



**ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL**  
*Avanzamos... ¡Es nuestro objetivo!*



**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CONTROL DINÁMICO MONOARTICULAR  
DE BIMANIPULADORES COLABORATIVOS CON HMI DE CONTROL PARA  
TECNOACADEMIA CÚCUTA**

**Autores**

**NEYER MAURICIO PABON BERMON**

**ALEX DUBAN GALVIS GUARNIZO**



**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA**  
**PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**  
**VILLA DEL ROSARIO**  
**2022**



SC-CER96940



*"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"*

Universidad de Pamplona  
Pamplona - Norte de Santander - Colombia  
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750



**ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL**  
*Avanzamos... ¡Es nuestro objetivo!*



**NEYER MAURICIO PABON BERMON**

**ALEX DUBAN GALVIS GUARNIZO**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO EN  
MECATRÓNICA**

**Director:**

**MSc. Ing. OSCAR MANUEL DUQUE SUAREZ**



**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA**  
**PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**VILLA DEL ROSARIO**

**2022**



SC-CER96940



*"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"*

Universidad de Pamplona  
Pamplona - Norte de Santander - Colombia  
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750



Nota de Aceptación

---

---

---

Presidente del Jurado

Jurado 1

Jurado 2



SC-CER96940



*"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"*

Universidad de Pamplona  
Pamplona - Norte de Santander - Colombia  
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750



**ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL**  
*Avanzamos... ¡Es nuestro objetivo!*



## DEDICATORIA

Este proyecto va dedicado a nuestros padres quienes fueron las bases y los pilares importantes en nuestra educación como persona y como futuro profesional.



SC-CER96940



*"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"*

Universidad de Pamplona  
Pamplona - Norte de Santander - Colombia  
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750



## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios y a nuestras familias por todo el apoyo y acompañamiento durante el transcurso de esta bonita carrera, así como a mis compañeros con los que compartí conocimientos, recursos y experiencias.

Al ingeniero Oscar Manuel Duque, que, por su motivación y disciplina, me ha permitido culminar las metas de este proyecto y por brindarnos su sabiduría y experiencia durante el transcurso de la cerrera.

Al SENA principalmente al área Tecno academia Cúcuta por hacer posible este proyecto.



SC-CER96940



*"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"*

Universidad de Pamplona  
Pamplona - Norte de Santander - Colombia  
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750

## RESUMEN

En la actualidad las aplicaciones de la robótica industrial están enfocada en la industria 4.0, debido a los rápidos avances en las tecnologías de fabricación inteligente. Sin embargo ya se produce discusiones en torno al tema de la quinta revolución industrial (industria 5.0), que se proyecta hacia el trabajo conjunto entre humanos y robots, gracias a los resultados significativos e investigación en inteligencia artificial (AI), así como trabajos con aplicaciones de manipuladores colaborativos que buscan sentar las bases de las futuras tareas conjuntas entre humanos y robots, ya que estas formas de automatizar procesos tienen entre sus cualidades la de mejorar la continua y el aumento de productividad, además de que los diseños son estructuralmente flexibles haciendo fáciles de adaptar a espacios de trabajos reducidos. En este proyecto se estudió las diferentes morfologías de manipuladores, buscando la mejor adaptación a la aplicación de robótica colaborativa, estableciendo los criterios de diseño que cumplan con la elaboración y diseño de los manipuladores, acompañándolas con matrices de selección. Se ejecutó la elaboración de modelos cinemáticos (directa e inversa) y la generación de trayectorias para el control cinemático. Al igual se realizó el diseño e implementación de un sistema de control dinámico mono-articular involucrado en la aplicación de la robótica colaborativa con bimanipuladores, así como también el desarrollo y diseño de una interfaz gráfica que facilite al usuario, controlar las diferentes opciones de modos o procesos ejecutados en el desarrollo del proyecto, proponiendo una metodología clara para el desarrollo de un sistema de control dinámico para manipuladores colaborativos.

Con lo cual este proyecto consistía en la recopilación del proceso de diseño y construcción de un módulo educativo de robótica colaborativa en bimanipuladores para los estudiantes de la unidad Tecno-academia Cúcuta. Donde se realizará prácticas de robótica tales como el estudio de los modelos de las cinemáticas directa e inversa, así como la generación del control cinemático y de trayectorias. Al igual que la generación de trayectorias colaborativas apoyándose en el desarrollo del control dinámico, con el fin de que esta entidad tuviera más aportes en el campo de la investigación.

## ABSTRACT

Currently, the applications of industrial robotics are focused on Industry 4.0, due to rapid advances in smart manufacturing technologies. However, there are already discussions on the subject of the fifth industrial revolution (industry 5.0), that is projected towards the joint work between humans and robots, thanks to the significant results and research in artificial intelligence (AI), as well as work with applications of collaborative manipulators that seek to lay the foundations of future joint tasks between humans and robots, since these ways of automating processes have among their qualities to improve the continuous and the increase of productivity, in addition to the fact that the designs are structurally flexible making it easy to adapt to small work spaces. In this project, the different morphologies of manipulators were studied, seeking the best adaptation to the application of collaborative robotics, establishing the design criteria that meet the elaboration and design of the manipulators, accompanying them with selection matrices. The development of kinematic models (direct and inverse) and the generation of trajectories for kinematic control were executed. Likewise, the design and implementation of a monoarticular dynamic control system involved in the application of collaborative robotics with bimanipulators was carried out, as well as the development and design of a graphic interface that facilitates the user, control the different options of modes or processes executed in the development of the project, proposing a clear methodology for the development of a dynamic control system for collaborative manipulators.

With which this project consisted of the compilation of the process of design and construction of an educational module of collaborative robotics in bimanipulators for the students of the Tecnoacademia Cúcuta unit. Where robotics practices will be carried out such as the study of direct and reverse kinematic models, as well as the generation of kinematic control and trajectories. As well as the generation of collaborative trajectories based on the development of dynamic control, in order for this entity to have more contributions in the field of research.

## CONTENIDO

|         |                                                                                                                                                                                                                                                                       |    |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1       | DELIMITACIÓN .....                                                                                                                                                                                                                                                    | 27 |
| 1.1     | Objetivo General .....                                                                                                                                                                                                                                                | 27 |
| 1.2     | Objetivo Especifico .....                                                                                                                                                                                                                                             | 27 |
| 1.3     | Acotaciones .....                                                                                                                                                                                                                                                     | 28 |
| 2       | MARCO TEÓRICO .....                                                                                                                                                                                                                                                   | 29 |
| 2.1     | Contextualización .....                                                                                                                                                                                                                                               | 29 |
| 2.2     | Conceptualización .....                                                                                                                                                                                                                                               | 30 |
| 2.2.1   | Robótica .....                                                                                                                                                                                                                                                        | 30 |
| 2.2.2   | Estructura mecánica de un robot.....                                                                                                                                                                                                                                  | 30 |
| 2.2.3   | Clasificación de los robots.....                                                                                                                                                                                                                                      | 31 |
| 2.2.4   | Tipos de robots.....                                                                                                                                                                                                                                                  | 31 |
| 2.2.5   | Aspectos técnicos de un robot .....                                                                                                                                                                                                                                   | 32 |
| 2.2.6   | Morfología .....                                                                                                                                                                                                                                                      | 35 |
| 2.2.7   | Tipos de articulaciones.....                                                                                                                                                                                                                                          | 36 |
| 2.2.8   | Configuraciones de manipuladores robóticos .....                                                                                                                                                                                                                      | 37 |
| 2.2.9   | Bases teóricas.....                                                                                                                                                                                                                                                   | 37 |
| 2.2.10  | Estudio cinemático y dinámico.....                                                                                                                                                                                                                                    | 39 |
| 2.2.11  | Control cinemático y dinámico .....                                                                                                                                                                                                                                   | 40 |
| 2.2.12  | Robótica colaborativa .....                                                                                                                                                                                                                                           | 42 |
| 3       | ESTUDIAR LAS MORFOLOGÍAS DE BIMANIPULADORES, CONTROL CINEMÁTICO Y MÉTODOS DE CONTROL DINÁMICO, ESTRATEGIAS DE ROBÓTICA COLABORATIVA, NORMATIVA ASOCIADA, Y HERRAMIENTAS NECESARIAS PARA EL DESARROLLO DE INTERFACES GRAFICAS APLICADAS EN ROBÓTICA COLABORATIVA. .... | 44 |
| 3.1     | Diseños y concepciones de morfologías de manipuladores .....                                                                                                                                                                                                          | 44 |
| 3.1.1   | Morfología del robot cartesiano .....                                                                                                                                                                                                                                 | 44 |
| 3.1.1.1 | Descripción .....                                                                                                                                                                                                                                                     | 44 |
| 3.1.1.2 | Ventajas y Desventajas.....                                                                                                                                                                                                                                           | 45 |
| 3.1.2   | Morfología del robot cilíndrico .....                                                                                                                                                                                                                                 | 45 |
| 3.1.2.1 | Descripción .....                                                                                                                                                                                                                                                     | 45 |
| 3.1.2.2 | Ventaja y Desventajas .....                                                                                                                                                                                                                                           | 46 |
| 3.1.3   | Morfología del robot esférico o polar .....                                                                                                                                                                                                                           | 46 |

|                                                                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1.3.1 Descripción .....                                                                                                                                            | 46 |
| 3.1.3.2 Ventaja y Desventajas .....                                                                                                                                  | 47 |
| 3.1.4 Morfología del robot scara.....                                                                                                                                | 47 |
| 3.1.4.1 Descripción .....                                                                                                                                            | 47 |
| 3.1.4.2 Ventaja y Desventajas .....                                                                                                                                  | 48 |
| 3.1.5 Morfología del robot articular (6 gdl).....                                                                                                                    | 48 |
| 3.1.5.1 Descripción .....                                                                                                                                            | 48 |
| 3.1.5.2 Ventaja y Desventajas .....                                                                                                                                  | 49 |
| 3.2 Contextualización del Control Cinemático .....                                                                                                                   | 49 |
| 3.2.1 Cinemática Directa.....                                                                                                                                        | 50 |
| 3.2.2 Cinemática Inversa.....                                                                                                                                        | 51 |
| 3.2.3 Tipos de trayectoria.....                                                                                                                                      | 51 |
| 3.2.3.1 Trayectorias Eje a EJE.....                                                                                                                                  | 51 |
| 3.2.3.2 Trayectorias Simultanea .....                                                                                                                                | 52 |
| 3.2.3.3 Trayectorias Coordinada o Isócrona .....                                                                                                                     | 53 |
| 3.2.3.4 Trayectorias Continuas .....                                                                                                                                 | 53 |
| 3.3 Contextualización del Control Dinámico .....                                                                                                                     | 54 |
| 3.3.1 Control Mono articular .....                                                                                                                                   | 55 |
| 3.3.2 Control Multiarticular .....                                                                                                                                   | 56 |
| 3.4 Interfaz- Hombre- Maquina.....                                                                                                                                   | 56 |
| 3.5 Avances de la robótica colaborativa .....                                                                                                                        | 58 |
| 3.6 Normativa asociada en robótica colaborativa .....                                                                                                                | 59 |
| 3.6.1 Norma ISO 10218-1 .....                                                                                                                                        | 59 |
| 3.6.2 Normativas generales y especificas en el campo de la robótica colaborativa .....                                                                               | 62 |
| 4 ESTABLECER LOS CRITERIOS DE DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL DINÁMICO DE MANIPULADORES COLABORATIVOS, LA MORFOLOGÍA DEL MANIPULADOR Y COMO DE SU HMI DE CONTROL. .... | 63 |
| 4.1 Parámetros de diseño de la morfología .....                                                                                                                      | 63 |
| 4.2 Condiciones necesarias en la generación del control dinámico(mono-Articular).....                                                                                | 64 |
| 4.3 Condiciones necesarias en la generación de la HMI .....                                                                                                          | 65 |

