

**Escuela Superior Politécnica del Litoral**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción**

Desarrollo de una plataforma para simular las condiciones de un barco costero en  
el mar

INGE-2531

**Proyecto Integrador**

Previo la obtención del Título de:

**Ingenieros en Mecatrónica**

Presentado por:

Jonathan Frank Solórzano Pinargote

César Mario Quezada Dávila

Guayaquil - Ecuador

Año: 2024

## Dedicatoria

---

Quiero dedicar este logro a mis padres, quienes desde mi infancia lo dieron todo para que sus hijos tuvieran un futuro brillante. Les ofrezco este logro como una de las tantas maneras de agradecerles por todo lo que han hecho por mí. A mi hermano, por su constante apoyo y aliento para mejorar. A mi novia, quien ha creído en mí desde el primer día. A mis amigos, por ser un apoyo en los momentos difíciles. Y a toda mi familia, por inculcarme valores y ser un ejemplo de cómo ser mejor cada día.

**César Quezada**

## Dedicatoria

---

Es un honor dedicar este documento a mi amada familia, cuyo apoyo es un pilar fundamental en mi vida. Este trabajo no es más que el fruto dulce del árbol plantado hace 5 años con ayuda de mis padres, a quienes dedico especialmente este proyecto por su apoyo y consejo. A mis hermanos, ya que por ellos consigo superarme y mejorar cada día.

Dedico también este proyecto a conmemorar a aquellos que me acompañaron en vida y sé que estarían orgullosos de verme alcanzar este logro.

**Jonathan Solórzano**

## Agradecimientos

---

Desde pequeño, mis padres, Jaime Quezada y Teresa Dávila, han sido mi fuente de inspiración en cada momento de mi vida, y mi más grande demostración de amor y confianza, reconociendo que gran parte de quien soy hoy, como hombre, hijo y amigo, es gracias a ellos.

Le agradezco también a mi hermano Jorge, por ser un compañero de vida y estar siempre dispuesto a guiarme con su apoyo incondicional. A mi novia, Stefanny, quien ha sumado un motivo más a mi vida para aspirar a mejorar como persona y como profesional.

Por último, quiero agradecer a mi compañero Jonathan, quien demostró ser un gran aliado para culminar este desafío con éxito. Igualmente, al PhD. Marcelo Fajardo, le agradezco por su dedicación y por su guía a lo largo de este proyecto.

**César Quezada**

## Agradecimientos

---

Quiero extender mis más sinceros agradecimientos a mis padres: Juan Solórzano y Karen Pinargote, por brindarme su apoyo y consejo incondicional para aprender y superarme cada día. A mis hermanos: Samuel y Doménica, por su amor que me inspira a ser una mejor persona y un gran profesional. Gracias, porque el apoyo, amor y consejo de cada uno de ustedes hicieron posible alcanzar este objetivo; su influencia conjunta ha sido vital en todo este proceso.

A mi compañero César Quezada le agradezco por su dedicación y esfuerzo para culminar este proyecto. Finalmente, expreso mi gratitud al Ph.D. Marcelo Fajardo y al Ph.D. Carlos Saldarriaga por su valiosa guía, la cual fue fundamental para la conclusión exitosa de este trabajo.

**Jonathan Solórzano**

## Declaración Expresa

---

Nosotros, **Jonathan Frank Solórzano Pinargote** y **César Mario Quezada Dávila** acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra autorizada a sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, y para crear y usar obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique a los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 22 de mayo de 2024.

  
Jonathan Frank  
Solórzano Pinargote

  
César Mario Quezada  
Dávila

## **Evaluadores**

---

**Carlos Xavier Saldarriaga Mero, Ph.D.**

Profesor de Materia

---

**Marcelo Rodolfo Fajardo Pruna, Ph.D.**

Tutor de proyecto

## Resumen

El objetivo de este proyecto es diseñar una plataforma capaz de replicar las condiciones de movimiento de un buque costero en el mar. La incorporación de sistemas de armas giro estabilizadas es fundamental en la defensa marítima, ya que mejora su precisión y efectividad; sin embargo, debido a los altos costos y la complejidad logística de realizar las pruebas en el mar, surge la necesidad de un banco de pruebas. Se determinó que la plataforma Stewart de 6 DOF brindaba el rango de movimiento deseado para replicar las olas provenientes de proa, babor y estribor. El desarrollo del sistema mecánico, electrónico y de control, se llevó a cabo mediante programas especializados como Autodesk Inventor, Cade Simu, MATLAB y TIA Portal. El análisis estático y dinámico permitió seleccionar el actuador y el material que se utilizarían para la plataforma. Además, como resultado de la simulación y validación realizada en MATLAB se determinó que el PID desarrollado permitió un control preciso y estable de los movimientos de la plataforma Stewart; logrando replicar fielmente las condiciones dinámicas de las costas ecuatorianas. Por lo cual, el presente proyecto se presenta como un alternativa precisa y económica para realizar las pruebas a los sistemas de armas giro estabilizadas.

**Palabras claves:** Actuador, plataforma, diseño, MATLAB, simulación.

## Abstract

*The objective of this project is to develop a platform capable of replicating the motion conditions of a coastal ship at sea. The incorporation of gyro-stabilized weapon systems is critical in maritime defense as it improves their accuracy and effectiveness; however, due to the high cost and logistical complexity of testing at sea, the need for a test bed arose. It was determined that the Stewart 6 DOF platform provided the desired range of motion to reproduce bow, port and starboard waves. The mechanical, electronic, and control systems were developed using specialized programs such as Autodesk Inventor, Cade Simu, MATLAB, and TIA Portal. Static and dynamic analysis allowed the selection of the actuator and material to be used for the platform. In addition, because of the simulation and validation performed in MATLAB, it was determined that the developed PID allows a precise and stable control of the movements of the Stewart platform, achieving a faithful replication of the dynamic conditions of the Ecuadorian coasts. Therefore, this project is presented as an accurate and economical alternative for testing gyro-stabilized weapon systems.*

*Keywords: Actuator, platform, design, MATLAB, simulation.*

## Índice general

|                                     |      |
|-------------------------------------|------|
| Resumen.....                        | I    |
| Abstract.....                       | II   |
| Índice general.....                 | III  |
| Abreviaturas.....                   | VII  |
| Simbología.....                     | VIII |
| Índice de figuras.....              | IX   |
| Índice de tablas.....               | XI   |
| Índice de planos.....               | XII  |
| Capítulo 1.....                     | 1    |
| 1.1 Introducción.....               | 2    |
| 1.2 Descripción del problema.....   | 2    |
| 1.3 Justificación del problema..... | 3    |
| 1.4 Objetivos.....                  | 4    |
| 1.4.1 Objetivo general.....         | 4    |
| 1.4.2 Objetivos específicos.....    | 4    |
| 1.5 Marco Teórico.....              | 5    |
| 1.6 Estado del Arte.....            | 10   |
| Capítulo 2.....                     | 14   |
| 2.1 Metodología.....                | 15   |

|   |    |
|---|----|
| 2.1.1 Alternativas de solución .....            | 15 |
| 2.1.2 Criterios de selección .....              | 16 |
| 2.1.3 Ponderación de soluciones .....           | 16 |
| 2.2 Proceso de diseño .....                     | 17 |
| 2.3 Diseño Mecánico.....                        | 18 |
| 2.3.1 Modelo matemático .....                   | 18 |
| 2.3.2 Dimensionamiento.....                     | 22 |
| 2.3.3 Selección de Actuadores.....              | 23 |
| 2.3.4 Diseño de las bases .....                 | 23 |
| 2.3.5 Diseño del actuador .....                 | 24 |
| 2.3.6 Ensamble de la plataforma .....           | 24 |
| 2.3.7 Selección de Materiales .....             | 25 |
| 2.3.8 Pruebas y simulación .....                | 25 |
| 2.4 Diseño Electrónico .....                    | 26 |
| 2.4.1 Selección del PLC .....                   | 26 |
| 2.4.2 Selección de drivers.....                 | 26 |
| 2.4.3 Selección del controlador de 6 ejes ..... | 26 |
| 2.4.4 Selección de sensores .....               | 27 |
| 2.4.5 Diseño del circuito Electrónico .....     | 27 |
| 2.5 Diseño del sistema de control .....         | 28 |

|  |    |
|--|----|
| 2.5.1 Selección de PLC .....             | 28 |
| 2.5.2 Controladores PID .....            | 29 |
| 2.5.3 Diagrama de flujo .....            | 29 |
| Capítulo 3.....                          | 31 |
| 3.1 Resultados y Análisis .....          | 32 |
| 3.1.1 Diseño de la plataforma.....       | 32 |
| 3.2 PLC seleccionado.....                | 36 |
| 3.3 Drivers seleccionados.....           | 37 |
| 3.4 Controlador de 6 ejes .....          | 38 |
| 3.5 Sensores.....                        | 38 |
| 3.6 Circuito electrónico .....           | 38 |
| 3.7 Programación PLC .....               | 39 |
| 3.8 Diagrama de flujo.....               | 42 |
| 3.9 Controlador PID .....                | 45 |
| 3.10 Simulación y validación .....       | 47 |
| 3.11 Análisis de costos .....            | 51 |
| Capítulo 4.....                          | 53 |
| 4.1 Conclusiones y recomendaciones ..... | 54 |
| 4.1.1 Conclusiones.....                  | 54 |
| 4.1.2 Recomendaciones .....              | 54 |

|                   |    |
|-------------------|----|
| Referencias ..... | 56 |
| Apéndices .....   | 59 |

## Abreviaturas

DINDES Dirección de Innovación y Desarrollo

INEN Instituto ecuatoriano de normalización

PID Proporcional-Integral-Derivativo

## Simbología

|          |  |
|----------|--|
| $h$      | Altura                                   |
| $\Phi$   | Angulo Phi                               |
| $\theta$ | Angulo Theta                             |
| $A$      | Área se la sección circular del actuador |
| $\phi$   | Diámetro del actuador                    |
| $l$      | Longitud del actuador                    |
| $F_a$    | Fuerza Axial                             |
| $F_p$    | Fuerza Perpendicular                     |
| $R_x$    | Reacción en el eje X                     |
| $R_y$    | Reacción en el eje Y                     |
| $w$      | Peso                                     |
| $w_i$    | Peso en cada actuador                    |

## Índice de figuras

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1.1</b> Cronología de Desarrollos en el Diseño de Mecanismos Paralelos .....      | 6  |
| <b>Figura 1.2</b> Evolución de la plataforma Steward .....                                  | 6  |
| <b>Figura 1.3</b> Configuración de plataformas .....  | 7  |
| <b>Figura 1.4</b> Aplicación de una Plataforma Stewart en mecanizado .....                  | 8  |
| <b>Figura 1.5</b> Simulador de barcos .....   | 9  |
| <b>Figura 1.6</b> Resultados de la rotación del eje z en h media.....                       | 12 |
| <b>Figura 1.7</b> Control a través de cinemática inversa.....                               | 13 |
| <b>Figura 2.1</b> Comportamiento de olas en la costa ecuatoriana .....                      | 17 |
| <b>Figura 2.2</b> Metodología.....  | 18 |
| <b>Figura 2.3</b> Parámetros base fija y base móvil .....                                   | 19 |
| <b>Figura 2.4</b> Relación de los puntos de anclaje entre la base fija y la base móvil..... | 20 |
| <b>Figura 2.5</b> Diseño conceptual del actuador eléctrico.....                             | 24 |
| <b>Figura 2.6</b> Diseño conceptual del circuito electrónico .....                          | 28 |
| <b>Figura 2.7</b> Diseño conceptual del sistema de control .....                            | 30 |
| <b>Figura 3.1</b> Diseño final de la base fija .....  | 32 |
| <b>Figura 3.2</b> Diseño final de la base móvil .....                                       | 32 |
| <b>Figura 3.3</b> Ensamble final de la plataforma.....                                      | 33 |
| <b>Figura 3.4</b> Análisis dinámico - Fuerzas .....   | 34 |
| <b>Figura 3.5</b> Análisis estático - Actuador extendido.....                               | 35 |
| <b>Figura 3.6</b> Análisis estático - Actuador retraído.....                                | 35 |
| <b>Figura 3.7</b> Análisis estático - Plataforma móvil .....                                | 36 |
| <b>Figura 3.8</b> Análisis estático - Cruceta del cardán .....                              | 36 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 3.9</b> Driver VD3E .....                                     | 37 |
| <b>Figura 3.10</b> Programación del PLC - Inicio de la simulación ..... | 40 |
| <b>Figura 3.11</b> Pantalla principal del HMI .....                     | 41 |
| <b>Figura 3.12</b> HMI - Modos de simulación .....                      | 41 |
| <b>Figura 3.13</b> HMI - Ingreso de parámetros de simulación .....      | 42 |
| <b>Figura 3.14</b> Sistema de control .....                             | 42 |
| <b>Figura 3.15</b> Procedimiento inicial.....                           | 43 |
| <b>Figura 3.16</b> Control y accionamiento de la planta .....           | 44 |
| <b>Figura 3.17</b> Verificación del sistema .....                       | 45 |
| <b>Figura 3.18</b> Controladores PID.....                               | 45 |
| <b>Figura 3.19</b> Modelo de la plataforma en MATLAB.....               | 47 |
| <b>Figura 3.20</b> Posición ingresada.....                              | 48 |
| <b>Figura 3.21</b> Rotación ingresada .....                             | 48 |
| <b>Figura 3.22</b> Posición final.....                                  | 49 |
| <b>Figura 3.23</b> Rotación final .....                                 | 49 |
| <b>Figura 3.24</b> Valor teórico vs Valor real .....                    | 50 |
| <b>Figura 3.25</b> Estabilización del error.....                        | 51 |
| <b>Figura 3.26</b> Procesamiento PID .....                              | 51 |

## Índice de tablas

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabla 2.1</b> Evaluación de criterios según su relevancia ..... | 16 |
| <b>Tabla 2.2</b> Matriz de decisión.....                           | 17 |
| <b>Tabla 3.1</b> Especificaciones del actuador LEMC-S-3005 .....   | 33 |
| <b>Tabla 3.2</b> Especificaciones driver VD3E.....                 | 37 |
| <b>Tabla 3.3</b> Especificaciones controlador MP3300iec.....       | 38 |
| <b>Tabla 3.4</b> Parámetros del controlador PID.....               | 46 |
| <b>Tabla 3.5</b> Análisis de costos.....                           | 52 |

## Índice de planos

- PLANO 1 Diagrama electrónico
- PLANO 2 Diagrama de ensamble
- PLANO 3 Diagrama de la base superior
- PLANO 4 Diagrama de la base inferior
- PLANO 5 Diagrama del actuador eléctrico lineal
- PLANO 6 Diagrama de la cruceta del cardán

## **Capítulo 1**

## **1.1 Introducción**

En defensa marítima, incorporar sistemas de armas giro estabilizadas en los buques costeros es crucial en operaciones de seguridad ya que mejora la precisión y efectividad del sistema de armas [1]. La adquisición de una plataforma enfocada a un simulador de movimiento de barcos, similar a las plataformas implementada como simuladores de vuelo, puede resultar significativamente costosa (\$17.081.859,52) [2]; por lo que, la inversión busca optimizar la implementación de sus sistemas. El presente proyecto de tesis se enfoca en el diseño de una plataforma que servirá como banco de pruebas para estas armas, bajo la supervisión de la Dirección de Innovación y Desarrollo de la Armada del Ecuador. Realizar pruebas en el mar representa un desafío debido a la naturaleza incontrolable; factores como el periodo y amplitud de las olas, junto a la distribución de cargas en el propio buque, pueden afectar la obtención de datos precisos. Por lo cual, se busca que este banco de pruebas no solo permita simular las condiciones dinámicas de un buque en las costas del mar ecuatoriano, sino también asegurar su replicabilidad en condiciones específicas, permitiendo así controlar el entorno en el que se desea evaluar y optimizar el desempeño de los sistemas de armas antes de su despliegue.

## **1.2 Descripción del problema**

La necesidad de un banco de pruebas para sistemas de armas giro estabilizadas surge de obstáculos considerables debido a los altos costos y la complejidad logística de realizar las pruebas en el mar; las cuales requieren el despliegue de embarcaciones, consumo de combustible, mantenimiento, personal y tiempo además de estar sujetas a la variabilidad de las condiciones marítimas, lo que puede resultar en datos inconsistentes.

La relevancia de este problema surge de las condiciones reales del mar que afectan significativamente la estabilidad y precisión de los sistemas de armas. Un banco de pruebas que

pueda simular estas condiciones permitirá realizar ajustes y pruebas exhaustivas, reduciendo riesgos y aumentando la eficacia operativa. La observación, medición y análisis del comportamiento de los sistemas de armas en este entorno controlado es crucial para el desarrollo de tecnología militar avanzada.

### **1.3 Justificación del problema**

La evaluación del desempeño de la estación remota de armas giro estabilizadas de la Armada del Ecuador implicaría el despliegue de buques costeros, lo que conlleva una serie de complejidades logísticas y económicas; además, la necesidad de realizar múltiples pruebas amplifica estas complicaciones. Teniendo en cuenta las variaciones del gasto público en defensa de los últimos años [3] y el costo del conflicto armado interno que atraviesa el país [4] resulta fundamental encontrar formas más económicas para evaluar el desempeño del sistema de armas giro estabilizadas.

Para mitigar estos problemas, se propone diseñar un banco de pruebas que permita evaluar el sistema de armas en condiciones controladas. Este banco de pruebas deberá ser capaz de soportar el peso de la ametralladora y simular el movimiento de las olas, proporcionando un entorno de pruebas más ajustable y extenso. Por lo cual, se deben cumplir los siguientes requerimientos:

- Plataforma capaz de soportar una carga de 4000N y cuyo costo sea inferior a \$200.000,00.
- Replicar el movimiento de un barco costero, considerando que las olas en las costas ecuatorianas son de categoría 3 según la escala de Douglas.
- Simular el movimiento que realiza el buque debido a olas provenientes de proa, de babor y de estribor; cuya altura puede alcanzar 1.25 [m].

Además, se debe considerar que la plataforma debe ser ligera ya que será transportada de un sitio a otro, cuyo mantenimiento debe ser sencillo y económico. Esto permitirá realizar pruebas repetitivas y controladas, mejorando la precisión y eficacia del sistema de armas antes de su despliegue en el mar. El desarrollo de esta plataforma de pruebas mejorará la preparación y capacidad operativa de la Armada, permitiendo que las armas se pongan a punto con mayor precisión y eficacia; facilitando la implementación de tecnologías críticas y mejorando la capacidad defensiva de la Armada del Ecuador.

## **1.4 Objetivos**

### ***1.4.1 Objetivo general***

Diseñar una plataforma capaz de replicar las condiciones de movimiento de un buque costero en el mar, con software de simulación especializados, para hacer pruebas al sistema de armas giro estabilizadas de la Armada del Ecuador previo a instalarlo en los barcos guardacostas.

### ***1.4.2 Objetivos específicos***

1. Realizar el dimensionamiento y la selección de materiales de los componentes mecánicos del sistema a través de software de simulación, asegurando que la plataforma soporte cargas de 4000N a una inclinación máxima de 30°
2. Implementar un código de programación que permita al usuario variar las condiciones de movimiento del sistema mediante el ingreso de los parámetros deseados.
3. Diseñar un sistema electrónico que permita alimentar, proteger y leer señales de cada dispositivo implementado, utilizando software especializado, para asegurar la funcionalidad y seguridad del banco de pruebas.

4. Realizar un proceso de validación mediante un software de simulación que permita calibrar cada uno de los elementos utilizados para mejorar la aproximación del sistema a las olas costeras en Ecuador.

### **1.5 Marco Teórico**

La automatización, simulación de sistemas y pruebas de entrenamiento han representado desafíos persistentes durante décadas. La Plataforma Stewart, conocida desde su creación como un robot paralelo, ha emergido como una solución efectiva a estos problemas. Desde su concepción, ha contribuido significativamente a estudios e investigaciones industriales, impulsando el desarrollo de nuevas tecnologías; su evolución y adaptación ha sido posible gracias a continuas mejoras e innovaciones inspiradas por la aparición de nuevas tecnologías en el diseño de robots paralelos (**Figura 1.1**). Inicialmente concebida como un boceto, la Plataforma Stewart ha sido perfeccionada a lo largo de los años por numerosos investigadores (**Figura 1.2**), hasta convertirse en la avanzada herramienta que conocemos hoy.

Figura 1.1

## Cronología de Desarrollos en el Diseño de Mecanismos Paralelos

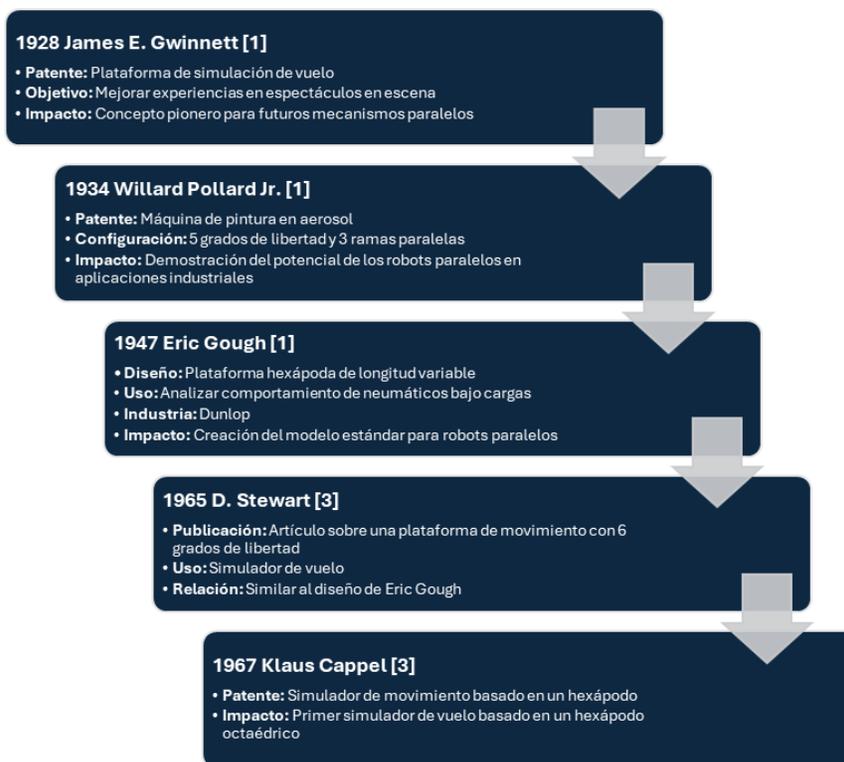
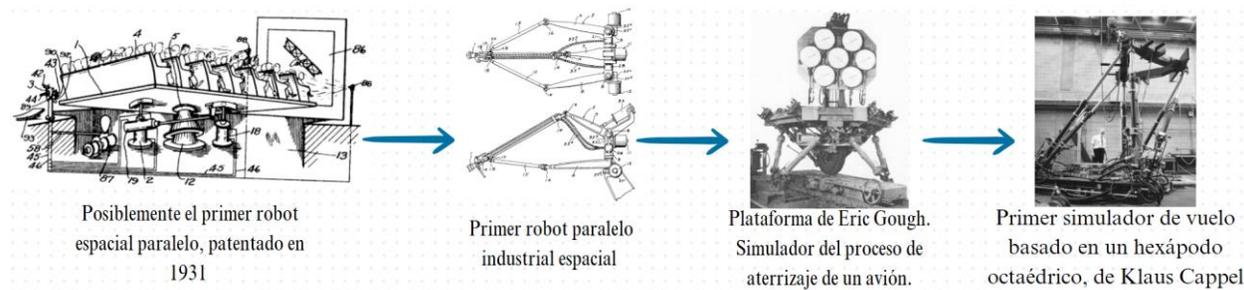


Figura 1.2

## Evolución de la plataforma Stewart

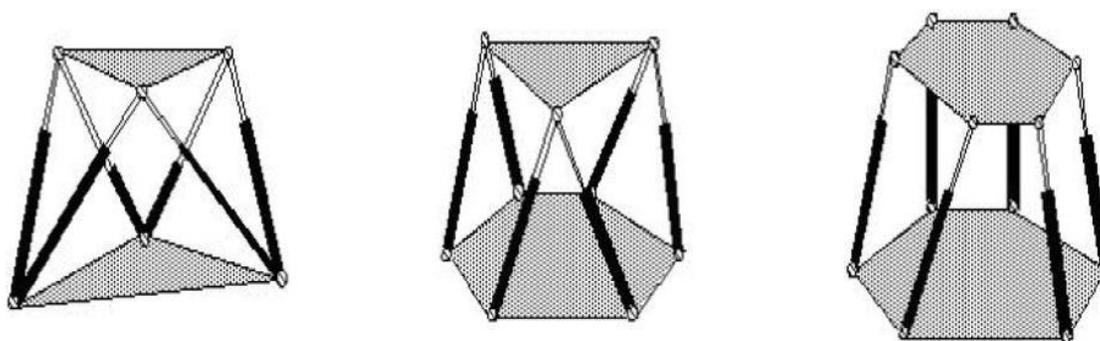


De esta forma, los robots paralelos se han vuelto dispositivos manipuladores utilizados para posicionamiento y control de movimiento, consistiendo en dos placas paralelas combinadas con seis patas ajustables que permiten ajustar y controlar con precisión las placas; no obstante, la plataforma Stewart es un modelo particular de los robots manipuladores de tipo paralelo, el número de actuadores y su distribución alrededor de las bases da lugar a su notación de configuración.

Cada una ofrece características diferentes y grados de libertad que aumentan su rango de operación, X-Y, donde X es el número de puntos de fijación en la plataforma móvil y Y los puntos de fijación en la plataforma base, cuando nos referimos a plataforma Stewart nos referimos al robot paralelo de tipo 6-6 que entrega 6 grados de libertad, 3 de tipo traslación y 3 de tipo rotación, lo que permite un control complejo y controlable en el espacio tridimensional.

**Figura 1.3**

*Configuración de plataformas*



a) Tipo 3-3

b) Tipo 3-3

c) Tipo 6-6

*Nota: Configuración de distribución y número de actuadores en plataformas Gough [5]*

La complejidad y escasez de mecanismos capaces de replicar movimientos de 6 grados de libertad indica su demanda y resalta su rango de aplicaciones a nivel industrial debido a la variedad de movimientos, ángulos y velocidades que se puede conseguir. El desafío en el proceso de diseño en las plataformas Stewart se encuentra en un correcto dimensionamiento y selección de actuadores, en donde sus dimensiones delimitan su rango de operación y el tipo de actuadores la precisión y velocidad con las que ejecutar dichos movimientos, como ejemplo algunas de estas áreas son:

- Simulación: La simulación de condiciones de movimiento como en el ámbito aeroespacial convirtiéndose en un ambiente óptimo para el entrenamiento de pilotos, prototipado, investigación y fabricación de vehículos [6].

- Mecanizado: En el área de mecanizado es ampliamente utilizado para ejecutar acciones de fabricación industrial, diseñados para manufactura y automatización de procesos de montaje que requieren extrema rigidez y repetibilidad como en el caso del robot FANUC F-200iB. [6].
- Medicina: La medicina ha requerido la implementación de asistentes quirúrgicos, necesitando la programabilidad y precisión en estos robots, utilizando tomografías computarizadas escaneadas para movimientos más específicos y sutiles. [6].

**Figura 1.4**

*Aplicación de una Plataforma Stewart en mecanizado*



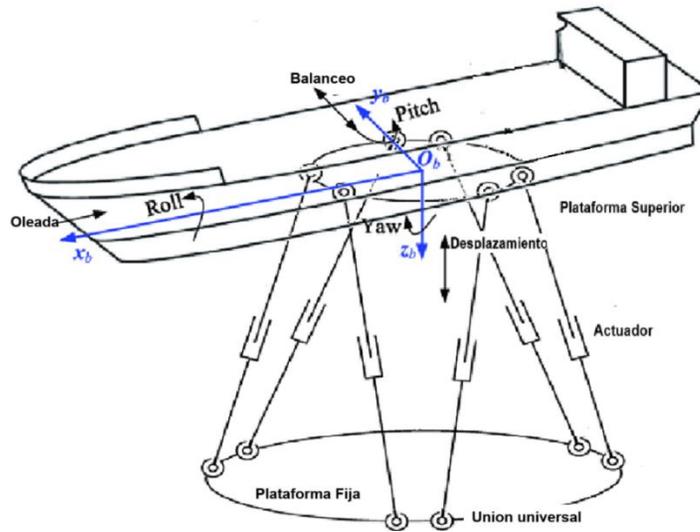
*Nota: Análisis y simulación cinemática de una plataforma de Stewart [6]*

Las investigaciones recientes han demostrado la posibilidad de automatizar la plataforma Stewart, utilizando controladores industriales modernos sin necesidad de software de terceros, esto incluye la implementación de modelos cinemáticos inversos y directos, así como movimientos PTP (point-to-point) cicloidales y de olas oceánicas [7]. Las contribuciones de Stewart en áreas como la simulación de Olas son ideales para simular embarcaciones, su diseño modular y adaptable permite usarse en aplicaciones marítimas y, a la vez, demostrando su compatibilidad con

controladores industriales facilitando la implementación de algoritmos avanzados de control y simulación.

**Figura 1.5**

*Simulador de barcos*



*Nota: Plano referencial para movilidad entre plataforma Stewart y barco.*

Para describir el movimiento de una onda a lo largo de un período, es posible utilizar las matemáticas, permitiendo conocer su desplazamiento y pendiente, los cuales varían según diversos parámetros de entrada. La descripción matemática de una ola se aproxima a través de ondas sinusoidales propagadas a lo largo del tiempo [8]. Estas se pueden expresar mediante la siguiente ecuación:

$$h(x) = A \cdot \text{Sen} \left( \frac{2\pi}{B} \cdot x + C \right) + D \quad (1.1)$$

donde:

- **A:** Amplitud de la onda, que representa la altura máxima de la ola respecto a su posición de equilibrio.
- **B:** Longitud de onda, la distancia entre dos puntos consecutivos en fase (como dos crestas o dos valles).

- **x**: Distancia desde el origen, un punto de referencia en el tiempo o en el espacio.
- **C**: Fase inicial, que indica el desplazamiento horizontal de la onda.
- **D**: Desplazamiento en Y, que representa el ajuste vertical de la onda respecto al eje horizontal.

El Instituto Oceanográfico y Antártico de la Armada (INOCAR) se ha dedicado por años al estudio y análisis de las olas en la costa central del Ecuador. Según estudios realizados desde el año 1987 y valores de periodo registrados hasta el año 2024, se ha determinado que, en promedio, los rangos más bajos de periodo han sido de 8 segundos, dicho valor de periodo es significativo, ya que se evidencia una pendiente de inclinación máxima de hasta  $26.1452^\circ$  [9].

