a partir de las velocidad deseadas (navegación autónoma y operada remotamente), lo que puede encontrarse con la inversa de la cinemática, ecuación 6.2, para lo cual  $\mathbf{J}$  es una matriz invertible.

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}^{-1}\dot{\mathbf{h}} \quad (6.2)$$

### 6.7.2. Control de movimiento

El objetivo principal del control de movimientos coordinado es diseñar un controlador en lazo cerrado, de forma que las velocidades del robot  $\dot{\mathbf{q}}$  logren el movimiento deseado de  $\dot{\mathbf{h}}$ , por lo que el control del robot se logra modificando los estados de los actuadores del robot. El método de control coordinado implica que todas las velocidades del robot

se produzcan para un objetivo en común, esto se obtiene mediante la cinemática inversa, y podemos resumir este proceso en cuatro etapas:

- a) Calcular el error de las variables de interés o variables a controlar.
- b) Determinar la cinemática inversa de los valores a controlar
- c) Compensar los valores obtenidos en la cinemática diferencial mediante un controlador.
- d) Verificar la respuesta del robot.

La figura 6.1 presenta el diagrama de bloque de este procedimiento para el control de movimiento.

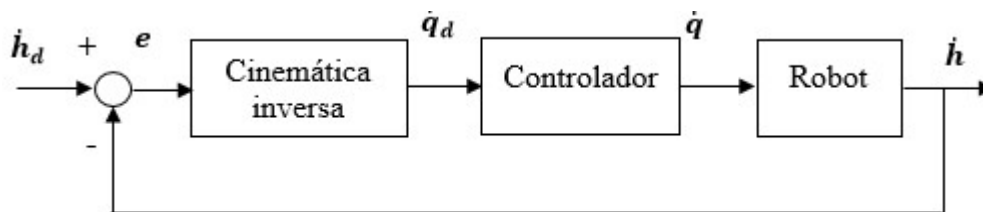


Fig. 6.1 Esquema general de control de movimiento

**Elaborado por:** Tomás Núñez

Si bien la cinemática inversa está definida por el modelo matemático del robot, el controlador tiene la difícil tarea de compensar lo requerimiento de velocidad para que el robot cumpla con el objetivo del sistema de control. Para ello se puede utilizar un controlador PID, el cual es ampliamente utilizado en la robótica y se ha demostrado su efectividad.

### 6.7.3. Sintonización PID

La cinemática inversa en un control de movimiento implica que el robot sigue perfectamente las velocidades necesarias para cumplir la tarea, sin embargo, debido a la dinámica del sistema esta no se cumple, obligando a utilizar métodos de compensación que corrigen este problema. Los controladores PID son reguladores dinámicos que están compuestos por tres elementos de compensación, estos se describen a continuación:

**Proporcional.** - realiza la compensación para que el estado actual de la variable a controlar alcance los valores deseado. Se obtiene mediante una constante proporcional  $K_p$  multiplicada por el error.

**Integral.** - esta compensación acumula la experiencia de los estados pasados, corrigiendo el error cuando no es corregido por el elemento proporcional. Se obtiene mediante una constante integral  $K_i$  multiplicada por la integral del error.

**Derivativa.** - Realiza la predicción de los estados en las variables deseadas, reflejando la información sobre las tendencias futuras y evitando excesos en las variables de control. Se obtiene mediante una constante derivativa  $K_d$  multiplicada por la derivada del error.

Sabiendo el propósito de los elementos de un controlador PID, es necesarios determinar un método para encontrar los valores de las contantes de compensación, para lo cual una solución eficiente es la sintonización, que requiere de aplicar reglas que logran los objetivos deseados. A continuación, se exponen las reglas de sintonización de un controlador PID usando el método de Ziegler y Nichols.

#### **6.7.3.1. Ziegler y Nichols**

El método de sintonización de Ziegler y Nichols permite determinar los valores de las ganancias proporcional, integral y derivativa de un PID utilizando dos posibles alternativas: A) Mediante la respuesta del sistema en lazo abierto, utilizada en sistemas estables en lazo abierto; B) Utilizando la respuesta del sistema en lazo cerrado, aplicable en sistemas con mayor dinámica en lazo abierto. De estos el más utilizado es el método de sintonización con la respuesta en lazo cerrado (Boiko, 2013).

#### **Sintonización en lazo cerrado**

Se basa en la ganancia crítica  $K_c$  y el tiempo de oscilación  $t_c$  de la señal de respuesta en lazo cerrado, donde únicamente se implementa un controlador Proporcional, que debe lograr mantener la respuesta en oscilación de periodo constante. Para lo cual  $K_c$  es la ganancia proporcional que genera esta respuesta y  $t_c$  es el tiempo de oscilación de la señal oscilante. En la figura 6.2 se observa la respuesta oscilante característica de la respuesta de sintonización.

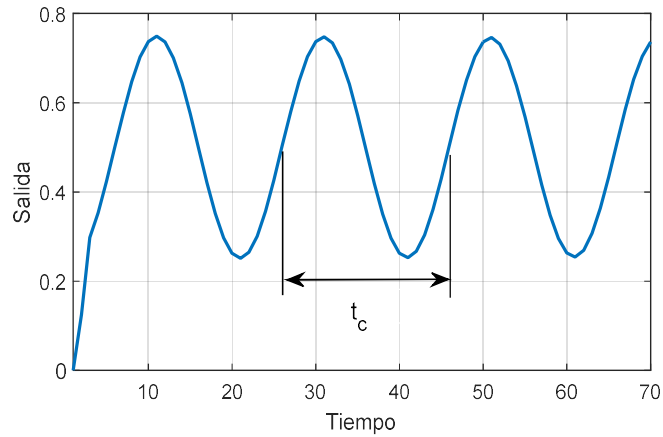


Fig. 6.2 Respuesta oscilante de un sistema en lazo cerrado.

**Elaborado por:** Tomás Núñez

Una vez hallados estos valores se procede a aplicar la tabla de sintonización, que permite encontrar las constantes del controlador por el método de sintonización de Ziegler y Nichols y según el tipo de compensación a utilizar.

### 6.8. Metodología

Se propone implementar el simulador para los dos sistemas de control: a) el sistema de navegación autónoma y, b) el sistema de tele-operación.

El esquema de la figura 6.3 presenta el modelo operativo del sistema de navegación autónoma, que requiere una planificación de la ruta a seguir mediante las posiciones de navegación que debe ser alcanzadas por el submarino, un controlador por cinemática inversa determina las velocidades que debería tener el robot, luego estas velocidades son reguladas por un controlador PID, la respuesta del sistema se obtiene por el modelo cinemático y dinámico del vehículo submarino, estos datos son enviados al entorno de simulación 3D para mostrar dichas respuestas, así mismo los estados del robot son retroalimentados a los controladores para cerrar el lazo de control.

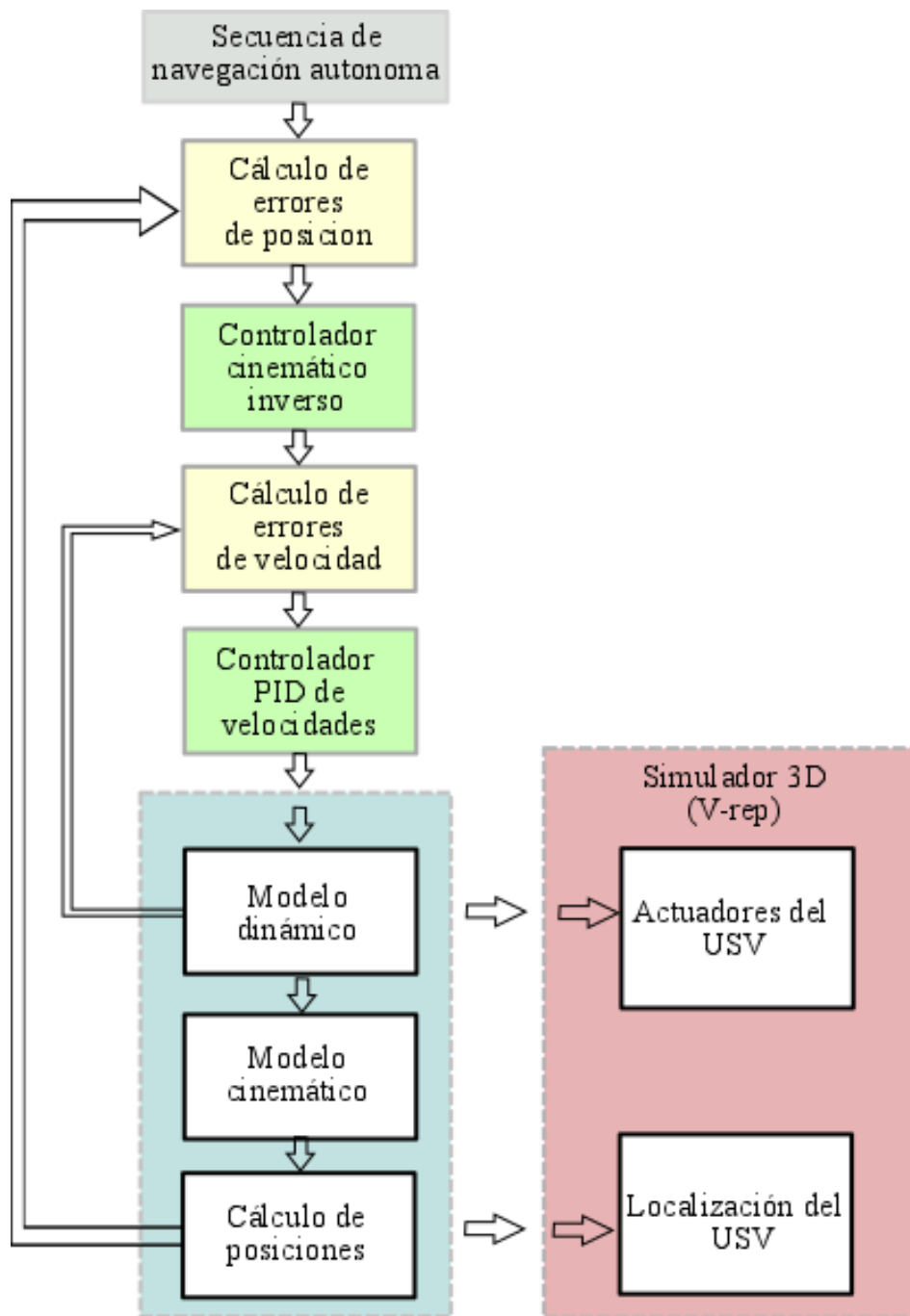


Fig. 6.3 Esquema de navegación autónoma

Elaborado por: Tomás Núñez

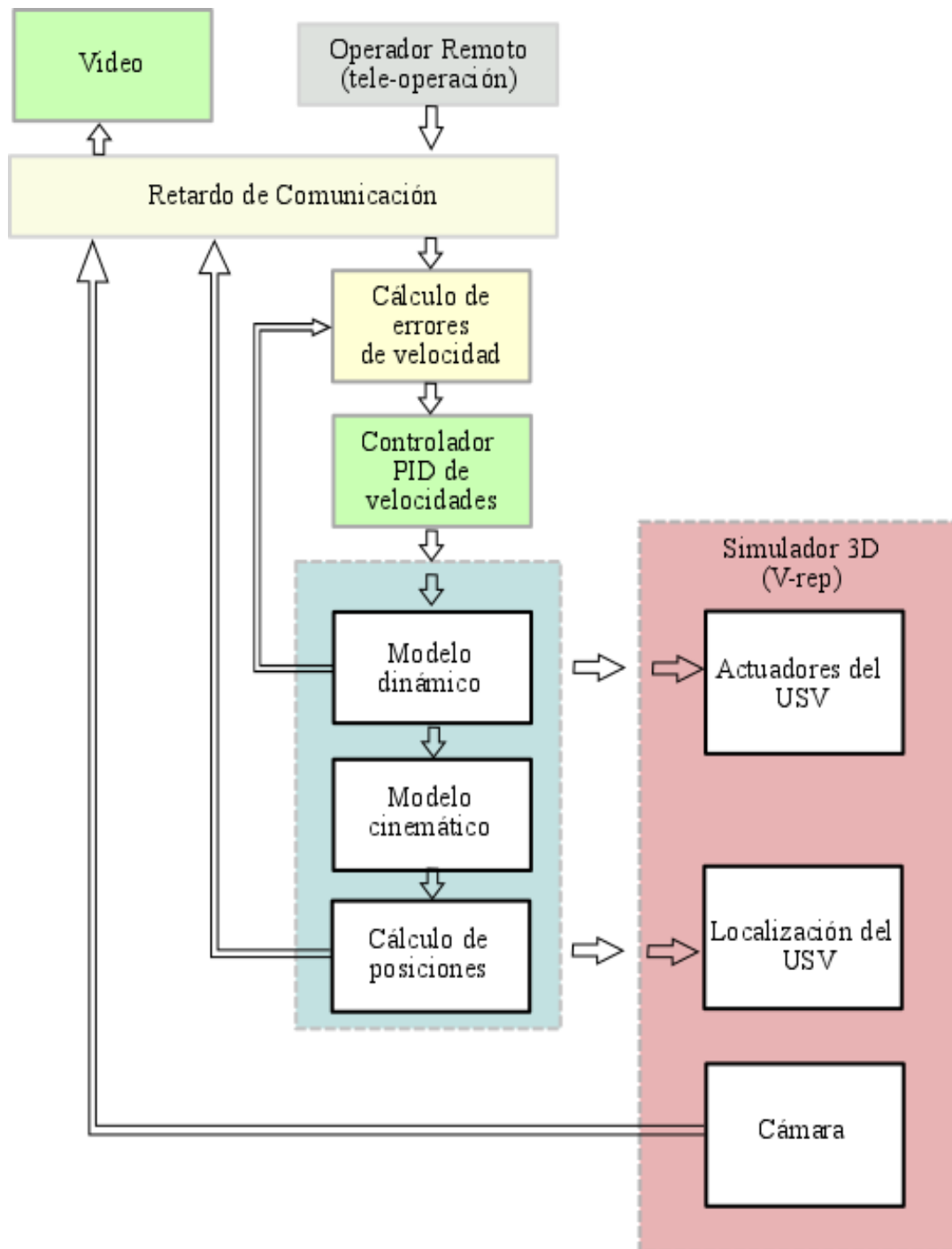


Fig. 6.4 Esquema de tele-operación

**Elaborado por: Tomás Núñez**

La figura 6.4 muestra el esquema de tele-operación de la propuesta, que permite al operador remoto generar las acciones de control, las cuales son enviadas mediante el medio de comunicación que se representa con retardos en el simulador; las órdenes de tele-operación se realizan mediante velocidades, estas velocidades son compensadas por un controlador PID que envía sus salidas a los modelos del submarino, las repuestas del

sistema se reproducen en el simulador virtual y se adquieren imágenes desde una cámara montada sobre el submarino, esta información junto con los estados del robot son transmitidos hacia el sitio local para cerrar el ciclo de tele-operación.

Los elementos que conforman los sistemas anteriormente mencionados, se describen a continuación:

### 6.8.1. Modelo matemático del submarino

#### 6.8.1.1. Modelo cinemático del submarino

Considerando un vehículo submarino como se muestra en la figura 6.5, para lo cual  $G$  es el sistema de referencial global o inercial y  $L$  es el sistema de referencial local, ubicado en la mitad de los impulsores. Se observa que el submarino posee dos impulsores acuáticos, lo que implica dos grados de libertad,  $v_1$  que es la velocidad lineal siendo neta cuando los dos impulsores generen la misma velocidad, y  $v_2$  que es la velocidad angular de giro para el submarino, la cual se genera cuando existe una diferencia de velocidades en los impulsores, muy similar a los robots móviles.

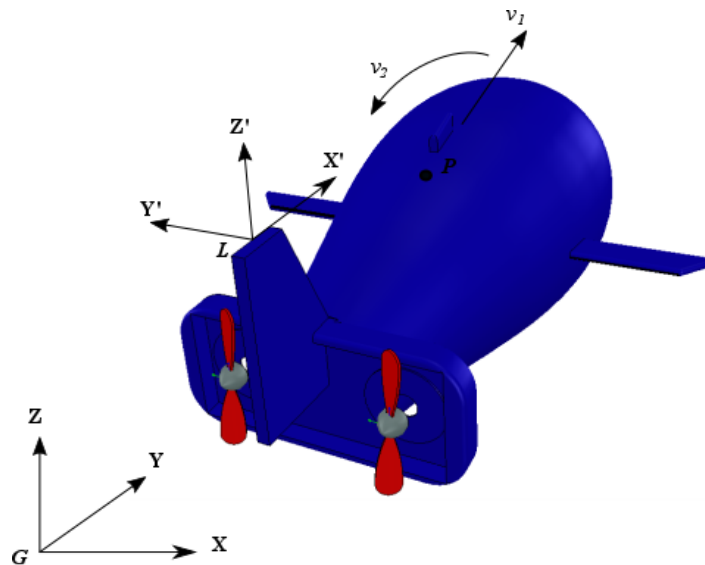


Fig. 6.5 Sistema de referencia del submarino.

Elaborado por: Tomás Núñez

Es común que este tipo de submarino no tenga velocidades lineales de control en el eje  $Z$  debido a que se puede manejar mediante el control de lastre, que se revisa en el análisis dinámico del submarino.

Definidos los grados de libertad del submarino propuesto, se tiene su plano XY de acción a una altura definida en el eje Z, podemos modelar la cinemática del submarino mediante matrices de rotación como se tienen en las matrices de las ecuaciones (4.4), requiriendo una matriz de rotación en el eje Z como se muestra en la ecuación (6.3).

$$\dot{\mathbf{P}}_G = \begin{bmatrix} \cos(\theta_z) & -\sin(\theta_z) & 0 \\ \sin(\theta_z) & \cos(\theta_z) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dot{\mathbf{P}}_L \quad (6.3)$$

Donde,

$\dot{\mathbf{P}}_G$  son las velocidades del submarino  $[\dot{P}_{Gx}; \dot{P}_{Gy}; \dot{P}_{Gz}]$  respecto al sistema de referencia global.

$\dot{\mathbf{P}}_L$  son las velocidades  $[\dot{P}_{Lx}; \dot{P}_{Ly}; \dot{P}_{Lz}]$  respecto al sistema de referencia local.

Complementario al modelo anterior se tiene las ecuaciones 6.4, 6.5 y 6.6.

$$\dot{\theta}_z = v_2 \quad (6.4)$$

$$\dot{P}_{Lx} = v_1 \quad (6.5)$$

$$\dot{P}_{Ly} = a v_2 \quad (6.6)$$

Además,  $\dot{P}_{Lz}$  no es una variable que se controla por velocidad,  $a$  es la distancia entre  $L$  y  $P$ , observable en la figura 6.10, con lo que se obtiene el modelo cinemático de la ecuación 6.7.

$$\begin{bmatrix} \dot{P}_{Gx} \\ \dot{P}_{Gy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_z) & -a \sin(\theta_z) \\ \sin(\theta_z) & a \cos(\theta_z) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (6.7)$$

## Simulación

Para simular el modelo de la ecuación (6.7) se implementan un programa en Matlab con tiempo de simulación de 45 segundos, el Anexo A presenta la programación del modelo cinemático que no considera las propiedades del agua, la figura 6.6 muestra los parámetros necesarios para la simular la cinemática, y la tabla 6-1 contiene los valores de dichos parámetros usados en la simulación.



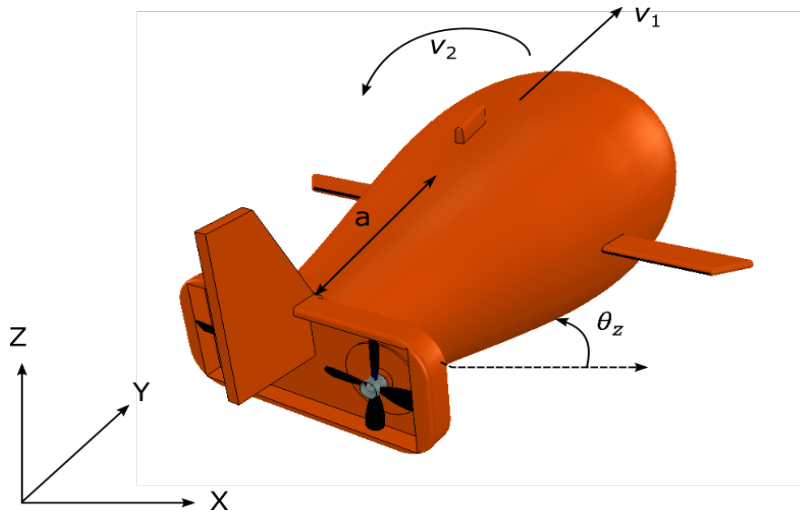


Fig. 6.6 Parámetros de simulación del modelo cinemático.

Elaborado por: Tomás Núñez

Tabla 6-1: Parámetros de simulación del modelo cinemático.

Condiciones iniciales		Velocidades		Dimensiones	
x	0 m	$v_1$	0.025 m/s	A	0.32 m
y	0 m	$v_2$	0.025 rad/s		
$\theta_z$	0 rad				

Elaborado por: Tomás Núñez

La figura 6.7 muestra la evolución del ángulo de submarino  $\theta_z$ , la figura 6.8 y 6.9 presentan las velocidades lineales  $\dot{P}_{Cx}$  y  $\dot{P}_{Cy}$ , respectivamente, resultantes del modelo cinemático simulado, además, la figura 6.10 permite observar el movimiento del submarino en el plano XY.

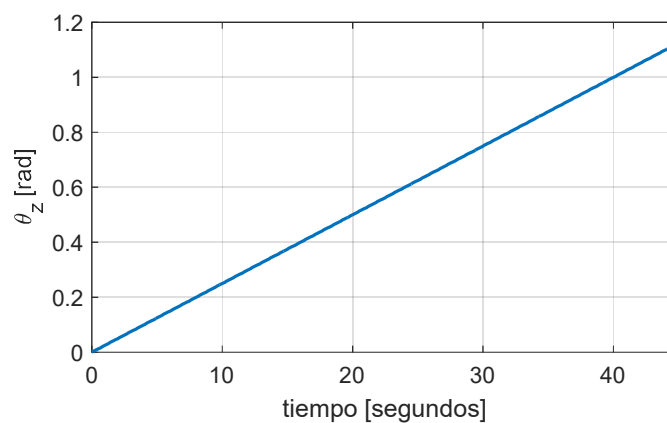


Fig. 6.7 Evolución cinemática el ángulo  $\theta_z$

Elaborado por: Tomás Núñez

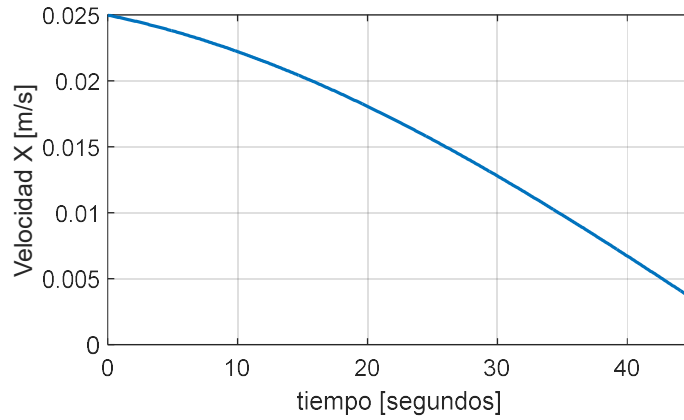


Fig. 6.8 Velocidad lineal  $\dot{P}_{Gx}$  del modelo cinemático

**Elaborado por: Tomás Núñez**

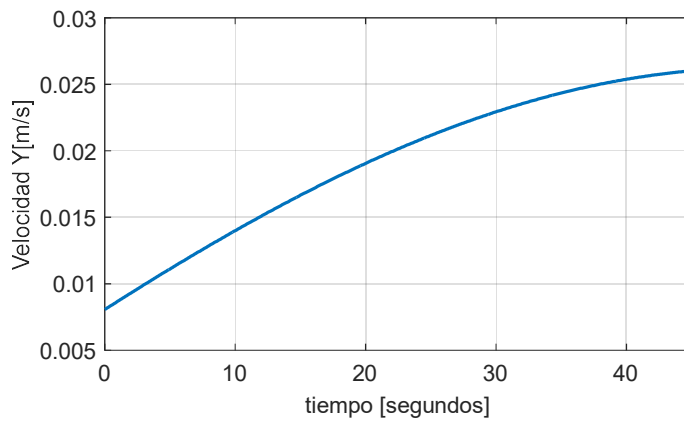


Fig. 6.9 Velocidad lineal  $\dot{P}_{Gy}$  del modelo cinemático

**Elaborado por: Tomás Núñez**

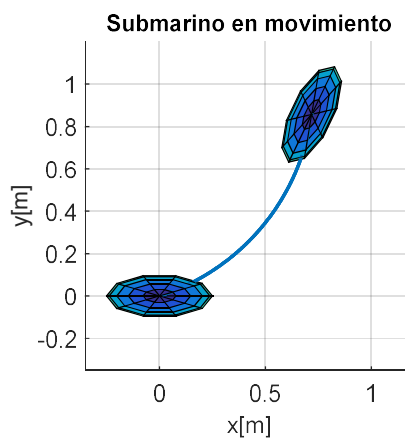


Fig. 6.10 Movimiento cinemático del submarino

**Elaborado por: Tomás Núñez**

### 6.8.1.2. Modelo dinámico del submarino

Para obtener el modelo dinámico se utiliza las ecuaciones determinadas por (Fossen, 2002) que fueron analizadas en el capítulo 4 sección 4.1.2.4, en la figura 6.11 se puede observar los parámetros dinámicos para el modelo.

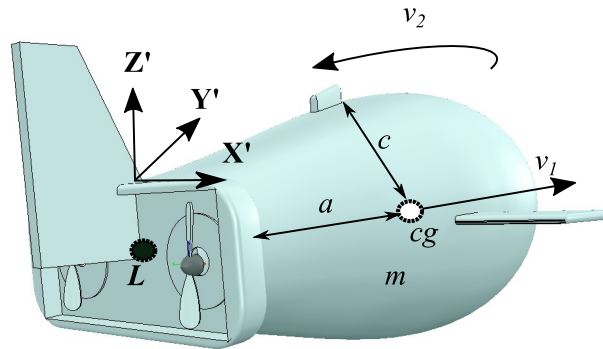


Fig. 6.11 Parámetros dinámicos del submarino

Elaborado por: Tomás Núñez

#### Fuerzas inerciales

Considerando la posición del centro de masa  $c_g$  respecto al sistema de referencia  $L$ , podemos encontrar la ecuación 6.8.

$$mS([a; 0; 0]) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -am \\ 0 & am & 0 \end{bmatrix} \quad (6.8)$$

Conociendo que la matriz de momento de inercia de un elipsoide es la ecuación 6.9.

$$I_Q = \begin{bmatrix} \frac{2m}{5} c^2 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{m}{5} (a^2 + c^2) & 0 \\ 0 & 0 & \frac{m}{5} (a^2 + c^2) \end{bmatrix} \quad (6.9)$$

Luego obtenemos la matriz de inercia de las fuerzas de inercia en la ecuación 6.10, la cual considera las restricciones de los grados de libertad del submarino.

$$M_i = \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & \frac{m}{5} (a^2 + c^2) \end{bmatrix} \quad (6.10)$$

Con  $M_i$  obtenemos la matriz centrífuga de las fuerzas de inercia en la ecuación 6.11.

$$C_i = \begin{bmatrix} 0 & -amv_2 \\ amv_2 & 0 \end{bmatrix} \quad (6.11)$$

### Fuerzas de masa añadida

Para obtener las matrices de masa añadida se utilizan las ecuaciones de masa añadida de un cuerpo sumergido descritas por (Moreno Avalos, 2013), donde se analiza la masa añadida de una esferoide prolato, que es la forma características de un submarino común.