|         |                                                                                                                                                             |    |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5       | SELECCIONAR LA MORFOLOGÍA DE LOS MANIPULADORES, LOS ACTUADORES, SENSORES, ELEMENTOS DE PROCESAMIENTO, COMUNICACIÓN, VISUALIZACIÓN Y CONTROL NECESARIOS..... | 66 |
| 5.1     | Selección de la morfología.....                                                                                                                             | 66 |
| 5.2     | Volumen de trabajo (montaje físico) .....                                                                                                                   | 66 |
| 5.3     | Volumen de trabajo (manipulador).....                                                                                                                       | 67 |
| 5.4     | Ponderación de los factores de selección morfológica .....                                                                                                  | 69 |
| 5.4.1   | Robot cartesiano .....                                                                                                                                      | 69 |
| 5.4.2   | Robot Scara .....                                                                                                                                           | 70 |
| 5.4.3   | Robot Articular.....                                                                                                                                        | 70 |
| 5.4.4   | Matriz de selección de morfologías .....                                                                                                                    | 71 |
| 5.5     | Selección del hardware para el control del manipulador.....                                                                                                 | 73 |
| 5.5.1   | Ponderación de los Factores de la Selección del Hardware de control                                                                                         | 74 |
| 5.5.1.1 | Raspberry PI 3 .....                                                                                                                                        | 74 |
| 5.5.1.2 | Arduino.....                                                                                                                                                | 75 |
| 5.5.1.3 | Tenssy 4.0 .....                                                                                                                                            | 76 |
| 5.5.1.4 | Matriz de selección de la placa de desarrollo .....                                                                                                         | 77 |
| 5.6     | Selección del Software Para el Desarrollo de la HMI .....                                                                                                   | 78 |
| 5.6.1   | Ponderación de los factores de la selección para el desarrollo de la HMI                                                                                    | 80 |
| 5.6.1.1 | C .....                                                                                                                                                     | 80 |
| 5.6.1.2 | Python.....                                                                                                                                                 | 81 |
| 5.6.1.3 | Script de Matlab .....                                                                                                                                      | 81 |
| 5.6.1.4 | Matriz de selección del software .....                                                                                                                      | 82 |
| 5.7     | Selección y especificación de Componentes Electrónicos y Materiales ...                                                                                     | 84 |
| 6       | DISEÑAR LA ESTRUCTURA DEL MANIPULADOR, ASÍ COMO LA DE CONTROL CINEMÁTICO Y DINÁMICO JUNTO AL DESARROLLO DE LA HMI QUE PERMITA ROBÓTICA COLABORATIVA.....    | 87 |
| 6.1     | Diseño de la Morfología.....                                                                                                                                | 87 |
| 6.1.1   | Delimitación del espacio de trabajo.....                                                                                                                    | 88 |
| 6.1.2   | Elaboración del diseño CAD .....                                                                                                                            | 88 |
| 6.1.2.1 | Articulación 1 .....                                                                                                                                        | 89 |
| 6.1.2.2 | Articulación 2 .....                                                                                                                                        | 90 |

|         |                                                                             |     |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.1.2.3 | Articulación 3 y 4.....                                                     | 91  |
| 6.1.2.4 | Articulación 5 y 6.....                                                     | 92  |
| 6.1.2.5 | Ensamblaje CAD del manipulador .....                                        | 93  |
| 6.1.3   | Diseño de la pieza a transportar.....                                       | 94  |
| 6.2     | Diseño de los modelos cinemáticos.....                                      | 95  |
| 6.2.1   | Cálculo de la cinemática directa.....                                       | 95  |
| 6.2.2   | Cálculo de la cinemática inversa .....                                      | 96  |
| 6.3     | Diseño del Control Cinemático para la Generación de Trayectorias .....      | 98  |
| 6.3.1   | Control de las trayectorias Eje a Eje-Simultanea-coordinada- continua<br>98 |     |
| 6.4     | Diseño del control dinámico (Mono-Articular) .....                          | 100 |
| 6.4.1   | Toma de datas del manipulador 1 .....                                       | 101 |
| 6.4.2   | Toma de datas del manipulador 2 .....                                       | 108 |
| 6.4.3   | Identificación del Manipulador 1 .....                                      | 115 |
| 6.4.4   | Identificación del Manipulador 2 .....                                      | 128 |
| 6.4.5   | Sintonización del manipulador 1 .....                                       | 135 |
| 6.4.5.1 | Aplicación de los métodos de sintonización manipulador 1 .....              | 153 |
| 6.4.6   | Sintonización del manipulador 2 .....                                       | 160 |
| 6.4.6.1 | aplicación de los métodos de sintonización manipulador 2.....               | 174 |
| 6.5     | Diseño del Control Cinemático Colaborativo .....                            | 181 |
| 6.5.1   | Control cinemático.....                                                     | 181 |
| 6.5.2   | Modelos matemáticos .....                                                   | 181 |
| 6.5.3   | Montaje de los manipuladores .....                                          | 182 |
| 6.5.4   | Diseño de la pieza a transportar.....                                       | 182 |
| 6.5.5   | Diseño estructural del sistema colaborativo .....                           | 182 |
| 6.5.5.1 | Relación de los manipuladores con la pieza de transporte .....              | 182 |
| 6.5.5.2 | Diseño de las rutinas de trayectorias colaborativas .....                   | 187 |
| 6.6     | Diseño de la Estructura e Interfaz de control (HMI).....                    | 190 |
| 6.5.6   | Calculo de cinemáticas .....                                                | 191 |
| 6.5.7   | Cálculo y generador de trayectorias.....                                    | 194 |
| 6.5.8   | Robótica colaborativa.....                                                  | 200 |

|                                                                                                                                                            |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>7 VALIDAR LA ARQUITECTURA DE CONTROL CINEMÁTICO Y DINÁMICO PROPUESTO, A TRAVÉS DE LA HMI GARANTIZANDO EL FUNCIONAMIENTO DEL ROBOT COLABORATIVO.....</b> | <b>207</b> |
| 7.1 Validación de cinemática directa .....                                                                                                                 | 207        |
| 7.2 Validación de Cinemática Inversa.....                                                                                                                  | 211        |
| 7.3 Validación del Control Cinemático (Interpolador Trapezoidal) .....                                                                                     | 214        |
| 7.3.1 Generación de Trayectoria Eje a Eje.....                                                                                                             | 214        |
| 7.3.2 Generación de trayectoria simultanea.....                                                                                                            | 221        |
| 7.3.3 Generación de trayectoria coordinada .....                                                                                                           | 226        |
| 7.4 Validación del Control Cinemático (Interpolador cubico) .....                                                                                          | 231        |
| 7.4.1 Generación de trayectoria eje a eje.....                                                                                                             | 231        |
| 7.4.2 Generación de Trayectoria Simultanea .....                                                                                                           | 237        |
| 7.4.3 Generación de Trayectoria Coordinada .....                                                                                                           | 242        |
| 7.4.4 Generación de Trayectoria Continua.....                                                                                                              | 247        |
| 7.5 Validación de trayectorias colaborativas.....                                                                                                          | 253        |
| 7.5.1 Trayectoria colaborativa (translación en y (+) y z (+)) .....                                                                                        | 253        |
| 7.5.2 Trayectoria Colaborativa (translación en y (-) y z (+)) .....                                                                                        | 257        |
| 7.5.3 Trayectoria colaborativa (translación en y (+) y z (+), rotación en z).....                                                                          | 261        |
| 7.5.4 Trayectoria colaborativa (translación en y (-) y z (+), rotación en z).....                                                                          | 265        |
| 7.5.5 Trayectoria colaborativa (translación en z (+), rotación z).....                                                                                     | 269        |
| 7.5.6 Trayectoria Colaborativa (Cuadrada) .....                                                                                                            | 273        |
| 7.5.7 Trayectoria colaborativa (circular) .....                                                                                                            | 277        |
| 7.6 Validación del control dinámico (mono-articular) con el método seleccionado (tune de matlab) .....                                                     | 281        |
| 7.6.1.1 Validación del control dinámico manipulador 1 .....                                                                                                | 281        |
| 7.6.1.2 Validación del control dinámico manipulador 2 .....                                                                                                | 292        |
| <b>8 PROPONER UNA METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DE CONTROL DINÁMICO MONOARTICULAR DE BIMANIPULADORES.....</b>                                             | <b>302</b> |
| 8.1 Estructuración y recopilación.....                                                                                                                     | 304        |
| 8.1.1 Estado actual de la robótica .....                                                                                                                   | 304        |
| 8.1.2 Características actuales de los robots.....                                                                                                          | 305        |
| 8.1.3 Descripción del manipulador .....                                                                                                                    | 306        |
| 8.1.3.1 Eslabones .....                                                                                                                                    | 308        |
| 8.1.3.2 Articulaciones.....                                                                                                                                | 312        |

|         |                                                                                                      |     |
|---------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 8.2     | Desarrollo matemático de la cinemática directa .....                                                 | 313 |
| 8.2.1   | parámetros denavit-hartenberg .....                                                                  | 313 |
| 8.2.2   | Matrices de transformación homogéneas .....                                                          | 316 |
| 8.3     | Desarrollo matemático de la cinemática inversa.....                                                  | 325 |
| 8.4     | Control cinemático y trayectorias .....                                                              | 341 |
| 8.4.1   | Tipos de Trayectorias.....                                                                           | 341 |
| 8.4.1.1 | Trayectoria Eje a Eje.....                                                                           | 342 |
| 8.4.1.2 | Trayectoria Simultanea .....                                                                         | 342 |
| 8.4.1.3 | Trayectoria coordinada o isócrona.....                                                               | 343 |
| 8.4.1.4 | Trayectoria continua .....                                                                           | 344 |
| 8.5     | Funciones del control cinemático.....                                                                | 344 |
| 8.5.1   | Simulación del interpolador trapezoidal.....                                                         | 348 |
| 8.5.2   | Simulación del interpolador cubico.....                                                              | 358 |
| 8.6     | Control Dinámico (Monoarticular) .....                                                               | 370 |
| 8.6.1   | Proceso de Identificación .....                                                                      | 371 |
| 8.6.2   | Identificación mediante una entrada escalón .....                                                    | 373 |
| 8.6.3   | Análisis de respuesta transitoria.....                                                               | 373 |
| 8.6.4   | Toma de datas del manipulador .....                                                                  | 375 |
| 8.6.5   | Identificación del Manipulador .....                                                                 | 382 |
| 8.6.6   | Sintonización del manipulador .....                                                                  | 396 |
| 8.6.6.1 | Aplicación de los métodos de sintonización manipulador .....                                         | 414 |
| 8.6.7   | Validación del control dinámico (mono-articular) con el método<br>seleccionado (tune de matlab)..... | 421 |
| 8.6.7.1 | Validación del control dinámico del manipulador .....                                                | 421 |
| 9       | CONCLUSIONES .....                                                                                   | 432 |
| 10      | RECOMENDACIONES .....                                                                                | 435 |
| 11      | BIBLIOGRAFÍA .....                                                                                   | 436 |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                               |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 1. Área de trabajo de un robot.                                                        | 33  |
| Figura 2. Grados de libertad de un robot.                                                     | 33  |
| Figura 3. Tipos de articulaciones.                                                            | 36  |
| Figura 4 Morfologías robóticas más comunes.                                                   | 37  |
| Figura 5. Trayectorias.                                                                       | 41  |
| Figura 6. Movimiento eje a eje                                                                | 52  |
| Figura 7. Movimiento simultáneo de ejes                                                       | 52  |
| Figura 8. Trayectoria coordinada                                                              | 53  |
| Figura 9. Trayectoria continua                                                                | 54  |
| Figura 10. Condiciones necesarias en la generación del control dinámico(mono-Articular)       | 64  |
| Figura 11. Condiciones Necesarias en la Generación de la HMI                                  | 65  |
| Figura 12. Base circular (90cm de diámetro)                                                   | 67  |
| Figura 13. Esquema del manipulador (estado inicial)                                           | 88  |
| Figura 14. Visualización CAD de la pieza 1(base Articulación 1)                               | 89  |
| Figura 15. Visualización CAD complemento de la pieza 2(rodamiento)                            | 89  |
| Figura 16. Visualización CAD complemento de la pieza 3 (base del rodamiento)                  | 90  |
| Figura 17. Visualización CAD de la pieza 4 (base Articulación 2).                             | 90  |
| Figura 18. Visualización CAD de la pieza 5 (Articulación 2)                                   | 91  |
| Figura 19. Visualización CAD de la pieza 6 (Articulación 3 y 4)                               | 91  |
| Figura 20. Visualización CAD de la pieza 7 (base Articulación 5).                             | 92  |
| Figura 21. Visualización CAD de la pieza 8 (Articulación 5 y 6)                               | 92  |
| Figura 22. Visualización CAD de la pieza 9 (base del efector final)                           | 93  |
| Figura 23. Visualización del ensamblaje CAD del manipulador.                                  | 93  |
| Figura 24. Ensamblaje e instalación de los manipuladores                                      | 94  |
| Figura 25. Sistema de referencia manipulador (6GDL)                                           | 95  |
| figura 26. Manipulador de 6gdl- Desacople Cinemático                                          | 97  |
| Figura 27. Diagrama de flujo Diseño del Control Cinemático para la Generación de Trayectorias | 99  |
| Figura 28. Datos promedio del motor 1                                                         | 101 |
| Figura 29. Datos promedio del motor 2                                                         | 102 |
| Figura 30. Datos promedio del motor 2-2                                                       | 103 |
| Figura 31. Datos promedio del motor 3                                                         | 104 |
| Figura 32. Datos promedio del motor 4                                                         | 105 |
| Figura 33. Datos promedio del motor 5                                                         | 106 |
| Figura 34. Datos promedio del motor 6                                                         | 107 |
| Figura 35. Datos promedio del motor 1                                                         | 108 |
| Figura 36. Datos promedio del motor 2                                                         | 109 |
| Figura 37. Datos promedio del motor 2-2                                                       | 110 |
| Figura 38. Datos promedio del motor 3                                                         | 111 |
| Figura 39. Datos promedio del motor 4                                                         | 112 |
| Figura 40. Datos promedio del motor 5                                                         | 113 |
| Figura 41. Datos promedio del motor 6                                                         | 114 |
| Figura 42. Interfaz System Identificación                                                     | 115 |
| Figura 43. Partes de la interfaz System Identificación                                        | 116 |
| Figura 44. Importación de datos de identificación y validación del sistema                    | 116 |
| Figura 45. Importación de las datas en la interfaz System Identificación Toolbox              | 117 |
| Figura 46. Visualización de las datas importadas                                              | 118 |