Estos estudios son cruciales para comprender la dinámica de las olas, ya que permiten conocer la amplitud y la longitud de onda, así como otros parámetros fundamentales. Al replicar de manera precisa las condiciones reales del mar en simulaciones, es posible diseñar y probar sistemas de control que aseguren la estabilidad de las plataformas Stewart bajo diferentes condiciones. La inclinación de las olas, determinada por la pendiente de la onda sinusoidal, es un factor clave en estas simulaciones, pues afecta directamente las fuerzas y los momentos que deben ser compensados por la plataforma. Esta capacidad de simulación precisa es esencial para desarrollar tecnologías que garanticen el rendimiento y la seguridad de las plataformas en entornos marítimos diversos.

## **1.6 Estado del Arte**

El diseño de una plataforma Stewart es altamente versátil, permitiendo adaptaciones desde escalas pequeñas con movimientos sutiles, hasta escalas grandes con amplios rangos de operación y movimientos bruscos. Sin embargo, el proceso de diseño requiere un estudio meticuloso de las cargas, dimensionamiento y selección de materiales adecuados para las bases, uniones y

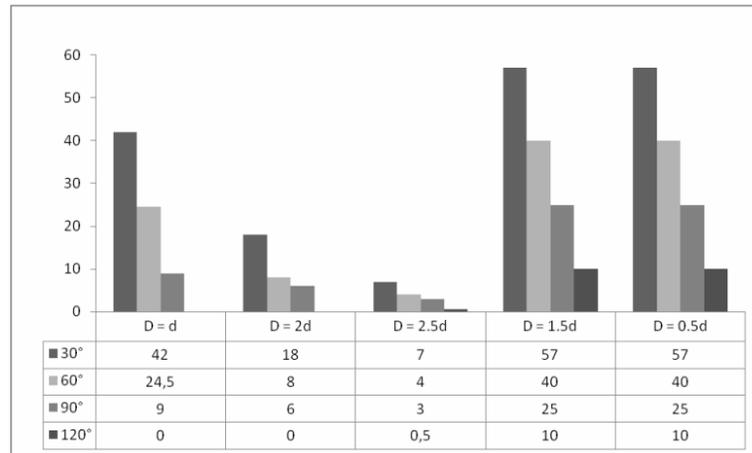
actuadores. La principal finalidad de estas plataformas en el ámbito de la simulación es realizar pruebas, investigaciones, entre otros propósitos, lo cual conlleva una reducción significativa de costos y esfuerzos. Al realizar un análisis de costos de implementación para distintos modelos, es posible estimar un presupuesto promedio en función de las cargas a movilizar. Por ejemplo, una plataforma Stewart diseñada para la simulación de maniobras navales con una capacidad de hasta 1500 newtons puede tener un costo aproximado de \$17,937 [10]; de igual forma, un diseño utilizado como simulador de marcha para personas de hasta 981 Newtons con rotaciones de  $30^\circ$  y desplazamientos de hasta 400 mm, tiene un costo aproximado de \$26,352 [11].

Debido a esto se sabe que el primer desafío de la construcción de estas plataformas está en su diseño, ya que la distribución de los actuadores en sus bases indicaría factores como la altura base en el eje Z, los rangos de rotación respecto a los ejes X, Y, Z y capacidad de traslación. Dada todas las posibles configuraciones y tamaños, surge la necesidad de identificar el diseño óptimo para un rendimiento eficiente durante su operación. En este contexto, el departamento de ingeniería mecánica de la Universidad de los Andes llevó a cabo un estudio detallado donde se investiga la relación de los diámetros y otros factores de diseño relevantes, evaluando cuidadosamente las variables de interés. Al analizar esta relación, se compararon valores de diámetros que oscilaban entre  $D=2.5d$  y  $D=0.5d$ , siendo D el diámetro de la base inferior y d el diámetro de la base superior. Los resultados indicaron que, para la rotación en altura mínima, las configuraciones óptimas se encuentran en el rango de diámetros entre  $D=2.5d$  y  $D=0.5d$ , con ángulos de rotación entre  $30^\circ$  y  $60^\circ$ . Por otro lado, al evaluar la rotación respecto al eje Z a una altura media, se observó que las mejores configuraciones se sitúan entre  $D=1.5d$  y  $D=0.5d$ , con rangos de ángulos similares. Estos hallazgos proporcionan una comprensión clara de los parámetros más adecuados según los

criterios de diseño específicos, lo que contribuye significativamente al desarrollo eficiente de estas plataformas [12].

**Figura 1.6**

*Resultados de la rotación del eje z en h media*



*Nota: Estudio realizado por el departamento de ingeniería mecánica de la Universidad de los Andes [12]*

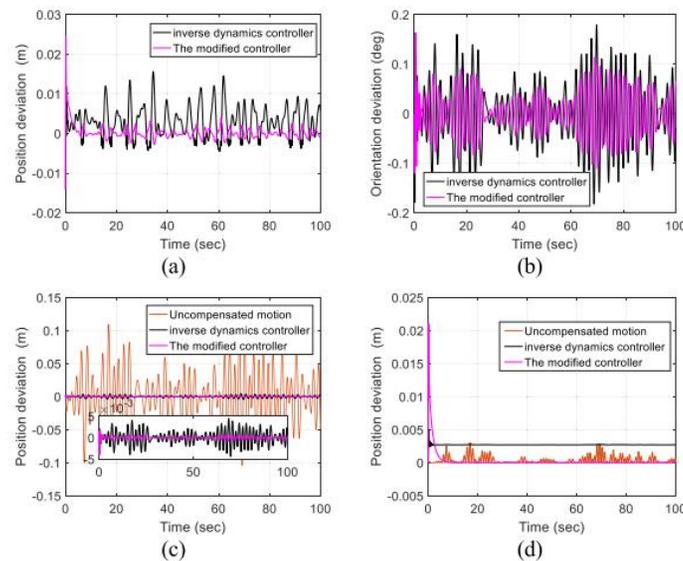
El sistema de control para plataformas Stewart es una parte crucial para una operación efectiva en la movilidad, especialmente en ambientes dinámicos. Este control no solo se utiliza para la simulación de movimientos, sino que también ha sido implementado en aplicaciones marítimas para contrarrestar las perturbaciones inducidas por los movimientos del barco, con frecuencias que van desde 0 hasta 0.3 Hz con el objetivo de reducir las desviaciones o perturbaciones en las direcciones X, Y, Z. En este contexto, se han comparado diferentes métodos de control, incluyendo controladores PID, retroalimentación de presión y control de dinámica inversa. Los resultados indican que el método de control de dinámica inversa complementa la mejora de los sistemas de amortiguación. Sin embargo, se ha observado que la aplicación simultánea de varios métodos, como el control modificado que incluye un bucle de realimentación de velocidad y un bucle de control de movimiento, proporciona la mejor combinación de resultados

para la estabilización efectiva. Esta estrategia integrada ofrece una solución más completa y eficaz para el control de las plataformas Stewart en entornos dinámicos [13].

Cuando se aborda el tema de simulación, el control continúa siendo un componente fundamental. Este principio se extiende incluso a campos como la aviación, donde se analizan helipuertos móviles. En tales escenarios, el uso de lazos de control para el movimiento se combina con el empleo de unidades de medida inercial y sensores de longitud ultrasónicos. Esta combinación permite implementar un control a través de la cinemática inversa, lo que posibilita la compensación de las simulaciones de movimiento en alta mar, tomando en cuenta que el sistema puede experimentar retrasos, los cuales varían según el tipo de sensores utilizados y la velocidad de la plataforma [14], recalcando la indispensabilidad de los procesos de control a través de cinemáticas inversas en el movimiento de las plataformas.

**Figura 1.7**

*Control a través de cinemática inversa*



*Nota: Procesos de control a través de cinemáticas inversas en el movimiento de las plataformas [14]*

## **Capítulo 2**

## 2.1 Metodología

Los métodos utilizados para el diseño y dimensionamiento de una plataforma, capaz de solucionar la problemática expuesta anteriormente, fueron descritos en este capítulo. Luego de una exhaustiva investigación sobre plataformas capaces de replicar el movimiento de embarcaciones marinas se obtuvieron diferentes ideas de diseño, de las cuales se presentaron 4 alternativas de solución.

### 2.1.1 Alternativas de solución

Las soluciones planteadas se enmarcan en el tipo de actuadores de una plataforma Stewart de 6 DOF enfocada a la orientación del sistema de armas. La elección de este tipo de plataformas se produjo debido a la estabilidad y rapidez de respuesta que brindan los robots en paralelo.

**Solución A.** Robot en paralelo con actuadores eléctricos controlados mediante un PLC. Su diseño permitirá que la plataforma sea ensamblada y desmontada con facilidad, favoreciendo su transporte de un lugar a otro. Además, el usuario podrá ingresar los parámetros de simulación mediante una pantalla HMI.

**Solución B.** Robot en paralelo con actuadores hidráulicos, implementando agua en lugar de aceite para aumentar la potencia del sistema. Las condiciones de simulación estarán preasignadas y el usuario deberá escoger cuál de ellas desea ejecutar mediante una pantalla HMI.

**Solución C.** Robot en paralelo con actuadores neumáticos cuyo sistema de alimentación lo conforma un compresor estático, filtro, válvulas y elementos de seguridad. Además, el control se realiza mediante una computadora conectada a un PLC a través de un cable Ethernet y el usuario podrá modificar los parámetros de simulación mediante la computadora.

**Solución D.** Robot en paralelo con boyas de suspensión de vehículo, controlado mediante un microcontrolador. Los parámetros de la simulación se ingresan por medio de una aplicación móvil.

### 2.1.2 Criterios de selección

Luego de plantear las alternativas de solución se establecieron los siguientes criterios que permitieron elegir la mejor solución al problema planteado:

- 1) **Controlabilidad.-** El sistema debe ser fácilmente controlable por el usuario.
- 2) **Costo.-** El precio de implementación debe ser inferior a los \$500.000,00.
- 3) **Potencia.-** La potencia debe ser la necesaria para levantar la carga establecida.
- 4) **Peso.-** Bajo peso para facilitar el traslado del sistema de un sitio a otro.
- 5) **Mantenimiento.-** El mantenimiento debe ser sencillo y rápido; el desmontaje y el reensamblaje no deben presentar desafíos. Además, se debe asegurar una disposición óptima de los componentes y facilitar el reemplazo de las piezas, garantizando que su mantenimiento se pueda llevar a cabo con eficiencia y sin complicaciones adicionales.

### 2.1.3 Ponderación de soluciones

Una vez determinados los criterios se estableció el peso de cada uno ellos, la columna *Ponderación* de la *Tabla 2.1* muestra el peso que tuvo cada criterio para la selección de una solución.

**Tabla 2.1**  
*Evaluación de criterios según su relevancia*

| <b>Controlabilidad &gt; Bajo Costo &gt; Potencia &gt; Peso &gt; Mantenimiento</b> |                 |            |          |      |               |            |                    |
|---|-----------------|------------|----------|------|---------------|------------|--------------------|
| <b>Criterio</b>   | Controlabilidad | Bajo Costo | Potencia | Peso | Mantenimiento | $\Sigma+1$ | <b>Ponderación</b> |
| <b>Controlabilidad</b>  |                 | 1          | 1        | 1    | 1             | 5          | 0,33               |
| <b>Bajo Costo</b>   | 0               |            | 1        | 1    | 1             | 4          | 0,27               |
| <b>Potencia</b>   | 0               | 0          |          | 1    | 1             | 3          | 0,20               |
| <b>Peso</b>   | 0               | 0          | 0        |      | 1             | 2          | 0,13               |
| <b>Mantenimiento</b>  | 0               | 0          | 0        | 0    |               | 1          | 0,07               |
|   |                 |            |          |      |               | 15         | 1,00               |

Como resultado, el criterio de mayor peso fue la controlabilidad, mientras que, el mantenimiento terminó como el criterio de menor relevancia. Luego se evaluaron los criterios para cada solución (*Apéndice A*). Con estos resultados se obtuvo el orden de prioridad de cada solución.

**Tabla 2.2***Matriz de decisión*

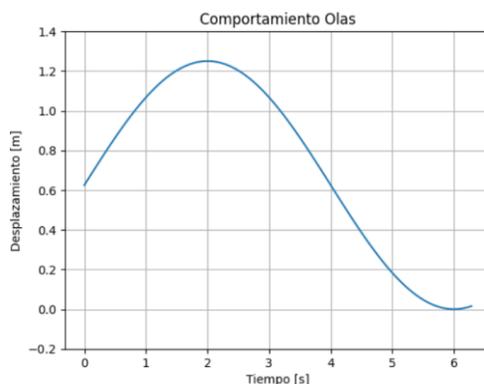
| <b>Conclusión</b> | Controlabilidad | Bajo Costo | Potencia | Peso  | Mantenimiento | $\Sigma$ | <b>Ponderación</b> |
|-------------------|-----------------|------------|----------|-------|---------------|----------|--------------------|
| Solución A        | 0,133           | 0,107      | 0,022    | 0,040 | 0,023         | 0,326    | 1                  |
| Solución B        | 0,067           | 0,053      | 0,089    | 0,013 | 0,013         | 0,236    | 3                  |
| Solución C        | 0,067           | 0,027      | 0,056    | 0,027 | 0,007         | 0,182    | 4                  |
| Solución D        | 0,067           | 0,080      | 0,033    | 0,053 | 0,023         | 0,257    | 2                  |

Mediante la matriz de decisión de la *Tabla 2.2* se determinó que la solución A, actuadores eléctricos, era la mejor opción para resolver el problema planteado.

## 2.2 Proceso de diseño

Previamente, se debía comprender que el movimiento de las olas podía representarse matemáticamente por una función sinusoidal; dadas las condiciones marítimas en Ecuador y considerando la ecuación (1.1), el movimiento de las olas en las costas ecuatorianas se pudo representar mediante la ecuación (2.1) obteniendo la *Figura 2.1*.

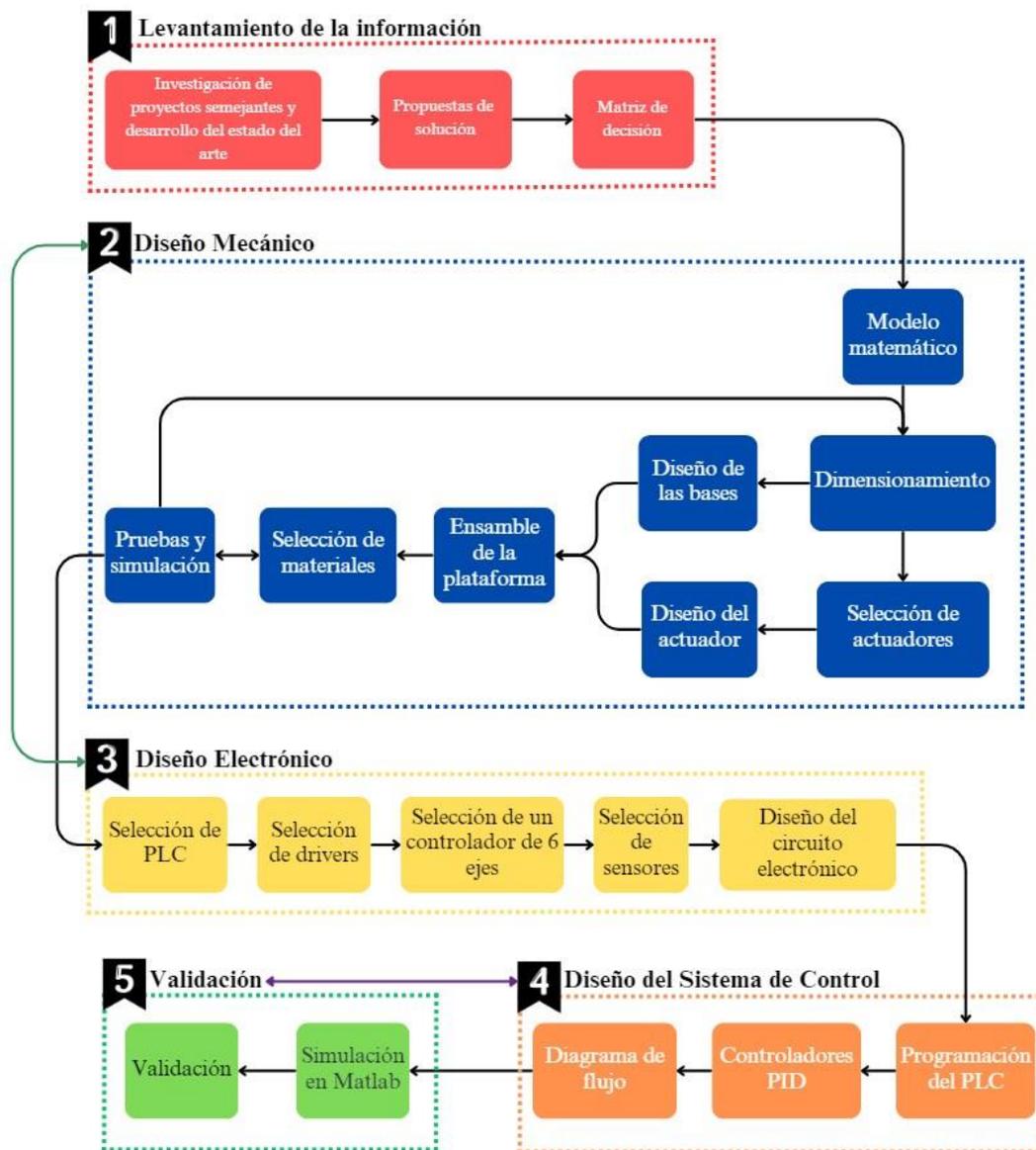
$$h(x) = 0.625 \cdot \text{Sen} \left( \frac{2\pi}{8} \cdot x + 0 \right) + 0.625 \quad (2.1)$$

**Figura 2.1***Comportamiento de olas en la costa ecuatoriana*

La metodología de este proyecto, *Figura 2.2*, se centró en el diseño, simulación y validación de una plataforma Stewart capaz de replicar las condiciones de un barco costero en el mar.

Figura 2.2

Metodología



## 2.3 Diseño Mecánico

### 2.3.1 Modelo matemático

El primer paso en el diseño de la plataforma Stewart fue la creación de un modelo matemático preciso que permitiera la simulación y control del sistema. Este modelo se basó en la cinemática

inversa para determinar las longitudes de los actuadores, necesarios para posicionar la plataforma móvil en una orientación y ubicación específica.

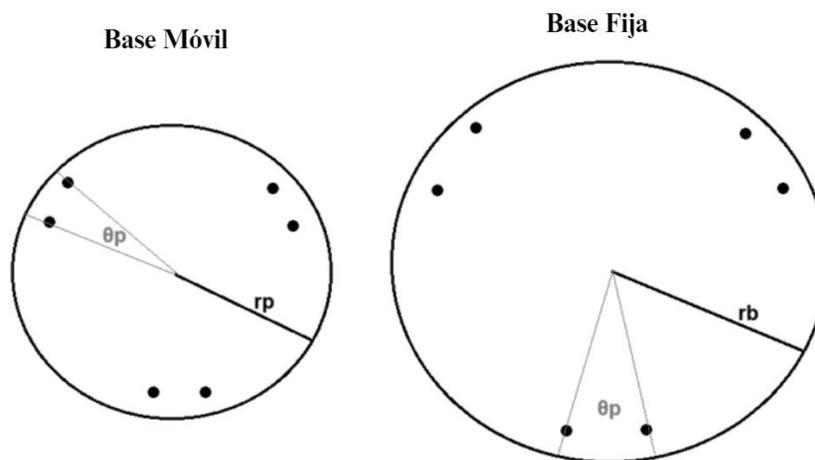
La cinemática inversa para una plataforma Stewart implicó calcular las longitudes de los actuadores basándose en la posición y orientación deseada de la plataforma móvil; para ello, se definió un sistema de coordenadas para la base fija y otro para la plataforma móvil. Las posiciones de los puntos de anclaje en ambas bases se representaron en coordenadas cartesianas. A partir de estas posiciones y de los ángulos de rotación de la plataforma móvil, se pudo utilizar un conjunto de ecuaciones para determinar las longitudes de los actuadores.

Los parámetros considerados para el desarrollo del modelo matemático fueron:

- $ds$  → Diámetro de la base superior.
- $di$  → Diámetro de la base inferior.
- $rp = \frac{ds}{2}$  → Radio de la base móvil.
- $rb = \frac{di}{2}$  → Radio de la base fija.
- $\theta p$  → Ángulo de separación.

**Figura 2.3**

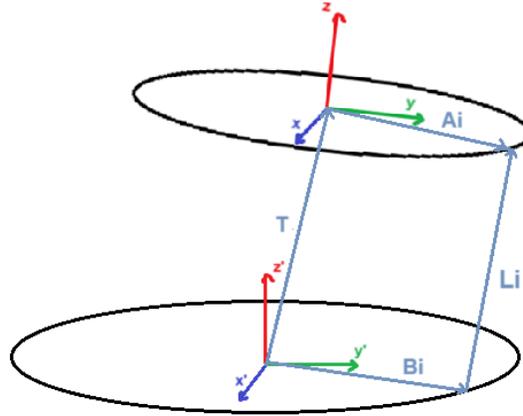
*Parámetros base fija y base móvil*



### Coordenadas de los puntos de anclaje

Figura 2.4

Relación de los puntos de anclaje entre la base fija y la base móvil



**Base móvil superior.** Dado que existen 6 puntos de anclaje en cada una de las bases, la disposición de cada uno de sus puntos de anclaje vendrá dado de acuerdo con el grado de separación definido  $\theta_p$ , según esto, los ángulos de separación entre cada uno de los puntos de anclaje se representarían mediante la siguiente ecuación (2.3):

$$\alpha_i = \begin{cases} \frac{\pi}{3} - \frac{\theta_p}{2}, & \text{si } i \text{ es impar} \\ \alpha_{i-2} + \theta_p, & \text{si } i \text{ es par} \end{cases} \quad (2.2)$$

Conociendo los ángulos entre cada uno de los puntos de anclaje, y teniendo en consideración el radio de la base superior, se puede calcular la posición xyz para cada uno de los puntos de anclaje  $[A_i]_{3 \times 1}$  a través de la siguiente ecuación:

$$A_i = \begin{bmatrix} r_p \cos(\alpha_i) \\ r_p \sin(\alpha_i) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

**Base fija.** Los ángulos de separación ( $u_i$ ) para los puntos de anclaje en la base fija se calculan de manera similar:

$$u_i = \begin{cases} \frac{\pi}{3} - \frac{\theta_b}{2}, & \text{si } i \text{ es impar} \\ u_{i-2} + \theta_p, & \text{si } i \text{ es par} \end{cases} \quad (2.4)$$

Las coordenadas de los puntos de anclaje  $[B_i]_{3 \times 3}$  en la base fija se obtuvieron mediante:

$$B_i = \begin{bmatrix} rb \cos(u_i) \\ rb \sin(u_i) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

**Matriz de rotación.** La matriz de rotación se definió para los ángulos  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$  (en grados) que representará los ángulos de rotación en Roll-Pitch-Yaw de la base superior respecto a la inferior como:

$$R_x(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$R_y(\beta) = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & 0 & \sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$R_z(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) & 0 \\ \sin(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

De esta forma, se obtuvo la matriz de rotación de la plataforma:

$$R_{xyz} = R_x(\alpha)R_y(\beta)R_z(\gamma) \quad (2.9)$$

**Cálculo de la longitud de los actuadores.** Para una posición de la plataforma dada por el vector de traslación  $T = [t_x t_y t_z]^T$ , la longitud de cada actuador ( $L_i$ ) se calculó usando la fórmula:

$$L_i = \|T + R_{xyz} * A_i - B_i\| \quad (2.10)$$

Donde:

- $A_i$  son las coordenadas de los puntos de anclaje en la base móvil.

- $B_i$  son las coordenadas de los puntos de anclaje en la base fija.
- $R_{xyz}$  es la matriz de rotación.

### 2.3.2 Dimensionamiento

Una vez desarrollado el modelo matemático, el siguiente paso fue realizar el dimensionamiento del sistema; lo que incluyó determinar de las dimensiones de las bases (superior e inferior) y de los links (actuadores). El dimensionamiento adecuado fue crucial para asegurar que la plataforma pudiera soportar las cargas previstas y operar dentro de los límites de movimiento requeridos.

Para el dimensionamiento de las plataformas, se debieron considerar varios factores, entre ellos:

- **Capacidad de carga:** La plataforma debía ser capaz de soportar el peso del equipo de prueba, aproximadamente 500kg, más un margen de seguridad.
- **Espacio de trabajo:** La plataforma debía ser lo suficientemente grande como para permitir el rango de movimiento necesario en los seis grados de libertad (tres traslaciones y tres rotaciones).
- **Estabilidad:** Las dimensiones debían garantizar la estabilidad estructural durante la operación, minimizando las deformaciones y vibraciones.

En cuanto a los enlaces o actuadores, su dimensionamiento implicó determinar la longitud mínima y máxima que podían alcanzar, así como su capacidad de carga y velocidad de operación. Los actuadores debían ser seleccionados para cumplir con las especificaciones de movimiento precisas derivadas del modelo matemático.

### 2.3.3 Selección de Actuadores

La selección de actuadores fue una etapa crítica en el diseño de la plataforma Stewart. Los actuadores debían cumplir con los requisitos de capacidad de carga, velocidad y precisión establecidos en el dimensionamiento y el modelo matemático.

Los tipos de actuadores que formaron parte durante las propuestas de solución fueron:

- **Actuadores eléctricos:** Ofrecen alta precisión y capacidad de carga, siendo fáciles de controlar y programar.
- **Actuadores hidráulicos:** Son capaces de manejar cargas muy pesadas, pero requieren sistemas hidráulicos complejos y pueden ser difíciles de controlar con precisión.
- **Actuadores neumáticos:** Son rápidos y económicos, pero su control es menos preciso debido a la compresibilidad del aire.
- **Boyas de suspensión de vehículos:** Proporcionan una excelente amortiguación y absorción de impactos. Son robustas y duraderas, pero pueden requerir un mantenimiento regular para asegurar su correcto funcionamiento.

### 2.3.4 Diseño de las bases

Para este punto se consideraron los conceptos planteados en el capítulo anterior referente a la relación de los diámetros de las bases. Su diseño se realizó utilizando el software de modelado CAD conocido como Autodesk Inventor.

**Base fija.** Se planteó un diseño hexagonal ya que esta forma es conocida por su eficiencia en la distribución de fuerzas y estabilidad estructural. Además, esta configuración geométrica también facilitaba la integración y el ensamblaje con otros componentes de manera eficiente y precisa [15].

**Base móvil.** Se diseñó una base pentagonal debido a que esta forma geométrica permitía una distribución uniforme del peso, además de optimizar la eficiencia estructural [16].

### 2.3.5 Diseño del actuador

Con el fin de realizar pruebas y simulaciones en MATLAB se realizó un modelo CAD del actuador en el software CAD utilizado para el diseño de las bases. Las dimensiones de este diseño se basaron en los resultados obtenidos mediante el modelo matemático.

**Figura 2.5**

*Diseño conceptual del actuador eléctrico*



### 2.3.6 Ensamble de la plataforma

A continuación, se ensamblaron todas las piezas diseñadas para que el modelo pudiera ser sometido a un análisis estático y dinámico, así como obtener un diseño conceptual del sistema de control de la plataforma mediante MATLAB. Con el fin de evitar errores durante la importación del archivo CAD a MATLAB, se realizaron 3 subensambles dentro del ensamble final; el primer y segundo subensamble consistió de las bases fija y móvil con la horquilla de un cardán, para el tercer subensamble consideró a los componentes del actuador. Para el ensamblaje final, se unieron todos los subensambles mediante la cruceta del cardán.

### 2.3.7 Selección de Materiales

La selección de materiales fue fundamental para asegurar la resistencia y durabilidad de la plataforma Stewart. Los materiales fueron seleccionados en función de sus propiedades mecánicas, como resistencia a la tracción, rigidez y peso.

Entre los materiales comunes para la construcción de plataformas Stewart se encontraban:

- **Aluminio:** Ligero y con buena resistencia a la corrosión, siendo ideal para componentes que no requieren soportar grandes cargas.
- **Acero:** Ofrece alta resistencia y rigidez, siendo adecuado para componentes estructurales que soportan cargas significativas.
- **Compuestos:** Materiales como la fibra de carbono, que combinan alta resistencia con baja densidad, pudiendo ser utilizados en aplicaciones especializadas donde el peso es crítico.

### 2.3.8 Pruebas y simulación

El análisis de simulación de tensiones y cargas se realizó utilizando herramientas de análisis por elementos finitos (FEA) en el software CAD. Este análisis ayudó a:

- **Identificar las áreas críticas:** Se localizaron los puntos de mayor esfuerzo y deformación en la estructura.
- **Optimizar el diseño:** Se ajustaron las dimensiones y formas de los componentes para mejorar su resistencia y reducir el peso.
- **Seleccionar materiales:** Se eligieron los materiales más adecuados para cada componente en función de los resultados del análisis de tensiones y cargas.

## **2.4 Diseño Electrónico**

El diagrama electrónico fue un componente esencial para la construcción y operación segura del sistema. Este diagrama incluyó todos los detalles de las conexiones eléctricas entre los componentes, como el PLC, los drivers, los actuadores, los sensores y otros dispositivos auxiliares.

### ***2.4.1 Selección del PLC***

La implementación de un PLC en lugar de un microcontrolador se debió a su robustez, durabilidad y su capacidad de trabajar en ambientes industriales hostiles, así como a su larga vida útil y alta fiabilidad; características poco comunes de encontrar en microcontroladores. Además, los PLC proporcionaban una mayor facilidad de programación y mantenimiento.

El modelo seleccionado debía poseer suficiente capacidad de procesamiento y manejo de datos esenciales para obtener respuestas rápidas y precisa. Era necesario que el PLC posea compatibilidad y versatilidad para la integración de diversos componentes como drivers, sensores y actuadores. Además, la selección del modelo del PLC estuvo enfocada en reducir los costos de mantenimiento a largo plazo y mejorar la eficiencia operativa del sistema.

### ***2.4.2 Selección de drivers***

Los drivers se encargaron de la interfaz entre el PLC y los actuadores, proporcionando la potencia necesaria y controlando la velocidad y posición de los actuadores. Su selección se basó en las características del motor del actuador eléctrico seleccionado con anterioridad. Además, el driver debía poseer características de protección contra sobrecargas y fallos.

### ***2.4.3 Selección del controlador de 6 ejes***

Este controlador especializado permitió la gestión simultánea y coordinada de los seis actuadores de la plataforma Stewart. Fue crucial para ejecutar movimientos complejos y precisos en

los seis grados de libertad. Algunos controladores de 6 ejes estaban integrados con software de programación que facilitaba la creación de trayectorias y secuencias de movimiento.

