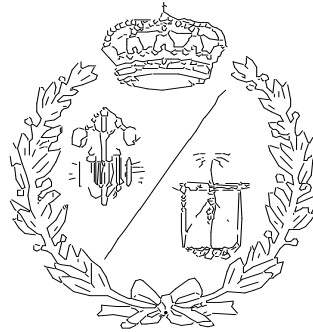


**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Proyecto Fin de Grado

**MODELADO, SIMULACIÓN Y CONTROL DE
UNA PLATAFORMA STEWART PARA LA
ESTABILIZACIÓN DE ACCESO DE
PERSONAS ENTRE INFRAESTRUCTURAS
MARINAS FLOTANTES**

**MODELING, SIMULATION AND CONTROL OF A STEWART
PLATFORM FOR ACCESS STABILIZATION BETWEEN
FLOATING MARINE INFRASTRUCTURES**

Para acceder al Título de

**GRADUADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA**

Autor: Javier De La Pedraja Fernández

09 - 2025

Resumen

En este trabajo de fin de grado se desarrollará el diseño, modelado y simulación de una plataforma Stewart para la estabilización de accesos en entornos marinos. Para ello se emplearán diversos componentes: el robot paralelo, el sistema de control, la sensórica asociada y el software de simulación que reproduce los movimientos del oleaje. Se tratará cómo se relacionan entre sí estos elementos para dar lugar a un sistema de compensación activa de movimiento. El componente central del simulador será la plataforma Stewart, que actuará como mecanismo paralelo encargado de mantener estable la superficie de acceso frente a perturbaciones externas.

Abstract

In this final degree project, the design, modeling and simulation of a Stewart platform for access stabilization in marine environments is developed. Several components are considered: the parallel robot, the control system, the associated sensors and the simulation software that reproduces sea wave motion. The relationship between these elements is analyzed to build an active motion compensation system. The central component of the simulator is the Stewart platform, acting as the parallel mechanism responsible for keeping the access surface stable against external disturbances.

Índice

1. INTRODUCCIÓN.....	10
2. OBJETIVO	11
3. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.....	12
3.1. FUNDAMENTOS DE LA PLATAFORMA STEWART	12
3.2. CINEMÁTICA Y DINÁMICA DE LOS MECANISMOS PARALELOS	14
3.2.1. Cinemática	14
3.2.2. Dinámica.....	16
3.3. TÉCNICAS DE CONTROL APLICADAS	17
3.3.1. Control PID.....	17
3.3.2. Control LQR	20
3.3.3. Control robusto.....	21
3.3.4. Control adaptativo	21
3.4. SENSÓRICA.....	22
3.4.1. Acelerómetros.....	22
3.4.2. Giroscopios.....	22
3.4.3. IMUs.....	23
3.4.4. Encoders	23
3.4.5. Sensores LVDT	23
3.4.6. Tabla comparativa.....	24
3.5. FILTRADO DE SEÑALES.....	25
3.5.1. Kalman	25
3.5.2. Sistemas AHRS.....	25
3.5.3. Complementarios avanzados (Madgwick / Mahony)	26
3.5.4. Observadores robustos (SMO Y HGO).....	26
3.6. ACTUADORES.....	27
3.6.1. Eléctricos	27
3.6.2. Hidráulicos	28
3.6.3. Neumáticos	29
3.6.4. Tabla comparativa.....	29
3.7. TIPOS DE MATERIALES Y CRITERIOS DE DISEÑO EN ENTORNOS OFFSHORE	30
3.7.1. Acero inoxidable marino	30
3.7.2. Aluminio naval	30
3.7.3. Titanio.....	31

3.7.4.	Fibra de carbono.....	31
3.7.5.	Fibra de vidrio	31
3.7.6.	Híbridos	32
3.7.7.	Tabla comparativa.....	32
3.8.	APLICACIONES MARINAS Y SISTEMAS DE COMPENSACIÓN DE MOVIMIENTO	33
3.9.	ESTADO DEL ARTE	35
4.	DISEÑO Y MODELADO DE LA PLATAFORMA STEWART	37
4.1.	CONTEXTUALIZACIÓN DEL USO PROPUESTO.....	37
4.2.	CARGAS Y MÁRGENES DE SEGURIDAD	37
4.3.	GEOMETRÍA DE LA PLATAFORMA	38
4.3.1.	Definición de los parámetros principales	38
4.3.2.	Coordenadas de la base y de la plataforma.....	40
4.3.3.	Longitudes y recorrido de los actuadores	42
4.4.	CONFIGURACIÓN Y SELECCIÓN DE LOS ACTUADORES	43
4.4.1.	Requisitos de los actuadores	43
4.4.2.	Tipo de actuador seleccionado.....	43
4.4.3.	Configuración y consideraciones adicionales	45
4.5.	SENSÓRICA Y SISTEMAS DE MEDIDA	45
4.5.1.	Sensores de los actuadores	46
4.5.2.	Sensores de la base y de la plataforma	47
4.5.3.	Sensores de carga y presión hidráulica.....	48
4.5.4.	Consideraciones adicionales.....	48
4.6.	PROCESADO Y FILTRADO DE LA SEÑAL	49
4.6.1.	Filtrado de la señal de los actuadores	49
4.6.2.	Filtrado de la señal IMU	50
4.6.3.	Procesado de las señales hidráulicas.....	50
4.7.	SELECCIÓN DE MATERIALES Y CRITERIOS DE DISEÑO ESTRUCTURAL	50
4.7.1.	Base y plataforma.....	51
4.7.2.	Actuadores y articulaciones	51
4.7.3.	Cubiertas y protecciones	51
4.7.4.	Tabla de la selección de los materiales.....	52
4.8.	IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO.....	52
4.8.1.	ESTRUCTURA GENERAL DE LA PLATAFORMA	53
4.8.2.	SENSÓRICA Y FILTRADO.....	56

4.8.3.	MATERIALES	57
5.	CINEMÁTICA DE LA PLATAFORMA STEWART.....	58
5.1.	CINEMÁTICA DIRECTA.....	58
5.2.	CINEMÁTICA INVERSA	58
5.3.	IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO.....	59
6.	DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL.....	66
6.1.	TIPO DE CONTROL SELECCIONADO	66
6.2.	IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO.....	67
7.	GENERACIÓN DEL MOVIMIENTO DEL MAR.....	69
7.1.	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL OLEAJE	69
7.1.1.	Representación matemática	69
7.1.2.	Espectro de energía.....	69
7.1.3.	Parámetros físicos.....	70
7.1.4.	Influencia en estructuras flotantes.....	71
7.2.	MODELOS ESPECTRALES DEL MAR	72
7.2.1.	Espectro Pierson-Moskowitz (PM).....	72
7.2.2.	Espectro JONSWAP.....	73
7.2.3.	Tabla comparativa.....	73
7.3.	MOVIMIENTO DE EMBARCACIONES.....	74
7.4.	IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO.....	75
8.	RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN.....	78
8.1.	SIMULACIÓN 1 (ALTURA MÁXIMA DE OLA DE 1,25M)	78
8.2.	SIMULACIÓN 2 (ALTURA MÁXIMA DE OLA DE 3,25M)	81
8.3.	SIMULACIÓN 3 (ALTURA MÁXIMA DE OLA DE 5,5M)	84
8.4.	ANÁLISIS DE LAS SIMULACIONES.....	87
9.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	89
9.1.	CONCLUSIONES.....	89
9.2.	TRABAJOS FUTUROS.....	89
10.	BIBLIOGRAFÍA	91

Índice de figuras

Figura 1: Diagrama esquemático de la plataforma Stewart, mostrando la plataforma móvil y la fija con sus ejes de referencia. Adaptado de Khalil, W., & Dombre, E. (2004). Modeling, Identification and Control of Robots. Hermes Science, Cap. 9, p. 321.	12
Figura 2: Representación de los 6 grados de libertad de la plataforma Stewart Adaptado de Hexapod Applications, Axiom Optics (s.f.).	13
Figura 3: Diagramas esquemáticos de la plataforma Stewart: (a) Descripción geométrica; (b) Ubicación de las juntas de la plataforma móvil; (c) Ubicación de las juntas de la plataforma base. Adaptado de Silva-Muñiz, D., Garrido Campos, J., & Riveiro Fernández, E. (2022). Stewart Platform Motion Control Automation with Industrial Resources to Perform Cycloidal and Oceanic Wave Trajectories. Machines, 10(8), 541.	15
Figura 4: Diagrama de bloques de un controlador PID en un lazo realimentado. Adaptado de Wikipedia. (s.f.). Controlador PID [Diagrama]. https://es.wikipedia.org/wiki/Controlador_PID	18
Figura 5: Estructura de un sistema de control LQR.....	20
Figura 6: Esquema de un Sistema de Referencia de Actitud y Rumbo (AHRS) con sensores de giroscopios, acelerómetros y magnetómetros. Adaptado de UAV Navigation. (s.f.). UAV Navigation en profundidad: Navegación inercial [Esquema]. https://www.uavnavigation.com/es/empresa/blog/uav-navigation-en-profundidad-navegacion-inercial	26
Figura 7: Estructura de un motor eléctrico servo. Adaptado de Zhao, Z., Xu, L., Liu, B., & Yu, J. (2018). Research on Performances of a Displacement Controllable Active Suspension. ResearchGate. https://www.researchgate.net/figure/The-structure-of-the-servo-electric-motor_fig3_328704275	28
Figura 8: Actuador hidráulico de válvula de globo de la serie MS de Cowan Dynamics. Adaptado de Cowan Dynamics. (s.f.). Globe Valve Actuators.. https://www.cowandynamics.com/globe-valve-actuators/Cowan Dynamics+5Cowan Dynamics+5	28
Figura 9: Simulador de vuelo en el centro de entrenamiento de Qatar Airways. Adaptado de FlightGlobal. (2018). How reshaped flight simulator market is adapting to change. https://www.flightglobal.com/aerospace/how-reshaped-flight-simulator-market-is-adapting-to-change/157096.article	34
Figura 10: Representación conceptual de un barco, una plataforma Stewart y un molino offshore afectados por oleaje y viento. Adaptado de DNV. (s.f.). Hydrodynamics advisory services [Ilustración]. https://www.dnv.com/services/hydrodynamics-advisory-services-3729/	37
Figura 11: Ubicación de las juntas en las plataformas base y móvil de una plataforma Stewart. Adaptado de Hernández, E. E., Valdez Peña, S. I., & Sánchez Soto, E. (2013). Towards a Robust Solution of the Non-Linear Kinematics for the General Stewart Platform with Estimation of Distribution Algorithms. International Journal of Advanced Robotic Systems. https://www.researchgate.net/figure/Location-of-the-joints-on-the-base-and-mobile-platforms_fig3_260637657	40
Figura 12: Actuador electrohidráulico Moog para aplicaciones industriales. Adaptado de Moog Inc. (s.f.). Electrohydraulic Servo Actuators [Fotografía]. https://www.moog.com/products/actuators-servoactuators/actuation-technologies/electrohydraulic.html	44

Figura 13: Sensor LVDT para medición de desplazamiento lineal. Adaptado de Sensores de Medida. (s.f.). Sensores de distancia LVDT [Ilustración]. https://sensores-de-medida.es/medicion/sensores-y-transductores/sensores-de-distancia/sensores-de-distancia-lvdt/	47
Figura 14: Señal de salida del filtro AHRS que representa la estimación de la orientación en tiempo real a partir de datos de acelerómetro, giroscopio y magnetómetro. Adaptado de MathWorks. (s.f.). ahrsfilter – Estimación de orientación a partir de lecturas de acelerómetro, giroscopio y magnetómetro [Gráfico]. https://www.mathworks.com/help/nav/ref/ahrsfilter-system-object.html	48
Figura 15: Modelado de la plataforma Stewart en SimScape	53
Figura 16: Modelado de la base en Simscape	54
Figura 17: Modelado de los enganches en Simscape	54
Figura 18: Modelado de un actuador lineal de la plataforma Stewart en Simscape	55
Figura 19: Modelado final de la plataforma Stewart en Simscape	56
Figura 20: Modelado del sistema de sensórica (IMU) y filtrado (AHRS) de las señales medidas de la base en Simscape	57
Figura 21: Modelado de la matriz de rotación en Simscape	60
Figura 22: Modelado de la ecuación $R \cdot \Pi + T \cdot B_i$ en Simscape.....	61
Figura 23: Modelado del módulo en Simscape	62
Figura 24: Modelado de la resta final de la longitud nominal y salida de la posición deseada de cada actuador en Simscape	62
Figura 25: Modelado del uso del módulo ya modelado en el cálculo de la velocidad en Simscape.....	63
Figura 26: Modelado de la obtención $R \cdot \Pi + T'$ en Simscape	64
Figura 27: Visualización del subsistema de la cinemática inversa en Simscape	65
Figura 28: Modelado del controlador PID de posición y velocidad en Simscape	67
Figura 29: Visualización del subsistema del control PID en Simscape	68
Figura 30: Visualización de los movimientos de un barco en el mar. Adaptado de Shipping and Freight Resource. (2022). How to track your cargo anywhere – Product Review – Tive's real-time IoT data tracker. https://www.shippingandfreightresource.com/how-to-track-your-cargo-anywhere-product-review-tives-real-time-iot-data-tracker/	71
Figura 31: Espectro Pierson-Moskowitz que describe la distribución de energía de las olas en función de la frecuencia en un mar completamente desarrollado. Adaptado de Stewart, R. H. (s.f.). 16.4: Ocean-Wave Spectra. En Introduction to Physical Oceanography. LibreTexts. https://geo.libretexts.org/Bookshelves/Oceanography/Introduction_to_Physical_Oceanography_%28Stewart%29/16:_Ocean_Waves/16.4:_Ocean-Wave_Spectra	73
Figura 32: Comparación del espectro de energía del oleaje entre el modelo de Pierson-Moskowitz y datos reales obtenidos en el Golfo de México. Adaptado de Tinoco, H., & López, I. (2014). Ondas Superficiales en el Mar (Review). ResearchGate. https://www.researchgate.net/figure/Figura-16-Comparacion-espectro-de-energia-del-oleaje_fig10_263443211	74
Figura 33: Modelado de las señales del movimiento del mar en Simscape.....	75
Figura 34: Modelado de las diferentes juntas para permitir el movimiento en seis grados de libertad en Simscape.....	76
Figura 35: Modelo general del sistema de movimiento en Simscape	77
Figura 36: Visualización del subsistema del movimiento del mar en Simscape.....	77
Figura 37: Movimiento marino en la simulación 1	78

Figura 38: Error de posición de los actuadores en la simulación 1	79
Figura 39: Fuerza aplicada por los actuadores en la simulación 1	79
Figura 40: Velocidad de los actuadores en la simulación 1	80
Figura 41: Movimiento de traslación de la plataforma en la simulación 1	80
Figura 42: Movimiento de rotación de la plataforma en la simulación 1.....	81
Figura 43: Movimiento marino en la simulación 2	81
Figura 44: Error de posición de los actuadores en la simulación 2.....	82
Figura 45: Fuerza aplicada por los actuadores en la simulación 2	82
Figura 46: Velocidad de los actuadores en la simulación 2	83
Figura 47: Movimiento de traslación de la plataforma en la simulación 2	83
Figura 48: Movimiento de rotación de la plataforma en la simulación 2.....	84
Figura 49: Movimiento marino en la simulación 3	84
Figura 50: Error de posición de los actuadores en la simulación 3.....	85
Figura 51: Fuerza aplicada por los actuadores en la simulación 3	85
Figura 52: Velocidad de los actuadores en la simulación 3	86
Figura 53: Movimiento de traslación de la plataforma en la simulación 3	86
Figura 54: Movimiento de rotación de la plataforma en la simulación 3.....	87

Índice de tablas

Tabla 1: Comparación de los diferentes sensores que integra una plataforma Stewart	24
Tabla 2: Comparación de los diferentes tipos y tecnologías de actuadores	29
Tabla 3: Comparación de los materiales más utilizados en los componentes de una plataforma Stewart.....	32
Tabla 4: Selección de los valores de la geometría de la plataforma Stewart	40
Tabla 5: Valores de las coordenadas de anclaje y de la base calculadas	41
Tabla 6: Valores de las longitudes nominales, mínimas y máximas de los actuadores	43
Tabla 7: Selección del material según el componente de la plataforma Stewart.....	52
Tabla 8: Descripción del movimiento inducido en embarcaciones por el oleaje.	71
Tabla 9: Comparación de los espectros PM y JONSWAP	74

1. INTRODUCCIÓN

El entorno marino presenta desafíos únicos y complejos para la realización de operaciones seguras y eficientes. Los movimientos generados por el oleaje, las corrientes y el viento provocan desplazamientos continuos en barcos, plataformas y grúas, afectando la estabilidad de estas estructuras y aumentando significativamente los riesgos durante las operaciones. Esta inestabilidad dificulta operaciones críticas (transferencia de cargas, perforación, lanzamiento de vehículos) y aumenta los riesgos para el personal y los equipos.

Para mitigar estos problemas, se han desarrollado diversas tecnologías de compensación de movimiento. El objetivo de estos sistemas es minimizar la influencia del entorno, proporcionando condiciones de trabajo más seguras y estables, incluso en condiciones adversas. Entre estas tecnologías, la plataforma Stewart ha demostrado ser especialmente eficaz gracias a su capacidad de generar movimientos en seis grados de libertad mediante actuadores hidráulicos o eléctricos. Integrando sensores inerciales y sistemas de control en tiempo real, la plataforma puede calcular la acción necesaria de cada actuador para estabilizar la plataforma superior frente a perturbaciones externas, garantizando así precisión y seguridad en la operación.

2. OBJETIVO

El presente trabajo se centra en el diseño, modelado, simulación y análisis de una plataforma Stewart aplicada a la compensación de movimiento en entornos marinos. El objetivo principal es desarrollar un sistema capaz de mantener la plataforma móvil lo más estable y horizontal posible, minimizando los movimientos de traslación y rotación, incluso frente a perturbaciones significativas del oleaje.

En primer lugar, se realiza un análisis teórico del sistema, revisando los fundamentos de las plataformas Stewart y las técnicas de control aplicables. A continuación, se desarrolla el diseño del sistema, considerando la geometría de la plataforma, la configuración de los actuadores y los sistemas de sensórica y limitadores. Posteriormente, se lleva a cabo el modelado cinemático de la plataforma, empleando herramientas de simulación para validar el comportamiento de la plataforma y estimar fuerzas y torques en los actuadores. Finalmente, se implementan en Simulink y se analizan los resultados obtenidos, evaluando la eficacia de la plataforma para mantener la estabilidad frente a perturbaciones externas.

Los resultados obtenidos no solo aportan información sobre el desempeño del sistema, sino que también pueden servir como base para futuras investigaciones y aplicaciones, incluyendo simuladores de entrenamiento, operaciones de carga y descarga, y mantenimiento de estructuras marinas.

Este trabajo muestra cómo una plataforma Stewart con control adecuado puede mejorar la estabilidad en entornos marinos, aumentando la seguridad y eficiencia en operaciones.

3. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

3.1. FUNDAMENTOS DE LA PLATAFORMA STEWART

La plataforma Stewart es un mecanismo paralelo ampliamente utilizado en ingeniería por su precisión, rigidez y capacidad de carga. Fue utilizada por primera vez en 1954 por Eric Gough y más tarde descrita detalladamente por D. Stewart en 1965. En 1962, antes de la publicación del artículo de Stewart, el ingeniero Klaus Cappel desarrollo y patento de manera independiente un mecanismo equivalente.

Una plataforma Stewart se compone de dos placas rígidas, una base fija (placa inferior) y una plataforma móvil (placa superior). Estas placas se conectan mediante seis actuadores prismáticos, que suelen ser cilíndricos hidráulicos o eléctricos de husillo de bolas. Los actuadores se fijan en pares en tres posiciones de la base fija y se conectan a tres puntos de la plataforma superior mediante juntas universales. La disposición más común rota la plataforma móvil 60 grados respecto a la base, garantizando que los puntos de anclaje sean equidistantes. Variando la longitud de los actuadores, se controla la posición y orientación de la plataforma superior.

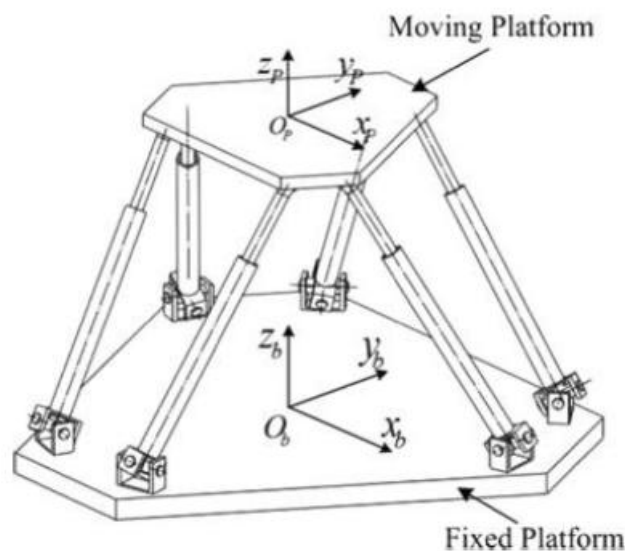


Figura 1: Diagrama esquemático de la plataforma Stewart, mostrando la plataforma móvil y la fija con sus ejes de referencia. Adaptado de Khalil, W., & Dombre, E. (2004). *Modeling, Identification and Control of Robots*. Hermes Science, Cap. 9, p. 321.

La característica principal de la plataforma Stewart es que tiene una estructura paralela, esto permite que la carga y el movimiento se distribuya entre los seis actuadores, aumentando la rigidez estructural y la precisión, ya que los posibles errores se

promedian en vez de acumularse, como ocurriría en robots seriales. Debido a esta disposición y arquitectura, la plataforma móvil cuenta con seis grados de libertad. Esto significa que la plataforma tiene tres movimientos de traslación (lateral, longitudinal y vertical) y tres movimientos de rotación (balanceo, cabeceo y guiñada). El control de los seis grados de libertad se logra variando de manera coordinada las longitudes de los seis actuadores. Esto puede representarse mediante el vector de posición y orientación:

$$P = [x, y, z, \phi, \theta, \psi]^T$$

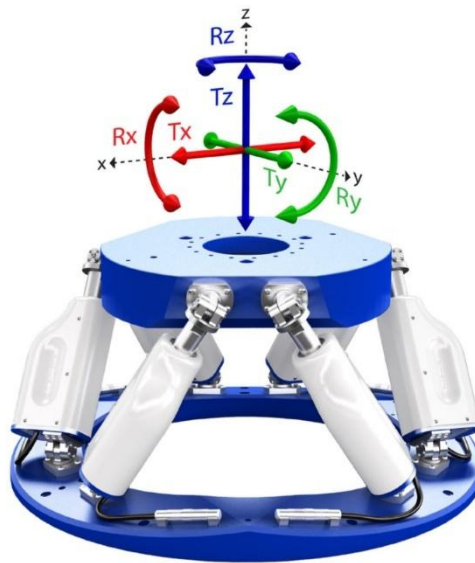


Figura 2: Representación de los 6 grados de libertad de la plataforma Stewart Adaptado de Hexapod Applications, Axiom Optics (s.f.).

Las características estructurales y de operación de la plataforma Stewart, otorgan diferentes ventajas y limitaciones con respecto a los mecanismos seriales. Tienen una alta rigidez y capacidad de carga con respecto a robots seriales de tamaño similar gracias a que la carga se distribuye entre los seis actuadores y a su estructura triangular, haciéndolas más rígidas. La rigidez y el hecho de que el error se promedia en vez de acumularse contribuyen a una mayor precisión y repetibilidad ya que los errores individuales de los actuadores tienen un impacto menor en la posición final de la plataforma. Además, permite que la plataforma Stewart realice movimientos rápidos y con altas aceleraciones, haciéndolas ideales para aplicaciones que requieren una respuesta dinámica ágil.

A pesar de las numerosas ventajas, las plataformas tienen algunas limitaciones como puede ser la complejidad de la cinemática directa, ya que es un problema no lineal y

puede requerir de métodos numéricos iterativos sin solución, añadiendo dificultades al control en tiempo real. La necesidad de que los actuadores se extiendan y contraigan requieren de un amplio espacio de trabajo, además de su coste elevado debido a la necesidad de seis actuadores de alta precisión, sensores y un sistema complejo de control.

Las características de las plataformas Stewart las hacen ideales para aplicaciones que necesiten alta precisión, rigidez y capacidad dinámica en seis grados de libertad. Las principales aplicaciones son en simuladores de vuelo y de conducción, por su capacidad para recrear movimientos realistas de las aeronaves o vehículos con aceleraciones de hasta 2 g; en plataformas de posicionamiento preciso, empleadas para el ensamblaje de componentes industriales con tolerancias de $\pm 0,1$ mm; en la robótica médica, para sistemas de rehabilitación o cirugía asistida; en la astronomía, para el posicionamiento de antenas o espejos de telescopios y en sistemas de compensación de movimiento, como plataformas marinas que estabilizan el acceso en entornos dinámicos sujetos a oleaje.

3.2. CINEMÁTICA Y DINÁMICA DE LOS MECANISMOS PARALELOS

El análisis cinemático y dinámico de los mecanismos paralelos, como la plataforma Stewart, constituye la base para su diseño, simulación y control. A diferencia de los robots seriales, donde los eslabones se mueven secuencialmente, los mecanismos paralelos tienen múltiples cadenas cinemáticas que actúan simultáneamente sobre la plataforma móvil, lo que proporciona mayor rigidez y precisión, pero aumenta la complejidad del modelado.

3.2.1. Cinemática

La cinemática es el estudio del movimiento de los cuerpos sin tener en cuenta las fuerzas que causan dicho movimiento. En el caso de la plataforma Stewart (mecanismo paralelo), hay la cinemática inversa y la cinemática directa.

La cinemática inversa, la plataforma Stewart, consiste en determinar las longitudes que se requieren en cada uno de los actuadores para alcanzar una posición y orientación deseadas de la plataforma móvil. Denotando la posición de la plataforma como:

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

y los puntos de anclaje de la plataforma móvil y la base como B_i y P_i respectivamente, la longitud de cada actuador i se obtiene mediante la expresión:

$$L_i = \|P + R \cdot P_i - B_i\|$$

donde R es la matriz de rotación de la plataforma móvil en función de los ángulos de Euler (ϕ , θ , ψ). Esta relación permite calcular directamente las extensiones de los seis actuadores para una posición y orientación deseadas, siendo la resolución analítica directa del problema.