|                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 47.Opción modelos de procesos.....                                              | 118 |
| Figura 48.Parámetros de estimación función de transferencia .....                      | 119 |
| Figura 49. Visualización del Modelo .....                                              | 120 |
| Figura 50.Exportación de la función de transferencia obtenida .....                    | 121 |
| Figura 51.función de transferencia obtenida motor 1.....                               | 121 |
| Figura 52.función de transferencia obtenida motor 2.....                               | 122 |
| Figura 53.función de transferencia obtenida motor 2-2.....                             | 123 |
| Figura 54.función de transferencia obtenida motor 3.....                               | 124 |
| Figura 55.función de transferencia obtenida motor 4.....                               | 125 |
| Figura 56.función de transferencia obtenida motor 5.....                               | 126 |
| Figura 57.función de transferencia obtenida motor 6.....                               | 127 |
| Figura 58.Función de transferencia obtenida motor 1.....                               | 128 |
| Figura 59.Función de transferencia obtenida motor 2.....                               | 129 |
| Figura 60.Función de transferencia obtenida motor 2-2.....                             | 130 |
| Figura 61.Función de transferencia obtenida motor 3.....                               | 131 |
| Figura 62.Función de transferencia obtenida motor 4.....                               | 132 |
| Figura 63.Función de transferencia obtenida motor 5.....                               | 133 |
| Figura 64.Función de transferencia obtenida motor 6.....                               | 134 |
| Figura 65. Z&N para sistemas mayor a primer orden. ....                                | 147 |
| Figura 66. Fórmulas para el ajuste para respuesta de razón de asentamiento.....        | 147 |
| Figura 67.Diagramas de bloques para la sintonización del motor 1 .....                 | 148 |
| Figura 68.Ubicación T1 en la data .....                                                | 149 |
| Figura 69.Ubicación T2 en la data .....                                                | 149 |
| Figura 70.Ubicación Tm en la data.....                                                 | 149 |
| Figura 71.Digrama de bloques métodos de sintonización motor 1.....                     | 153 |
| Figura 72.Digrama de bloques métodos de sintonización motor 2.....                     | 154 |
| Figura 73.Digrama de bloques métodos de sintonización motor 2-2.....                   | 155 |
| Figura 74.Digrama de bloques métodos de sintonización motor 3.....                     | 156 |
| Figura 75.Digrama de bloques métodos de sintonización motor 4.....                     | 157 |
| Figura 76.Digrama de bloques métodos de sintonización motor 5.....                     | 158 |
| Figura 77.Digrama de bloques métodos de sintonización motor 6.....                     | 159 |
| Figura 78.Digrama de bloques métodos de sintonización motor 1.....                     | 174 |
| Figura 79.Digrama de bloques métodos de sintonización motor 2.....                     | 175 |
| Figura 80.Digrama de bloques métodos de sintonización motor 2-2.....                   | 176 |
| Figura 81.Digrama de bloques métodos de sintonización motor 3.....                     | 177 |
| Figura 82.Digrama de bloques métodos de sintonización motor 4.....                     | 178 |
| Figura 83.Digrama de bloques métodos de sintonización motor 5.....                     | 179 |
| Figura 84.Digrama de bloques métodos de sintonización motor 6.....                     | 180 |
| Figura 85. Diagrama de flujo diseño de rutinas colaborativas.....                      | 189 |
| Figura 86.Ventana Principal de la HMI.....                                             | 191 |
| Figura 87. Calculo de la Cinemática Directa .....                                      | 192 |
| Figura 88. Calculo de la Cinemática Inversa.....                                       | 192 |
| Figura 89.Visualización Articular del Manipulador.....                                 | 193 |
| Figura 90. Opción Ejecutar en el Manipulador.....                                      | 193 |
| Figura 91.Ventana Cálculo de Cinemáticas.....                                          | 194 |
| Figura 92. Ingreso de los valores articulares qi, qf y sus MTHS correspondientes ..... | 195 |
| Figura 93.Creacion de la trayectoria eje a eje por trapezoidal.....                    | 196 |
| Figura 94.Opcion Creación de la trayectoria junto con el número de puntos.....         | 197 |
| Figura 95. Visualización de Posición Inicial del Manipulador .....                     | 197 |
| Figura 96.Visualización de Posición Final del Manipulador.....                         | 198 |
| Figura 97.Visualización y Análisis Articular.....                                      | 198 |
| Figura 98.Opción Ejecutar Trayectoria en el Manipulador .....                          | 199 |
| Figura 99. ventana Calculo y Generador de Trayectorias .....                           | 199 |
| Figura 100. Selección de la pieza ubicada .....                                        | 200 |

|                                                                                         |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 101. Tipo de Trayectoria Colaborativa .....                                      | 201 |
| Figura 102. Opción Crear Trayectoria Colaborativa .....                                 | 201 |
| Figura 103. Creación de la trayectoria colaborativa .....                               | 202 |
| Figura 104. Posición inicial de los manipuladores .....                                 | 203 |
| Figura 105. Zona de preparación de los manipuladores .....                              | 203 |
| Figura 106. Sujeción de la pieza .....                                                  | 204 |
| Figura 107. Ejecución de la trayectoria colaborativa .....                              | 204 |
| Figura 108. Análisis de trayectoria colaborativa .....                                  | 205 |
| Figura 109. Opción Ejecutar trayectoria colaborativa en los manipuladores .....         | 205 |
| Figura 110. Ventana Robótica Colaborativa .....                                         | 206 |
| Figura 111. Validación de la cinemática directa (ingreso de valores articulares) .....  | 208 |
| Figura 112. Obtención de la MTH final .....                                             | 208 |
| Figura 113. Localización inicial del manipulador (animación C-D) .....                  | 209 |
| Figura 114. Localización final del manipulador (animación C-D) .....                    | 209 |
| Figura 115. Validación de la Cinemática Directa (manipulador real en X y Z) .....       | 210 |
| Figura 116. Validación de la Cinemática Directa (manipulador real en Y) .....           | 210 |
| Figura 117. Validación de la Cinemática Inversa (ingreso MTH final) .....               | 211 |
| Figura 118. Obtención de los ángulos a través de la C-I .....                           | 212 |
| Figura 119. Posición inicial del manipulador (animación C-I) .....                      | 212 |
| Figura 120. Posición final del manipulador (animación C-I) .....                        | 213 |
| Figura 121. Validación de la Cinemática Inversa (manipulador real) .....                | 213 |
| Figura 122. Validación Trayectoria Eje a Eje (ingreso de valores $q_i$ , $q_f$ ) .....  | 214 |
| Figura 123. Validación Trayectoria Eje a Eje (MTH finales) .....                        | 215 |
| Figura 124. Validación Trayectoria Eje a Eje (selección de parámetros iniciales) .....  | 216 |
| Figura 125. Validación Trayectoria Eje a Eje (crear trayectoria vista lateral) .....    | 216 |
| Figura 126. Validación Trayectoria Eje a Eje (crear trayectoria vista superior) .....   | 217 |
| Figura 127. Validación Trayectoria Eje a Eje (posición inicial) .....                   | 217 |
| Figura 128. Validación Trayectoria Eje a Eje (posición final-vista lateral) .....       | 218 |
| Figura 129. Validación Trayectoria Eje a Eje (posición final-vista superior) .....      | 218 |
| Figura 130. Validación Trayectoria Eje a Eje (análisis de trayectoria) .....            | 219 |
| Figura 131. Validación de la Trayectoria Eje a Eje (manipulador real en X y Z) .....    | 220 |
| Figura 132. Validación de la Trayectoria Eje a Eje (manipulador real en X y Z) .....    | 220 |
| Figura 133. Validación Trayectoria Simultanea (ingreso de valores $q_i$ , $q_f$ ) ..... | 221 |
| Figura 134. Validación Trayectoria Simultanea (MTH finales) .....                       | 221 |
| Figura 135. Validación Trayectoria Simultanea (selección de parámetros iniciales) ..... | 222 |
| Figura 136. Validación Trayectoria Simultanea (crear trayectoria vista lateral) .....   | 223 |
| Figura 137. Validación Trayectoria Simultanea (crear trayectoria vista superior) .....  | 223 |
| Figura 138. Validación Trayectoria Simultanea (posición inicial) .....                  | 224 |
| Figura 139. Validación Trayectoria Simultanea (posición final-vista lateral) .....      | 224 |
| Figura 140. Validación Trayectoria Simultanea (posición final-vista superior) .....     | 225 |
| Figura 141. Validación Trayectoria Simultanea (análisis de trayectoria) .....           | 225 |
| Figura 142. Validación Trayectoria Coordinada (ingreso de valores $q_i$ , $q_f$ ) ..... | 226 |
| Figura 143. Validación Trayectoria Coordinada (MTH finales) .....                       | 227 |
| Figura 144. Validación Trayectoria Coordinada (selección de parámetros iniciales) ..... | 227 |
| Figura 145. Validación Trayectoria Coordinada (crear trayectoria vista lateral) .....   | 228 |
| Figura 146. Validación Trayectoria Coordinada (crear trayectoria vista superior) .....  | 228 |
| Figura 147. Validación Trayectoria Coordinada (posición inicial) .....                  | 229 |
| Figura 148. Validación Trayectoria Coordinada (posición final-vista lateral) .....      | 229 |
| Figura 149. Validación Trayectoria Coordinada (posición final-vista superior) .....     | 230 |
| Figura 150. Validación Trayectoria Coordinada (análisis de trayectoria) .....           | 230 |
| Figura 151. Validación Trayectoria Eje a Eje (ingreso de valores $q_i$ , $q_f$ ) .....  | 231 |
| Figura 152. Validación Trayectoria Eje a Eje (MTH finales) .....                        | 232 |
| Figura 153. Validación Trayectoria Eje a Eje (selección de parámetros iniciales) .....  | 232 |
| Figura 154. Validación Trayectoria Eje a Eje (crear trayectoria vista lateral) .....    | 233 |