Para la selección del controlador de 6 ejes se consideraron los siguientes criterios:

- **Compatibilidad:** El controlador debe ser compatible con el protocolo de comunicación del PLC seleccionado y poseer afinidad con el driver del actuador seleccionado.
- **Precisión:** Soportar algoritmos de control como PID que garantice un movimiento preciso.
- **Sincronización:** Capacidad para sincronizar el movimiento de los actuadores de forma que se replique el movimiento deseado.
- **Protección:** Protección contra condiciones ambientales y de trabajo adversas, tales como: humedad, vibraciones, etc.

#### ***2.4.4 Selección de sensores***

Para esta sección se planteó implementar sensores externos, sin embargo, luego de una búsqueda en el mercado se seleccionaron actuadores con sensores del tipo finales de carrera ya incluidos dentro del actuador. Por lo que su implementación se encontró integrada a los actuadores y las señales fueron recibidas por el PLC.

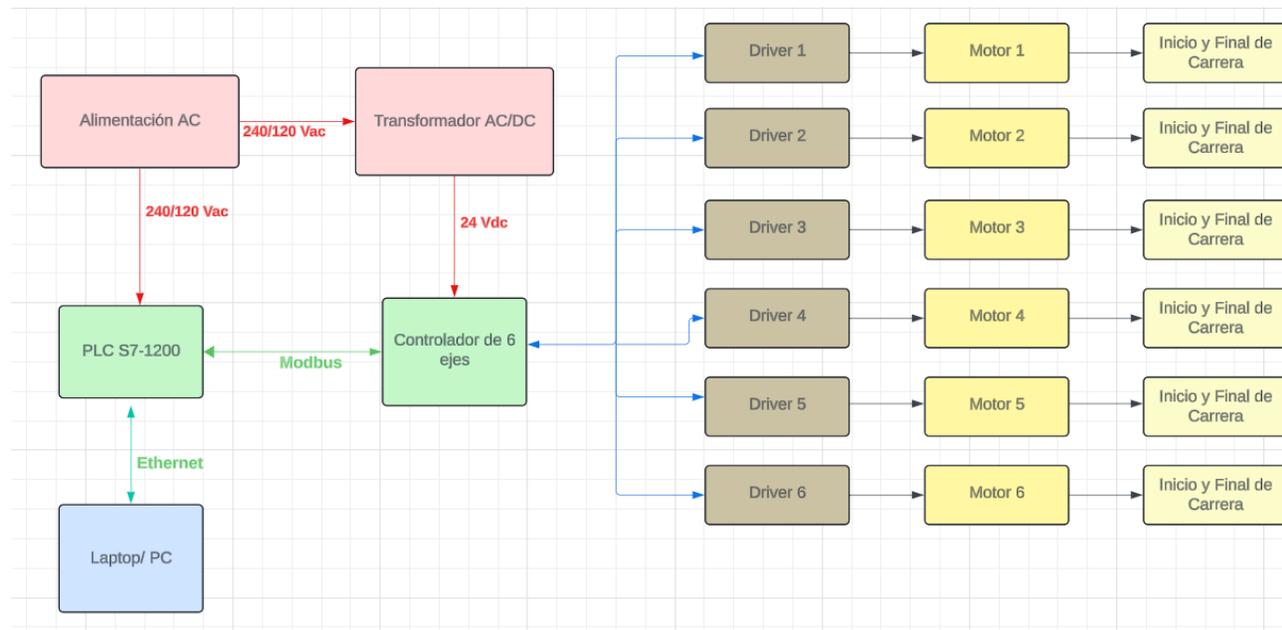
#### ***2.4.5 Diseño del circuito Electrónico***

El diagrama eléctrico deberá ser claro y detallado, proporcionando una guía completa para la instalación y mantenimiento del sistema. Por ello, las conexiones de potencia fueron especificadas para cada uno de los actuadores y drivers, asegurando que la fuente de energía fuera adecuada para los requerimientos del sistema. Asimismo, se detallaron las conexiones de control, incluyendo las líneas de comunicación entre el PLC, los drivers y el controlador de 6 ejes para la transmisión de

comandos y la recepción de retroalimentación de posición y estado. Además, en el diagrama se incluyeron las conexiones para sensores y dispositivos Auxiliares, tales como sensores de límite, encorder de posición y dispositivos de seguridad que podrían ser necesarios.

**Figura 2.6**

*Diseño conceptual del circuito electrónico*



## 2.5 Diseño del sistema de control

### 2.5.1 Selección de PLC

Para la implementación de un controlador PID en lazo cerrado en una plataforma Stewart, era esencial seguir una metodología adecuada para la selección del PLC, garantizando que el mismo pueda gestionar eficientemente todos los aspectos del sistema de control y mantener una operación precisa y estable.

- **Gestión de Señales:** El PLC debe manejar eficientemente las señales de entrada y salida, incluyendo datos de sensores y señales a actuadores.
- **Compatibilidad con el Controlador PID:** Asegurar que el PLC sea compatible con el controlador PID en términos de interfaces y procesamiento de datos.

- **Rango y Resolución:** El PLC debe tener el rango y la resolución necesarios para el control preciso del sistema.
- **Capacidad de Procesamiento:** El PLC debe ofrecer suficiente capacidad de procesamiento y velocidad para una respuesta rápida y estable del controlador PID.
- **Configuración y Mantenimiento:** Facilitar la configuración e integración del PLC para una puesta en marcha y mantenimiento eficientes.

### ***2.5.2 Controladores PID***

La selección del controlador PID debía considerar varios criterios clave para proporcionar un control preciso y eficiente de la plataforma Stewart.

- **Capacidad de Ajuste de Parámetros:** El controlador PID debe permitir un ajuste fino de los parámetros proporcionales, integrales y derivativos.
- **Rango de Operación y Resolución:** Es importante que el controlador PID tenga un rango de operación adecuado y una resolución suficiente para manejar los pequeños cambios en la posición y la velocidad de los actuadores.
- **Tiempo de Respuesta y Estabilidad:** El controlador debe ser capaz de proporcionar una respuesta rápida y estable frente a las variaciones en el set point.
- **Compatibilidad con el Sistema de Control:** El controlador PID debe ser compatible con el PLC y otros elementos del sistema de control para asegurar que la integración sea fluida.

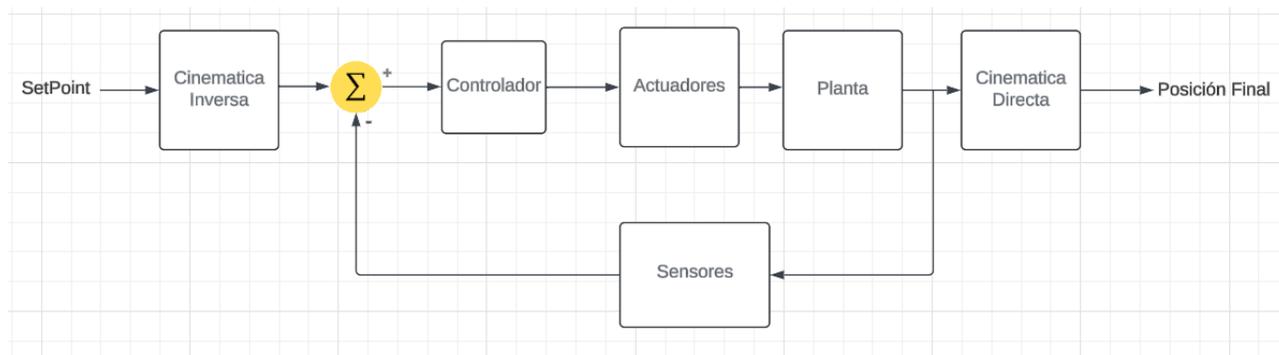
### ***2.5.3 Diagrama de flujo***

El sistema de control en lazo cerrado fue fundamental para garantizar la precisión y estabilidad de la plataforma Stewart. En un sistema de lazo cerrado, los sensores de retroalimentación monitorearon continuamente la posición y velocidad de los actuadores, y esta información se utilizó

para ajustar los comandos de control en tiempo real, se propone un bosquejo conceptual de su distribución a continuación.

**Figura 2.7**

*Diseño conceptual del sistema de control*



## Capítulo 3

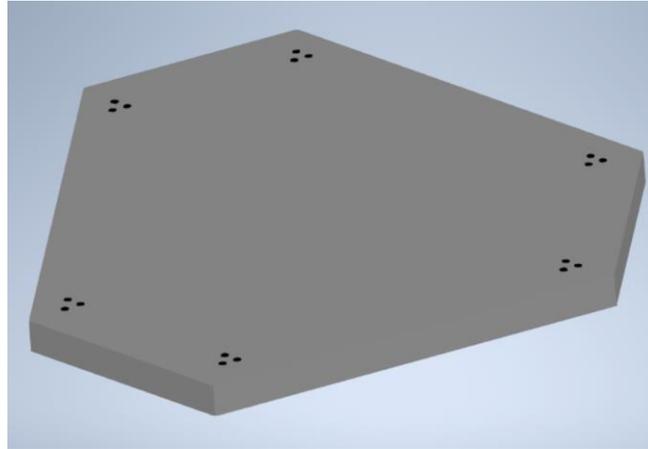
### 3.1 Resultados y Análisis

#### 3.1.1 Diseño de la plataforma

##### Base Fija.

Figura 3.1

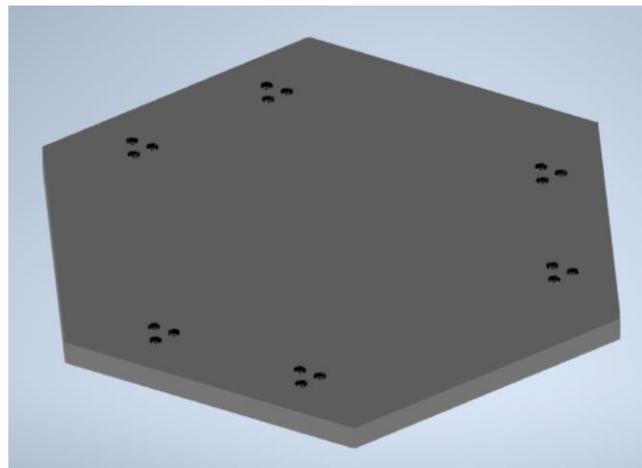
*Diseño final de la base fija*



##### Base Móvil.

Figura 3.2

*Diseño final de la base móvil*



**Actuador seleccionado.** Se realizó una investigación en el mercado local de actuadores eléctricos lineales que cumplieran con los requisitos de trabajo. Después de consultar en el manual de SKF se seleccionó el actuador LEMC-S-3005 en conjunto con el servomotor P10 LB6 con

configuración en paralelo. Para la elección de este actuador se consideraron los datos obtenidos mediante el análisis dinámico, tales como fuerza, velocidad, etc.

**Tabla 3.1**

*Especificaciones del actuador LEMC-S-3005*

| <b>LEMC-S-3005</b>             |              |
|--------------------------------|--------------|
| Velocidad máxima lineal        | 269 mm/s     |
| Carrera                        | 100 – 800 mm |
| Fuerza máxima a velocidad cero | 53.3 kN      |
| Capacidad de carga dinámica    | 91.9 kN      |
| Tipo de motor                  | Servo        |
| Potencia nominal               | 7.09 kW      |

### **Ensamble.**

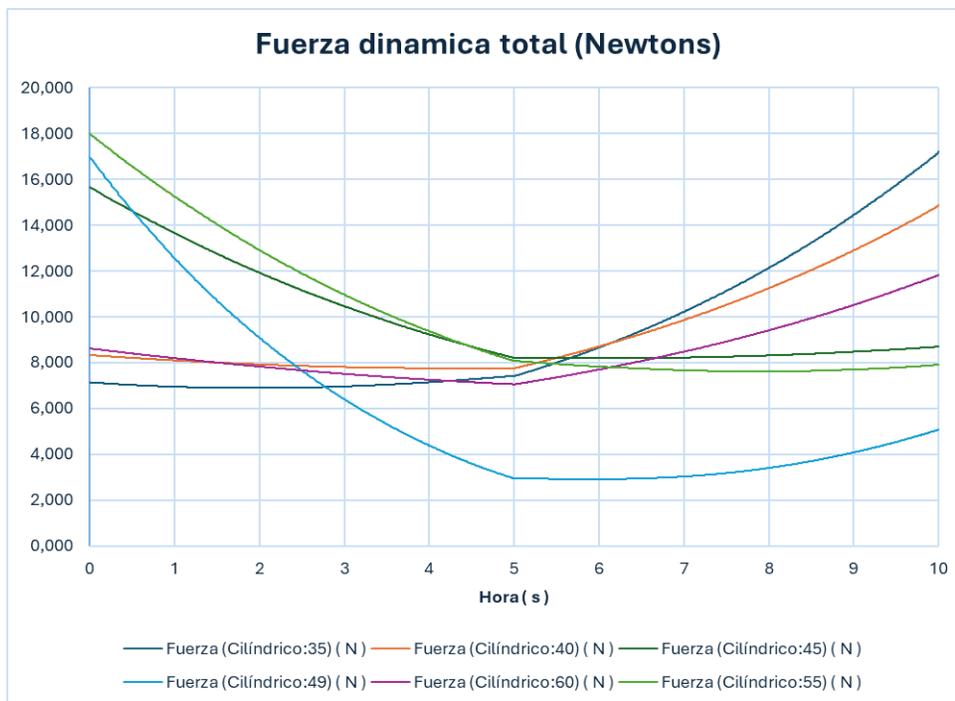
**Figura 3.3**

*Ensamble final de la plataforma*



### **Pruebas y simulación.**

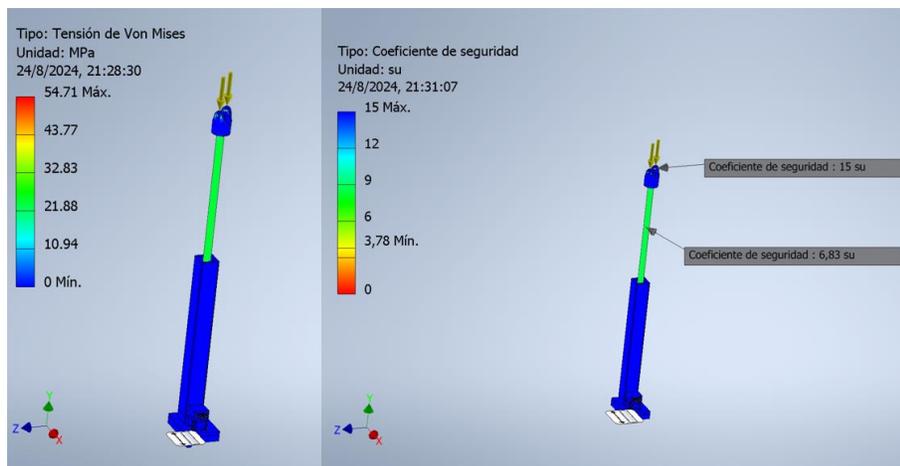
Se realizó un análisis dinámico y estático de la plataforma en el software de simulación Autodesk Inventor. En primer lugar, se realizó un análisis dinámico para determinar las fuerzas a la que se encuentra sometido cada actuador, *Figura 3.4*; así como su posición, velocidad y aceleración.

**Figura 3.4***Análisis dinámico - Fuerzas*

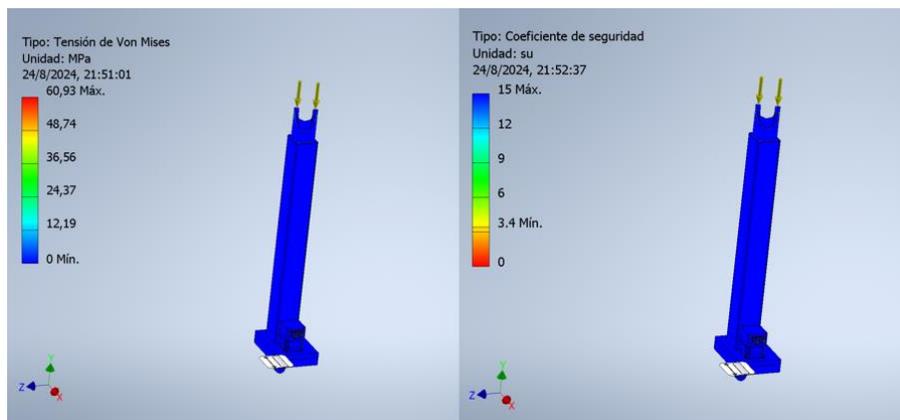
Con los datos obtenidos de la fuerza que experimenta cada actuador, se procedió a realizar un análisis cuasiestático de elementos finitos a la plataforma. Sin embargo, debido a limitaciones de software no fue posible realizar un análisis a la plataforma en conjunto; por ello, se optó por realizar las pruebas a la base superior, al actuador y a la cruceta del cardán de forma individual. De esta forma, se validó que el actuador seleccionado fuera capaz de trabajar bajo las condiciones de trabajo deseadas, evaluando la Tensión de Von Mises, coeficiente de seguridad, el desplazamiento y las deformaciones. El análisis fue realizado para los casos cuando el actuador se encuentra completamente extendido (*Figura 3.5*) y retraído (*Figura 3.6*); obteniendo un elevado factor de seguridad y asegurando que el actuador no se pandea bajo las condiciones de carga.

**Figura 3.5**

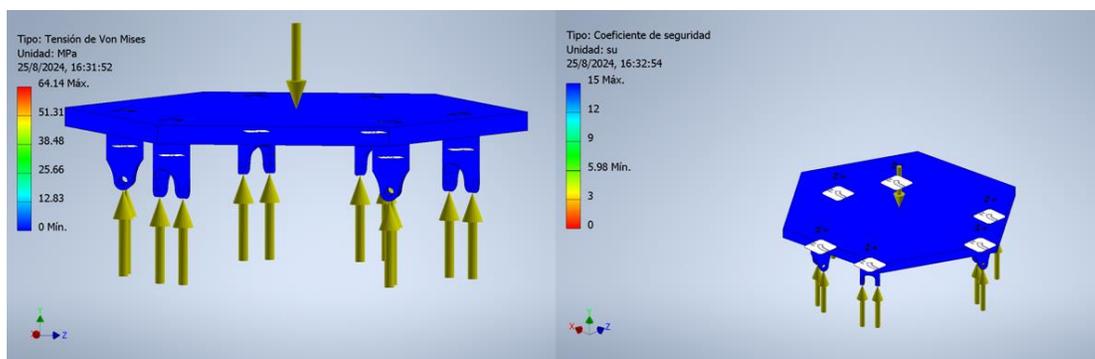
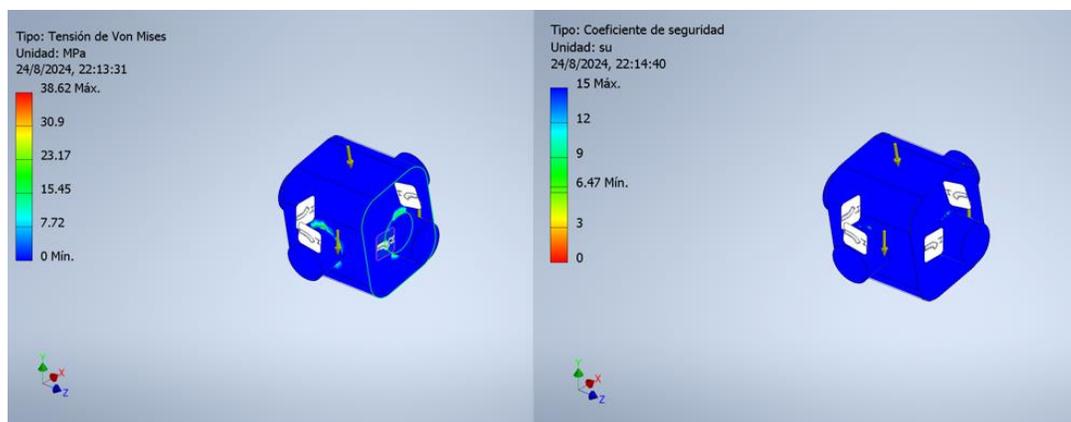
*Análisis estático - Actuador extendido*

**Figura 3.6**

*Análisis estático - Actuador retraído*



Para el análisis de la plataforma se consideró el peso de la plataforma y las reacciones de los actuadores, *Figura 3.7*. Mientras que, para la cruceta se consideró la carga dinámica durante el movimiento de plataforma, *Figura 3.8*. Estos análisis se realizaron eligiendo diferentes materiales para la simulación con la finalidad de elegir el material a utilizar.

**Figura 3.7***Análisis estático - Plataforma móvil***Figura 3.8***Análisis estático - Cruceta del cardán*

**Material.** Mediante el análisis estático de la plataforma superior y del cardán, se determinó que se utilizará el acero inoxidable AISI 304. Este material ofrece alta durabilidad y resistencia mecánica lo que asegura que la plataforma soporte cargas dinámicas sin deformarse. Además, es relativamente fácil de maquinar a comparación de otros tipos de acero, lo que permite manufacturar las distintas piezas que componen la plataforma.

### 3.2 PLC seleccionado

Se seleccionó el PLC Siemens S7-1200, modelo CPU 1215C AC/DC/RELE, ya que ofrece la funcionalidad necesaria para cumplir con los requisitos del proyecto, sin incurrir en los costos elevados asociados a alternativas más avanzadas. En particular, se evaluó la opción de seleccionar un

PLC S7-1500, que posee una mayor cantidad de entradas digitales; sin embargo, la diferencia significativa en costos motivó la decisión de complementar el PLC S7-1200 con un módulo de expansión 6ES7221-1BF32-0XB0, lo que permite satisfacer el número de entradas digitales necesarias. Además, para el ingreso de los parámetros de simulación, se eligió un panel HMI KTP700 BASIC, con una pantalla TFT de 7 pulgadas y conectividad PROFINET, proporcionando una interfaz de usuario intuitiva.

### 3.3 Drivers seleccionados

**Figura 3.9**

*Driver VD3E*



Nota: Imagen extraída del catálogo del producto.

El driver VD3E-014SA1G fue seleccionado debido a su compatibilidad con las especificaciones eléctricas del actuador LEMC-S-3005 P10 LB6 y su capacidad para ofrecer un control preciso y eficiente.

**Tabla 3.2**

*Especificaciones driver VD3E*

| <b>VD3E-014SA1G</b> |                                |
|---------------------|--------------------------------|
| Entradas            | 6                              |
| Salidas             | 3                              |
| Encoder             | 17 – 23 bits                   |
| Comunicación        | 1 puerto Ethernet y 1 EtherCAT |
| Voltaje             | 220 V                          |
| Velocidad nominal   | 3000 rpm                       |
| Torque nominal      | 3.8 Nm                         |
| Potencia            | 1 – 3.8 kW                     |

### 3.4 Controlador de 6 ejes

Se seleccionó un controlador de al menos 6 ejes que fuera capaz de comunicarse con el PLC programado; por ello, se seleccionó al controlador

**Tabla 3.3**

*Especificaciones controlador MP3300iec*

| <b>MP3300iec</b>    |                             |
|---------------------|-----------------------------|
| Número de modelo    | PMC-U-MP33008               |
| Número de ejes      | 8                           |
| Protocolos Ethernet | Ethernet/IP y Modbus TCP/IP |
| Voltaje             | 24 V DC o 100 - 200 V AC    |

### 3.5 Sensores

El actuador eléctrico seleccionado incluía sensores de límite de carrera, por lo cual no fue necesario realizar una búsqueda en el mercado para implementar este dispositivo. Los sensores son implementados dentro de la programación para definir como zona crítica cuando al menos uno de los actuadores alcance su límite superior o inferior; así como para establecer una zona de seguridad desde dónde la plataforma iniciará la simulación según los parámetros ingresados por el usuario.

### 3.6 Circuito electrónico

En el apartado electrónico, se desarrolló un plano eléctrico enfocado en asegurar una integración eficiente y conforme a las normativas técnicas vigentes. Este diagrama detalla las conexiones y la estructura del sistema, lo cual es esencial para garantizar su correcto funcionamiento y seguridad operativa.

El sistema se alimenta a través de líneas de fase que suministran energía al PLC S7-1200, que posee un módulo de expansión de entradas digitales con la finalidad de gestionar todas las señales provenientes de los sensores ubicados en cada actuador. Estos sensores están alimentados por una fuente de 24V DC, proporcionada por un transformador AC/DC. El PLC S7-1200 también está conectado a un controlador de seis ejes tipo CNC, encargado de coordinar el movimiento preciso de los actuadores. Este controlador se comunica con los drivers de los servomotores, que son los

encargados de gestionar el accionamiento de cada motor individual. Las señales de control, tales como pulso (PUL) y dirección (DIR), se transmiten desde el controlador de seis ejes a los drivers, garantizando que los motores se muevan de acuerdo con los parámetros establecidos.

Además, el sistema incluye una interfaz HMI (Human Machine Interface), la cual está conectada al PLC y al controlador de seis ejes mediante el mismo protocolo de comunicación, formando parte crucial en el sistema para la visualización en tiempo real de la operación del sistema, permitiendo al usuario monitorear y ajustar parámetros de manera intuitiva y eficiente.

### 3.7 Programación PLC

Para esta actividad se implementó el software TIA Portal. En primer lugar, se definieron las variables del programa separándolas en 3 categorías:

- *Entradas:* Variables establecidas para el ingreso de señales digitales o analógicas al programa.
- *Salidas:* Variables establecida para la salida de señales digitales.
- *Estados:* Variables utilizadas para definir estados internos que tienen lugar cuando se cumplen ciertos requisitos. Por ejemplo, si el botón de parada de emergencia es presionado se definió una variable de estado que define esta situación y es utilizada para detener el movimiento de la plataforma.

La programación consistió en el recibimiento de señales digitales provenientes de los sensores ubicados en cada actuador para definir los siguientes estados:

- *Zona crítica:* Ocurre cuando al menos uno de los actuadores alcanza su límite superior o inferior previamente delimitado con los sensores.
- *Zona de seguridad:* Acontece cuando todos los actuadores alcancen una posición de seguridad definida con anterioridad.

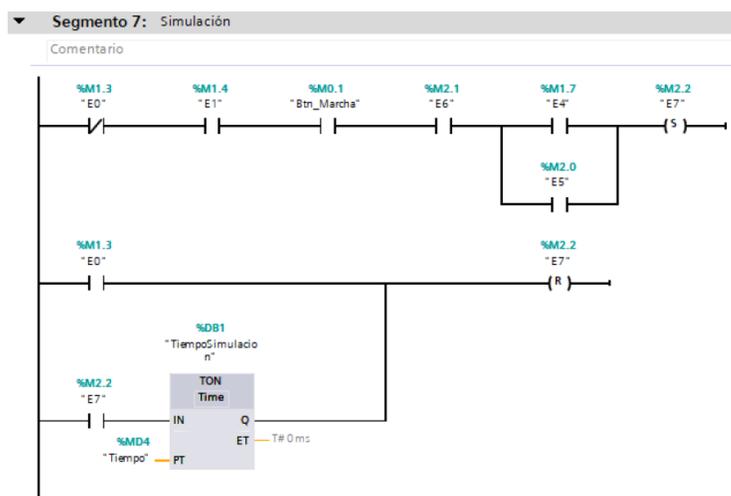
La plataforma cuenta con dos modos de simulación: *Traslacional* y *rotacional*. Sin embargo, solo podrá iniciarse si se cumplieron los siguientes requisitos:

- La plataforma se encuentra en una posición segura.
- Los parámetros de la simulación ingresados son mayores a 0.
- Se definió el eje respecto al cual la plataforma rotará o se trasladará.

Cuando se cumplan estos requisitos, se activará el estado E7 señalando que la simulación ha iniciado y se desactivará cuando haya transcurrido el tiempo ingresado por el usuario o se active el estado E0, que hace referencia a la parada de emergencia del sistema; este estado tiene lugar cuando la plataforma ha alcanzado una zona crítica o el botón de parada de emergencia fue presionado por el usuario.

**Figura 3.10**

*Programación del PLC - Inicio de la simulación*



Se implementó una pantalla HMI, donde el usuario podrá ingresar los parámetros de la simulación, acceder al historial de alarmas activadas y a una pequeña descripción del proyecto. Estas opciones se encuentran en la pantalla principal del dispositivo, *Figura 3.11*.

Figura 3.11

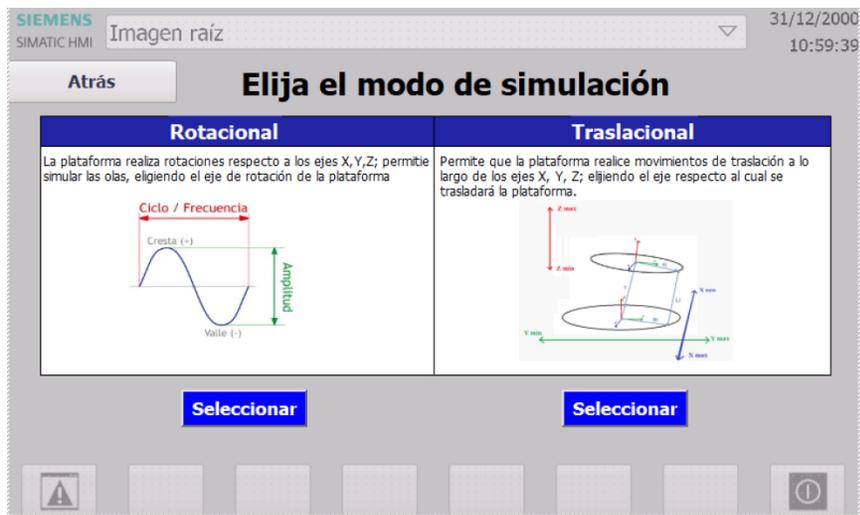
Pantalla principal del HMI



Al elegir la opción *Simulación*, el usuario deberá seleccionar el modo que desea simular. En esta nueva pantalla, se presenta una breve explicación de cada modo junto a un gráfico para facilitar su comprensión, *Figura 3.12*.