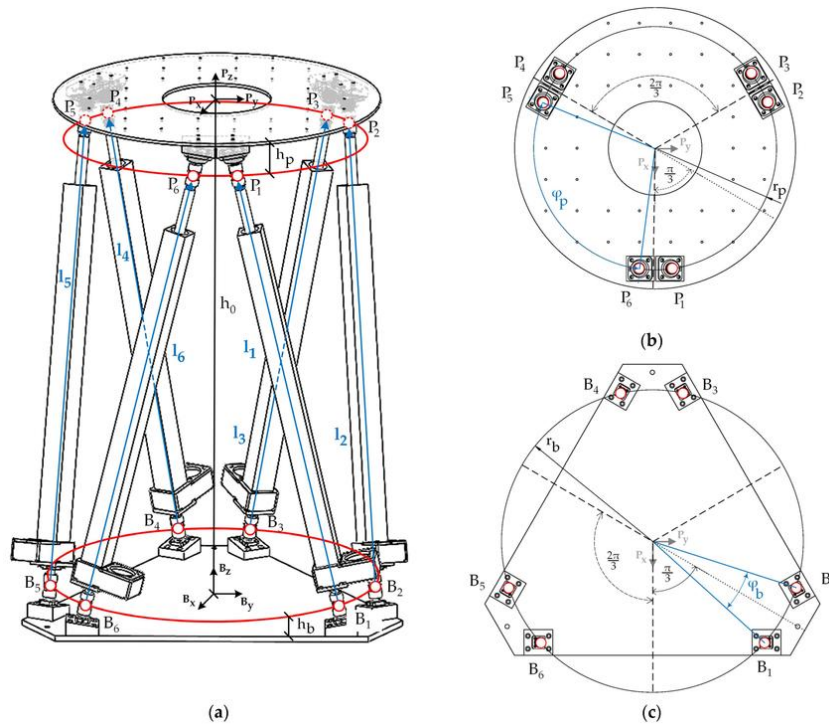


Figura 3: Diagramas esquemáticos de la plataforma Stewart. (a) Descripción geométrica; (b) Ubicación de las juntas de la plataforma móvil; (c) Ubicación de las juntas de la plataforma base. Adaptado de Silva-Muñiz, D., Garrido Campos, J., & Riveiro Fernández, E. (2022). Stewart Platform Motion Control Automation with Industrial Resources to Perform Cycloidal and Oceanic Wave Trajectories. *Machines*, 10(8), 541.

La cinemática directa, es mucho más compleja para los mecanismos paralelos. Se basa en determinar la posición y orientación de la plataforma móvil a partir de la longitud de cada uno de los seis actuadores.

A diferencia de la cinemática inversa, la cual tiene una única solución, la cinemática directa de una plataforma Stewart es un problema no lineal y complejo. Normalmente no existe una solución cerrada, lo que significa que no se puede expresar la pose de la plataforma como una función. El problema se resuelve generalmente mediante métodos numéricos iterativos, este es un procedimiento que busca la solución de un problema

matemático a través de aproximaciones sucesivas comenzando con un valor inicial. Cada paso genera una nueva aproximación a partir de la anterior, con el objetivo de que se acerque cada vez más a la solución real.

Los métodos geométricos y algebraicos, aunque son complejos, se han desarrollado soluciones que implican la resolución de polinomios de alto grado, las cuales pueden llevar a varias posibles soluciones para el mismo conjunto de longitudes.

Otro enfoque empleado para resolver la cinemática directa es el uso de inteligencia artificial (redes neuronales), se pueden entrenar modelos de IA para transformar longitudes a poses de la plataforma. Esto requiere de datos y entrenamiento y puede carecer de la precisión y la garantía de los métodos tradicionales.

La complejidad computacional de la cinemática directa es algo a considerar de manera importante para el control a tiempo real, especialmente si se necesita calcular la pose de la plataforma a partir de la retroalimentación de las longitudes de los actuadores. Por eso, en los sistemas de control de las plataformas Stewart, se emplean sensores de posición externos, como son los IMUs (unidad de medición inercial), para que proporcionen una estimación directa de la posición y orientación de la plataforma, facilitando y eliminando la dependencia de emplear la cinemática directa para el control principal.

3.2.2. Dinámica

La dinámica se encarga del estudio del movimiento de los cuerpos en función de las fuerzas y torques que lo provocan. En el caso de una plataforma Stewart, resulta fundamental para predecir su comportamiento bajo distintas cargas, dimensionar correctamente los actuadores y diseñar controladores eficaces.

El modelo dinámico de una plataforma Stewart es más complejo que el de los robots seriales debido a la presencia de múltiples cadenas cinemáticas y la interacción simultánea de seis actuadores. Una aproximación habitual para el modelado dinámico es el método de Newton-Euler, que aplica las ecuaciones de Newton para la traslación y las leyes de Euler para la rotación de cada eslabón. Este enfoque puede volverse extremadamente complicado y propenso a errores por la gran cantidad de fuerzas y reacciones que deben considerarse en las articulaciones.

Una alternativa más práctica es el método de Lagrange, que simplifica el modelado al evitar el cálculo de las fuerzas de reacción internas, ya que estas no realizan trabajo. El

punto de partida de este método es el Lagrangiano, definido como la diferencia entre la energía cinética y la energía potencial del sistema:

$$L = T - V$$

A partir del Lagrangiano, las ecuaciones de movimiento se obtienen mediante las ecuaciones de Euler-Lagrange para cada coordenada generalizada q_i :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i$$

donde Q_i representa la fuerza o torque generalizado aplicado sobre la coordenada q_i .

El resultado de este procedimiento es un conjunto de ecuaciones diferenciales que relacionan las aceleraciones de la plataforma con las fuerzas aplicadas por los actuadores, la gravedad y cualquier perturbación externa, como las fuerzas del oleaje en entornos marinos.

3.3. TÉCNICAS DE CONTROL APLICADAS

El control de la plataforma Stewart, especialmente para una aplicación exigente como es la estabilización de personas entre infraestructuras flotantes, requiere el uso de técnicas de control precisas. Es una parte crítica debido a la complejidad de la cinemática y la dinámica y de las perturbaciones del entorno marítimo.

El sistema de control tiene una serie de objetivos primordiales que debe de cumplir. El objetivo principal es mantener la plataforma móvil lo más horizontal y estable posible, minimizando los movimientos de traslación y orientación a pesar del movimiento de la base.

El sistema debe contrarrestar eficazmente perturbaciones (oleaje, viento, corrientes) y ser robusto ante cambios tanto de condiciones ambientales como de la carga a soportar. Finalmente se tiene que asegurar que la plataforma opere dentro de los límites físicos como son los finales de carrera de los actuadores, las fuerzas máximas o las velocidades.

3.3.1. Control PID

El control PID (Proporcional – Integral – Derivativo) es una de las estrategias de control más utilizadas en la industria y que, además, se adapta muy bien a la regulación de las plataformas Stewart debido a su implementación sencilla y capacidad de

mantener la estabilidad frente a perturbaciones externas, lo que es muy importante en entornos marinos, donde la plataforma está sujeta a movimientos de oleaje, viento y corrientes.

El principio del PID consiste en combinar tres acciones de control sobre el error $e(t)$, definido como la diferencia entre la posición o velocidad deseada y la medida real. Y viene definido por la siguiente expresión:

$$y(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de}{dt}$$

La componente proporcional K_p corrige el error instantáneo. Un valor alto de la ganancia aumenta la rapidez de respuesta del sistema, pero puede generar oscilaciones e inestabilidad si se excede un límite.

La componente integral K_i acumula el error a lo largo del tiempo, eliminando desviaciones persistentes y asegurando que la plataforma alcance con precisión la posición requerida. Valores demasiado altos de la ganancia pueden causar sobrecompensación y oscilaciones prolongadas, valores demasiado bajos dejan un error residual sin corregir.

La componente derivativa K_d actúa sobre la tasa de cambio del error, anticipando desviaciones y suavizando la respuesta. Mejora la estabilidad frente a perturbaciones rápidas, aunque puede amplificar el ruido de los sensores si se aplica en exceso.

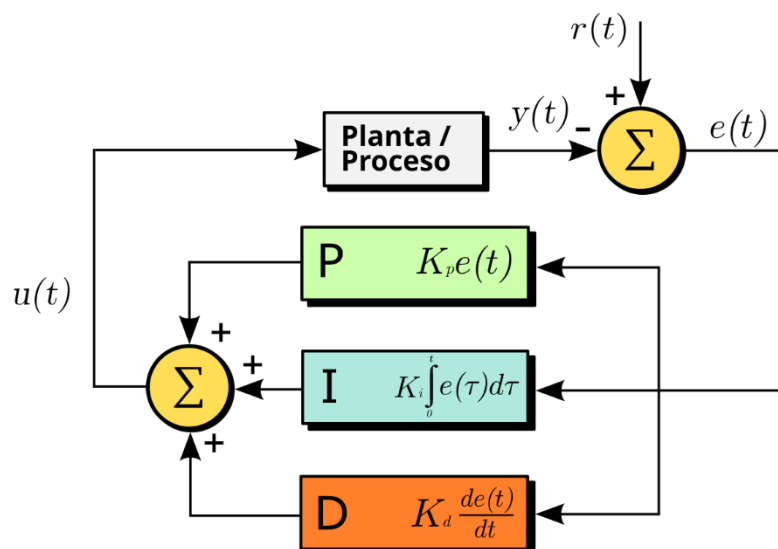


Figura 4: Diagrama de bloques de un controlador PID en un lazo realimentado. Adaptado de Wikipedia. (s.f.). Controlador PID [Diagrama]. https://es.wikipedia.org/wiki/Controlador_PID

La función de transferencia del controlador PID en el dominio de Laplace se expresa como:

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right)$$

Donde K_p , K_i y K_d son las ganancias proporcionales, integrales y derivativas respectivamente, T_i es la constante de tiempo integral y T_d es la constante de tiempo derivativa. Esta formulación permite un ajuste preciso del equilibrio entre la rapidez de respuesta, la eliminación de error residual y la amortiguación de oscilaciones.

Hay diferentes estrategias para elegir los valores de las ganancias.

El método de Ziegler-Nichols consiste en ajustar K_p hasta que el sistema alcance oscilaciones sostenidas en el margen de estabilidad, a partir del valor crítico K_u y el periodo de oscilación T_u se calculan las otras ganancias. Es un sistema rápido y directo, pero requiere llevar el sistema a su límite de estabilidad.

Otra manera es el método de ensayo y error (manual tuning) en el cual se ajustan progresivamente las ganancias observando la respuesta del sistema a un escalón o perturbación. Se empieza ajustando K_p para reducir el error y luego K_i para eliminar las desviaciones persistentes, se finaliza con K_d para suavizar oscilaciones. Es un método más flexible y fácil de implementar, pero puede ser lento en sistemas complejos.

Otro método es el de coincidencia de polos, a partir del modelo linealizado del sistema, se ubican los polos del lazo cerrado en posiciones deseadas para conseguir rapidez, amortiguación y estabilidad. Las constantes se calculan a partir de las ecuaciones características del sistema. Es una manera más predecible y que se basa en el modelo, pero depende de la exactitud de este.

En la plataforma Stewart, el PID puede implementarse en bucle de posición y velocidad. Este bucle externo, regula la posición de la plataforma, asegurando que los movimientos de traslación y rotación se mantengan dentro de los límites deseados. El bucle interno de velocidad controla los actuadores de manera suave, evitando sobrecargas y movimientos bruscos que podrían comprometer la seguridad del sistema.

Las principales ventajas del control PID son su robustez frente a un modelado inexacto y su facilidad de implementación. Sin embargo, presenta algunas limitaciones, como la necesidad de ajustar las ganancias frente al ruido y la saturación de los actuadores, lo que puede reducir la efectividad del control si no se eligen adecuadamente.

3.3.2. Control LQR

El control LQR (Linear Quadratic Regulator) es un enfoque basado en la teoría de control óptimo, que busca mantener la plataforma Stewart en la posición y orientación deseadas minimizando simultáneamente el error y el esfuerzo de control. El objetivo es minimizar una función de coste que penaliza tanto las desviaciones como el uso excesivo de los actuadores. La función de coste se define como:

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt$$

Donde x es el vector de estados (posiciones, velocidades, ángulos), u es el vector de señales de control aplicadas a los actuadores, y Q y R son matrices de ponderación que permiten ajustar la prioridad entre minimizar el error o limitar la acción de control. El resultado es una ley de control lineal:

$$u = -Kx$$

donde K es la matriz de ganancias obtenida al resolver la ecuación de Riccati asociada.

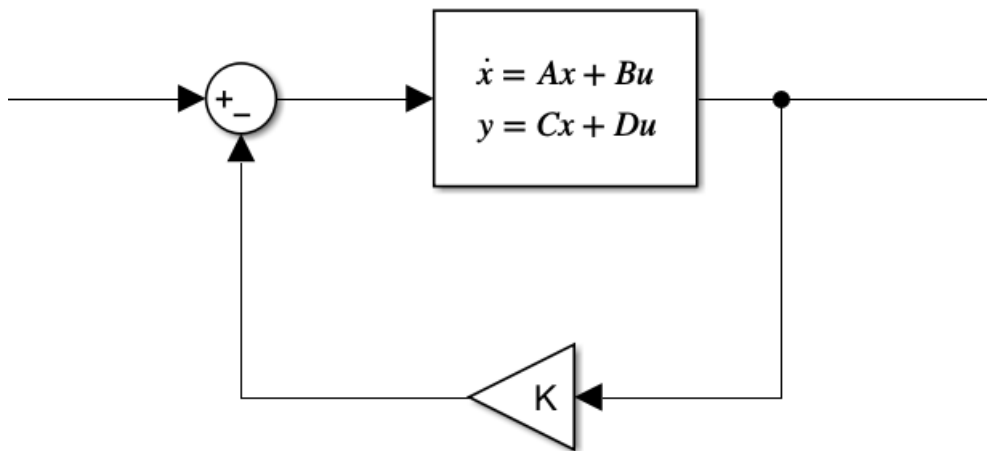


Figura 5: Estructura de un sistema de control LQR

El control LQR ofrece señales de control suaves y buena estabilidad frente a perturbaciones pequeñas, aunque requiere que el sistema este linealizado, por lo que puede perder precisión frente a perturbaciones grandes o no linealidades importantes como las que produce el oleaje.

3.3.3. Control robusto

El control robusto H^∞ se diseña para mantener la estabilidad y un desempeño aceptable incluso ante incertidumbres en el modelo del sistema o perturbaciones externas. En el caso de una plataforma Stewart expuesta al oleaje, viento y variaciones de carga, este tipo de control permite que la plataforma siga siendo estable y que los actuadores no sufran esfuerzos excesivos.

El planteamiento matemático consiste en minimizar la ganancia del sistema entre perturbaciones w y salidas z :

$$\|T_{zw}(s)\|_\infty = \sup_w \sigma_{\max}(T_{zw}(jw)) < \gamma$$

Donde T_{zw} es la función de transferencia desde la perturbación hasta la salida y γ es un límite que define la toleración máxima.

El control robusto garantiza estabilidad frente a incertidumbres y perturbaciones, siendo útil en entornos impredecibles como las plataformas marinas. Sin embargo, el diseño es complejo, las señales de control pueden ser más agresivas y requiere un conocimiento avanzado de teoría de control.

3.3.4. Control adaptativo

El control adaptativo ajusta automáticamente los parámetros del controlador en función del comportamiento observado del sistema. Esto es especialmente útil en plataformas Stewart que operan en entornos marinos, donde las cargas y perturbaciones varían constantemente.

En su forma más simple, la actualización de una ganancia proporcional adaptativa se expresa como:

$$\dot{K}_p = \gamma e(t)x(t)$$

Donde $e(t)$ es el error de posición o velocidad, $x(t)$ el estado medido y γ una constante de adaptación que regula la velocidad de cambio del parámetro.

Este tipo de control permite mantener el desempeño ante cambios de dinámica o perturbaciones imprevistas y no requiere de un modelo exacto del sistema. Sin embargo, tiene algo de complejidad en la implementación, es sensible al ruido de medición y puede presentar inestabilidad si no se ajustan correctamente los parámetros de adaptación.

3.4. SENSÓRICA

La calidad del control en una plataforma Stewart para aplicaciones offshore depende de la calidad de la señal proporcionada por los sensores. Estos dispositivos son los encargados de medir el estado dinámico de la plataforma (posición, velocidad, aceleración y orientación), así como el movimiento de la base generado por el oleaje. Una correcta elección de la sensórica permite implementar estrategias de control avanzadas que compensen las perturbaciones externas con la mayor precisión posible.

3.4.1. Acelerómetros

Los acelerómetros miden la aceleración lineal en los tres ejes de la plataforma. En el caso de aplicaciones marinas, se utilizan acelerómetros de grado industrial, basados principalmente en tecnología MEMS de alta precisión o en sensores piezoeléctricos encapsulados para resistir las condiciones ambientales adversas.

Estos dispositivos permiten registrar vibraciones y movimientos rápidos, siendo fundamentales para detectar perturbaciones en tiempo real. Sin embargo, si se integran para obtener velocidad o posición, acumulan error con el tiempo debido a la deriva. Presentan una resolución de hasta 0.001 g y rangos típicos de $\pm 2g$ a $\pm 10g$.

Los acelerómetros industriales oscilan entre los 500 € y 2000 € por unidad, dependiendo de la calidad y el rango de medida.

Son sensores robustos, que necesitan un bajo mantenimiento y con capacidad de registrar vibraciones con una alta respuesta. Sin embargo, son sensibles al ruido y tienen tendencia a la deriva en cálculos prolongados de velocidad o posición.

3.4.2. Giroscopios

Los giroscopios miden la velocidad angular, la rapidez con la que la plataforma rota alrededor de sus tres ejes. En entornos offshore existen dos tecnologías principales, los giroscopios MEMS industriales, compactos y económicos y los FOG (Fiber Optic Gyroscopes), mucho más precisos y estables.

Los giroscopios de tipo MEMS pueden ser adecuados para aplicaciones menos exigentes, pero tienden a presentar mayor deriva a largo plazo. Por el contrario, los giroscopios FOG alcanzan precisiones extremadamente altas, con derivas de menos de

0.01 %/h, siendo por ello la opción adecuada en aplicaciones navales y de compensación activa en condiciones extremas.

La tecnología MEMS puede alcanzar un precio de entre 1000 € y 3000 €, mientras que la tecnología FOG puede llegar a estar entre 2000 € y 20000 €.

3.4.3. IMUs

Las IMUs (Inertial Measurement Units) son dispositivos que integran acelerómetros y giroscopios, y en algunos casos también magnetómetros, en un único sistema. Esto permite obtener información completa de la orientación de la plataforma (roll, pitch, yaw), además de las aceleraciones lineales.

En el caso de las plataformas Stewart para la compensación de movimiento, lo más habitual es utilizar una IMU instalada en la base para registrar directamente los efectos del oleaje sobre la estructura, y otra instalada en la plataforma móvil para conocer el movimiento residual que queda después de la acción de los actuadores.

En los sistemas más caros, las IMUs empleadas incluyen giroscopios FOG y acelerómetros de precisión, alcanzando errores de orientación menores a 0.05°.

El coste de una IMU varía mucho en función de la tecnología empleada, las basadas en MEMS industriales están alrededor de 5000 € y 10000 €, las IMUs basadas en FOG de alta precisión pueden llegar a costar entre 20000 € y 50000 €.

3.4.4. Encoders

Los encoders son sensores que miden la posición de los actuadores de la plataforma. Se emplean encoders absolutos industriales, capaces de indicar en todo momento la posición exacta del actuador sin necesidad de una referencia inicial. Suelen ser de tipo óptico o magnético, con un grado de protección elevado (IP67) para resistir humedad y polvo.

La resolución de estos sensores puede alcanzar los 24 bits, lo que se traduce en precisiones submilimétricas en la posición de los actuadores. Esto les convierte en un elemento esencial para el control en lazo cerrado de la plataforma.

Su coste suele estar en el rango de 300 € a 1500 €.

3.4.5. Sensores LVDT

En las plataformas Stewart con actuadores hidráulicos, es habitual emplear sensores LVDT para medir directamente la posición lineal del vástago. Estos dispositivos ofrecen una alta precisión y gran robustez, con resoluciones micrométricas. Son muy empleados en la industria offshore, especialmente en torres de perforación y sistemas de compensación activa ya que tienen un rendimiento fiable en condiciones severas. Sin embargo, necesitan de un acondicionamiento de señal adicional.

Su rango típico va desde ± 100 mm a ± 300 mm, con costes que oscilan entre 800 € y 3000 €, superior a los encoders.

3.4.6. Tabla comparativa

Sensor	Tecnología	Rango de medida	Resolución	Deriva	Coste (€)
Acelerómetro	MEMS / Piezoeléctrico	$\pm 2g$ a $\pm 10g$	0,001g	Al integrar	500 - 2000
Giroscopio	MEMS / FOG	$\pm 250^\circ/s$ a $\pm 2000^\circ/s$	0,01 $^\circ/s$ (MEMS) <0,001 $^\circ/s$ (FOG)	Alta (MEMS) <0,01 $^\circ/h$ (FOG)	1000 - 20000
IMU	MEMS / FOG	$\pm 2g$ a $\pm 10g$ / $\pm 250^\circ/s$ a $\pm 2000^\circ/s$	0,001g / 0,01 $^\circ$	0.5 $^\circ$ (MEMS) <0,05 $^\circ$ (FOG)	5000 - 50000
Encoder	Absoluto Óptico / Magnético	Según actuador	24 bits	Muy bajo	300 - 1500
LVDT	Lineal	± 100 mm a ± 300 mm	Micrométrica	Muy bajo	800 - 3000

Tabla 1: Comparación de los diferentes sensores que integra una plataforma Stewart

En la configuración estándar de una plataforma Stewart offshore se emplearían dos IMUs industriales, una en la base y otra en la plataforma y seis encoders absolutos o LVDTs, uno en cada actuador. Con esta configuración, el coste total en sensórica oscilaría entre los 20000 € y 60000 € dependiendo del nivel de precisión exigido para la aplicación.

3.5. FILTRADO DE SEÑALES

Los sensores empleados en una plataforma Stewart offshore, aunque sean de alta precisión, no están exentos de ruido, interferencias y derivas. Este ruido puede provenir de varias fuentes como vibraciones estructurales, turbulencias en los actuadores, interferencias electromagnéticas o limitaciones de los propios sensores. Para que el sistema de control actúe de forma eficaz, es imprescindible aplicar técnicas de filtrado de señales, de manera que la información que le llega al controlador represente el movimiento real y no tenga perturbaciones no deseadas.

El objetivo del filtrado es suavizar las señales medidas, reducir el ruido y eliminar deriva, sin perder la dinámica real del sistema.

3.5.1. Kalman

El Filtro de Kalman es una técnica de estimación óptima utilizada para combinar la información de varios sensores con un modelo dinámico del sistema, reduciendo el efecto del ruido y mejorando la precisión de las variables estimadas. En plataformas Stewart, la versión Extendida (EKF) y la Unscented (UKF) son las más relevantes debido a la naturaleza no lineal de la cinemática y la dinámica del mecanismo.

El uso de EKF y UKF en la plataforma Stewart permite corregir la deriva de los giroscopios y reducir el ruido de acelerómetros y magnetómetros, proporcionando al sistema de control datos fiables sobre el movimiento de la base.

3.5.2. Sistemas AHRS

Los Sistemas de Referencia de Actitud y Rumbo (AHRS) integran acelerómetros, giroscopios y magnetómetros, junto con algoritmos avanzados, para entregar directamente la orientación completa de la plataforma.

En una plataforma Stewart offshore, el AHRS simplifica el control porque proporciona al controlador la información de orientación ya filtrada y compensada. Los AHRS modernos emplean filtros tipo EKF, UKF o algoritmos de Madgwick/Mahony en su interior, ofreciendo alta frecuencia de actualización (100 – 1000 Hz) y robustez frente a vibraciones y perturbaciones externas.

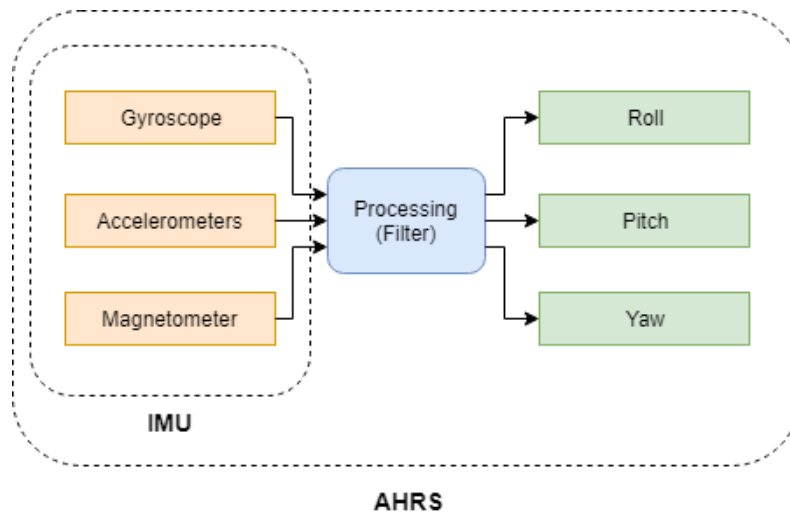


Figura 6: Esquema de un Sistema de Referencia de Actitud y Rumbo (AHRS) con sensores de giroscopios, acelerómetros y magnetómetros. Adaptado de UAV Navigation. (s.f.). UAV Navigation en profundidad: Navegación inercial [Esquema]. <https://www.uavnavigation.com/es/empresa/blog/uav-navigation-en-profundidad-navegacion-inercial>

Entre sus ventajas destacan la entrega directa de la orientación, la reducción de deriva y ruido, y la compatibilidad con sistemas de control en tiempo real. Como inconvenientes, destacan su coste elevado, la dependencia del magnetómetro, y que su algoritmo interno suele tener pocos parámetros ajustables.

3.5.3. Complementarios avanzados (Madgwick / Mahony)

Los filtros complementarios avanzados combinan la información de los giroscopios con los acelerómetros y magnetómetros para estimar la orientación de manera eficiente y con bajo coste computacional.

El filtro Madgwick utiliza un esquema basado en cuaterniones y gradiente descendente, optimizando la señal y corrigiendo la deriva de los giroscopios.

El filtro Mahony implementa un controlador PI interno que ajusta la estimación de la orientación mediante la retroalimentación del error entre la medición y la predicción.

Estos filtros son ideales en plataformas Stewart que requieren alta frecuencia de actualización y bajo coste computacional. Sin embargo, son menos precisos que los EKF o UKF frente a perturbaciones muy grandes o situaciones altamente no lineales.

3.5.4. Observadores robustos (SMO Y HGO)

Los observadores robustos permiten estimar estados no medidos de la plataforma y compensar perturbaciones externas sin depender de un modelo probabilístico.

El Sliding Mode Observer (SMO) es resistente a incertidumbres en el modelo y a perturbaciones externas como oleaje irregular, logrando una estimación confiable de la posición y velocidad de la plataforma.

El High-Gain Observer (HGO) proporciona una convergencia rápida en la estimación de los estados, aunque su sensibilidad al ruido requiere un ajuste cuidadoso de las ganancias.