|                                                                                          |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 155. Validación Trayectoria Eje a Eje (crear trayectoria vista superior) .....    | 233 |
| Figura 156. Validación Trayectoria Eje a Eje (posición inicial) .....                    | 234 |
| Figura 157. Validación Trayectoria Eje a Eje (posición final-vista lateral) .....        | 234 |
| Figura 158. Validación Trayectoria Eje a Eje (posición final-vista superior) .....       | 235 |
| Figura 159. Validación Trayectoria Eje a Eje (análisis de trayectoria) .....             | 235 |
| Figura 160. Validación de la Trayectoria Eje a Eje (manipulador real en X y Z) .....     | 236 |
| Figura 161. Validación de la Trayectoria Eje a Eje (manipulador real en Y) .....         | 237 |
| Figura 162. Validación Trayectoria Simultanea (ingreso de valores $q_i$ , $q_f$ ) .....  | 237 |
| Figura 163. Validación Trayectoria Simultanea (MTH finales) .....                        | 238 |
| Figura 164. Validación Trayectoria Simultanea (selección de parámetros iniciales) .....  | 238 |
| Figura 165. Validación Trayectoria Simultanea (crear trayectoria vista lateral) .....    | 239 |
| Figura 166. Validación Trayectoria Simultanea (crear trayectoria vista superior) .....   | 239 |
| Figura 167. Validación Trayectoria Simultanea (posición inicial) .....                   | 240 |
| Figura 168. Validación Trayectoria Simultanea (posición final-vista lateral) .....       | 240 |
| Figura 169. Validación Trayectoria Simultanea (posición final-vista superior) .....      | 241 |
| Figura 170. Validación Trayectoria Simultanea (análisis de trayectoria) .....            | 241 |
| Figura 171. Validación Trayectoria Coordinada (ingreso de valores $q_i$ , $q_f$ ) .....  | 242 |
| Figura 172. Validación Trayectoria Coordinada (MTH finales) .....                        | 243 |
| Figura 173. Validación Trayectoria Coordinada (selección de parámetros iniciales) .....  | 243 |
| Figura 174. Validación Trayectoria Coordinada (crear trayectoria vista lateral) .....    | 244 |
| Figura 175. Validación Trayectoria Coordinada (crear trayectoria vista superior) .....   | 244 |
| Figura 176. Validación Trayectoria Coordinada (posición inicial) .....                   | 245 |
| Figura 177. Validación Trayectoria Coordinada (posición final-vista lateral) .....       | 245 |
| Figura 178. Validación Trayectoria Coordinada (posición final-vista superior) .....      | 246 |
| Figura 179. Validación Trayectoria Coordinada (análisis de trayectoria) .....            | 246 |
| Figura 180. Validación Trayectoria Continua (ingreso de MTHS inicial y final) .....      | 247 |
| Figura 181. Validación Trayectoria Continua (selección de parámetros iniciales) .....    | 248 |
| Figura 182. Validación Trayectoria Continua (crear trayectoria vista frontal) .....      | 249 |
| Figura 183. Validación Trayectoria Continua (crear trayectoria vista superior) .....     | 249 |
| Figura 184. Validación Trayectoria Continua (posición inicial) .....                     | 250 |
| Figura 185. Validación Trayectoria Continua (posición final-vista frontal) .....         | 250 |
| Figura 186. Validación Trayectoria Continua (posición final-vista superior) .....        | 251 |
| Figura 187. Validación Trayectoria Continua (análisis de trayectoria) .....              | 251 |
| Figura 188. Validación de la Trayectoria Continua (manipulador real en X y Z) .....      | 252 |
| Figura 189. Validación de la Trayectoria Continua (manipulador real en y) .....          | 252 |
| Figura 190. Trayectoria Colaborativa (Translación en Y (+) y Z (+)) .....                | 253 |
| Figura 191. Translación en Y (+) y Z (+) (vista frontal) .....                           | 254 |
| Figura 192. Translación en Y (+) y Z (+) (vista lateral) .....                           | 254 |
| Figura 193. Posición inicial de los manipuladores (vista lateral) .....                  | 255 |
| Figura 194. Posición final de los manipuladores (vista lateral) .....                    | 255 |
| Figura 195. Posición final de los manipuladores (vista superior) .....                   | 256 |
| Figura 196. Translación en Y (+) y Z (+) (Análisis de grafica) .....                     | 256 |
| Figura 197. Trayectoria Colaborativa (Translación en Y (-) y Z (+)) .....                | 257 |
| Figura 198. Translación en Y (-) y Z (+) (vista frontal) .....                           | 258 |
| Figura 199. Translación en Y (-) y Z (+) (vista lateral) .....                           | 258 |
| Figura 200. Posición inicial de los manipuladores (vista lateral) .....                  | 259 |
| Figura 201. Posición final de los manipuladores (vista lateral) .....                    | 259 |
| Figura 202. Posición final de los manipuladores (vista superior) .....                   | 260 |
| Figura 203. Translación en Y (-) y Z (+) (Análisis de grafica) .....                     | 260 |
| Figura 204. Trayectoria Colaborativa (Translación en Y (+) y Z (+), rotación en z) ..... | 261 |
| Figura 205. Translación en Y (+) y Z (+), rotación en z (vista frontal) .....            | 262 |
| Figura 206. Translación en Y (+) y Z (+), rotación en z (vista lateral) .....            | 262 |
| Figura 207. Posición inicial de los manipuladores (vista lateral) .....                  | 263 |
| Figura 208. Posición final de los manipuladores (vista lateral) .....                    | 263 |

|                                                                                         |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 209. Posición final de los manipuladores (vista superior) .....                  | 264 |
| Figura 210. Translación en Y (+) y Z (+), rotación en z (Análisis de grafica) .....     | 264 |
| Figura 211. Trayectoria Colaborativa (Traslación en Y (-) y Z (+), rotación en z) ..... | 265 |
| Figura 212. Translación en Y (-) y Z (+) (vista frontal) .....                          | 266 |
| Figura 213. Translación en Y (-) y Z (+) (vista lateral) .....                          | 266 |
| Figura 214. Posición inicial de los manipuladores (vista lateral) .....                 | 267 |
| Figura 215. Posición final de los manipuladores (vista lateral) .....                   | 267 |
| Figura 216. Posición final de los manipuladores (vista superior) .....                  | 268 |
| Figura 217. Translación en Y (-) y Z (+), rotación en z (Análisis de grafica) .....     | 268 |
| Figura 218. Trayectoria Colaborativa (Traslación en Z (+), rotación en z) .....         | 269 |
| Figura 219. Translación en Z (+), rotación en z (vista frontal) .....                   | 270 |
| Figura 220. Translación en Z (+), rotación en z (vista lateral) .....                   | 270 |
| Figura 221. Posición inicial de los manipuladores (vista lateral) .....                 | 271 |
| Figura 222. Posición final de los manipuladores (vista lateral) .....                   | 271 |
| Figura 223. Posición final de los manipuladores (vista superior) .....                  | 272 |
| Figura 224. Translación en Z (+), rotación en z (Análisis de grafica) .....             | 272 |
| Figura 225. Trayectoria Colaborativa (Cuadrada) .....                                   | 273 |
| Figura 226. Trayectoria Cuadrada (vista frontal) .....                                  | 274 |
| Figura 227. Trayectoria Cuadrada (vista superior) .....                                 | 274 |
| Figura 228. Posición inicial de los manipuladores (vista lateral) .....                 | 275 |
| Figura 229. Posición final de los manipuladores (vista lateral) .....                   | 275 |
| Figura 230. Posición final de los manipuladores (vista superior) .....                  | 276 |
| Figura 231. Trayectoria Cuadrada (Análisis de grafica) .....                            | 276 |
| Figura 232. Trayectoria Colaborativa (Circular) .....                                   | 277 |
| Figura 233. Trayectoria Circular (vista frontal) .....                                  | 278 |
| Figura 234. Trayectoria Circular (vista superior) .....                                 | 278 |
| Figura 235. Posición inicial de los manipuladores (vista lateral) .....                 | 279 |
| Figura 236. Posición final de los manipuladores (vista lateral) .....                   | 279 |
| Figura 237. Posición final de los manipuladores (vista superior) .....                  | 280 |
| Figura 238. Trayectoria Circular (Análisis de grafica) .....                            | 280 |
| Figura 239. Setpoints de validación del manipulador 1 .....                             | 281 |
| Figura 240. Diagrama de bloques de las plantas que componen el manipulador 1 .....      | 282 |
| Figura 241. Constantes por defecto de fabrica de los motores .....                      | 287 |
| Figura 242. Diagrama de bloques de las plantas que componen el manipulador 2 .....      | 292 |
| Figura 243. Diseño de la metodología .....                                              | 303 |
| Figura 244. Brazo del manipulador .....                                                 | 307 |
| Figura 245. Muñeca del manipulador .....                                                | 307 |
| Figura 246. Base (primer eslabón) .....                                                 | 309 |
| Figura 247. Primer eslabón .....                                                        | 309 |
| Figura 248. Segundo eslabón .....                                                       | 310 |
| Figura 249. Tercer eslabón .....                                                        | 310 |
| Figura 250. Cuarto eslabón .....                                                        | 311 |
| Figura 251. Quinto eslabón .....                                                        | 311 |
| Figura 252. Sexto eslabón .....                                                         | 312 |
| Figura 253. Ejes de rotación .....                                                      | 312 |
| Figura 254. Sistemas de referencia del manipulador .....                                | 314 |
| Figura 255. Parámetros D-H del manipulador .....                                        | 315 |
| Figura 256. MTH Simbólica (A01) .....                                                   | 318 |
| Figura 257. MTH Simbólica (A02) .....                                                   | 318 |
| Figura 258. MTH Simbólica (A03) .....                                                   | 318 |
| Figura 259. MTH Simbólica (A04) .....                                                   | 319 |
| Figura 260. MTH Simbólica (A05) .....                                                   | 319 |
| Figura 261. MTH Simbólica (A06) .....                                                   | 320 |
| Figura 262. MTH de casa sistema de referencia .....                                     | 322 |