Combinando el estudio de Moreno y las características de nuestro modelo se obtiene la matriz de inercia generadas por las fuerzas de masa añadida presentada en la ecuación 6.12.

$$M_a = \begin{bmatrix} -\frac{\alpha_0}{2-\alpha_0} m_s & 0 \\ 0 & -\frac{1}{8} \frac{(c^2-a^2)^2 (\alpha_0-B_0)}{2(c^2-a^2)+(c^2+a^2)(B_0-\alpha_0)} m_s \end{bmatrix} \quad (6.12)$$

Donde  $c$  es el radio de la sección transversal del submarino, que se puede observar en la figura 6.10.

La ecuación 6.12 se complementa con las ecuaciones 6.13, 6.14 y 6.15.

$$m_s = \frac{4}{3} \pi \rho a b^2 \quad (6.13)$$

$$\alpha_0 = \frac{2(1-e^2)}{e^3} \left( \frac{1}{2} \ln \left( \frac{1+e}{1-e} \right) - e \right) \quad (6.14)$$

$$B_0 = \frac{1}{e^2} - \frac{1-e^2}{2e^3} \ln \left( \frac{1+e}{1-e} \right) \quad (6.15)$$

Además,  $e$  es la excentricidad del esferoide prolato y se determina con la ecuación 6.16.

$$e = \sqrt{1 - \left( \frac{c}{a} \right)^2} \quad (6.16)$$

Con  $M_a$  determinamos que la matriz centrífuga de las fuerzas de masa añadida  $C_a$  no existe, debido a que su diagonal secundaria es cero.

Combinando las matrices de fuerzas inerciales y las matrices de masa añadida podemos obtener las matrices  $\mathbf{M}$  y  $\mathbf{C}$  de la dinámica del vehículo submarino, según se tiene en las ecuaciones de 6.17 y 6.18.

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m - \frac{m_0}{2 - \alpha_0} m_s & 0 \\ 0 & \frac{m}{5} (a^2 + c^2) - \frac{1}{5} \frac{(c^2 - a^2)^2 (\alpha_0 - \beta_0)}{2(c^2 - a^2) + (c^2 + a^2)(\beta_0 - \alpha_0)} m_s \end{bmatrix} \quad (6.17)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & -amv_2 \\ amv_2 & 0 \end{bmatrix} \quad (6.18)$$

### Fuerzas viscosas

En base al análisis de fuerzas viscosas de Morrison revisada en el capítulo 4 sección 4.1.2.4.C, podemos deducir la matriz de fuerzas viscosas, como se observa en la ecuación 6.19.

$$\mathbf{D} = \frac{1}{2} \rho C_D \begin{bmatrix} A_{v_1} |v_1| & 0 \\ 0 & A_{v_2} a^3 |v_2| \end{bmatrix} \quad (6.19)$$

Donde las áreas son determinadas según las ecuaciones 6.20 y 6.21.

$$A_{v_1} = \pi c^2 \quad (6.20)$$

$$A_{v_2} = \pi a c \quad (6.21)$$

### Modelo completo

Usando las ecuaciones 6.17, 6.18 y 6.19 que conforman el modelo dinámico, podemos obtener la expresión matricial de la ecuación 6.20 que representa la dinámica del robot submarino propuesto. Las fuerza y torque de  $\boldsymbol{\tau}$  es generada por los actuadores del submarino y  $\mathbf{w}$  son fuerzas de perturbaciones.

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}\mathbf{v} + \mathbf{D}\mathbf{v} = \boldsymbol{\tau} + \mathbf{w} \quad (6.20)$$

Donde,

$\mathbf{M}$ , contiene la matriz de fuerzas inerciales propias y de masa añadida del submarino.

$\mathbf{C}$ , contiene la matriz de fuerzas centrífugas del submarino.

$M$ , contiene la matriz de fuerzas viscosas del submarino.

$w$ , se compone de las perturbaciones.

$\tau$ , se compone de las fuerzas generadas por submarino.

$v$ , se compone de las velocidades del submarino.

$\dot{v}$ , se compone de las aceleraciones del submarino.

Para lo cual los vectores son los definidos en las ecuaciones 6.21, 6.22, 6.23 y 6.24.

$$\dot{v} = [\dot{v}_1; \dot{v}_2] \quad (6.21)$$

$$v = [v_1; v_2] \quad (6.22)$$

$$\tau = [f_{v_1}; \tau_{v_2}] \quad (6.23)$$

$$w = [w_{v_1}; w_{v_2}] \quad (6.24)$$

### Simulación

Para simular el modelo el modelo dinámico se realiza un programa en Matlab con tiempo de simulación de 45 segundos, ver el Anexo B. La figura 6.12 contiene los parámetros de simulación dinámica, y la tabla 6-2 contiene los datos de estos parámetros.

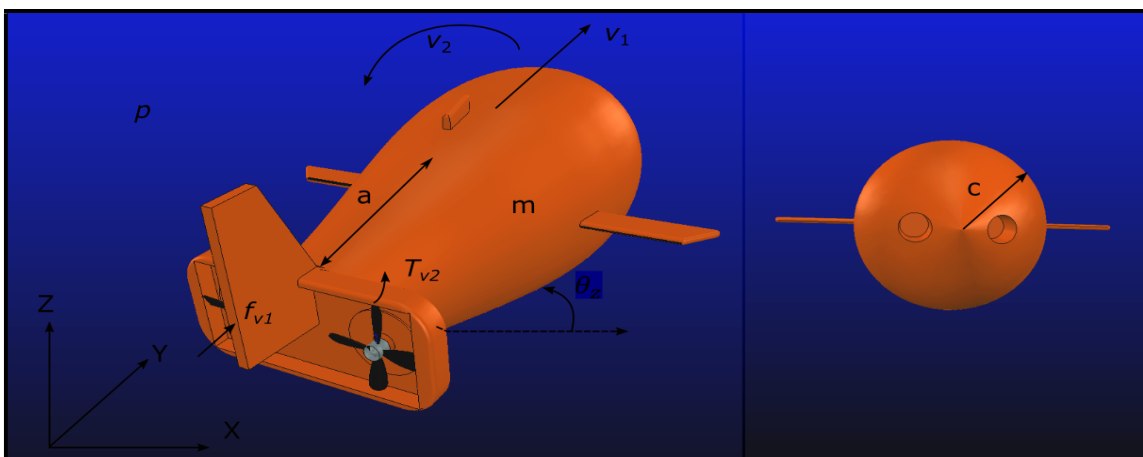


Fig. 6.12 Parámetros de simulación del modelo dinámico

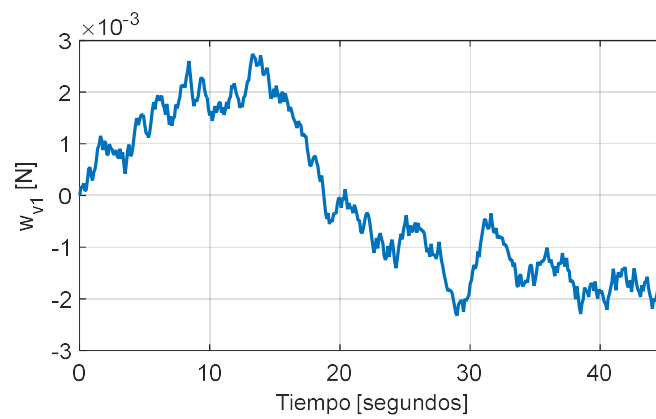
Elaborado por: Tomás Núñez

**Tabla 6-2:** Parámetros de simulación del modelo dinámico

Condiciones iniciales		Fuerzas		Constantes	
x	0 m	$f_{v_1}$	0.1 N	a	0.32 m
y	0 m	$\tau_{v_2}$	0.025 N.m	c	0.15 m
$\theta_z$	0 rad			m	30 Kgr
$v_1$	0 m/s			$\rho$	1027 $\frac{\text{Kgr}}{\text{m}^3}$
$v_2$	0 rad/s			$C_d$	0.42

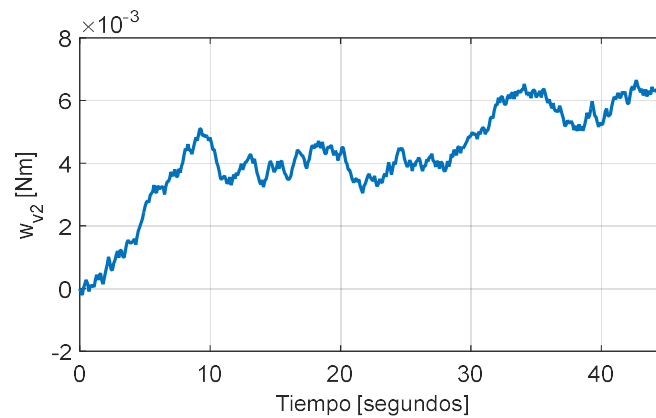
**Elaborado por:** Tomás Núñez

La simulación incluye las perturbaciones  $w_{v1}$  y  $w_{v2}$  mediante valores randomicos presentados en la figura 6.13 y 6.14, respectivamente.



**Fig. 6.13** Perturbación randomica  $w_{v1}$

**Elaborado por:** Tomás Núñez



**Fig. 6.14** Perturbación randomica  $w_{v2}$

**Elaborado por:** Tomás Núñez

Las figuras 6.15 y 6.16 presentan las aceleraciones para las velocidades del submarino  $a_{v_1}$  y  $a_{v_2}$ , respectivamente, las figuras 6.17 y 6.18 muestran la evolución dinámica de las velocidades del submarino  $v_1$  y  $v_2$ , respectivamente, las figuras 6.19 y 6.20 presentan las velocidades  $\dot{P}_{Gx}$  y  $\dot{P}_{Gy}$ , respecto al sistema referencial global, respectivamente. Además, la figura 6.21 muestra la evolución del ángulo de submarino  $\theta_x$  y la figura 6.22 permite observar el movimiento del submarino en el plano XY.

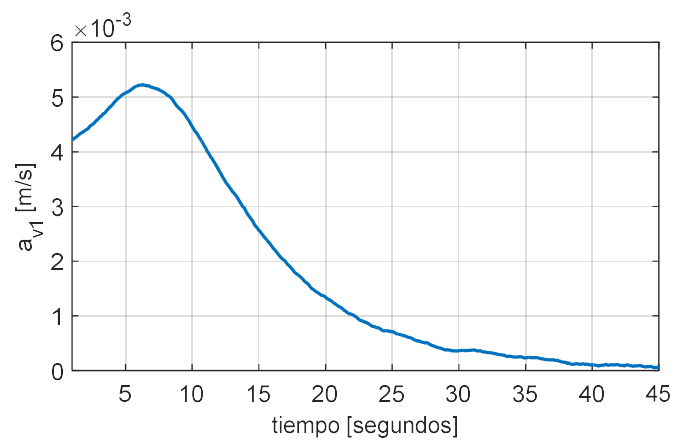


Fig. 6.15 Aceleración del submarino  $a_{v_1}$

**Elaborado por:** Tomás Núñez

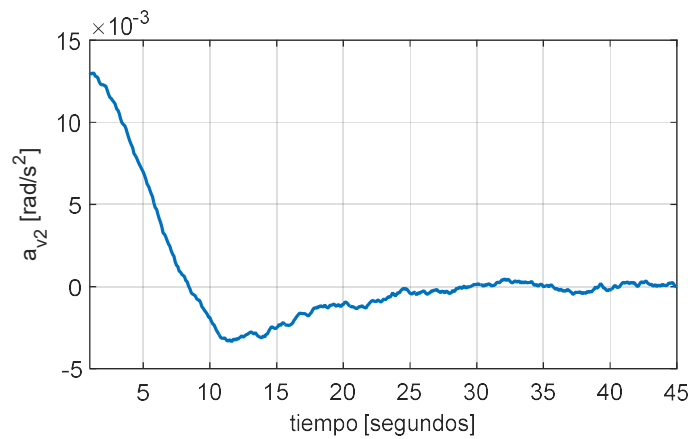


Fig. 6.16 Aceleración del submarino  $a_{v_2}$

**Elaborado por:** Tomás Núñez



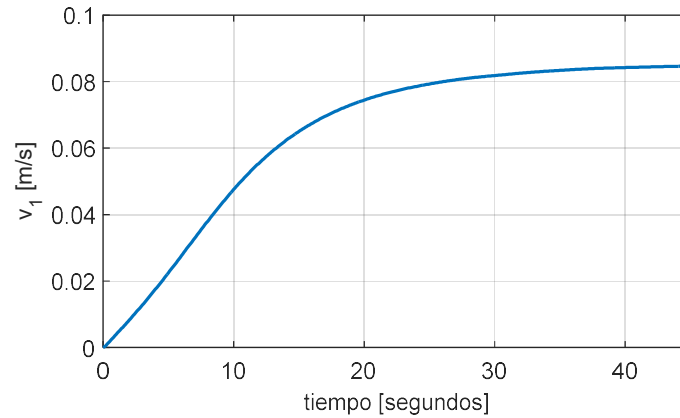


Fig. 6.17 Evolución de la velocidad  $v_1$  del modelo dinámico.

**Elaborado por:** Tomás Núñez

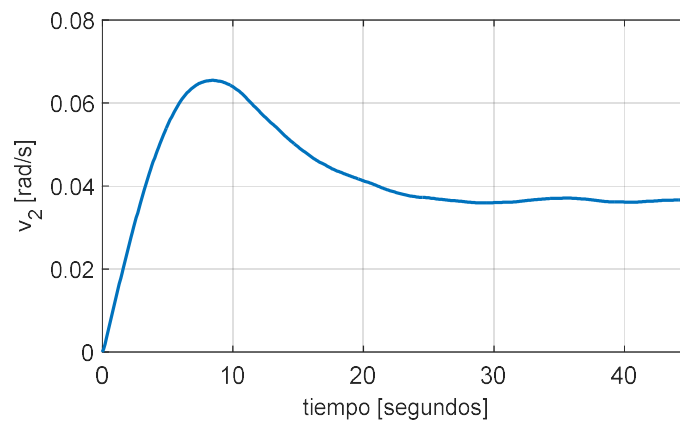


Fig. 6.18 Evolución de la velocidad  $v_2$  del modelo dinámico.

**Elaborado por:** Tomás Núñez

La figura 6.17 muestra la respuesta de la velocidad lineal del submarino, donde se observa una respuesta suave debido al amortiguamiento de la viscosidad de agua, y la figura 6.18 presenta la respuesta de la velocidad angular del submarino, la cual indica un sobre amortiguamiento sin oscilación significativa, lo que implica una respuesta que necesita una compensación que regule este comportamiento.

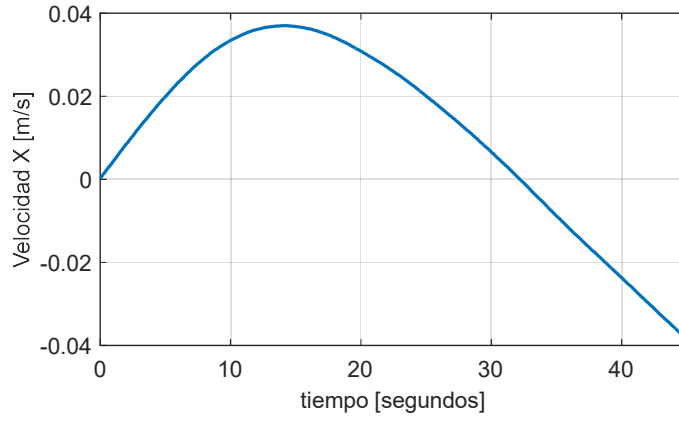


Fig. 6.19 Velocidad lineal  $\dot{P}_{Gx}$  del modelo dinámico

**Elaborado por:** Tomás Núñez

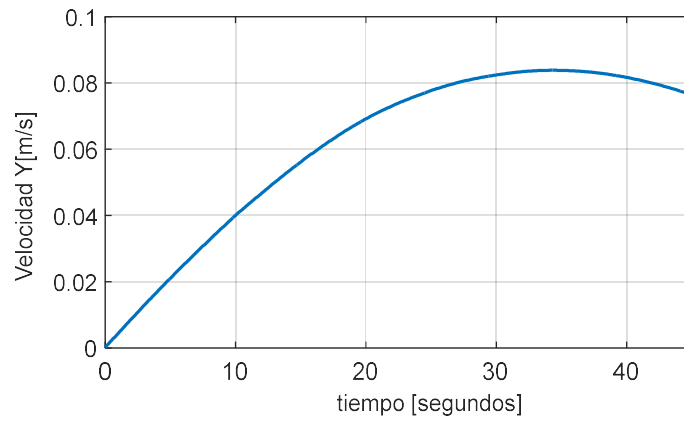


Fig. 6.20 Velocidad lineal  $\dot{P}_{Gy}$  del modelo dinámico

**Elaborado por:** Tomás Núñez

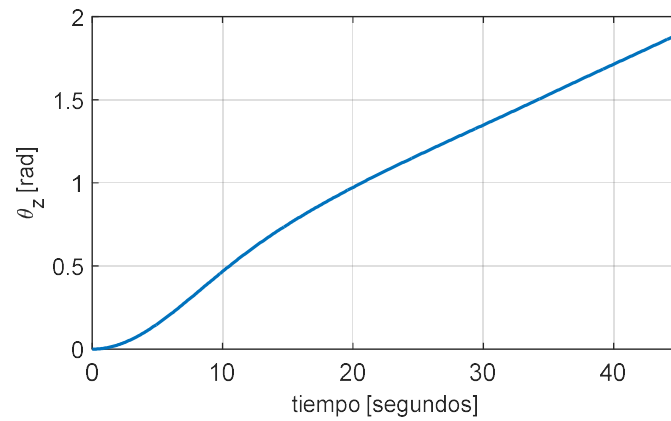


Fig. 6.21 Evolución del ángulo  $\theta_z$  del modelo dinámico.

**Elaborado por:** Tomás Núñez

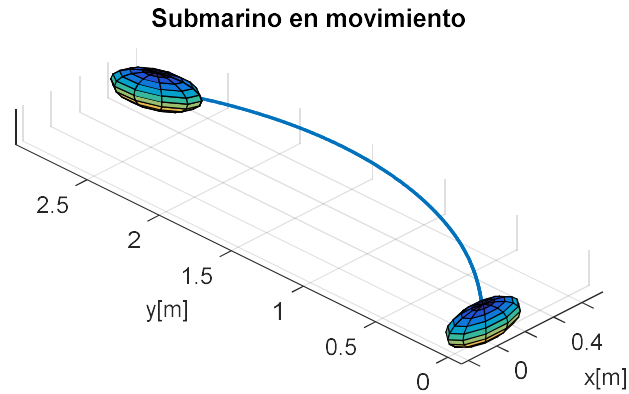


Fig. 6.22 Movimiento de submarino debido a la respuesta dinámica

Elaborado por: Tomás Núñez

### Fuerzas de restitución

Considerando ideal el comportamiento de la diferencia de fuerzas de restitución, además, si ubicamos en la misma posición el centro de gravedad y el centro de flotación, podemos expresar el vector de gravedad como se muestra en la ecuación 6.25.

$$g = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ B - W_0 \end{bmatrix} \quad (6.25)$$

Donde,  $W_0$  es el peso inicial del submarino, el cual es compensado mediante el control de lastre.

Complementario al modelo dinámico de 6.13 se tiene la expresión escalar 6.26 que considera las fuerzas de restitución de la expresión 6.14, que se compone de la aceleración vertical  $a_z$ , el coeficiente de arrastre en  $C_{D_z}$ , el área  $A_{v_z}$  proyectada en la dirección de la velocidad  $v_z$ , la fuerza de empuje vertical  $f_z$ , el control de lastre  $g_0$  y las perturbaciones en profundidad  $w_z$ . De estos elementos se utiliza  $g_0$  para manipular la posición de altura del submarino.

$$a_z m + \frac{1}{2} \rho C_{D_z} A_{v_z} |v_z| v_z + (W_0 - B) = f_z + g_0 + w_z \quad (6.26)$$

### Simulación

Para simular el modelo dinámico correspondiente a la respuesta vertical del submarino se realiza un programa en Matlab con un tiempo de simulación de 5 segundos debido a

que la velocidad se estabiliza luego de periodo, ver el Anexo C, la figura 6.23 presenta los parámetros para la simulación de la dinámica de restitución y la tabla 6-3 contiene los valores de condiciones iniciales, fuerzas y constantes de la simulación.

No existe la fuerza  $f_z$  debido a la ausencia de actuantes para generar fuerzas verticales en el submarino, con lo que se anula este componente de modelo y la dinámica de restitución depende únicamente de las fuerzas de flotación, peso y fuerzas viscosas que desestabilizan el objeto sumergido.

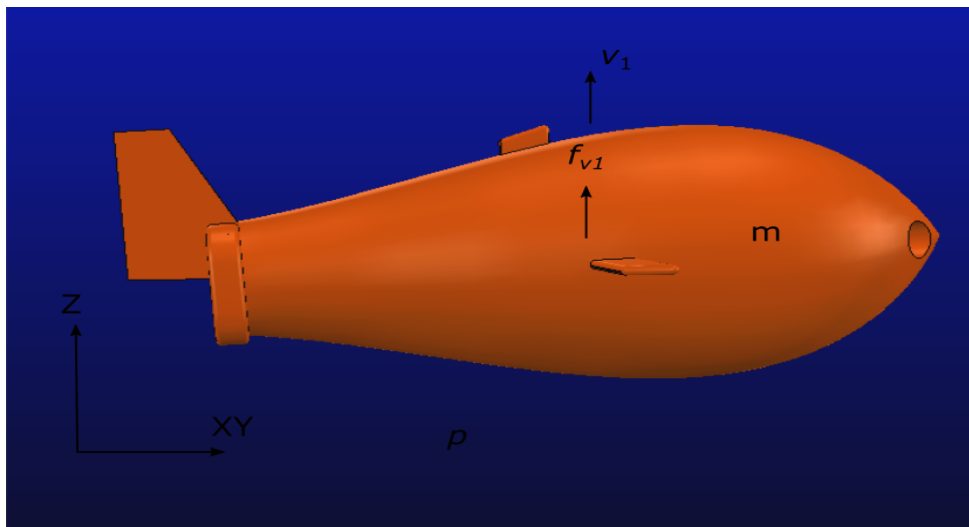


Fig. 6.23 Parámetros de simulación del modelo dinámico de restitución

Elaborado por: Tomás Núñez

Tabla 6-3: Parámetros de simulación del modelo dinámico de restitución

Condiciones iniciales		Fuerzas		Constantes	
$z$	-5 m	$f_z$	0 N	$m$	30 Kgr
$v_z$	0 m/s			$\rho$	1027 $\frac{\text{Kgr}}{\text{m}^3}$
				$C_{dz}$	0.82

Elaborado por: Tomás Núñez

Además, no se tiene control de arrastre aún por lo que  $g_o = 0$  y se incluye la perturbaciones  $w_z$  mediante valores randomicos presentados en la figura 6.24.

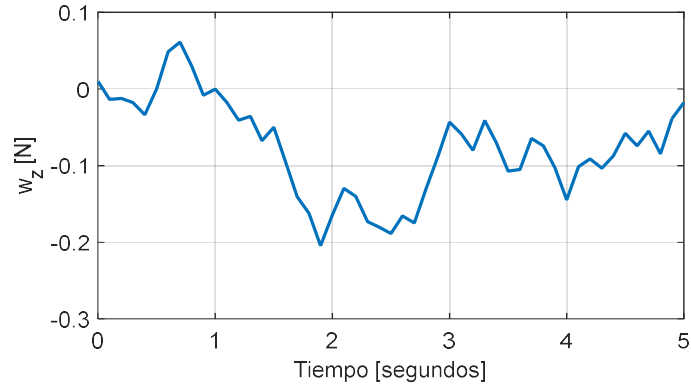


Fig. 6.24 Perturbación aleatoria  $w_z$

**Elaborado por:** Tomás Núñez

La figura 6.25 muestra la aceleración vertical del submarino  $a_z$  generada por respuesta dinámica, aquí se observa cómo se reduce la aceleración debido a la respuesta de la fuerza viscosa del agua; la figura 6.26 presenta la velocidad  $v_z$  del submarino en el eje Z, cuya respuesta es algo sub amortiguada lo que facilita su control, y la figura 6.27 permite observar el movimiento vertical del submarino generado por la dinámica del sistema.

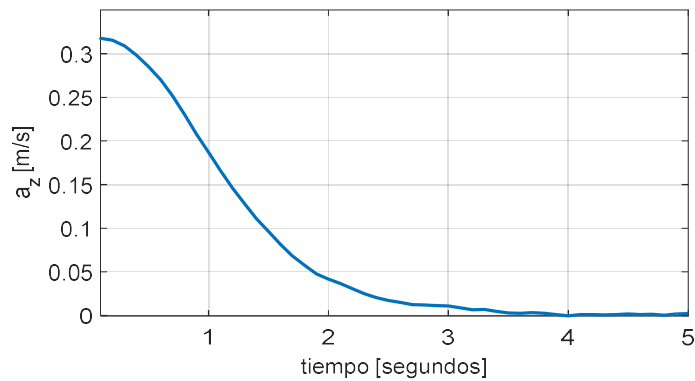


Fig. 6.25 Aceleración del submarino  $a_z$

**Elaborado por:** Tomás Núñez

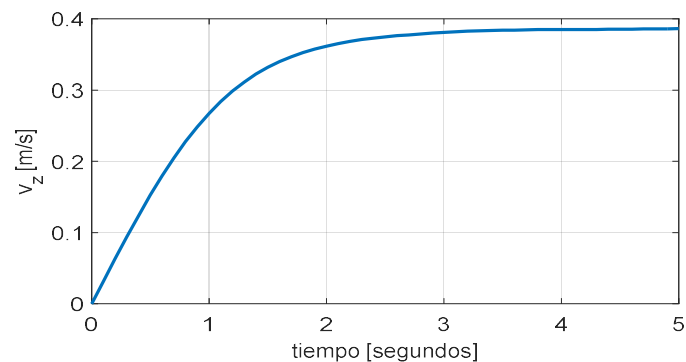


Fig. 6.26 Evolución de la velocidad  $v_z$  del modelo dinámico vertical.

**Elaborado por:** Tomás Núñez

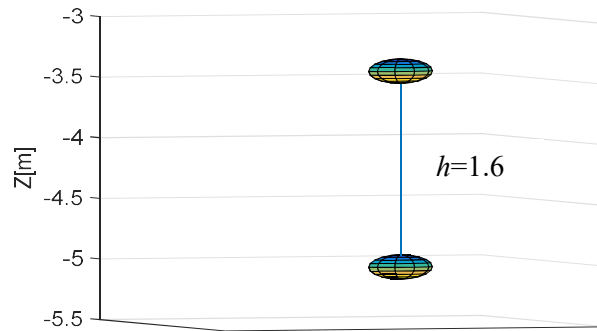


Fig. 6.27 Movimiento vertical de submarino debido a la respuesta dinámica

Elaborado por: Tomás Núñez

### Fuerzas impulsoras

Las fuerzas impulsoras de submarino se calculan mediante el valor cuadrático de las 2 velocidades angulares en las hélices, debido a que no puede impulsarse hacia atrás, así tenemos las ecuaciones 6.27 y 6.28.

$$f_{v_1} = \frac{k_{v1}(\omega_d^2 + \omega_i^2)}{2} \quad (6.27)$$

$$\tau_{v_2} = \frac{k_{v2}(\omega_d^2 - \omega_i^2)}{2} \quad (6.28)$$

#### 6.8.1.3. Retardos en el canal de comunicación

#### 6.8.1.4. Modelo del canal de comunicación

Citando el trabajo doctoral de (Vega, 2012): “El modelado del canal puede realizarse por métodos deterministas basados en los principios físicos de la propagación de ondas acústicas, o a partir de medidas experimentales de las que se extraen parámetros estadísticos para construir un modelo estocástico”, por esta razón el modelo a utilizar en el canal de comunicación utiliza técnicas estocásticas.

El esquema de la figura 6.28 indica los parámetros requeridos para el modelo probabilístico propuesto, donde los elementos del modelo se basan en datos experimentales, según el modelo a utilizar. Los datos enviados al sitio remoto son las señales de control y los datos recibidos por el sitio local permiten conocer las coordenadas del submarino y visualizar las imágenes captadas por una cámara remota.