Estos observadores son especialmente útiles cuando se busca robustez frente a cambios dinámicos y perturbaciones imprevisibles, como sucede en el entorno marítimo. Su implementación permite mantener la plataforma estable, incluso cuando las condiciones del mar cambian abruptamente o las mediciones de los sensores son ruidosas.

3.6. ACTUADORES

Los actuadores son los elementos que convierten la señal de control en movimiento físico, permitiendo que la plataforma Stewart se desplace y compense las perturbaciones externas. Su elección es un factor importante ya que determina la capacidad de carga, la velocidad de respuesta, la precisión y la robustez del sistema frente a condiciones marinas.

3.6.1. Eléctricos

Los actuadores eléctricos transforman el movimiento rotatorio de un motor en movimiento lineal mediante un husillo de bolas o tornillo sin fin. Su principal ventaja es la precisión y la facilidad de integración con sistemas de control digital, permitiéndoles hacer movimientos finos y repetibles. También destacan por su mantenimiento bajo y ausencia de sistemas hidráulicos complejos. Sin embargo, presentan limitaciones en la fuerza máxima que pueden generar y en la velocidad de reacción bajo cargas elevadas, por lo que se suelen emplear en aplicaciones donde la carga a compensar es moderada y la exactitud es prioritaria.

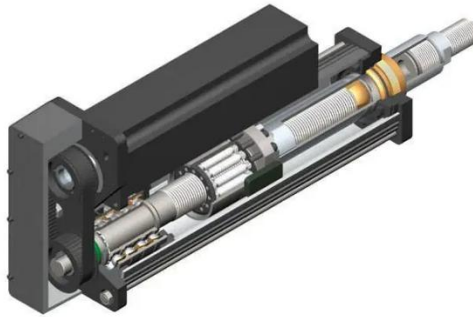


Figura 7: Estructura de un motor eléctrico servo. Adaptado de Zhao, Z., Xu, L., Liu, B., & Yu, J. (2018). *Research on Performances of a Displacement Controllable Active Suspension*. ResearchGate. https://www.researchgate.net/figure/The-structure-of-the-servo-electric-motor_fig3_328704275

3.6.2. Hidráulicos

Los actuadores hidráulicos utilizan la presión de un fluido para generar movimiento lineal. Su principal ventaja es la capacidad de ejercer fuerzas muy altas y alcanzar velocidades elevadas incluso bajo grandes cargas. Esto los hace ideales para plataformas que deben estabilizarse ante movimientos bruscos de la base o soportar cargas pesadas. Sus inconvenientes son la necesidad de sistemas hidráulicos complejos, un mayor mantenimiento y la posibilidad de fugas, además de un coste normalmente más elevado. Sin embargo, su robustez y capacidad de respuesta los convierten en la opción preferida en aplicaciones offshore exigentes.



Figura 8: Actuador hidráulico de válvula de globo de la serie MS de Cowan Dynamics. Adaptado de Cowan Dynamics. (s.f.). *Globe Valve Actuators*.. <https://www.cowandynamics.com/globe-valve-actuators/CowanDynamics+5CowanDynamics+5CowanDynamics+5>

3.6.3. Neumáticos

Los actuadores neumáticos utilizan aire comprimido para generar movimiento lineal o rotativo. Su principal ventaja es el bajo coste y la simplicidad del sistema, así como la facilidad de mantenimiento y la seguridad en entornos donde los líquidos o aceites podrían ser problemáticos. Ofrecen movimientos rápidos, haciéndolos útiles en aplicaciones donde la fuerza requerida no es elevada y se busca velocidad y simplicidad. Sin embargo, presentan limitaciones importantes ya que la fuerza máxima es baja, su precisión y repetibilidad son inferiores y son sensibles a cambios de presión y a fugas de aire, haciéndolos menos adecuados para sistemas de compensación de movimiento.

3.6.4. Tabla comparativa

Tipo de actuador	Fuerza máxima (kN)	Velocidad máxima (mm/s)	Precisión (mm)	Repetibilidad (mm)	Coste (€)
Eléctrico (Husillo de bolas)	2 - 10	50 - 200	$\pm 0,01$	$\pm 0,005$	2000 - 8000
Eléctrico (Motor lineal)	1 - 5	100 - 300	$\pm 0,02$	$\pm 0,01$	1500 - 6000
Hidráulico (cilindro estándar)	50 - 200	200 - 500	$\pm 0,1$	$\pm 0,05$	5000 - 20000
Hidráulico (servo-controlado)	30 - 150	100 - 400	$\pm 0,05$	$\pm 0,02$	10000 - 35000
Neumático	0,5 - 5	100 - 300	$\pm 0,1 - 0,5$	$\pm 0,05$	500 - 2000

Tabla 2: Comparación de los diferentes tipos y tecnologías de actuadores

3.7. TIPOS DE MATERIALES Y CRITERIOS DE DISEÑO EN ENTORNOS OFFSHORE

El diseño de una plataforma Stewart destinada a aplicaciones marinas u offshore requiere una cuidadosa selección de materiales ya que las condiciones del entorno imponen exigencias muy elevadas en términos de resistencia mecánica, durabilidad, peso, resistencia a la corrosión y coste. La elección del material no solo afecta a la vida útil, también a su rendimiento y capacidad de carga.

3.7.1. Acero inoxidable marino

Los metales son la opción más tradicional en estructuras offshore debido a su robustez, resistencia mecánica y disponibilidad. Sin embargo, cada uno presenta diferencias significativas en densidad, resistencia de corrosión y coste, lo cual determina su uso para cada parte de la plataforma Stewart.

El acero inoxidable en sus variantes AISI, dúplex y duperdúplex es una de las elecciones más comunes para aplicaciones marinas. Es un material con alta resistencia estructural, permitiendo soportar cargas elevadas y garantizar la integridad de la plataforma bajo condiciones dinámicas severas. Tiene alta resistencia a la corrosión, aunque puede verse comprometida en ambiente con alta salinidad si no se aplican recubrimientos adicionales o un buen mantenimiento. El principal inconveniente es su peso elevado, obligando a dimensionar actuadores con mayor capacidad de fuerza, aumentando el coste y consumo energético.

3.7.2. Aluminio naval

Las aleaciones de aluminio empleadas en aplicaciones marinas, como las series 5000 (5083) y 6000 (6082), constituyen una opción muy empleada cuando el objetivo principal es reducir peso. Poseen una buena resistencia mecánica y sobre todo excelente resistencia a la corrosión en agua salada, lo que las hace aptas para aplicaciones de larga duración sin necesidad de tratamientos superficiales. Su gran ventaja es su densidad, mucho menor respecto al acero, reduciendo la masa móvil de la plataforma Stewart y permitiendo que los actuadores trabajen con menores esfuerzos y mejores la respuesta dinámica del sistema. Sin embargo, su resistencia mecánica es menor que la del acero, lo que puede limitar su uso en piezas sometidas a esfuerzos elevados.

3.7.3. Titanio

El titanio, en especial la aleación grado 5 (Ti-6Al-4V), constituye una de las soluciones más avanzadas y de mayor rendimiento para aplicaciones offshore. Su principal ventaja es la excelente relación resistencia-peso, que lo convierte en un material más resistente que el acero y con una menor densidad. Además, tiene una resistencia prácticamente total a la corrosión marina, lo que lo hace idóneo para estructuras expuestas continuamente al agua salada sin necesidad de tratamientos superficiales. El principal inconveniente es su elevado coste, tanto de la materia como los procesos de mecanizado y soldadura, que además son más complejos. Esto limita su uso a componentes críticos donde la durabilidad y la ligereza son imprescindibles, como las uniones sometidas a esfuerzos repetitivos o actuadores de alta gama.

3.7.4. Fibra de carbono

En los últimos años, los materiales compuestos han ganado protagonismo en las aplicaciones marinas gracias a su ligereza, resistencia a la corrosión y capacidad de personalización ya que puede diseñarse con propiedades específicas a las necesidades estructurales.

La fibra de carbono (CFRP) es el material compuesto con mayor rendimiento empleado en este tipo de aplicaciones. Su relación resistencia-peso es muy superior a la de los metales, y su rigidez elevada permite reducir las deformaciones de la plataforma bajo cargas. Además, tiene una resistencia total a la corrosión marina, eliminando la necesidad de mantenimiento frente a la oxidación. Su uso está limitado por el alto coste de producción y la fragilidad frente a impactos, la cual, aunque es muy resistente a cargas distribuidas, puede sufrir fallos totales si recibe un golpe localizado. A todo esto, se le añade la dificultad de reparación en caso de daño, suponiendo una limitación operativa en los entornos marinos. Por todo esto, se suele emplear en la plataforma superior o en partes donde la reducción de peso es esencial.

3.7.5. Fibra de vidrio

La fibra de vidrio (GFRP) es un material compuesto más económico que la fibra de carbono, pero con prestaciones inferiores. Las principales ventajas son el bajo coste y la buena resistencia a la corrosión marina, haciéndola especialmente útil para

cubiertas protectoras o elementos no estructurales. Su rigidez es bastante menor, limitando su aplicación en elementos sometidos a cargas estructurales, además, puede sufrir degradación por exposición a los rayos UV si no se aplica un recubrimiento protector. Pese a todas estas limitaciones, sigue siendo una opción interesante en plataformas Stewart offshore debido a su facilidad de fabricación y que permite reducir el peso en zonas secundarias.

3.7.6. Híbridos

En la práctica, la mayoría de las plataformas Stewart para aplicaciones offshore recurren a soluciones híbridas que combinan diferentes materiales, aprovechando lo mejor de cada uno. Un ejemplo habitual es el uso de acero inoxidable o titanio en la base, donde se concentran los mayores esfuerzos estructurales, aluminio o fibra de carbono en la plataforma superior para reducir la inercia de la parte móvil y fibra de vidrio para las protecciones donde el objetivo es disminuir el peso y evitar la corrosión.

Esto permite lograr un equilibrio entre el coste, la resistencia, la durabilidad y la eficiencia dinámica, seleccionando los materiales según los requisitos específicos de cada aplicación.

3.7.7. Tabla comparativa

Material	Densidad (g/cm ³)	Módulo de Young (GPa)	Resistencia a tracción (MPa)	Coste (€/cm ³)
Acero inoxidable	7,7 – 8,03	190 - 210	500 - 950	0,005 – 0,01
Aluminio naval	2,7	70	275 - 310	0,008 – 0,015
Titanio	4,43	110	900 - 950	0,05 – 0,08
CFRP	1,6	70 - 150	500 - 1000	0,04 – 0,06
GFRP	2	25 - 40	150 - 350	0,002 – 0,005

Tabla 3: Comparación de los materiales más utilizados en los componentes de una plataforma Stewart

3.8. APLICACIONES MARINAS Y SISTEMAS DE COMPENSACIÓN DE MOVIMIENTO

Las operaciones en el mar se enfrentan constantemente a las perturbaciones producidas por el oleaje, las corrientes y el viento. Estos factores generan movimientos continuos que afectan a la estabilidad de los barcos, plataformas y grúas, lo que complica la realización de las tareas y aumenta los riesgos de seguridad. Por este motivo, en la industria offshore se han desarrollado diferentes tecnologías de compensación de movimiento, cuyo objetivo es minimizar la influencia del entorno y garantizar condiciones de trabajo más estables.

Uno de los campos donde esta tecnología está de manera más presente es en la transferencia de carga entre buques y plataformas. Cuando un barco intenta descargar material pesado en una plataforma fija, el movimiento relativo entre ambas estructuras puede provocar impactos, daños en la carga o accidentes graves. Los sistemas de compensación activa, basados en actuadores y controladores en tiempo real, permiten mantener la superficie de apoyo en una posición prácticamente fija, lo que mejora la seguridad y la eficiencia.

Otro ejemplo relevante es el lanzamiento y recuperación de vehículos submarinos como los ROVs (Remotely Operated Vehicles) o los AUVs (Autonomous Underwater Vehicles). Estas maniobras requieren que el vehículo atraviese la superficie del agua de manera controlada. Sin un sistema de compensación, el movimiento vertical del buque debido al oleaje podría dañar el vehículo. Con una plataforma estabilizada, el vehículo puede entrar y salir del agua con un riesgo mucho menor, lo cual es esencial para trabajos de inspección, reparación o instalación de infraestructuras marinas.

Los sistemas de perforación y mantenimiento también se benefician de esta tecnología. En el sector del petróleo y gas, así como en el de la energía eólica offshore, la precisión en la posición de herramientas y equipos es fundamental. Una torre de perforación que se mueve constantemente con el oleaje pierde eficiencia y compromete la seguridad. Con mecanismos de compensación activa, la estructura que sostiene las herramientas se mantiene estable, lo que permite trabajar incluso en condiciones ambientales exigentes.

Aparte de las aplicaciones industriales, existen también usos en el campo de la simulación y el entrenamiento. Las plataformas Stewart, debido a su capacidad de generar movimientos en seis grados de libertad, se utilizan como simuladores de

navegación para formas tripulaciones o para investigar el comportamiento dinámico de embarcaciones en situaciones extremas. Estos simuladores permiten entrenar en un entorno seguro y repetir situaciones que en el mar real serían demasiado costosas y peligrosas de recrear.



Figura 9: Simulador de vuelo en el centro de entrenamiento de Qatar Airways. Adaptado de FlightGlobal. (2018). *How reshaped flight simulator market is adapting to change.* <https://www.flightglobal.com/aerospace/how-reshaped-flight-simulator-market-is-adapting-to-change/157096.article>

Dentro de este conjunto de tecnologías, la plataforma Stewart ha demostrado ser especialmente útil por su capacidad para controlar el movimiento en los seis grados de libertad, mediante el uso de actuadores hidráulicos o eléctricos. La plataforma es capaz de generar un movimiento compensatorio que anula, en gran parte, las perturbaciones producidas por el entorno. Además, la integración de sensores inerciales (IMUs) permite medir el movimiento de la base y transmitir la información a un sistema de control, que calcula en tiempo real como debe actuar cada actuador para estabilizar la plataforma superior.

En definitiva, las aplicaciones marinas de los sistemas de compensación de movimiento abarcan desde la transferencia de cargas y el lanzamiento de vehículos submarinos hasta la perforación, el mantenimiento y la formación de personal. La plataforma Stewart, por su versatilidad y precisión, se ha convertido en una herramienta prometedora para todas estas tareas y representa un paso importante hacia operaciones offshore más seguras, eficientes y fiables.

3.9. ESTADO DEL ARTE

Las plataformas Stewart han evolucionado significativamente desde su concepción en los años 50, pasando de aplicaciones en simuladores de vuelo y posicionamiento industrial a su uso en entornos marinos complejos. Actualmente, el interés en sistemas de compensación de movimiento para plataformas offshore ha impulsado la investigación y desarrollo de soluciones más precisas, robustas y seguras.

En cuanto a los actuadores, los sistemas hidráulicos siguen siendo predominantes en aplicaciones donde se requiere fuerza elevada y alta velocidad, como en plataformas de perforación o grúas offshore. Los actuadores eléctricos han ganado terreno gracias a su precisión y facilidad de integración con control digital, especialmente en sistemas de menor tamaño o donde el mantenimiento hidráulico es costoso o genera riesgos. Los actuadores neumáticos, aunque más limitados en fuerza y precisión, se emplean en aplicaciones auxiliares y de bajo coste. Los desarrollos recientes incluyen cilindros hidráulicos servo-controlados con electrónica integrada para mejorar la dinámica y la respuesta frente a perturbaciones rápidas, permitiendo un control más fino y adaptativo.

En el campo de la sensórica, se observa una tendencia hacia la integración de IMUs de alta precisión y sensores de posición lineales o rotativos. Los sistemas modernos incorporan giroscopios FOG y acelerómetros de alta resolución, combinados con filtros avanzados (Kalman, AHRS) que permiten una estimación precisa de la orientación y el movimiento de la plataforma, incluso ante perturbaciones fuertes como oleaje o viento intenso. La combinación de IMU en la base y en la plataforma móvil permite calcular el movimiento relativo y generar acciones compensatorias más eficaces.

En términos de control, las técnicas más empleadas en entornos offshore incluyen el PID por su robustez y facilidad de implementación, el LQR para optimización de esfuerzo y suavidad de las señales, y los controladores adaptativos que permiten mantener el desempeño frente a variaciones de carga y condiciones ambientales cambiantes. Los métodos robustos H^∞ son especialmente útiles en entornos impredecibles, aunque su implementación es más compleja y requiere mayor conocimiento teórico y computacional.

La investigación reciente también se ha centrado en la reducción del consumo energético, la minimización del desgaste mecánico y la mejora de la seguridad mediante redundancia de sensores y actuadores, así como en la integración de simulaciones avanzadas para validar el desempeño del sistema antes de su implementación física.

El estado del arte muestra un interés creciente por soluciones que combinen alta precisión, velocidad de respuesta, robustez frente a perturbaciones y facilidad de mantenimiento, integrando sensores avanzados y técnicas de control modernas. Esto sirve como marco de referencia para el diseño de plataformas Stewart offshore modernas, donde se busca un equilibrio entre desempeño, seguridad y coste, adaptando cada tecnología a la aplicación específica.

4. DISEÑO Y MODELADO DE LA PLATAFORMA STEWART

4.1. CONTEXTUALIZACIÓN DEL USO PROPUESTO

El diseño de la plataforma Stewart se plantea para su uso en operaciones offshore, como sistema de estabilización en el acceso de personal entre embarcaciones de servicio e infraestructuras flotantes. Este tipo de transferencia de personal es crítica desde el punto de vista de seguridad, ya que el movimiento relativo entre embarcación y estructura, inducido principalmente por el oleaje y en menor medida por el viento, genera riesgos de caída o impacto. La plataforma Stewart actúa en este caso como un sistema de compensación activa de movimiento, cuyo objetivo es reducir al mínimo el desplazamiento relativo en la superficie de acceso.

Este uso impone una serie de exigencias en el diseño, por un lado, la plataforma debe ser capaz de soportar la carga estática y dinámica generada por el tránsito de personas y junto con el propio peso estructural. Por otro lado, debe mantener un rango de movimiento suficiente para contrarrestar los desplazamientos verticales y angulares típicos del mar en condiciones operativas moderadas.

Finalmente, el diseño debe integrar criterios de fiabilidad y redundancia, aplicando factores de seguridad elevados para garantizar la integridad estructural incluso en situaciones extremas.



Figura 10: Representación conceptual de un barco, una plataforma Stewart y un molino offshore afectados por oleaje y viento. Adaptado de DNV. (s.f.). Hydrodynamics advisory services [Ilustración]. <https://www.dnv.com/services/hydrodynamics-advisory-services-3729/>

4.2. CARGAS Y MÁRGENES DE SEGURIDAD

El primer paso del diseño consiste en determinar la carga de diseño que deberá soportar la plataforma. Se considera un escenario con dos operarios de 100–120 kg cada uno, incluyendo el equipo de protección individual y las herramientas. Esto implica una carga útil aproximada de 240 kg. A esta carga hay que añadirle el peso de la estructura, actuadores, elementos de unión y sensórica. Por lo tanto, se estima una masa estructural entre 700 y 1000 kg, de manera que la masa total del sistema se aproxima a:

$$m_{total} = m_{operarios} + m_{estructura} \approx 1500 \text{ kg}$$

la fuerza será entonces:

$$F_g = m_{total} \cdot g \approx 14715 \text{ N}$$

Debido a que la plataforma trabajará en un entorno marino, es necesario introducir un factor dinámico de seguridad que contemple aceleraciones inducidas por el oleaje y posibles impactos. En aplicaciones offshore, se adoptan habitualmente valores entre 2 y 3. Por lo que para este diseño se va a considerar $\alpha = 2$. Siendo entonces la carga de diseño global:

$$F = m_{total} \cdot g \cdot \alpha \approx 29430 \text{ N}$$

Este valor es el esfuerzo total que debe ser soportado de manera conjunta por los seis actuadores lineales de la plataforma Stewart. Asumiendo que se reparte la carga de manera equitativa (condición ideal), la carga por actuador es:

$$F_{actuador} = \frac{F}{6} \approx 4905 \text{ N}$$

Este valor, será importante para el dimensionado de los actuadores, sobre el que se añadirán factores adicionales por cargas transversales y desalineaciones.

4.3. GEOMETRÍA DE LA PLATAFORMA

La geometría de la plataforma Stewart es un factor crítico para su rendimiento, ya que condiciona tanto el rango de movimiento como la rigidez estructural. Una correcta definición de radios, alturas y posiciones de anclaje permite maximizar el espacio de operación de la plataforma, asegurando que cada actuador trabaje dentro de su rango nominal y evitando ángulos extremos que puedan generar fatiga o colapso.

4.3.1. Definición de los parámetros principales

Radio de la base (R_B): Distancia desde el centro de la base al punto de anclaje de cada actuador lineal. Afecta a la estabilidad y la distribución de fuerzas.

Espesor de la base (E_B): Grosor de la placa de la base que soporta los anclajes de los actuadores. Garantiza rigidez y resistencia a torsión, evitando deformaciones.

Radio de la plataforma (R_P): Distancia desde el centro de la plataforma al punto de anclaje de cada actuador lineal. Condiciona el espacio disponible para la plataforma.

Espesor de la plataforma (E_P): Grosor de la placa de la plataforma que soporta la carga de operarios y los puntos de anclaje de los actuadores. Proporciona rigidez, resistencia y soporte para elementos de unión, pasarelas y sensórica.

Altura neutra (H_0): Separación vertical entre el plano de anclaje de la base y el plano de la plataforma, cuando está en posición horizontal y sin desplazamiento. Define la longitud nominal de los actuadores y determina el centro de gravedad y geometría inicial de la plataforma.

Desfase angular (ϕ): Ángulo entre los puntos de anclaje de la base y los correspondientes puntos de la plataforma, medido en el plano horizontal. Permite distribuir los actuadores lineales de manera equitativa, evitando interferencias y mejorando la estabilidad.

Sesgo hexagonal (s): Variación entre los puntos de anclaje consecutivos. Se aplica de manera alterna para optimizar la distribución de las fuerzas y evitar interferencias.

Parámetro	Símbolo	Valor preliminar	Unidad
Radio de la base	R_B	110	cm
Espesor de la base	E_B	5	cm
Radio de la plataforma	R_P	70,5	cm
Espesor de la plataforma	E_P	4	cm

Altura neutra	H_0	53	cm
Desfase angular	ϕ	30	°
Sesgo hexagonal	s	15	°

Tabla 4: Selección de los valores de la geometría de la plataforma Stewart

4.3.2. Coordenadas de la base y de la plataforma

En la geometría de la plataforma Stewart, es necesario definir con los puntos de anclaje de cada actuador lineal, tanto en la base como en la plataforma superior.

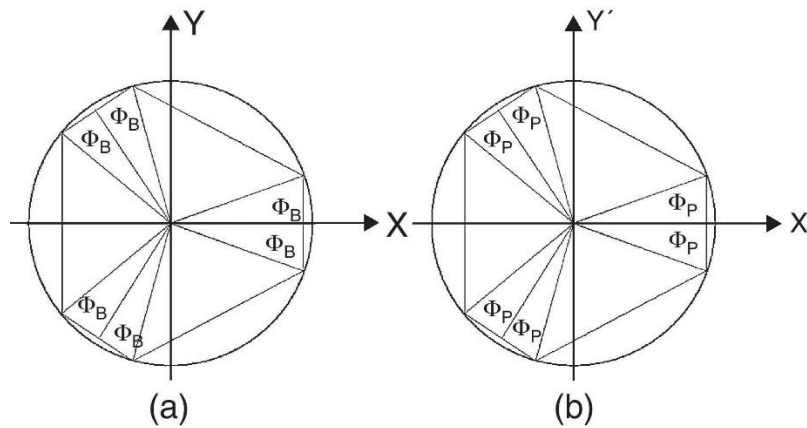


Figura 11: Ubicación de las juntas en las plataformas base y móvil de una plataforma Stewart. Adaptado de Hernández, E. E., Valdez Peña, S. I., & Sánchez Soto, E. (2013). Towards a Robust Solution of the Non-Linear Kinematics for the General Stewart Platform with Estimation of Distribution Algorithms. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. https://www.researchgate.net/figure/Location-of-the-joints-on-the-base-and-mobile-platforms_fig3_260637657

Se calcula el ángulo polar de cada actuador lineal:

$$\theta_i[^\circ] = 60 \cdot (i - 1) + (-1)^i \cdot s$$

$$\theta_i[rad] = \theta_i[^\circ] \cdot \frac{\pi}{180}$$

Se calcula el ángulo de orientación de la articulación, que agrupa los actuadores lineales de dos en dos:

$$\alpha_i = \left(\left\lfloor \frac{i+1}{2} \right\rfloor \cdot 120 - 30 \right) \cdot \frac{\pi}{180}$$

Se calcula la matriz de rotación:

$$R_i = \begin{bmatrix} \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i \\ \sin \alpha_i & \cos \alpha_i \end{bmatrix}$$

Coordenadas de la base:

$$B_{i,x} = R_B \cdot \cos \theta_i - R_{i,x}$$

$$B_{i,y} = R_B \cdot \cos \theta_i - R_{i,y}$$

$$B_{i,z} = \frac{E_B}{2}$$

Coordenadas de la plataforma:

$$P_{i,x} = R_P \cdot \cos \theta_i - R_{i,x}$$

$$P_{i,y} = R_P \cdot \cos \theta_i - R_{i,y}$$

$$B_{i,z} = B_{i,z} + H_0 - \frac{E_B}{2}$$

Actuador lineal	B (m)	P (m)
1	[1,049 -0,280 0,025]	[0,907 -0,240 0,305]
2	[0,259 1,046 0,025]	[0,224 0,905 0,305]
3	[-0,600 0,826 0,025]	[-0,518 0,713 0,305]
4	[-1,049 -0,280 0,025]	[-0,907 -0,240 0,305]
5	[-0,259 -1,046 0,025]	[-0,224 -0,905 0,305]
6	[0,600 -0,826 0,025]	[0,518 -0,713 0,305]

Tabla 5: Valores de las coordenadas de anclaje y de la base calculadas

4.3.3. Longitudes y recorrido de los actuadores

La longitud nominal de cada actuador corresponde a la distancia entre el punto de anclaje en la base y el punto de anclaje en la plataforma cuando la plataforma se encuentra en su posición neutral. Se emplea la siguiente expresión:

$$L_{nom,i} = \sqrt{(P_{i,x} - B_{i,x})^2 + (P_{i,y} - B_{i,y})^2 + (P_{i,z} - B_{i,z})^2}$$

Para definir el recorrido de cada actuador, se debe considerar el rango de movimiento máximo esperado de la plataforma, tanto vertical como angular, según las condiciones operativas offshore.

En condiciones extremas, la plataforma podría experimentar, un oleaje significativo de hasta 6 – 8 metros y una rotación máxima (ϕ roll, θ pitch) de hasta $\pm 15^\circ$ alrededor de los ejes horizontales.