|                                                                                          |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 263. Implementación de la cinemática directa en el manipulador .....              | 324 |
| Figura 264. Método de Desacople Cinemático .....                                         | 325 |
| Figura 265. Método de Desacople cinemático(esquema) .....                                | 326 |
| Figura 266. Método de Desacople cinemático(desarticulado) .....                          | 327 |
| Figura 267. Plot del Manipulador (tres primeros ángulos) .....                           | 327 |
| Figura 268. Vista superior del manipulador (3 primeros DDL) .....                        | 328 |
| Figura 269. Vista lateral del manipulador (3 primeros DDL) .....                         | 329 |
| Figura 270. Geometría para el cálculo de theta 3 .....                                   | 330 |
| Figura 271. Geometría para el cálculo de theta 2 .....                                   | 332 |
| Figura 272. matrices componentes de R36 .....                                            | 334 |
| Figura 273. Matriz de rotación R36 .....                                                 | 335 |
| Figura 274. Matriz de rotación RO3 .....                                                 | 335 |
| Figura 275. Matriz de rotación R06 .....                                                 | 335 |
| Figura 276. Matriz mth_f .....                                                           | 336 |
| Figura 277. Implementación de la cinemática inversa en el manipulador .....              | 340 |
| Figura 278. Tipos de trayectoria .....                                                   | 341 |
| Figura 279. Movimiento eje a eje .....                                                   | 342 |
| Figura 280. Movimiento Simultáneo .....                                                  | 343 |
| Figura 281. Movimiento Coordinada .....                                                  | 343 |
| Figura 282. Trayectoria Continua .....                                                   | 344 |
| Figura 283. Funciones del Control Cinemático .....                                       | 346 |
| Figura 284. Panel general del cálculo y generador de trayectoria .....                   | 347 |
| Figura 285. Creación de la trayectoria eje a eje por trapezoidal (vista lateral) .....   | 349 |
| Figura 286. Creación de la trayectoria eje a eje por trapezoidal (vista superior) .....  | 349 |
| Figura 287. Visualización de la posición inicial del manipulador(vista lateral) .....    | 350 |
| Figura 288. Visualización de la posición final del manipulador(vista lateral) .....      | 350 |
| Figura 289. Visualización de la posición final del manipulador(superior) .....           | 351 |
| Figura 290. Análisis de trayectoria (Trayectoria Eje a Eje) .....                        | 351 |
| Figura 291. Creación de la trayectoria simultanea por trapezoidal (vista lateral) .....  | 352 |
| Figura 292. Creación de la trayectoria simultanea por trapezoidal (vista superior) ..... | 352 |
| Figura 293. Visualización de la posición inicial del manipulador(vista lateral) .....    | 353 |
| Figura 294. Visualización de la posición final del manipulador(vista lateral) .....      | 353 |
| Figura 295. Visualización de la posición final del manipulador(vista frontal) .....      | 354 |
| Figura 296. Análisis de trayectoria (Trayectoria simultanea) .....                       | 354 |
| Figura 297. Creación de la trayectoria coordinada por trapezoidal (vista frontal) .....  | 355 |
| Figura 298. Creación de la trayectoria coordinada por trapezoidal (vista superior) ..... | 355 |
| Figura 299. Visualización de la posición inicial del manipulador(vista lateral) .....    | 356 |
| Figura 300. Visualización de la posición final del manipulador(vista lateral) .....      | 356 |
| Figura 301. Visualización de la posición final del manipulador(vista superior) .....     | 357 |
| Figura 302. Análisis de trayectoria (Trayectoria coordinada) .....                       | 357 |
| Figura 303. Creación de la trayectoria eje a eje por cubica(vista lateral) .....         | 358 |
| Figura 304. Visualización de la posición inicial del manipulador(vista lateral) .....    | 359 |
| Figura 305. Visualización de la posición final del manipulador(vista lateral) .....      | 359 |
| Figura 306. Visualización de la posición final del manipulador(superior) .....           | 360 |
| Figura 307. Análisis de trayectoria (Trayectoria Eje a Eje) .....                        | 360 |
| Figura 308. Creación de la trayectoria simultanea por cubica (vista frontal) .....       | 361 |
| Figura 309. Creación de la trayectoria simultanea por cubica(vista superior) .....       | 361 |
| Figura 310. Visualización de la posición inicial del manipulador(vista lateral) .....    | 362 |
| Figura 311. Visualización de la posición final del manipulador(vista frontal) .....      | 362 |
| Figura 312. Visualización de la posición final del manipulador(vista superior) .....     | 363 |
| Figura 313. Análisis de trayectoria (Trayectoria Simultanea) .....                       | 363 |
| Figura 314. Creación de la trayectoria coordinada por cubica (vista lateral) .....       | 364 |
| Figura 315. Creación de la trayectoria coordinada por cubica (vista superior) .....      | 364 |
| Figura 316. Visualización de la posición inicial del manipulador(vista lateral) .....    | 365 |

|                                                                                               |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 317. Visualización de la posición final del manipulador (vista frontal)                | 365 |
| Figura 318. Visualización de la posición final del manipulador (vista superior)               | 366 |
| Figura 319. Análisis de trayectoria (Trayectoria Coordinada)                                  | 366 |
| Figura 320. Creación de la trayectoria continua por cubica (vista frontal)                    | 367 |
| Figura 321. Creación de la trayectoria continua por cubica (vista superior)                   | 368 |
| Figura 322. Visualización de la posición inicial del manipulador (vista lateral)              | 368 |
| Figura 323. Visualización de la posición final del manipulador (vista frontal)                | 369 |
| Figura 324. Visualización de la posición final del manipulador (vista superior)               | 369 |
| Figura 325. Análisis de trayectoria (Trayectoria Continua)                                    | 370 |
| Figura 326. Proceso de identificación                                                         | 372 |
| Figura 327. Representación gráfica de la Identificación mediante la Respuesta Entrada Escalón | 373 |
| Figura 328. Datos promedio del motor 1                                                        | 375 |
| Figura 329. Datos promedio del motor 2                                                        | 376 |
| Figura 330. Datos promedio del motor 2-2                                                      | 377 |
| Figura 331. Datos promedio del motor 3                                                        | 378 |
| Figura 332. Datos promedio del motor 4                                                        | 379 |
| Figura 333. Datos promedio del motor 5                                                        | 380 |
| Figura 334. Datos promedio del motor 6                                                        | 381 |
| Figura 335. Interfaz System Identificación                                                    | 382 |
| Figura 336. Partes de la interfaz System Identificación                                       | 383 |
| Figura 337. Importación de datos de identificación y validación del sistema                   | 384 |
| Figura 338. Importación de las datas en la interfaz System Identificación Toolbox             | 385 |
| Figura 339. Visualización de las datas importadas                                             | 385 |
| Figura 340. Opción modelos de procesos                                                        | 386 |
| Figura 341. Parámetros de estimación función de transferencia                                 | 387 |
| Figura 342. Visualización del Modelo                                                          | 388 |
| Figura 343. Exportación de la función de transferencia obtenida                               | 389 |
| Figura 344. función de transferencia obtenida servo 1                                         | 389 |
| Figura 345. función de transferencia obtenida motor 2                                         | 390 |
| Figura 346. función de transferencia obtenida motor 2-2                                       | 391 |
| Figura 347. función de transferencia obtenida motor 3                                         | 392 |
| Figura 348. función de transferencia obtenida motor 4                                         | 393 |
| Figura 349. función de transferencia obtenida motor 5                                         | 394 |
| Figura 350. función de transferencia obtenida motor 6                                         | 395 |
| Figura 351. Z&N para sistemas mayor a primer orden.                                           | 408 |
| Figura 352. Fórmulas para el ajuste para respuesta de razón de asentamiento                   | 408 |
| Figura 353. Diagramas de bloques para la sintonización del motor 1                            | 409 |
| Figura 354. Ubicación T1 en la data                                                           | 410 |
| Figura 355. Ubicación T2 en la data                                                           | 410 |
| Figura 356. Ubicación Tm en la data                                                           | 410 |
| Figura 357. Digrama de bloques métodos de sintonización motor 1                               | 414 |
| Figura 358. Digrama de bloques métodos de sintonización motor 2                               | 415 |
| Figura 359. Digrama de bloques métodos de sintonización motor 2-2                             | 416 |
| Figura 360. Digrama de bloques métodos de sintonización motor 3                               | 417 |
| Figura 361. Digrama de bloques métodos de sintonización motor 4                               | 418 |
| Figura 362. Digrama de bloques métodos de sintonización motor 5                               | 419 |
| Figura 363. Digrama de bloques métodos de sintonización motor 6                               | 420 |
| Figura 364. Setpoints de validación del manipulador 1                                         | 421 |
| Figura 365. Diagrama de bloques de las plantas que componen el manipulador                    | 422 |
| Figura 366. Constantes por defecto de fabrica de los motores                                  | 427 |

## LISTA DE GRAFICAS

|                                                                                                        |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Grafica 1. Salida del comportamiento del motor 1 ante el escalón de entrada.....                       | 101 |
| Grafica 2. Salida del comportamiento del motor 2 ante el escalón de entrada.....                       | 102 |
| Grafica 3. Salida del comportamiento del motor 2-2 ante el escalón de entrada.....                     | 103 |
| Grafica 4. Salida del comportamiento del motor 3 ante el escalón de entrada.....                       | 104 |
| Grafica 5. Salida del comportamiento del motor 4 ante el escalón de entrada.....                       | 105 |
| Grafica 6. Salida del comportamiento del motor 5 ante el escalón de entrada.....                       | 106 |
| Grafica 7. Salida del comportamiento del motor 6 ante el escalón de entrada.....                       | 107 |
| Grafica 8. Salida del comportamiento del motor 1 ante el escalón de entrada.....                       | 108 |
| Grafica 9. Salida del comportamiento del motor 2 ante el escalón de entrada.....                       | 109 |
| Grafica 10. Salida del comportamiento del motor 2-2 ante el escalón de entrada.....                    | 110 |
| Grafica 11. Salida del comportamiento del motor 3 ante el escalón de entrada.....                      | 111 |
| Grafica 12. Salida del comportamiento del motor 4 ante el escalón de entrada.....                      | 112 |
| Grafica 13. Salida del comportamiento del motor 5 ante el escalón de entrada.....                      | 113 |
| Grafica 14. Salida del comportamiento del motor 6 ante el escalón de entrada.....                      | 114 |
| Grafica 15. Comparacion del modelo hallado con la data real del motor 1 (91.69% de estimación) .....   | 120 |
| Grafica 16. Comparacion del modelo hallado con la data real del motor 2 (93.42% de estimación) .....   | 122 |
| Grafica 17. Comparacion del modelo hallado con la data real del motor 2-2 (94.03% de estimación) ..... | 123 |
| Grafica 18. Comparacion del modelo hallado con la data real del motor 3 (93.42% de estimación) .....   | 124 |
| Grafica 19. Comparacion del modelo hallado con la data real del motor 4 (93.17% de estimación) .....   | 125 |
| Grafica 20. Comparacion del modelo hallado con la data real del motor 5 (93.55% de estimación) .....   | 126 |
| Grafica 21. Comparacion del modelo hallado con la data real del motor 6 (93.53% de estimación) .....   | 127 |
| Grafica 22. Comparacion del modelo hallado con la data real del motor 1 (92.97% de estimación) .....   | 128 |
| Grafica 23. Comparacion del modelo hallado con la data real del motor 2 (93.4% de estimación) .....    | 129 |
| Grafica 24. Comparacion del modelo hallado con la data real del motor 2-2 (93.97% de estimación) ..... | 130 |
| Grafica 25. Comparacion del modelo hallado con la data real del motor 3 (93.59% de estimación) .....   | 131 |
| Grafica 26. Comparacion del modelo hallado con la data real del motor 4 (93.33% de estimación) .....   | 132 |
| Grafica 27. Comparación del modelo hallado con la data real del motor 5 (93.55% de estimación) .....   | 133 |
| Grafica 28. Comparación del modelo hallado con la data real del motor 6 (93.41% de estimación) .....   | 134 |
| Grafica 29. Salida de las plantas del manipulador 1 .....                                              | 135 |
| Grafica 30. Salida del controlador Tune más las constantes del controlador del motor 1 ....            | 136 |
| Grafica 31. Salida del controlador Tune más las constantes del controlador del motor 2 ....            | 137 |
| Grafica 32. Salida del controlador Tune más las constantes del controlador del motor 2-2. ....         | 138 |
| Grafica 33. Salida del controlador Tune más las constantes del controlador del motor 3 ....            | 139 |