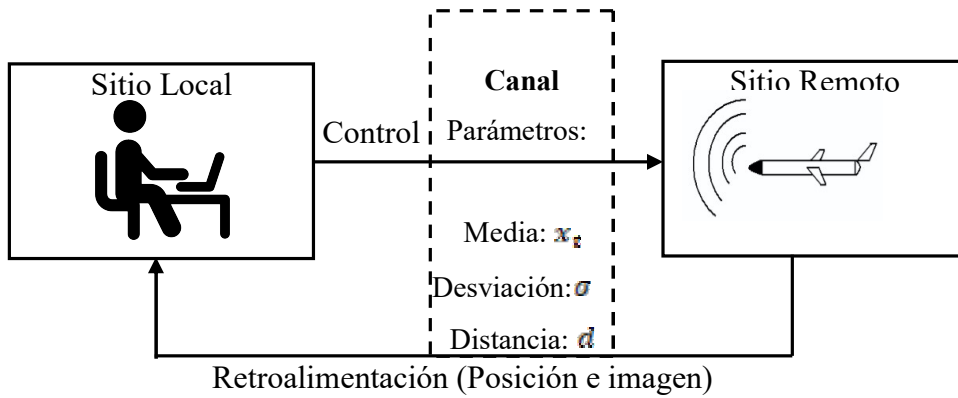


Fig. 6.28 Esquema del canal de comunicación

Elaborado por: Tomás Núñez

En base a la ecuación 4.23 de distribución gamma analizada en el capítulo 4 se puede desarrollar un modelo estocástico de latencia para la comunicación submarina. Los parámetros para el modelo son la media y la desviación estándar de los retardos, en base al estudio de (Vega, 2012) se conoce que estos datos dependen del tamaño del espacio de trabajo del vehículo submarino, es así que la comunicación puede tener un retardo de 0.1, 0.2 y hasta de 2 segundos.

En la figura 6.28: a) muestra una distribución gamma con  $x_t = 0.1$  s y  $\sigma = 0.00125$  segundos; y, b) con  $x_t = 0.8$  s y  $\sigma = 0.005$  segundos.

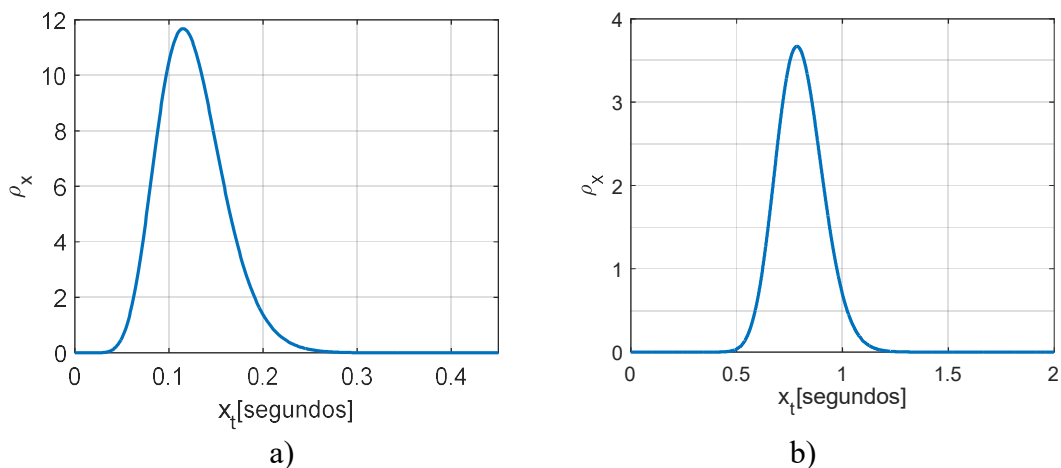


Fig. 6.29 Distribuciones gamma de latencia.

Elaborado por: Tomás Núñez

El modelo propuesto para este trabajo considera la ecuación de densidad acumulada de latencia según la ecuación 6.29.

$$\rho_x = \rho_o + \frac{d}{d_m} \quad (6.29)$$

Donde,

$\rho_o$ , es la mínima densidad de probabilidad acumulada,

$d$ , es la distancia de la comunicación, y

$d_m$ , la distancia máxima de conexión.

### Simulación

En la simulación del canal comunicación (ver Anexo D) se utilizan dos condiciones del ambiente, estos dependen de los factores del agua y el área de trabajo. La Figura 6.29 muestra los resultados para ambos parámetros del modelo de comunicación, según se describe a continuación:

1) La curva de color azul muestra los resultados para una media de latencia de 350ms y una desviación estándar 25ms, se propone una densidad acumulada de probabilidad mínima del 10% y una distancia máxima de comunicación de 200 m, para generar los posibles retardos se considera que el submarino se desplaza de 50 a 150m de la base o estación local.

2) La curva de color rojo muestra los resultados para una media de latencia de 450ms y una desviación estándar 35ms, se propone una densidad acumulada de probabilidad mínima del 15% y una distancia máxima de comunicación de 500 m, para generar los posibles retardos se considera que el submarino se desplaza de 50 a 150m de la base.

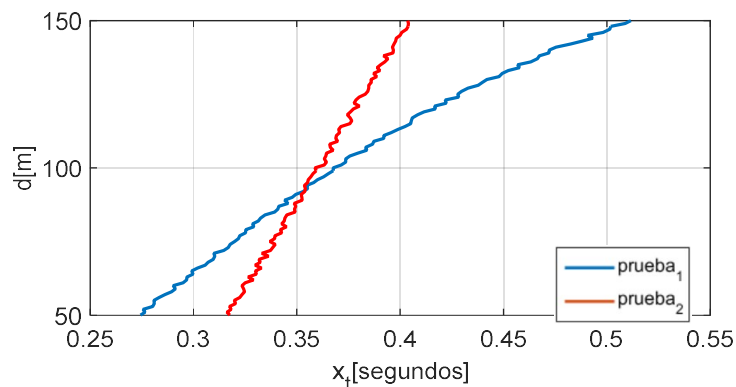


Fig. 6.30 Retardos generados por el modelo de comunicación respecto a la distancia.

**Elaborado por:** Tomás Núñez



## 6.8.2. Control de Submarino

El control del submarino se divide en dos etapas, el control de navegación mediante cinemática inversa y el control de velocidades mediante compensación PID, a continuación, se detallan:

### 6.8.2.1. Control de navegación

El propósito de este controlador es que el vehículo submarino se desplace de forma autónoma por una secuencia de posiciones  $P_d$  previamente definidos, como se observa en la figura 6.30, para ello se propone la cinemática inversa planteada en la ecuación 6.2, donde invertimos el modelo cinemático del submarino de la ecuación 6.4 para hallar la ecuación 6.30.

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & -\text{asin}(\theta_r) \\ \sin(\theta_r) & \text{acos}(\theta_r) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \dot{P}_{Gx} \\ \dot{P}_{Gy} \end{bmatrix} \quad (6.30)$$

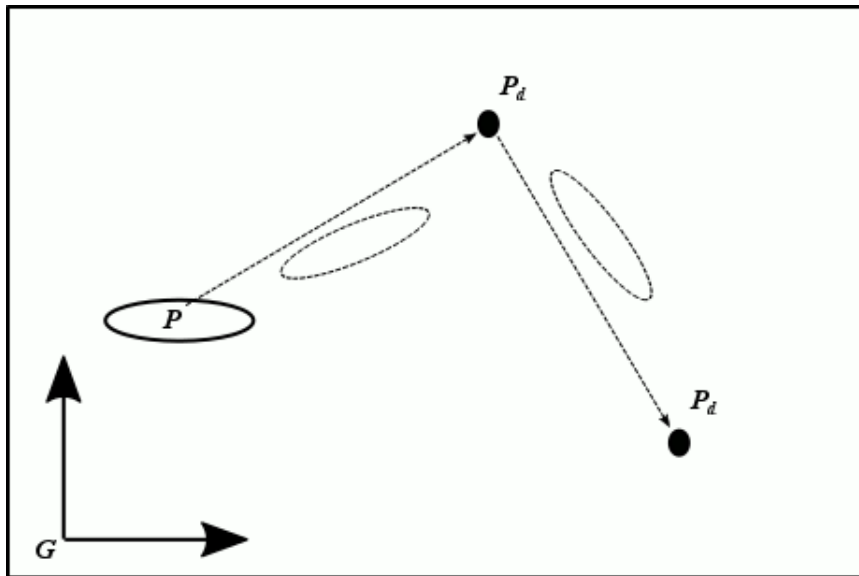


Fig. 6.31 Parámetros de la navegación autónoma del submarino

Elaborado por: Tomás Núñez

Para cumplir con el objetivo de navegación autónoma se propone el seguimiento de las posiciones mediante los errores determinados por las ecuaciones 6.31 y 6.32.

$$e_{Px} = P_{dGx} - P_{Gx} \quad (6.31)$$

$$e_{Py} = P_{dGy} - P_{Gy} \quad (6.32)$$

Además, se incluye la constante de ganancia  $K_e$  que regula las velocidades deseadas, como se presenta en la ecuación 6.33.

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & -\sin(\theta_r) \\ \sin(\theta_r) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} K_{e1} e_{Px} \\ K_{e2} e_{Py} \end{bmatrix} \quad (6.33)$$

### Simulación

Para simular el control autónomo (ver Anexo E) utilizamos el modelo cinemático de la ecuación (6.7) y aplicamos el controlador de cinemática inversa de la expresión 6.19. Se propone como objetivo las posiciones deseadas  $P_{d1} = (3; 3; -2)$  y  $P_{d2} = (4; 2; -2)$  las condiciones iniciales del submarino son  $x_0 = 0, y_0 = 0$  y  $z_0 = -2$ .

La figura 6.31 presenta la velocidad lineal  $v_1$  calculada por el control de navegación mediante cinemática inversa, y la figura 6.32 presenta la velocidad angular del submarino  $v_2$  y la figura 6.33 permite verificar el movimiento realizado por el submarino, lo indicando su correcta ubicación final en cada posición deseada.

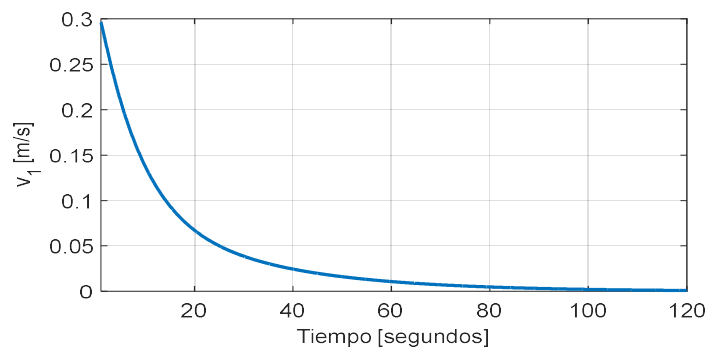


Fig. 6.32 Velocidad lineal del submarino determinada por el control de navegación.

**Elaborado por:** Tomás Núñez

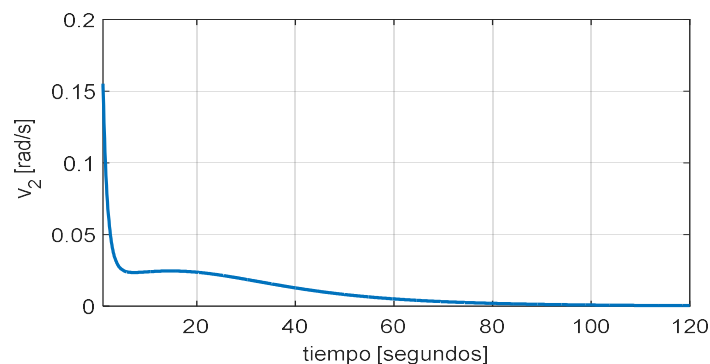


Fig. 6.33 Velocidad angular del submarino determinada por el control de navegación.

**Elaborado por:** Tomás Núñez

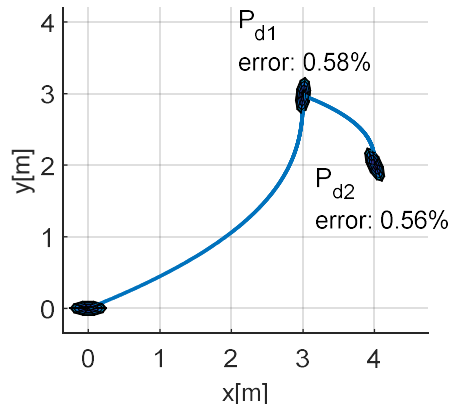


Fig. 6.34 Movimiento del submarino debido al control de navegación

Elaborado por: Tomás Núñez

### 6.8.2.2. Compensación PID de velocidades

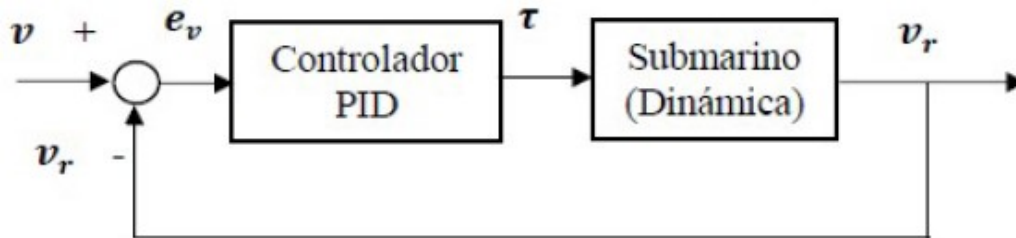


Fig. 6.35 Esquema de la compensación PID de velocidades

Elaborado por: Tomás Núñez

El controlador de velocidades propuesto tiene el propósito de corregir los errores de las consignas de velocidad calculadas por el control de navegación, así como las velocidades ordenadas remotamente en el sistema de tele-operación. La figura 6.34 presenta el diagrama de bloques del controlador PID que determina las fuerzas y torques que modifican las velocidades del submarino.

**Tabla 6-4:** Constantes de sintonización por Ziegler y Nichols

Constante / Controlador	$K_p$	$K_i$	$K_d$
Proporcional	$0.5 K_c$	-	-
Proporcional-Integral	$0.45 K_c$	$0.54 K_c / t_c$	-
PID	$0.59 K_c$	$1.18 K_c / t_c$	$0.074 K_c t_c$

Fuente: (Boiko, 2013)

Para regular la dinámica del submarino se propone un controlador PID que considere los errores de velocidad presentes en el submarino, la ecuación 6.34 muestra el

controlador PID propuesto. Para determinar las constantes de PID se propone la sintonización por el método de Ziegler y Nichols de la tabla 6-4.

$$\tau_{PID} = K_p e_v + K_i \int e_v + K_d \frac{de_v}{dt} \quad (6.34)$$

Con los errores de velocidades de la ecuación 6.35.

$$e_v = v - v_r \quad (6.35)$$

Además, el robot submarino modifica sus velocidades a partir de las aceleraciones que se determinan por la inversa del modelo dinámico en la ecuación 6.20, presentado en la ecuación 6.36.

$$\dot{v} = M^{-1}(\tau_{PID} - Cv_r - Dv_r) \quad (6.36)$$

### Simulación

Se realiza la simulación del controlador PID en dos etapas, la primera permite sintonizar las constantes del PID, y en la segunda se verifican estas constantes.

### Sintonización

Se implementa el controlador PID para sintonizar las constantes, y se determina que la velocidad lineal del submarino no tiene una constante proporcional válida que genere inestabilidad ni oscilación constante, pero el sistema muestra oscilaciones constantes en la velocidad angular para una constante proporcional de oscilación de  $K_c = 24$ . La figura 6.35 muestra el torque generado para el submarino en la sintonización del controlador.

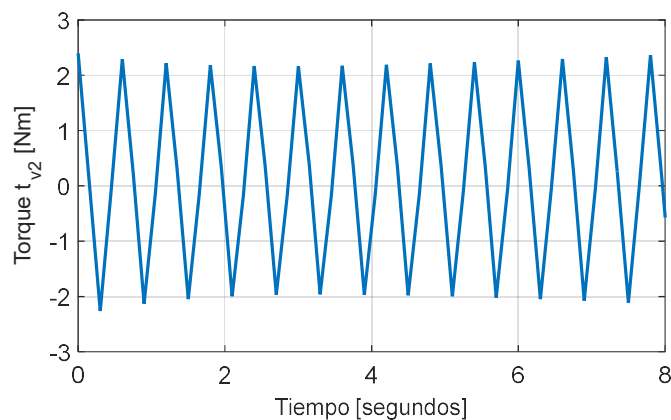


Fig. 6.36 Torque  $t_{v2}$  de la sintonización del PID

Elaborado por: Tomás Núñez

De la figura 6.36 se obtiene el tiempo de oscilación de la respuesta de velocidad  $t_c = 0.6$  segundos, y aplicando la tabla 6-4 se encuentra las constantes del PID para controlar la velocidad angular del submarino  $K_{p_{v_2}} = 14, K_{i_{v_2}} = 47$  y  $K_{d_{v_2}} = 1$ , mientras que para asignar los valores de las constantes PID para la velocidad lineal se usa constantes similares a los anteriores, pero se intensifica el valor de la constante proporcional, obteniendo las constantes  $K_{p_{v_1}} = 4K_{p_{v_2}}, K_{i_{v_1}} = K_{i_{v_2}}$  y  $K_{d_{v_1}} = K_{d_{v_2}}$ .

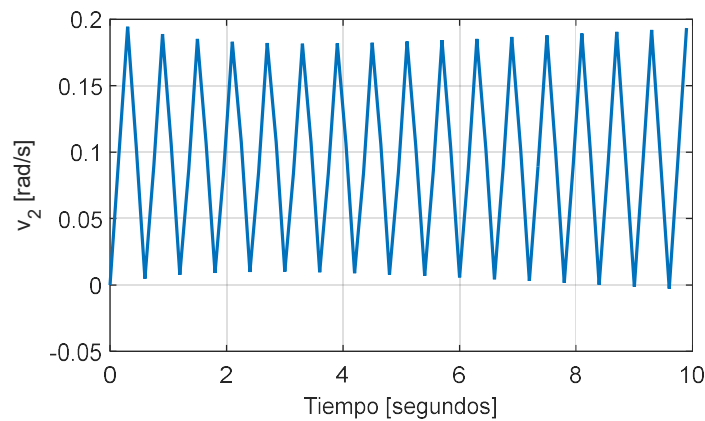


Fig. 6.37 Velocidad  $v_2$  de respuesta en la sintonización del PID

**Elaborado por:** Tomás Núñez

### Verificación

En la simulación de control PID (ver Anexo F) se realiza un programa que mantiene los parámetros dinámicos fijados en la simulación del modelo dinámico, y se aplican las constantes de PID determinada en la sintonización. Para la verificación del controlador de velocidades se fijan consignas de  $v_1 = 0.08 \frac{m}{s}$  y  $v_2 = 0.04 \frac{rad}{s}$ .

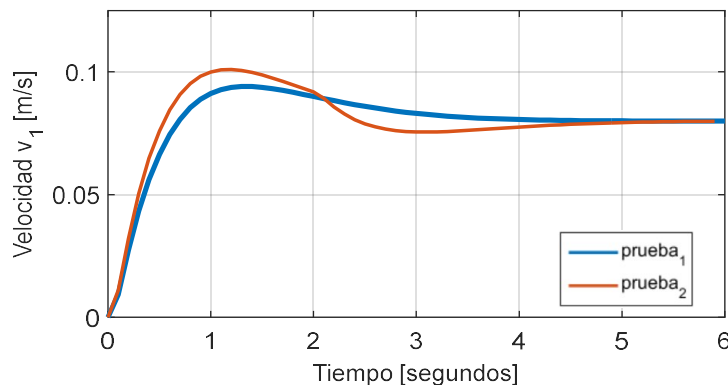


Fig. 6.38 Velocidad  $v_1$  de respuesta con el controlador PID

**Elaborado por:** Tomás Núñez

La figura 6.37 presenta la velocidad lineal del submarino controlada por el PID, observando un correcto seguimiento de velocidad, y la figura 6.38 muestra el seguimiento de la velocidad angular regulada por el PID.

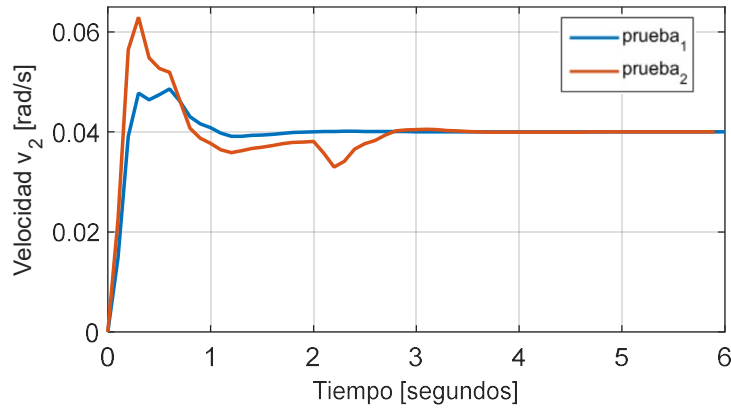


Fig. 6.39 Velocidad  $v_2$  de respuesta con el controlador PID

**Elaborado por:** Tomás Núñez

Las figuras 6.39 y 6.40 permiten observar las acciones de control generadas por el controlador PID, en esta figura se presentan la fuerza de empuje  $f_{v_1}$  y el torque de giro  $\tau_{v_2}$  de submarino, respectivamente.

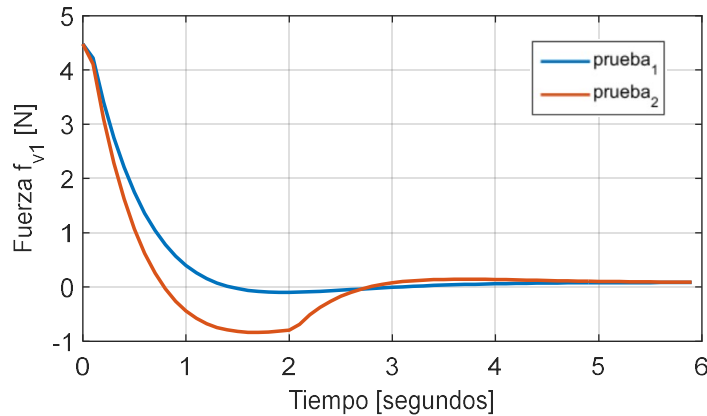


Fig. 6.40 Fuerza  $f_{v_1}$  generada por el controlador PID

**Elaborado por:** Tomás Núñez

Los resultados muestran un adecuado funcionamiento del controlador PID, observando los errores de velocidad de la figura 6.41, donde la curva de color azul son los errores en la velocidad  $v_1$  y la curva de color rojo son los errores en la velocidad  $v_2$ , ambos se hacen cero, demostrando que el set point ha sido alcanzado.

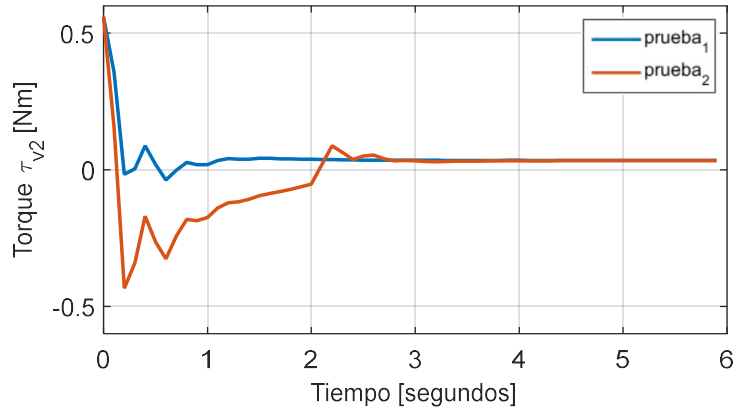


Fig. 6.41 Torque  $\tau_{v2}$  generado por el controlador PID

Elaborado por: Tomás Núñez

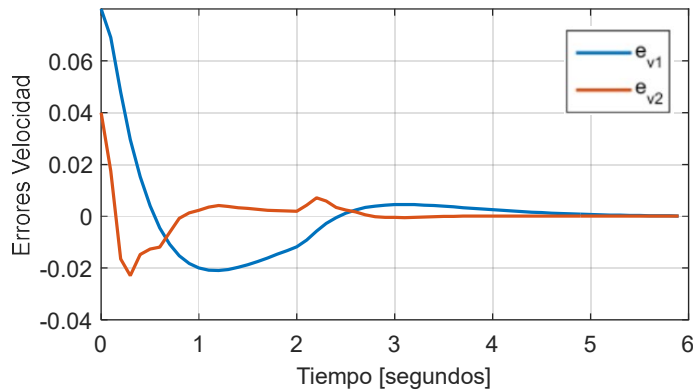


Fig. 6.42 Errores de velocidad

Elaborado por: Tomás Núñez

### 6.8.3. Control de profundidad

Se propone un control de profundidad basado en el control de lastre  $g_o$  del modelo dinámico de la ecuación 6.26 que permite al submarino regular su posición en  $z$  mediante abrir y cerrar una compuerta que ingresa agua al submarino hacia un contenedor interno, este control se regula mediante las cantidad de líquido ingresado  $m_o$  en kilogramos, ver la ecuación 6.37.

$$g_o = m_o g \tag{6.37}$$

En este trabajo no es estudia el comportamiento del ingreso o expulsión del líquido del contenedor interno, debido a que esta propuesta se enfoca en la respuesta del submarino,

para cual se propone un control PID expresado en la ecuación 6.38 mediante la variación de masa.

$$\Delta m_o = k_{pm} e_z + K_{im} \int e_z dt + +K_{dm} \frac{de_z}{dt} \quad (6.38)$$

Donde,

$k_{pm}$ , es la constante proporcional.

$k_{im}$ , es la constante integral.

$k_{dm}$ , es la contante derivativa.

$e_z = z_d - z$ , es el error de profundidad.

Para simular el comportamiento de submarino en su desplazamiento vertical o profundidad se utiliza la expresión 6.39 que considera la dinámica de las fuerzas de restitución y la resistencia viscosa del agua.

$$a_z = \frac{(g_o + w_z - \frac{1}{2} \rho C_{D_z} A_{v_z} |v_z| v_z - (W_o - B))}{m} \quad (6.39)$$

### Simulación

En la simulación del control de profundidad (ver Anexo G), se sintoniza las constante del PID mediante el método de Ziegler y Nichols, para lo cual se obtiene la excitación del sistema en lazo cerrado, ver la figura 6.42, donde se obtiene las constantes de sintonización  $K_c = 2.5$  y  $t_c = 9$  segundos.

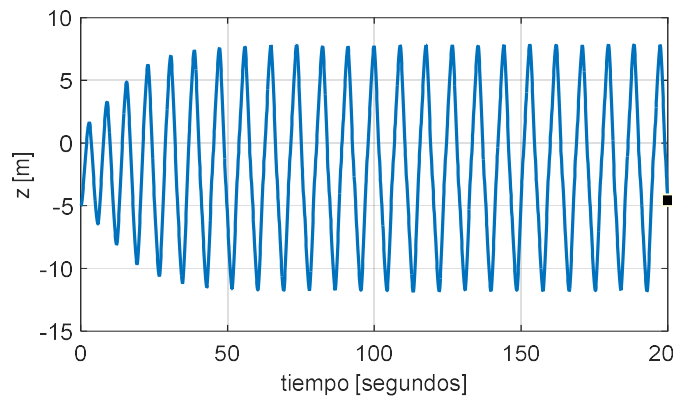


Fig. 6.43 Respuesta de profundidad  $z$  del submarino para sintonizar el PID.

**Elaborado por:** Tomás Núñez



Aplicando la tabla 6-1 para sintonizar el PID se obtienen las constantes  $k_{pm} = 1.48, K_{im} = 0.33$  y  $K_{dm} = 1.67$ . En la figura 6.43 se observa los resultados del control de profundidad para una consigna de -2 m cuando el submarino tiene una condición inicial de -5 m, con lo que se observa una oscilación debido a la respuesta dinámica del submarino sumergido bajo el agua, es decir, efecto de las fuerzas de restitución y fuerzas viscosas. La figura 6.44 muestra los cambios de masa producidos por el control PID de profundidad, estos cambios también son oscilante debido las características dinámicas de restitución del submarino sumergido.