Con estas condiciones se calcula la longitud de cada actuador en estas posiciones extremas:

$$L_{extremo,i} = \sqrt{(P'_{i,x} - B_{i,x})^2 + (P'_{i,y} - B_{i,y})^2 + (P'_{i,z} - B_{i,z})^2}$$

siendo $P'_{i,x}$ la posición de la plataforma en el extremo de movimiento.

$$L_{min,i} = L_{nom,i} - 0,25 \approx 0,307 \text{ m}$$

$$L_{max,i} = L_{nom,i} + 0,25 \approx 0,807 \text{ m}$$

Estos rangos aseguran que los actuadores puedan seguir la plataforma en sus movimientos más críticos sin salirse de su rango operativo. Se añade un margen de seguridad para fuerzas dinámicas inesperadas.

Actuador lineal	L_N (m)	L_{min} (m)	L_{max} (m)
1	0,577	0,307	0,807
2	0,577	0,307	0,807
3	0,577	0,307	0,807
4	0,577	0,307	0,807

5	0,577	0,307	0,807
6	0,577	0,307	0,807

Tabla 6: Valores de las longitudes nominales, mínimas y máximas de los actuadores

4.4. CONFIGURACIÓN Y SELECCIÓN DE LOS ACTUADORES

4.4.1. Requisitos de los actuadores

Antes de seleccionar el tipo de actuador, hay que definir los requisitos de funcionamiento según el diseño realizado.

Cada actuador lineal debe soportar una carga máxima calculada en condiciones extremas y con un factor de seguridad de 2 para cargas, impactos y desalineaciones de:

$$F_{max} \approx 4905 \text{ N} \cdot 2 \approx 10 \text{ kN}$$

La longitud de carrera útil que debe cubrir el actuador en los escenarios extremos calculados:

$$L_{min} \approx 0,307 \text{ m}, \quad L_{max} \approx 0,807 \text{ m}$$

$$L_u = L_{max} - L_{min} \approx 0,5 \text{ m}$$

Esto implica una carrera mínima de 0,5 m. Para garantizar holgura operativa, se establece como requisito una carrera por lo tanto $\geq 0,5 \text{ m}$.

La plataforma, además, debe de compensar perturbaciones dinámicas inducidas por el oleaje con frecuencias en torno a 1 Hz. Esto implica velocidades de extensión/retracción de 0,3 – 0,5 m/s.

Los actuadores deben resistir a ambientes marinos agresivos y soportar cargas transversales moderadas sin comprometer la integridad. Además, debe garantizar la operación en condiciones de sobrecarga puntual, evitando bloqueos o fallos.

4.4.2. Tipo de actuador seleccionado

Tras evaluar las diferentes tecnologías, se seleccionan actuadores servo-hidráulicos de doble efecto. Estos actuadores tienen una alta densidad de potencia, es

decir, gran fuerza en volúmenes reducidos, además, pueden trabajar tanto en extensión como en retracción y son ampliamente utilizados en aplicaciones offshore y marinas, con soluciones industriales ya probadas y con buena fiabilidad bajo condiciones dinámicas con cargas variables.

En concreto se van a usar Los actuadores Electro-Hydraulic Servo Actuators de Moog, en su versión Hydraulic Double-Ended Test Actuators, constituyen una solución avanzada para aplicaciones que requieren un control de movimiento de alta precisión, elevadas fuerzas y gran fiabilidad en entornos exigentes. Estos actuadores han sido desarrollados originalmente para ensayos estructurales, de vibración y de fatiga, lo que los convierte en dispositivos altamente robustos y adecuados para integrarse en sistemas de control activo como una plataforma Stewart destinada a la compensación de movimiento en aplicaciones offshore.

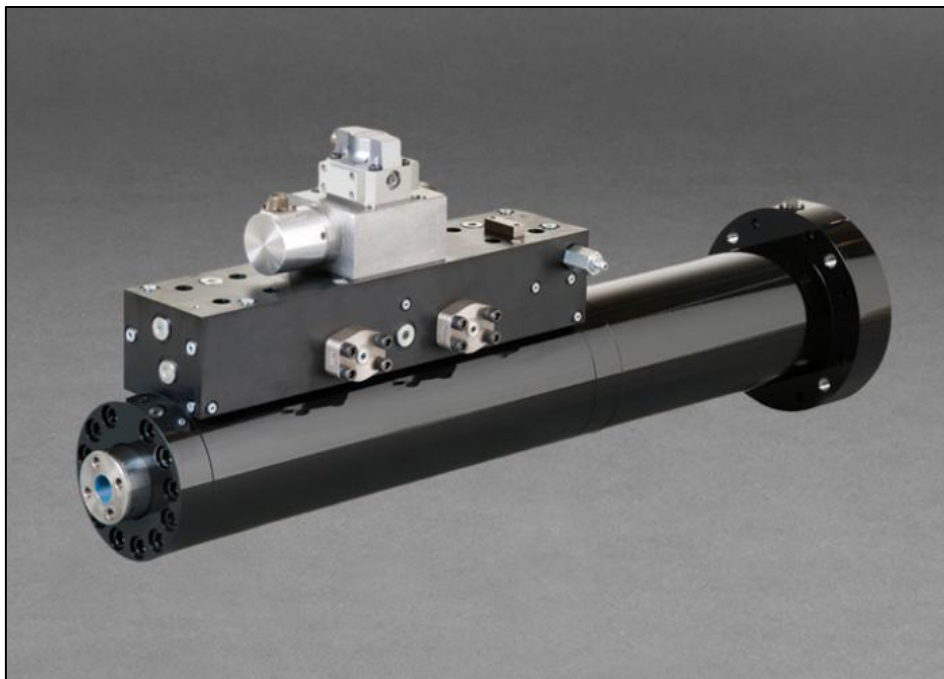


Figura 12: Actuador electrohidráulico Moog para aplicaciones industriales. Adaptado de Moog Inc. (s.f). Electrohydraulic Servo Actuators [Fotografía]. <https://www.moog.com/products/actuators-servoactuators/actuation-technologies/electrohydraulic.html>

En cuanto a especificaciones, Moog ofrece rangos de fuerza nominal que van desde 15 kN hasta 1000 kN, con recorridos estándar de 100, 150, 250 y 500 mm, lo que permite seleccionar el actuador más adecuado en función de la carga a soportar y del rango de movimiento requerido. Los diámetros de cilindro oscilan entre 57 mm y 300 mm, y los vástagos entre 45 mm y 160 mm, en correspondencia con la capacidad de fuerza.

Estos actuadores están diseñados para trabajo en condiciones de fatiga continua, con una larga vida útil incluso bajo cargas cíclicas de alta frecuencia, y permiten la integración de servoválvulas Moog y sensores de posición (LVDT) para un control en lazo cerrado de posición, velocidad o fuerza. Esta capacidad de control de alta resolución es fundamental para una plataforma Stewart offshore, en la que el objetivo es compensar en tiempo real los movimientos inducidos por el mar y mantener estable la carga o la cubierta superior.

4.4.3. Configuración y consideraciones adicionales

Se colocan seis actuadores dispuestos en configuración hexagonal entre la base y la plataforma móvil. Los extremos estarán articulados mediante rótulas esféricas, permitiendo rotación libre y evitando esfuerzos laterales en el cilindro.

Para garantizar la integridad de los actuadores y de la plataforma, cada unidad se equipa con válvulas de sobrepresión que actúan en caso de cargas superiores a las previstas, evitando daños estructurales. Se instalan limitadores de recorrido que impiden que los actuadores sobrepasen su rango seguro de extensión o compresión, protegiendo tanto al actuador como a la estructura.

Cada actuador incorpora sensores lineales de posición y velocidad que permiten una medición precisa y en tiempo real. Esta información se transmite al sistema de control, que ajusta de forma activa el movimiento de la plataforma frente a perturbaciones externas como el oleaje. De este modo se logra un control estable y una compensación dinámica de las oscilaciones.

Aunque en el dimensionamiento inicial se calculó la carga bajo un reparto ideal entre los seis actuadores, en condiciones reales cada actuador puede experimentar desviaciones de aproximadamente $\pm 25 - 35 \%$ respecto de la carga media. Por este motivo, se seleccionó un valor nominal de 5 kN por actuador, lo que proporciona un margen de seguridad suficiente para absorber estas variaciones sin comprometer el funcionamiento.

4.5. SENSÓRICA Y SISTEMAS DE MEDIDA

El correcto funcionamiento de la plataforma Stewart depende críticamente de la adquisición precisa y confiable de datos de posición, velocidad y orientación de la plataforma y de los actuadores. La sensórica constituye el elemento clave que permite

al sistema de control reaccionar en tiempo real a los movimientos inducidos por el oleaje, garantizando que la superficie de acceso permanezca estable y segura para los operarios. Para ello, se integran diferentes tipos de sensores adaptados a las necesidades específicas de la plataforma, cada uno seleccionado en base a criterios de precisión, robustez y compatibilidad con entornos marinos.

4.5.1. Sensores de los actuadores

Cada actuador hidráulico incorpora un sensor lineal de posición tipo LVDT (Linear Variable Differential Transformer), capaz de medir con precisión la extensión del pistón a lo largo del stroke nominal de 1 m. Estos sensores proporcionan información continua sobre la posición de cada actuador, con una precisión de ± 1 mm, lo que permite al sistema de control calcular la diferencia entre la posición real y la deseada y corregirla mediante el movimiento coordinado de los actuadores. La elección de LVDT se justifica no solo por su resolución, sino también por su robustez frente a vibraciones y golpes mecánicos, así como por su compatibilidad con ambientes salinos y húmedos. Se instalan directamente en el eje del pistón, asegurando mediciones lineales confiables y mínimas deformaciones por montaje.

En la plataforma Stewart, aunque la medición de velocidad de los actuadores es esencial para el control activo, no se instalan sensores físicos independientes para medirla. En lugar de ello, la velocidad se obtiene mediante derivación de la señal de posición proporcionada por los sensores lineales LVDT instalados en cada cilindro. Esta aproximación es habitual en aplicaciones hidráulicas, ya que evita la complejidad mecánica y la exposición de componentes adicionales a un entorno marino agresivo, sin comprometer la precisión necesaria para el control.

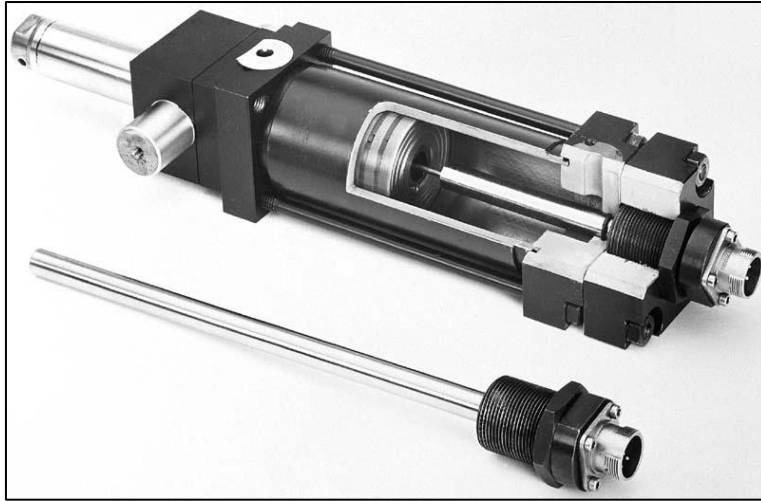


Figura 13: Sensor LVDT para medición de desplazamiento lineal. Adaptado de Sensores de Medida. (s.f.). Sensores de distancia LVDT [Ilustración]. <https://sensores-de-medida.es/medicion/sensores-y-transductores/sensores-de-distancia/sensores-de-distancia-lvdt/>

El cálculo de la velocidad se realiza a partir de la diferencia entre posiciones consecutivas medidas a intervalos de tiempo muy cortos, según la ecuación:

$$v(t) = \frac{dx(t)}{dt} \approx \frac{x(t) - x(t - \Delta t)}{\Delta t}$$

donde $x(t)$ representa la posición del pistón en el instante t y Δt el intervalo de muestreo de los sensores, típicamente de 10 ms o menos, lo que corresponde a frecuencias de muestreo superiores a 100 Hz. Esta frecuencia elevada permite capturar los cambios rápidos de movimiento inducidos por el oleaje, proporcionando al sistema de control la información necesaria para calcular las fuerzas correctivas de los actuadores.

4.5.2. Sensores de la base y de la plataforma

Para conocer el estado dinámico de la plataforma en tiempo real, se emplea una IMU (Inertial Measurement Unit), que combina acelerómetros, que miden las aceleraciones lineales, giroscopios, que miden las velocidades angulares y en algunos casos magnetómetros, que ayudan a la orientación respecto al norte magnético.

Estos sensores proporcionan datos sobre los desplazamientos y las rotaciones en los seis grados de libertad tanto de la base como de la plataforma, permitiendo al sistema de control calcular los movimientos compensatorios de los actuadores.

Se necesitan unos requisitos mínimos para las IMUs. Alta frecuencia de muestreo (≥ 100 Hz) para captar movimientos rápidos y una protección IP67 / IP68 para la resistencia en el entorno marino a las salpicaduras y el polvo.

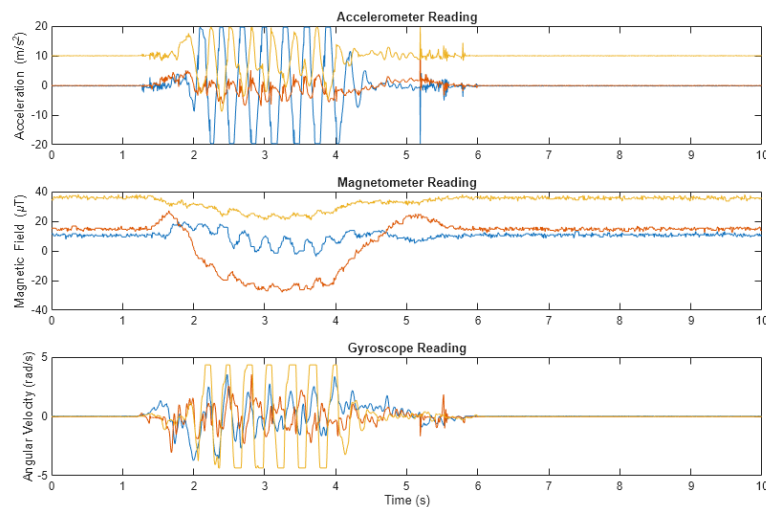


Figura 14: Señal de salida del filtro AHRS que representa la estimación de la orientación en tiempo real a partir de datos de acelerómetro, giroscopio y magnetómetro. Adaptado de MathWorks. (s.f.). *ahrsfilter – Estimación de orientación a partir de lecturas de acelerómetro, giroscopio y magnetómetro* [Gráfico]. <https://www.mathworks.com/help/nav/ref/ahrsfilter-system-object.html>

4.5.3. Sensores de carga y presión hidráulica

Cada cilindro hidráulico está equipado con transductores de presión que permiten medir la fuerza aplicada en tiempo real, asegurando que no se excedan los límites de diseño y verificando el reparto de carga entre los actuadores. La señal de presión, combinada con la información de posición, permite al sistema de control calcular las fuerzas dinámicas necesarias y detectar posibles sobrecargas o fallos parciales de algún actuador, aumentando así la seguridad operativa de la plataforma.

4.5.4. Consideraciones adicionales

Todos los sensores seleccionados para la plataforma Stewart deben cumplir con estrictos criterios de robustez y durabilidad, dado el entorno marino agresivo en el que operará el sistema. Esto implica que cada dispositivo, ya sea un sensor lineal de posición, un IMU o un transductor de presión hidráulica, debe estar certificado o específicamente diseñado para soportar corrosión, humedad, salinidad y vibraciones mecánicas. Los materiales expuestos y las carcasas de protección se seleccionan para garantizar que la vida útil de los sensores no se vea comprometida por la acción del agua salada o el movimiento constante de la plataforma.

Además, se incorpora redundancia en los sensores críticos del sistema. Por ejemplo, los actuadores disponen de sensores de posición duales o los parámetros de la IMU pueden ser estimados a partir de múltiples fuentes complementarias. Esta redundancia asegura que, ante el fallo de un sensor, el sistema pueda continuar operando de manera segura, evitando pérdidas de control que podrían poner en riesgo la integridad de la plataforma o la seguridad del personal. La redundancia no solo aumenta la fiabilidad del sistema, sino que también permite realizar diagnósticos y mantenimiento predictivo sin interrumpir la operación.

Por último, todos los sensores se integran en la arquitectura de control central de la plataforma, permitiendo una lectura sincronizada en tiempo real. La adquisición simultánea de datos de posición, orientación y presión hidráulica es esencial para el cálculo y ejecución de los movimientos compensatorios de los actuadores. Esta integración garantiza que el sistema de control pueda reaccionar de manera inmediata a cualquier perturbación inducida por el oleaje o el viento, manteniendo la superficie de acceso estable y asegurando la seguridad de los operarios durante las transferencias entre embarcaciones e infraestructuras flotantes.

4.6. PROCESADO Y FILTRADO DE LA SEÑAL

El procesamiento de señales es un elemento esencial para garantizar la precisión y estabilidad del control de la plataforma Stewart. Las señales provenientes de los sensores ya sean de posición, presión o IMU, contienen ruido eléctrico y mecánico, fluctuaciones provocadas por vibraciones, turbulencias hidráulicas o movimientos rápidos del oleaje. Para que el sistema de control pueda reaccionar de manera eficaz y segura, es imprescindible filtrar y suavizar estas señales sin introducir retrasos significativos que comprometan la respuesta dinámica de la plataforma.

4.6.1. Filtrado de la señal de los actuadores

Las señales de posición de los actuadores se obtienen de sensores lineales LVDT, que proporcionan la extensión del pistón en tiempo real con precisión del orden de ± 1 mm. Para eliminar el ruido de alta frecuencia, estas señales se filtran mediante un filtro digital paso bajo de segundo orden con frecuencia de corte de 10 Hz. Este valor se selecciona considerando que la plataforma puede experimentar movimientos rápidos inducidos por olas de hasta 1 Hz, por lo que se requiere filtrar frecuencias superiores sin atenuar la dinámica útil. La señal filtrada permite calcular tanto la posición como la

velocidad de los actuadores mediante derivación discreta, garantizando valores estables y precisos.

4.6.2. Filtrado de la señal IMU

Para la orientación y actitud de la plataforma, se utiliza un sistema AHRS que combina los datos de acelerómetros, giroscopios y magnetómetros de la IMU. El AHRS actúa como un filtro de fusión sensorica, procesando internamente las señales y aplicando algoritmos de estimación, como filtros de Kalman o filtros complementarios, para eliminar la deriva de los giroscopios y el ruido de alta frecuencia. Esto proporciona una señal de actitud y orientación ya filtrada y coherente, con una frecuencia de actualización de 100 Hz o más, suficiente para capturar los movimientos inducidos por el oleaje y el viento en tiempo real. La ventaja de usar un AHRS es que simplifica el procesamiento externo de la señal de la IMU, ofreciendo directamente al sistema de control datos precisos y fiables para calcular los movimientos compensatorios de los actuadores.

4.6.3. Procesado de las señales hidráulicas

Las señales de presión hidráulica de cada actuador se filtran mediante un promediado temporal de 50 ms, equivalente a un filtro paso bajo de primer orden, que elimina picos momentáneos provocados por turbulencias en el fluido o golpes de ariete. Esto permite que la fuerza calculada sea estable y representativa de la carga real aplicada, evitando que variaciones instantáneas afecten negativamente al control de la plataforma.

4.7. SELECCIÓN DE MATERIALES Y CRITERIOS DE DISEÑO ESTRUCTURAL

La elección de los materiales para la plataforma Stewart es un aspecto importante, ya que determina la capacidad del sistema para soportar las cargas estáticas y dinámicas, resistir la corrosión y garantizar la durabilidad en el entorno marino. Los criterios de selección se basan en tres factores principales: resistencia mecánica, rigidez estructural y resistencia a la corrosión, complementados con consideraciones de seguridad y mantenimiento.

4.7.1. Base y plataforma

La base se construye en acero inoxidable, con densidad $\rho = 7,7 \text{ g/cm}^3$. Este material ofrece alta resistencia mecánica y rigidez, esenciales para soportar la carga estática y dinámica de la plataforma, incluyendo los actuadores y el peso de la plataforma superior con los operarios. El acero inoxidable proporciona además una excelente resistencia a la corrosión, garantizando durabilidad en el entorno marino.

La plataforma es de aluminio naval, con densidad $\rho = 2,7 \text{ g/cm}^3$. Esta elección permite reducir significativamente el peso total de la parte móvil de la plataforma, disminuyendo la carga sobre los actuadores sin comprometer la rigidez necesaria. El aluminio naval combina buena resistencia mecánica con alta resistencia a la corrosión marina y facilidad de mecanizado.

4.7.2. Actuadores y articulaciones

Las articulaciones esféricas, necesarias para permitir el movimiento libre de los extremos de los actuadores, se construyen en acero inoxidable $\rho = 7,7 \text{ g/cm}^3$, asegurando que puedan soportar los esfuerzos laterales y las cargas cíclicas generadas por el oleaje sin desgaste prematuro. La dureza y resistencia a la corrosión del acero inoxidable garantizan que estas piezas críticas mantengan su funcionalidad durante largos periodos.

Los actuadores hidráulicos también están fabricados en acero inoxidable, proporcionando la fuerza estructural necesaria para soportar cargas de hasta 5 kN por cilindro y resistir esfuerzos dinámicos. La elección del acero asegura rigidez, resistencia a fatiga y durabilidad en entornos marinos, donde la exposición al agua salada podría comprometer materiales menos resistentes.

4.7.3. Cubiertas y protecciones

Las cubiertas y protecciones de la plataforma se realizan en fibra de vidrio reforzada (GFRP), con densidad $\rho = 2 \text{ g/cm}^3$. Este material ofrece buena resistencia mecánica y química, es ligero y resistente a la corrosión, proporcionando protección adicional a los componentes internos sin aumentar significativamente la carga total de la plataforma.

4.7.4. Tabla de la selección de los materiales

Elemento	Material	Densidad (g/cm ³)
Base	Acero inoxidable	7,7
Plataforma	Aluminio naval	2,7
Articulaciones	Acero inoxidable	7,7
Actuadores lineales	Acero inoxidable	7,7
Cubiertas y protecciones	Fibra de vidrio (GFRP)	2

Tabla 7: Selección del material según el componente de la plataforma Stewart

4.8. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO

La plataforma Stewart ha sido modelada en Simulink siguiendo la arquitectura propuesta por MathWorks en sus ejemplos oficiales, adaptándola para simular un entorno marino realista. El sistema se ha construido utilizando bloques sólidos, transformaciones geométricas y sensores virtuales, con el objetivo de replicar fielmente el comportamiento físico de la plataforma.

La simulación se ha configurado para replicar con precisión las condiciones físicas reales a las que estaría sometida una plataforma Stewart en un entorno marino. Para ello, se ha activado el campo gravitacional en el entorno Simscape, estableciendo una aceleración constante de $9,81 \text{ m/s}^2$, correspondiente al valor estándar de la gravedad terrestre. Esta configuración permite que todos los cuerpos sólidos del sistema respondan de forma coherente a las fuerzas gravitatorias, afectando tanto a la dinámica como al equilibrio de la estructura.

En cuanto al tratamiento temporal de la simulación, se ha optado por un esquema de paso variable, con un intervalo máximo de 0,1 segundos. Esta elección permite al simulador ajustar dinámicamente el tamaño del paso en función de la complejidad del sistema en cada instante, lo que mejora la eficiencia computacional sin comprometer la precisión de los resultados. Para la resolución de las ecuaciones diferenciales, se ha utilizado el método numérico ode45, basado en el algoritmo de Dormand-Prince. Este solver es especialmente adecuado para sistemas no rígidos y de comportamiento suave, como el que se presenta en este modelo, ya que ofrece un equilibrio óptimo entre velocidad de cálculo y exactitud en la integración.

La implementación de la plataforma Stewart en Simulink se ha llevado a cabo mediante el uso de bloques sólidos y elementos de Simscape Multibody, con el objetivo de replicar con precisión la estructura física y el comportamiento dinámico del sistema. La arquitectura se ha diseñado de forma modular, permitiendo una clara diferenciación entre los distintos componentes: base fija, plataforma móvil y actuadores lineales.

4.8.1. ESTRUCTURA GENERAL DE LA PLATAFORMA

La base y la plataforma se han modelado como cuerpos rígidos mediante bloques sólidos que incorporan la geometría previamente calculada e incorporan la densidad del material seleccionado, acero inoxidable y aluminio naval respectivamente.

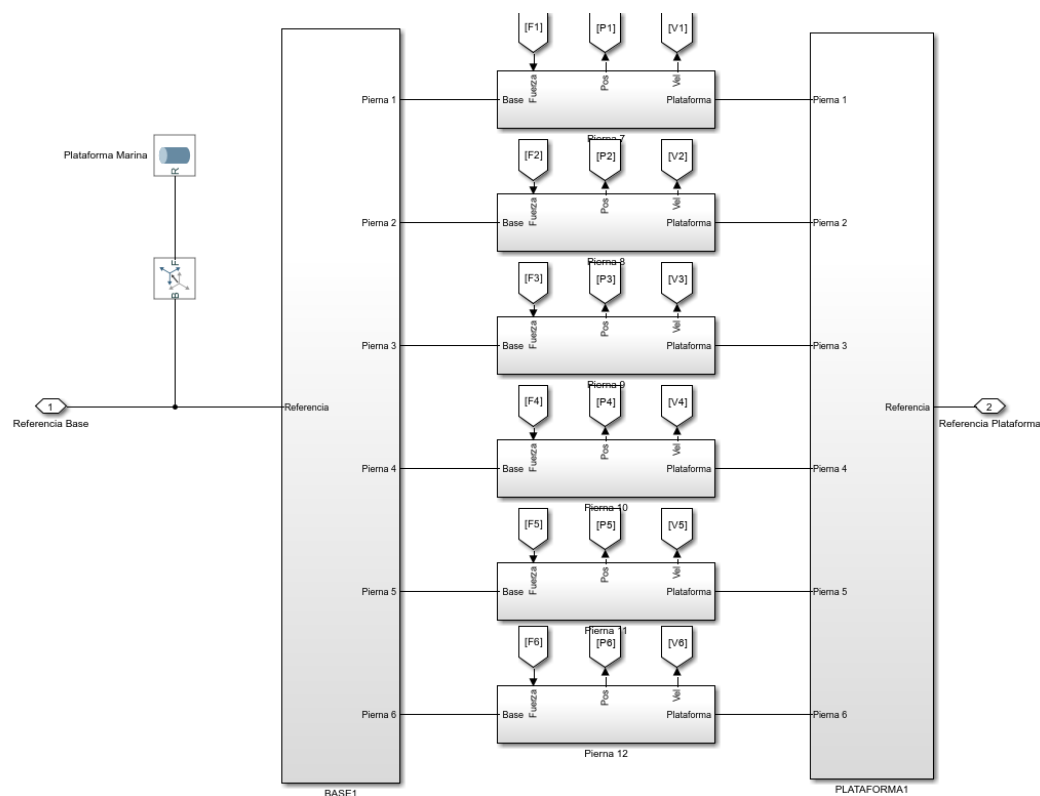


Figura 15: Modelado de la plataforma Stewart en SimScape

Cada uno de estos elementos incluye seis puntos de anclaje distribuidos según las coordenadas obtenidas en la función de la geometría de Matlab y mediante bloques Rigid Transform, lo que garantiza una correcta disposición espacial y simétrica. Estos anclajes actúan como puntos de conexión para los actuadores lineales, permitiendo la

transmisión de fuerzas y movimientos entre la base y la plataforma mediante juntas de revolución.