Figura 3.12

HMI - Modos de simulación

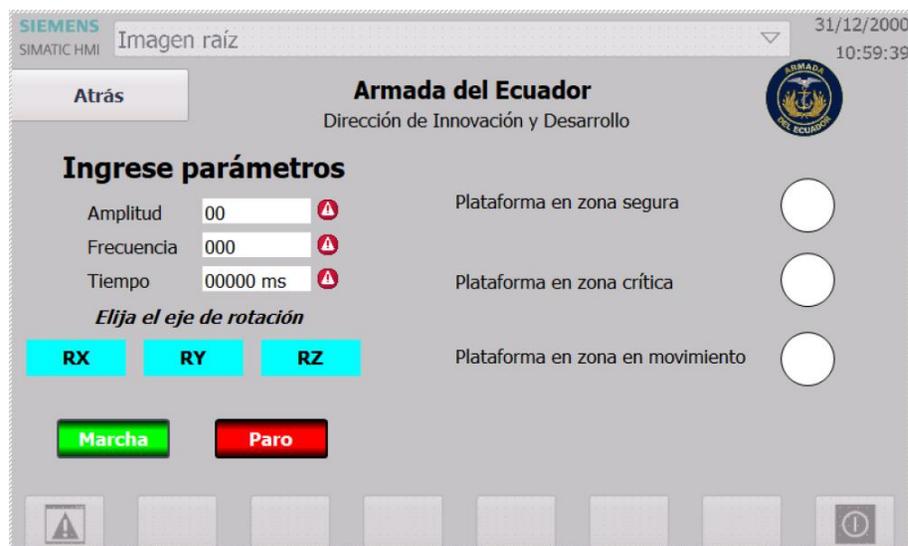


A continuación, el cliente podrá definir los parámetros de simulación e iniciar el movimiento de la plataforma o activar la parada de emergencia; en caso de que los valores ingresados no sean válidos, se mostrará un ícono de advertencia adyacente al parámetro erróneo. Adicionalmente, podrá

visualizar si la plataforma se encuentra en una zona segura, crítica o si está en movimiento, *Figura 3.13*. Cualquier advertencia o error que surja en esta sección podrá ser visualizado con mayor detalle en la pantalla de alarmas.

**Figura 3.13**

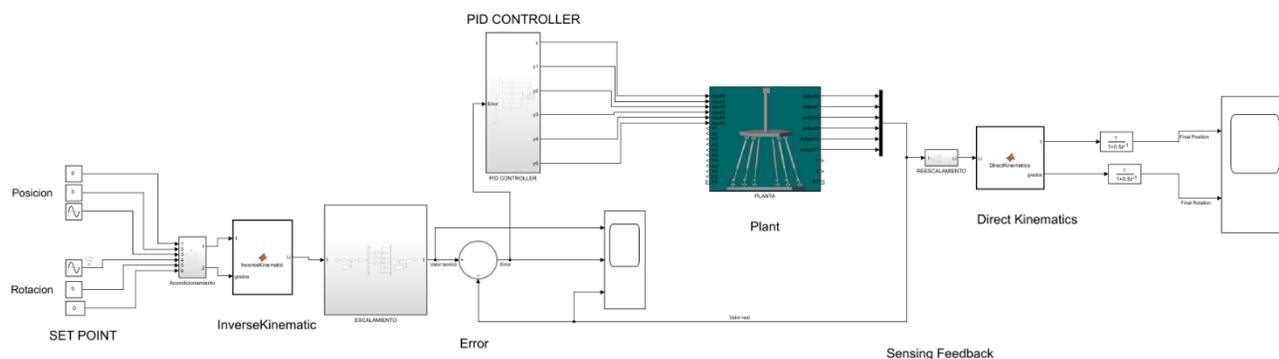
*HMI - Ingreso de parámetros de simulación*



### 3.8 Diagrama de flujo

**Figura 3.14**

*Sistema de control*

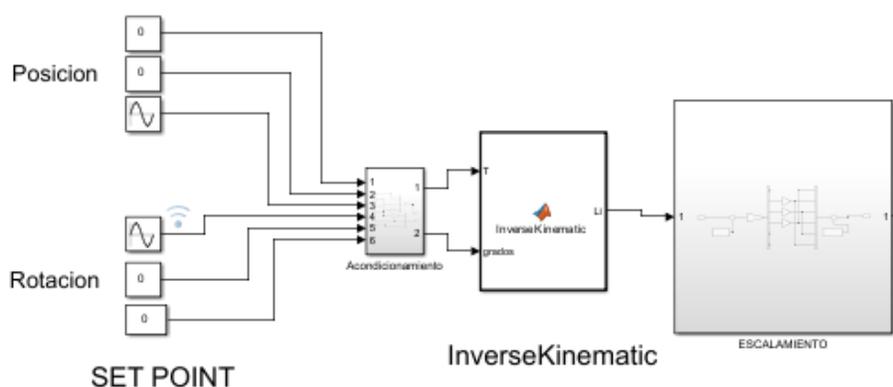


El sistema de control en lazo cerrado se desarrolló basado en un modelo que establece como puntos de referencia las características dinámicas de la ola a replicar, tales como amplitud, frecuencia

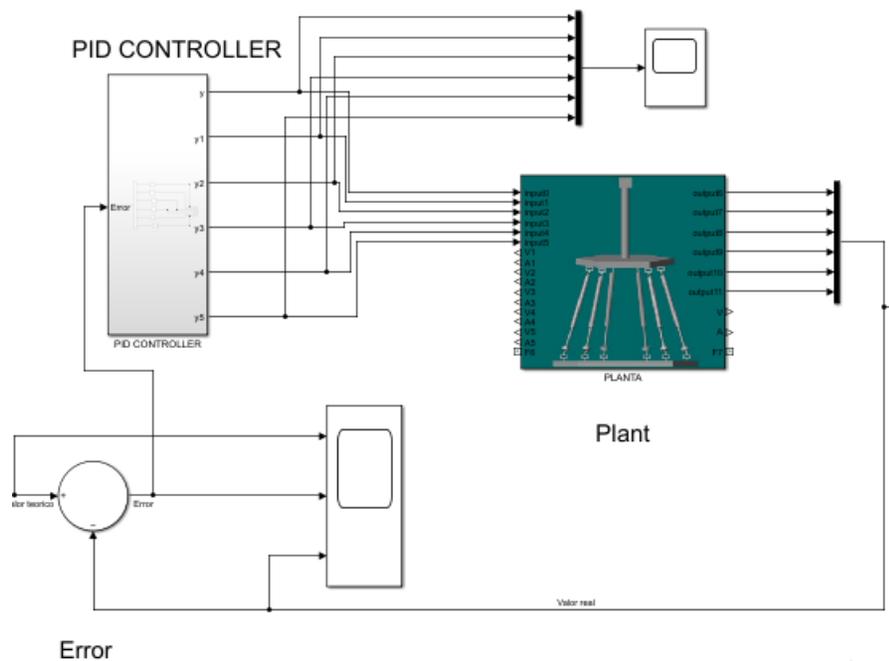
y duración. Estos parámetros definen las posiciones y rotaciones deseadas de la plataforma en función del tiempo. Tras la definición de estos puntos de ajuste, la señal generada se procesa mediante la función "InverseKinematics" de MATLAB, que convierte en tiempo real las posiciones y rotaciones deseadas en desplazamientos específicos para cada actuador. Antes de enviar esta señal al sistema físico, se realizó un escalamiento para asegurar la coherencia entre los valores numéricos del código y los interpretados por el software de Simscape, garantizando una adecuada correspondencia entre ambas señales, como se puede observar en la *Figura 3.14*.

**Figura 3.15**

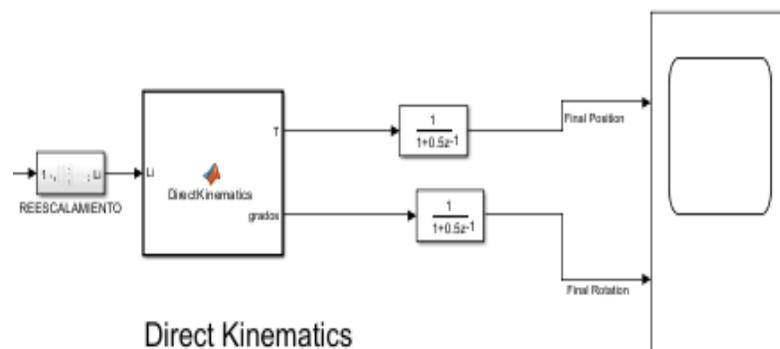
*Procedimiento inicial*



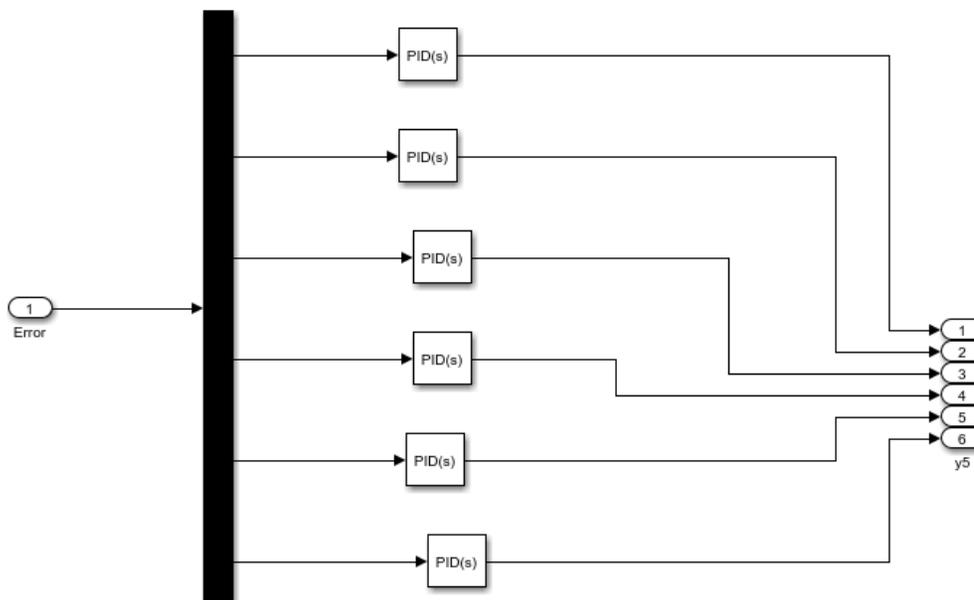
Las longitudes resultantes se transmiten a los controladores PID individuales de cada actuador. Dado que el movimiento y los desplazamientos varían entre los actuadores, se requiere un control preciso y adaptado a cada uno. La información procesada por los controladores se envía directamente a la planta, la cual ajusta su posición para alcanzar los objetivos definidos. Simultáneamente, el sistema realiza un proceso de monitoreo que vigila en tiempo real los desplazamientos reales de los actuadores, *Figura 3.15*. Estos valores se comparan con los teóricos en un bloque sumador, calculando la diferencia entre el valor esperado y el valor real, permitiendo a los controladores PID ajustar el sistema para minimizar el error y estabilizar su funcionamiento.

**Figura 3.16***Control y accionamiento de la planta*

El objetivo era que el sistema mantuviera la planta en un bucle continuo de corrección, aproximándose constantemente al desplazamiento deseado. Para verificar que la señal de entrada definida por el usuario fue interpretada correctamente por el sistema, se implementó un código de cinemática directa, *Figura 3.16*. Este proceso inverso recalcula las posiciones y rotaciones a partir de las longitudes obtenidas, invirtiendo previamente el escalamiento inicial para ajustar los valores a las escalas originales. De este modo, se aseguró que el sistema permaneciera constantemente próximo a los valores objetivos a lo largo de la simulación.

**Figura 3.17***Verificación del sistema*

### 3.9 Controlador PID

**Figura 3.18***Controladores PID*

El control de cada uno de los actuadores del sistema se implementó utilizando controladores PID individuales, *Figura 3.18*, todos configurados con los mismos parámetros. Estos parámetros se determinaron a partir de la linealización del sistema, un proceso esencial para simplificar las

complejidades no lineales del sistema real y permitir un diseño de control más efectivo. Posteriormente, se utilizó la herramienta PID Tuning de MATLAB, que facilitó el ajuste preciso de los valores de los parámetros del controlador; esta herramienta permite la sintonización automática de los controladores utilizando la planta del sistema y ofrece opciones para seleccionar el tipo de optimización que mejor se ajuste a los requisitos del proyecto.

Se optó por una optimización basada en "Reference Tracking", cuyo objetivo es asegurar que la salida del sistema siga de manera precisa una señal de referencia. Este enfoque es fundamental cuando se busca que la respuesta del sistema sea lo más cercana posible al comportamiento deseado, minimizando el error entre la entrada deseada y la salida real a lo largo del tiempo. Los parámetros finales obtenidos para el controlador PID fueron los siguientes:

**Tabla 3.4**  
*Parámetros del controlador PID*

| Parámetros  | Controlador PID |            |           |                            |
|-------------|-----------------|------------|-----------|----------------------------|
|             | P               | I          | D         | Coefficiente de filtro (N) |
| Controlador | 2.033735        | 1420.30148 | 0.0006523 | 121852.04735               |

La ganancia proporcional (P) se seleccionó para proporcionar una respuesta rápida y reducir el error de estado estacionario, la ganancia integral (I) se ajustó para eliminar el error acumulativo a lo largo del tiempo, asegurando que el sistema alcanzara y mantuviera la referencia deseada; la ganancia derivativa (D) se utilizó para anticipar los cambios en la señal de error, mejorando la estabilidad y reduciendo las oscilaciones. Por último, el coeficiente de filtro (N) se estableció para suavizar la acción derivativa y evitar la amplificación del ruido de alta frecuencia, lo que podría afectar negativamente la precisión del sistema.

La implementación de estos controladores PID individuales, aunque con parámetros uniformes, permite que cada actuador reaccione adecuadamente a las variaciones de su entorno operativo, manteniendo un control preciso y consistente en todo el sistema. Esto es crucial para

garantizar que el sistema en su conjunto opere de manera coordinada, alcanzando las posiciones y rotaciones deseadas con alta precisión y estabilidad.

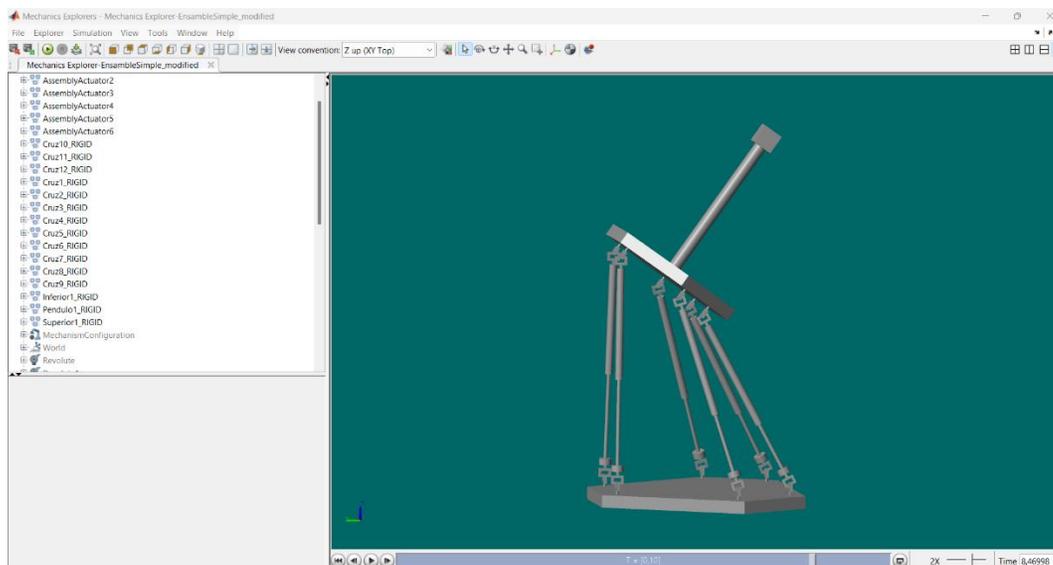
### 3.10 Simulación y validación

El proceso de simulación y validación del sistema se realizó utilizando Simscape Multibody de MATLAB, lo que permitió integrar el modelo mecánico diseñado en Autodesk Inventor dentro del entorno de MATLAB. Debido a la complejidad del modelo original, se optó por simplificar ciertos aspectos antes de la importación para evitar limitaciones durante la compilación y simulación. Esta simplificación aseguró que el sistema pudiera ser simulado de manera eficiente, manteniendo la precisión necesaria para un análisis riguroso.

Una vez importado el modelo en Simscape Multibody, se utilizó Mechanics Explorer para visualizar en tiempo real el movimiento de la plataforma Stewart, *Figura 3.19*. Esta herramienta proporcionó una visualización precisa y detallada del comportamiento dinámico del sistema, permitiendo observar cómo los actuadores respondían a los comandos de control.

**Figura 3.19**

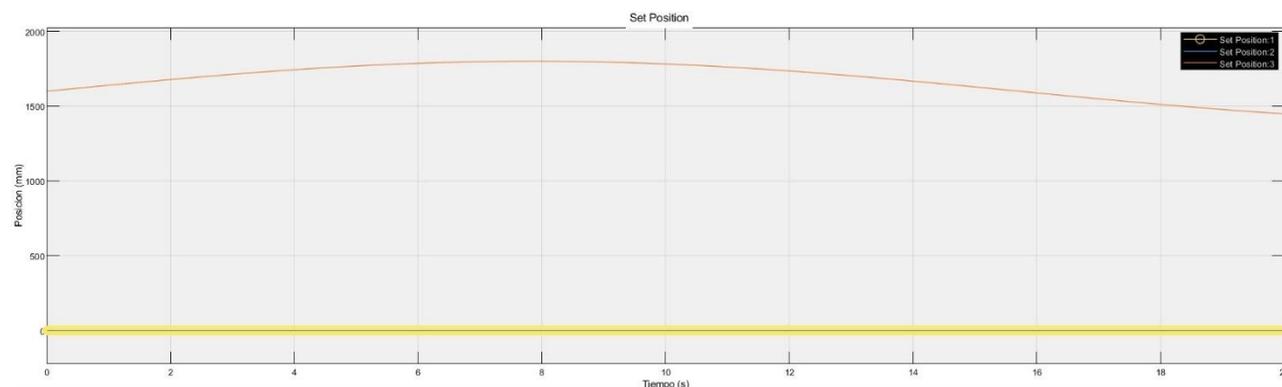
*Modelo de la plataforma en MATLAB*



En cuanto al análisis de señales, se realizaron comparaciones entre las señales obtenidas para su visualización y validación. En la *Figura 3.20* y *Figura 3.21* se muestran las posiciones y rotaciones objetivo, definidas por el usuario. Estas gráficas establecen la referencia que el sistema debe seguir y son fundamentales para evaluar la precisión del control. Las señales se procesaron a través del código de cinemática inversa. En este caso, el sistema se probó enviando una posición sinusoidal en Z y una rotación entre  $-0.46$  y  $+0.46$  radianes en X, mientras que el resto de las variables se configuraron en 0.

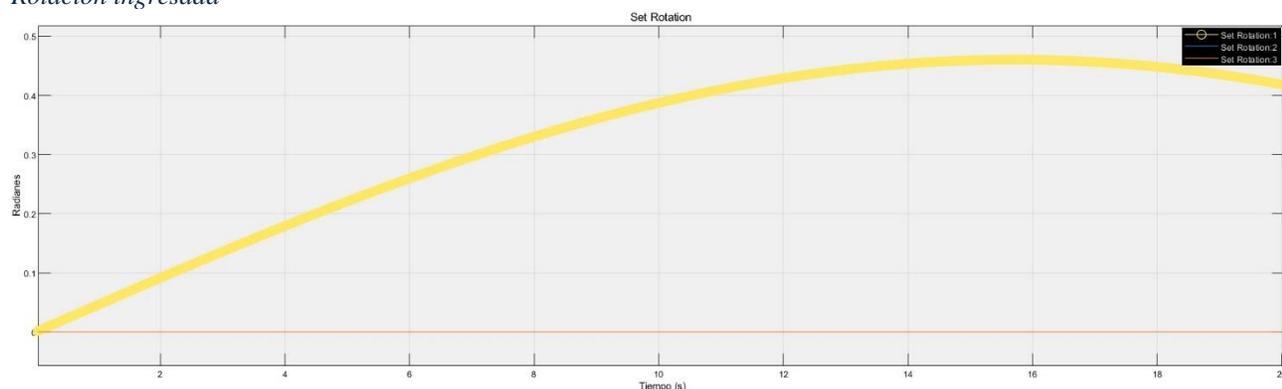
**Figura 3.20**

*Posición ingresada*



**Figura 3.21**

*Rotación ingresada*

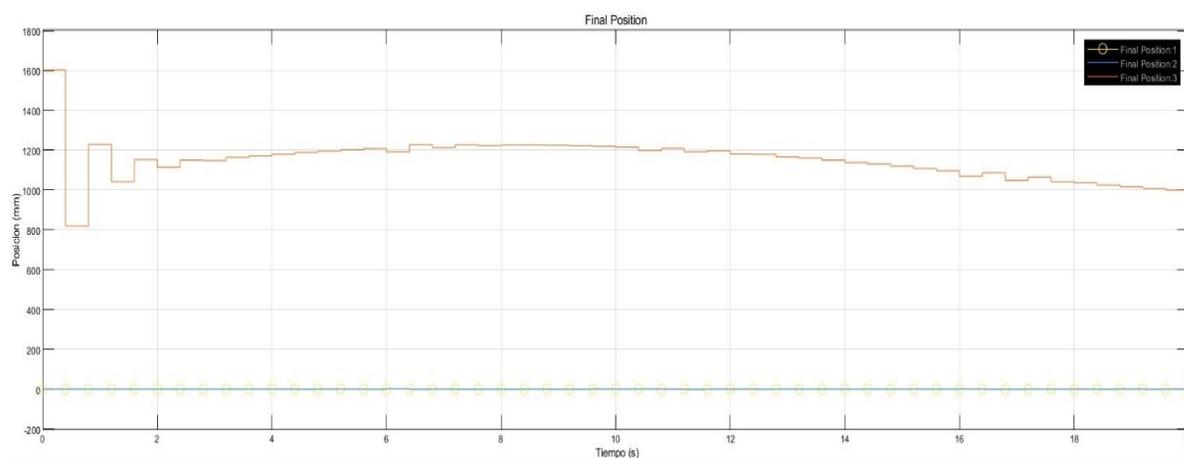


En la *Figura 3.22* se representan las posiciones y rotaciones alcanzadas por la plataforma al final de la simulación, lo que permite validar el sistema al comparar si los valores obtenidos a lo largo

de la simulación se mantuvieron próximos a los solicitados por el usuario. Sin embargo, la discretización de la gráfica se debe a la complejidad de los códigos de cinemática directa, ya que representan un desafío al no saber cuál de todas las posibles combinaciones de longitudes seleccionar para interpretar la posición y rotación final, *Figura 3.22* y *Figura 3.23*.

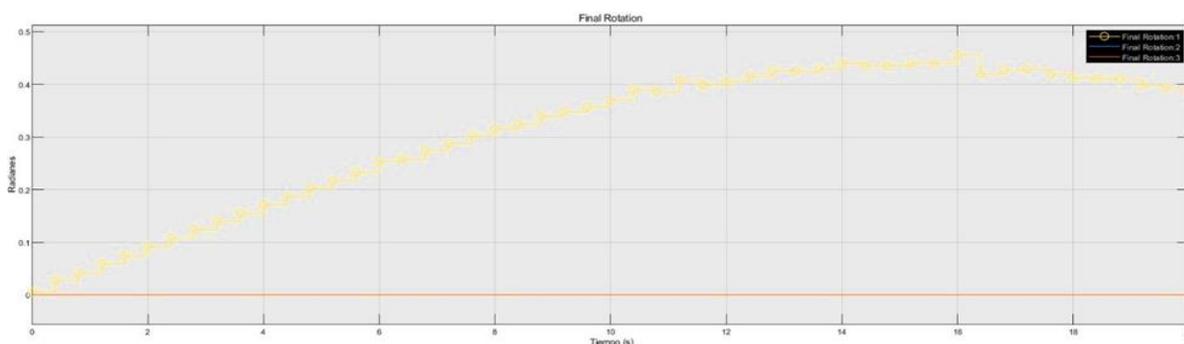
**Figura 3.22**

*Posición final*



**Figura 3.23**

*Rotación final*

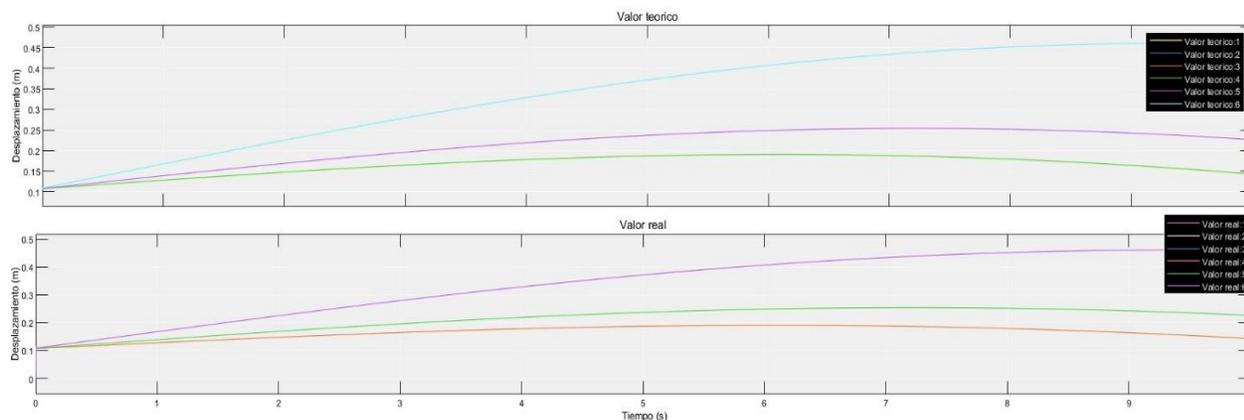


La *Figura 3.24* ofrece una comparación directa entre la señal teórica, obtenida a través de la cinemática inversa, y la señal real generada por el sistema. Esta comparación es esencial para evaluar el grado de precisión con el que el sistema sigue la trayectoria deseada. La gráfica muestra cómo, a

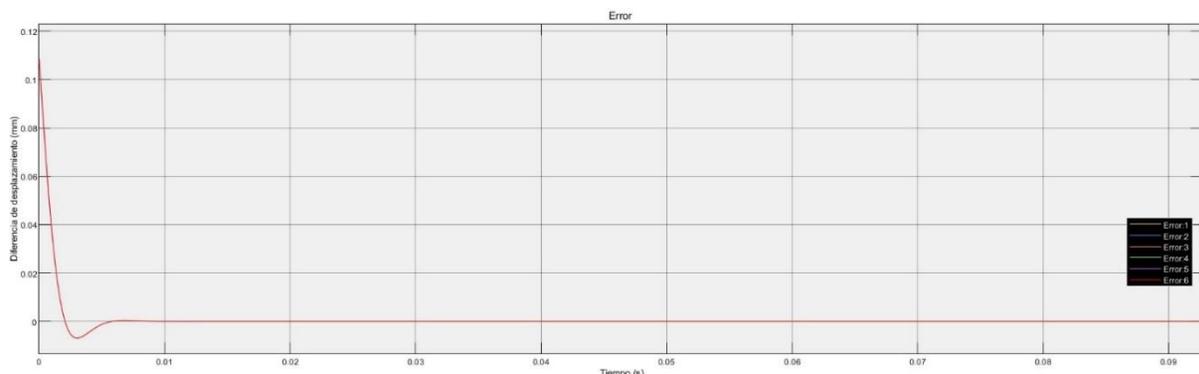
pesar de las dinámicas complejas del sistema, la señal real se aproxima muy bien a la señal teórica, lo que indica un control eficaz.

**Figura 3.24**

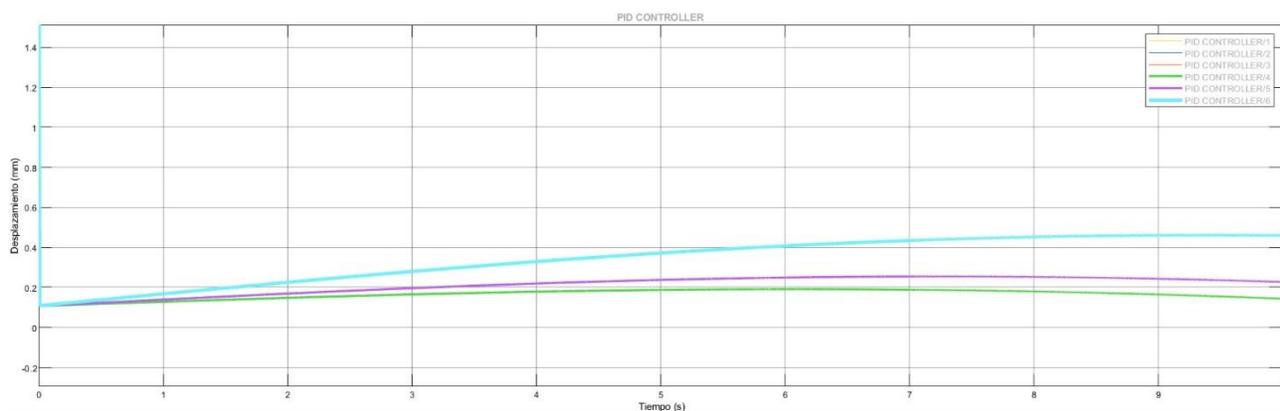
*Valor teórico vs Valor real*



Posteriormente, a través de la visualización de la salida del bloque sumador, es decir, el error, se puede observar claramente la diferencia entre la señal teórica y la señal real a lo largo del tiempo. Esta gráfica es crucial para entender cómo el error evoluciona durante la simulación y cómo los controladores PID trabajan para minimizarlo. En los primeros segundos de la simulación, se observa un proceso de amortiguamiento en el que el error disminuye significativamente, hasta que el sistema alcanza una estabilidad en la que el error se mantiene dentro de un rango estable y muy próximo a cero, *Figura 3.25*.

**Figura 3.25***Estabilización del error*

Finalmente, en la *Figura 3.26* se puede observar cómo los controladores PID ajustan las señales de control para cada actuador en respuesta al error detectado. Esta gráfica revela cómo cada controlador PID modula su salida para corregir cualquier desviación y asegurar que la plataforma siga la trayectoria deseada con alta precisión. La capacidad de los controladores para estabilizar la salida es evidente, lo que refuerza la robustez y efectividad del diseño de control implementado.

**Figura 3.26***Procesamiento PID*

### 3.11 Análisis de costos

Se realizó un análisis dividiendo los gastos en 4 categorías: Diseño mecánico, electrónico, de programación y gastos variables. Los valores considerados para este análisis tienen como referencia precios en el mercado local e internacional, debido a que no fue posible obtener un valor referencial

en el mercado ecuatoriano de todos los elementos. De esta forma, el proyecto tiene un precio de implementación de \$84,107.30; siendo el diseño electrónico el más oneroso del proyecto, con un precio de \$46,718.00, como se aprecia en la *Tabla 3.1*.