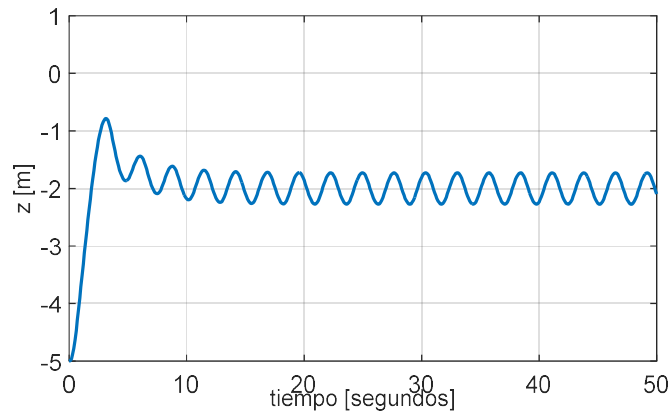


Fig. 6.44 Respuesta de profundidad del submarino con el control PID

**Elaborado por:** Tomás Núñez

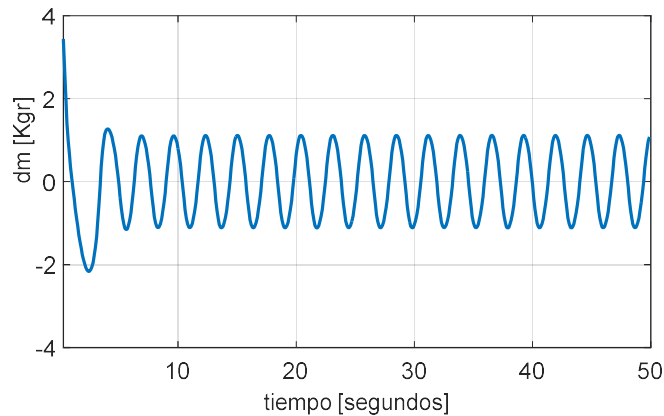


Fig. 6.45 Cambios de masa generados por el controlador de profundidad

**Elaborado por:** Tomás Núñez

#### 6.8.4. Tele operación

El sistema de tele operación implementado es maestro-esclavo de tipo unilateral o también llamado de bucle abierto respecto al entorno. En este tipo de control no existe

realimentación de señal alguna desde el esclavo hacia el maestro. Es decir, en el control el maestro genera las señales de referencia de velocidad. Se puede decir que el esclavo posee un sistema de control independiente, pero las señales de referencia las recibe generadas por el mando del maestro. La figura 6.45 muestra el esquema de tele operación propuesto.

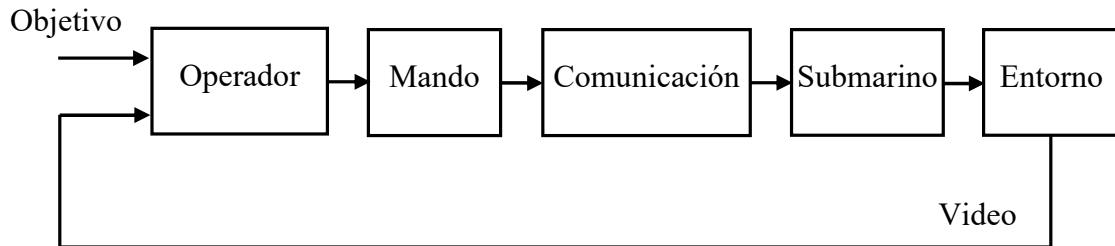


Fig. 6.46 Esquema de tele operación unilateral propuesto

**Elaborado por:** Tomás Núñez

El sistema de tele operación propuesto está expuesto a retardos en la comunicación por que es importante corregir este factor de importancia en la estabilidad del sistema. Un controlador PID es pasivo porque la señal de control en la salida se mueve en la misma dirección que la señal de error que es la entrada. Pero un controlador PID con retraso no es pasivo, porque la señal de control puede moverse en la dirección opuesta al error, una posible causa de inestabilidad. Por esta razón se realiza a continuación la corrección del retardo temporal y se analiza la pasividad del sistema de tele operación.

#### 6.8.4.1. Corrección del retardo temporal

El problema que presenta el retardo temporal en el sistema de control considerando que el dispositivo de mando tiene un retardo hasta que las señales deseadas de movimiento lleguen hasta el sitio remoto. Si la información de mando tiene un retardo, el operador no se dará cuenta hasta un tiempo después de que tiene que detenerse para lograr un objetivo. Una solución bastante conocida para corregir el retardo temporal es la técnica que se denomina acomodación activa remota. (Barrientos, Peñin, Balaguer, & Aracil, 2007)

#### Acomodación activa remota

Consiste en dar al sistema tele operado la capacidad de adaptación o acomodación al entorno, lo que implica modificar la referencia de velocidad del submarino mediante la información sobre los estados actuales de robot. La figura 6.46 muestra esta estrategia

de corrección de retardos, se observa que la retroalimentación en el sitio remoto tiene una ganancia para evitar que los efectos del ruido y perturbaciones alteren significativamente los valores.

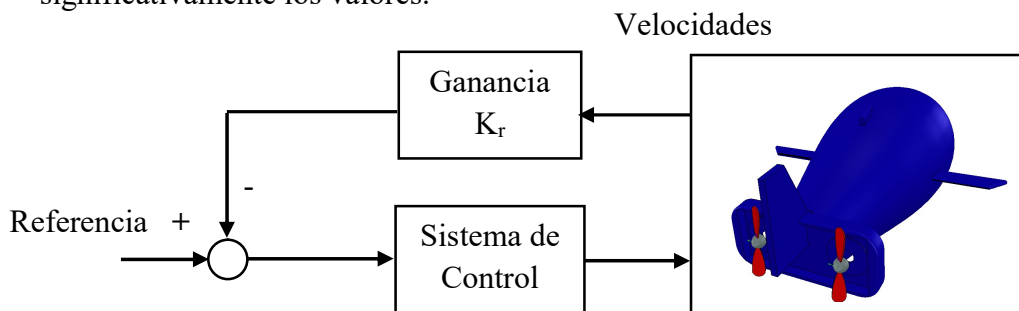


Fig. 6.47 Esquema de acomodación activa remota

Elaborado por: Tomás Núñez

### Simulación

Para la simulación se aplica una ganancia de acomodación activa remota de  $K_r=0.15$ , y se utiliza un retardo promedio de 100 milisegundos en la tele operación, con lo que se obtiene la figura 6.47 para la respuesta de velocidad lineal del submarino, observando un adecuado seguimiento de las velocidades deseadas.

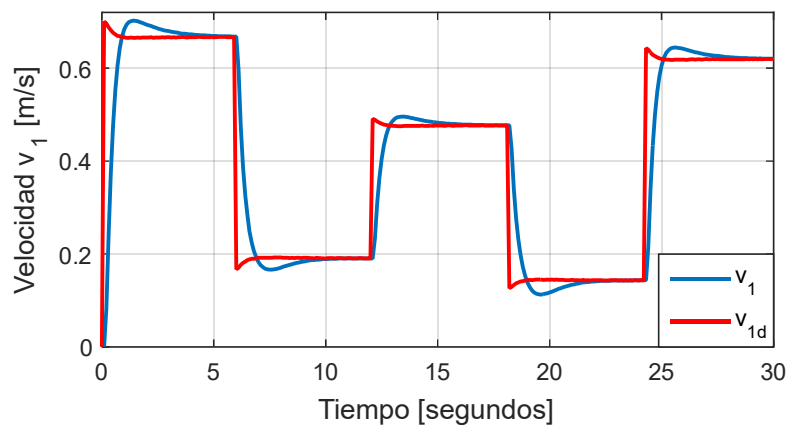


Fig. 6.48 Respuesta de velocidad lineal del submarino aplicando la acomodación activa remota.

Elaborado por: Tomás Núñez

Una respuesta bastante similar se obtiene en la velocidad angular del submarino como se presenta en la figura 6.48, se consigue un adecuado seguimiento de las órdenes deseadas de velocidad angular.

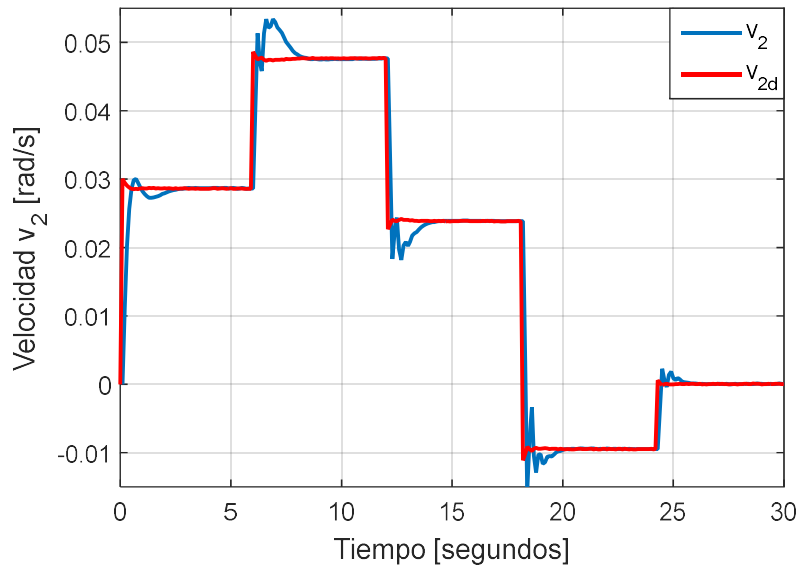


Fig. 6.49 Respuesta de velocidad angular del submarino aplicando la acomodación activa remota.

Elaborado por: Tomás Núñez

#### 6.8.4.2. Análisis de pasividad

La pasividad de un sistema comúnmente es parte de los requisitos de seguridad en aplicaciones tales como control de procesos, tele operación, interfaces hombre-máquina y redes de sistemas. Un sistema es pasivo si no puede producir energía por sí solo, y únicamente puede disipar la energía que se almacena inicialmente. De manera más general, un esquema de entrada-salida es pasivo si, para aumentar la salida se requiere aumentar la entrada.

Es recomendable saber por cuánto es pasivo un sistema de tele operación, por lo que es importante medir el exceso o la falta de pasividad, y aquí es donde se requiere un análisis de pasividad, el diagrama Nyquist garantiza pasividad cuando en el dominio de la frecuencia cuando el gráfico se encuentra en la parte real positiva.

#### Diagrama de Nyquist

Para obtener las gráficas de los diagramas de Nyquist se utiliza la ayuda de Matlab que genera automáticamente las figuras gracias a los toolbox, la figura 6.49 muestra el diagrama de Nyquist de la respuesta de velocidad lineal y la figura 6.50 de la velocidad angular. Donde se observa que las curvas se mantienen en el eje real positivo denotando pasividad en el sistema de tele operación si se mantiene el retardo de 100 milisegundos.

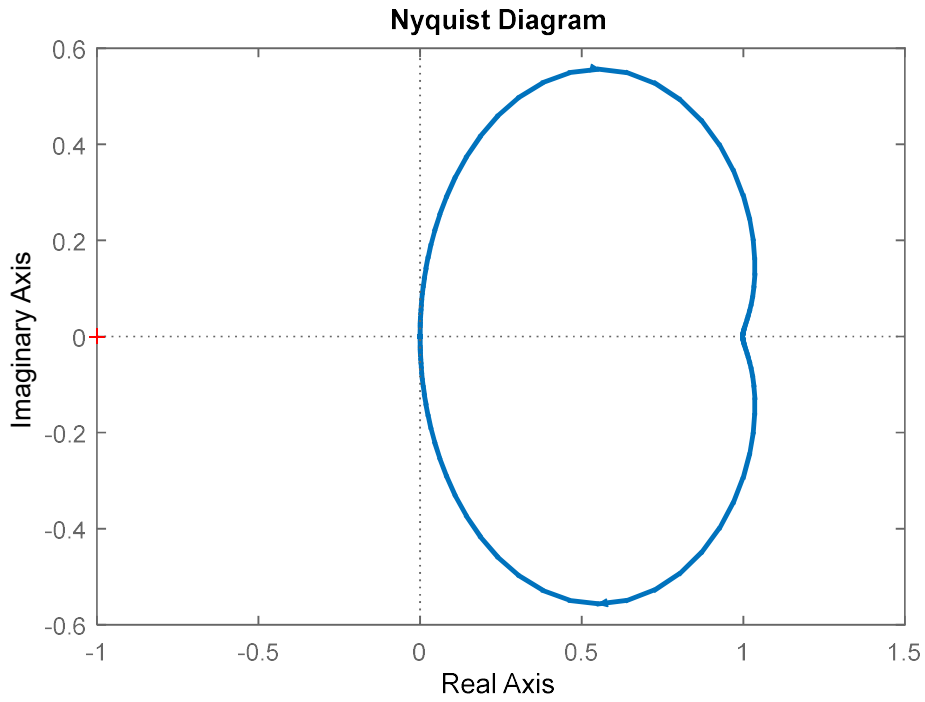


Fig. 6.50 Diagrama de Nyquist de la respuesta en la velocidad lineal del submarino.

**Elaborado por:** Tomás Núñez

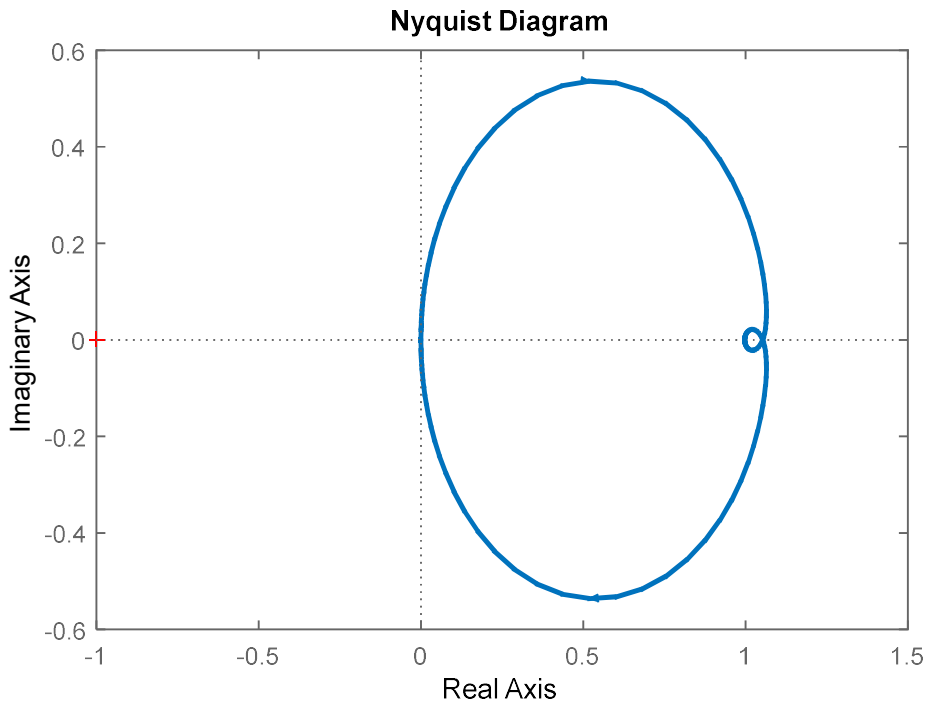


Fig. 6.51 Diagrama de Nyquist de la respuesta en la velocidad angular del submarino.

**Elaborado por:** Tomás Núñez

## Índices de pasividad

Para cuantificar la pasividad del sistema de tele operación con corrección de retardo temporal se utilizan los índices de pasividad, para ello se utiliza el toolbox de sistemas de control de Matlab, Control System Toolbox. Los datos utilizados son las respuestas de tele operación de las velocidades lineal y angular del submarino de las figuras 6.47 y 6.48, donde se tiene un retardo promedio 0.1 segundos.

Para determinar si el sistema es pasivo se aplica el comando `PF=isPassive(v)`, lo que indica que el sistema es pasivo cuando la respuesta es *true*, además, aplicando el índice del comando `R=getPassiveIndex(v)`, se puede determinar cuan pasivo es si R es menor o igual a 1, y para determinar si el sistema es estrictamente pasivo `tau=getPassiveIndex(F1, 'io')` debe ser mayor a cero para indicar pasividad estricta. La tabla 6.5 muestra los resultados de los índices de pasividad determinados en Matlab para las velocidades lineal y angular del submarino, donde se observa el sistema de tele operación es pasivo por muy poco por lo cual es recomendable mantener o reducir los retardos de comunicación al máximo.

**Tabla 6-5:** Índices de pasividad

	<b>PF</b>	<b>R</b>	<b>tau</b>
<b>v<sub>1</sub></b>	true	1	3.9e <sup>-16</sup>
<b>v<sub>2</sub></b>	true	1	3.8e <sup>-16</sup>

**Elaborado por:** Tomás Núñez

### 6.8.5. Simulador virtual

El ambiente de simulación se implementa combinando dos softwares: a) Matlab, como herramienta matemática para resolver los modelos matemáticos (operaciones numéricas, manejos de matrices y cálculos matemáticos; b) V-rep, como herramienta de virtualización 3D para crear la interfaz visual que presenta las interacciones del submarino con el ambiente. El uso de este software se justifica en el literal 4.2.2.3, donde se analizan sus ventajas y se compara con otro software de simulación. Ambos programas se ejecutan de forma paralela intercambiando información para el funcionamiento del simulador virtual. El Anexo H muestra los pasos para conectar los programas.

El submarino virtual de la figura 6.51 se construye en Solidwork (ver Anexo I), tiene forma similar a la de un esferoide prolato y cuenta con dos impulsores como se ha diseñado en esta propuesta.

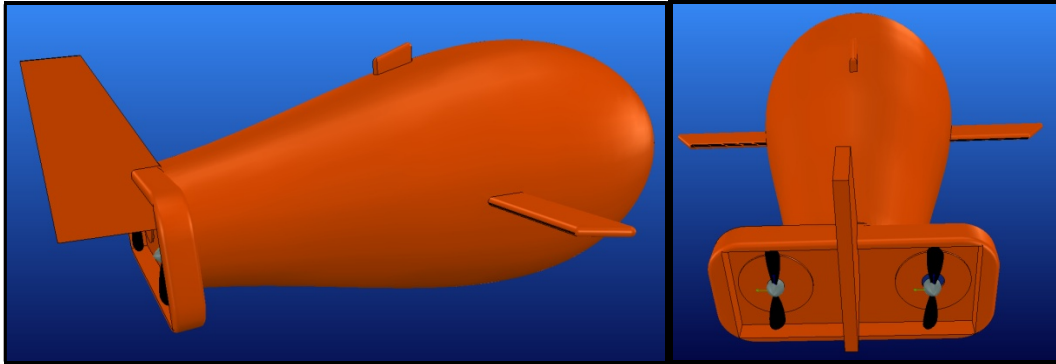


Fig. 6.52 Submarino de 3D

**Elaborado por:** Tomás Núñez

#### 6.8.5.1. Entorno virtual

El entorno virtual se construye mediante elementos 3D que conforman un ambiente similar al que se observa bajo la superficie acuática. La figura 6.52 muestra varias imágenes que conforma en entorno virtual desarrollado, este también ha sido construido mediante elementos de la superficie terrestre como edificios, islas, personas y la estación de mando.

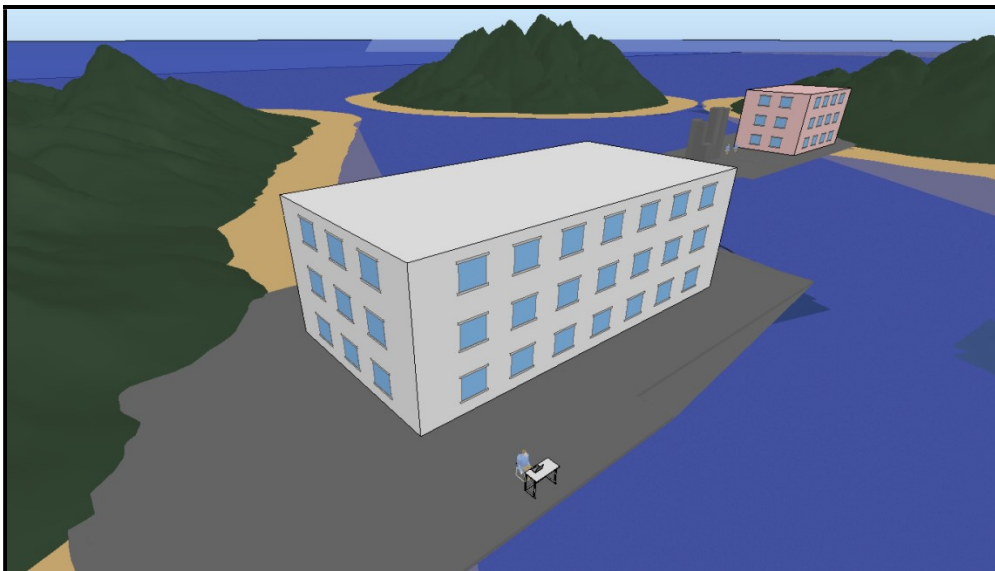


Fig. 6.53 Entorno virtual

**Elaborado por:** Tomás Núñez

### 6.8.5.2. Operación del simulador

El sistema de tele-operación requiere el sitio remoto para que el operador dirija el vehículo submarino. Para esto se dispone de un dispositivo de mando joystick Logitech Extreme Pro, la figura 6.53 muestra el dispositivo utilizado para el sistema de tele-operación.



Fig. 6.54 Joystick Logitech Extreme 3D Pro

**Elaborado por:** Tomás Núñez

Además, el operador debe visualizar las imágenes transmitidas desde el sitio remoto (entorno virtual), por lo que se instala una cámara sobre el submarino virtual (ver las figura 6.54), esta cámara transmite la información y es mostrado en una ventana con un retardo generado por el modelo comunicación. La figura 6.55 muestra una vista de la transmisión de imagen desde el entorno virtual.

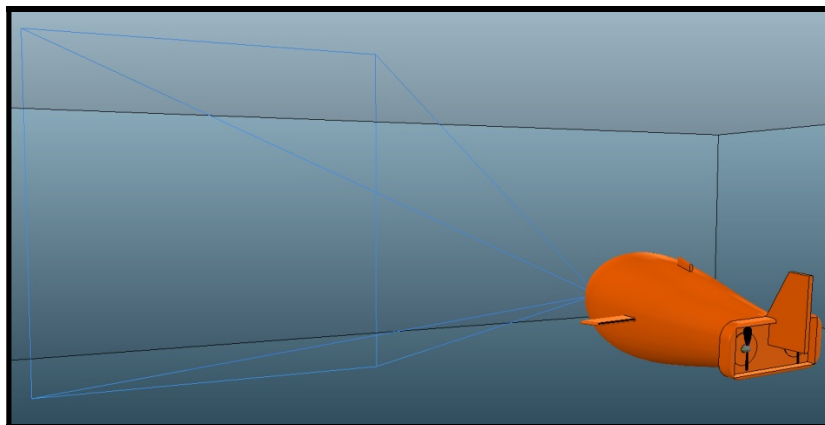


Fig. 6.55 Cámara ubicada en el submarino virtual

**Elaborado por:** Tomás Núñez



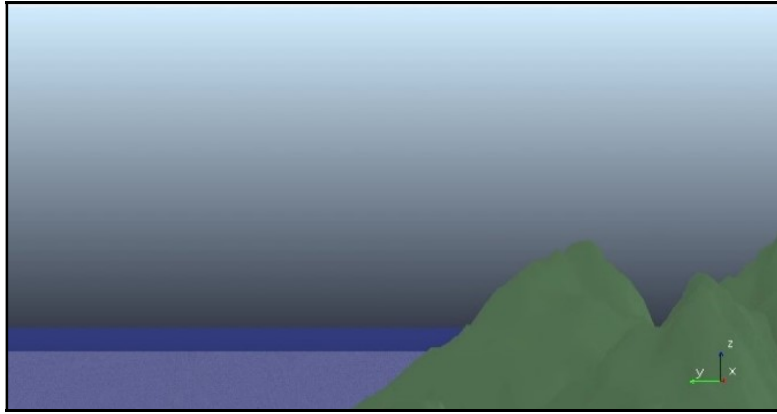


Fig. 6.56 Vista de la transmisión de imagen al sitio local.

**Elaborado por:** Tomás Núñez

### 6.8.6. Pruebas de simulación

#### 6.8.6.1. Prueba de navegación autónoma

Se realiza una prueba de todos los componentes de simulador para la navegación autónoma del submarino, para ello se consideran todos los parámetros establecidos en el desarrollo de los modelos matemáticos y controladores. La navegación autónoma de la prueba realizada tiene su sistema de referencia ubicado en la estación virtual de operación, el submarino se encuentra en las coordenadas iniciales  $P_0 = [-18; -21]m$  y se propone las siguientes posiciones de navegación:

$$P_1 = [-10; -10]m \quad ; \quad P_2 = [10; 0]m \quad ; \quad P_3 = [15; -25]m \quad \text{y} \quad P_4 = [-12; -12]m.$$

La figura 6.56 muestra las imágenes del simulador virtual en la prueba de navegación autónoma de submarino, en esta se puede visualizar las posiciones alcanzadas por el submarino en el desarrollo de la simulación.

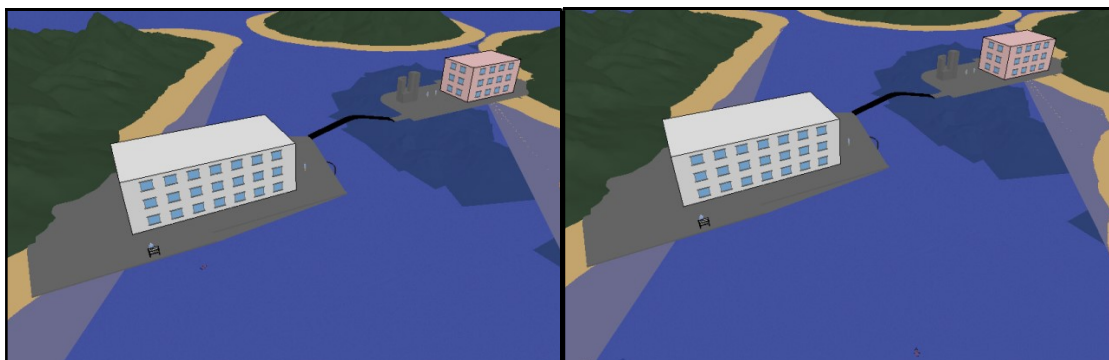


Fig. 6.57 Simulación virtual de la navegación autónoma del submarino.

**Elaborado por:** Tomás Núñez

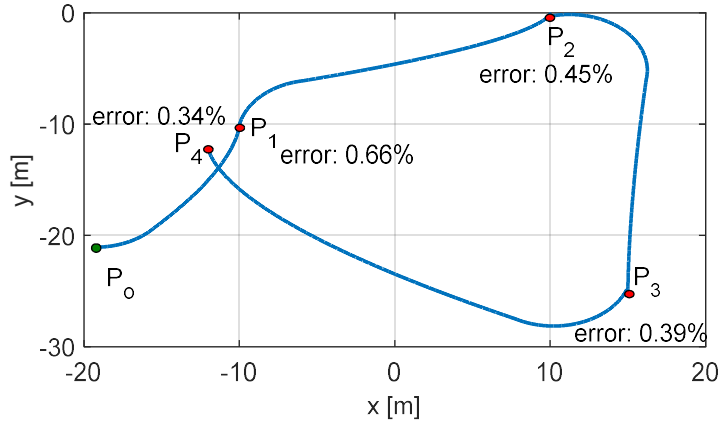


Fig. 6.58 Ruta de submarino en la navegación autónoma.

**Elaborado por:** Tomás Núñez

La figura 6.57 permite observar la ruta de movimientos del submarino, que sigue en la navegación autónoma, y se diferencia la posición inicial de las posiciones deseadas mediante sus respectivas etiquetas. Además, se indica el porcentaje de error para cada posición deseada, logrando corregir el error con bajos residuos y obteniendo valores entre el 0.39% y 0.66%, lo que demuestra un correcto funcionamiento del sistema.