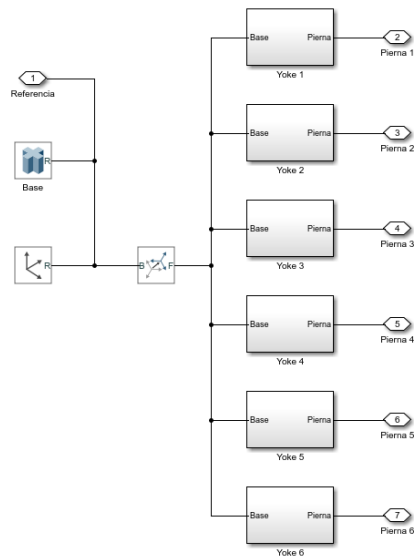


Figura 16: Modelado de la base en Simscape

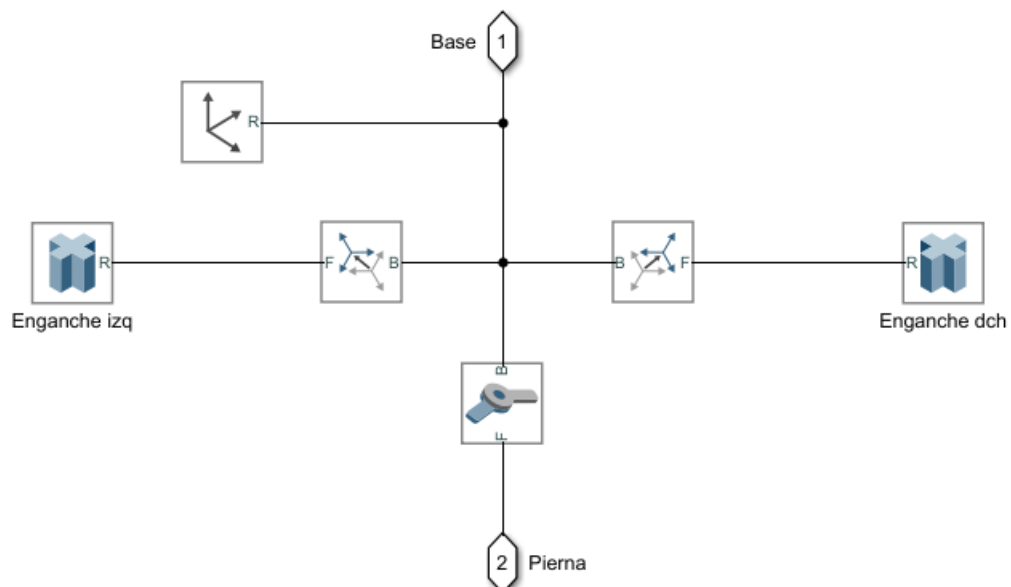


Figura 17: Modelado de los enganches en Simscape

Los actuadores lineales se han construido a partir de cuatro subcomponentes: dos enganches en los extremos, un actuador lineal inferior y un actuador lineal superior. Los enganches están unidos a la base y a la plataforma mediante juntas de revolución, que proporcionan libertad de movimiento en los extremos y permiten la adaptación angular necesaria para el funcionamiento del mecanismo. El actuador lineal inferior conecta el enganche de la base con el actuador, mientras que el actuador lineal superior une el actuador con el enganche de la plataforma. Esta configuración permite una transmisión eficiente del movimiento prismático generado por el actuador. Las juntas de revolución de los actuadores lineales respecto a las de la base o plataforma están desfasadas para poder generar la libertad de movimiento de las articulaciones.

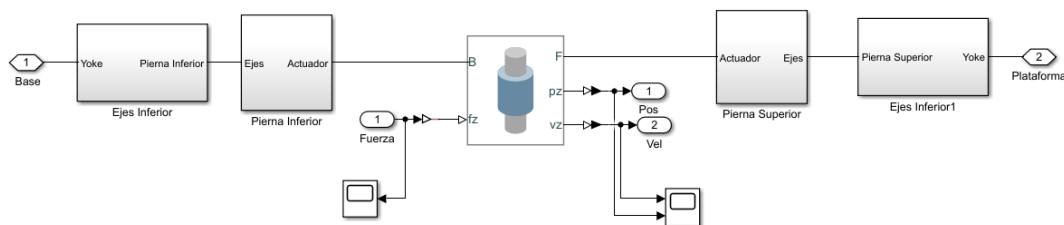


Figura 18: Modelado de un actuador lineal de la plataforma Stewart en Simscape

El actuador, situado entre el actuador lineal inferior y la superior, se ha modelado como una junta cilíndrica con la componente de revolución bloqueada, de modo que únicamente permite desplazamientos lineales. Esta restricción asegura que el actuador funcione como un elemento prismático, tal y como se requiere en una plataforma Stewart. Además, incorpora sensores virtuales de posición y velocidad, que permiten la realimentación al controlador PID encargado de generar la fuerza de entrada. Esta fuerza se calcula en función del error entre la posición deseada y la posición actual, permitiendo un control preciso y dinámico del sistema.

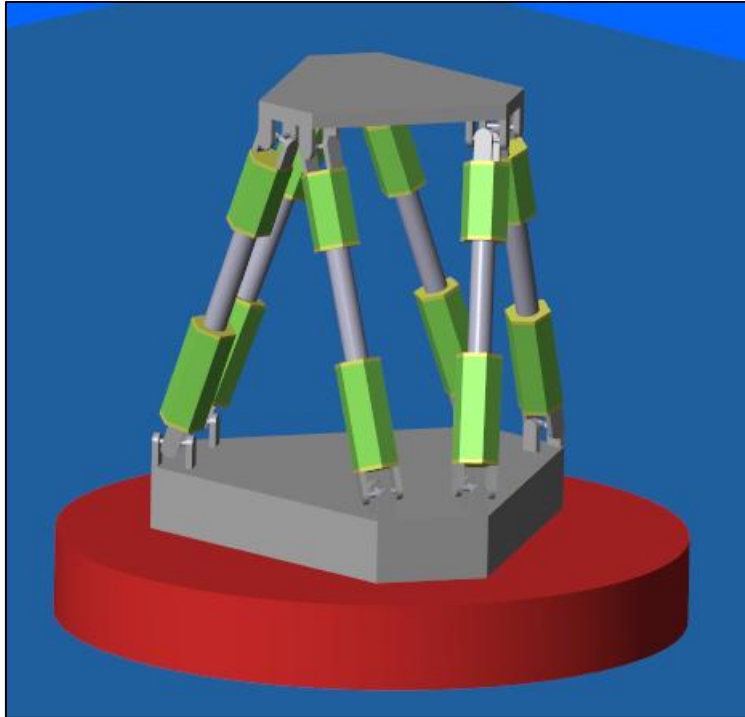


Figura 19: Modelado final de la plataforma Stewart en Simscape

4.8.2. SENSÓRICA Y FILTRADO

La sensórica del sistema se ha diseñado con el objetivo de replicar el comportamiento real de los sensores inerciales (IMUs) utilizados para estimar la orientación y posición tanto de la base como de la plataforma móvil. Este enfoque permite simular con mayor fidelidad las condiciones operativas de una plataforma Stewart en entornos dinámicos.

El proceso comienza con la incorporación de un bloque Transform Sensor, encargado de generar datos de aceleración lineal y velocidad angular a partir del movimiento relativo de los cuerpos. Estos datos se trasponen y discretizan para adaptarse al formato requerido por el bloque IMU, que actúa como sensor virtual. Este bloque introduce ruido artificial en las señales, simulando las perturbaciones que se producirían en un entorno físico real debido a vibraciones, interferencias o limitaciones del hardware.

Una vez generada la señal ruidosa, se procesa mediante un filtro AHRS (Attitude and Heading Reference System), que tiene como función suavizar y depurar la información proveniente del IMU. Este filtro aplica algoritmos de fusión sensorial para eliminar el ruido y mejorar la precisión de la estimación de orientación. La salida del filtro se obtiene en formato de cuaterniones, que posteriormente se convierte a ángulos de Euler mediante un bloque de conversión específico. Esta transformación permite trabajar con

una representación más intuitiva de la pose del sistema, facilitando su interpretación y uso en etapas posteriores.

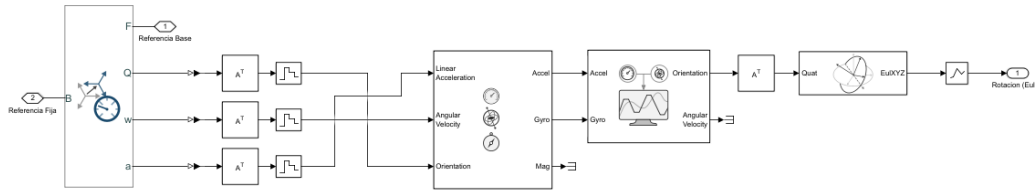


Figura 20: Modelado del sistema de sensórica (IMU) y filtrado (AHRS) de las señales medidas de la base en Simscape

La señal resultante, ya filtrada y convertida, se utiliza como entrada para el módulo de cinemática inversa, que calcula las longitudes necesarias de cada actuador lineal para alcanzar la orientación y posición deseadas de la plataforma. Este flujo de información garantiza una simulación coherente y realista, integrando la sensórica virtual con el control y la dinámica del sistema.

4.8.3. MATERIALES

Para representar correctamente las propiedades físicas de los distintos componentes de la plataforma Stewart, se ha asignado a cada bloque sólido una densidad específica, expresada en gramos por centímetro cúbico (g/cm^3). Esta densidad se ha introducido directamente en las propiedades de cada cuerpo rígido dentro del entorno Simscape Multibody, permitiendo que el simulador calcule de forma precisa las masas, inercias y efectos gravitatorios asociados a cada elemento.

La selección de densidades se ha realizado en función del material teórico que representa cada componente. Se ha utilizado una densidad de $7,7 \text{ g/cm}^3$ (acero inoxidable) para la base, actuadores lineales y articulaciones y $2,7 \text{ g/cm}^3$ (aluminio naval) para la plataforma. Esta parametrización permite simular con mayor realismo el comportamiento dinámico del sistema, especialmente en lo relativo a la distribución de masas y la respuesta ante fuerzas externas.

Cabe destacar que en esta implementación no se han modelado los recubrimientos superficiales de los materiales, como tratamientos anticorrosivos o capas de protección. Estos elementos, aunque relevantes en aplicaciones reales, se han omitido en la simulación por su escasa influencia en la dinámica global del sistema y para simplificar el modelo.

5. CINEMÁTICA DE LA PLATAFORMA STEWART

5.1. CINEMÁTICA DIRECTA

La cinemática directa de la plataforma Stewart consiste en determinar la posición y orientación de la plataforma superior a partir de las longitudes conocidas de los seis actuadores. A diferencia de la cinemática inversa, que se emplea habitualmente para control, la cinemática directa es más compleja, ya que requiere resolver un sistema de ecuaciones no lineales simultáneas.

Cada actuador conecta un punto de anclaje en la base con un punto de anclaje en la plataforma. La relación geométrica se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$L_i^2 = \|R \cdot P_i + T - B_i\|^2$$

donde L_i es la longitud del actuador i , R es la matriz de rotación que describe la orientación de la plataforma, y T es el vector de traslación del centro de la plataforma respecto a la base.

Dado que se trata de un sistema de seis ecuaciones no lineales con seis incógnitas, su resolución analítica es muy compleja y poco práctica. Por ello, se utilizan métodos iterativos numéricos, como Newton-Raphson o métodos de optimización, que permiten aproximar la posición y orientación de la plataforma con la precisión deseada.

Aunque la cinemática directa no se utiliza para controlar la plataforma, tiene un papel fundamental en la simulación y el diseño. Verifica la consistencia de la geometría, asegurando posturas físicas válidas de los actuadores, analiza escenarios con cargas extremas, ayudando a detectar configuraciones críticas y valida la cinemática inversa.

5.2. CINEMÁTICA INVERSA

La cinemática inversa de la plataforma Stewart consiste en determinar las longitudes que deben adoptar los seis actuadores hidráulicos para que la plataforma alcance una posición y orientación deseada en el espacio. A diferencia de la cinemática directa, este cálculo resulta mucho más sencillo, ya que la relación geométrica entre la base y la plataforma está claramente definida. Por este motivo, la cinemática inversa es la que se utiliza en los sistemas de control en tiempo real y, en particular, es la que se implementa en la simulación realizada en Simscape.

Para describir la postura de la plataforma se emplea, en primer lugar, el vector de traslación:

$$T = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

A continuación, se define la matriz de rotación, que describe la orientación de la plataforma en términos de los tres ángulos de Euler: roll, pitch y yaw. La matriz de rotación total se obtiene mediante la combinación de las rotaciones elementales en torno a los tres ejes:

$$R = R_Z(\psi) \cdot R_Y(\theta) \cdot R_X(\phi)$$

donde:

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

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

$$R_Z(\psi) = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Se calcula la longitud de cada actuador, para que la plataforma pueda adoptar la posición y orientación deseadas para la estabilización de esta, a partir de la siguiente expresión:

$$L_i = \|R \cdot P_i + T - B_i\| - L_{N_i}$$

Este cálculo se realiza de forma independiente para cada actuador, lo que permite obtener en tiempo real las longitudes para estabilizar la plataforma. La simplicidad de la cinemática inversa la convierte en la opción ideal para el control, ya que el sistema solo necesita conocer la posición y orientación deseada de la plataforma para calcular las longitudes de los actuadores y generar el movimiento compensatorio.

Si se derivan estas posiciones respecto al tiempo, se obtiene la velocidad de extensión de cada actuador:

$$V_i = \frac{(R \cdot P_i + T - B_i)}{\|R \cdot P_i + T - B_i\|} \cdot (\dot{R} \cdot P_i + \dot{T})$$

5.3. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO

La cinemática inversa de la plataforma Stewart se ha modelado en Simulink mediante una estructura modular que permite calcular las posiciones y velocidades

deseadas de los actuadores a partir de las referencias de movimiento de la plataforma. El sistema recibe como entrada los seis grados de libertad: traslación en los ejes X, Y y Z, y rotación en los ángulos de roll, pitch y yaw.

La implementación se divide en dos grandes bloques funcionales: el cálculo de la posición deseada de los actuadores y el cálculo de la velocidad deseada.

Cálculo de la posición deseada:

El objetivo de esta parte es implementar la fórmula de la cinemática inversa utilizando bloques de Simulink. La expresión utilizada es:

$$L_i = \|R \cdot P_i + T - B_i\| - L_{Ni}$$

Para obtener la matriz de rotación R, se parte de los ángulos de rotación roll, pitch y yaw. Se aplican tres rotaciones sucesivas sobre los ejes del sistema, combinando las matrices individuales mediante multiplicación en el orden adecuado. Cada elemento de la matriz se calcula por separado utilizando bloques trigonométricos (seno y coseno), y posteriormente se reagrupan en un bloque de reestructuración para formar la matriz completa.

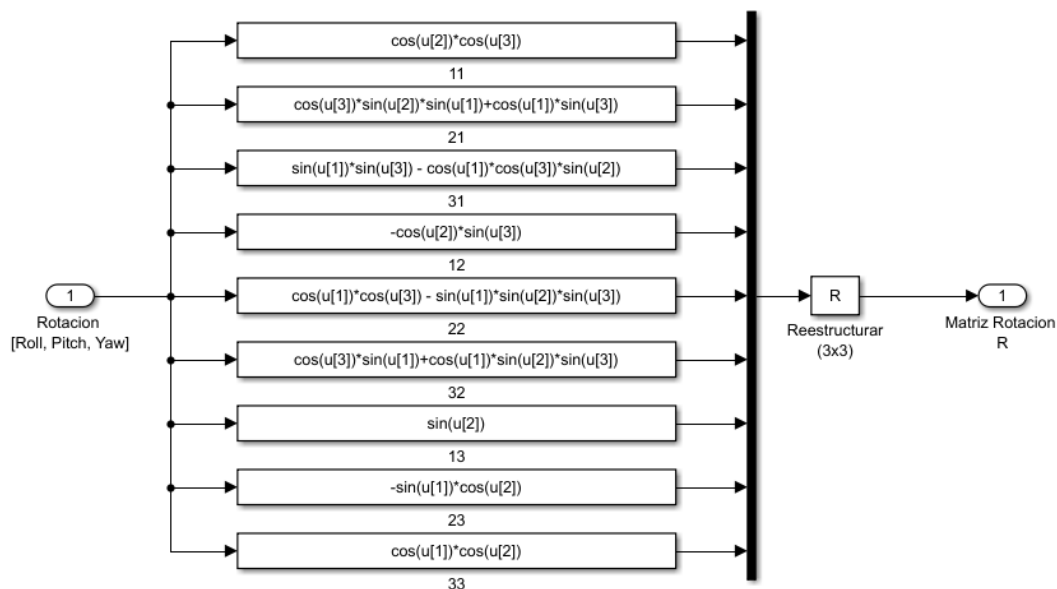


Figura 21: Modelado de la matriz de rotación en Simscape

Una vez obtenida la matriz R , se realiza la agrupación del vector de traslación T con el objetivo de generar una matriz de dimensión 3×6 , donde cada columna representa la traslación aplicada a uno de los seis actuadores lineales de la plataforma Stewart. Esta estructura permite realizar las operaciones vectoriales de forma paralela para cada actuador. Para ello, se emplea el bloque Matrix Concatenate, que agrupa las señales correspondientes a los desplazamientos en los ejes X, Y y Z, replicando el vector de traslación para cada actuador lineal. El resultado es una matriz que facilita la suma con los productos $R \cdot P_i$ y la posterior resta de los puntos de anclaje B_i , manteniendo la coherencia dimensional en todo el modelo:

$$R \cdot P_i + T - B_i$$

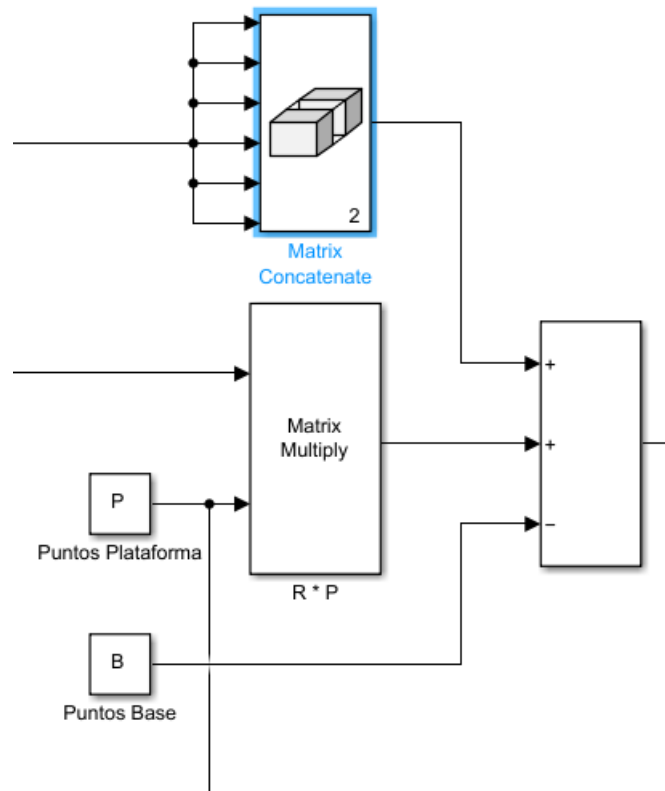


Figura 22: Modelado de la ecuación $R \cdot P_i + T - B_i$ en Simscape

Para calcular el módulo de cada actuador lineal, se utiliza un bloque Selector para extraer cada columna correspondiente a los seis actuadores lineales. Luego, se eleva al cuadrado cada componente, se suman y se aplica la raíz cuadrada para obtener la norma euclídea.

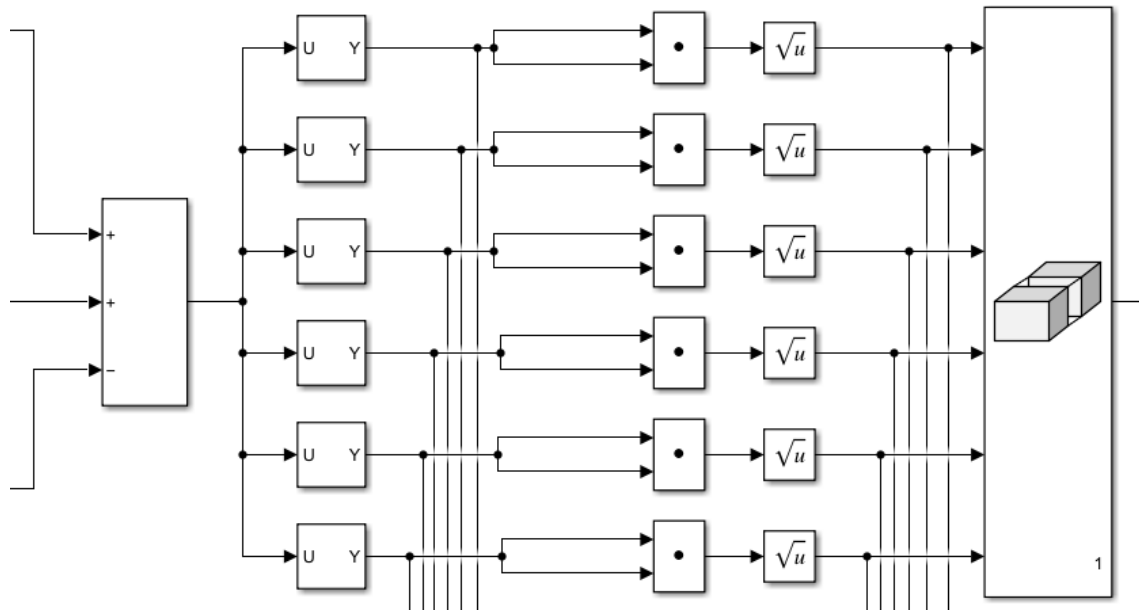


Figura 23: Modelado del módulo en Simscape

Finalmente, se agrupan los resultados mediante concatenación y se resta la longitud nominal L_N con un bloque Sum configurado para la resta, obteniendo así la longitud deseada de cada actuador.

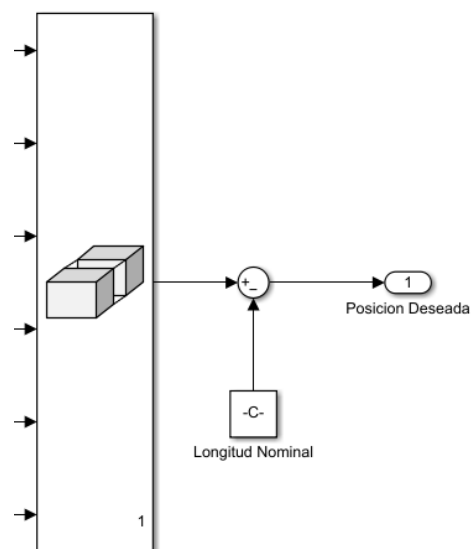


Figura 24: Modelado de la resta final de la longitud nominal y salida de la posición deseada de cada actuador en Simscape

Cálculo de la velocidad deseada:

La velocidad deseada de cada actuador se calcula con la siguiente expresión:

$$V_i = \frac{(R \cdot P_i + T - B_i)}{\|R \cdot P_i + T - B_i\|} \cdot (\dot{R} \cdot P_i + \dot{T})$$

En este caso, se reutilizan partes ya calculadas en el bloque de posición, como el numerador y el denominador de la fracción. Se utiliza el bloque Divide para obtener el vector unitario.

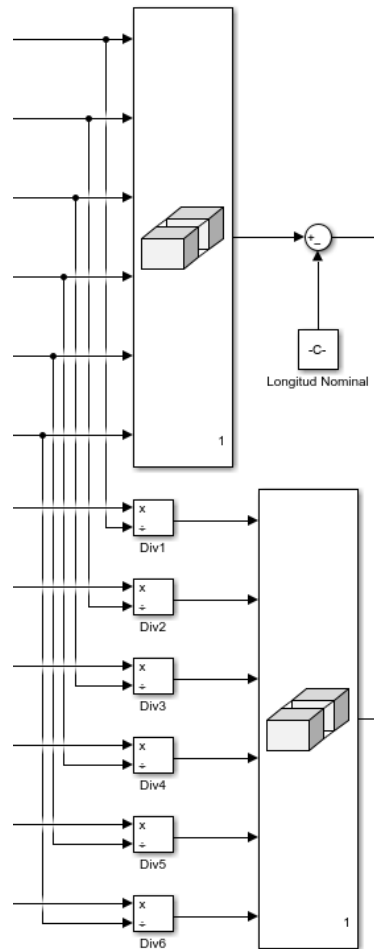


Figura 25: Modelado del uso del módulo ya modelado en el cálculo de la velocidad en Simscape

Para calcular la derivada de la matriz de rotación R , se derivan primero los ángulos de rotación mediante los bloques Gain y Derivative. Las funciones seno y coseno que forman la matriz se derivan aplicando la regla de la cadena:

$$\frac{d}{dt}(\cos \phi) = -\sin \phi \cdot \dot{\phi}$$

$$\frac{d}{dt}(\sin \phi) = \cos \phi \cdot \dot{\phi}$$

Estas operaciones se implementan con bloques Product, que multiplican las funciones trigonométricas por las derivadas de los ángulos correspondientes. Una vez derivadas todas las componentes individuales, se agrupan en una nueva matriz que representa la matriz de rotación derivada.

El vector T derivado se obtiene directamente mediante el bloque Derivative. Con estos valores, se calcula la expresión utilizando bloques Matrix Multiply y Sum:

$$\dot{R} \cdot P_i + \dot{T}$$

Finalmente, se multiplica por el vector unitario con el bloque Product, obteniendo así la velocidad deseada V_i .