**Tabla 3.5**  
*Análisis de costos*

| Precio total del proyecto |              |
|---------------------------|--------------|
| Categoría                 | Total        |
| Diseño mecánico           | \$ 6,880.00  |
| Diseño electrónico        | \$ 46,718.00 |
| Diseño de programación    | \$ 5,000.00  |
| Costos variables          | \$ 25,509.30 |
| Total                     | \$ 84,107.30 |

## **Capítulo 4**

## **4.1 Conclusiones y recomendaciones**

### **4.1.1 Conclusiones**

A partir de los resultados obtenidos y considerando los objetivos del proyecto planteados, se presentan las siguientes conclusiones:

- Mediante el análisis dinámico y estático se determinó que el material seleccionado y el dimensionamiento de la plataforma fueron los adecuados para soportar cargas de 4000N a una inclinación máxima de 30°.
- La programación del PLC gestiona los sensores de forma que la plataforma trabaje dentro de un rango seguro, reduciendo los riesgos de accidentes; además el HMI es amigable con el usuario, permitiendo modificar las condiciones de la simulación según lo desee.
- La selección minuciosa de los componentes electrónicos, como sensores, actuadores y el PLC, se realizó asegurando que cada uno cumpliera con los requisitos del proyecto; permitiendo diseñar un sistema electrónico que garantice alimentación, y lectura precisa de señales, contribuyendo a la funcionalidad y seguridad del banco de pruebas.
- La validación a mediante la implementación y el ajuste de un controlador PID, permitió un control preciso y estable de los movimientos de la plataforma Stewart en seis grados de libertad; logrando replicar fielmente las condiciones dinámicas de las costas ecuatorianas.

### **4.1.2 Recomendaciones**

Considerando las limitaciones que tuvieron lugar durante el desarrollo del presente proyecto, se realizan las siguientes recomendaciones:

- A pesar de que la simulación y validación fueron exitosas, se recomienda realizar las pruebas y calibraciones correspondientes antes de su puesta en marcha.
- Se sugiere explorar la implementación de tecnologías más avanzadas o alternativas, como sistemas de control basados en inteligencia artificial o aprendizaje automático, que podrían mejorar aún más la precisión y la adaptabilidad del sistema en diferentes condiciones operativas.
- Aunque el análisis de costos fue realizado minuciosamente, se recomienda revisar periódicamente la fluctuación o variabilidad de los precios, dado que los valores utilizados corresponden principalmente a estimaciones del mercado internacional y no necesariamente reflejan los precios en el mercado ecuatoriano.

## Referencias

- [1] Rafael, «Rafael,» [En línea]. Available: <https://www.rafael.co.il/system/typhoon/>.
- [2] «Alibaba,» [En línea]. Available: [https://spanish.alibaba.com/p-detail/training-60819916526.html?spm=a2700.details.you\\_may\\_like.2.404a7df8QKF5n5](https://spanish.alibaba.com/p-detail/training-60819916526.html?spm=a2700.details.you_may_like.2.404a7df8QKF5n5).
- [3] «Ecuador gasta USD 137 por persona en equipamiento militar». *Primicias*.
- [4] «La guerra interna cuesta 1.020 millones de dólares, según el Ministerio de Finanzas,» *Expreso*, 15 Enero 2024.
- [5] L. Á. Silva, «ResearchGate,» Enero 2005. [En línea]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/39425275\\_Control\\_visual\\_de\\_robots\\_paralelos\\_analisis\\_desarrollo\\_y\\_aplicacion\\_a\\_la\\_plataforma\\_RoboTenis](https://www.researchgate.net/publication/39425275_Control_visual_de_robots_paralelos_analisis_desarrollo_y_aplicacion_a_la_plataforma_RoboTenis).
- [6] J. Martínez González, «Repositorio Digital UPCT,» 7 Octubre 2016. [En línea]. Available: <https://repositorio.upct.es/server/api/core/bitstreams/288aa22d-24d0-4c7c-8903-fb90c986e232/content>.
- [7] D. Silva, J. Garrido y E. Rivero, «mdpi,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.mdpi.com/2075-1702/10/8/711>.
- [8] M. Howard, «LibreTexts Español,» 30 Octubre 2022. [En línea]. Available: [https://espanol.libretexts.org/Fisica/Libro%3A\\_Física\\_introductoria\\_-\\_Construyendo\\_modelos\\_para\\_describir\\_nuestro\\_mundo\\_\(Martin\\_et\\_al.\)](https://espanol.libretexts.org/Fisica/Libro%3A_Física_introductoria_-_Construyendo_modelos_para_describir_nuestro_mundo_(Martin_et_al.)).
- [9] L. Vera San Martín, «Inocar,» 2000. [En línea]. Available: [https://www.inocar.mil.ec/web/phocadownloadpap/actas\\_oceanograficas/acta10/OCE1001\\_4.pdf](https://www.inocar.mil.ec/web/phocadownloadpap/actas_oceanograficas/acta10/OCE1001_4.pdf).

- [10] A. Gómez Lobo, «Diseño de un robot S.G. para un simulador naval,» Tesis de grado Fac. de ingeniería, Programa de Ing. mecánica, Univ. Tec. de Bolívar, Cartagena, 2013.
- [11] G. E. Sevillano Gainza, «PUCP,» Febrero 2014. [En línea]. Available: [https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/5345/SEVILLANO\\_GONZALO\\_DISEÑO\\_MECANICO\\_SIMULADOR\\_MARCHA\\_PLATAFORMA\\_STEWART\\_GOUGH.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/5345/SEVILLANO_GONZALO_DISEÑO_MECANICO_SIMULADOR_MARCHA_PLATAFORMA_STEWART_GOUGH.pdf?sequence=1&isAllowed=y).
- [12] F. Carosio, «Repositorio institucional Séneca,» 2007. [En línea]. Available: <https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/000c1f73-ba7e-45e6-ad90-c74587cbaea6/content>.
- [13] Y. Cai, S. Zheng, W. Liu, Z. Qu y J. Han, «Model Analysis and Modified Control Method of Ship-Mounted Stewart Platforms for Wave Compensation,» *IEEE Access*, vol. 9, p. 10, 8 Enero 2021.
- [14] A. Campos, J. Quintero, R. Saltaren, M. Ferre y R. Aracil, «An Active helideck testbed for floating structures based on a Stewart-Gough platform,» *IEEE Xplore*, 2008.
- [15] «Starry Stories,» 29 1 2022. [En línea]. Available: <https://www.starrystories.com/hexagons-in-nature/#:~:text=Hexagonal%20structures%20are%20also%20mechanically,more%20than%20any%20other%20shape..>
- [16] P. P. Bhaveshkumar y H. P. Rashmiben, «Determination and analysis of stress concentration factor in finite plate with different polygonal discontinuities under uniaxial compression using finite element analysis (FEA),» *Engineering Research Express*, 2024.

- [17] Y. San Martín, M. Giménez y V. Nabat, «Metalmecánica,» 27 Noviembre 2008. [En línea]. Available: <https://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/26569-Maquinas-de-cinematica-paralela-implementacion-industrial-y-futuras-tendencias.html>.
- [18] J. Pradipta, . K. L. Knierim y O. Sawodny, «Semantic Scholar,» 9 Abril 2015. [En línea]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/Force-trajectory-generation-for-the-redundant-in-a-Pradipta-Knierim/1997444ea7622e3e0a1b2b3616fd4aac9c261d5a>.
- [19] [En línea]. Available: [https://www.uco.es/ucci/media/k2/items/cache/853197cadb7f0bf1a498fa7fcc83ce07\\_L.jpg](https://www.uco.es/ucci/media/k2/items/cache/853197cadb7f0bf1a498fa7fcc83ce07_L.jpg).

## **Apéndices**

## Apéndice A

### Ponderación de soluciones

En esta sección, se presenta la evaluación de cada uno de los criterios en las soluciones planteadas; con la finalidad de elegir la mejor solución para el proyecto.

**Tabla A.1**

*Evaluación del criterio: Controlabilidad*

| <b>A &gt; B = C = D</b> |            |            |            |            |            |                    |
|-------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|--------------------|
| <b>Controlabilidad</b>  | Solución A | Solución B | Solución C | Solución D | $\Sigma+1$ | <b>Ponderación</b> |
| Solución A              |            | 1          | 1          | 1          | 4          | 0,400              |
| Solución B              | 0          |            | 0,5        | 0,5        | 2          | 0,200              |
| Solución C              | 0          | 0,5        |            | 0,5        | 2          | 0,200              |
| Solución D              | 0          | 0,5        | 0,5        |            | 2          | 0,200              |
| <b>Suma</b>             |            |            |            |            | 10         | 1,000              |

**Tabla A.2**

*Evaluación del criterio: Bajo Costo*

| <b>A &gt; D &gt; B &gt; C</b> |            |            |            |            |            |                    |
|-------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|--------------------|
| <b>Bajo Costo</b>             | Solución A | Solución B | Solución C | Solución D | $\Sigma+1$ | <b>Ponderación</b> |
| Solución A                    |            | 1          | 1          | 1          | 4          | 0,400              |
| Solución B                    | 0          |            | 1          | 0          | 2          | 0,200              |
| Solución C                    | 0          | 0          |            | 0          | 1          | 0,100              |
| Solución D                    | 0          | 1          | 1          |            | 3          | 0,300              |
| <b>Suma</b>                   |            |            |            |            | 10         | 1,000              |

**Tabla A.3**

*Evaluación del criterio: Potencia*

| <b>B &gt; C = D &gt; A</b> |            |            |            |            |            |                    |
|----------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|--------------------|
| <b>Potencia</b>            | Solución A | Solución B | Solución C | Solución D | $\Sigma+1$ | <b>Ponderación</b> |
| Solución A                 |            | 0          | 0          | 0          | 1          | 0,111              |
| Solución B                 | 1          |            | 1          | 1          | 4          | 0,444              |
| Solución C                 | 1          | 0          |            | 0,5        | 2,5        | 0,278              |
| Solución D                 | 0          | 0          | 0,5        |            | 1,5        | 0,167              |
| <b>Suma</b>                |            |            |            |            | 9          | 1,000              |

**Tabla A.4**

*Evaluación del criterio: Peso*

| <b>D &gt; A &gt; C &gt; B</b> |            |            |            |            |            |                    |
|-------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|--------------------|
| <b>Peso</b>                   | Solución A | Solución B | Solución C | Solución D | $\Sigma+1$ | <b>Ponderación</b> |
| Solución A                    |            | 1          | 1          | 0          | 3          | 0,300              |
| Solución B                    | 0          |            | 0          | 0          | 1          | 0,100              |
| Solución C                    | 0          | 1          |            | 0          | 2          | 0,200              |

|            |   |   |   |             |    |       |
|------------|---|---|---|-------------|----|-------|
| Solución D | 1 | 1 | 1 |             | 4  | 0,400 |
|            |   |   |   | <b>Suma</b> | 10 | 1,000 |

**Tabla A.5**

*Evaluación del criterio: Mantenimiento*

| <b>A = D &gt; B &gt; C</b> |            |            |            |             |            |                    |
|----------------------------|------------|------------|------------|-------------|------------|--------------------|
| <b>Mantenimiento</b>       | Solución A | Solución B | Solución C | Solución D  | $\Sigma+1$ | <b>Ponderación</b> |
| Solución A                 |            | 1          | 1          | 0,5         | 3,5        | 0,350              |
| Solución B                 | 0          |            | 1          | 0           | 2          | 0,200              |
| Solución C                 | 0          | 0          |            | 0           | 1          | 0,100              |
| Solución D                 | 0,5        | 1          | 1          |             | 3,5        | 0,350              |
|                            |            |            |            | <b>Suma</b> | 10         | 1,000              |

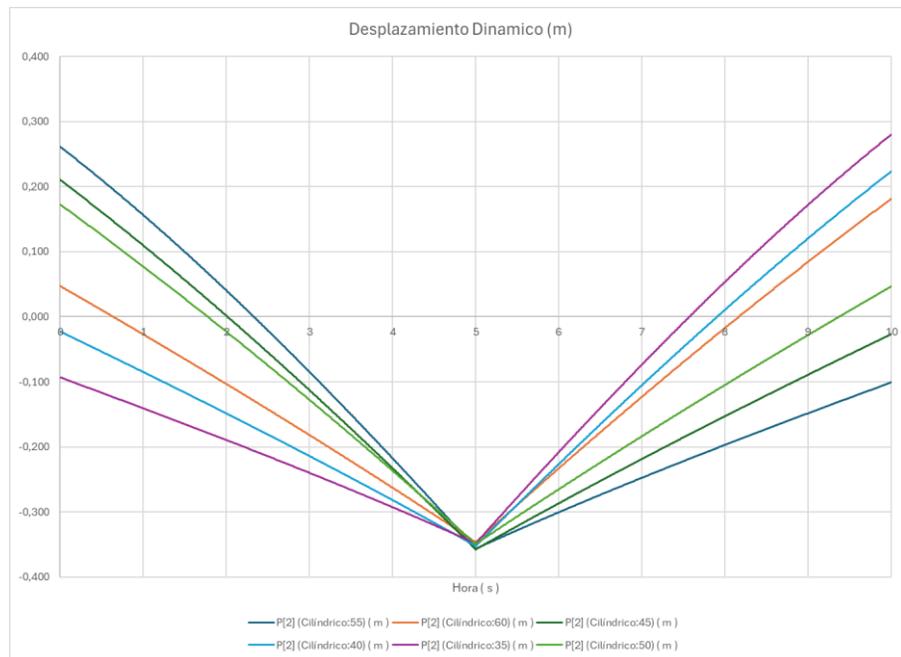
## Apéndice B

### Análisis dinámico

Se realizó un análisis dinámico de la plataforma a fin de determinar las fuerzas y los momentos que actúan sobre la plataforma, así como su velocidad y aceleración; por ello, se colocó un péndulo invertido sobre la plataforma que simulara el movimiento del sistema de armas.

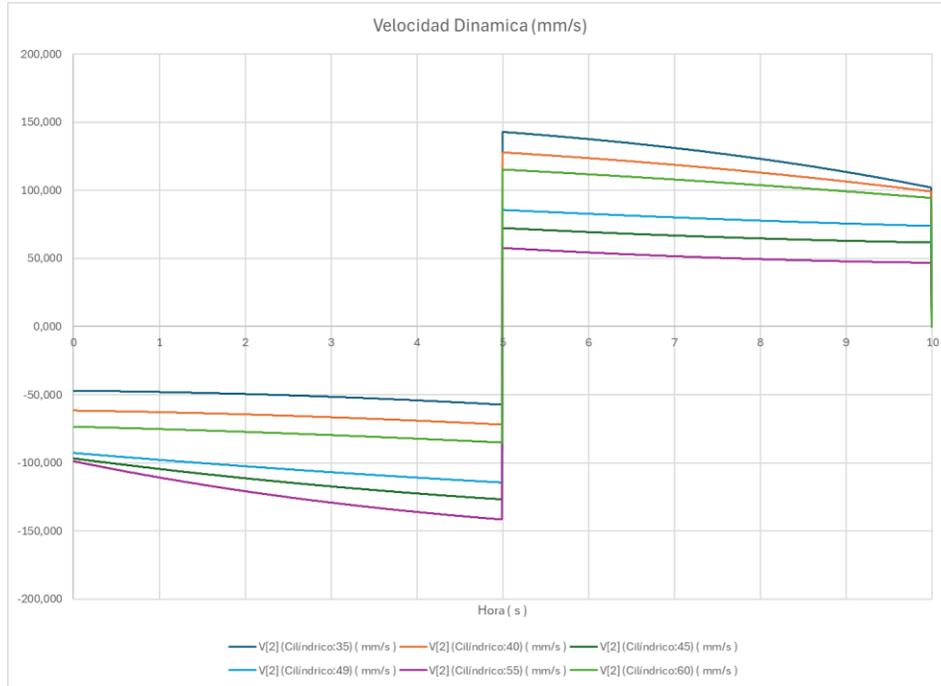
**Figura B.1**

*Desplazamiento de los actuadores*



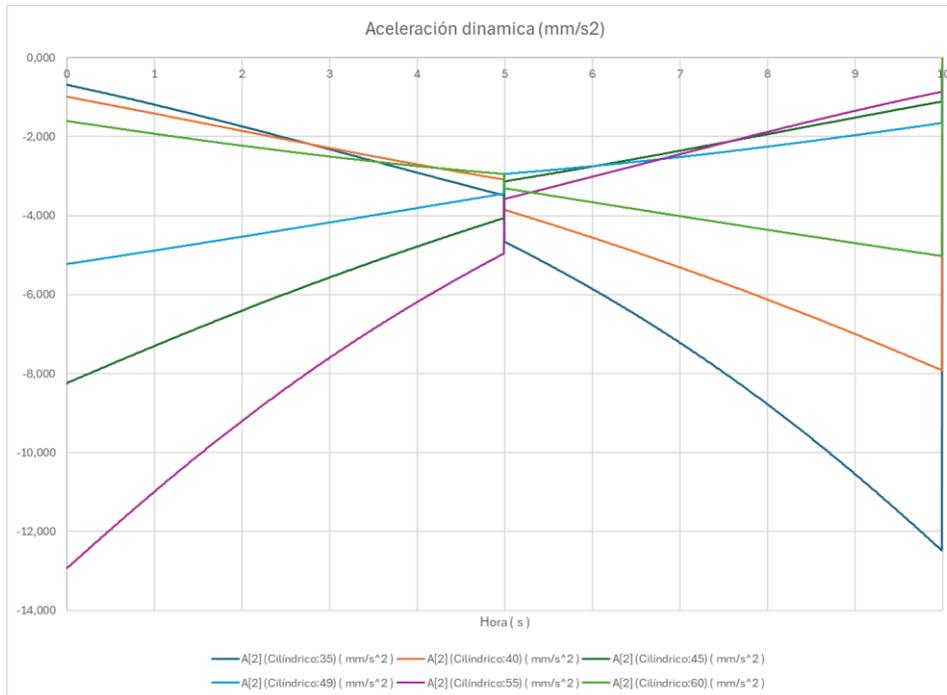
**Figura B.2**

*Velocidad de los actuadores*



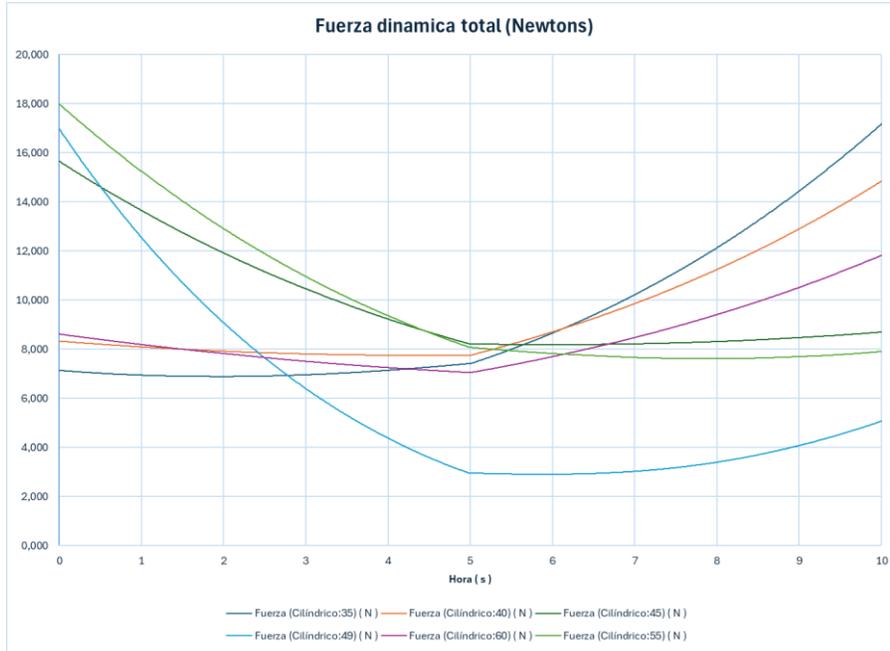
**Figura B.3**

*Aceleración de los actuadores*



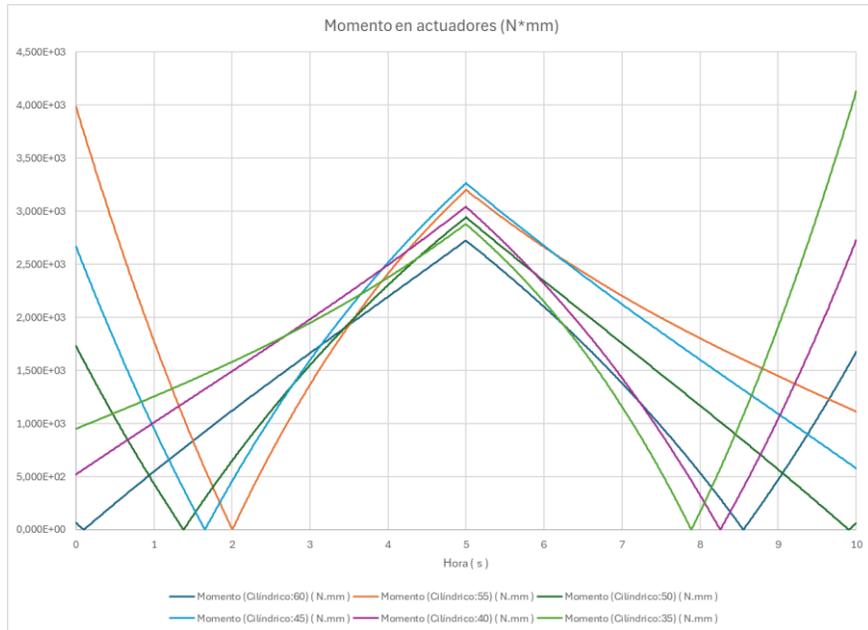
**Figura B.4**

*Fuerza dinámica en los actuadores*



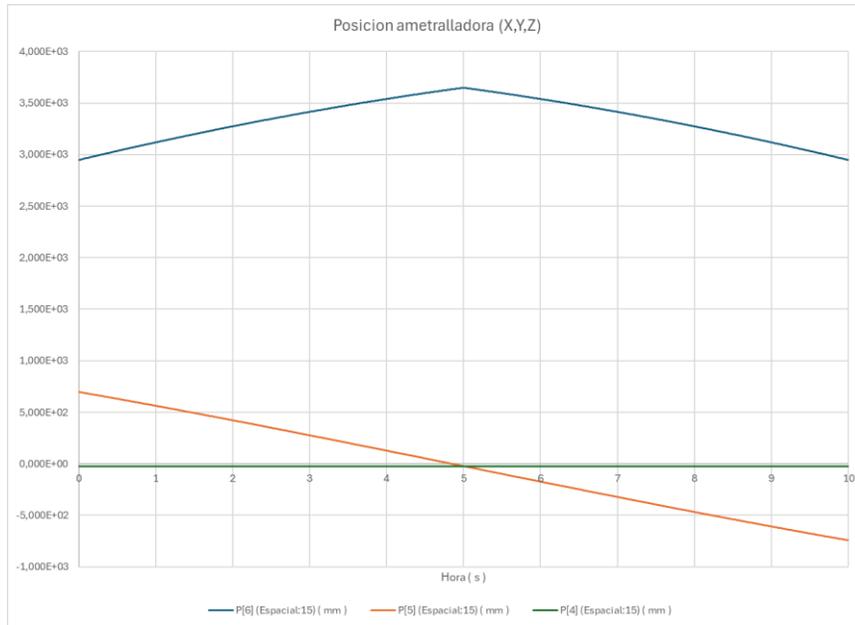
**Figura B.5**

*Momento en los actuadores*



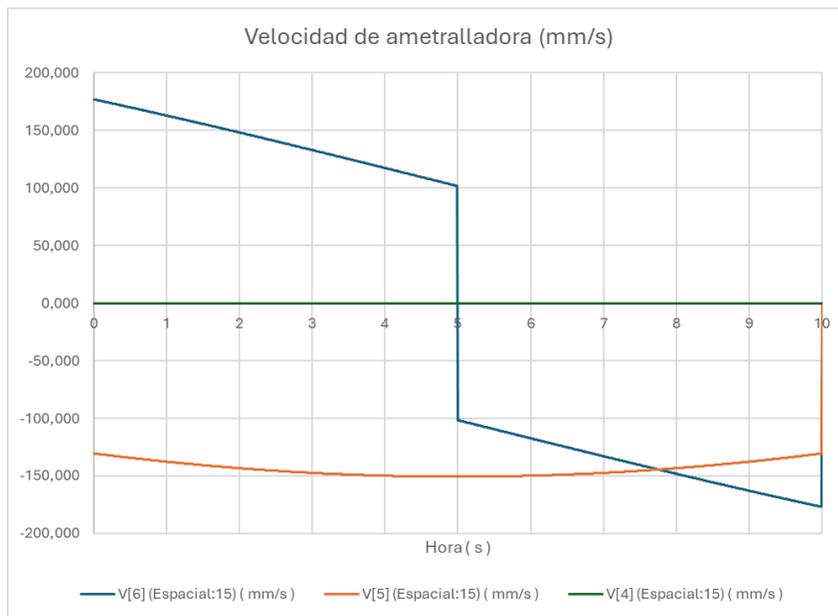
**Figura B.6**

*Posición del sistema de armas*



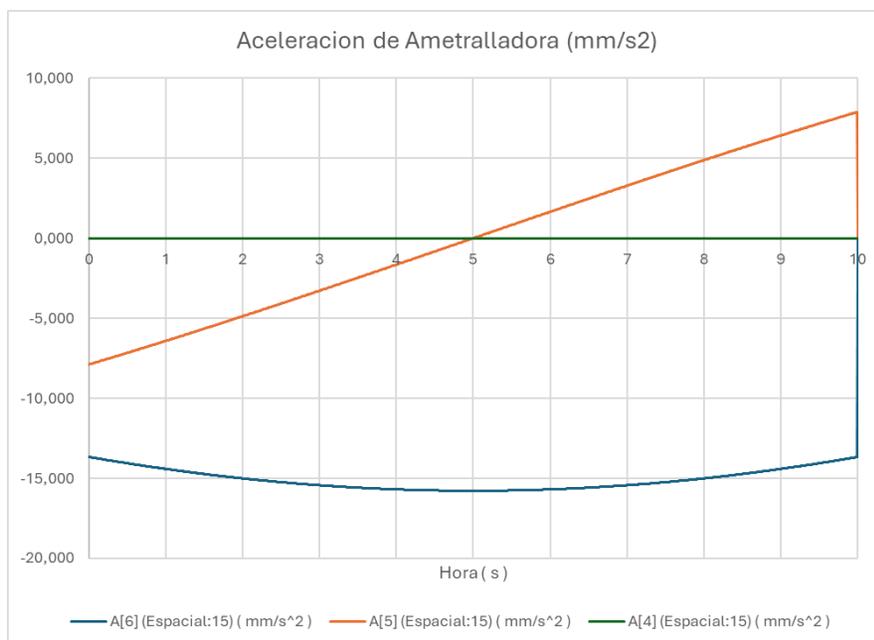
**Figura B.7**

*Velocidad del sistema de armas*



**Figura B.8**

*Aceleración del sistema de armas*



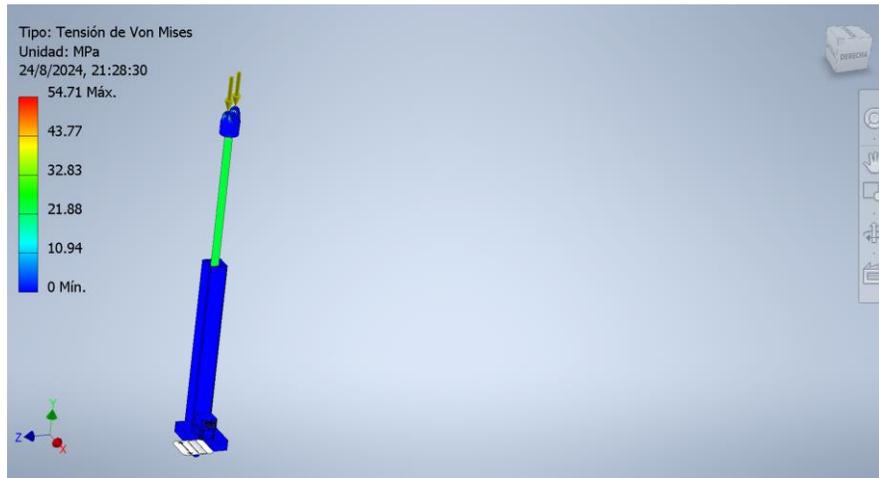
## Apéndice C

### Análisis estático

Con los resultados obtenidos del análisis dinámico, se realizó un análisis estático para seleccionar el material de la plataforma y validar su dimensionamiento.