La figura 6.58 y 6.59 presentan la fuerza de empuje y el torque de rotación ejercidos en el submarino por las acciones de control del PID para lograr la navegación autónoma por las posiciones deseadas, estos resultados muestran un máximo de 5 [N] de fuerza y un máximo de -0.7 [N.m] de torque producidos en el submarino para lograr los movimientos requeridos en la navegación autónoma.

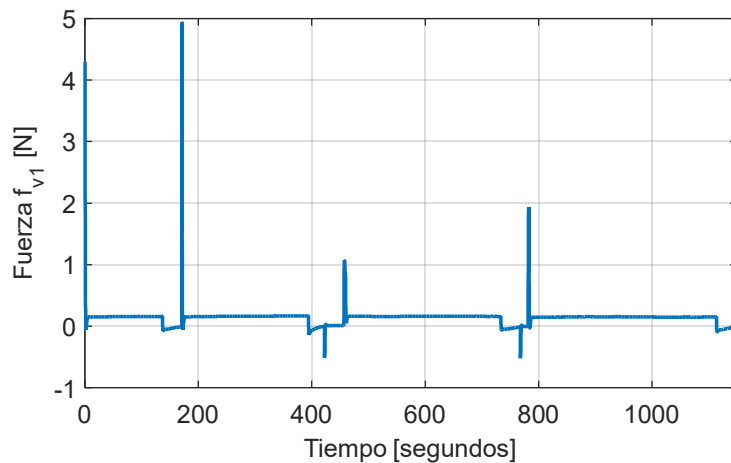


Fig. 6.59 Fuerza de empuje lineal del submarino en la navegación autónoma.

**Elaborado por:** Tomás Núñez

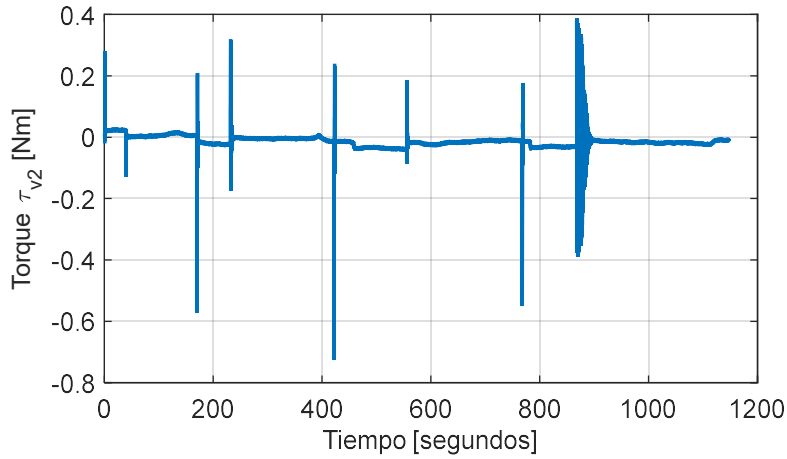


Fig. 6.60 Torque de rotación del submarino en la navegación autónoma.

**Elaborado por:** Tomás Núñez

Estas acciones de control generan aceleraciones en el submarino según su respuesta dinámica, la figura 6.60 y 6.61 muestran la aceleración lineal y la aceleración angular, respectivamente. Las figuras muestran una aceleración de  $v_1$  máxima de  $0.19 \text{ m/s}^2$  y una aceleración angular de  $v_2$  máxima de  $-0.38 \text{ rad/s}^2$ .

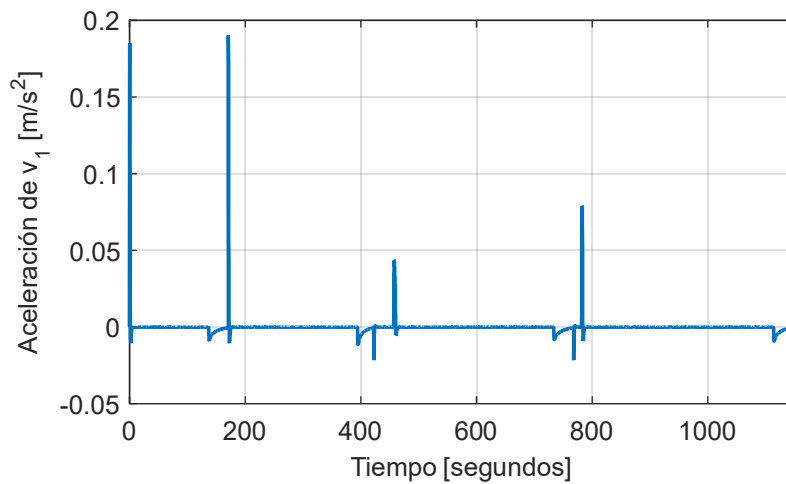


Fig. 6.61 Aceleración lineal del submarino en la navegación autónoma.

**Elaborado por:** Tomás Núñez

Las aceleraciones tienen el propósito de lograr las velocidades deseadas determinadas por el control por cinemática inversa para la navegación autónoma, la figura 6.62 y 6.63 presentan la velocidad lineal y velocidad angular alcanzadas por el submarino, respectivamente.

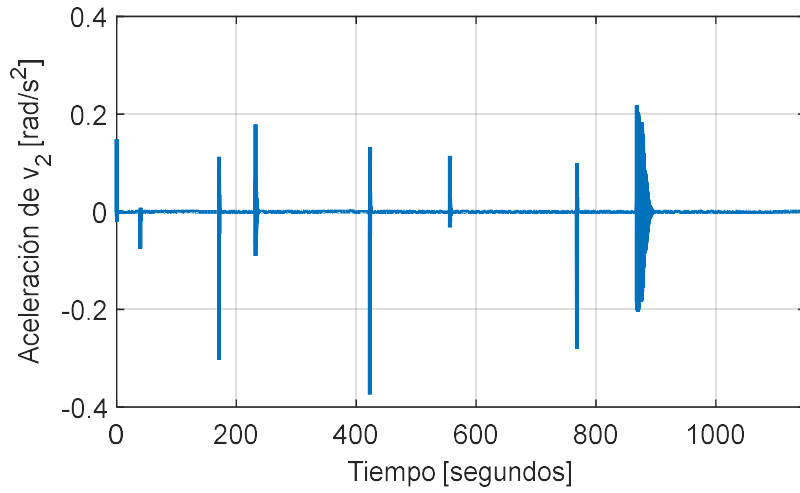


Fig. 6.62 Aceleración angular del submarino en la navegación autónoma.

**Elaborado por:** Tomás Núñez

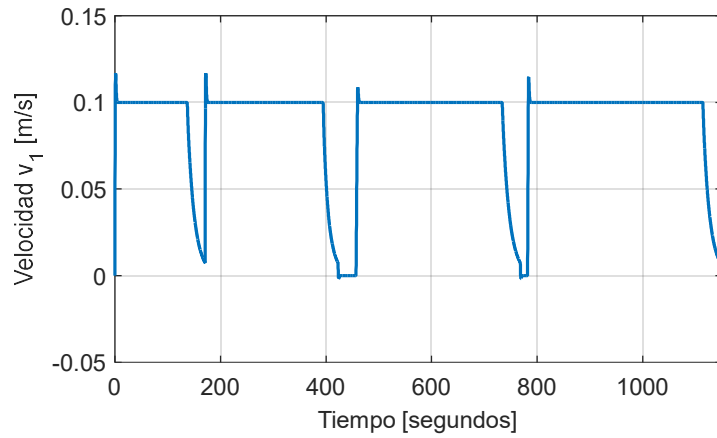


Fig. 6.63 Velocidad lineal del submarino en la navegación autónoma.

**Elaborado por:** Tomás Núñez

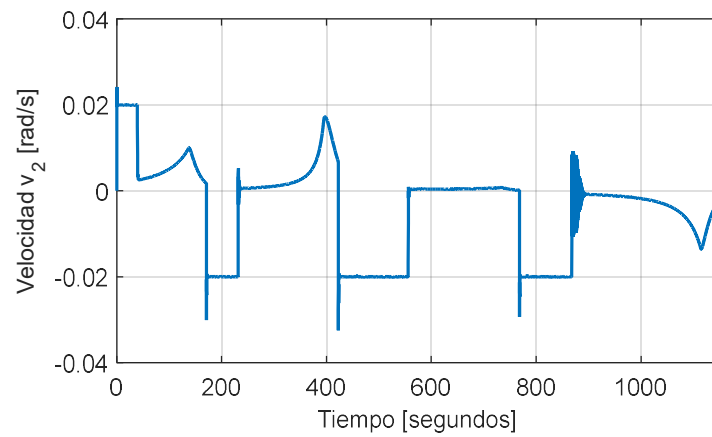


Fig. 6.64 Velocidad angular del submarino en la navegación autónoma.

**Elaborado por:** Tomás Núñez

### 6.8.6.2. Prueba de tele-operación

Se realiza una prueba de todos los componentes del simulador para la tele-operación del submarino, para ello se consideran todos los parámetros establecidos en el desarrollo de los modelos matemáticos y controladores. Las órdenes de control son realizadas mediante el joystick de la figura 6.53 mediante velocidades deseadas para el submarino, donde se regulan estas velocidades con el controlador PID.

La figura 6.64 muestra las imágenes del simulador virtual en la prueba de tele-operación del submarino, en esta se puede visualizar las posiciones alcanzadas por el submarino en el desarrollo de la simulación, además, se observa las imágenes transmitidas por la cámara virtual ubicada en el submarino.

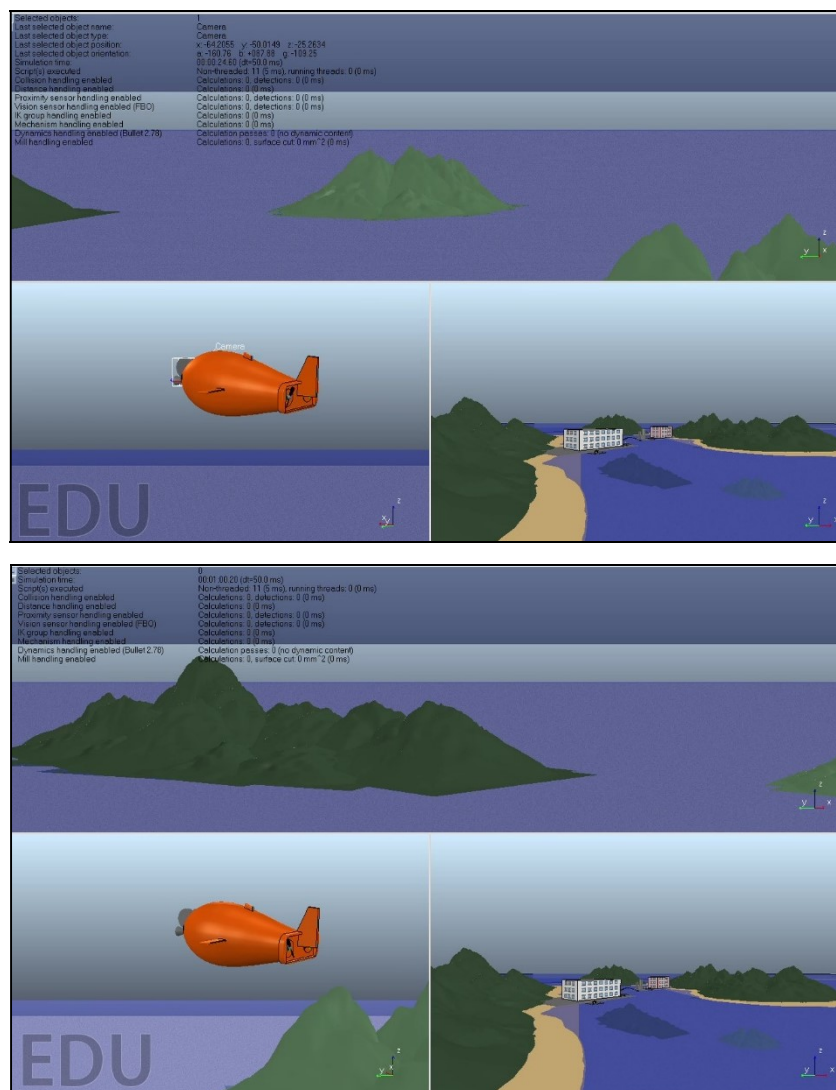


Fig. 6.65 Simulación virtual de la tele-operación del submarino.

Elaborado por: Tomás Núñez

La figura 6.65 y 6.66 presentan la fuerza de empuje y el torque de rotación ejercidos en el submarino por las acciones de control del PID para lograr el seguimiento de las velocidades ordenadas por el dispositivo de mando en el sitio local, estos resultados muestran un máximo de 4 [N] de fuerza y un máximo de 0.085 [N.m] de torque producidos en el submarino para lograr los movimientos requeridos en la teleoperación.

La figura 6.67 y 6.68 presentan las aceleraciones determinadas por la dinámica del sistema, donde se observa la aceleración lineal y la aceleración angular de submarino, respectivamente.

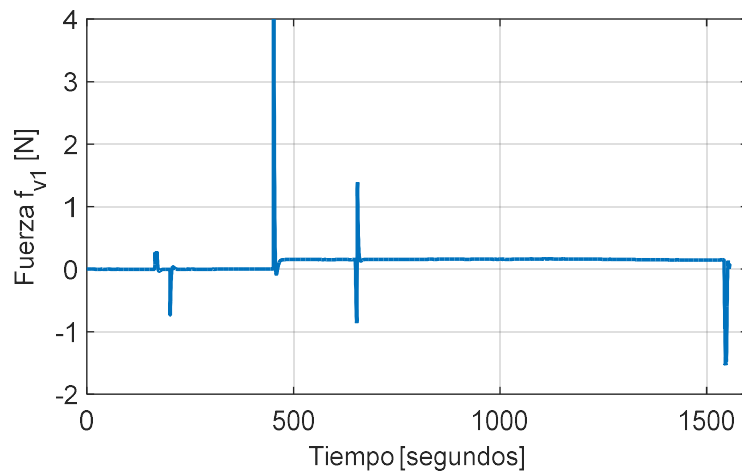


Fig. 6.66 Fuerza de empuje lineal del submarino en la teleoperación.

**Elaborado por:** Tomás Núñez

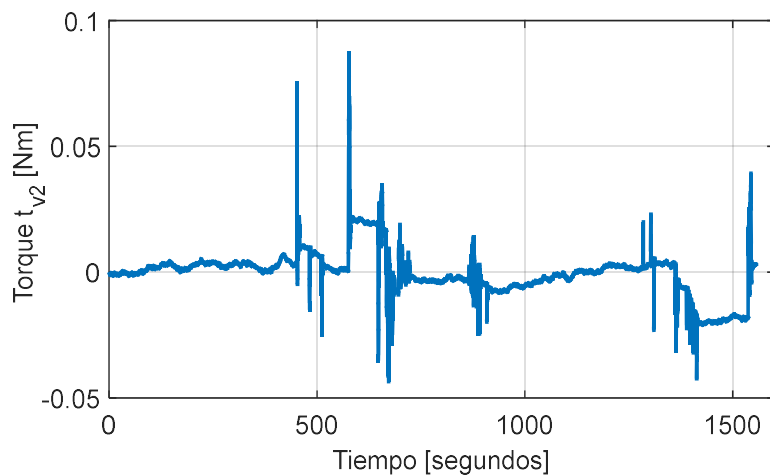


Fig. 6.67 Torque de rotación del submarino en la teleoperación.

**Elaborado por:** Tomás Núñez

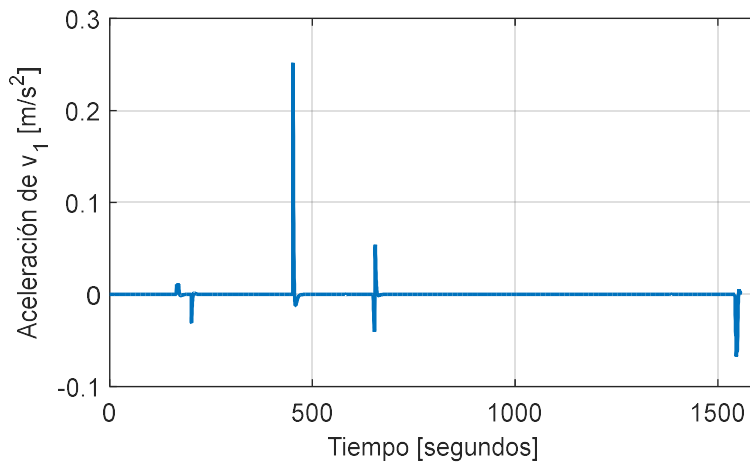


Fig. 6.68 Aceleración lineal del submarino en la tele-operación.

**Elaborado por:** Tomás Núñez

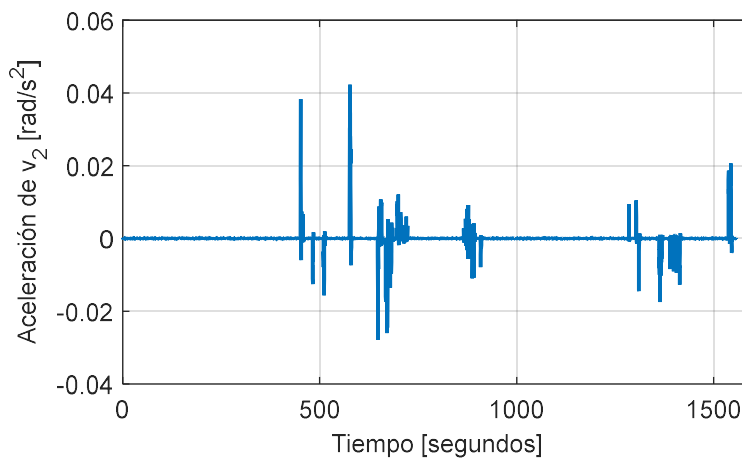


Fig. 6.69 Aceleración angular del submarino en la tele-operación.

**Elaborado por:** Tomás Núñez

El sistema de tele-operación del submarino tiene como objetivo el seguimiento de las velocidades ordenadas por el operador desde el sitio local, así, se presenta la figura 6.69 y 6.64 que muestran la velocidad lineal y velocidad angular de submarino, respetivamente, comparadas con las velocidades deseadas en la tele-operación, donde se verifica el seguimiento correcto de dichas velocidades.

Las velocidades nos permiten comparar los datos enviados por el joystick con la respuesta del submarino, como se muestra en la figura 6.71 a. y b., donde se observa el desplazamiento entre la velocidad lineal ordenada (rojo) y la generada por el submarino (azul), además, la figura 6.72 a. y b. presenta esta diferencia para la velocidad angular.

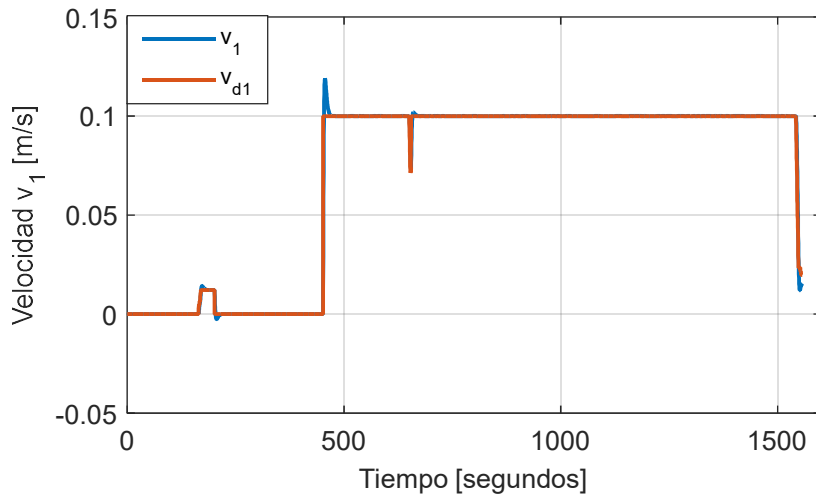


Fig. 6.70 Velocidad lineal del submarino en la tele-operación.

Elaborado por: Tomás Núñez

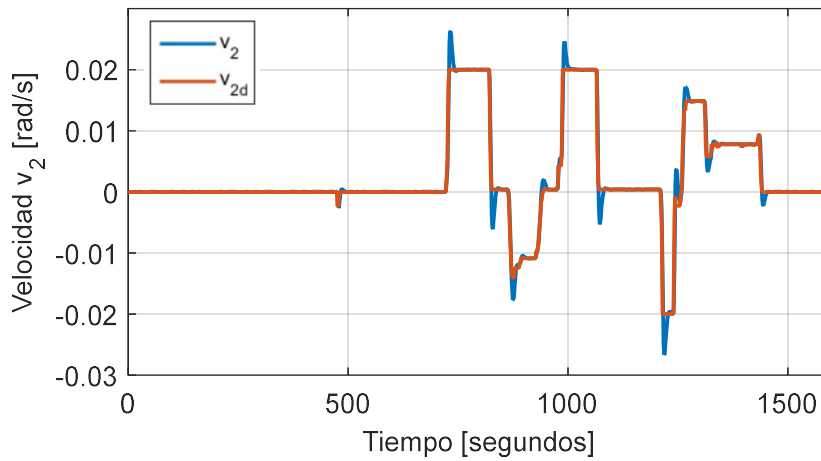


Fig. 6.71 Velocidad angular del submarino en la tele-operación.

Elaborado por: Tomás Núñez

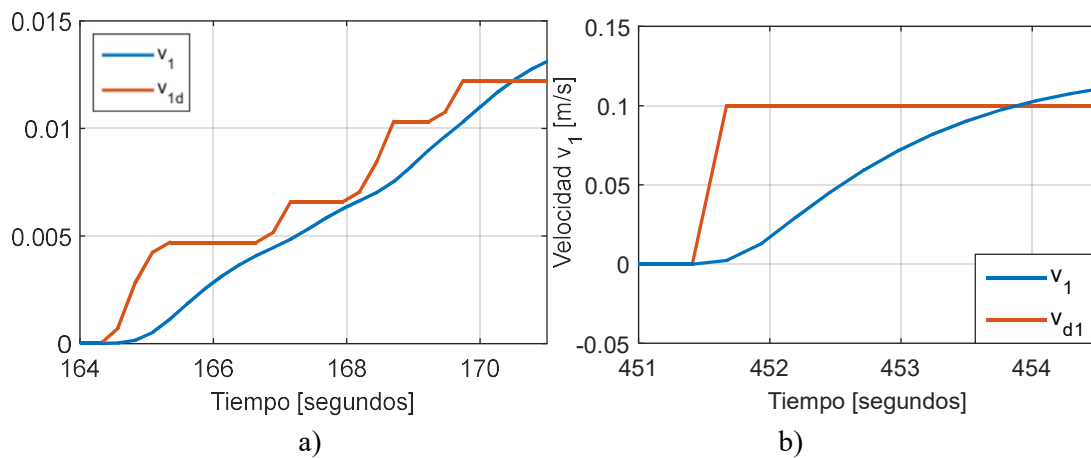


Fig. 6.72 Velocidad lineal del submarino en la tele-operación.

Elaborado por: Tomás Núñez



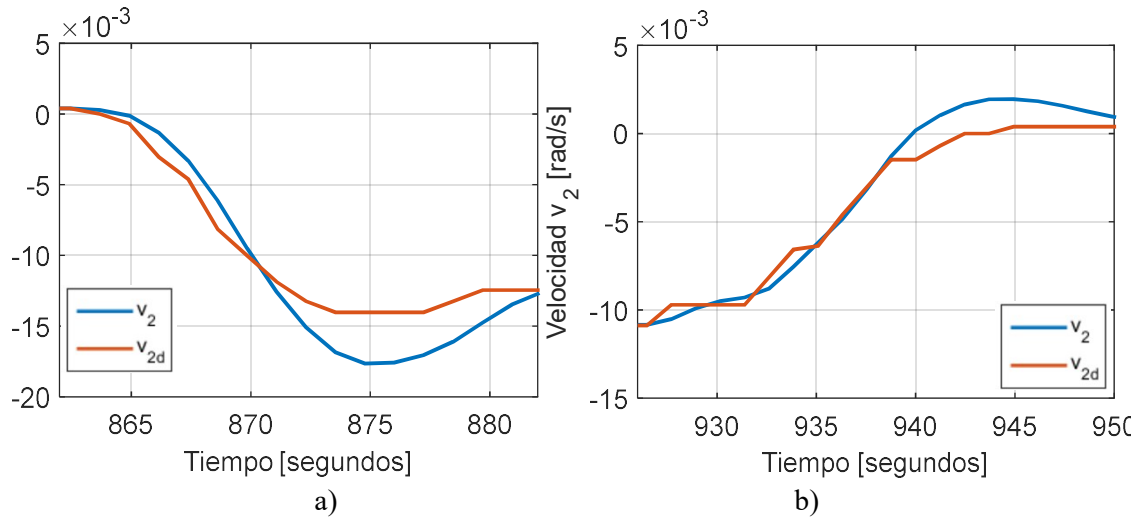


Fig. 6.73 Velocidad angular del submarino en la tele-operación.

**Elaborado por:** Tomás Núñez

Adicional, el sistema de tele-operación permite dirigir la profundidad del submarino mediante el control de lastre de la ecuación 6.38, de manera similar se ordena desde el dispositivo de mando en el sitio local. La figura 6.73 muestra la evolución de la profundidad del submarino en el proceso de tele-operación.

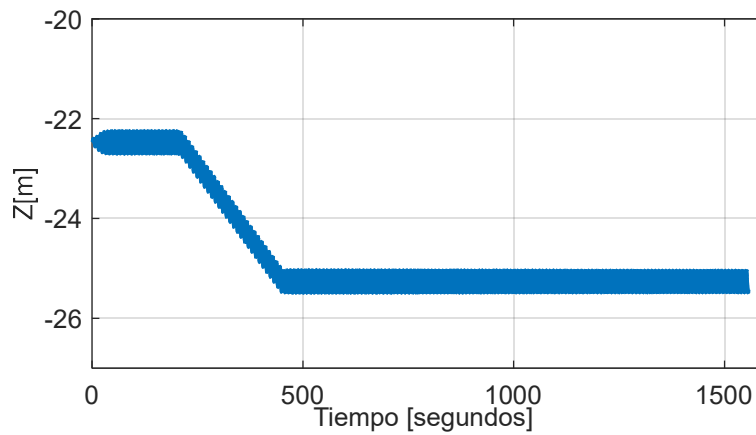


Fig. 6.74 Profundidad del submarino en la tele-operación.

**Elaborado por:** Tomás Núñez

Finalmente, se presentan los retardos de comunicación determinados por el modelo probabilístico del canal de transmisión. La figura 6.74 muestra la latencia de la comunicación resultante del proceso de tele-operación, estos datos también representan cuanto difieren los datos enviados por el joystick y los datos producidos en el sitio remoto.

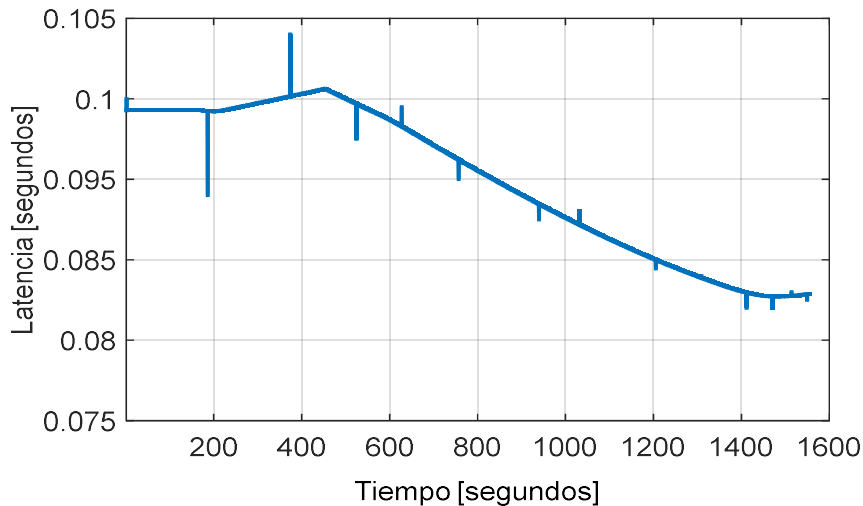


Fig. 6.75 Latencia de la comunicación en la tele-operación del submarino.