|                                                                                                |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Grafica 34. Salida del controlador Tune más las constantes del controlador del motor 4 ....    | 140 |
| Grafica 35. Salida del controlador Tune más las constantes del controlador del motor 5 ....    | 141 |
| Grafica 36. Salida del controlador Tune más las constantes del controlador del motor 6 ....    | 142 |
| Grafica 37. Salida de los métodos de sintonización motor 1 .....                               | 153 |
| Grafica 38. Salida de los métodos de sintonización motor 2 .....                               | 154 |
| Grafica 39. Salida de los métodos de sintonización motor 2-2 .....                             | 155 |
| Grafica 40. Salida de los métodos de sintonización motor 3 .....                               | 156 |
| Grafica 41. Salida de los métodos de sintonización motor 4 .....                               | 157 |
| Grafica 42. Salida de los métodos de sintonización motor 5 .....                               | 158 |
| Grafica 43. Salida de los métodos de sintonización motor 6 .....                               | 159 |
| Grafica 44. Salida de las plantas del manipulador 2 .....                                      | 160 |
| Grafica 45. Salida del controlador Tune más las constantes del controlador del motor 1 ....    | 161 |
| Grafica 46. Salida del controlador Tune más las constantes del controlador del motor 2 ....    | 162 |
| Grafica 47. Salida del controlador Tune más las constantes del controlador del motor 2-2 ..... | 163 |
| Grafica 48. Salida del controlador Tune más las constantes del controlador del motor 3 ....    | 164 |
| Grafica 49. Salida del controlador Tune más las constantes del controlador del motor 4 ....    | 165 |
| Grafica 50. Salida del controlador Tune más las constantes del controlador del motor 5 ....    | 166 |
| Grafica 51. Salida del controlador Tune más las constantes del controlador del motor 6 ....    | 167 |
| Grafica 52. Salida de los métodos de sintonización motor 1 .....                               | 174 |
| Grafica 53. Salida de los métodos de sintonización motor 2 .....                               | 175 |
| Grafica 54. Salida de los métodos de sintonización motor 2-2 .....                             | 176 |
| Grafica 55. Salida de los métodos de sintonización motor 3 .....                               | 177 |
| Grafica 56. Salida de los métodos de sintonización motor 4 .....                               | 178 |
| Grafica 57. Salida de los métodos de sintonización motor 5 .....                               | 179 |
| Grafica 58. Salida de los métodos de sintonización motor 6 .....                               | 180 |
| Grafica 59. Salida de control del motor 1 ante perturbaciones .....                            | 283 |
| Grafica 60. Salida de control del motor 2 ante perturbaciones .....                            | 283 |
| Grafica 61. Salida de control del motor 2-2 ante perturbaciones .....                          | 284 |
| Grafica 62. Salida de control del motor 3 ante perturbaciones .....                            | 284 |
| Grafica 63. Salida de control del motor 4 ante perturbaciones .....                            | 285 |
| Grafica 64. Salida de control del motor 5 ante perturbaciones .....                            | 285 |
| Grafica 65. Salida de control del motor 6 ante perturbaciones .....                            | 286 |
| Grafica 66. Salida de control real del motor 1 ante perturbaciones (PID vs por defecto) .....  | 288 |
| Grafica 67. Salida de control real del motor 2 ante perturbaciones (PID vs por defecto) .....  | 288 |
| Grafica 68. Salida de control real del motor 2-2 ante perturbaciones (PID vs por defecto) ...  | 289 |
| Grafica 69. Salida de control real del motor 3 ante perturbaciones (PID vs por defecto) .....  | 289 |
| Grafica 70. Salida de control real del motor 4 ante perturbaciones (PID vs por defecto) .....  | 290 |
| Grafica 71. Salida de control real del motor 5 ante perturbaciones (PID vs por defecto) .....  | 290 |
| Grafica 72. Salida de control real del motor 6 ante perturbaciones (PID vs por defecto) .....  | 291 |
| Grafica 73. Salida de control del motor 1 ante perturbaciones .....                            | 293 |
| Grafica 74. Salida de control del motor 2 ante perturbaciones .....                            | 293 |
| Grafica 75. Salida de control del motor 2-2 ante perturbaciones .....                          | 294 |
| Grafica 76. Salida de control del motor 3 ante perturbaciones .....                            | 294 |
| Grafica 77. Salida de control del motor 4 ante perturbaciones .....                            | 295 |
| Grafica 78. Salida de control del motor 5 ante perturbaciones .....                            | 295 |
| Grafica 79. Salida de control del motor 6 ante perturbaciones .....                            | 296 |
| Grafica 80. Salida de control real del motor 1 ante perturbaciones (PID vs por defecto) .....  | 298 |
| Grafica 81. Salida de control real del motor 2 ante perturbaciones (PID vs por defecto) .....  | 298 |
| Grafica 82. Salida de control real del motor 2-2 ante perturbaciones (PID vs por defecto) ...  | 299 |
| Grafica 83. Salida de control real del motor 3 ante perturbaciones (PID vs por defecto) .....  | 299 |
| Grafica 84. Salida de control real del motor 4 ante perturbaciones (PID vs por defecto) .....  | 300 |
| Grafica 85. Salida de control real del motor 5 ante perturbaciones (PID vs por defecto) .....  | 300 |
| Grafica 86. Salida de control real del motor 6 ante perturbaciones (PID vs por defecto) .....  | 301 |
| Grafica 87. Salida del comportamiento del motor 1 ante el escalón de entrada .....             | 375 |

|                                                                                                       |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Grafica 88.Salida del comportamiento del motor 2 ante el escalón de entrada.....                      | 376 |
| Grafica 89.Salida del comportamiento del motor 2-2 ante el escalón de entrada .....                   | 377 |
| Grafica 90.Salida del comportamiento del motor 3 ante el escalón de entrada.....                      | 378 |
| Grafica 91.Salida del comportamiento del motor 4 ante el escalón de entrada.....                      | 379 |
| Grafica 92.Salida del comportamiento del motor 5 ante el escalón de entrada.....                      | 380 |
| Grafica 93.Salida del comportamiento del motor 6 ante el escalón de entrada.....                      | 381 |
| Grafica 94.Comparacion del modelo hallado con la data real del servo 1(91.69% de estimación) .....    | 388 |
| Grafica 95.Comparacion del modelo hallado con la data real del motor 2(93.42% de estimación) .....    | 390 |
| Grafica 96.Comparacion del modelo hallado con la data real del motor 2-2 (94.03% de estimación) ..... | 391 |
| Grafica 97.Comparacion del modelo hallado con la data real del motor 3 (93.42% de estimación) .....   | 392 |
| Grafica 98.Comparacion del modelo hallado con la data real del motor 4 (93.17% de estimación) .....   | 393 |
| Grafica 99.Comparacion del modelo hallado con la data real del motor 5 (93.55% de estimación) .....   | 394 |
| Grafica 100.Comparacion del modelo hallado con la data real del motor 6 (93.53% de estimación) .....  | 395 |
| Grafica 101.Salida de las plantas del manipulador 1 .....                                             | 396 |
| Grafica 102.Salida del controlador Tune más las constantes del controlador del motor 1 ..             | 397 |
| Grafica 103.Salida del controlador Tune más las constantes del controlador del motor 2 ..             | 398 |
| Grafica 104.Salida del controlador Tune más las constantes del controlador del motor 2-2              | 399 |
| Grafica 105.Salida del controlador Tune más las constantes del controlador del motor 3 ..             | 400 |
| Grafica 106.Salida del controlador Tune más las constantes del controlador del motor 4 ..             | 401 |
| Grafica 107.Salida del controlador Tune más las constantes del controlador del motor 5 ..             | 402 |
| Grafica 108.Salida del controlador Tune más las constantes del controlador del motor 6 ..             | 403 |
| Grafica 109.Salida de los métodos de sintonización motor 1 .....                                      | 414 |
| Grafica 110.Salida de los métodos de sintonización motor 2 .....                                      | 415 |
| Grafica 111.Salida de los métodos de sintonización motor 2-2.....                                     | 416 |
| Grafica 112.Salida de los métodos de sintonización motor 3 .....                                      | 417 |
| Grafica 113.Salida de los métodos de sintonización motor 4 .....                                      | 418 |
| Grafica 114.Salida de los métodos de sintonización motor 5 .....                                      | 419 |
| Grafica 115.Salida de los métodos de sintonización motor 6 .....                                      | 420 |
| Grafica 116. Salida de control del motor 1 ante perturbaciones.....                                   | 423 |
| Grafica 117.Salida de control del motor 2 ante perturbaciones .....                                   | 423 |
| Grafica 118.Salida de control del motor 2-2 ante perturbaciones .....                                 | 424 |
| Grafica 119.Salida de control del motor 3 ante perturbaciones .....                                   | 424 |
| Grafica 120.Salida de control del motor 4 ante perturbaciones .....                                   | 425 |
| Grafica 121.Salida de control del motor 5 ante perturbaciones .....                                   | 425 |
| Grafica 122.Salida de control del motor 6 ante perturbaciones .....                                   | 426 |
| Grafica 123. Salida de control real del motor 1 ante perturbaciones (PID vs por defecto) ...          | 428 |
| Grafica 124.Salida de control real del motor 2 ante perturbaciones (PID vs por defecto) ...           | 428 |
| Grafica 125.Salida de control real del motor 2-2 ante perturbaciones (PID vs por defecto). 429        |     |
| Grafica 126.Salida de control real del motor 3 ante perturbaciones (PID vs por defecto) ....          | 429 |
| Grafica 127.Salida de control real del motor 4 ante perturbaciones (PID vs por defecto) ....          | 430 |
| Grafica 128.Salida de control real del motor 5 ante perturbaciones (PID vs por defecto) ....          | 430 |
| Grafica 129.Salida de control real del motor 6 ante perturbaciones (PID vs por defecto) ....          | 431 |



## LISTA DE TABLAS

|                                                                                                  |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Tabla 1. Ponderación de los factores de selección morfológica .....</b>                       | <b>69</b>  |
| <b>Tabla 2. Matriz de Selección de morfologías articulares .....</b>                             | <b>72</b>  |
| <b>Tabla 3. Ponderación de los Factores de la Selección del Hardware de control .....</b>        | <b>74</b>  |
| <b>Tabla 4. Matriz de selección de la placa de desarrollo .....</b>                              | <b>78</b>  |
| <b>Tabla 5. Ponderación de los Factores de la Selección Para el Desarrollo de la HMI.....</b>    | <b>80</b>  |
| <b>Tabla 6. Matriz de selección del software de programación .....</b>                           | <b>83</b>  |
| <b>Tabla 7. Selección y especificación de componentes electrónicos y Materiales .....</b>        | <b>86</b>  |
| <b>Tabla 8. Parámetros D-H.....</b>                                                              | <b>96</b>  |
| <b>Tabla 9. Cambio de constantes de los motores del manipulador 1 .....</b>                      | <b>287</b> |
| <b>Tabla 10. Cambio de constantes de los motores del manipulador 2 .....</b>                     | <b>297</b> |
| <b>Tabla 25. tabla de parámetros de D-H del manipulador.....</b>                                 | <b>316</b> |
| <b>Tabla 12. Enumeración y diferenciación de colores (cálculo y generador de trayectorias) .</b> | <b>348</b> |
| <b>Tabla 13. Cambio de constantes de los motores del manipulador .....</b>                       | <b>427</b> |



SC-CER96940



*"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"*

Universidad de Pamplona  
Pamplona - Norte de Santander - Colombia  
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La robótica colaborativa constituye un campo de investigación amplio, debido a las grandes complejidades que tiene el desarrollo de trayectorias que faciliten el trabajo conjunto entre manipuladores. En la actualidad la industria 4.0 se enfoca en los desarrollos de fabricación inteligente, que ha permitido avances significativos en la robótica y la investigación en la inteligencia artificial (AI)<sup>1</sup>. Sin embargo, se están desarrollando investigaciones proyectadas a la industria 5.0 en aplicaciones de robótica colaborativa, buscando suplir las necesidades de que enfrentan las pequeñas y medianas empresas (PYMES) en términos de automatización, ya que estas aplicaciones permiten la reducción de costos en el empleo de robots de menor complejidad, y de mayor flexibilidad en cuanto espacio o área de trabajo y multifuncionalidad, permitiendo la integración tecnológica a este tipo de pequeñas industrias. La problemática está orientada a un enfoque productivo, dentro de las necesidades de la industria 4.0 y las necesidades de Tecno academia Cúcuta, como las nuevas tendencias de la automatización bajo la filosofía de la industria 4.0, este trabajo surge de buscar como respuesta a la necesidad de establecer una metodología clara para el desarrollo de un sistema de control dinámico de bimanipuladores que permita ejecutar trayectorias robustas ante posibles perturbaciones y que no son solucionables con el control cinemático. Así mismo se busca proporcionar unos avances análogos a nivel de estrategias de control a las aplicaciones futuras de la industria 5.0 en lo que respecta a la interacción Humano-Robot (HRI), ya que este tipo de aplicaciones que involucren el trabajo conjunto entre humanos y robots requieren sistemas de control dinámico no solo en la trayectoria ejecutada sino también en las posibles eventualidades en la ejecución de la tarea con el humano.

---

<sup>1</sup> Kadir Alpaslan Demir, Gözde Döven, Bülent Sezen. "Industry 5.0 and Human-Robot Co-working". Innovation and Entrepreneurship (WOCTINE). 2019, 689 p.