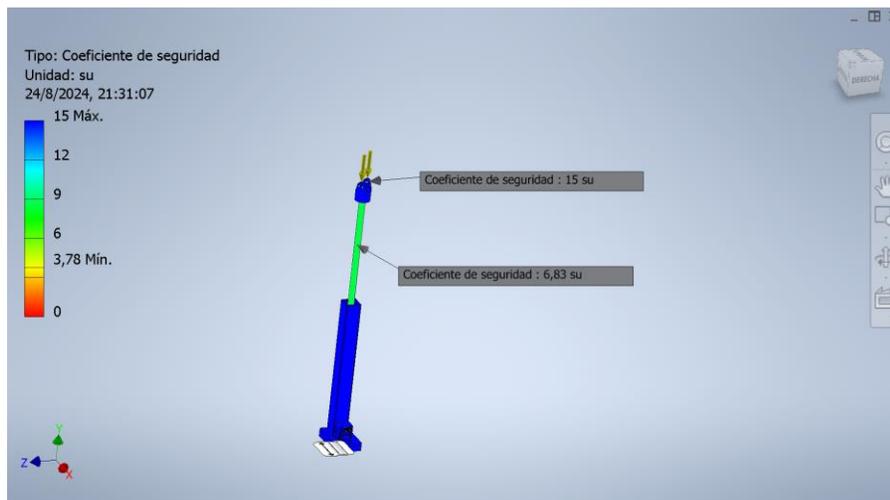
**Figura C.1**

*Actuador extendido - Tensión de Von Mises*



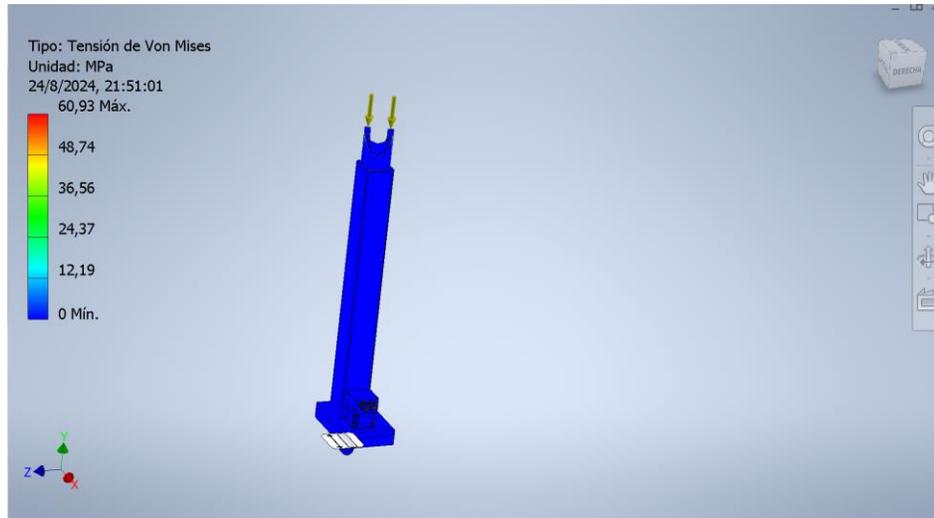
**Figura C.2**

*Actuador extendido – Factor de seguridad*



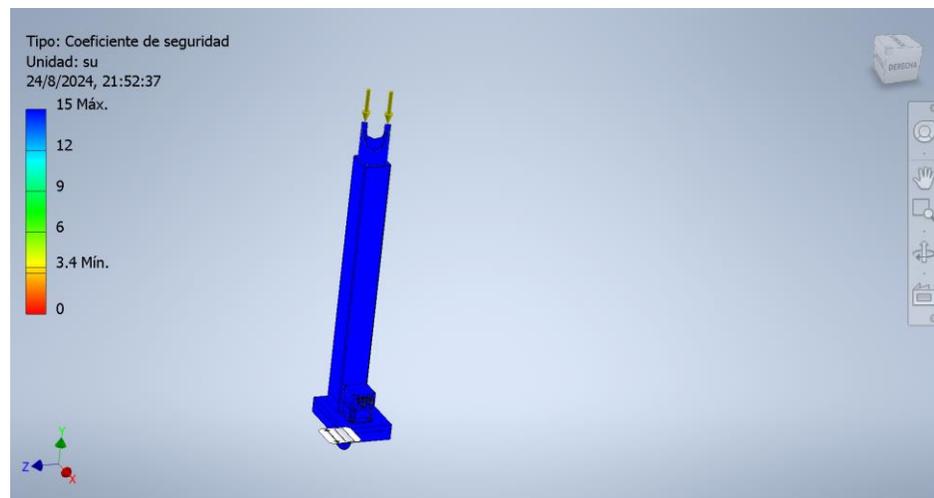
**Figura C.3**

*Actuador retraído - Tensión de Von Mises*



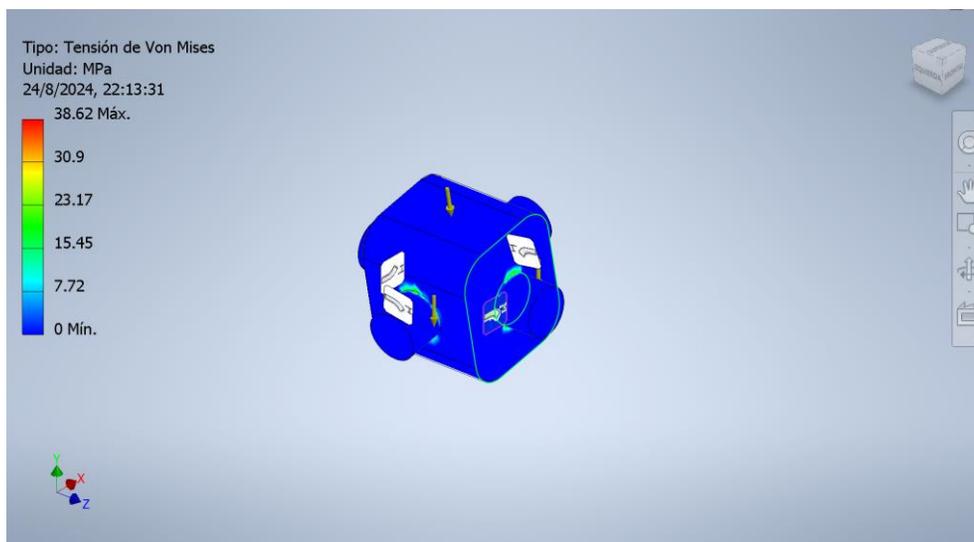
**Figura C.4**

*Actuador retraído - Factor de seguridad*



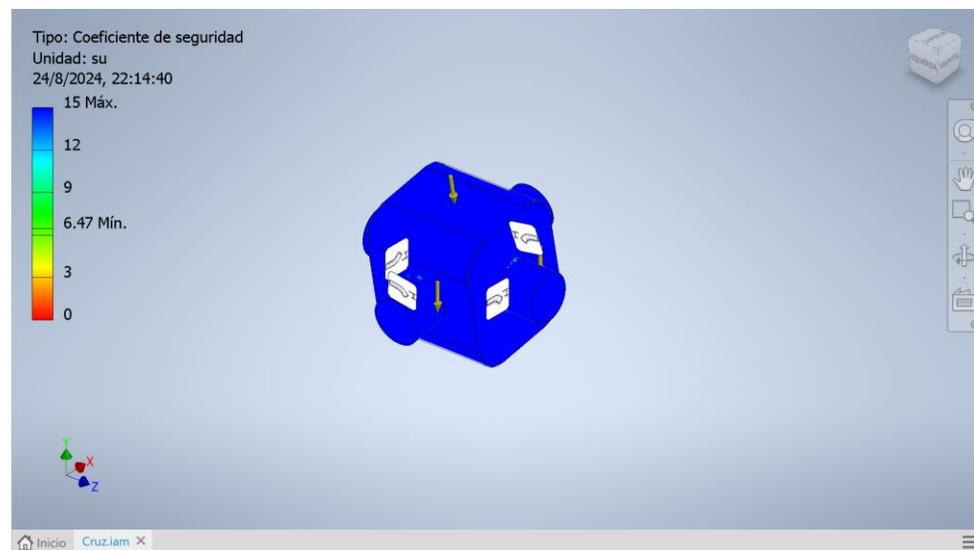
**Figura C.5**

*Cruceta del cardán - Tensión de Von Mises*



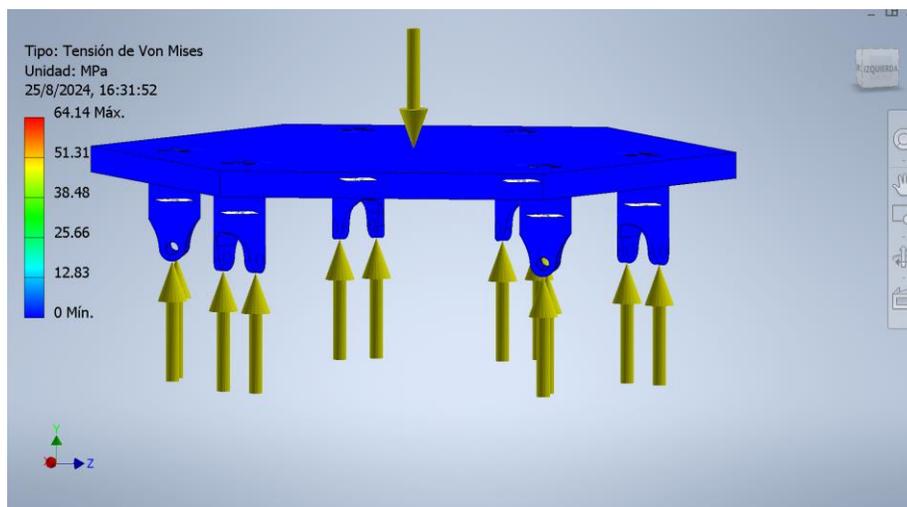
**Figura C.6**

*Cruceta del cardán - Factor de seguridad*



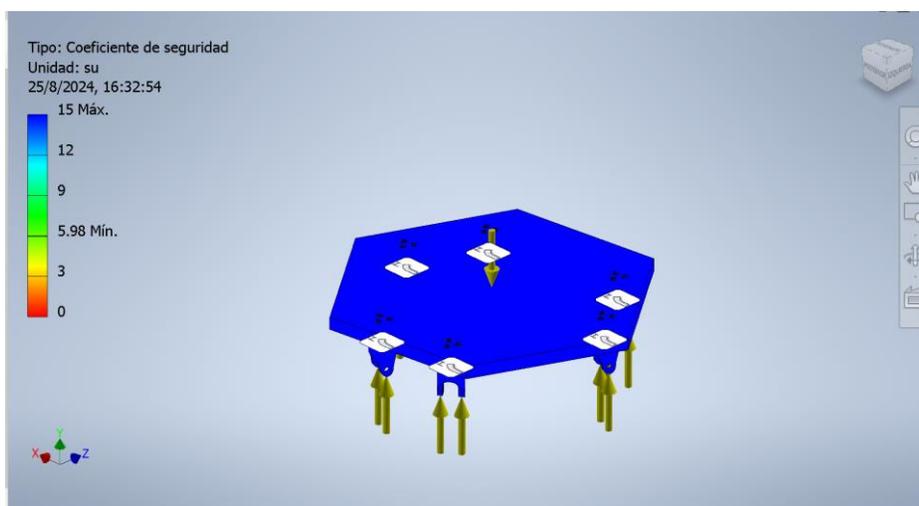
**Figura C.7**

*Base móvil - Tensión de Von Mises*



**Figura C.8**

*Base móvil - Factor de seguridad*



## Apéndice D

### Programación PLC

En este apéndice se presenta la programación realiza para el PLC.

Figura D.1

Variables de entrada - PLC

| Entradas |        |               |           |                          |                                     |                                     |                                     |                                 |  |
|----------|--------|---------------|-----------|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|--|
|          | Nombre | Tipo de datos | Dirección | Rema...                  | Acces...                            | Escrib...                           | Visibl...                           | Comentario                      |  |
| 1        | PS1    | Bool          | %I0.0     | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Actuador 1 en posición segura   |  |
| 2        | PS2    | Bool          | %I0.1     | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Actuador 2 en posición segura   |  |
| 3        | PS3    | Bool          | %I0.2     | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Actuador 3 en posición segura   |  |
| 4        | PS4    | Bool          | %I0.3     | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Actuador 4 en posición segura   |  |
| 5        | PS5    | Bool          | %I0.5     | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Actuador 5 en posición segura   |  |
| 6        | PS6    | Bool          | %I0.6     | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Actuador 6 en posición segura   |  |
| 7        | PI1    | Bool          | %I0.7     | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Actuador 1 totalmente retraído  |  |
| 8        | PI2    | Bool          | %I1.0     | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Actuador 2 totalmente retraído  |  |
| 9        | PI3    | Bool          | %I1.1     | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Actuador 3 totalmente retraído  |  |
| 10       | PI4    | Bool          | %I1.2     | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Actuador 4 totalmente retraído  |  |
| 11       | PI5    | Bool          | %I1.3     | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Actuador 5 totalmente retraído  |  |
| 12       | PI6    | Bool          | %I1.4     | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Actuador 6 totalmente retraído  |  |
| 13       | PF1    | Bool          | %I1.5     | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Actuador 1 totalmente extendido |  |
| 14       | PF2    | Bool          | %I1.6     | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Actuador 2 totalmente extendido |  |
| 15       | PF3    | Bool          | %I1.7     | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Actuador 3 totalmente extendido |  |
| 16       | PF4    | Bool          | %I2.0     | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Actuador 4 totalmente extendido |  |
| 17       | PF5    | Bool          | %I2.1     | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Actuador 5 totalmente extendido |  |
| 18       | PF6    | Bool          | %I2.2     | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Actuador 6 totalmente extendido |  |

Figura D.2

Variables de entrada - HMI

| Entradas |            |               |           |                          |                                     |                                     |                                     |                                 |  |
|----------|------------|---------------|-----------|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|--|
|          | Nombre     | Tipo de datos | Dirección | Rema...                  | Acces...                            | Escrib...                           | Visibl...                           | Comentario                      |  |
| 19       | Btn_Stop   | Bool          | %M0.0     | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Botón de emergencia presionado  |  |
| 20       | Btn_Marcha | Bool          | %M0.1     | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Botón de marcha presionado      |  |
| 21       | Btn_RX     | Bool          | %M0.4     | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Rotación en X                   |  |
| 22       | Btn_RY     | Bool          | %M0.5     | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Rotación en Y                   |  |
| 23       | Btn_RZ     | Bool          | %M0.6     | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Rotación en Z                   |  |
| 24       | Tiempo     | Time          | %MD4      | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Tiempo de simulación            |  |
| 25       | Frecuencia | Int           | %MW8      | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Frecuencia de simulación        |  |
| 26       | Btn_MT     | Bool          | %M0.2     | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Modo de simulación traslacional |  |
| 27       | Btn_MR     | Bool          | %M0.3     | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Modo de simulación rotacional   |  |
| 28       | Btn_TX     | Bool          | %M0.7     | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Traslación en X                 |  |
| 29       | Btn_TY     | Bool          | %M1.0     | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Traslación en Y                 |  |
| 30       | Btn_TZ     | Bool          | %M1.2     | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Traslación en Z                 |  |
| 31       | Amplitud   | Int           | %MW10     | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Amplitud de la simulación       |  |

Figura D.3

Variables de estados

| Estados |        |               |           |                          |                                     |                                     |                                     |   |  |
|---------|--------|---------------|-----------|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---|--|
|         | Nombre | Tipo de datos | Dirección | Rema...                  | Acces...                            | Escrib...                           | Visibl...                           | Comentario                                |  |
| 1       | E0     | Bool          | %M1.3     | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Botón parada de emergencia presionado     |  |
| 2       | E1     | Bool          | %M1.4     | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Plataforma en posición segura             |  |
| 3       | E2     | Bool          | %M1.5     | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Modo rotacional seleccionado              |  |
| 4       | E3     | Bool          | %M1.6     | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Modo traslacional seleccionado            |  |
| 5       | E4     | Bool          | %M1.7     | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Eje de rotación seleccionado              |  |
| 6       | E5     | Bool          | %M2.0     | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Eje de traslación seleccionado            |  |
| 7       | E6     | Bool          | %M2.1     | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Parámetros de simulación ingresados corr. |  |
| 8       | E7     | Bool          | %M2.2     | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Botón de marcha presionado                |  |
| 9       | E8     | Bool          | %M2.3     | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Plataforma alcanzó el límite inferior     |  |
| 10      | E9     | Bool          | %M2.4     | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Plataforma alcanzó el límite superior     |  |

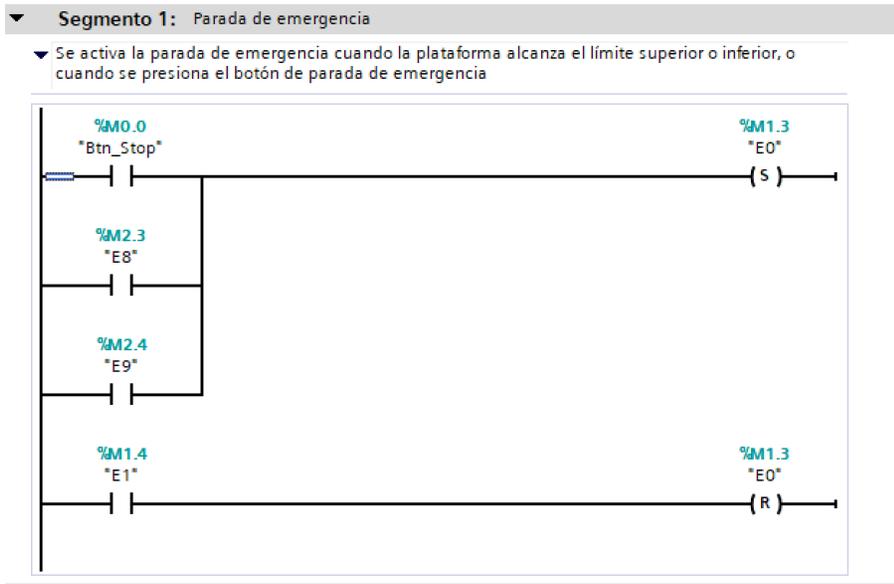
**Figura D.4**

*Variables de salida*

| Salidas |        |               |           |                          |                                     |                                     |                                     |                                     |
|---------|--------|---------------|-----------|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
|         | Nombre | Tipo de datos | Dirección | Rema...                  | Acces...                            | Escrib...                           | Visibl...                           | Comentario                          |
| 1       | H1     | Bool          | %Q0.0     | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Led para plataforma en zona segura  |
| 2       | H2     | Bool          | %Q0.1     | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Led para plataforma en zona crítica |
| 3       | H3     | Bool          | %Q0.2     | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Led para plataforma en movimiento   |
| 4       | PM     | Bool          | %Q0.3     | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Mover plataforma a posición segura  |

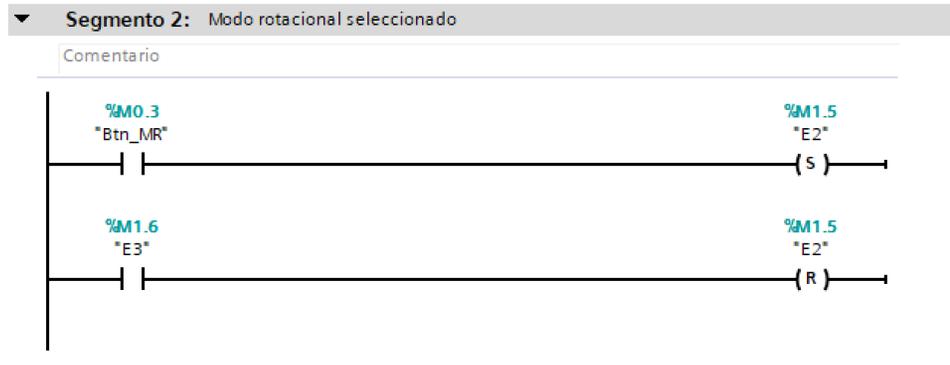
**Figura D.5**

*Botón de parada de emergencia*



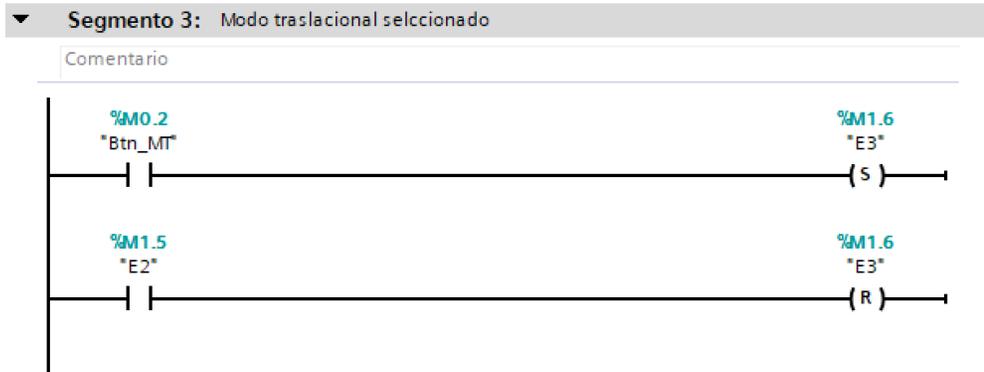
**Figura D.6**

*Modo de simulación rotacional*



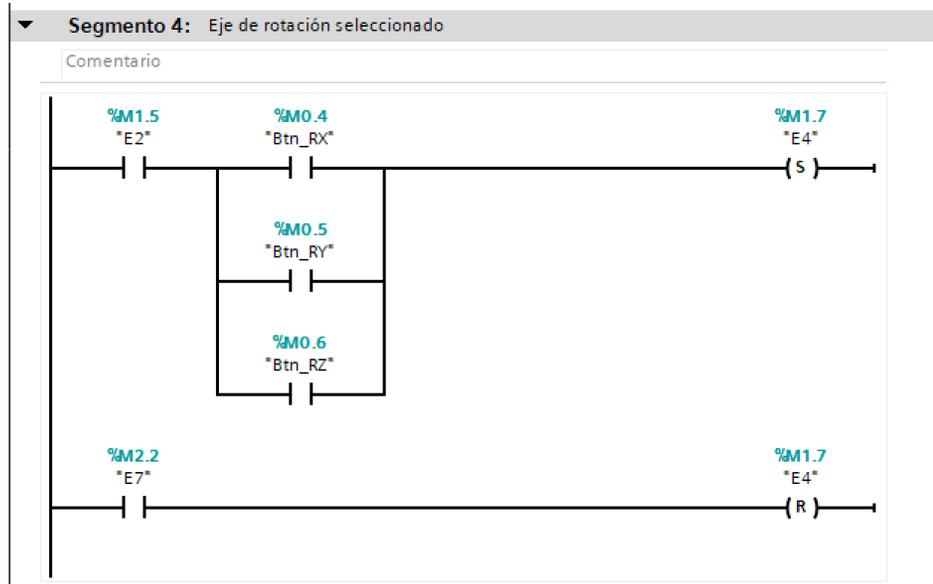
**Figura D.7**

*Modo de simulación traslacional*

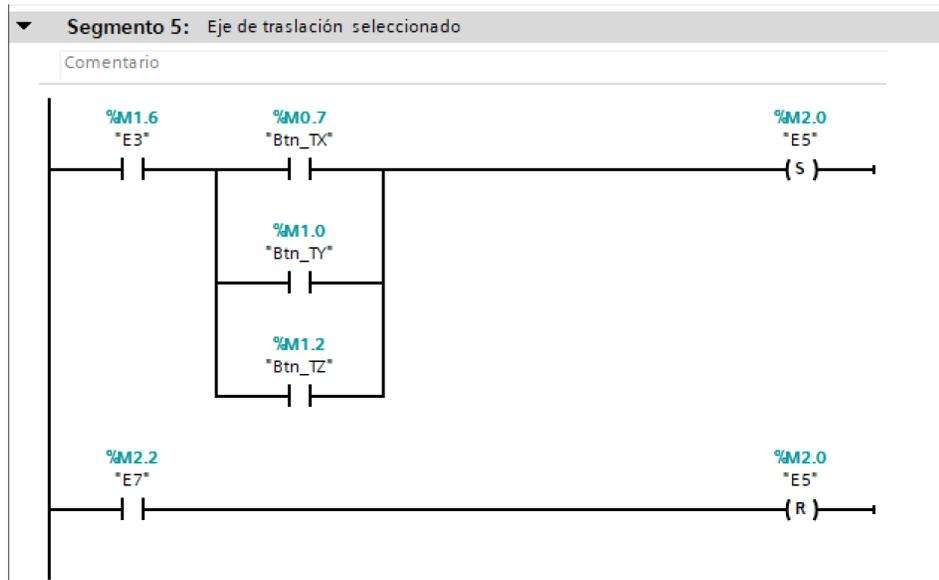


**Figura D.8**

*Selección del eje rotación*



**Figura D.9**  
*Selección del eje de traslación*



**Figura D.10**  
*Validación de los parámetros de simulación*

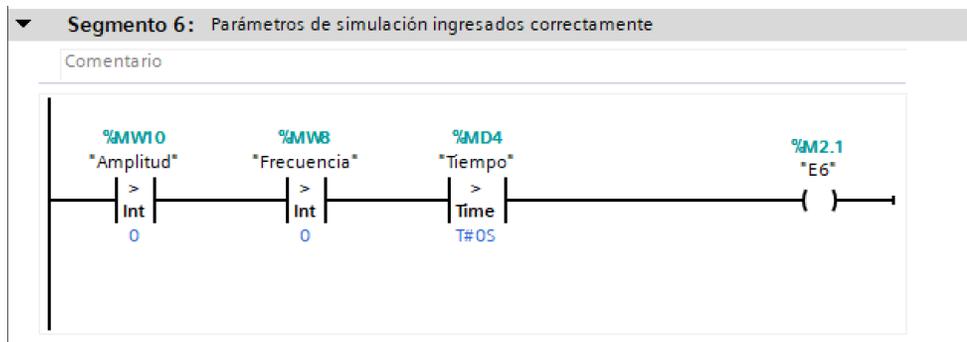


Figura D.11

Inicio de la simulación

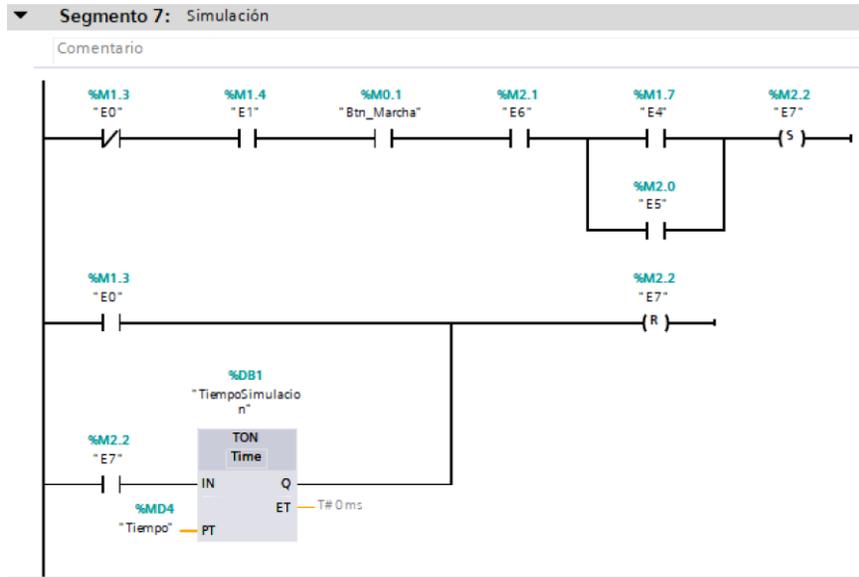
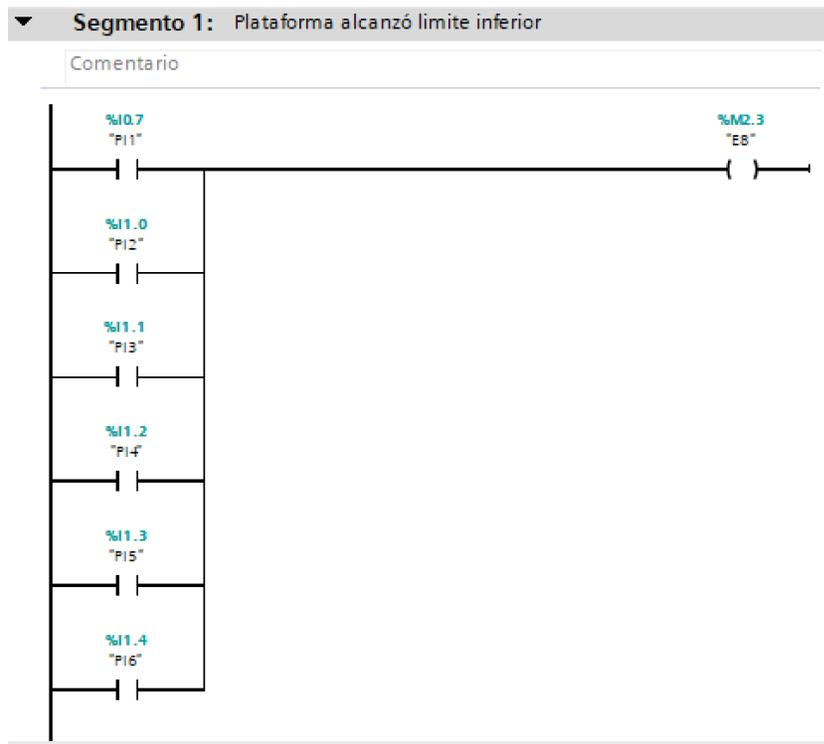