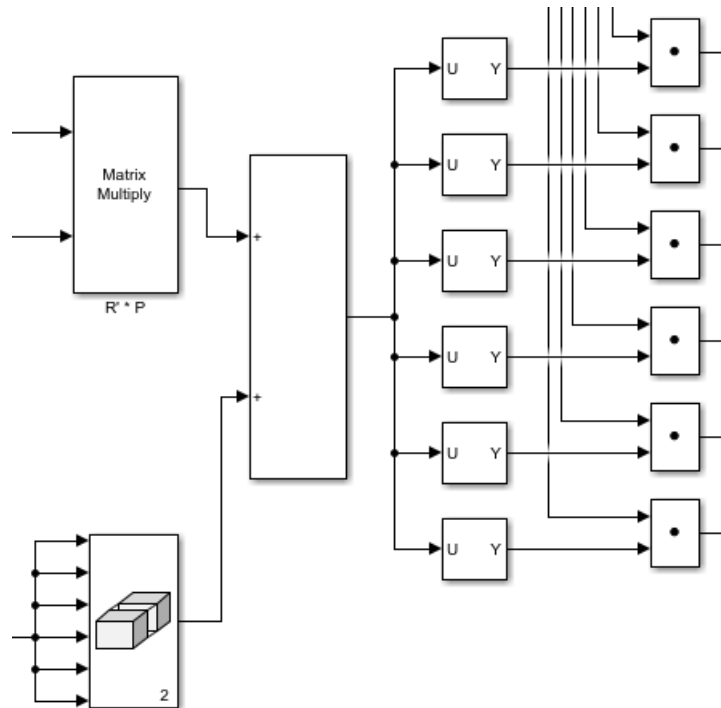


Figura 26: Modelado de la obtención $R' \cdot P_i + T'$ en Simscape

Toda la cinemática está organizada en un subsistema que recibe como entradas la traslación y rotación deseadas, y proporciona como salidas la longitud y velocidad necesarias para alcanzar la pose objetivo de la plataforma. Esta estructura modular facilita la integración con el modelo físico y permite realizar simulaciones precisas del comportamiento dinámico de la plataforma Stewart.

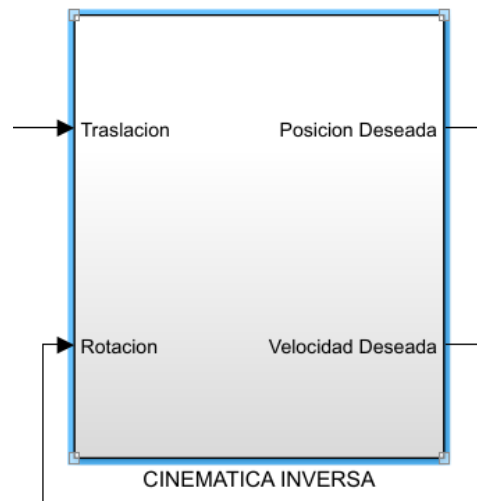


Figura 27: Visualización del subsistema de la cinemática inversa en Simscape

6. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL

6.1. TIPO DE CONTROL SELECCIONADO

El sistema de control de la plataforma Stewart se ha diseñado siguiendo un enfoque clásico basado en reguladores PID, debido a su simplicidad de implementación, su bajo coste computacional y su eficacia contrastada.

El control se organiza en dos niveles principales. En primer lugar, el control de posición de cada actuador tiene como objetivo que la longitud alcanzada coincida con la longitud de referencia, calculada previamente mediante la cinemática inversa en función de la posición y orientación deseadas de la plataforma. El regulador PID actúa sobre el error de posición:

$$e_p(t) = L_{actual,i} - L_{deseada,i}$$

En segundo lugar, se incluye un control de velocidad. Este lazo actúa sobre el error de velocidad, con el objetivo de mejorar la respuesta dinámica del sistema:

$$e_v(t) = V_{actual,i} - V_{deseada,i}$$

La incorporación de este segundo lazo permite una mejor compensación de perturbaciones rápidas, como las provocadas por el oleaje, y contribuye a reducir el sobreimpulso y los errores transitorios en la trayectoria de los actuadores.

La sintonización de las ganancias K_p , K_i y K_d de los controladores no se ha realizado mediante métodos analíticos, dado que la dinámica global de la plataforma resulta demasiado compleja para obtener un modelo cerrado sencillo. En su lugar, se ha seguido un procedimiento de ajuste empírico por prueba y error directamente en el entorno de simulación de Simscape.

El proceso consistió en un ajuste progresivo: en una primera fase, se fijó únicamente el término proporcional K_p incrementándolo hasta obtener una respuesta suficientemente rápida sin que aparecieran oscilaciones inestables. Posteriormente, se añadió el término derivativo K_d , que permitió amortiguar la respuesta y reducir el sobreimpulso. Finalmente, se incorporó el integrador K_i , para asegurar la eliminación del error en régimen permanente. De esta forma, se consiguió una buena relación entre estabilidad, rapidez y precisión. Tras diversas iteraciones, se seleccionaron los siguientes valores finales: $K_p = 2000$, $K_d = 1000$, $K_i = 250$.

Estos coeficientes permiten mantener la plataforma estable, con un error de posición reducido y una adecuada amortiguación de las oscilaciones, garantizando un compromiso entre rapidez de respuesta y robustez del sistema de control.

Aunque el método de prueba y error no garantiza un diseño óptimo ni robusto frente a variaciones de parámetros, sí permite ajustar de manera práctica el comportamiento del sistema en un entorno de simulación controlado. Además, este enfoque resulta adecuado en fases tempranas de desarrollo, ya que simplifica la implementación y facilita la validación experimental posterior, donde podrán aplicarse técnicas de sintonización más avanzadas si el rendimiento lo requiere.

6.2. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO

El controlador PID se ha desarrollado íntegramente en Simulink, utilizando bloques funcionales básicos para representar cada uno de los términos del control. La estructura del controlador se ha diseñado de forma modular, lo que permite ajustar individualmente las ganancias de cada componente (K_p , K_i , K_d) y observar su efecto sobre la señal de salida. Esta configuración facilita tanto la sintonización del sistema como su análisis dinámico.

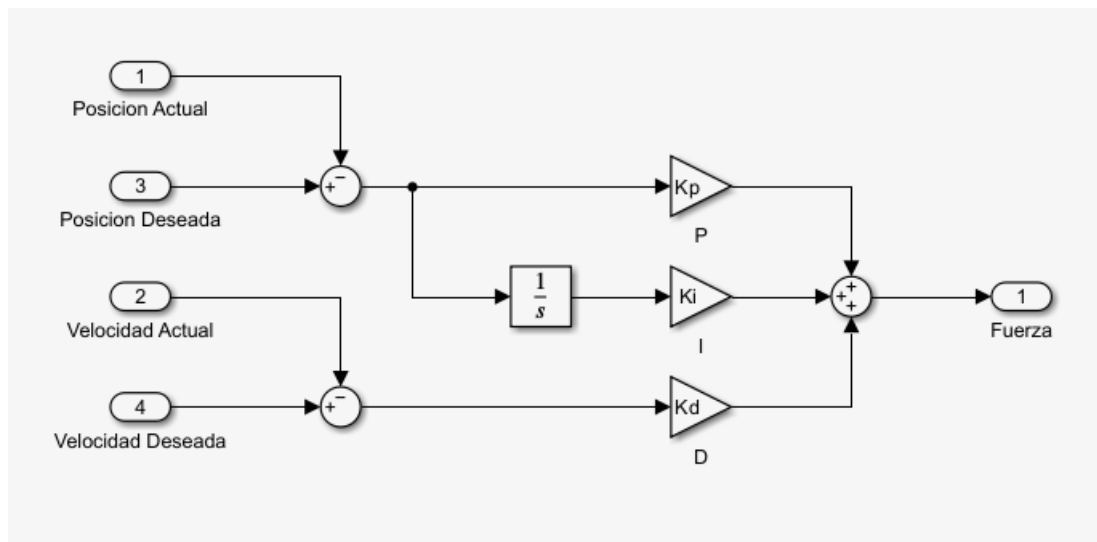


Figura 28: Modelado del controlador PID de posición y velocidad en Simscape

Para obtener las señales de error, se emplean bloques Sum que realizan la resta entre las referencias deseadas y las señales reales del sistema:

$$e_p = p_{deseada} - p_{actual}$$

$$v_p = v_{deseada} - v_{actual}$$

Estas señales de error constituyen la base para los tres términos del controlador PID.

El error de posición se multiplica por la ganancia proporcional K_p mediante un bloque Gain. Este término proporciona una respuesta inmediata proporcional al error, contribuyendo a reducirlo rápidamente.

El mismo error de posición se integra utilizando un bloque Integrator y posteriormente se multiplica por la ganancia integral K_i . Este componente permite eliminar el error estacionario acumulado a lo largo del tiempo, mejorando la precisión del sistema.

El error de velocidad se multiplica por la ganancia derivativa K_d mediante otro bloque Gain. Este término anticipa el comportamiento del sistema, proporcionando una acción correctiva basada en la velocidad de cambio del error, lo que mejora la estabilidad y reduce las oscilaciones.

Los tres términos calculados (P, I y D) se suman mediante un bloque Sum, generando así la fuerza de control que se aplica al sistema. Esta señal es la encargada de corregir la posición y velocidad del actuador, asegurando que la plataforma Stewart siga con precisión las referencias deseadas.

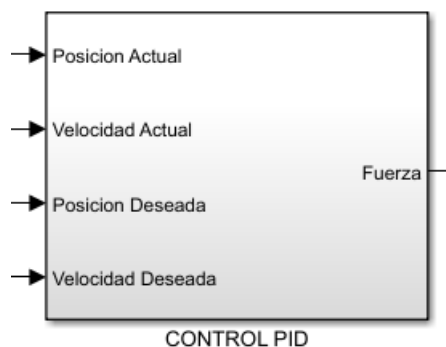


Figura 29: Visualización del subsistema del control PID en Simscape

7. GENERACIÓN DEL MOVIMIENTO DEL MAR

7.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL OLEAJE

El oleaje es el resultado de la transferencia de energía del viento a la superficie del mar. Este fenómeno se caracteriza por su comportamiento irregular y aleatorio, lo que lo convierte en un proceso estocástico que debe ser tratado estadísticamente. En el contexto de sistemas offshore, es fundamental comprender y modelar con precisión las características físicas del oleaje, ya que este determina las condiciones dinámicas del entorno.

7.1.1. Representación matemática

El oleaje puede modelarse como una superposición de ondas armónicas con diferentes frecuencias, amplitudes y fases. La elevación de la superficie del mar en un punto fijo se expresa como:

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^N A_i \cos(\omega_i t + \phi_i)$$

Donde $\eta(t)$ es la elevación de la superficie del mar en el instante t , A_i es la amplitud, ω_i es la frecuencia angular y ϕ_i es la fase aleatoria. Este modelo permite generar series temporales de oleaje a partir de espectros de energía, como el Pierson-Moskowitz o el JONSWAP, que describen cómo se distribuye la energía del oleaje en función de la frecuencia.

7.1.2. Espectro de energía

El espectro de energía $S(\omega)$ representa la densidad espectral de potencia del oleaje en función de la frecuencia angular ω . A partir de este espectro se pueden calcular los momentos espectrales, que son integrales definidas de la forma:

$$m_n = \int_0^{\infty} \omega^n S(\omega) d\omega$$

El momento espectral de orden cero m_0 es especialmente importante, ya que permite calcular la altura significativa de ola (H_s), uno de los parámetros más utilizados en ingeniería marítima.

7.1.3. Parámetros físicos

La **altura significativa H_s** es el parámetro más representativo del estado del mar. Se define como:

$$H_s \approx 4\sqrt{m_0}$$

Donde m_0 es el momento espectral de orden cero, que representa la energía total del oleaje:

$$m_n = \int_0^{\infty} S(\omega) d\omega$$

Este valor representa, de forma estadística, la media del tercio superior de las olas más altas registradas en un intervalo de tiempo. Es el parámetro más empleado en normativas como DNV, ITTC y ABS para caracterizar el estado del mar.

El **periodo de pico (T_p)** es el periodo de la componente de frecuencia con mayor energía. Se relaciona con la frecuencia angular de pico ω_p mediante:

$$T_p = \frac{2\pi}{\omega_p}$$

El **periodo medio entre cero cruzamientos (T_z)** representa el tiempo medio entre dos cruces consecutivos por el nivel medio de la superficie del mar. Se calcula como:

$$T_z = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}}$$

Donde m_2 es el momento espectral de orden dos:

$$m_2 = \int_0^{\infty} \omega^2 S(\omega) d\omega$$

El período T_z está relacionado con la frecuencia dominante del oleaje y es clave para determinar la dinámica de estructuras flotantes.

La **longitud de onda (λ)** en aguas profundas, se puede aproximar mediante:

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi}$$

Donde g es la aceleración de la gravedad y T el período de la ola.

El **número de cruce por cero N_z** permite estimar la cantidad de olas en un periodo de tiempo T :

$$N_z = \frac{T}{T_z}$$

Estos parámetros permiten construir modelos espectrales precisos y generar series temporales de oleaje que alimentan el sistema de simulación de la plataforma Stewart.

7.1.4. Influencia en estructuras flotantes

El oleaje induce movimiento en embarcaciones y plataformas flotantes en sus seis grados de libertad:

Movimiento	Tipo	Eje de referencia
Surge	Traslación	X
Sway	Traslación	Y
Heave	Traslación	Z
Roll	Rotación	X
Pitch	Rotación	Y
Yaw	Rotación	Z

Tabla 8: Descripción del movimiento inducido en embarcaciones por el oleaje.

La magnitud de estos movimientos depende de la interacción entre el oleaje y las propiedades físicas de la embarcación (masa, geometría, centro de gravedad, etc.). Para simular correctamente este comportamiento, es necesario contar con una representación realista del oleaje que permita generar excitaciones dinámicas precisas.

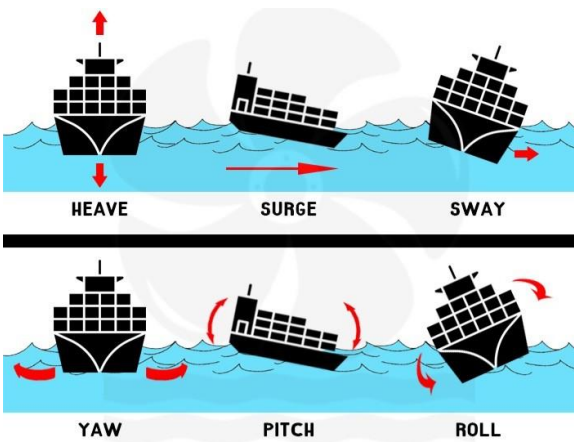


Figura 30: Visualización de los movimientos de un barco en el mar. Adaptado de Shipping and Freight Resource. (2022). How to track your cargo anywhere – Product Review – Tive’s real-time IoT data tracker.

7.2. MODELOS ESPECTRALES DEL MAR

Para simular el comportamiento del oleaje de forma realista y eficiente, especialmente en aplicaciones de control en tiempo real como la plataforma Stewart, se utilizan modelos espectrales. Estos modelos permiten representar el oleaje como un proceso aleatorio, describiendo cómo se distribuye su energía en función de la frecuencia. A partir de ellos, se pueden generar series temporales de elevación del mar que sirven como entrada para sistemas dinámicos.

7.2.1. Espectro Pierson-Moskowitz (PM)

El modelo Pierson–Moskowitz representa mares completamente desarrollados, es decir, cuando el viento ha soplado de forma constante durante un tiempo suficiente sobre una gran extensión de agua. El espectro de energía del oleaje se define como:

$$S_{PM}(\omega) = \frac{A}{\omega^5} e^{-\frac{B}{\omega^4}}$$

Siendo los coeficientes: $A = \frac{4\pi^3 H_s^2}{T_z^4}$, $B = \frac{16\pi^3}{T_z^4}$,

Donde H_s es la altura significativa del oleaje, relacionada con la energía total del mar, T_z es período medio entre cero cruzamientos, que caracteriza la frecuencia dominante del oleaje y ω es la frecuencia angular, relacionada con la frecuencia lineal por $\omega = 2\pi f$.

Este espectro tiene un pico de energía en torno a la frecuencia dominante, y decae rápidamente para frecuencias altas y bajas. Es ideal para representar mares desarrollados bajo viento constante.

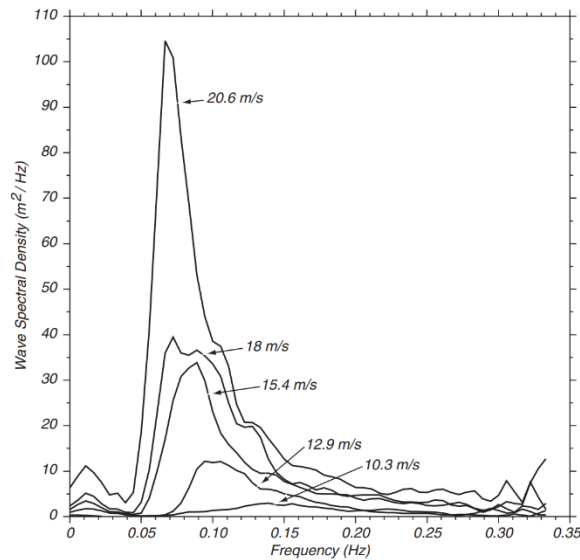


Figura 31: Espectro Pierson-Moskowitz que describe la distribución de energía de las olas en función de la frecuencia en un mar completamente desarrollado. Adaptado de Stewart, R. H. (s.f.). 16.4: Ocean-Wave Spectra. En Introduction to Physical Oceanography. LibreTexts. [https://geo.libretexts.org/Bookshelves/Oceanography/Introduction to Physical Oceanography %28Stewart%29/16: Ocean Waves/16.4: Ocean-Wave Spectra](https://geo.libretexts.org/Bookshelves/Oceanography/Introduction%20to%20Physical%20Oceanography%28Stewart%29/16%3A%20Ocean%20Waves/16.4%3A%20Ocean-Wave%20Spectra)

7.2.2. Espectro JONSWAP

El espectro JONSWAP (Joint North Sea Wave Project) es una extensión del PM que permite modelar mares en crecimiento, es decir, cuando el viento aún está generando oleaje. Introduce un pico de energía más agudo mediante el parámetro γ , que representa el factor de agudización del espectro:

$$S_J(\omega) = S_{PM}(\omega) \cdot \gamma e^{\left(-\frac{(\omega - \omega_p)^2}{2\sigma^2 \omega_p^2} \right)}$$

Donde ω_p es la frecuencia de pico, σ es el ancho de pico ($\sigma \approx 0.07$ si $\omega < \omega_p$, $\sigma \approx 0.09$ si $\omega > \omega_p$) y γ es el factor de agudización (típicamente entre 1 y 7).

Este modelo permite representar oleajes más realistas en zonas costeras o en condiciones de viento variable, y es el más utilizado en simulaciones operativas.

7.2.3. Tabla comparativa

Modelo	Tipo de mar	Ventajas	Limitaciones
Pierson-Moskowitz	Mar desarrollado	Simplicidad	No representa el crecimiento del oleaje

JONSWAP	Mar en crecimiento	Más realista y adaptable	Tiene más parámetros y más complejidad
----------------	--------------------	--------------------------	--

Tabla 9: Comparación de los espectros PM y JONSWAP

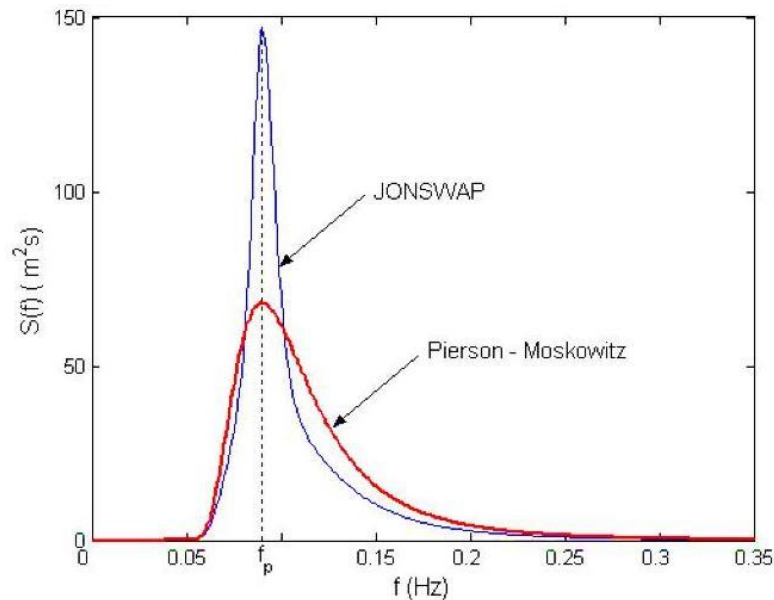


Figura 32: Comparación del espectro de energía del oleaje entre el modelo de Pierson-Moskowitz y datos reales obtenidos en el Golfo de México. Adaptado de Tinoco, H., & López, I. (2014). *Ondas Superficiales en el Mar (Review)*. ResearchGate. https://www.researchgate.net/figure/Figura-16-Comparacion-espectro-de-energia-del-oleaje_fig10_263443211

Ambos modelos permiten generar series temporales de oleaje mediante transformadas inversas, que luego se convierten en excitaciones dinámicas para embarcaciones en sus seis grados de libertad.

7.3. MOVIMIENTO DE EMBARCACIONES

Para modelar cómo responde una embarcación al oleaje, se utilizan las Funciones de Amplitud de Respuesta (RAO). Estas funciones relacionan la entrada (oleaje) con la salida (movimiento del buque) en cada grado de libertad:

$$RAO(\omega) = \frac{X(\omega)}{A(\omega)}$$

Donde $X(\omega)$ es la amplitud del movimiento de la embarcación y $A(\omega)$ es la amplitud de la ola que incide. La forma general de un RAO puede expresarse como:

$$RAO(\omega) = \frac{C}{(M + A(\omega)) \cdot \omega^2 + iB(\omega)\omega}$$

Donde M es la masa de la embarcación, A(ω) es la inercia, B(ω) es el coeficiente de amortiguamiento lineal y C es el coeficiente de fuerza de restauración.

Estas funciones se obtienen mediante simulaciones hidrodinámicas o ensayos en canal de olas, y permiten calcular el movimiento de la cubierta del buque en respuesta al oleaje.

7.4. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO

Para simular el efecto del oleaje sobre la plataforma Stewart, se ha incorporado un modelo de perturbación que representa el movimiento del mar de forma simplificada pero funcional. Esta perturbación se aplica como entrada externa al sistema, afectando tanto la posición como la orientación de la base de la plataforma.

La generación de la señal se ha realizado mediante un bloque MATLAB Function, cuya entrada es el tiempo y cuya salida son los seis grados de libertad: traslación en los ejes X, Y, Z y rotación en los ángulos de roll, pitch y yaw. Para permitir una evaluación continua de la función aleatoria, se ha definido un paso de simulación discreto de 0.01 segundos, lo que permite que el bloque evalúe correctamente las funciones de generación de números aleatorios (rng) dentro de unos límites establecidos.

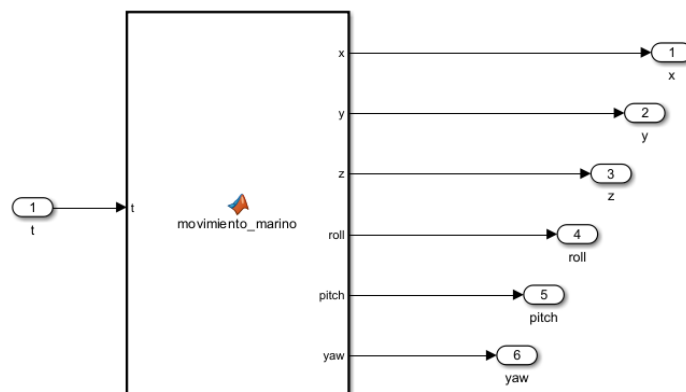


Figura 33: Modelado de las señales del movimiento del mar en Simscape

El modelo de oleaje se basa en la suma de componentes armónicas aleatorias, generadas mediante la función rand, lo que proporciona una señal con apariencia irregular y dinámica, intentando asemejarse al comportamiento real del mar. Esta señal simula variaciones en la altura y orientación de la base, provocadas por el movimiento del agua.

Para aplicar esta señal al modelo físico, se ha descartado el uso de la junta de seis grados de libertad (6-DOF Joint), ya que esta no permite introducir señales independientes de posición para cada grado de libertad. En su lugar, se ha optado por una combinación de juntas individuales: una junta de traslación para controlar los desplazamientos en X, Y y Z y Tres juntas de revolución, orientadas correctamente para simular los giros en roll, pitch y yaw.

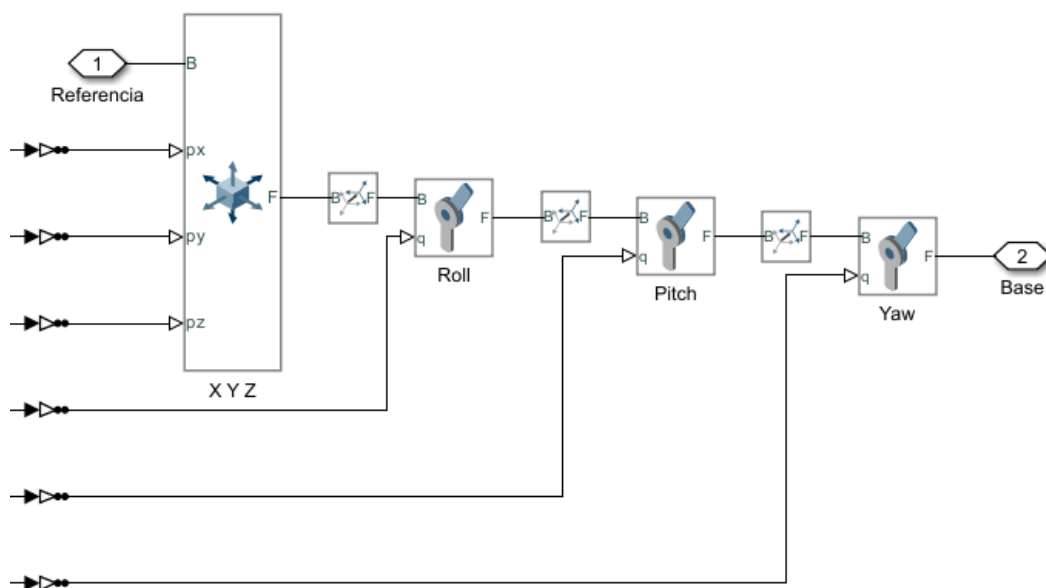


Figura 34: Modelado de las diferentes juntas para permitir el movimiento en seis grados de libertad en Simscape

Estas juntas se han conectado mediante bloques Rigid Transform, tomando como referencia un punto fijo en el mar, lo que permite aplicar la señal generada por el bloque MATLAB Function directamente sobre la base de la plataforma. De este modo, se logra controlar la base en los seis grados de libertad, reproduciendo el efecto del oleaje sobre la estructura.