## JUSTIFICACIÓN

La realización de la metodológica investigativa que busca este proyecto, se justifica en darle continuidad a la línea de investigaciones que se han venido desarrollando Tecno academia Cúcuta, dentro de las líneas de trabajo de Tecno academia Cúcuta está la línea de ingeniería robótica, dentro de la cual ya hace un tiempo se desarrollan de manera mancomunada con la Universidad de Pamplona, proyectos enfocados en el área de diseño de manipuladores y diseño de estrategias de control de manipuladores, siendo importante para ambas instituciones que se continúen desarrollando proyectos que orienten a las nuevas tendencias de la Industria 4.0 y a los beneficios de esta revolución al desarrollo productivo del mismo, que se proyecta hacia el trabajo conjunto entre humanos y robots, gracias a los resultados significativos e investigación en inteligencia artificial (AI), así como trabajos con aplicaciones de manipuladores colaborativos que buscan sentar las bases de las futuras tareas conjuntas entre humanos y robots.

Así como también profundizar en el desarrollo del diseño e implementación de un sistema de control dinámico que involucre aplicación a la robótica colaborativa con bimanipuladores, buscando nuevas formas de interacción con el humano que va a permitir con la creación de trayectorias que realicen actividades al comportamiento humano, entonces se enfatiza en proponer una metodología para el desarrollo de un sistema de control dinámico para manipuladores colaborativos y a su vez acercándonos al objetivo que busca la industria 4.0, que es, del que el ser humano y manipuladores colaborativos creen una sinergia y trabajen de manera conjunta.

## 1 DELIMITACIÓN

### 1.1 Objetivo General

Desarrollar un sistema de control dinámico mono articular de bimanipuladores colaborativos con HMI de control para tecno academia Cúcuta.

### 1.2 Objetivo Especifico

- Estudiar las morfologías de bimanipuladores, control cinemático y métodos de control dinámico, estrategias de robótica colaborativa, normativa asociada, y herramientas necesarias para el desarrollo de interfaces graficas aplicadas en robótica colaborativa.
- Establecer los criterios de diseño del sistema de control dinámico de manipuladores colaborativos, la morfología del manipulador y como de su HMI de control.
- Seleccionar la morfología de los manipuladores, los actuadores, sensores, elementos de procesamiento, comunicación, visualización y control necesarios.
- Diseñar la estructura del manipulador, así como la de control cinemático y dinámico junto al desarrollo de la HMI que permita robótica colaborativa.
- Validar la arquitectura de control cinemático y dinámico propuesto, a través de la HMI garantizando el funcionamiento del robot colaborativo.
- Proponer una metodología para el desarrollo de control dinámico monoarticular de bimanipuladores.

### 1.3 Acotaciones

- La selección del material de los eslabones, tamaño de los eslabones, elementos de sujeción, elementos de control, cableado, entre otros componentes dependerán en gran parte de los costos que los asocia, debido a que serán autofinanciados, también se contará con el apoyo de componentes por parte de la unidad Tecno academia Cúcuta para la realización de la implementación necesaria en el desarrollo del proyecto en curso.
- Las dimensiones de los manipuladores y su espacio de trabajo, dependerán en gran parte al uso que se le pretenda dar por parte de la unidad Tecno academia Cúcuta.
- Seguir con la inclusión de la robótica colaborativa en la unidad Tecno academia Cúcuta, para ello se construirán bimanipuladores colaborativos, ya que es la mínima cantidad de manipuladores necesarios para haber un trabajo colaborativo.
- Dentro de la robótica colaborativa existen muchas dimensiones, para este caso se realizará robótica colaborativa entre robot-robot.
- Finalizada la realización del proyecto, los bimanipuladores colaborativos se ubicará en las instalaciones de Tecno academia Cúcuta. Que será para fines académicos con el enfoque de apoyar en dar los primeros pasos a la industria 5.0.

## 2 MARCO TEÓRICO

### 2.1 Contextualización

"El Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA, es un establecimiento público del orden nacional, con personería jurídica, patrimonio propio e independiente, y autonomía administrativa adscrito al Ministerio del Trabajo de Colombia. Ofrece formación gratuita a millones de colombianos que se benefician con programas técnicos, tecnológicos y complementarios que, enfocados en el desarrollo económico, tecnológico y social del país, entran a engrosar las actividades productivas de las empresas y de la industria, para obtener mejor competitividad y producción con los mercados globalizados.

La Institución está facultada por el Estado para la inversión en infraestructura necesaria para mejorar el desarrollo social y técnico de los trabajadores en las diferentes regiones, a través de formación profesional integral que logra incorporarse con las metas del Gobierno Nacional, mediante el cubrimiento de las necesidades específicas de recurso humano en las empresas, a través de la vinculación al mercado laboral -bien sea como empleado o subempleado-, con grandes oportunidades para el desarrollo empresarial, comunitario y tecnológico.

La entidad funciona en permanente alianza entre Gobierno, empresarios y trabajadores, desde su creación hace 60 años, con el firme propósito de lograr la competitividad de Colombia a través del incremento de la productividad en las empresas y regiones, sin dejar de lado la inclusión social, en articulación con la política nacional: Más empleo y menos pobreza. Por tal razón, se generan continuamente programas y proyectos de responsabilidad social, empresarial, formación, innovación, internacionalización y transferencia de conocimientos y tecnologías." <sup>2</sup>

---

<sup>2</sup> Servicio Nacional de Aprendizaje. Sena. Disponible en: < <https://www.sena.edu.co/es-co/sena/Paginas/quienesSomos.aspx> >

## 2.2 Conceptualización

### 2.2.1 Robótica

En la actualidad, la robótica es cada día más imprescindible para el desarrollo de la sociedad. Por ello, cada día es más notable la presencia de la robótica en las industrias, o a nivel doméstico en aparatos de uso cotidiano o incluso su presencia en el ámbito de la sanidad. Además, la robótica es un campo en constante desarrollo desde su creación, ya que, cada vez aparecen tecnologías más novedosas e innovadoras, que hacen posible que la industria actual avance y sea cada vez más eficiente<sup>3</sup>.

Por ende, podemos decir que la robótica es el conjunto de conocimientos teóricos y prácticos aplicado a la automatización de mecanismos articulados, con una determinada inteligencia que permite la realización de distintas tareas hechas por el ser humano y la aceleración de producción industrial<sup>4</sup>. Según una definición industrial común, un robot es un dispositivo mecatrónica programable capaz de moverse en su entorno. Las computadoras y los robots se basan en sistemas de información avanzados, pero los robots difieren de las computadoras en su capacidad de manipular físicamente o interactuar con su entorno. A diferencia de los robots industriales, que generalmente se usan en la fabricación y otras aplicaciones de ensamblaje, los robots de servicio trabajan en el sector de servicios, por ejemplo, en limpieza, servicio al cliente y búsqueda y rescate.

### 2.2.2 Estructura mecánica de un robot

Un robot es una unión de eslabones unidos mediante articulaciones en las que se permite un movimiento relativo entre ellas. Cada movimiento independiente que puede realizar una articulación respecto a la anterior se denomina grado de libertad. En la práctica, solo se asumen articulaciones prismáticas y rotacionales, y si

<sup>3</sup> Zakharyan Elizabet, "Desarrollo de aplicaciones Mediante robots colaborativos basadas en interfaces naturales hombre-máquina", 2017-18, p.19. Disponible en: <[https://m.riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/109336/X5012166Y\\_TFG\\_15363159340895530604594386092865.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://m.riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/109336/X5012166Y_TFG_15363159340895530604594386092865.pdf?sequence=1&isAllowed=y)>

<sup>4</sup> Tuuli Turja et al., "Robot acceptance model for care (RAM-care): A principled approach to the intention to use care robots", Information & Management, 2019, 103220, Disponible en: <<https://doi.org/10.1016/j.im.2019.103220>>

existiese una con mayor grado de libertad se sustituye por dos varias articulaciones separadas por longitud nula.<sup>5</sup>

### 2.2.3 Clasificación de los robots

A lo largo del tiempo, los robots han tenido y siguen teniendo una evolución continua, con el objetivo de conseguir una mejora en las características y especificaciones técnicas del robot, para que tenga un rendimiento mayor en cualquier ámbito que tenga que desenvolver su trabajo. Se puede hacer una clasificación de los robots en función de la evolución que han tenido a lo largo del tiempo. Esta clasificación se puede hacer distinguiendo tres generaciones que se detallarán más detenidamente a continuación. En primer lugar, la primera generación de robots se desarrolló alrededor de los años 50, siendo estos robots manipuladores, pero sin capacidad de ser programados por un operario humano, en cambio, si podían ser dirigidos para realizar ciertas tareas, pero no conocían el entorno en el cual desarrollaban su función. Tras esto, alrededor de los años 80 se pasa a la segunda generación (robots de aprendizaje), mediante la implantación de sistemas sensoriales en el robot manipulador, como sistemas de distancia, posición o visión, y la capacidad de ser programado anteriormente por un operario. Por otro lado, la evolución continua hasta una tercera generación, en la cual los robots ya son capaces de desenvolverse en ámbitos de trabajo complejos. Actualmente, esta generación no está completa todavía porque se siguen creando nuevos prototipos y modelos. Por último, respecto a la cuarta generación, son conocidos como robots inteligentes y aparte de recibir información del entorno para realizar la tarea, también son capaces de enviar información sobre el estado del proceso, es decir, intercambian información con la computadora de control.<sup>6</sup>

### 2.2.4 Tipos de robots

“Actualmente, existen muchos tipos de robots, con diferentes características y funcionalidades, a continuación, se detallarán los tipos de robots más conocidos y empleados.”<sup>7</sup>

<sup>5</sup> Barrientos, Antonio. Fundamentos de robótica. Madrid-España, McGRAW-HILL/INTERAMERICANA DE ESPAÑA, 2007

<sup>6</sup> Zakharyan Elizabet.Op.cit, p.20.

<sup>7</sup> Ibid, p.21.

**Robots industriales de manipulación:** Son robots con una base fija anclada a una plataforma de trabajo, Además, pueden ser multifuncionales y reprogramables, y poseen un control absoluto del entorno en el que han de desenvolver su trabajo, sobretodo en ámbitos de producción realizando tareas que requieren mucho esfuerzo físico para el operario. En este tipo de robots, se encuentra el prototipo de brazo robótico con el que se va a trabajar en este proyecto.

**Robots de servicio:** Son dispositivos controlados por ordenador, suelen ser móviles y sustituyen al hombre en procesos cotidianos. Son de uso individual, por ejemplo, los robots empleados en realizar tareas de limpieza, además, son capaces de adaptarse a cambios en el torno en el que han de desenvolverse.

**Robots médicos:** en la robótica actual, cada vez más se presente el uso de robots facilitando muchas tareas para diversas operaciones médicas, con diversos tipos de aparatos, que facilitan y aumentan la precisión de las operaciones realizadas.<sup>8</sup>

#### 2.2.5 Aspectos técnicos de un robot

Antes de profundizar en el concepto de robótica colaborativa que es el protagonista de este proyecto, hay que definir los aspectos técnicos más importantes de un robot, que son cruciales ya que influyen en la capacidad de trabajo del robot, determinando así, su eficiencia a la hora de realizar tareas dentro de una industria.

---

<sup>8</sup> Ibid, p.22-23.

Área de trabajo:

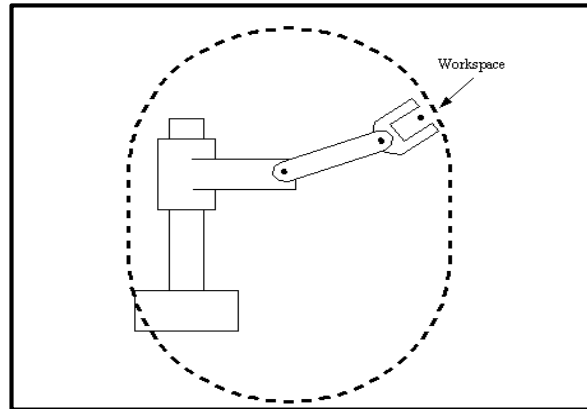


Figura 1. Área de trabajo de un robot.<sup>9</sup>

El área de trabajo de un robot es el volumen espacial que el extremo del robot puede alcanzar. Dicho de otro modo, es el espacio de trabajo de un robot dicho espacio en el cual el mecanismo puede trabajar (simple y llanamente).