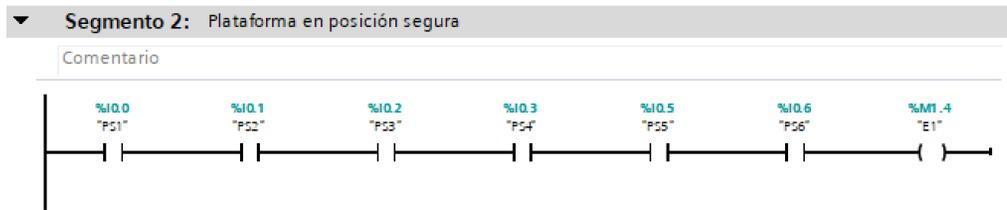
Figura D.12

Sensores de límite inferior



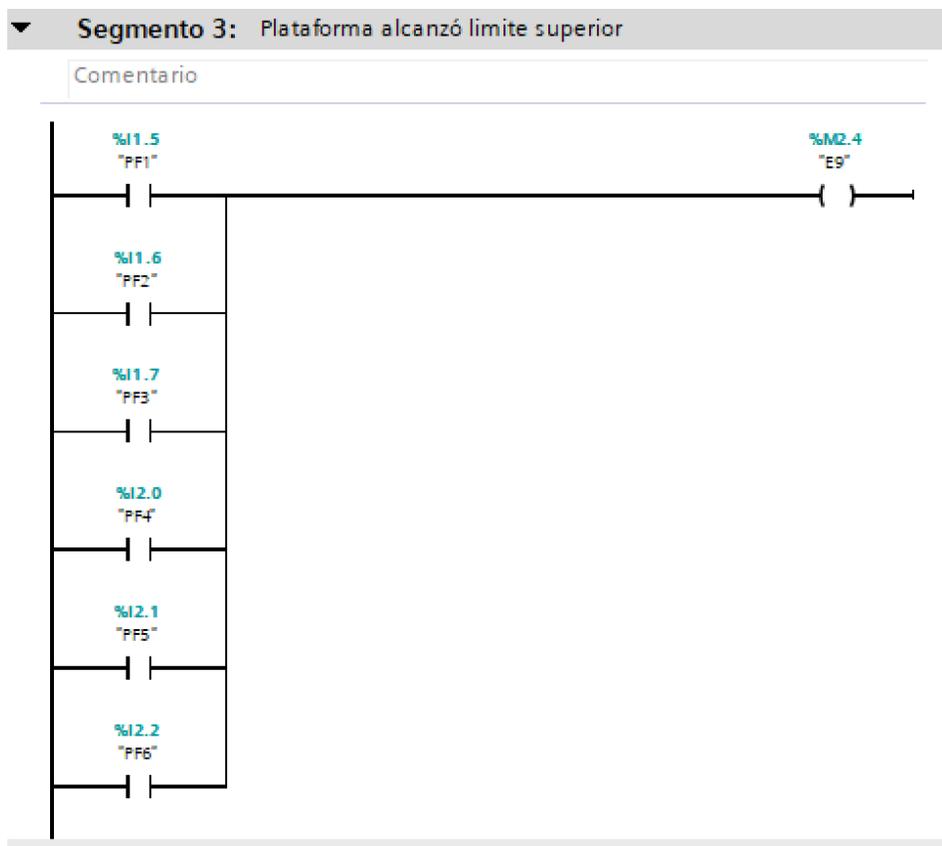
**Figura D.13**

*Sensores de zona segura*



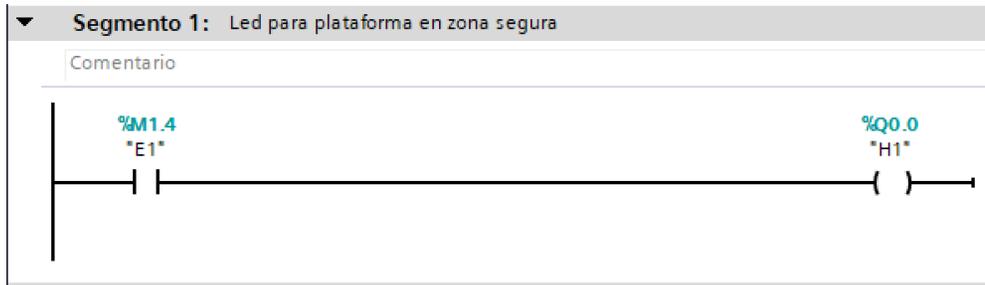
**Figura D.14**

*Sensores de límite superior*



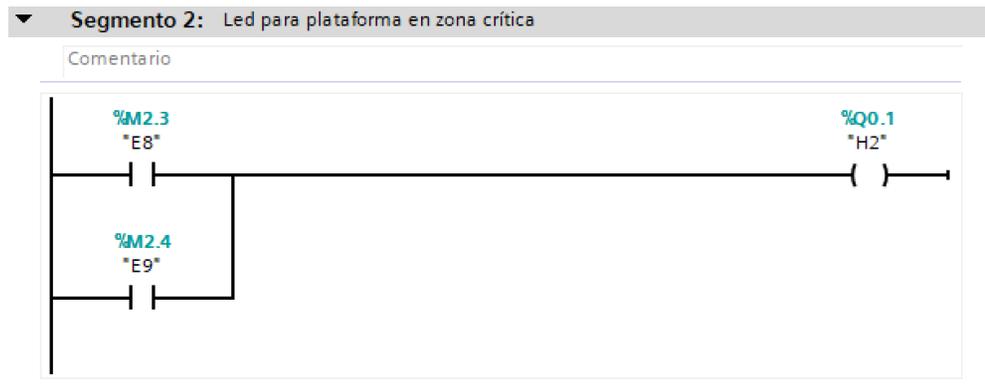
**Figura D.15**

*Salida para plataforma en zona segura*



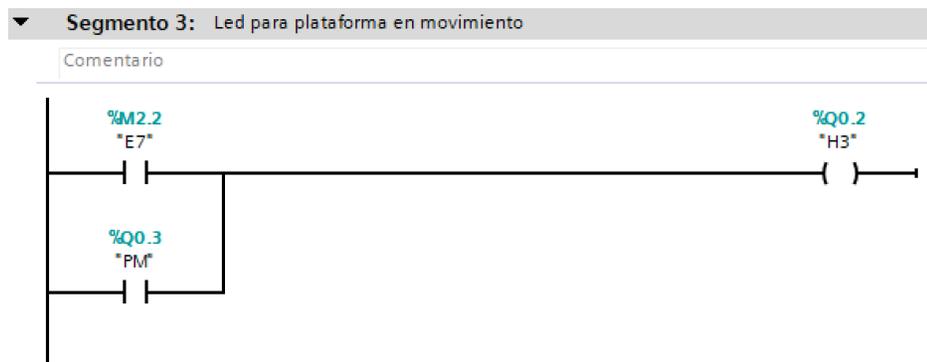
**Figura D.16**

*Salida para plataforma en zona crítica*



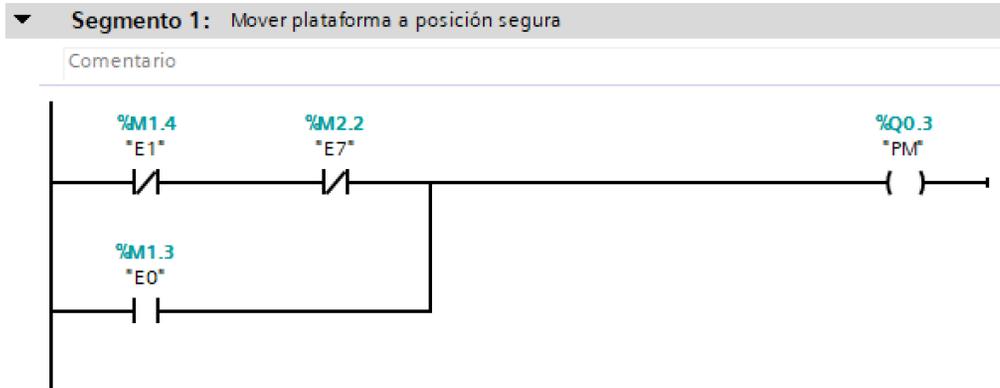
**Figura D.17**

*Salida para plataforma en movimiento*



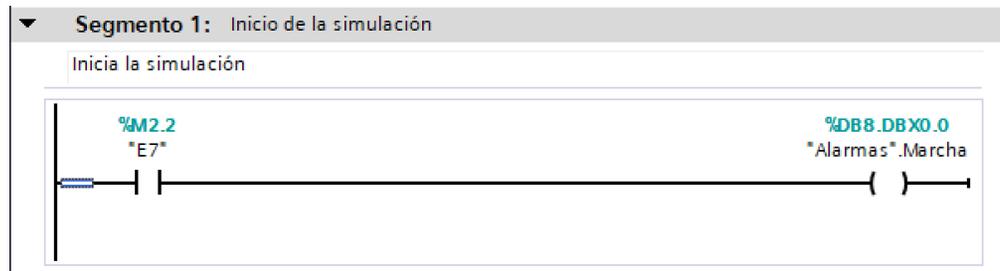
**Figura D.18**

*Señal de salida para mover la plataforma a una posición segura*



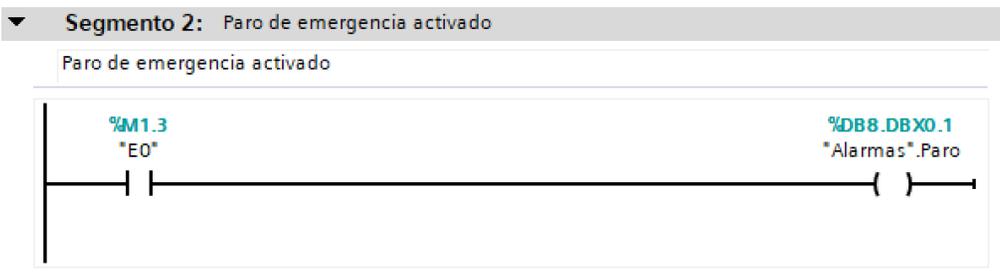
**Figura D.19**

*Alarmas - Inicio de la simulación*



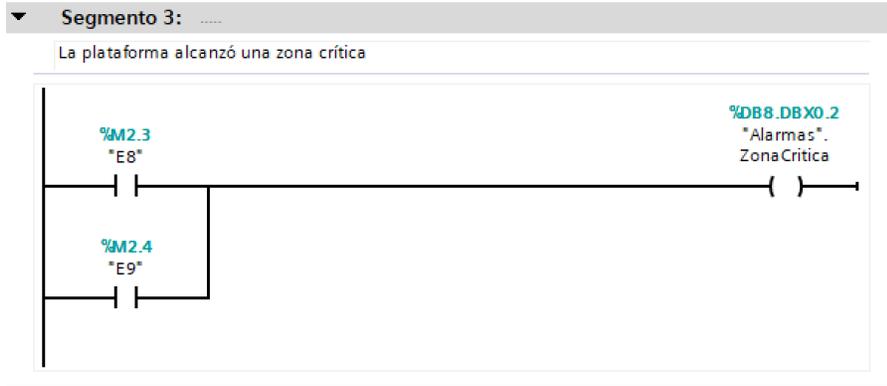
**Figura D.20**

*Alarmas - Parada de emergencia*



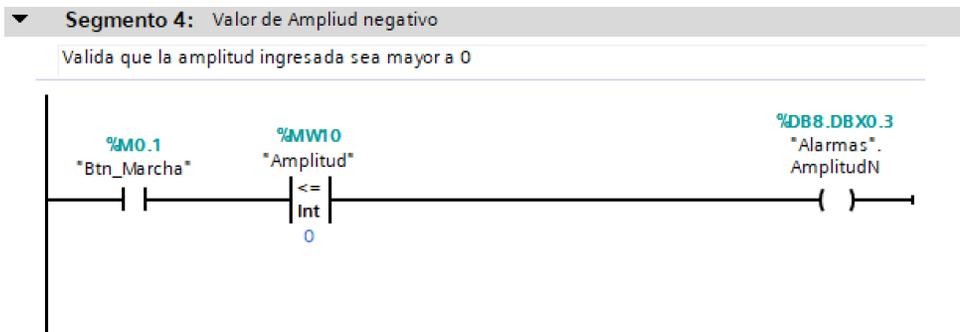
**Figura D.21**

*Alarmas - Plataforma en zona crítica*



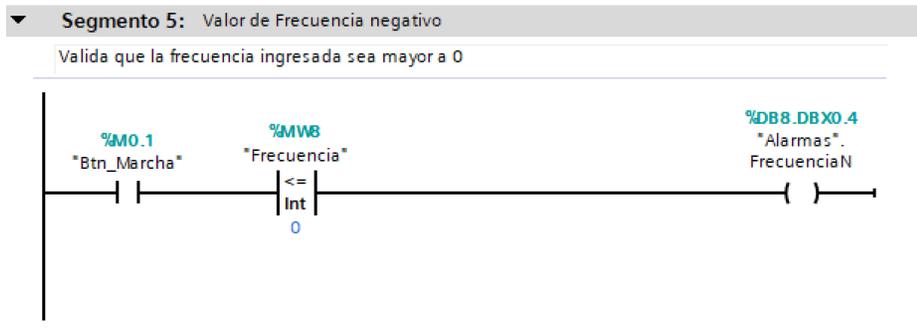
**Figura D.22**

*Alarmas - Valor de amplitud inválido*



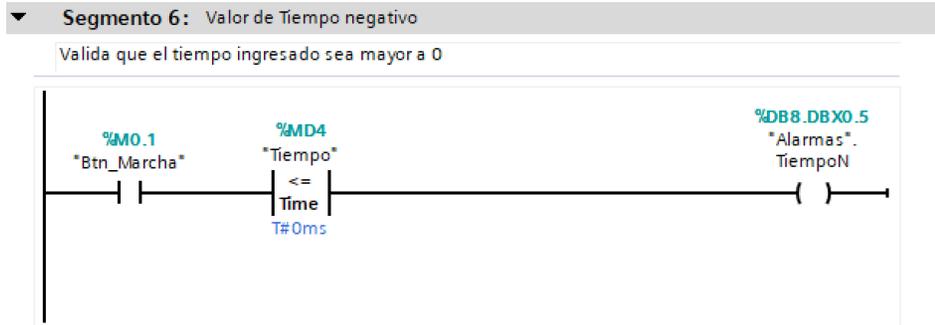
**Figura D.23**

*Alarmas - Valor de frecuencia inválido*



**Figura D.24**

*Alarmas - Valor del tiempo inválido*



**Figura D.25**

*Variables HMI*

| Variables HMI  |                             |               |                |                |              |           |  |
|----------------|-----------------------------|---------------|----------------|----------------|--------------|-----------|--|
| Nombre         | Tabla de variables          | Tipo de datos | Conexión       | Nombre del PLC | Variable PLC | Dirección |  |
| AmplitudHMI    | Tabla de variables estándar | Int           | HMI_Conexión_1 | PLC_1          | Amplitud     |           |  |
| Btn_MR         | Tabla de variables estándar | Bool          | HMI_Conexión_1 | PLC_1          | Btn_MR       |           |  |
| Btn_MT         | Tabla de variables estándar | Bool          | HMI_Conexión_1 | PLC_1          | Btn_MT       |           |  |
| Marcha         | Tabla de variables estándar | Bool          | HMI_Conexión_1 | PLC_1          | Btn_Marcha   |           |  |
| RX             | Tabla de variables estándar | Bool          | HMI_Conexión_1 | PLC_1          | Btn_RX       |           |  |
| RY             | Tabla de variables estándar | Bool          | HMI_Conexión_1 | PLC_1          | Btn_RY       |           |  |
| RZ             | Tabla de variables estándar | Bool          | HMI_Conexión_1 | PLC_1          | Btn_RZ       |           |  |
| Paro           | Tabla de variables estándar | Bool          | HMI_Conexión_1 | PLC_1          | Btn_Stop     |           |  |
| TX             | Tabla de variables estándar | Bool          | HMI_Conexión_1 | PLC_1          | Btn_TX       |           |  |
| TY             | Tabla de variables estándar | Bool          | HMI_Conexión_1 | PLC_1          | Btn_TY       |           |  |
| TZ             | Tabla de variables estándar | Bool          | HMI_Conexión_1 | PLC_1          | Btn_TZ       |           |  |
| Frecuencia     | Tabla de variables estándar | Int           | HMI_Conexión_1 | PLC_1          | Frecuencia   |           |  |
| ZonaSegura     | Tabla de variables estándar | Bool          | HMI_Conexión_1 | PLC_1          | H1           |           |  |
| ZonaCritica    | Tabla de variables estándar | Bool          | HMI_Conexión_1 | PLC_1          | H2           |           |  |
| PlataformaMove | Tabla de variables estándar | Bool          | HMI_Conexión_1 | PLC_1          | H3           |           |  |
| Tiempo         | Tabla de variables estándar | Time          | HMI_Conexión_1 | PLC_1          | Tiempo       |           |  |

**Figura D.26**

*Alarmas - Variables HMI*

| Variables HMI          |                             |               |                     |                |               |             |  |
|------------------------|-----------------------------|---------------|---------------------|----------------|---------------|-------------|--|
| Nombre                 | Tabla de variables          | Tipo de datos | Conexión            | Nombre del PLC | Variable PLC  | Dirección   |  |
| Número_imagen_variable | Tabla de variables estándar | UInt          | <Variable intern... |                | <No definido> |             |  |
| FNegativo              | Tabla de variables estándar | Bool          | HMI_Conexión_1      | PLC_1          | <No definido> | %DB8.DBX0.4 |  |
| ANegativo              | Tabla de variables estándar | Bool          | HMI_Conexión_1      | PLC_1          | <No definido> | %DB8.DBX0.3 |  |
| FueraZona              | Tabla de variables estándar | Bool          | HMI_Conexión_1      | PLC_1          | <No definido> | %DB8.DBX0.2 |  |
| Paro_Proceso           | Tabla de variables estándar | Bool          | HMI_Conexión_1      | PLC_1          | <No definido> | %DB8.DBX0.1 |  |
| Inicio_Proceso         | Tabla de variables estándar | Bool          | HMI_Conexión_1      | PLC_1          | <No definido> | %DB8.DBX0.0 |  |
| TNegativo              | Tabla de variables estándar | Bool          | HMI_Conexión_1      | PLC_1          | <No definido> | %DB8.DBX0.5 |  |
| Alarmas                | Tabla de variables estándar | UInt          | HMI_Conexión_1      | PLC_1          | <No definido> | %DB8.DBW0   |  |

Figura D.27

HMI - Pantalla principal



Figura D.28

HMI - Modos de simulación

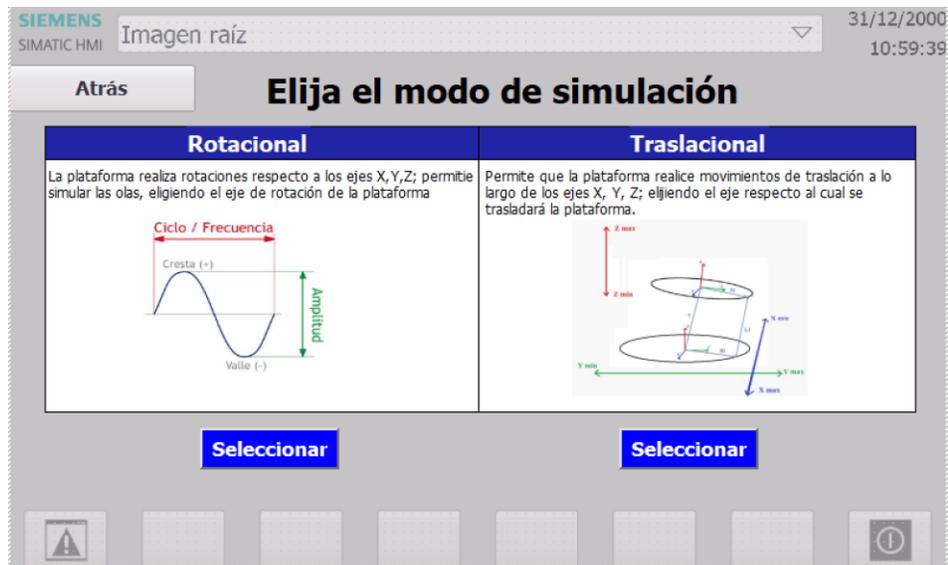


Figura D.29

HMI - Modo rotacional



Figura D.30

HMI - Modo traslacional

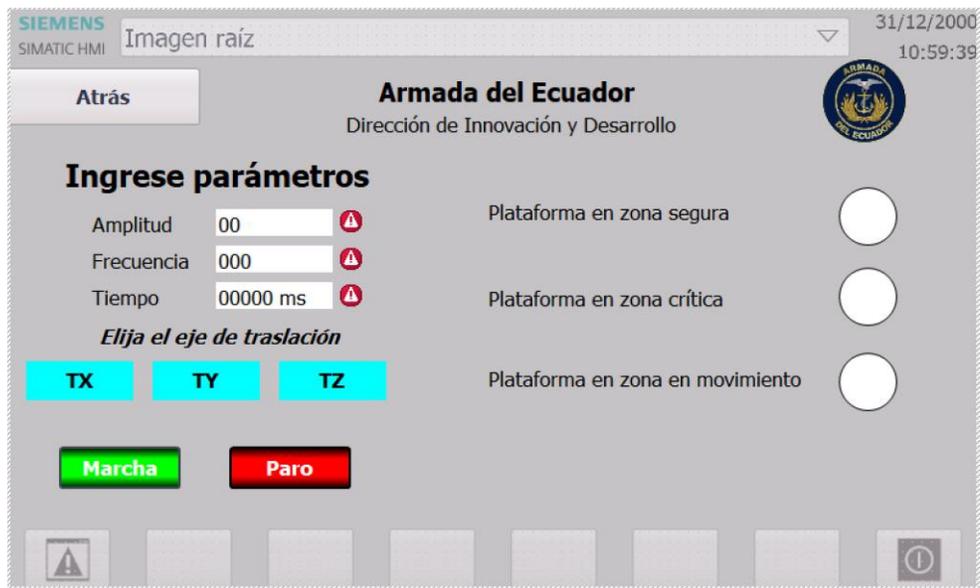


Figura D.31

HMI - Alarmas

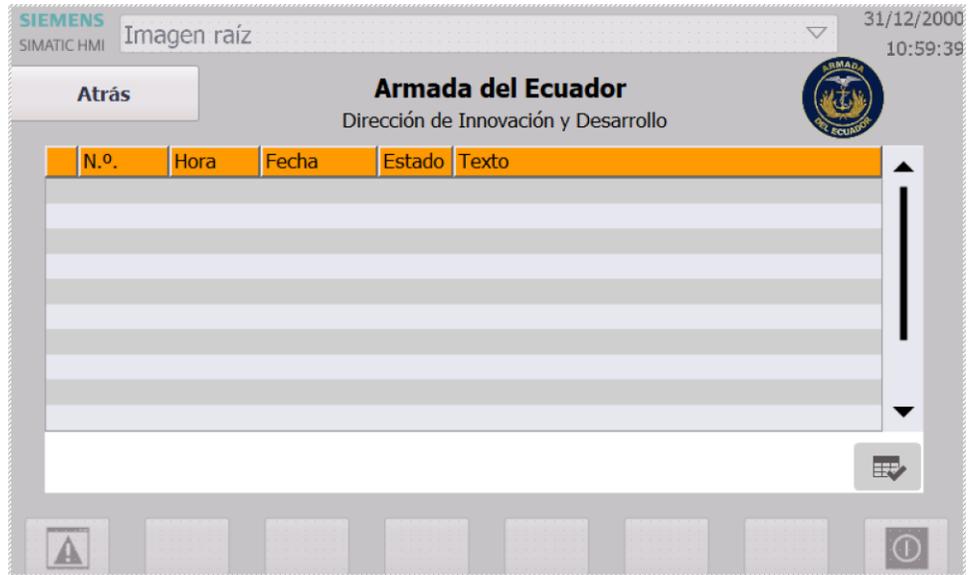
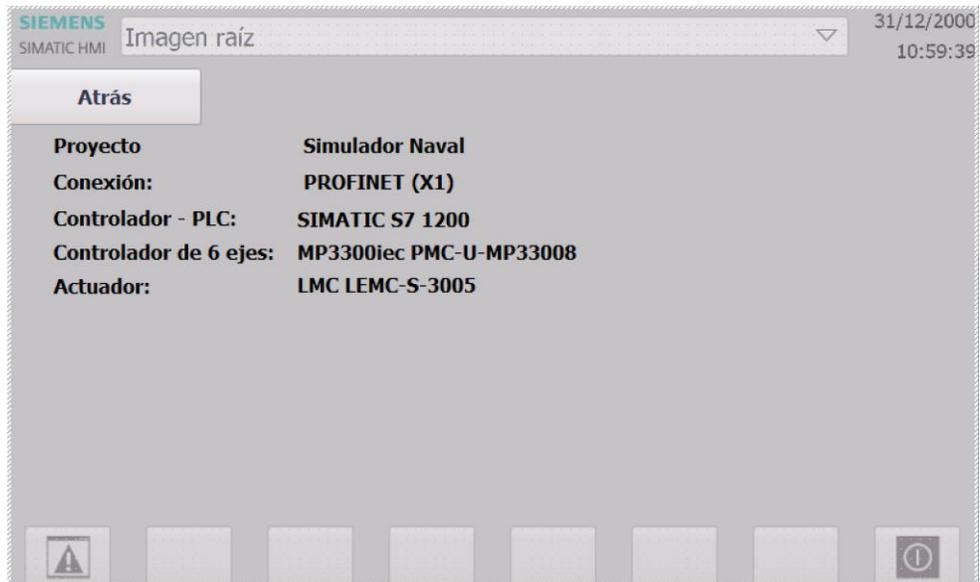


Figura D.32

HMI - Descripción del proyecto



## Apéndice E

### Cinemática Inversa

En este apéndice se detalla el modelo matemático desarrollado en MATLAB.

```
function Li = InverseKinematic(T, grados)
% Función para calcular las longitudes de los actuadores en una plataforma
Stewart
% basada en la cinemática inversa.
% T: Vector de traslación [Tx, Ty, Tz]
% grados: Vector de ángulos de rotación [alfa, beta, gamma] en grados
% Parámetros (mm)
ds = 921.605; % Diámetro base superior
di = 1593.751; % Diámetro base inferior
rp = ds / 2; % Radio base superior
rb = di / 2; % Radio base inferior
% Ángulos de la base móvil y base fija
thetap = deg2rad(80); % Convertir a radianes
thetab = deg2rad(80);
% Coordenadas de la base MOVIL superior
alphai = zeros(1, 6);
for i = 1:6
if mod(i, 2) == 0
alphai(i) = (i - 1) * thetap;
else
alphai(i) = (i - 1) * thetap + (thetap / 2);
end
end
A = zeros(6, 3);
for i = 1:6
A(i, :) = [rp * cos(alphai(i)), rp * sin(alphai(i)), 0];
end
% Coordenadas de la BASE FIJA
ui = zeros(1, 6);
for i = 1:6
if mod(i, 2) == 0
ui(i) = (i - 1) * thetab;
else
ui(i) = (i - 1) * thetab + (thetab / 2);
end
end
B = zeros(6, 3);
for i = 1:6
B(i, :) = [rb * cos(ui(i)), rb * sin(ui(i)), 0];
end
% Matriz de rotación
alpha = deg2rad(grados(1));
```

```

beta = deg2rad(grados(2));
gamma = deg2rad(grados(3));
RX = [
1, 0, 0;
0, cos(alpha), -sin(alpha);
0, sin(alpha), cos(alpha)
];
RY = [
cos(beta), 0, sin(beta);
0, 1, 0;
-sin(beta), 0, cos(beta)
];
RZ = [
cos(gamma), -sin(gamma), 0;
sin(gamma), cos(gamma), 0;
0, 0, 1
];
% La matriz de rotación correcta es RZ * RY * RX
rotacion = RZ * RY * RX;
% Longitudes de los actuadores
Li = zeros(1, 6);
for i = 1:6
% T es la traslación, rotacion * A(i,:)' es la posición transformada
% B(i,:)' es la posición en la base fija
Li(i) = norm(T' + rotacion * A(i, :) - B(i, :));
end
end

```

## Apéndice F

### Cinemática Directa

En este apéndice se muestra el código desarrollado en Matlab para el proceso de validación.

```
function [T, grados] = DirectKinematics(Li)
% Cinemática Directa para una plataforma Stewart
% Li: Longitudes de los actuadores [L1, L2, L3, L4, L5, L6]
% Salidas:
% - T: Vector de traslaciones [Tx, Ty, Tz]
% - grados: Vector de ángulos de rotación [alfa, beta, gamma] en grados
% Parámetros de la plataforma (ajustados para la plataforma específica)
ds = 921.605; % Diámetro base superior
di = 1593.751; % Diámetro base inferior
rp = ds / 2; % Radio base superior
rb = di / 2; % Radio base inferior
% Ángulos de la base móvil y base fija
thetap = deg2rad(80);
thetab = deg2rad(80);
% Coordenadas de la base móvil (A) y base fija (B)
A = zeros(3, 6);
B = zeros(3, 6);
for i = 1:6
A(:,i) = [rp * cos(thetap * (i-1)), rp * sin(thetap * (i-1)), 0];
B(:,i) = [rb * cos(thetab * (i-1)), rb * sin(thetab * (i-1)), 0];
end
% Estimación inicial de posición y orientación (Z y RotX deben variar)
x0 = [0, 0, 1.6 + 2750, 0.0, 0, 0]'; % [Tx, Ty, Tz, alfa, beta, gamma]
% Iteración para ajustar posición y orientación
options = optimset('Display','off');
x = fminsearch(@(x) objectiveFunction(x, A, B, Li), x0, options);
% Asegurar que las rotaciones en Y y Z sean 0 y que la rotación en X esté en el
rango [-0.46, 0.46]
x(4) = max(min(x(4) / 14.783, 0.46), -0.46); % Dividir RotX por 14.783 y limitar
a [-0.46, 0.46]
x(5) = 0; % RotY = 0
x(6) = 0; % RotZ = 0
```

```

% Extraer resultados
T = x(1:3); % [Tx, Ty, Tz]
grados = rad2deg(x(4:6)); % [alfa, beta, gamma]
end
function error = objectiveFunction(x, A, B, Li)
% Descomponer variables
T = x(1:3); % [Tx, Ty, Tz]
alfa = -x(4); % Invertir la rotación en X para corregir la dirección
beta = -x(5); % Mantener RotY en 0
gamma = -x(6); % Mantener RotZ en 0
% Matriz de rotación total (RotX * RotY * RotZ)
RX = [1, 0, 0; 0, cos(alfa), -sin(alfa); 0, sin(alfa), cos(alfa)];
RY = [cos(beta), 0, sin(beta); 0, 1, 0; -sin(beta), 0, cos(beta)];
RZ = [cos(gamma), -sin(gamma), 0; sin(gamma), cos(gamma), 0; 0, 0, 1];
R = RZ * RY * RX;
% Calcular las longitudes teóricas
error = 0;
for i = 1:6
Pi = T + R * A(:,i); % Posición del punto en la base móvil
error = error + (norm(Pi - B(:,i)) - Li(i))^2;
end
end

```

## Apéndice G

### Análisis de costos

En este apéndice se presente el análisis de costos detallado en los que incurre la implementación del proyecto.