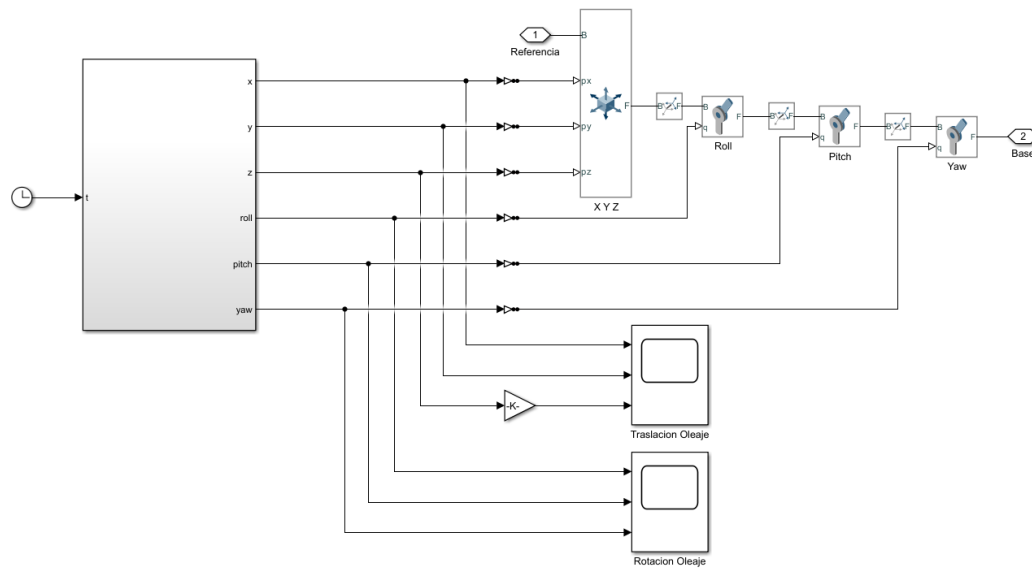


Figura 35: Modelo general del sistema de movimiento en Simscape

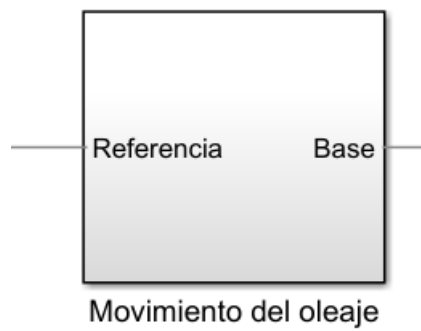


Figura 36: Visualización del subsistema del movimiento del mar en Simscape

8. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Las simulaciones se han llevado a cabo en Simscape Multibody, un entorno que permite modelar sistemas mecánicos con un alto grado de fidelidad. Aunque se han considerado aspectos clave como la geometría, las masas y las restricciones cinemáticas de la plataforma Stewart, el modelo no contempla ciertos factores presentes en un entorno real, como el desgaste de componentes, el juego mecánico o las limitaciones de control en tiempo real. Aun así, esta aproximación proporciona una base sólida para analizar el comportamiento dinámico del sistema y validar el diseño del controlador bajo condiciones representativas.

8.1. SIMULACIÓN 1 (ALTURA MÁXIMA DE OLA DE 1,25M)

La primera gráfica muestra la evolución temporal de la altura del oleaje, generado como una señal compuesta por múltiples frecuencias armónicas. Este enfoque permite simular un entorno marino realista, con interferencias entre ondas que provocan variaciones no periódicas.

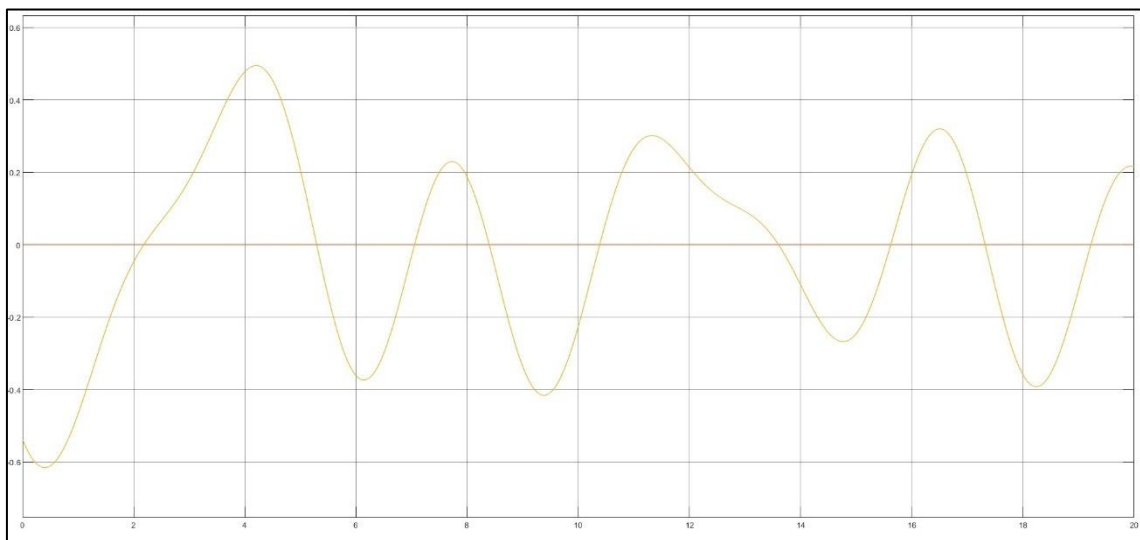


Figura 37: Movimiento marino en la simulación 1

En cuanto al comportamiento del sistema, los actuadores presentan una fase transitoria breve con ligeras oscilaciones, propias de la adaptación inicial ante la perturbación. La corrección es rápida y efectiva, con errores que tienden a cero en pocos segundos, lo que refleja una excelente respuesta del controlador.

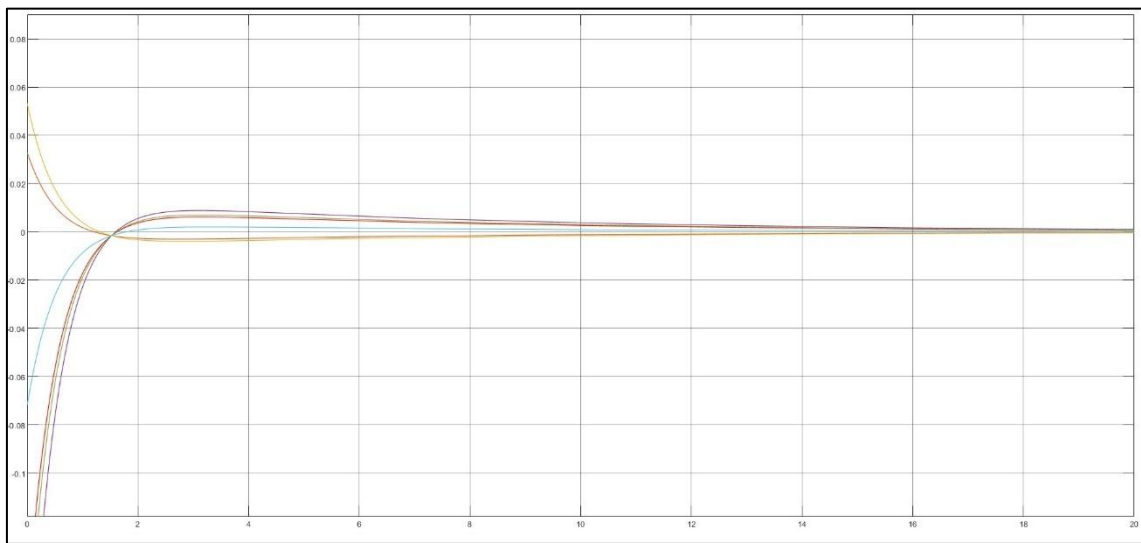


Figura 38: Error de posición de los actuadores en la simulación 1

Las fuerzas generadas por los actuadores se mantienen dentro de un margen seguro de $\pm 1,1$ kN, sin indicios de sobrecarga.

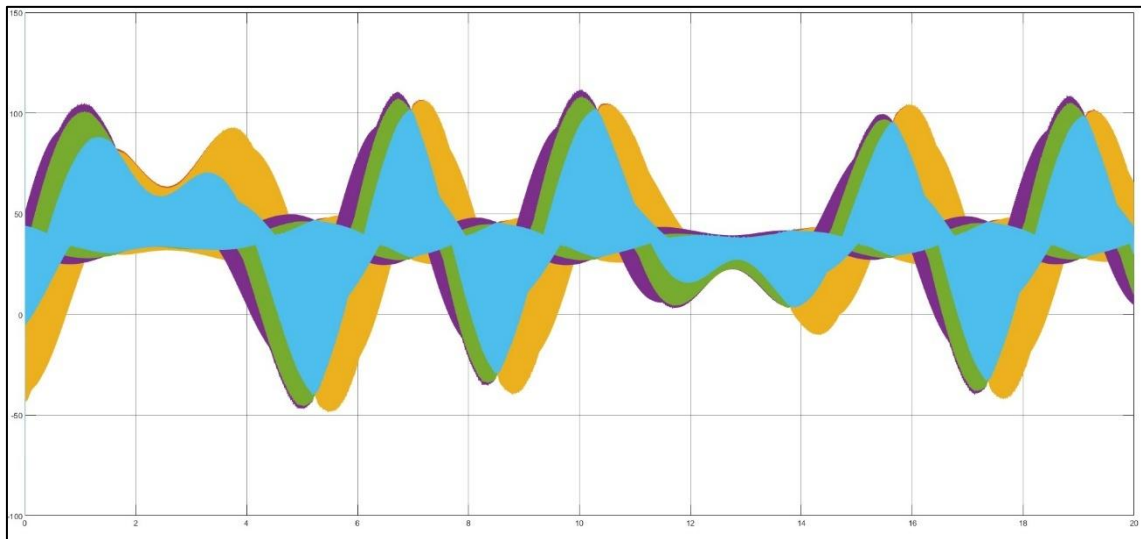


Figura 39: Fuerza aplicada por los actuadores en la simulación 1

Las velocidades, por su parte, oscilan suavemente en torno a ± 3 mm/s, lo que garantiza un funcionamiento mecánico estable y sin esfuerzos bruscos.

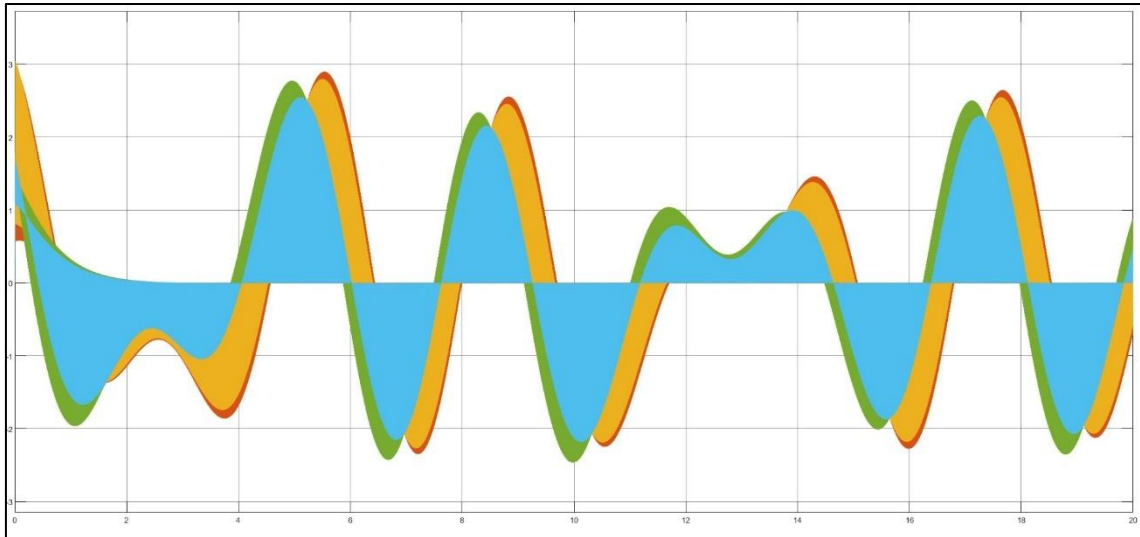


Figura 40: Velocidad de los actuadores en la simulación 1

La plataforma conserva su posición de referencia con gran precisión. Los desplazamientos en los ejes X e Y son prácticamente nulos, mientras que el eje Z se estabiliza en torno a los 0,53 m, valor objetivo.

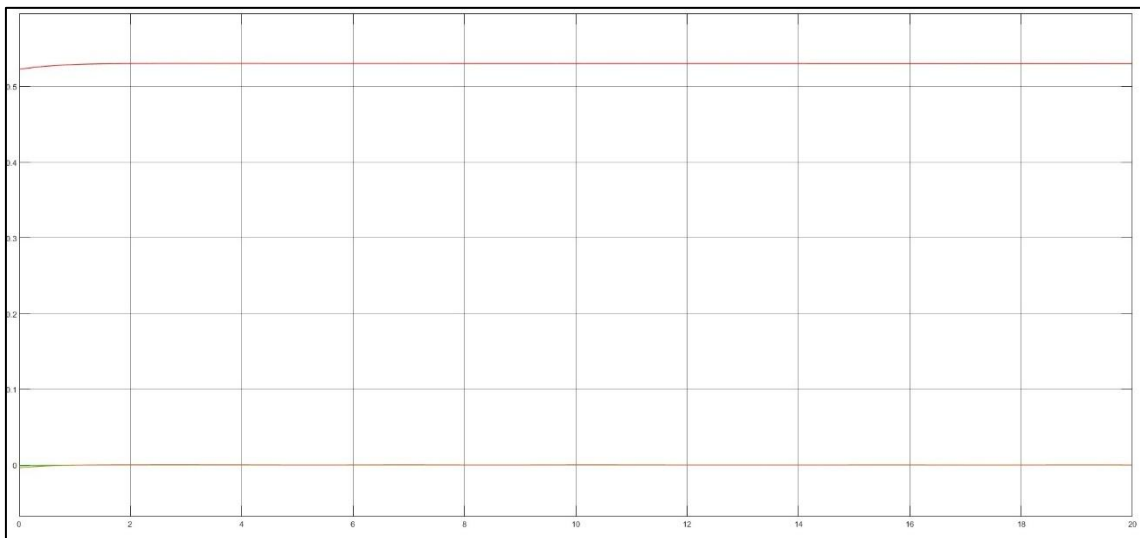


Figura 41: Movimiento de traslación de la plataforma en la simulación 1

En cuanto a la orientación, se observa una rotación controlada: roll y pitch permanecen en 0 rad, y yaw se estabiliza cerca de 1,05 rad ($\approx 60^\circ$), sin variaciones significativas.

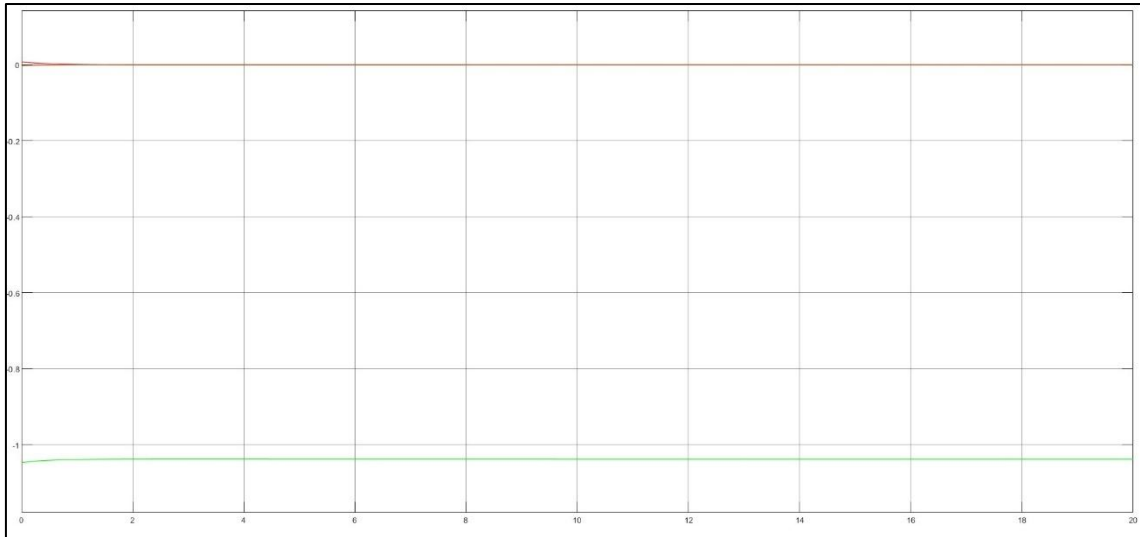


Figura 42: Movimiento de rotación de la plataforma en la simulación 1

8.2. SIMULACIÓN 2 (ALTURA MÁXIMA DE OLA DE 3,25M)

En este escenario, el oleaje presenta mayor intensidad, lo que se traduce en una perturbación más exigente para el sistema.

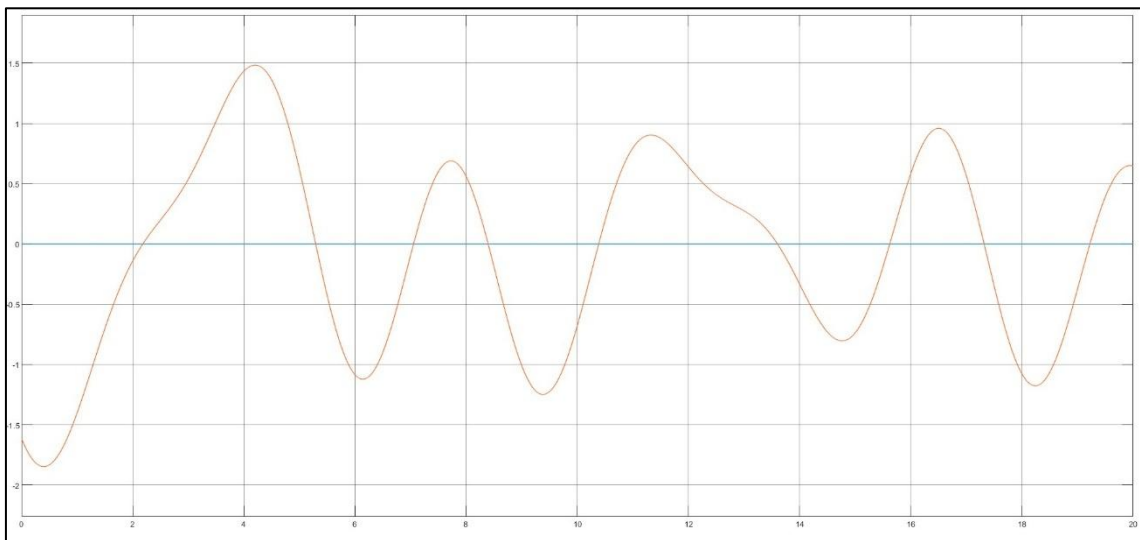


Figura 43: Movimiento marino en la simulación 2

La señal de entrada provoca una respuesta inicial con desviaciones negativas en los actuadores, seguida de una corrección rápida y sin oscilaciones prolongadas. El sistema demuestra una capacidad robusta de adaptación frente a condiciones marinas más agresivas.

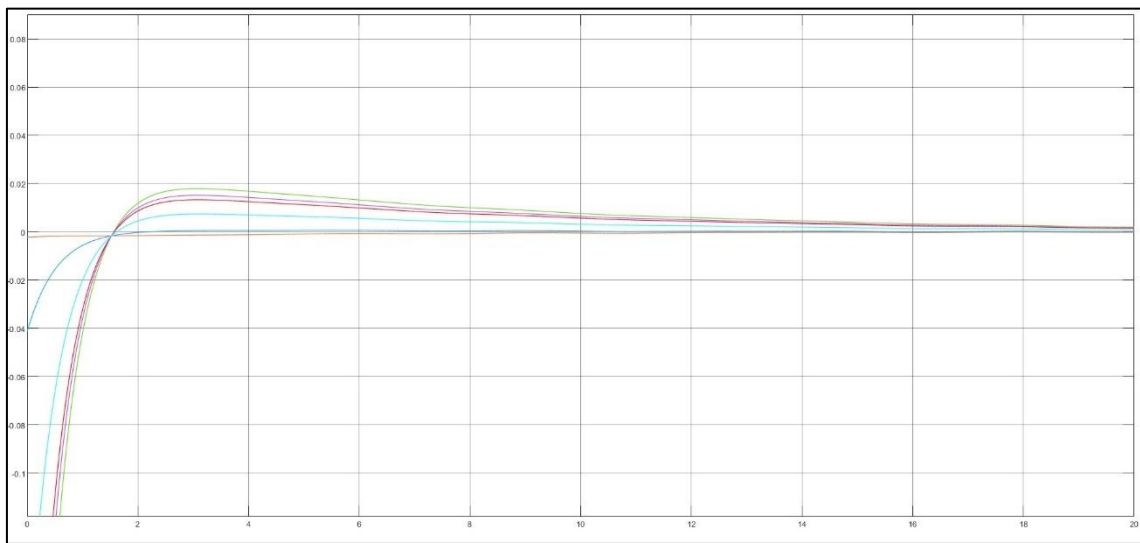


Figura 44: Error de posición de los actuadores en la simulación 2

Las fuerzas aplicadas alcanzan valores de hasta $\pm 2,5$ kN, distribuidas de forma eficiente entre los seis actuadores. No se detectan sobreesfuerzos, lo que confirma una correcta elección de parámetros y una buena gestión de carga por parte del controlador.

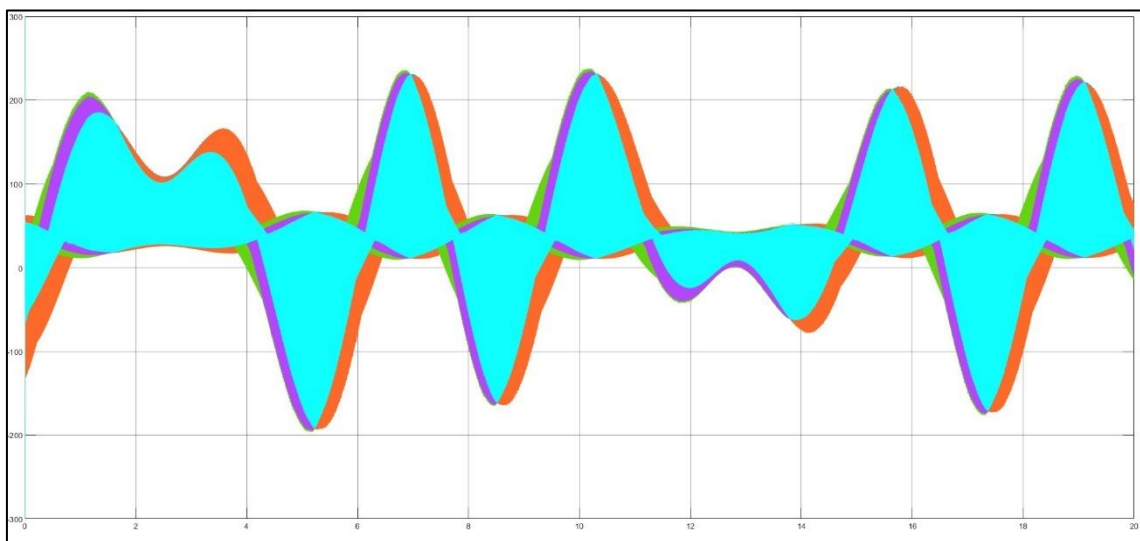


Figura 45: Fuerza aplicada por los actuadores en la simulación 2

Las velocidades se incrementan ligeramente respecto al caso anterior, alcanzando ± 8 mm/s, pero sin presentar picos abruptos ni aceleraciones que comprometan la integridad estructural.

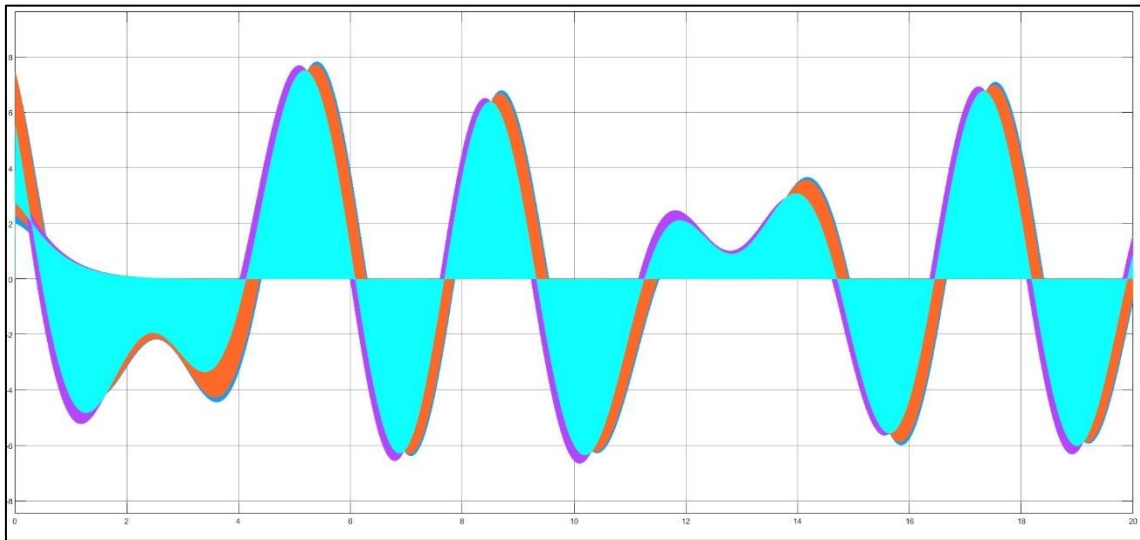


Figura 46: Velocidad de los actuadores en la simulación 2

La plataforma mantiene su estabilidad lineal, con desplazamientos mínimos en X e Y y una altura constante en Z. La corrección inicial es más pronunciada, pero se estabiliza rápidamente.