**Elaborado por:** Tomás Núñez

### 6.8.6.3. Comparaciones

Complementario a las pruebas anteriores se realizan comparaciones de las respuestas de los controladores implementados, a continuación, se analizan dos propuestas de comparación, cambios de salinidad en el agua y alcance de objetivo de forma autónoma vs tele operada.

#### Cambios de salinidad

La salinidad implica la cantidad de sales que se encuentran disueltas en el agua de mar, por ende, cambios de densidad en el agua, (marietta, 2008) analiza la relación de los cambios en la densidad debido al porcentaje de salinidad en el agua, como se observa en la figura 6.75.

Analizando el modelo dinámico del submarino se puede observar que la densidad es una variable influyente, por lo que se proponen pruebas del control de velocidad con los siguientes valores de densidad:

$$\rho_1 = 1000 \text{ Kgr/m}^3$$

$$\rho_2 = 1010 \text{ Kgr/m}^3$$

$$\rho_3 = 1020 \text{ Kgr/m}^3$$

$$\rho_4 = 1027 \text{ Kgr/m}^3$$

$$\rho_5 = 1050 \text{ Kgr/m}^3$$

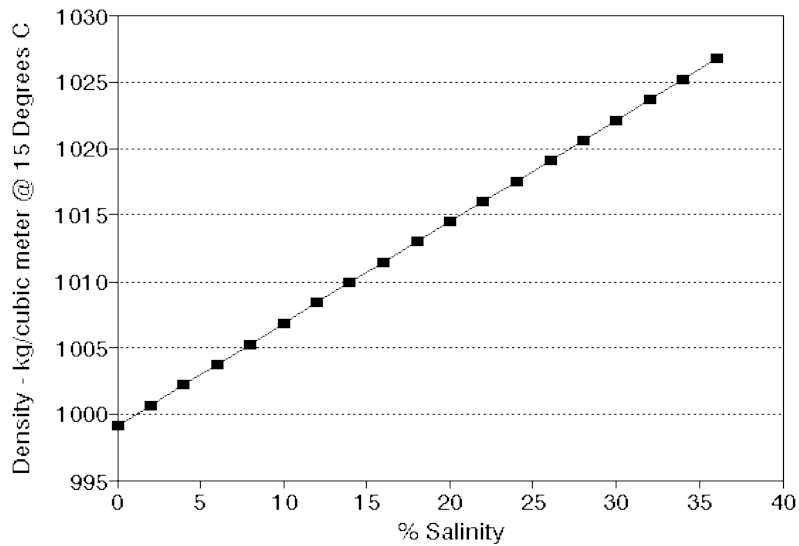


Fig. 6.76 Relación de la salinidad y la densidad del agua de mar.

**Fuente:** (marietta, 2008)

La figura 6.76 presenta las respuestas de velocidad lineal con diferentes valores de densidad en el agua. Debido a que los cambios en las respuestas difieren de forma limitada no es posible observar grandes cambios, para lo cual la figura 6.77 muestra un acercamiento que permite verificar las diferencias en las respuestas de velocidad lineal del submarino.

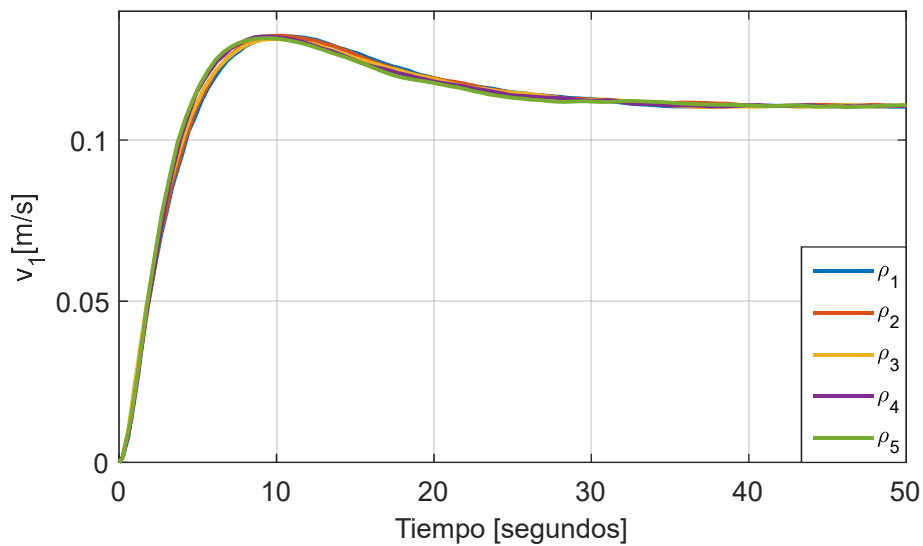


Fig. 6.77 Respuestas de velocidad lineal del submarino con diferentes valores de densidad

**Elaborado por:** Tomás Núñez

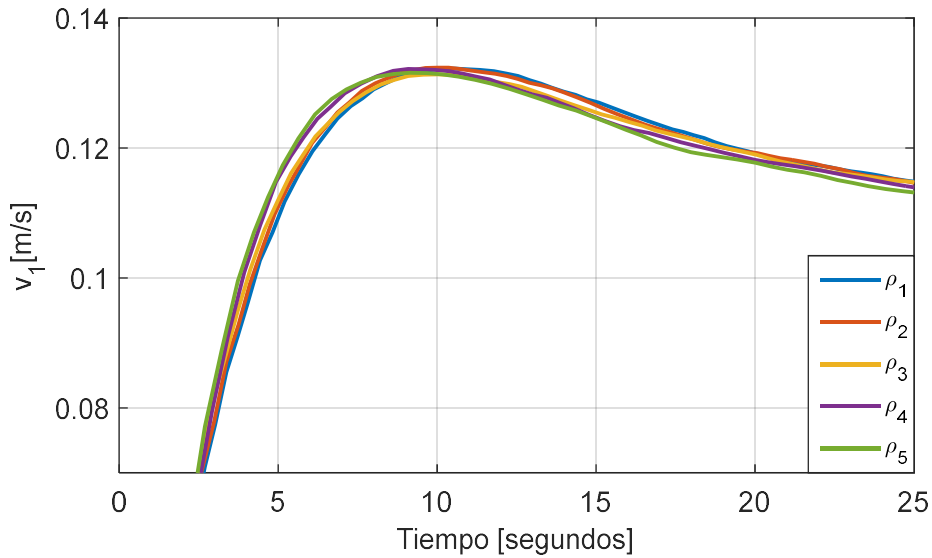


Fig. 6.78 Acercamiento a las respuestas de velocidad lineal del submarino con cambios de densidad.

**Elaborado por:** Tomás Núñez

La figura 6.78 presenta las respuestas de velocidad angular con diferentes valores de densidad en el agua. Debido a que los cambios en las respuestas difieren de forma limitada no es posible observar grandes cambios, para lo cual la figura 6.79 muestra un acercamiento que permite verificar las diferencias en las respuestas de velocidad lineal del submarino.

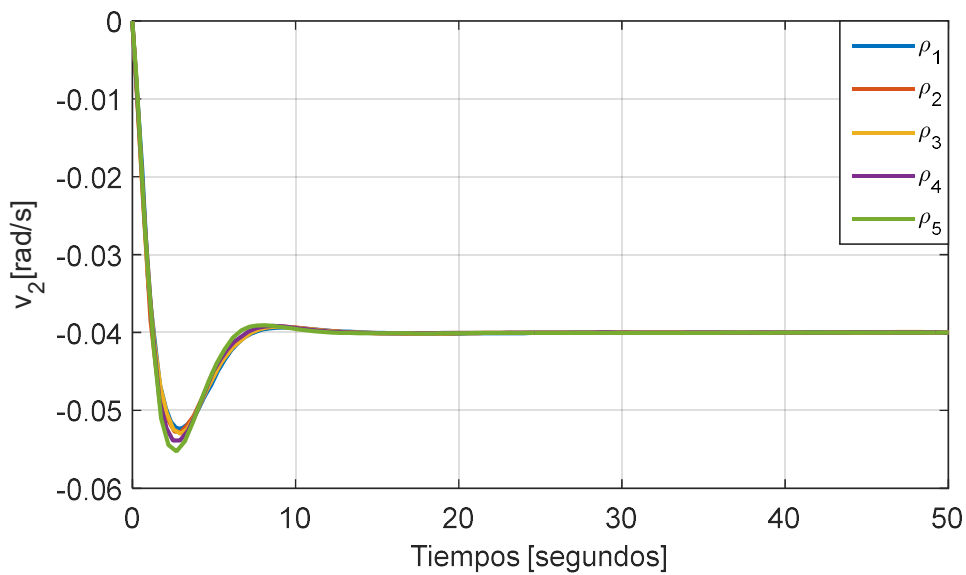


Fig. 6.79 Respuestas de velocidad angular del submarino con diferentes valores de densidad

**Elaborado por:** Tomás Núñez

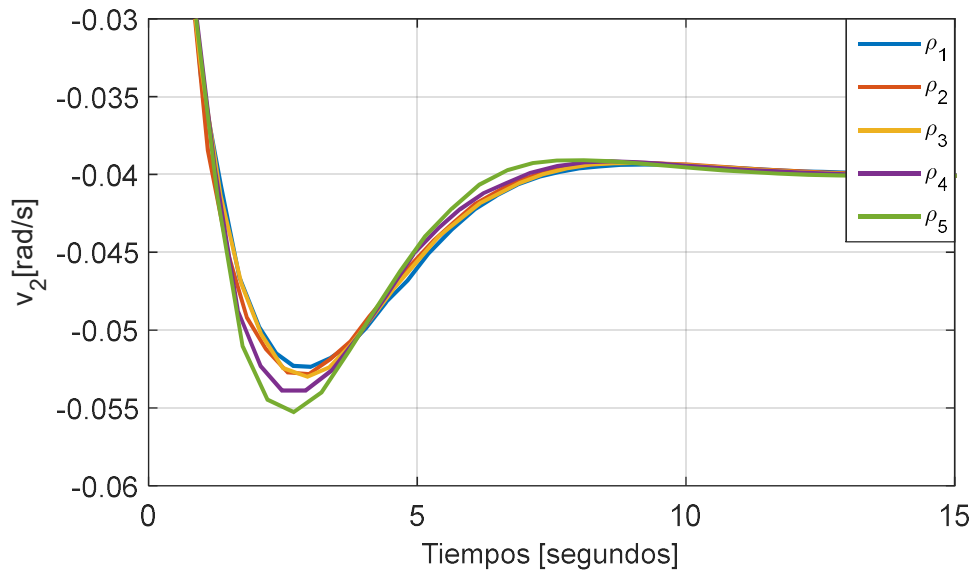


Fig. 6.80 Acercamiento a las respuestas de velocidad angular del submarino con cambios de densidad

**Elaborado por:** Tomás Núñez

Debido a que los cambios en la salinidad del agua no producen cambios significativos en la densidad del agua, se observa que producen una limitada influencia en la dinámica del sistema.

### Control Autónomo vs Tele operado

La propuesta de este trabajo se resume en el control autónomo y el control tele operado del submarino, por lo que se propone una comparación de los sistemas de control. A continuación, se presentan dos pruebas de comparación.

#### a) Comparación 1

Para esta primera prueba se propone llegar las posiciones deseadas  $x_d = 8.5[m]$  y  $y_d = -33[m]$  partiendo de las condiciones iniciales  $x_o = -6[m]$  y  $y_o = -8[m]$ .

La figura 6.80 muestra el movimiento del submarino en el caso de las dos pruebas, la curva azul es el movimiento del submarino debido al control autónomo y la curva roja son los movimientos realizado por un operador para alcanzar la posición deseada. Notando que el control autónomo alcanza su objetivo luego de 5.29 minutos y el control tele operado se demora 11.32 minutos en lograr el mismo propósito.

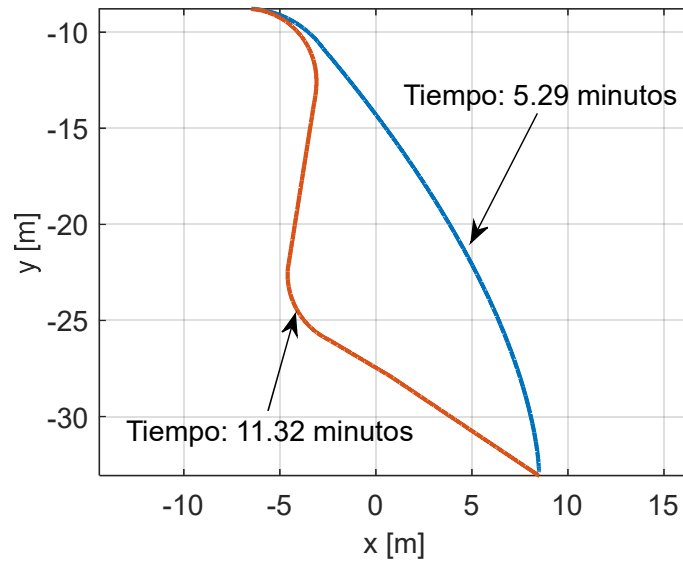


Fig. 6.81 Control autónomo vs tele operado 1: Movimiento del submarino

**Elaborado por:** Tomás Núñez

Las figuras 6.81 y 6.82, muestran las velocidades lineales y angulares del submarino, respectivamente, para alcanzar la posición deseada mediante el control autónomo y tele operado. Observando que el control autónomo es más eficiente aplicando las velocidades para lograr su objetivo, y al control tele operado le toma más tiempo llegar a la posición deseada.

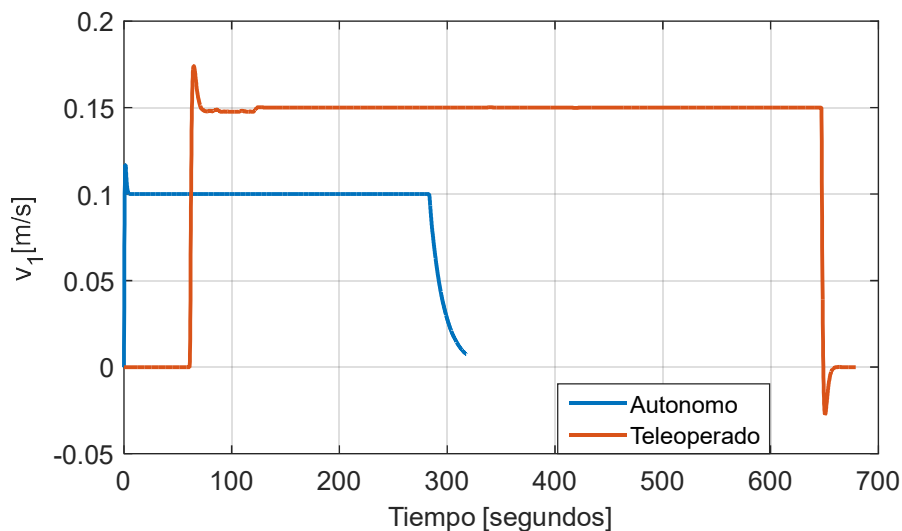


Fig. 6.82 Control autónomo vs tele operado 1: velocidad lineal del submarino

**Elaborado por:** Tomás Núñez

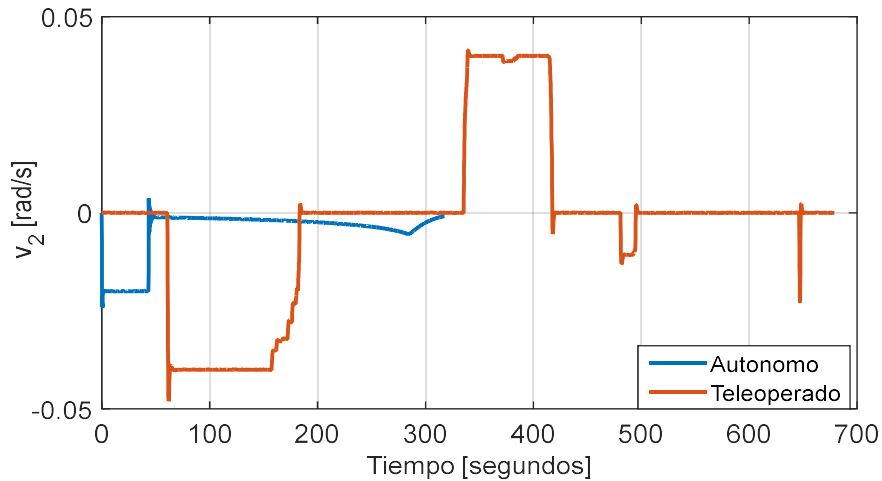


Fig. 6.83 Control autónomo vs tele operado 1: velocidad angular del submarino.

Elaborado por: Tomás Núñez

### b) Comparación 2

Para esta segunda prueba se propone llegar a las posiciones deseadas  $x_d = 2.5[m]$  y  $y_d = -20[m]$  partiendo de las condiciones iniciales  $x_o = -6[m]$  y  $y_o = -8[m]$ .

La figura 6.83 muestra el movimiento del submarino en el caso de las dos pruebas, la curva azul es el movimiento del submarino debido al control autónomo y la curva roja son los movimientos realizado por un operador para alcanzar la posición deseada. Notando que el control autónomo alcanza su objetivo luego de 2.83 minutos y el control tele operado se demora 6.12 minutos en lograr el mismo propósito.

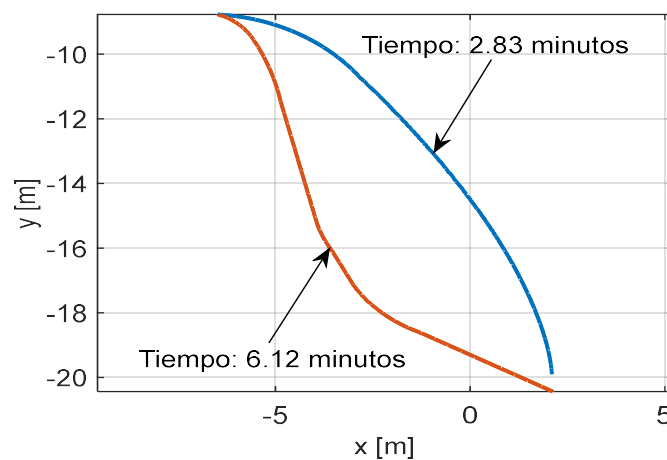


Fig. 6.84 Control autónomo vs tele operado 2: Movimiento del submarino

Elaborado por: Tomás Núñez

Las figuras 6.84 y 6.85, muestran las velocidades lineales y angulares del submarino, respectivamente, para alcanzar la posición deseada mediante el control autónomo y teleoperado. Observando que el control autónomo es más eficiente aplicando las velocidades para lograr su objetivo, y al control teleoperado le toma más tiempo llegar a la posición deseada.

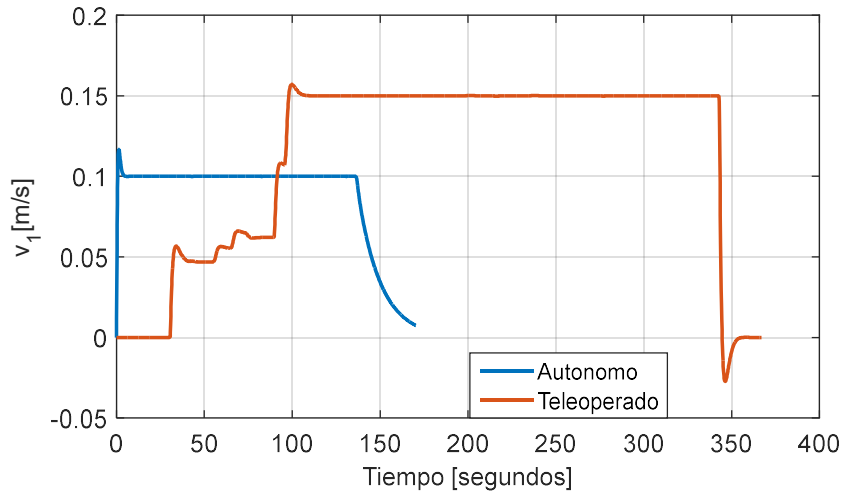


Fig. 6.85 Control autónomo vs teleoperado 1: velocidad lineal del submarino

**Elaborado por:** Tomás Núñez

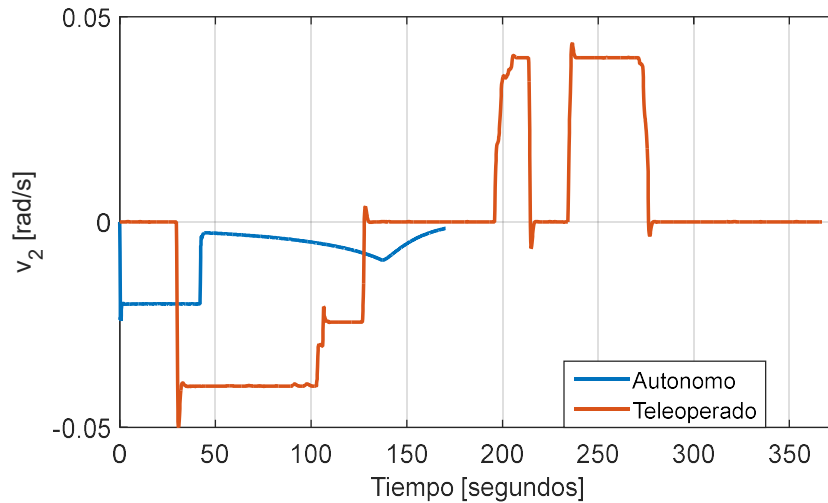


Fig. 6.86 Control autónomo vs teleoperado 2: velocidad angular del submarino

**Elaborado por:** Tomás Núñez



## 6.9. Administración

Este trabajo de investigación requiere de tres tipos de recursos para su funcionamiento: humanos, materiales y económicos, todos detallados a continuación:

### 6.9.1. Recursos humanos

El proyecto se implementa con la participación activa del investigador (Ing. Tomás Núñez) y el tutor (Ing. Patricio Encalada, MsC.), que desarrollaron los componentes de la investigación, de forma que todos los contenidos de este documento permiten entender su funcionamiento y utilizar el simulador obtenido.

### 6.9.2. Recursos Materiales

El sistema implementado es un simulador virtual, por lo que se quieren recursos informáticos (aplicaciones computacionales) y el hardware que permita utilizarlo (dispositivo de control y un procesador que soporte las exigencias de video); los recursos materiales son detallados a continuación:

- Computador portátil con tarjeta de video
- Software Matlab
- Software V-rep.
- Dispositivo de mando – Joystick

### 6.9.3. Recursos Económicos

Para implementar el simulador se requiere adquirir los recursos que se han mencionado, la tabla 6-5 muestra los costos para implementar este simulador virtual.

**Tabla 6-6:** Recursos Económicos del Proyecto

<b>Detalle del producto</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo Unitario</b>	<b>Total</b>
Computador	1	\$1000	\$1000
Joystick	1	\$120	\$120
Software Matlab	1	\$500	\$500
<b>TOTAL</b>			<b>\$1620</b>

**Elaborado por:** Tomás Núñez

## 6.10. Conclusiones y recomendaciones

### 6.10.1. Conclusiones

#### Objetivo 1:

- El modelo cinemático de submarino de dos grados de libertad propuesto se obtiene mediante una matriz de rotación en el eje Z, y permite la transformación lineal de la velocidad lineal y velocidad angular del submarino a las velocidades de plano de trabajo, es decir, un plano XY.
- La dinámica del submarino propuesto se compone de matrices de inercia que consideran las fuerzas intrínsecas del sistema, las fuerzas de masa añadida que consideran el efecto de las fuerzas en el líquido que rodean al submarino, las fuerzas viscosas que frenan el movimiento del submarino, y fuerzas de perturbación; obteniendo una ecuación matricial de segundo orden que determina las fuerzas resultantes del comportamiento dinámico del submarino.
- La dinámica gravitacional del submarino se interpreta mediante un modelo escalar que considera el peso del submarino producido por la gravedad, la fuerza de flotación que es contraria al peso, las fuerzas viscosas que detienen el movimiento del submarino y las fuerzas de perturbación, obteniendo una fuerza resultante que genera la aceleración vertical del comportamiento del submarino.
- Los retardos del canal de comunicación del sistema de tele-operación submarina se modelan mediante un modelo estocástico que determina la latencia de comunicación según una densidad de distribución gamma acumulada, donde los parámetros utilizados en el modelo son: 450ms para la media de latencia en el área de trabajo, 35ms en la desviación estándar de los retardos y 500 metros de distancia máxima entre el sitio local y el sitio remoto.

#### Objetivo 2:

- Para controlar las posiciones deseadas del submarino de manera autónoma se propone un controlador por cinemática inversa, que determina las velocidades lineal y angular del submarino para generar velocidades en el plano de trabajo y cumplir con el objetivo de navegación autónoma, y se incluye en el controlador constantes de ganancia que permiten regular la corrección de error hasta con un margen máximo del  $\pm 1\%$ .

- Las velocidades deseadas que se calculan en el controlador por cinemática inversa o se generan por tele-operación son reguladas por un controlador PID, sintonizando sus ganancias proporcional, integral y derivativa por el método de Ziegler y Nichols, donde se utiliza la dinámica del sistema para obtener los parámetros. Este mismo método es aplicado al control de lastre que permite regular la profundidad del submarino en la dinámica gravitacional del submarino con un tiempo de estabilización aproximado de 5 segundos.
- La dinámica del submarino es cambiante entre una simulación y otra, debido a la complejidad de sus componentes físicos, además, un factor determinante son las perturbaciones del sistema que modifican de manera significativa la respuesta del submarino.

### **Objetivo 3:**

- Se implementa un simulador 3D usando el software V-rep que permite construir el ambiente virtual acuático para la navegación autónoma y tele-operación del submarino, este entorno de simulación contiene los elementos visuales para apreciar el comportamiento del submarino y observar la transmisión de video enviada desde el sitio remoto mediante una cámara virtual.

### **Objetivo 4:**

- Los resultados observados en tele-operación del submarino presentan un retardo entre enviar las órdenes de movimiento desde el sitio local y la respuesta del submarino en el ambiente remoto. Lo que permite determinar las diferencias entre los valores encontrados mediante cálculos matemáticos y un simulador que considera la latencia del sistema.
- Las pruebas de navegación autónoma y tele-operación utilizan todos los elementos matemáticos e informáticos desarrollados para el simulador, y permiten observar el correcto funcionamiento de ambos sistemas.

### **6.10.2. Recomendaciones**

- Para ejecutar el simulador es importante realizar la configuración necesaria para conectar Matlab con V-rep como se detalla en este documento.
- La metodología aplicada en este proyecto se puede utilizar para modelar y controlar otro tipo de submarino, con diferentes grados de libertad, siempre y cuando se conozcan sus características cinemática y dinámicas.
- En trabajos futuros se podría aplicar los resultados obtenidos en este proyecto de investigación en un submarino real.
- Otro de los trabajos futuros podría ser la reconstrucción tridimensional del espacio acuático frente al submarino y utilizar esta información para la evasión de obstáculos.