**Tabla G.1**

*Costo del diseño mecánico*

| Diseño mecánico       |                               |          |                |            |
|-----------------------|-------------------------------|----------|----------------|------------|
| Equipos/Materiales    | Modelo/Descripción            | Cantidad | Valor Unitario | Total      |
| Material              | Acero Inoxidable AISI 304     | 1 Ton    | \$1,180.00     | \$1,180.00 |
| Elementos de fijación | Tornillo Allen DIN 912 M14x70 | 36       | \$75.00        | \$2,700.00 |
| Mecanizado            | Manufactura de los elementos  | -        | \$3,000        | \$3,000    |
| Total                 |                               |          |                | \$6,880.00 |

**Tabla G.2**

*Costo del diseño electrónico*

| Diseño Electrónico        |   |          |                |             |
|---------------------------|---|----------|----------------|-------------|
| Equipos/Material          | Modelo/Descripción                                    | Cantidad | Valor Unitario | Total       |
| S7-1200                   | CPU 1215C, AC/DC/RELE                                 | 1        | \$1,450.00     | \$1,450.00  |
| Módulo                    | 6ES7221-1BF30-0XB0                                    | 1        | \$286.00       | \$286.00    |
| HMI                       | KTP700 BASIC PANEL, PANTALLA TFT 7 PULGADAS, PROFINET | 1        | \$1,683.00     | \$1,683.00  |
| Controlador de 6 ejes     | MP3300iec PMC-U-MP33008                               | 1        | \$2,970.00     | \$2,970.00  |
| Actuador eléctrico lineal | LEMC-S-3005   | 6        | \$5,675.00     | \$34,050.00 |
| Driver                    | VD3E-014SA1G  | 6        | \$500.00       | \$3,000.00  |
| Transformador AC/DC       | 24V DC  | 1        | \$23.00        | \$23.00     |
| Autotransformador         | 400V AC   | 1        | \$3,256.00     | \$3,256.00  |
| Total                     |   |          |                | \$46,718.00 |

**Tabla G. 3**

*Costos de la programación*

| Diseño de Programación |                        |          |                |             |
|------------------------|------------------------|----------|----------------|-------------|
| Equipos/Materiales     | Modelo/Descripción     | Cantidad | Valor Unitario | Total       |
| Software               | Licencia de MATLAB     | 1        | \$ 2,000.00    | \$ 2,000.00 |
|                        | Licencia de TIA Portal | 1        | \$ 3,000.00    | \$ 3,000.00 |
| Total                  |                        |          |                | \$ 5,000.00 |

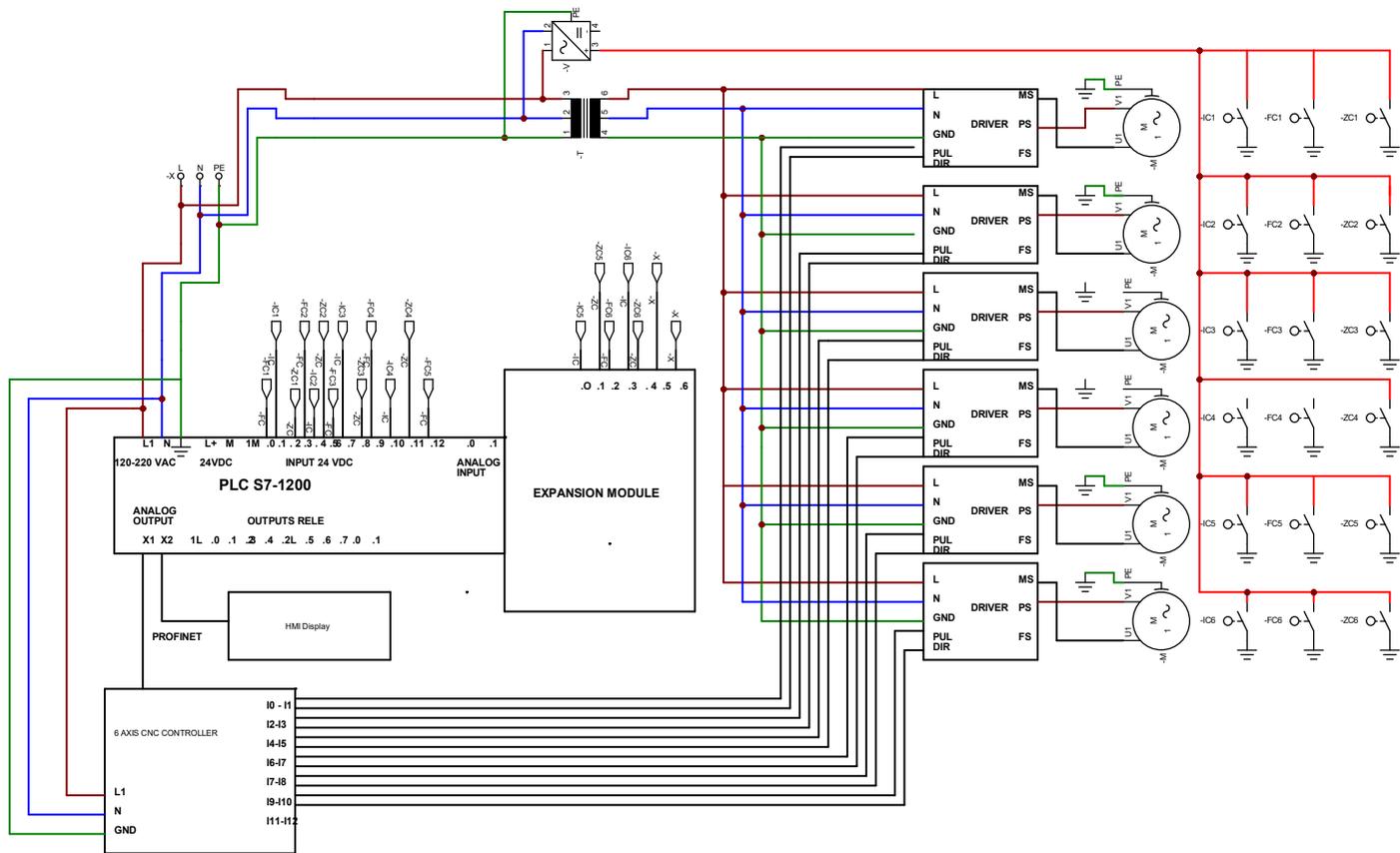
**Tabla G.4***Costos variables*

| Costos variables   |                            |          |                |              |
|--------------------|----------------------------|----------|----------------|--------------|
| Equipos/Materiales | Descripción                | Cantidad | Valor Unitario | Total        |
| Mano de obra       | Ingeniero especializado    | 1        | \$ 5,000.00    | \$ 5,000.00  |
| Impuestos          | Asociados a la importación | -        | \$ 20,509.30   | \$ 20,509.30 |
| Equipos            | PC                         | 1        | \$ 3,000.00    | \$ 3,000.00  |
| Total              |                            |          |                | \$ 25,509.30 |

## **Apéndice H**

### **Plano electrónico**

En esta sección se presenta el plano del sistema electrónico diseñado para el correcto funcionamiento de la plataforma.

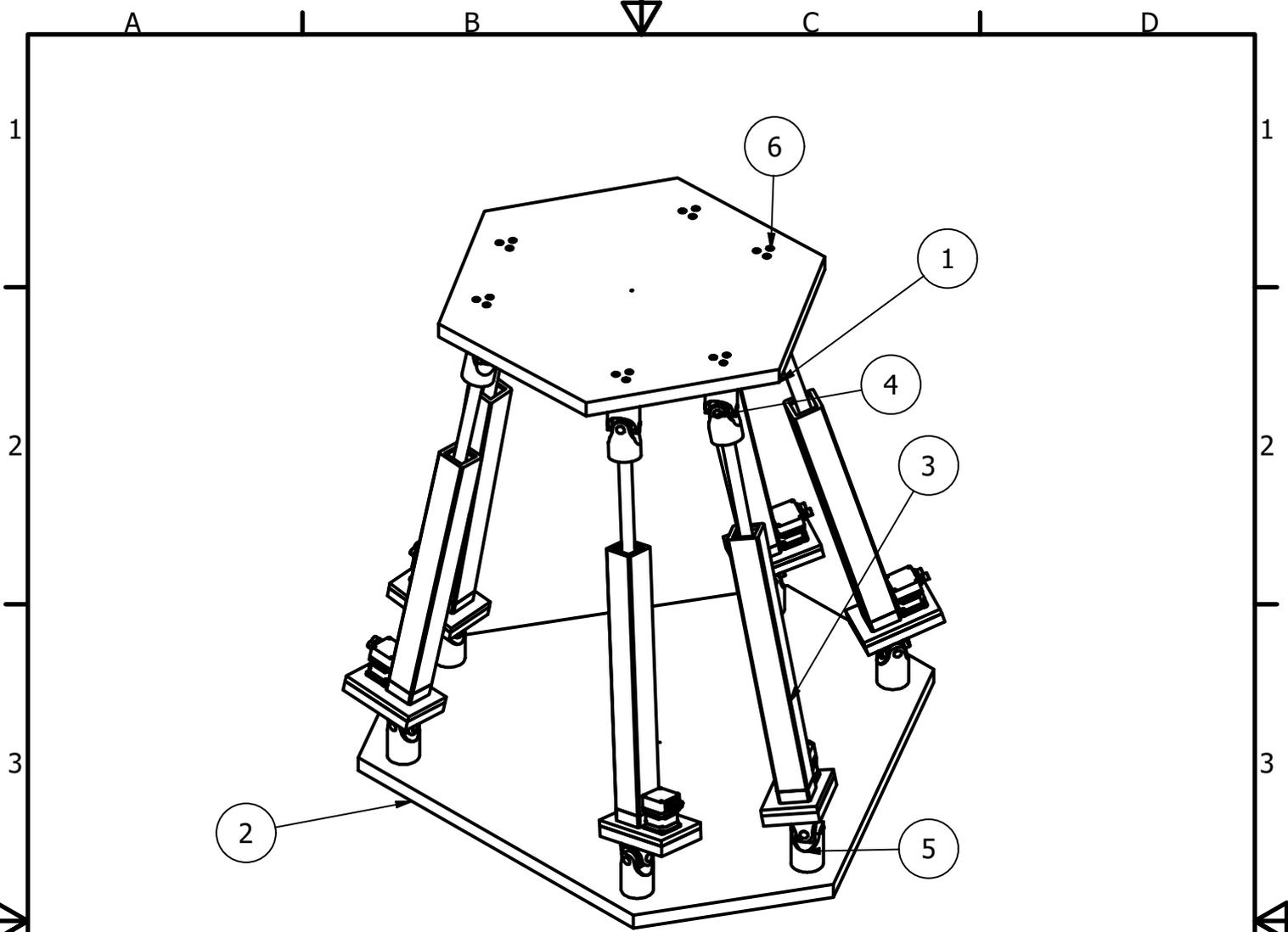


|            |          |                      |         |  |                              |             |              |
|------------|----------|----------------------|---------|--|------------------------------|-------------|--------------|
|            | Fecha    | Nombre               | Firmas  | Entidad                                  | Título                       | Fecha       | Núm.         |
| Dibujado   | 02/08/24 | César Quezada        | C.M.Q.D | Escuela Superior Politécnica del Litoral | Stewart P. Electronic Design | 31-Jul-2024 | 1 de 1       |
| Comprobado | 02/08/24 | PhD. Marcelo Fajardo |         |  |                              | Archivo:    | ElectroFinal |

## **Apéndice I**

### **Planos mecánicos**

En el presente apéndice se detallan los planos mecánicos de cada pieza no comercial que compone la plataforma Stewart, siguiendo las normas INEN.



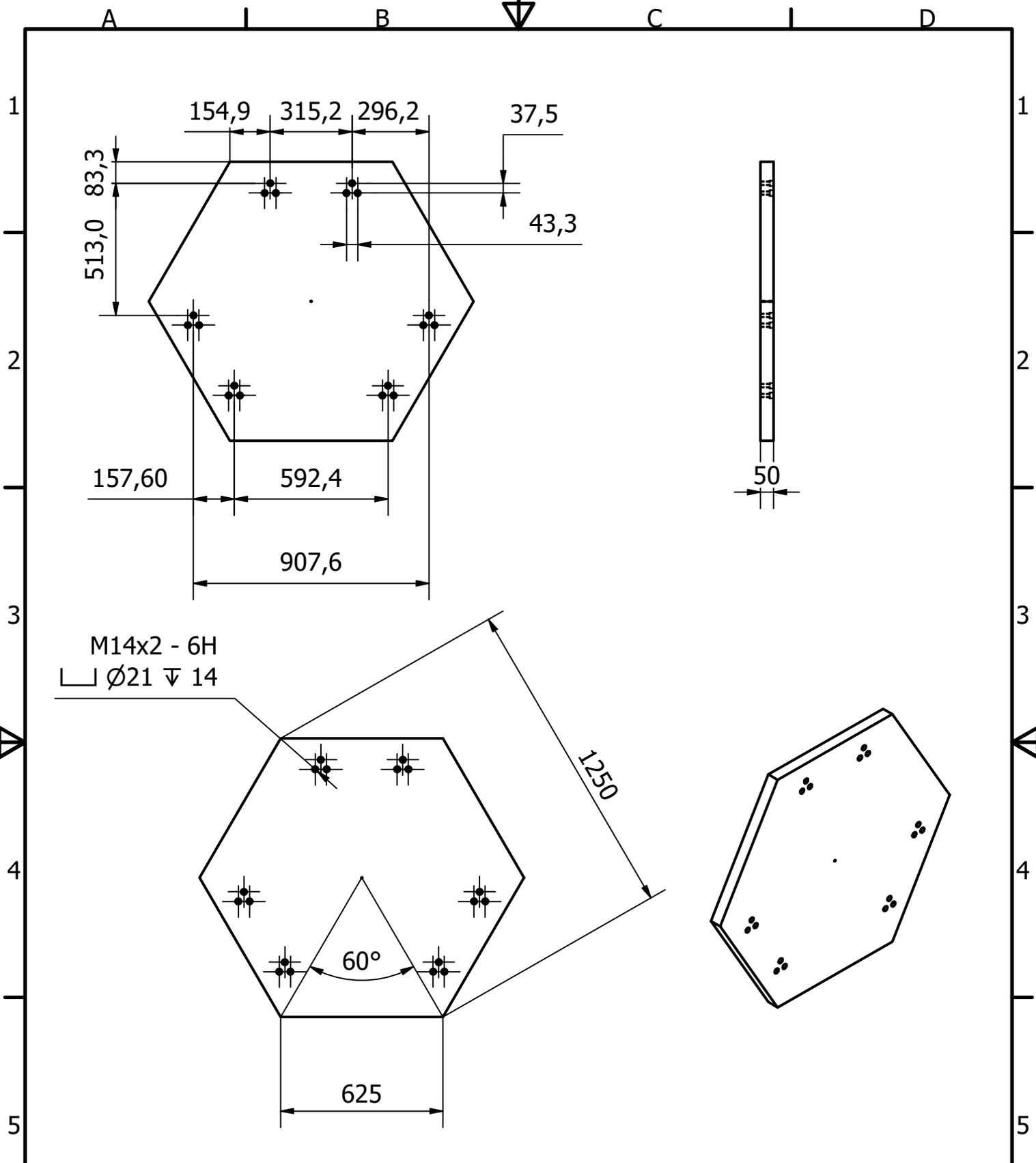
LISTA DE PIEZAS

| ELEMENTO | CTDAD | Nº DE PIEZA     | DESCRIPCIÓN               |
|----------|-------|-----------------|---------------------------|
| 1        | 1     | Base Mobil      | Base superior             |
| 2        | 1     | Base Inferior   | Base fijo                 |
| 3        | 6     | Actuador Lineal | LMEC Actuador             |
| 4        | 12    | Cruz            | Cruz o cruceta del cardan |
| 5        | 12    | Cardan          | Unión universal           |
| 6        | 36    | ISO 4762 M14x70 | Conexión base-cardan      |

|          | NOMBRE                | FECHA      |
|----------|-----------------------|------------|
| Dibujado | César Quezada D.      | 01/09/2024 |
|          | Jonathan Solórzano P. | 01/09/2024 |
| CLIENTE  | Tte. Santiago Meneses | 01/09/2024 |

**espol** Escuela Superior  
Politécnica del Litoral

|                |  |  |              |
|----------------|--|--|--------------|
| ESCALA<br>30:1 | <b>DIBUJO</b><br><br><b>INGE2531.100</b> | FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA<br>Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN |              |
|                |  | Nº<br><b>0</b>   | UNIDAD<br>mm |



M14x2 - 6H  
 ⌊ Ø21 ∇ 14

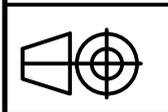
|          | NOMBRE                | FECHA      |
|----------|-----------------------|------------|
| Dibujado | César Quezada D.      | 01/09/2024 |
|          | Jonathan Solórzano P. | 01/09/2024 |
| CLIENTE  | Tte. Santiago Meneses | 01/09/2024 |

**espol** Escuela Superior  
 Politécnica del Litoral

ESCALA  
 20:1

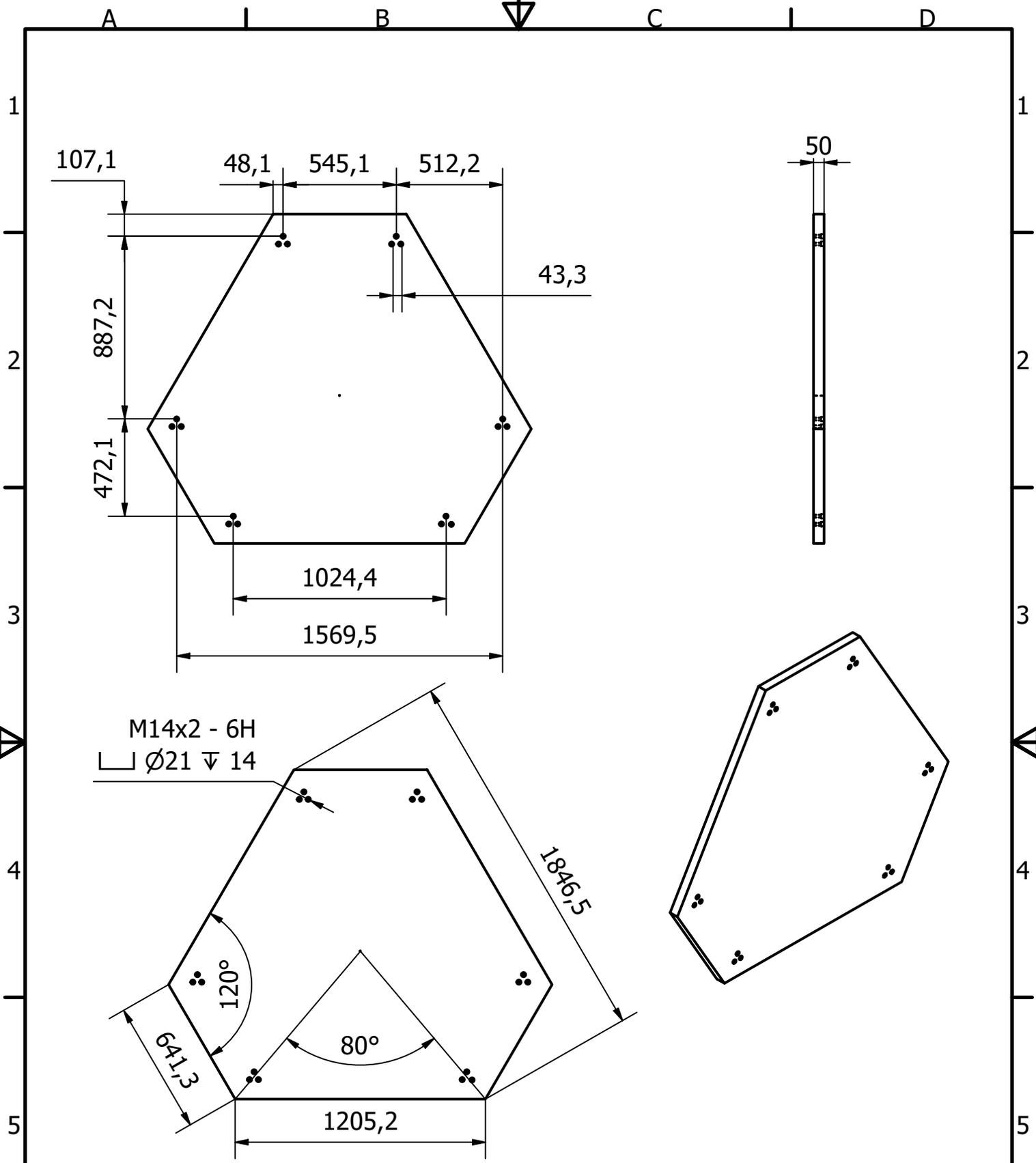
**DIBUJO**  
**INGE2531.101**

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
 Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN



Nº **1**

UNIDAD  
 mm



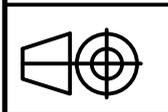
|          | NOMBRE                | FECHA      |
|----------|-----------------------|------------|
| Dibujado | César Quezada D.      | 01/09/2024 |
|          | Jonathan Solórzano P. | 01/09/2024 |
| CLIENTE  | Tte. Santiago Meneses | 01/09/2024 |

**espol** Escuela Superior  
Politécnica del Litoral

ESCALA  
25:1

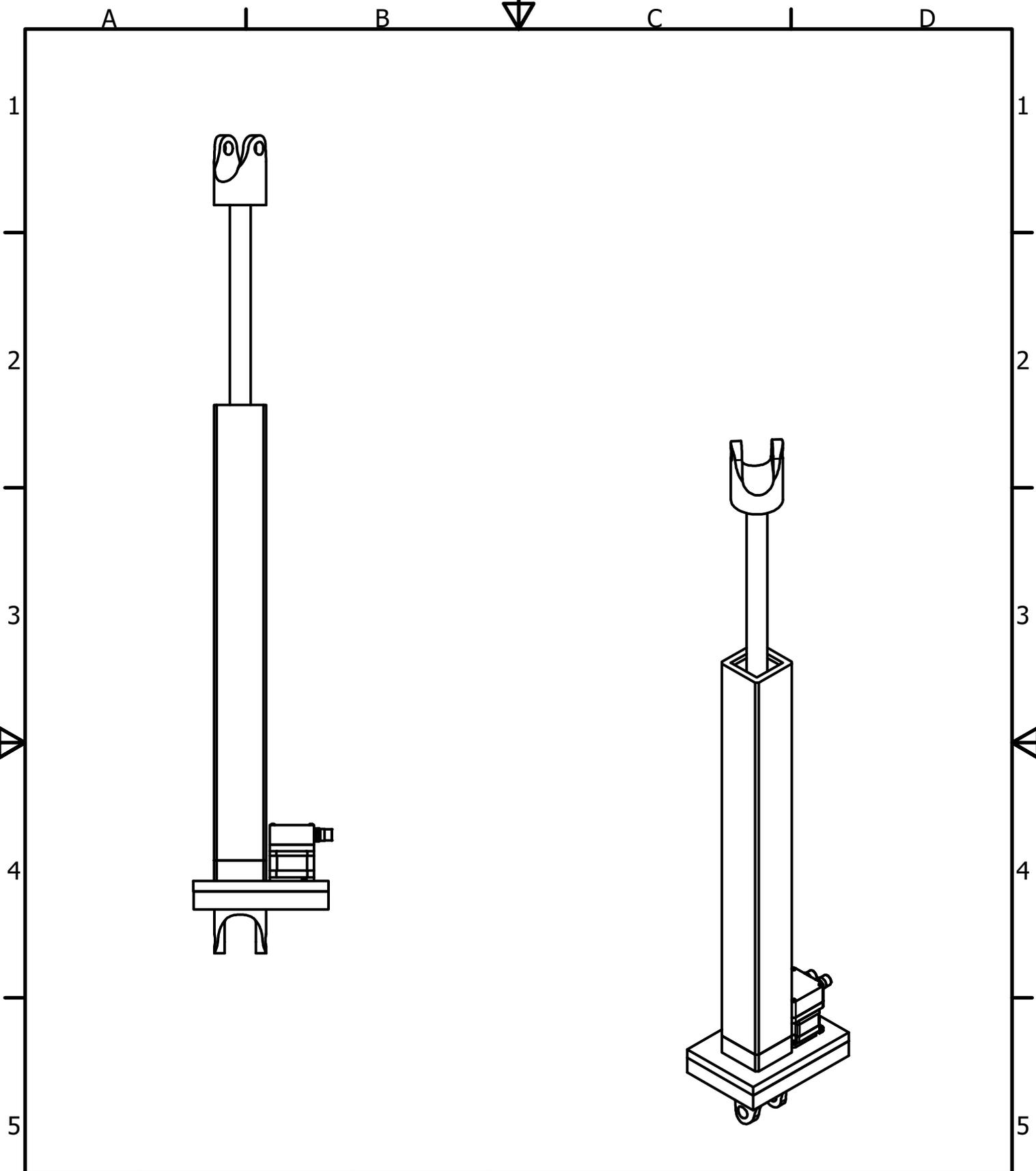
**DIBUJO**  
**INGE2531.102**

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN



Nº **2**

UNIDAD  
mm



|                |                       |            |  |  |
|----------------|-----------------------|------------|--|--|
|                | NOMBRE                | FECHA      |  |  |
| Dibujado       | César Quezada D.      | 01/09/2024 |  |  |
|                | Jonathan Solórzano P. | 01/09/2024 |  |  |
| CLIENTE        | Tte. Santiago Meneses | 01/09/2024 | <b>Escuela Superior Politécnica del Litoral</b><br>FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN |  |
| ESCALA<br>15:1 | DIBUJO                |            | Nº <b>3</b> UNIDAD mm  |  |
|                | <b>INGE2531.103</b>   |            |  |  |

A

I

B

C

I

D

1

1

2

2

3

3

4

4

5

5

6

6

A

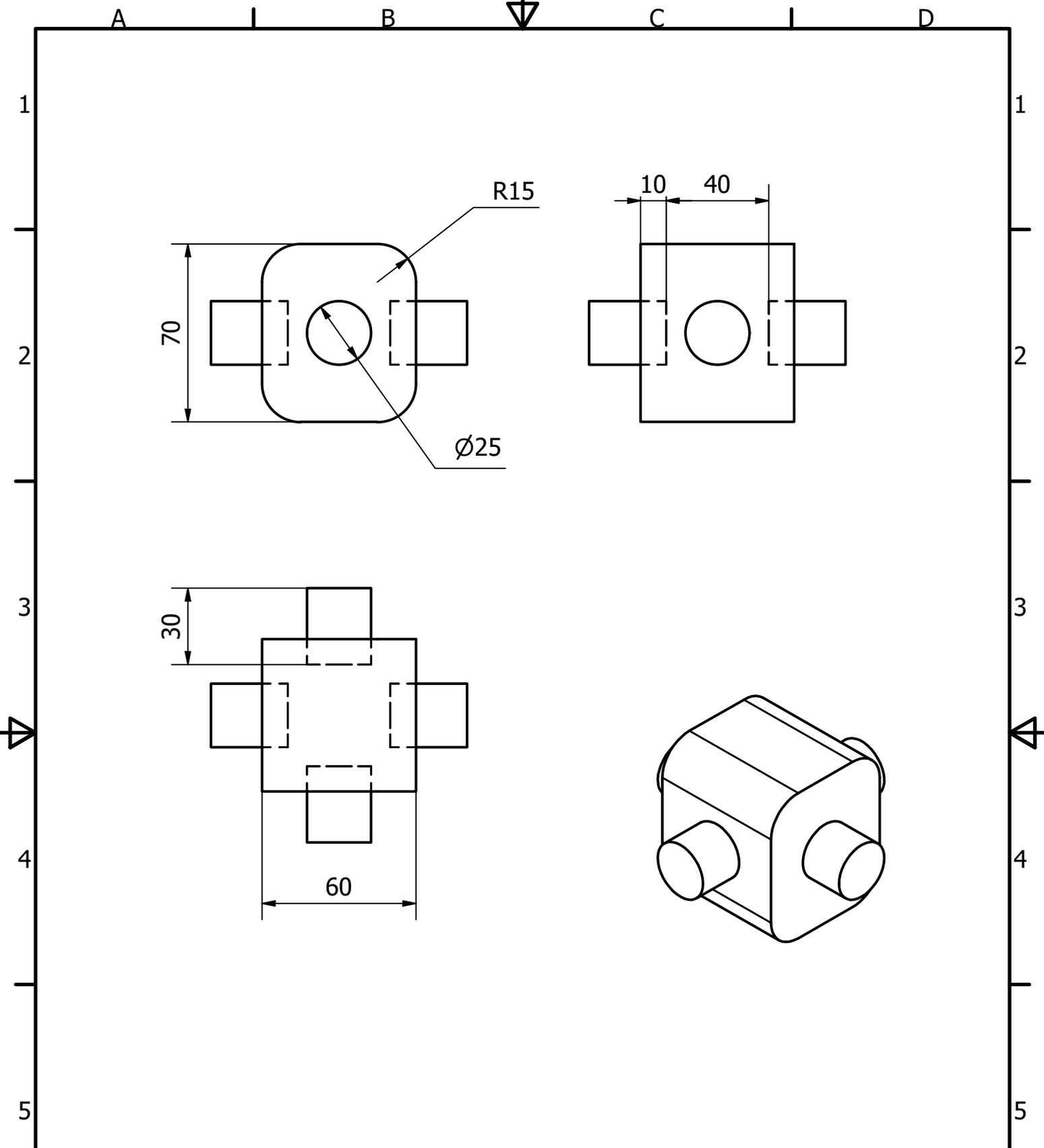
I

B

C

I

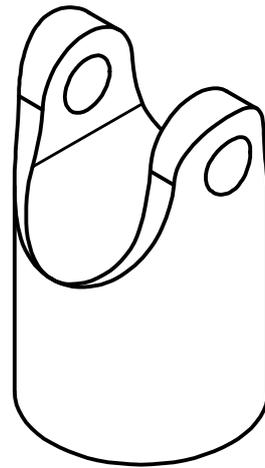
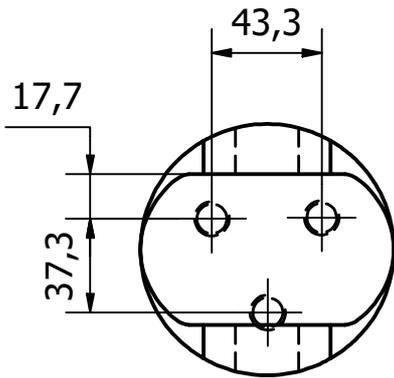
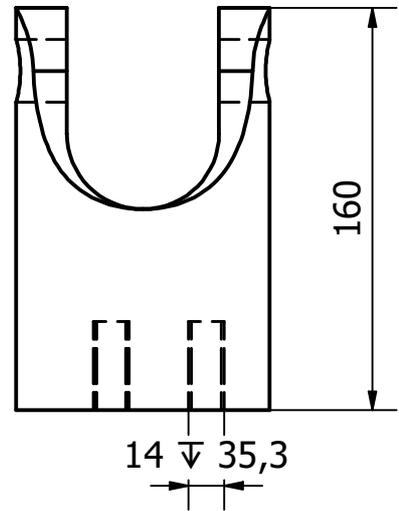
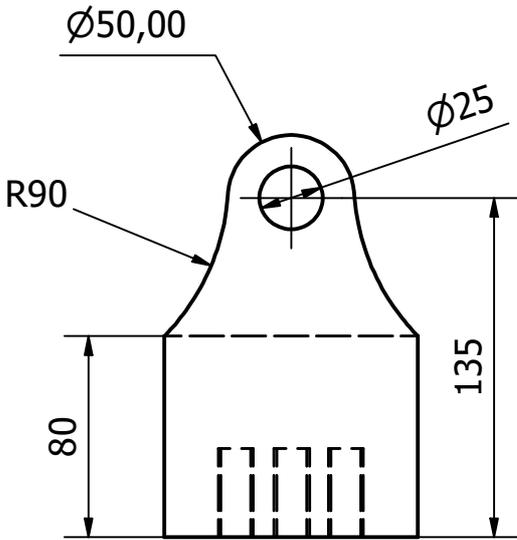
D



|          |                       |            |   |
|----------|-----------------------|------------|---|
|          | NOMBRE                | FECHA      |   |
| Dibujado | César Quezada D.      | 01/09/2024 |   |
|          | Jonathan Solórzano P. | 01/09/2024 |   |
| CLIENTE  | Tte. Santiago Meneses | 01/09/2024 | FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN |
| ESCALA   | DIBUJO                |            | N° <b>4</b> UNIDAD mm                                       |
| 2:1      | <b>INGE2531.104</b>   |            |   |



A I B C I D



|          |                       |            |  |
|----------|-----------------------|------------|--|
|          | NOMBRE                | FECHA      |  |
| Dibujado | César Quezada D.      | 01/09/2024 |  |
|          | Jonathan Solórzano P. | 01/09/2024 |  |
| CLIENTE  | Tte. Santiago Meneses | 01/09/2024 | FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA<br>Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN |
| ESCALA   | DIBUJO                |            |  |
| 3:1      | INGE2531.105          |            | N° 5   |
|          |                       |            | UNIDAD<br>mm   |