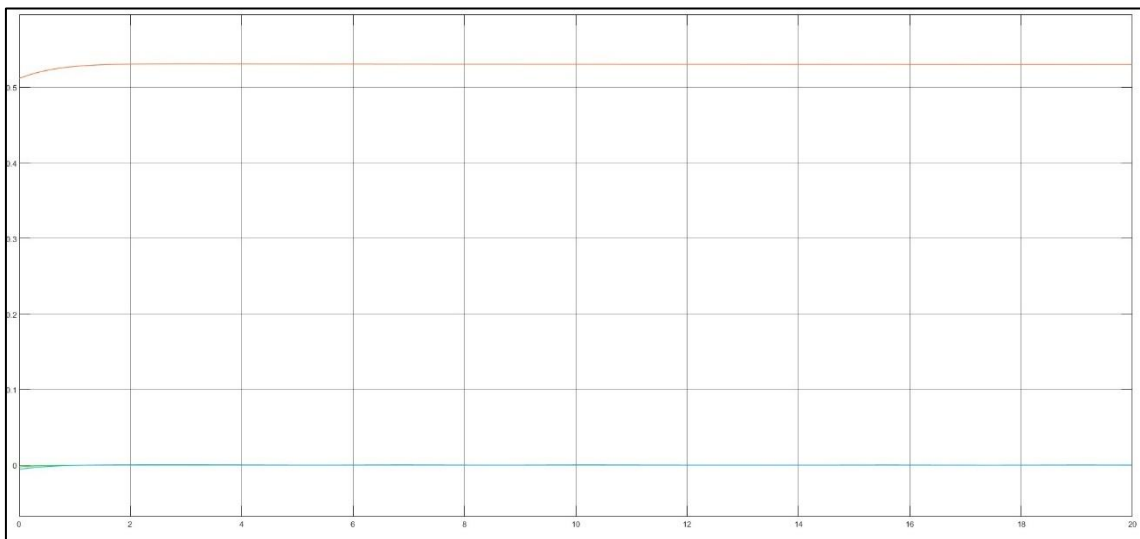


Figura 47: Movimiento de traslación de la plataforma en la simulación 2

En cuanto a la orientación, los ángulos de pitch y roll se mantienen en 0 rad, mientras que yaw se estabiliza nuevamente en torno a 1,05 rad. El sistema se comporta de forma segura y eficaz, incluso bajo oleaje moderado, lo que lo hace apto para operaciones en entornos marinos con actividad media.

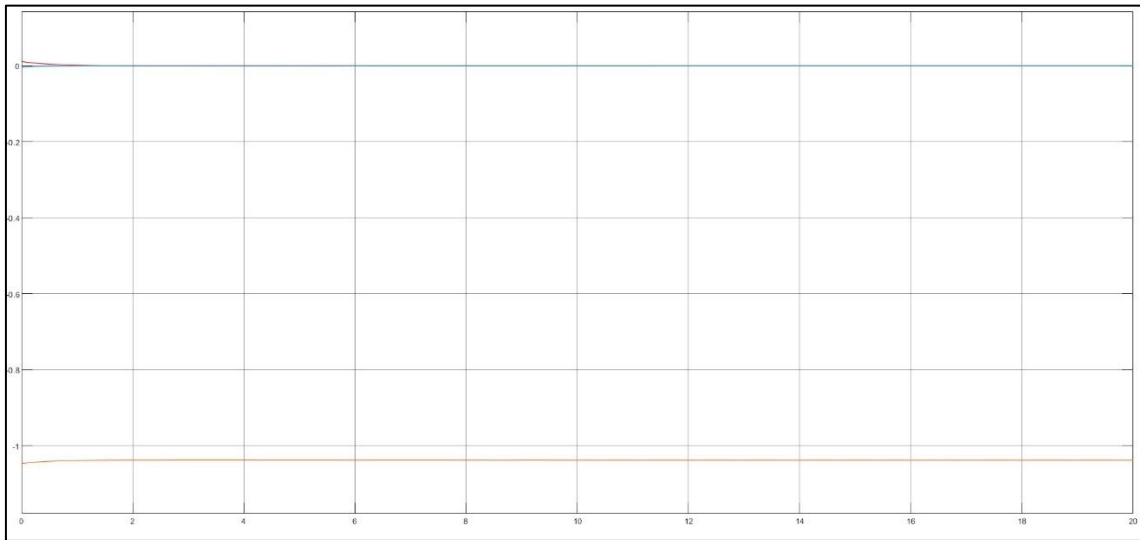


Figura 48: Movimiento de rotación de la plataforma en la simulación 2

8.3. SIMULACIÓN 3 (ALTURA MÁXIMA DE OLA DE 5,5M)

Este último caso representa una situación de oleaje severo, con perturbaciones de gran amplitud que ponen a prueba la capacidad de respuesta del sistema.

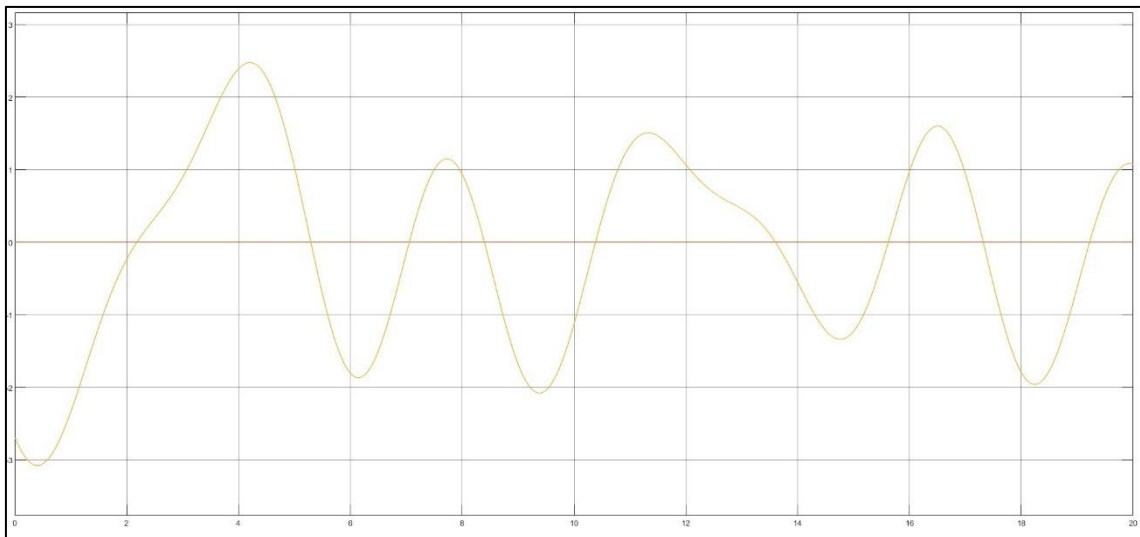


Figura 49: Movimiento marino en la simulación 3

La gráfica de error muestra una fase transitoria más prolongada, con oscilaciones subamortiguadas tanto positivas como negativas. A pesar de ello, el sistema logra estabilizarse sin generar errores persistentes.

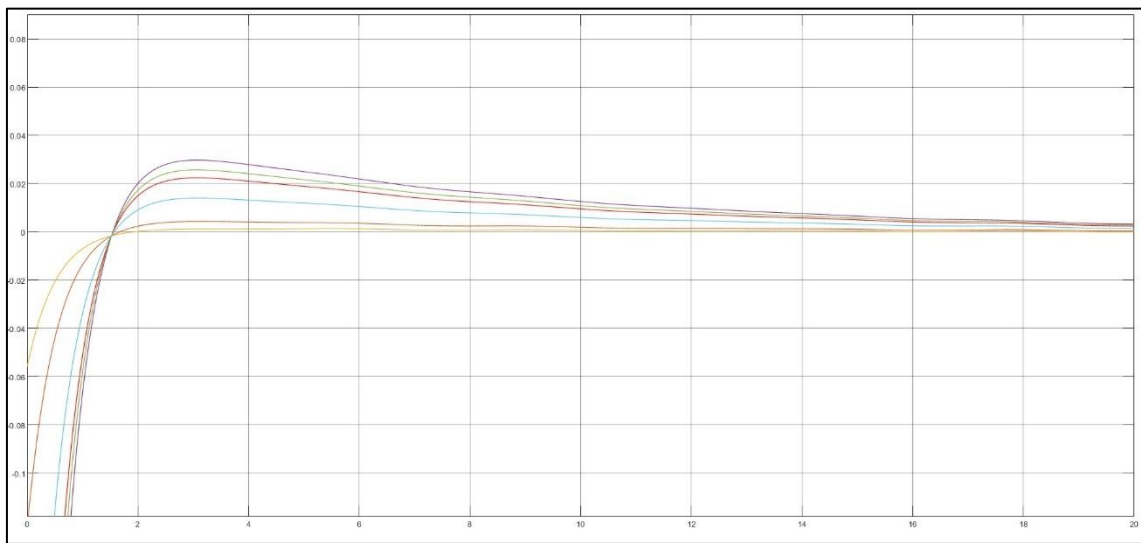


Figura 50: Error de posición de los actuadores en la simulación 3

Las fuerzas alcanzan valores de ± 4 kN, dentro de los límites operativos previstos, sin evidencia de saturación.

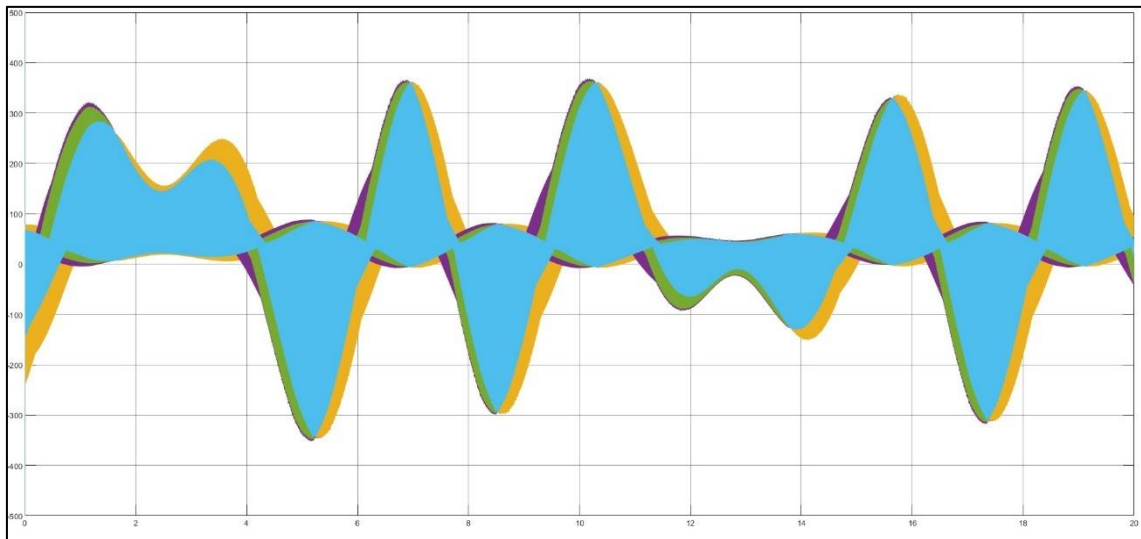


Figura 51: Fuerza aplicada por los actuadores en la simulación 3

Las velocidades de los actuadores aumentan hasta ± 13 mm/s, lo que refleja una mayor exigencia dinámica, aunque sin comprometer la suavidad del movimiento.

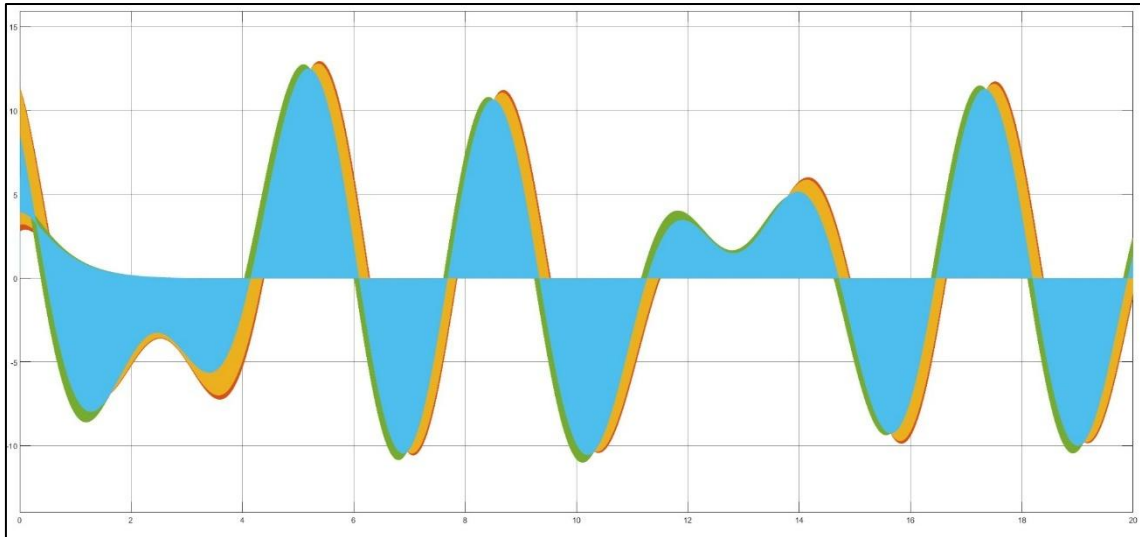


Figura 52: Velocidad de los actuadores en la simulación 3

La plataforma conserva su posición objetivo con notable precisión, incluso bajo condiciones extremas. Los desplazamientos lineales se mantienen estables.

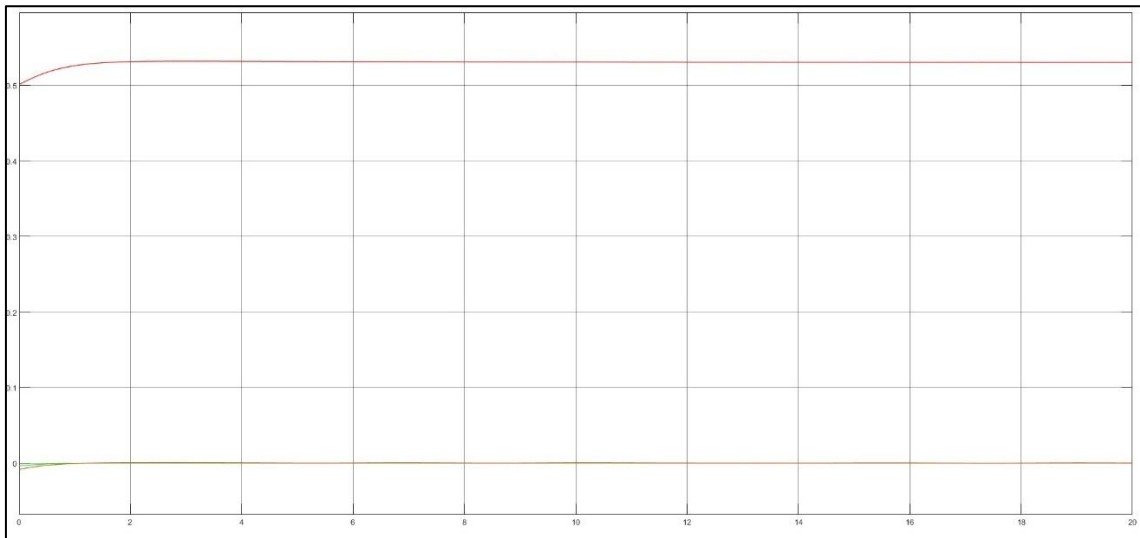


Figura 53: Movimiento de traslación de la plataforma en la simulación 3

La orientación se regula correctamente durante toda la simulación. No se observan giros no deseados ni pérdidas de control, lo que demuestra la robustez del sistema ante perturbaciones de alta magnitud.

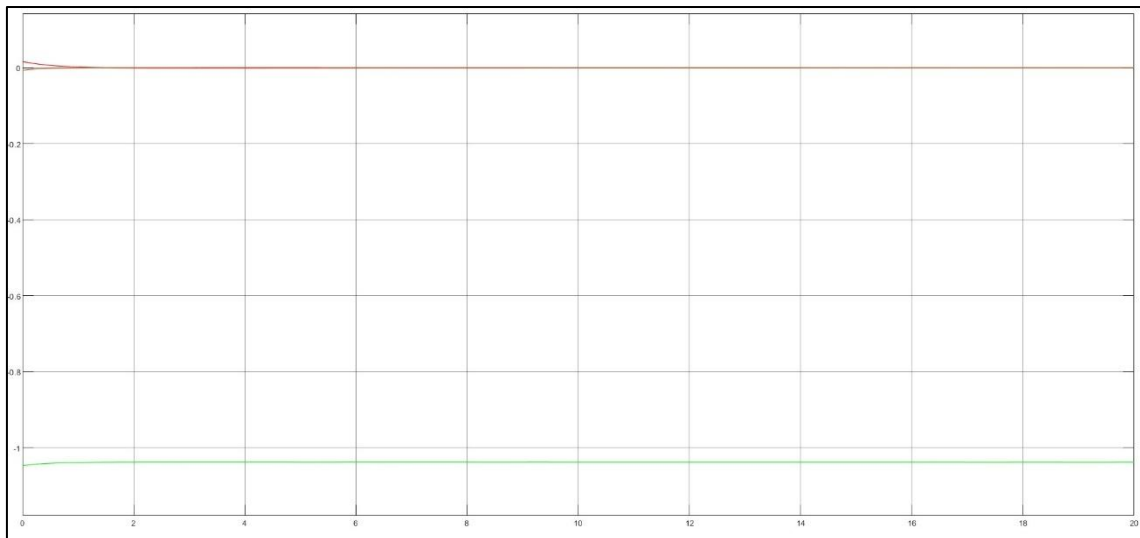


Figura 54: Movimiento de rotación de la plataforma en la simulación 3

8.4. ANÁLISIS DE LAS SIMULACIONES

Las tres simulaciones realizadas en Simscape Multibody, correspondientes a oleajes de 1,25 m, 3,25 m y 5,5 m de altura máxima, han permitido evaluar de forma progresiva el comportamiento dinámico de la plataforma Stewart frente a perturbaciones externas de distinta magnitud. Este análisis ha sido clave para validar la robustez del sistema de control y la capacidad estructural de la plataforma en entornos marinos simulados.

En todos los escenarios, la plataforma ha demostrado una respuesta estable y controlada, manteniendo su integridad física sin evidencias de sobreesfuerzos ni saturación en los actuadores. Las fuerzas generadas se mantuvieron dentro de los márgenes operativos previstos, incluso en el caso más extremo, lo que confirma un correcto dimensionamiento mecánico y una distribución eficiente de cargas por parte del controlador.

El sistema PID implementado ha mostrado un muy buen comportamiento, logrando reducir los errores de posición a valores cercanos a cero tras una fase transitoria breve. Esta capacidad de corrección rápida y precisa se ha mantenido constante en los tres casos, lo que evidencia una buena sintonización de los parámetros de control y una alta capacidad de adaptación frente a perturbaciones dinámicas.

Las velocidades de los actuadores se mantuvieron en rangos seguros en todo momento, sin registrar picos bruscos ni aceleraciones repentinas que pudieran comprometer la estabilidad del sistema o generar fatiga mecánica. Este comportamiento suave y

continuo es indicativo de una buena coordinación entre los elementos de control y la estructura física de la plataforma.

En cuanto al movimiento de la plataforma, se ha observado una excelente estabilidad tanto en traslación como en rotación. Los desplazamientos en los ejes X e Y fueron prácticamente nulos, mientras que el eje Z se mantuvo en torno al valor objetivo de 0,53 m. La orientación angular también se conservó dentro de los márgenes deseados, con pitch y roll estabilizados en 0 rad y yaw en torno a 1,05 rad ($\approx 60^\circ$), sin oscilaciones prolongadas ni giros no deseados.

La integración de sensores LVDT para medición lineal y IMU para orientación, junto con técnicas de filtrado como AHRS, ha permitido una estimación precisa y continua del estado dinámico de la plataforma. Esta información ha sido fundamental para alimentar el sistema de control en tiempo real, mejorando la capacidad de respuesta y reduciendo el impacto de ruido o interferencias en las mediciones.

En conjunto, los resultados obtenidos permiten concluir que la plataforma Stewart, bajo el esquema de control propuesto, es altamente eficaz y segura para operar en entornos marinos con distintos niveles de oleaje. Su comportamiento dinámico, la precisión en el seguimiento de referencias y la capacidad de compensación frente a perturbaciones externas la convierten en una solución viable para aplicaciones offshore, especialmente en tareas que requieren estabilidad estructural y precisión en el posicionamiento, como el embarque de personal, operaciones de carga o mantenimiento en plataformas flotantes.

9. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

9.1. CONCLUSIONES

Este trabajo ha abordado el diseño, modelado y simulación de una plataforma Stewart orientada a la compensación activa de movimiento en entornos offshore, con el objetivo de mejorar la seguridad y estabilidad en operaciones críticas como la transferencia de personal entre embarcaciones y estructuras flotantes.

Se ha realizado un diseño estructural completo de la plataforma, considerando criterios de carga, geometría, materiales y configuración de actuadores, adaptado a las exigencias del entorno marino.

Se ha implementado un modelo cinemático y dinámico detallado en Simulink y Simscape Multibody, permitiendo simular el comportamiento de la plataforma bajo perturbaciones inducidas por oleaje.

Se ha desarrollado un sistema de control basado en reguladores PID, que ha demostrado ser eficaz en la estabilización de la plataforma frente a perturbaciones externas.

La integración de sensores tipo IMU, LVDT y sistemas de filtrado como AHRS ha permitido una estimación precisa del estado dinámico de la plataforma, mejorando la respuesta del sistema de control.

Se ha validado el comportamiento de la plataforma en tres escenarios de oleaje (1,25 m, 3,25 m y 5,5 m de altura máxima), demostrando que el sistema es capaz de mantener la estabilidad y orientación deseada sin sobreesfuerzos ni saturación de actuadores.

La selección de materiales como acero inoxidable, aluminio naval y fibra de vidrio ha permitido equilibrar resistencia estructural, ligereza y resistencia a la corrosión, optimizando el rendimiento en entornos marinos.

En conjunto, el trabajo demuestra la viabilidad técnica de una plataforma Stewart como sistema de compensación activa de movimiento en aplicaciones offshore, ofreciendo una solución robusta, precisa y adaptable a condiciones dinámicas exigentes.

9.2. TRABAJOS FUTUROS

A partir del desarrollo realizado en este proyecto, se identifican diversas líneas de investigación y mejora que podrían abordarse en trabajos futuros, tanto para profundizar

en el estudio de la plataforma Stewart como para ampliar sus aplicaciones en entornos marítimos y aeroespaciales:

Modelado CAD avanzado: Se propone el diseño detallado de la plataforma Stewart mediante software CAD como Catia o SolidWorks, con el objetivo de exportar el modelo al entorno Simulink. Esto permitiría realizar simulaciones más precisas, considerando geometrías reales y posibles interferencias mecánicas.

Diseño de controladores avanzados: Aunque el controlador PID ha demostrado ser eficaz, se propone investigar el uso de estrategias de control más sofisticadas, como el control predictivo basado en modelos (MPC), control robusto o control adaptativo. Estas técnicas podrían mejorar la respuesta del sistema ante perturbaciones no lineales y condiciones marinas extremas.

Desarrollo físico del sistema: Se sugiere la construcción de un prototipo físico (aunque no sea a escala) de la plataforma, utilizando tecnologías de fabricación como la impresión 3D. Esto permitiría validar experimentalmente los resultados obtenidos en simulación y realizar pruebas en condiciones reales de funcionamiento.

Integración de sensores avanzados: Se plantea la incorporación de sensores de mayor precisión, como giroscopios de grado industrial o sistemas GNSS diferenciales, para mejorar la estimación del estado dinámico de la plataforma y aumentar la fiabilidad del sistema.

Estudio de mercado y aplicaciones emergentes: Finalmente, se propone realizar un análisis de mercado para identificar nuevas aplicaciones de la plataforma Stewart en sectores como la logística portuaria, la energía eólica marina, el rescate en alta mar o el aterrizaje autónomo de UAV en plataformas móviles.

Estas líneas de trabajo permitirían consolidar el sistema desarrollado, mejorar su rendimiento y explorar nuevas oportunidades de aplicación en entornos exigentes donde la estabilidad dinámica es un factor crítico.

10. BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. STEWART: A platform with six degrees of freedom. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 180(1):371–386, 1965.
- [2] J.-P. MERLET: *Parallel Robots*. Springer-Verlag, ISBN 978-1-84628-152-3.
- [3] K. OGATA: *Modern Control Engineering*. 5ª edición, Prentice Hall, 2010.
- [4] M. GREWAL y A. ANDREWS: *Kalman Filtering: Theory and Practice with MATLAB*. Wiley, 4ª edición, 2015.
- [5] MATHWORKS: *Modeling Stewart Platforms in Simscape Multibody*. Documentación técnica, 2023. <https://www.mathworks.com/help/physmod/sm/ug/stewart-platform.html>
- [6] MATHWORKS: *ahrsfilter – Orientation from accelerometer, gyroscope, and magnetometer readings*. <https://www.mathworks.com/help/fusion/ref/ahrsfilter-system-object.html>
- [7] L. H. HOLTHUIJSEN: *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. Cambridge University Press, 2007.
- [8] WIKIPEDIA: Plataforma Stewart: https://en.wikipedia.org/wiki/Stewart_platform
- [9] UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA: Análisis del oleaje a corto plazo. Documento técnico, s.f. https://www2.ulpgc.es/hege/almacen/download/40/40177/oleaje_corto_plazo.pdf
- [10] MOOG INC.: Moog Electrohydraulic Servo Actuators. Documentación técnica, s.f. <https://www.moog.com/products/actuators-servoactuators/actuation-technologies/electrohydraulic.html>
- [11] AUMA IBERIA: Tipos de actuadores para la automatización industrial. Artículo técnico, 2024. <https://aumaiberia.com/tipos-de-actuadores/>
- [12] WIKIPEDIA: Controlador PID. Enciclopedia libre, s.f. https://es.wikipedia.org/wiki/Controlador_PID
- [13] UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PANAMÁ: Diseño de sistema de control PID para regulación de temperatura. *Revista Ingeniería y Desarrollo Tecnológico*, s.f. <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/id-tecnologico/article/view/1719/html>
- [14] DNV: Dynamic Positioning Capability Assessment. Documentación técnica, s.f. <https://www.dnv.com/maritime/services/dp-capability-85124/>
- [15] SILVA-MUÑOZ, D., GARRIDO, J., RIVEIRO, E., RIVERA-ANDRADE, J.: Generación de movimientos oceánicos para pruebas sistemáticas con Plataforma Stewart. *Jornadas*

de *Automática*, 45, Universidad de Vigo, 2024.
https://investigo.biblioteca.uvigo.es/xmlui/bitstream/handle/11093/7495/2024_silva_generacion_steward.pdf?sequence=4

[16] FERNÁNDEZ ACEITUNO, J.: Diseño y cálculo de una plataforma Stewart. Trabajo Fin de Grado, Universidad de Jaén, 2023. <https://crea.ujaen.es/bitstreams/d35506a9-49c6-4185-84a0-01e4b1d90283/download>

[17] SÁNCHEZ PALOMINO, J.C.: Análisis cinemático y dinámico de una plataforma de Stewart. Trabajo Fin de Grado, Universidad de Sevilla, 2020.
<https://idus.us.es/items/03e98de9-a293-416a-bf0e-a7921f21282e>