## REFERENCIAS

- AnyKode. (16 de 11 de 2017). *Simulating your robotics applications*. Obtenido de <http://www.anykode.com/marilou.php>
- Barrientos, A., Peñin, L. F., Balaguer, C., & Aracil, R. (2007). *Fundamentos de Robótica*. España: McGraw-Hill.
- Bhopale, P. S., Bajaria, P. K., Kazi, F. S., & Singh, N. M. (2016). LMI Based Depth Control for Autonomous Underwater Vehicle. *International Conference on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies*, 477-481.
- Bhopale, P., Bajaria, P., Singh, N., & Kazi, F. (2017). Enhancing Reduced Order Model Predictive Control for Autonomous Underwater Vehicle. *Advanced Computational Methods for Knowledge Engineering*, 60-71.
- Boiko, I. (2013). *Non-parametric Tuning of PID Controllers*. London: Springer.
- Bryson, M., Johnson-Roberson, M., Pizarro, O., & Williams, S. B. (2015). True Color Correction of Autonomous Underwater Vehicle Imagery. *Journal of Field Robotics*, 1-22.
- Cabrera, D., & Soria, N. (2012). *Submarino USFQ*. Quito: USFQ.
- Chopitea Cantos, J. A., & Ayala, P. (2010). *Diseño y construcción de un prototipo de robot submarino para la inspección de los cascos de buques,(Fase Uno)*. Sangolqui: ESPE.
- Coppelia-Robotics. (01 de Febero de 2018). *Virtual Robot Experimentation Platform*. Obtenido de <http://www.coppeliarobotics.com/helpFiles/index.html>
- Elena López, J. P. (Diciembre de 2007). *STUDYLIB*. Obtenido de <http://studylib.es/doc/8489021/simuladores-en-rob%C3%B3tica-documento-pdf>
- Emmanuel Nuño Ortega, L. B. (25 de 11 de 2004). *Universidad Tecnica de Catalunya*. Obtenido de <http://upcommons.upc.edu/handle/2117/570>

- Encarnacao, P., & Pacoal, A. (2000). 3D Path Following for Autonomous Underwater Vehicle. *Conference on Decision and Control*.
- Esfandiari, R. S., & Lu, B. (2014). *Modeling and Analysis of dynamics system*. Boca Raton: CRC Press.
- Fossen, T. I. (2002). Marine Control Systems. Guidance, Navigation, and Control of ships, rigs and underwater vehicles. *Marine Cybernetics*.
- Garcia, I. A. (2005). *Teoria de Estabilidad y Control*. Cargraphics.
- I. Akyildiz, D. P. (2005). "Underwater acoustic networks: research challenges. *Ad Hoc Networks*, 257–279.
- Kuo, B. C. (1996). *Sistemas de Control Automatico*. MEXICO: Prendice-Hall Hispanoamerica S.A.
- Lagar, D. (2012). *Simuladores para submarinos*. Argentina: Comunidad Submarinista Latinoamericana.
- Llerena Villa, F. O., & Medina Moreira, W. A. (2002). *Diseño de un sistema de comunicaciones interiores para submarinos*. Guayaquil: ESPOL.
- Maraver, J. J. (2015). *Piziadas*. Obtenido de <http://piziadas.com/2014/09/animacion-armatures-en-blender-que-es-la-cinematica-inversa.html>
- marietta. (01 de September de 2008). *The Physical Properties of Water*. Obtenido de [http://w3.marietta.edu/~biol/biomes/water\\_physics.htm](http://w3.marietta.edu/~biol/biomes/water_physics.htm)
- Martín Hernández Ordoñez, M. B. (2015). *Robótica: Análisis, modelado, control e implementación*. Victoria, Tamaulipas, México: OmniaScience.
- MathWorks. (2014). *MathWorks*. Obtenido de <https://es.mathworks.com/videos/simulation-of-collision-avoidance-for-mobile-robots-97765.html>
- Mathworks. (16 de 11 de 2017). *Robotics and Autonomous Systems*. Obtenido de <https://www.mathworks.com/solutions/robotics.html>
- Microsoft. (15 de 11 de 2017). *Welcome to Robotics Developer Studio*. Obtenido de <https://msdn.microsoft.com/en-us/library/bb648760.aspx?f=255&MSPPError=2147217396>

- Moreno Avalos, H. (2013). *Modelado, Control y Diseño de Robots Submarinos de Estructura Paralela con Impulsores Vectorizados*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales.
- Moreno, H. (2013). *Modelado, Control y Diseño de Robots Submarinos de Estructura Paralela con Impulsores Vectorizados*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales.
- Nägeli, T., Meier, L., Domahidi, A., Alonso-Mora, J., & Hilliges, O. (2017). Real-time planning for automated multi-view drone cinematography. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 1-14.
- Nogueira, L. L. (2014). Comparative Analysis Between Gazebo and V-REP. *Semantic Scholar*.
- Ogata, K. (1998). *Ingeniería en Control Moderna*. Prentice-Hall Hispanoamericana S.A.
- Oliviera, M. d. (01 de 11 de 2017). *Pesquisa FAPESP*. Obtenido de <http://revistapesquisa.fapesp.br/es/2007/11/01/robots-acuaticos/>
- Ollero, A. (2001). *Robótica, Manipuladores y robots móviles*. Barcelona: MARCOMBO.
- Ordoñez, M. H. (2015). *Robótica*. Mexico: Omnia Publisher.
- Pesquisa. (12 de 11 de 2017). *Robots acuáticos*. Obtenido de <http://revistapesquisa.fapesp.br/es/2007/11/01/robots-acuaticos/>
- Piziadas. (14 de 11 de 2017). *Animación : Armatures en Blender : ¿Qué es la cinemática inversa?* Obtenido de <http://piziadas.com/2014/09/animacion-armatures-en-blender-que-es-la-cinematica-inversa.html>
- Piziadas. (5 de 11 de 2017). *Animación: ¿Qué es la cinemática inversa?* Obtenido de <http://piziadas.com/2014/09/animacion-armatures-en-blender-que-es-la-cinematica-inversa.html>
- playerstage. (1998). *willowgarage*. Obtenido de <http://www.willowgarage.com/pages/software/player>

- Playerstage. (14 de 11 de 2017). *Gazebo: 3D multiple robot simulator with dynamics*.  
Obtenido de <http://playerstage.sourceforge.net/gazebo/gazebo.html>
- Pshikhopov, K., Medvedev, Y., & Gurenko, B. (2014). Homing and Docking Autopilot Design for Autonomous Underwater Vehicle. *Applied Mechanics and Materials*, 700-707.
- Red Calvo, J. d. (2015). *Modelado, Simulación y Control de un Vehículo Submarino Manipulado de forma Remota (ROV)*. Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena.
- Sam. (2011). *upcommons*. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/93642/07Sam07de15.pdf?sequence=7&isAllowed=y>
- Siciliano, B. S. (2009). Robotics. En *Modelling, Planning and Control* (págs. 161-189). London: Springer-Verlag London.
- Siciliano, B., & Khatib, O. (2008). *Handbook of Robotics*. Berlin: Springer-Verlag Berlin.
- Siciliano, B., & Oussama, K. (2008). *Handbook of Robotics*. Berlin: Springer.
- Sira-Ramírez, H., López-Urbe, C., & Velasco-Villa, M. (2013). Linear Observer-Based Active Disturbance Rejection Control Of The Omnidirectional Mobile Robot. *Asian Journal of Control*, 1-13.
- Tsingas, C., Aramco), M. A., Walker, C., Bunting, T., Postic, E., Rokkan, A., . . . Brizard, T. (2017). SpiceRack™: An autonomous underwater vehicle for efficient seabed seismic acquisition. *SEG International Exposition and 87th Annual Meeting*, 5953-5957.
- Universidad\_de\_Cádiz. (1 de Agosto de 2011). *Oficina del Software Libre y Conocimiento Abierto de la Universidad de Cádiz*. Obtenido de [http://osl2.uca.es/wikijuegos/w/index.php?title=Temario/Captura\\_y\\_Gesti%C3%B3n\\_de\\_Eventos](http://osl2.uca.es/wikijuegos/w/index.php?title=Temario/Captura_y_Gesti%C3%B3n_de_Eventos)
- Vaughan, R. (2009). *playerstage*. Obtenido de <http://playerstage.sourceforge.net/doc/stage-svn/>



- Vega, F. R. (2012). *Eficiencia y control de potencia en canales de comunicaciones acústicas subacuáticas*. Málaga: Tesis Doctoral RIUMA.
- Vervoort, J. (2008). *Modeling and Control of an Unmanned Underwater Vehicle*. Christchurch, New Zealand: University of technology Eindhoven.
- West, M. E., Schmidt, B., & Spears, A. (2015). Autonomous underwater vehicle for advanced exploration of polar environments. *SPIE Newsroom*, 10(1), 1-3.

# **ANEXOS**

## Anexo A: Código en Matlab del modelo cinemático

```
%% ANEXO A
clc
clear all
close all
%Velocidades
v1=0.025;%m/s
v2=0.025;%rad/s
%Constantes
a=0.32;%m
tm=0.1; % tiempo de discretización
t=0:tm:45; % tiempo de simulación
%Condiciones iniciales
qz=0;%rad
xo=0;% metros
yo=0;% metros
%Lazo de simulación
for i=2:length(t)
    qz(i)=qz(i-1)+v2*tm; %integral de la velocidad angular
    R=[cos(qz(i)) -a*sin(qz(i));sin(qz(i)) a*cos(qz(i))]; % Matriz del
modelo
    v=[v1;v2];
    %Cinemática
    PGp=R*v;
    pgxp(i-1)=PGp(1);
    pgyp(i-1)=PGp(2);
    % integral de las velocidades
    x(i-1)=xo+trapz(pgxp)*tm;
    y(i-1)=yo+trapz(pgyp)*tm;
    % graficar el submarino
    submarine(x(i-1),y(i-1),0,qz(i-1),.1)
    axis([-0.35 1.2 -0.35 1.2])
    pause(0.001)
end
% posicion inicial
hold on
plot(x,y)
submarine(xo,yo,0,qz(1),.1)
title('Submarino en movimiento')
xlabel('x[m]')
ylabel('y[m]')
axis([-0.35 1.2 -0.35 1.2])
%% velocidad en x
t(end)=[];
figure
plot(t,pgxp),grid on
xlabel('tiempo [segundos]')
ylabel('Velocidad X [m/s]')
%% velocidades en y
figure
plot(t,pgyp),grid on
xlabel('tiempo [segundos]')
ylabel('Velocidad Y[m/s]')
%% ángulo del submarino
```

```
qz(end)=[];  
figure  
plot(t,qz),grid on  
xlabel('tiempo [segundos]')  
ylabel('\theta_z [rad]')
```

## Anexo B: Código en Matlab del modelo dinámico

```

%% Anexo B
clc
clear all
close all
%constantes
a=0.32;%m
c=0.15;%m
p=1027;%kgr/m3
Cd=0.42;%coeficiente de arrastre
Av1=pi*c^2;
Av2=pi*a*c;
e=sqrt(1-(c/a)^2); %excentricidad
alpha0=2*(1-e^2)/e^3*(1/2*log((1+e)/(1-e))-e);
beta0=1/e^2-(1-e^2)/(2*e^3)*log((1+e)/(1-e));
m=30;%kgrs
ms=4/3*pi*p*a*c^2;
%condiciones iniciales
v1=0;%m/s
v2=0;%rad/s
fx=0.1;%N
tz=0.025;%N*m
w=[0;0];
qz=0;%rad
tm=0.1;
t=0:tm:45; % tiempo de simulación
xo=0;
yo=0;
zo=0;
v=[v1;v2];
%lazo de simulación
for i=2:length(t)
    %Matrices Dinamicas
    M=[m-alpha0*ms/(2-alpha0) 0;0 ...
        m/5*(a^2+c^2)-ms/5*((c^2-a^2)*(alpha0-beta0))/(2*(c^2-
a^2))+((c^2+a^2)*(alpha0-beta0))];
    C=[0 -a*m*v2(i-1);a*m*v2(i-1) 0];
    D=1/2*p*[Cd*Av1*abs(v1(i-1)) 0;0 Cd*2*Av2*a^3*abs(v2(i-1))];
    T=[fx;tz];
    wt=[rand-0.5;rand-0.5]/2000;%perturbaciones
    w=w+wt; % perturbacion creciente (acumula)
    % separa las perturbaciones para graficar
    w1(i)=w(1);
    w2(i)=w(2);
    %Modelo Dinámico
    vp=inv(M)*(T+w-C*v-D*v);
    v1p(i)=vp(1);
    v2p(i)=vp(2);
    %integral de las aceleraciones
    v1(i)=v1(1)+trapz(v1p)*tm;
    v2(i)=v2(1)+trapz(v2p)*tm;
    v=[v1(i);v2(i)];
    %Cinematica
    qz(i)=qz(i-1)+v2(i)*tm;
    R=[cos(qz(i)) -a*sin(qz(i));sin(qz(i)) a*cos(qz(i))];

    PGp=R*v;
    pgxp(i-1)=PGp(1);

```

```

    pgyp(i-1)=PGp(2);
    x(i-1)=xo+trapz(pgxp)*tm;
    y(i-1)=yo+trapz(pgyp)*tm;
    %GRaficar submarino
    submarine(x(i-1),y(i-1),0,qz(i-1),.1)
    axis([-0.35 1.2 -0.35 1.2])
    pause(0.001)
end
%Posicion Inicial
hold on
plot(x,y)
submarine(xo,yo,0,qz(1),.1)
submarine(x(end),y(end),0,qz(end),.1)
title('Submarino en movimiento')
xlabel('x[m]')
ylabel('y[m]')
axis([-1.5 1.5 -0.35 2.5]),grid on
%% velocidad 1
figure
plot(t,v1),grid on
xlabel('tiempo [segundos]')
ylabel('Velocidad v_1 [m/s]')
%% velocidad 2
figure
plot(t,v2),grid on
xlabel('tiempo [segundos]')
ylabel('Velocidad v_2 [rad/s]')
%% aceleracion 1
figure
plot(t,v1p),grid on
xlabel('tiempo [segundos]')
ylabel('Aceleración de v_1 [m/s]')
%% aceleracion 2
figure
plot(t,v2p),grid on
xlabel('tiempo [segundos]')
ylabel('Aceleración de v_2 [rad/s^2]')
%
%% velocidad en x
t(end)=[];
figure
plot(t,pgxp),grid on
xlabel('tiempo [segundos]')
ylabel('Velocidad X [m/s]')
%% velocidad en y
figure
plot(t,pgyp),grid on
xlabel('tiempo [segundos]')
ylabel('Velocidad Y[m/s]')
%% angulo del submarino
qz(end)=[];
figure
plot(t,qz),grid on
xlabel('tiempo [segundos]')
ylabel('\theta_z [rad]')

```

## Anexo C: Código en Matlab del modelo de restitución

```
%% Anexo C
clc
clear all
close all
%constantes
a=0.32;%m
c=0.15;%m
p=1027;%kgr/m3
m=30;%kgrs
g=9.8;%m/s2
V=4/3*pi*c^2*a;
Az=pi*a*c;
Cdz=0.82;
wz=0.01;
B=p*g*V;
W=m*g;
go=0;
mo=0;
tm=0.1;
t=0:tm:5; % tiempo de simulación hasta que se estabiliza la velocidad
%Condiciones iniciales
vz=0;%m/s
fz=0.0;%N
wz=0;
zo=-5;
z=zo;
% Lazo de simulación
for i=2:length(t)
    go=-mo*g;
    wz(i)=(rand-0.5)/10+wz(i-1);%perturbación
    % modelo de restitución
    az(i)=(fz+go+wz(i)-(W-B)-1/2*p*Cdz*Az*abs(vz(i-1))*vz(i-1))/m;
    vz(i)=vz(i-1)+az(i)*tm;
    z(i)=zo+trapz(vz)*tm;
end
%Posicion inicial
hold on
plot3(z*0,z*0,z)
submarine(0,0,zo,0,.1)
submarine(0,0,z(end),0,.1)
title('Submarino en movimiento')
% xlabel('x[m]')
axis([-1.5 1.5 -.35 2.5]),grid on
%% aceleración z
figure
plot(t,az),grid on
xlabel('tiempo [segundos]')
ylabel('a_z [m/s]')
%% velocidad z
figure
plot(t,vz),grid on
xlabel('tiempo [segundos]')
ylabel('v_z [m/s]')
```

## Anexo D: Código en Matlab del modelo de comunicación

```
%% Anexo D
clc
clear all
close all
% Parametros
s=0.025;
xm=0.35;
b=s/xm; % parametro b
a=xm^2/s; % parametro a

grid on
%distancias
d=50:150;
% densidad acumulada incial
po=0.1;
%maxima distancia
dm=200;
for i=1:length(d)
    % densidad de probabilidad
    p=po+d(i)/(dm);
    % inversa de la distribución gamma
    xt=gaminv(p+rand/100,a,b);
    l(i)=xt;%latencia
end
% Grafico de latencia
figure,plot(l,d);grid on
xlabel('x_t[segundos]');ylabel('d[m]');
```



## Anexo E: Código en Matlab del control de posición por cinemática inversa

```
%% Anexo E
clc
clear all
close all
%Constantes
a=0.32;%m
tm=0.1;
t=0:tm:120;
%Condiciones Iniciales
qz=0;%rad
xo=0;
yo=0;
zo=0;
x=xo;
y=xo;
v2=0;
%Posicion deseada
xd=3;
yd=3;
%Ganacias del control por cinemática inversa
Ke1=.1;
Ke2=.04;
%lazo de simulación
for i=2:length(t)
    qz(i)=qz(i-1)+v2(i-1)*tm;
    % Matriz cinemática
    R=[cos(qz(i)) -a*sin(qz(i));sin(qz(i)) a*cos(qz(i))];
    %Errores
    ex=xd-x(i-1);
    ey=yd-y(i-1);
    E=[Ke1*ex;Ke2*ey];
    %Cinemática Inversa
    v=inv(R)*E;

    v1(i)=v(1);
    v2(i)=v(2);
    %Cinemática Directa
    v=[v1(i);v2(i)];
    PGp=R*v;
    pgxp(i-1)=PGp(1);
    pgyp(i-1)=PGp(2);
    %Integral de las velocidades
    x(i)=xo+trapz(pgxp)*tm;
    y(i)=yo+trapz(pgyp)*tm;
    %Graficar submarino
    submarine(x(i),y(i),0,qz(i),.1)
    axis([-0.35 4 -0.35 4])
    pause(0.001)
end
%Posición Inicial
hold on
plot(x,y)
submarine(xo,yo,0,qz(1),.1)
title('Submarino en movimiento')
xlabel('x[m]')
ylabel('y[m]')
axis([-0.35 4 -0.35 4])
```

```
%% Velocidad 1
figure
plot(t,v1),grid on
xlabel('tiempo [segundos]')
ylabel('v_1 [m/s]')
%% Velocidad 2
figure
plot(t,v2),grid on
xlabel('tiempo [segundos]')
ylabel('v_2 [m/s]')
```

## Anexo F: Código en Matlab del control PID de velocidades

```

%% Anexo F
clc
clear all
close all
%Constantes
a=0.32;%m
c=0.15;%m
p=1027;%kgr/m3
Cd=0.42;%coeficiente de arrastre
Av1=pi*c^2;
Av2=pi*a*c;
e=sqrt(1-(c/a)^2);
alpha0=2*(1-e^2)/e^3*(1/2*log((1+e)/(1-e))-e);
beta0=1/e^2-(1-e^2)/(2*e^3)*log((1+e)/(1-e));
m=30;%kgrs
ms=4/3*pi*p*a*c^2;
%Condiciones Iniciales
w=[0;0];
qz=0;%rad
tm=0.1;
t=0:tm:6;
xo=0;
yo=0;
zo=0;
v1=0;%m/s
v2=0;%rad/s
v=[v1;v2];
v1d=0.08;
v2d=0.04;%rad/s
%Ganancias PID
Kp=diag([14*4,14]);
Ki=diag([47;47]);
Kd=diag([1;1]);
%Lazo de simulacion
for i=2:length(t)
    %constantes dinámicas
    M=[m-alpha0*ms/(2-alpha0) 0;0 ...
        m/5*(a^2+c^2)-ms/5*((c^2-a^2)*(alpha0-beta0))/(2*(c^2-
a^2)+((c^2+a^2)*(alpha0-beta0)))]);
    C=[0 -a*m*v2(i-1);a*m*v2(i-1) 0];
    D=1/2*p*[Cd*Av1*abs(v1(i-1)) 0;0 Cd*2*Av2*a^3*abs(v2(i-1))];
    %Errores de velocidad
    ev1(i-1)=v1d-v1(i-1);
    ev2(i-1)=v2d-v2(i-1);
    ev=[ev1(i-1);ev2(i-1)];
    % Integral del error
    iel=trapz(ev1)*tm;
    ie2=trapz(ev2)*tm;
    ie=[iel;ie2];
    % derivada del error
    del=diff(ev1)/tm;
    de2=diff(ev2)/tm;
    de=[del;de2];
    if isempty(de)
        de=[0;0];
    else
        de=de(:,end);
    end
end

```

```

end
%PID
T_PID=M*(Kp*ev+Ki*ie+Kd*de)+C*v+D*v;
T_PID=Kp*ev+Ki*ie+Kd*de;
fv1(i-1)=T_PID(1);
tv2(i-1)=T_PID(2);

%Perturbaciones
wt=[rand-0.5;rand-0.5]/2000;
w=w+wt;
w1(i)=w(1);
w2(i)=w(2);
%Dinamica
vp=inv(M)*(T_PID+w-C*v-D*v);
v1p(i)=vp(1);
v2p(i)=vp(2);

v1(i)=v1(1)+trapz(v1p)*tm;
v2(i)=v2(1)+trapz(v2p)*tm;
v=[v1(i);v2(i)];
%Cinemática
qz(i)=qz(i-1)+v2(i)*tm;
R=[cos(qz(i)) -a*sin(qz(i));sin(qz(i)) a*cos(qz(i))];

PGp=R*v;
pgxp(i-1)=PGp(1);
pgyp(i-1)=PGp(2);
x(i-1)=xo+trapz(pgxp)*tm;
y(i-1)=yo+trapz(pgyp)*tm;
%Graficar el submarino
submarine(x(i-1),y(i-1),0,qz(i-1),.1)
axis([-0.35 1.2 -0.35 1.2])
pause(0.001)
end
%POsicion inicial
hold on
plot(x,y)
submarine(xo,yo,0,qz(1),.1)
submarine(x(end),y(end),0,qz(end),.1)
title('Submarino en movimiento')
xlabel('x[m]')
ylabel('y[m]')
axis([-1.5 1.5 -0.35 2.5]),grid on
%% Velocidad 1
figure
plot(t,v1),grid on
xlabel('Tiempo [segundos]')
ylabel('Velocidad v_1 [m/s]')
%% Velocidad 2
figure
plot(t,v2),grid on
xlabel('Tiempo [segundos]')
ylabel('Velocidad v_2 [rad/s]')
%% aceleración 1
figure
plot(t,v1p),grid on
xlabel('Tiempo [segundos]')
ylabel('Aceleración de v_1 [m/s^2]')
%% aceleración 2
figure
plot(t,v2p),grid on

```

```

xlabel('Tiempo [segundos]')
ylabel('Aceleración de v_2 [rad/s^2]')
%% fuerza
t(end)=[];
figure
plot(t, fv1), grid on
xlabel('Tiempo [segundos]')
ylabel('Fuerza f_v_1 [N]')
%% torque
figure
plot(t, tv2), grid on
xlabel('Tiempo [segundos]')
ylabel('Torque t_v_2 [Nm]')
%% errores de velocidad
figure
plot(t, ev1), grid on
xlabel('Tiempo [segundos]')
ylabel('Error v_1 [m/s]')
figure
plot(t, ev2), grid on
xlabel('Tiempo [segundos]')
ylabel('Error v_2 [m/s]')

```

## Anexo G: Código en Matlab del control de lastre

```
%% Anexo G
clc
clear all
close all
%constantes
a=0.32;%m
c=0.15;%m
p=1027;%kgr/m3
m=30;%kgrs
g=9.8;%m/s2
V=4/3*pi*c^2*a;
Az=pi*a*c;
Cdz=0.82;
wz=0.01;
B=p*g*V;
W=m*g;
tm=0.1;%seg
t=0:tm:50;
%Condiciones iniciales
vz=0;%m/s
fz=0;%N
wz=0;%N
zo=-5;%m
z=zo;
go=0;
mo=0;
zd=-2;
%Ganancias
kc=2.5;
Kpm=kc*0.59;
tc=9;
Kim=1.18*kc/tc;
Kdm=0.074*kc*tc;
% Lazo de simulacion
for i=2:length(t)
    %Error de profundidad
    ez(i-1)=zd-z(i-1);
    %Integral del error
    iez=trapz(ez)*tm;
    %derivada del error
    dez=diff(ez)/tm;
    if isempty(dez)
        dez=0;
    end
    dez=dez(end);
    %PID
    dm(i-1)=Kpm*ez(i-1)+Kim*iez+Kdm*dez;
    mo=mo+dm(i-1);
    go=mo*g;
    %Perturbaciones
    wz(i)=(rand-0.5)/1000+wz(i-1);
    %Modelo de resitución
    az(i)=(fz+go+wz(i)-(W-B)-1/2*p*Cdz*Az*abs(vz(i-1))*vz(i-1))/m;
    vz(i)=vz(i-1)+az(i)*tm;
    z(i)=zo+trapz(vz)*tm;
end
```

```

%Posición inicial
hold on
plot3(z*0,z*0,z)
submarine(0,0,z0,0,.1)
submarine(0,0,z(end),0,.1)
title('Submarino en movimiento')
axis([-1.5 1.5 -.35 2.5]),grid on
%% aceleración z
figure
plot(t,az),grid on
xlabel('tiempo [segundos]')
ylabel('a_z [m/s^2]')
%% velocidad z
figure
plot(t,vz),grid on
xlabel('tiempo [segundos]')
ylabel('v_z [m/s]')

%% posición z
figure
plot(t,z),grid on
xlabel('tiempo [segundos]')
ylabel('z [m]')

```

## Anexo H: Conexión entre Matlab y V-rep

A continuación se describe el procedimiento para conectar Matlab con v-rep.

### 1. Configuración de Matlab

Copiar los archivos de la figura H.1 que se encuentran en la ruta **C:\Program Files\V-REP3\V-REP\_PRO\_EDU\programming\remoteApiBindings\matlab\matlab**.

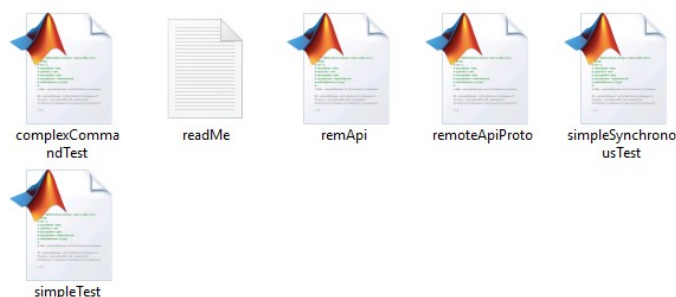


Fig. H.1

Estos archivos deben ser pegados en la dirección de Matlab **C:\Program Files\MATLAB\R2015a\bin**.

Luego debe copiarse el archivo de la figura H.2 que se encuentra en la dirección: **C:\Program Files\V-REP3\V-REP\_PRO\_EDU\programming\remoteApiBindings\lib\lib\Windows\64Bit** y los pegamos en la misma carpeta **bin** de MATLAB.

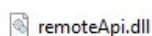


Fig. H.2

### 2. Configuración de V-REP

Esta configuración debe realizarse cada vez que se cree un nuevo entorno de simulación en v-rep:

-En la ventana del programa de simulación en la parte lateral izquierda se debe seleccionar la pestaña de scripts, como se indica en la figura H.3



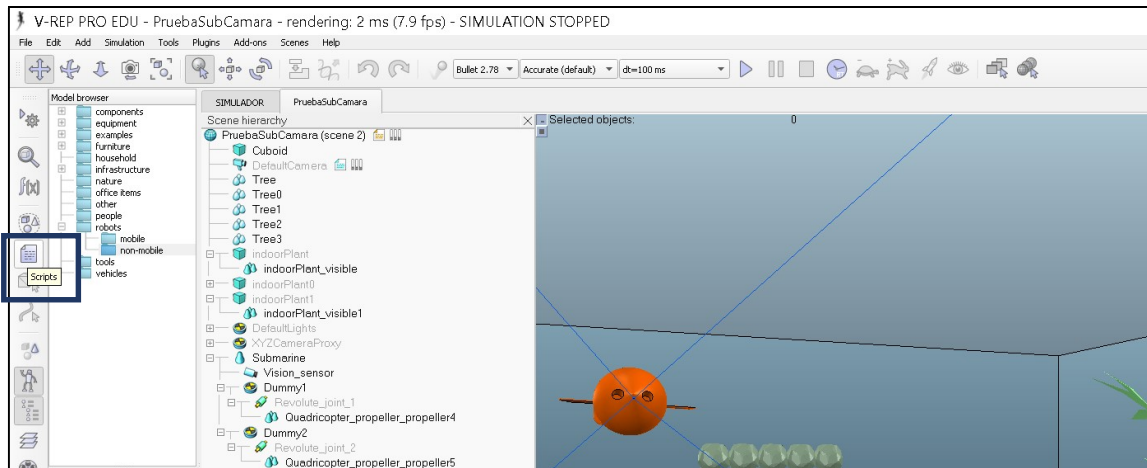


Fig. H.3

- Con esta opción se abre una ventana que contiene todos los scripts de la actual simulación. Ver la figura H.4.

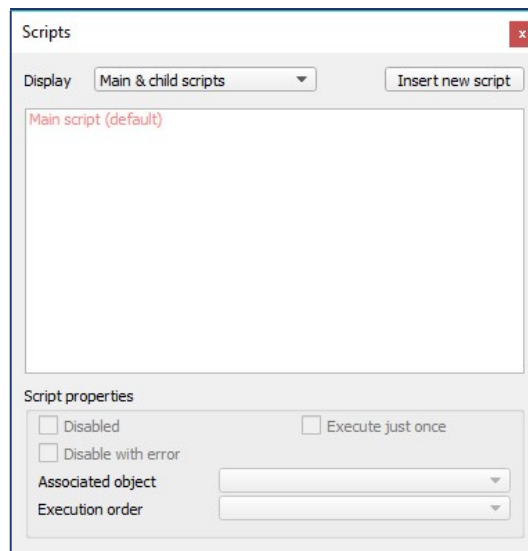


Fig. H.4

-después, se debe crear un nuevo script mediante la opción '**Insert new script**', y del tipo '**Child script (threaded)**' como se muestra en la Figura H.5.

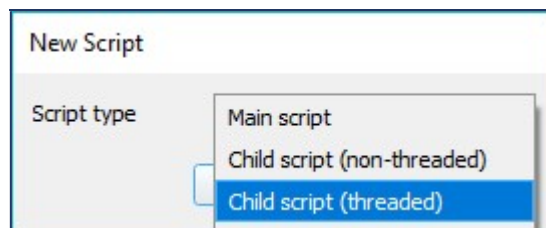


Fig. H.5

- A este nuevo script se debe modificar en la opción “Associated Object” al objeto **DefaultCamera**, ver la figura H.6.

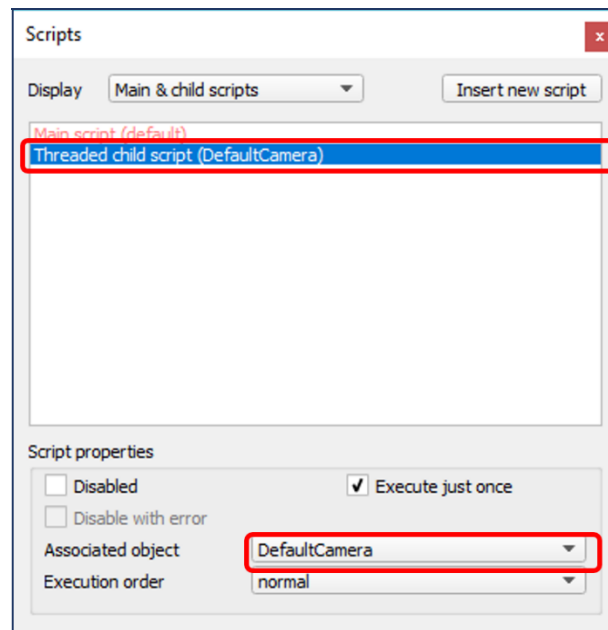


Fig. H.6

- A continuación, se abre el script y se inserta la siguiente línea al código “**simExtRemoteApiStart(19999)**”, el script está vacío. Esta línea permite la comunicación entre V-rep y Matlab.

### 3. Verificación en Matlab

Para comprobar la conexión se debe ejecutar la escena en V-rep y pegar el siguiente código en Matlab:

```
vrep=remApi('remoteApi');
clientID=vrep.simxStart('127.0.0.1',19999,true,true,5000,5)
vrep.simxFinish(clientID);
```

La figura H.7 muestra que la conexión entre las dos aplicaciones es correcta.

```
>> vrep=remApi('remoteApi'); %Crear el objeto vrep y cargar la libreria
clientID=vrep.simxStart('127.0.0.1',19999,true,true,5000,5) %Iniciar conexion con
vrep.simxFinish(clientID); %Terminar la conexion
Note: always make sure you use the corresponding remoteApi library
(i.e. 32bit Matlab will not work with 64bit remoteApi, and vice-versa)

clientID =

0
```

Fig. H.7

## Anexo I: Construcción del Submarino en 3D

A continuación se describe el proceso de construcción del submarino en 3D, realizado en el software SolidWorks:

1. Primeramente se realiza el perfil del diseño de nuestro submarino, en la figura I.1 se muestra las medidas del perfil del submarino. (dimensiones en milímetros)

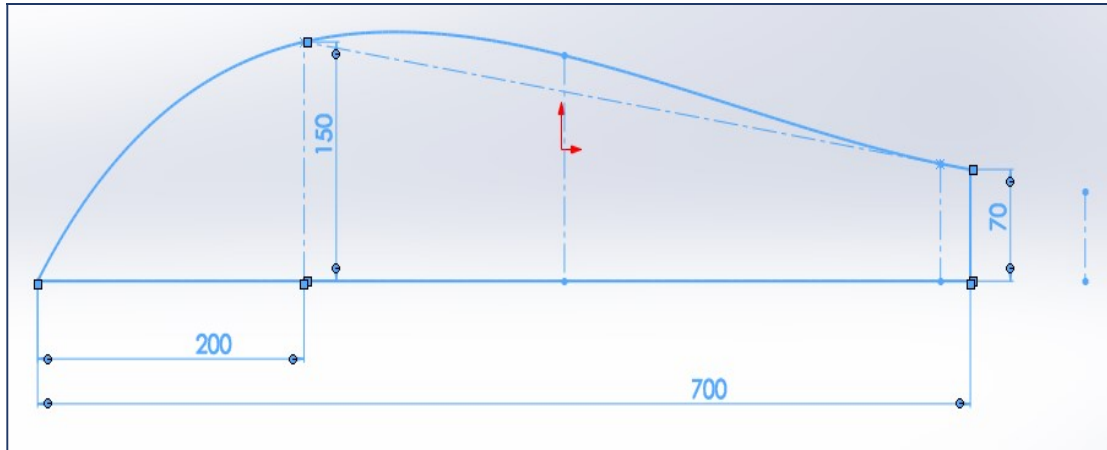


Fig I.1

2. Ya realizado el perfil procedemos a realizar un revolución con el siguiente comando que se muestra en la figura I.2, se procede a seleccionar el eje de revolución.

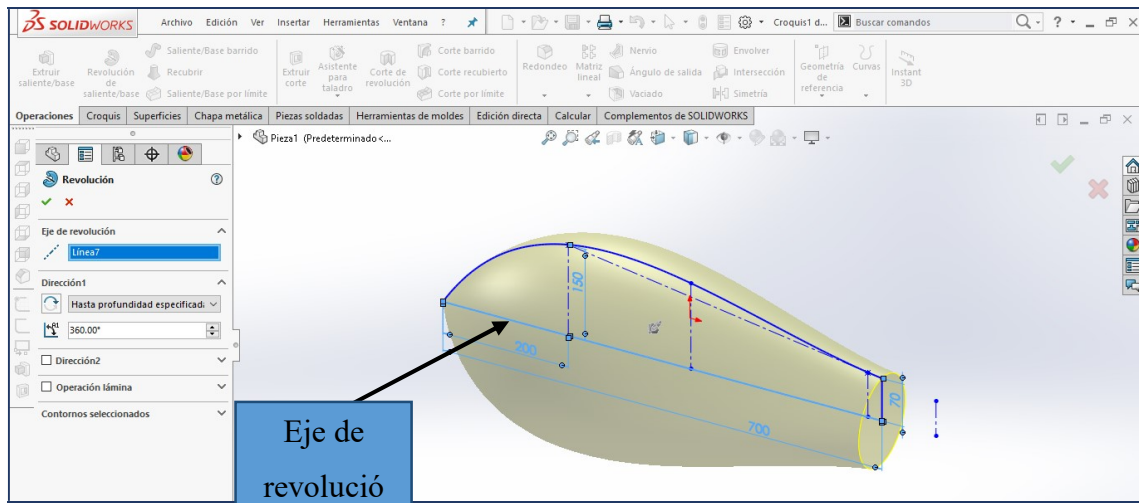


Fig I.2

3. Creamos un nuevo croquis en la parte trasera del submarino para crear las hélices, ver la figura I.3.

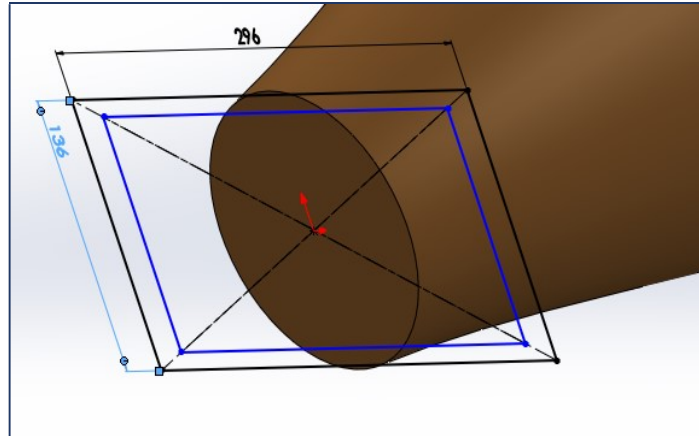


Fig I.3

4. Se procede a extrudir 30 milímetros como se muestra en la figura I.4.

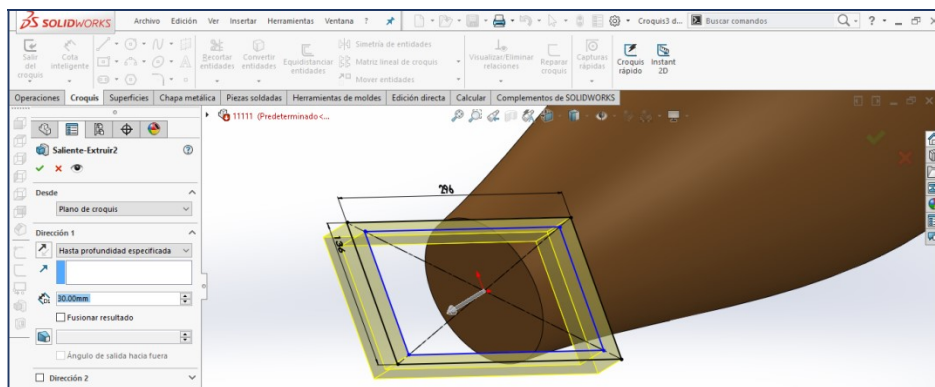


Fig I.4

5. Se procede a crear un nuevo croquis como se muestra en la figura I.5 en la parte interior de la extracción.

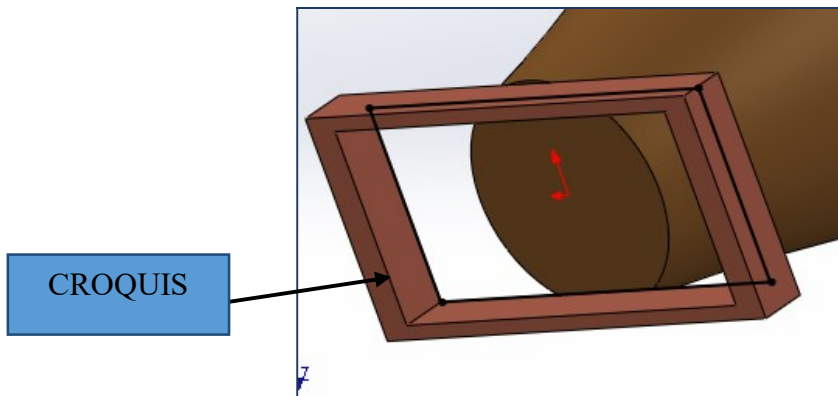


Fig I.5

6. Se procede a extrudir 10 milímetro como se muestra en la figura I.6.

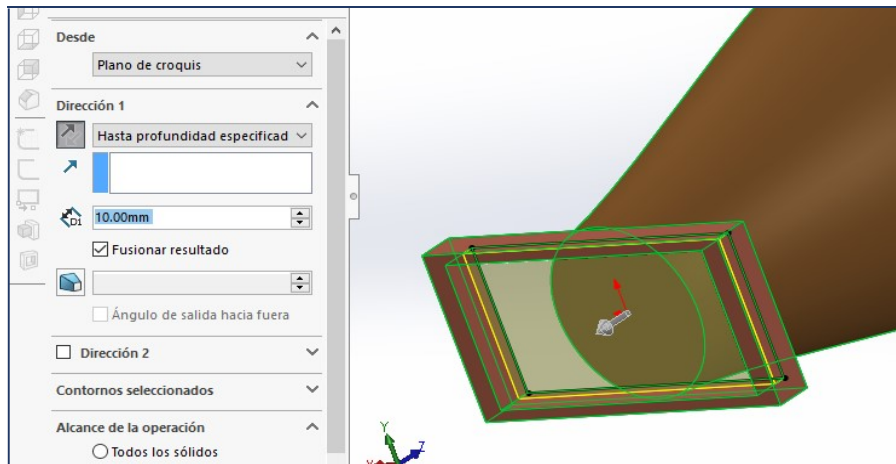


Fig I.6

7. Se crea un nuevo croquis en la extrusión, el detalle se muestra en la figura I.7.

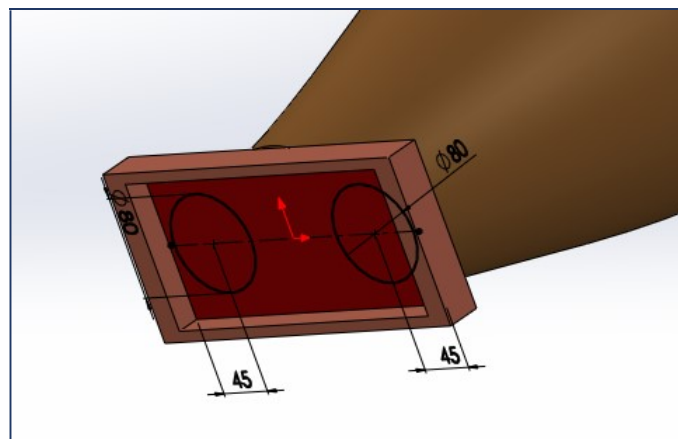


Fig I.7

8. Se procede a extrudir el corte como se muestra en la figura I.8

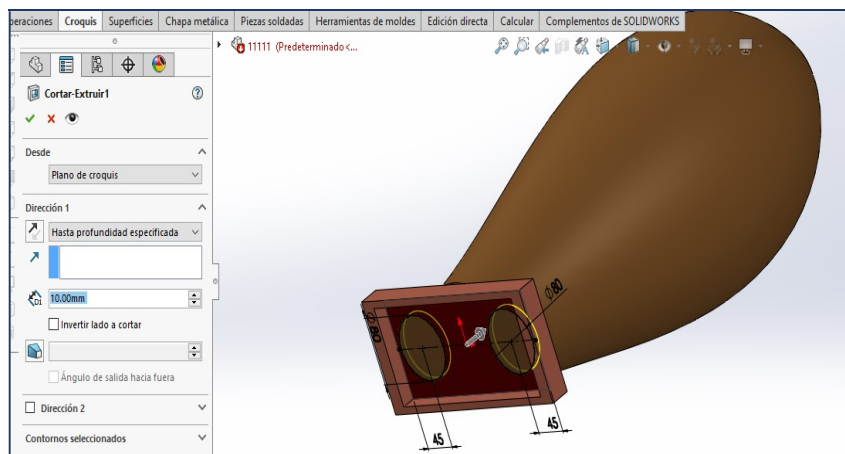


Fig I.8

9. Se procede a realizar un redondeo en la esquinas como se muestra en la figura I.9 con un radio de 40 milímetros.

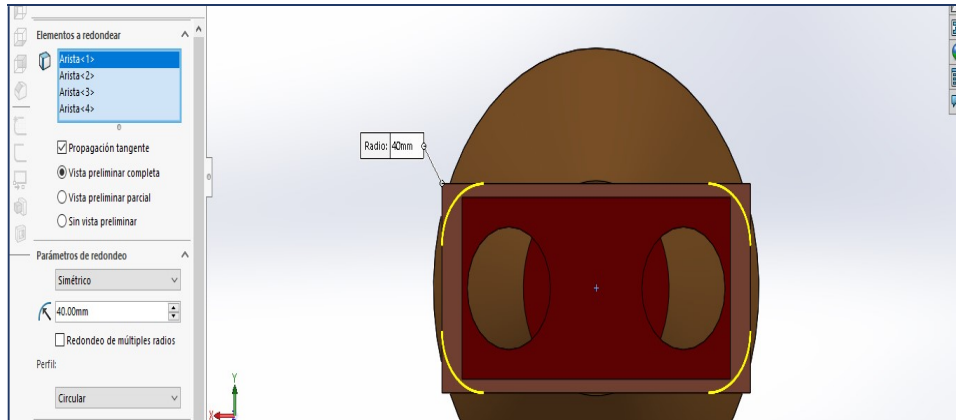


Fig I.9

10. En la figura I.10 se muestra un nuevo croquis creado en el eje de revolución del submarino, este croquis es para la aletas.

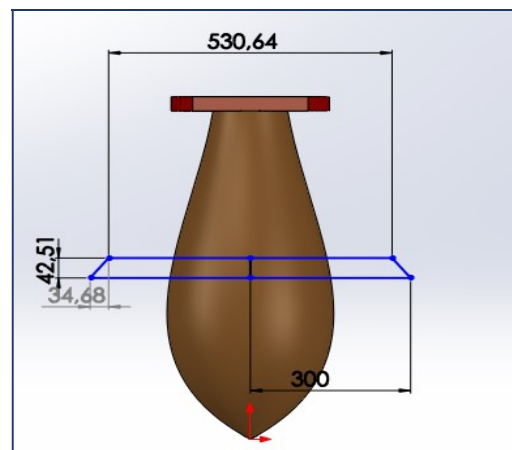


Fig I.10

11. Se procede a extrudir bidireccionalmente las aletas como se muestra en la figura I.11 dada 5 milímetros

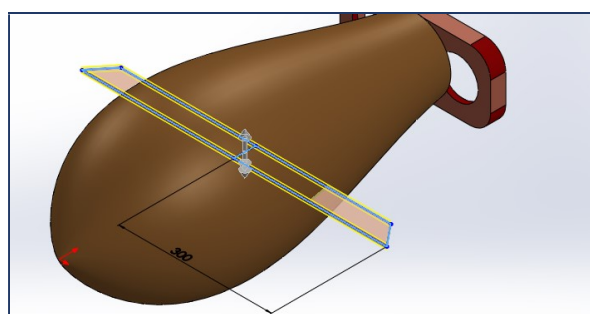


Fig I.11

12. Se procede a realizar la aleta superior creando un nuevo croquis como se muestra en la figura I.12.

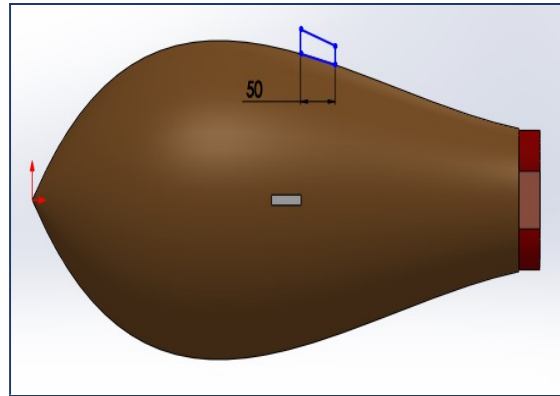


Fig I.12

13. De igual manera se procede a extrudir bidireccionalmente como se muestra en la figura I.13.

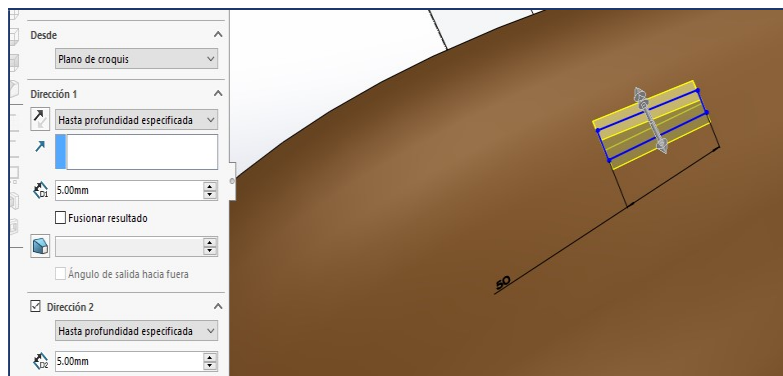


Fig I.13

14. Se redonda la esquinas vivas de las aletas como se muestra en la figura I.14

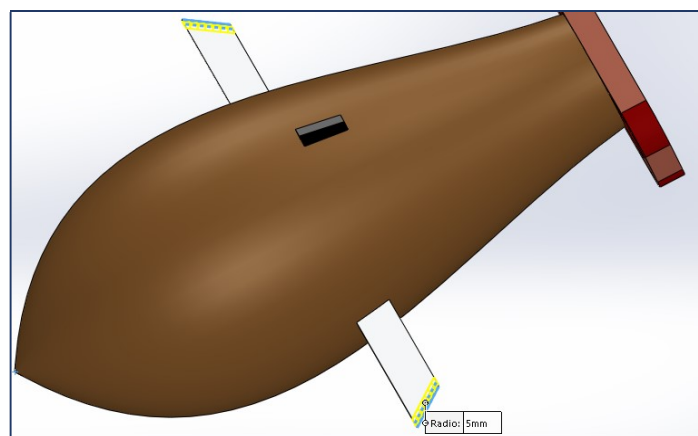


Fig I.14

15. Se redonda la aleta superior, en la figura I.15 se muestra el detalle

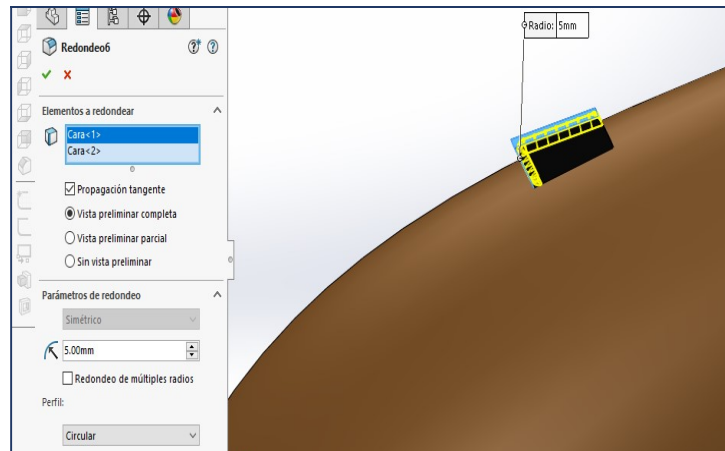


Fig I.15

16. Se procede a crear un nuevo croquis en la parte frontal del submarino para crear la salida de los cañones, ver la figura I.16.

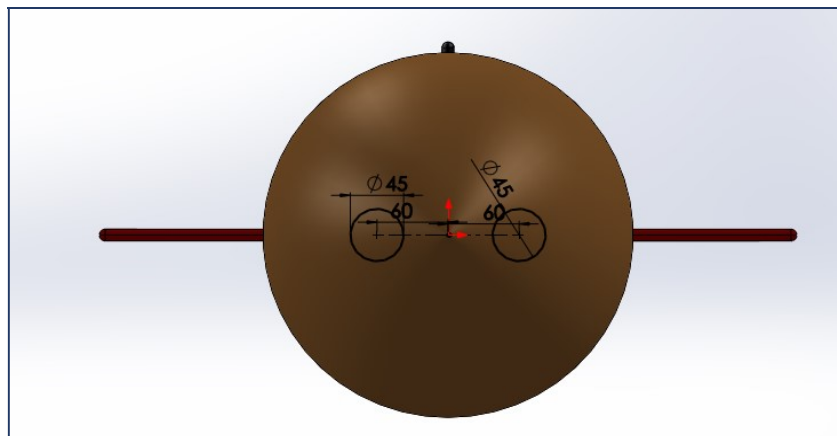


Fig I.16

17. Se procede a extrudir en corte 213 milímetros como se muestra en la figura I.17.

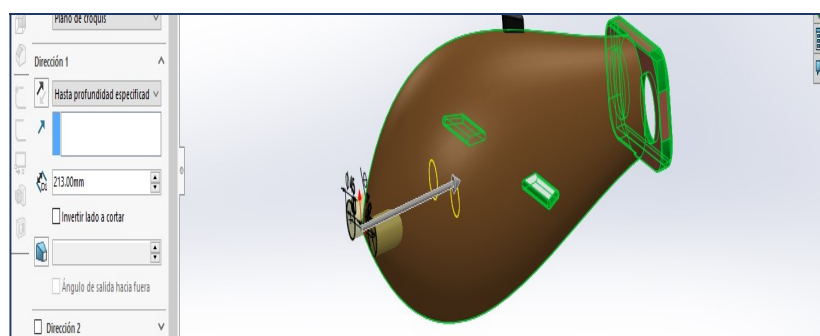


Fig I.17



Finalmente, en la figura I.18 se muestra el submarino terminado desde diferentes vistas.

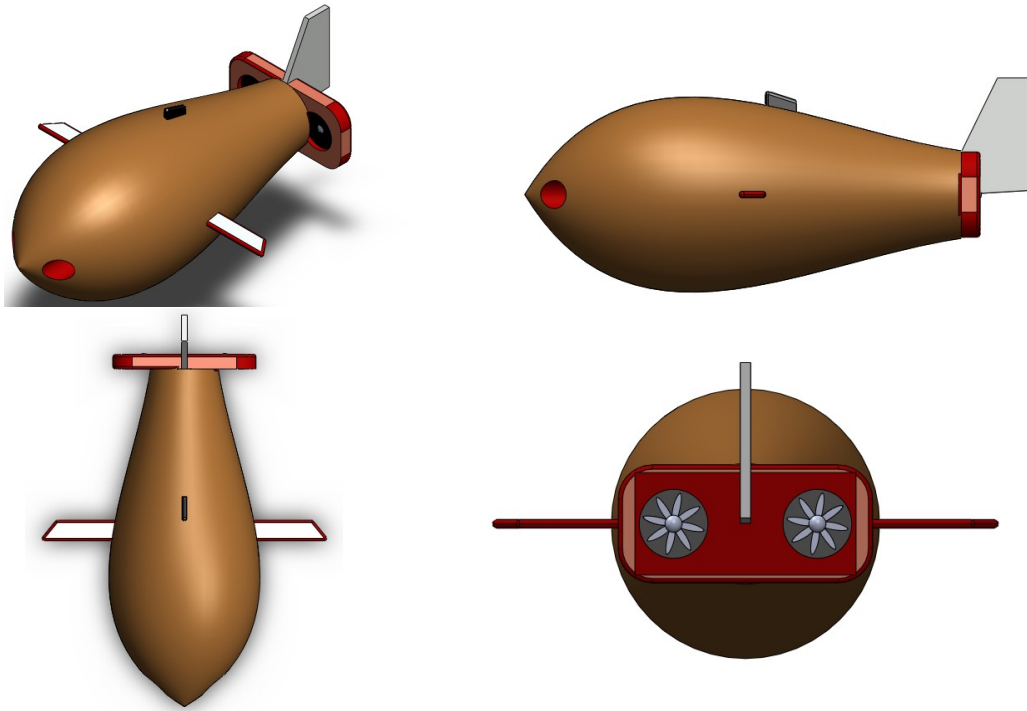


Fig I.18