Grados de libertad:

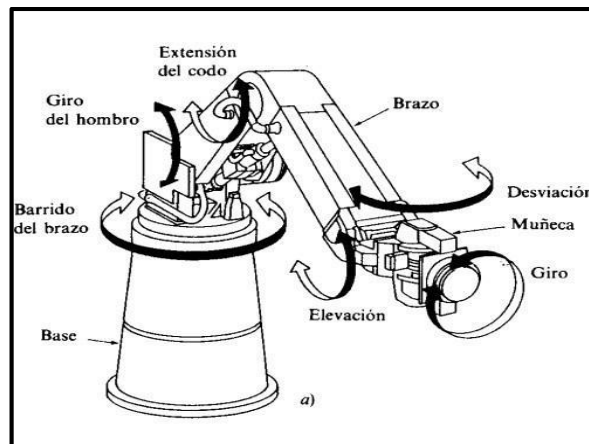


Figura 2. Grados de libertad de un robot.<sup>10</sup>

<sup>9</sup> Blog, "Características Morfológicas". Disponible en: [http://wwwassig.fib.upc.es/~rob/protegit/treballs/Q2\\_03-04/general/carmorf.htm](http://wwwassig.fib.upc.es/~rob/protegit/treballs/Q2_03-04/general/carmorf.htm)

<sup>10</sup> Blog, "Robotica", 2017, Disponible en : <https://itziassite.wordpress.com/grados-de-libertad/>

los grados de libertad es esencial para saber la capacidad de orientación que puede tener el robot de la herramienta que lleve conectada en el extremo, ya sea una pinza o cualquier otro tipo de herramienta.<sup>11</sup>

El número de grados de libertad de una cadena cinemática puede ser obtenido mediante la fórmula de Grübler, según la cual:

$$NGDL = \lambda(n - j - 1) + \sum_{i=1}^j f_i \quad (1)$$

Donde:

$\lambda$ : GDL del espacio de trabajo (Típicamente tres en el plano, seis en el espacio).

$n$ : Número de eslabones (debe incluirse el eslabón fijo o base).

$j$ : número de articulaciones.

$f_i$ : Grados de libertad permitidos a la articulación  $i$ .<sup>12</sup>

Capacidad de carga:

Este ámbito es uno de los factores más importantes a la hora de seleccionar un robot con  $x$  o  $y$  características determinado. Se define como el peso máximo que puede transportar para garantizar el correcto funcionamiento, mediante su elemento de efector final. Depende del tamaño y del peso del robot, como de su propia configuración, Además, este factor disminuye cuanto más lejos esté de la base, ya que entre más lejos de la base se crean momentos en el extremo del robot.<sup>13</sup>

Precisión:

Es el valor medio de los puntos que recorre el robot para alcanzar un punto inicial y el punto final programado, una mayor o menor precisión depende de factores como el modelo de control cinemático ya que se deben de tener en cuenta con

<sup>11</sup> Zakharyan Elizabet.Op.cit, p.26.

<sup>12</sup> Barrientos, Antonio. Fundamentos de robótica. Madrid-España, McGRAW-HILL/INTERAMERICANA DE ESPAÑA, 2007.

<sup>13</sup> Zakharyan Elizabet.Op.cit, p.27.

exactitud las distancias morfológicas de las articulaciones, Además, cuanto más alejado esté el brazo de la base, menor será su precisión ya que cuando se extiende el brazo, las imprecisiones aumentan.<sup>14</sup>

**Repetibilidad:**

La Repetibilidad es el radio que contiene los puntos por los que pasa el efector final del robot al recibir la orden de ir al mismo punto de partida ósea el punto inicial e irse al punto final. Un error se puede producir por problemas de comunicación en el sistema de transmisión de datos.<sup>15</sup>

### 2.2.6 Morfología

La morfología de un robot depende del número y el orden de las articulaciones del manipulador, también de su estructura o configuración mecánica, fundamentalmente existen ciertas estructuras clásicas en los manipuladores series, estos son: el robot cartesiano, el cilíndrico, el esférico, el articular y el scara.<sup>16</sup>

Un ejemplo claro es el robot cartesiano que se caracteriza en que sus primeras tres articulaciones son prismáticas, su espacio de trabajo es amplio, su precisión es elevada pero la velocidad de desplazamiento es baja<sup>17</sup>, este tipo de robot presenta varias aplicaciones como lo es por ejemplo un trabajo implementado que presenta un sistema interactivo capaz de producir obras de arte realistas con pintura acrílica basada en un robot cartesiano. Estos tipos de robot también se puede optimizar aumentando el número de articulaciones aumentando su rigidez cartesiana<sup>18</sup>, para esto se puede lograr utilizando el grado de libertad funcionalmente redundante.

---

<sup>14</sup> Ibid, p.27.

<sup>15</sup> Ibid, p.27.

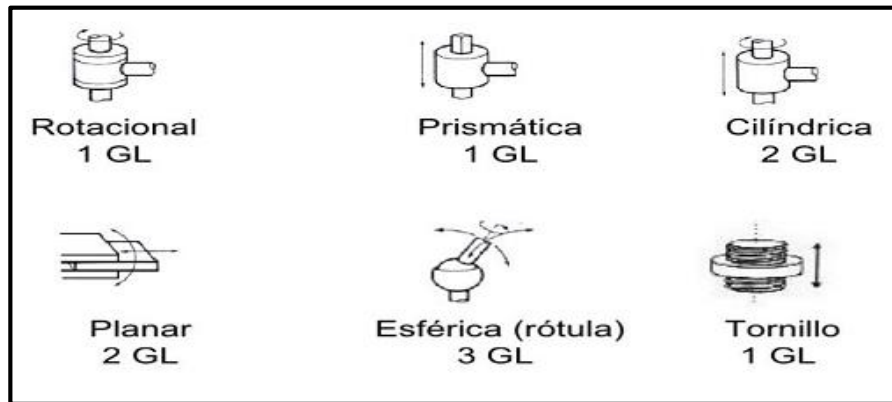
<sup>16</sup> Chedmail, P., and Ramstein, E. (1996) Robot mechanism synthesis and genetic algorithms. En Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol. 4, pp. 3466-3471.

<sup>17</sup> Otoniel Igno-Rosario et al., "Interactive system for painting artworks by regions using a robot", Robotics and Autonomous Systems, 121 (2019), 103263< <https://doi.org/10.1016/j.robot.2019.103263>>.

<sup>18</sup> Huseyin Celikag, Neil D. Sims, y Erdem Ozturk, "Cartesian stiffness optimization for serial arm robots", Procedia CIRP, 77. Hpc (2018), 566–69< <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.222>>

### 2.2.7 Tipos de articulaciones

Un robot está compuesto por una serie de elementos y un grado de libertad entre cada elemento. En cada articulación se genera un movimiento como se ha descrito previamente, existen 2 tipos de articulaciones como desplazamiento y giro<sup>19</sup>.



**Figura 3. Tipos de articulaciones.**<sup>20</sup>

**Rotacional:** Suministra un grado de libertad, gira alrededor del eje de la articulación.

**Prismática:** Un grado de libertad, translación a lo largo del eje de la articulación

**Cilíndrica:** Dos grados de libertad, uno de ellos es Rotacional y el otro prismático.

**Planar:** Movimiento caracterizado por realizar su desplazamiento en un plano, con 2 grados de libertad.

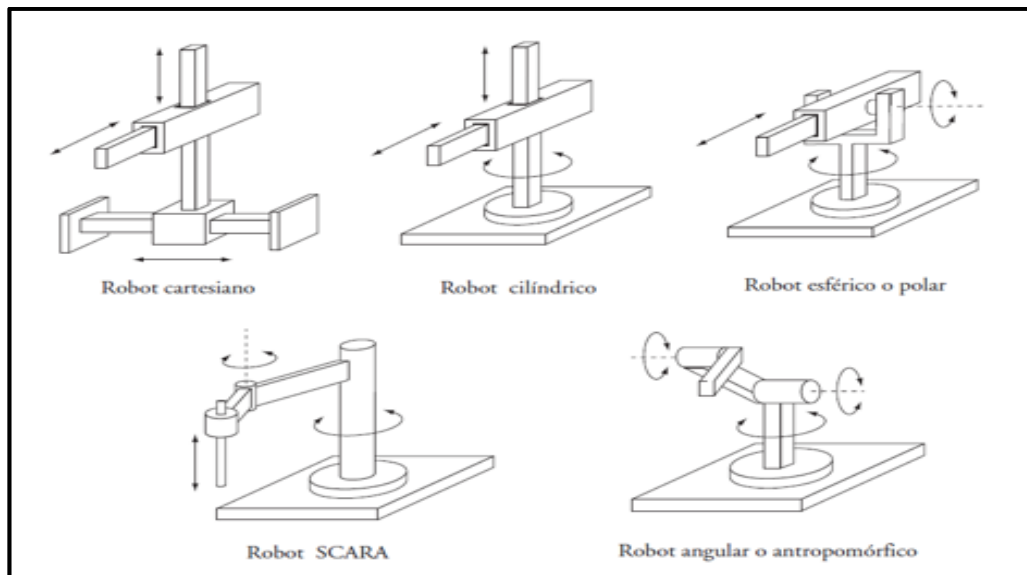
**Esférica:** Tres giros en tres direcciones perpendiculares.

<sup>19</sup> Pablo Jesus Padilla, "Diseño e implementación de un prototipo de robótica colaborativa de ensamble de producto", 2013. Disponible en: <<http://blogdetareasdepablo.blogspot.com/2014/01/historia-de-los-robots-estructura.html>>

<sup>20</sup> Mg. Samuel Oporto Díaz, "Introducción a la Robótica y Inteligencia Artificial", 2010. Disponible en: <<https://es.slideshare.net/mgarofalo85/robotica-2865379>>

## 2.2.8 Configuraciones de manipuladores robóticos

Una configuración morfológica corresponde a las diferentes combinaciones que puede presentar un manipulador, el número de grados de libertad depende de la aplicación del robot, el volumen de trabajo esperado y las localizaciones que deberá ejecutar. Entre las configuraciones más comunes y comerciales se encuentran el robot cartesiano, el robot scara y el articular. Como se pueden observar a continuación las morfologías más comunes.



**Figura 4 Morfologías robóticas más comunes.<sup>21</sup>**

## 2.2.9 Bases teóricas

Con estas son más que suficientes para poder modelar como se mueve un robot manipulador tales como la geometría, álgebra lineal y ecuaciones diferenciales. “Todo se reduce a saber describir matemáticamente posición, orientación y el

<sup>21</sup> Barrientos, Antonio. Fundamentos de robótica. Madrid-España, McGRAW-HILL/INTERAMERICANA DE ESPAÑA, 2007

movimiento de los diferentes componentes de un brazo robótico, un robot manipulador trabaja en el espacio tridimensional, de que tenga que ser referenciado en este mismo espacio. Una posición se establece de forma unívoca mediante un vector de posición con tres componentes con respecto a un sistema de referencia  $M$  siendo este el origen y el extremo la posición. Para describir la orientación de un cuerpo adjuntamos un sistema de coordenadas al cuerpo  $O$  (tres por ser tridimensional) y luego daremos una descripción de este sistema de coordenadas relativo al sistema de referencia  $M$ . Para una mejor visualización gráfica a veces se opta por representar ambos sistemas coincidentes en el origen.

En cuanto a describir un movimiento, matemáticamente lo definimos como una transformación. En robótica, una transformación total se descompone en una serie de transformaciones básicas de traslación y de rotación. Se hace uso de una traslación si lo que cambia es la posición del objeto con respecto a un sistema de referencia y/o de una rotación, si se produce un giro del objeto con respecto al sistema de referencia. Puesto que aplicar una transformación implica una multiplicación de matrices, no solo es importante el orden en que se aplican, sino que también es necesario identificar en cada transformación con respecto a que sistema se realiza<sup>22</sup>.

Todo lo anterior se reduce en que cuando se realiza una transformación, hay dos maneras de referenciarlo:

**Respecto al sistema móvil:** Cuando se referencia con respecto al sistema resultante de la transformación anterior, es decir, con respecto a la última localización del sistema transformado, la nueva transformación (una matriz homogénea) se pos multiplica respecto a las aplicadas previamente.

**Respecto al sistema fijo:** Cuando se referencia con respecto al que fue de referencia para la última transformación. En este caso, la matriz de transformación homogénea de la nueva transformación se pre multiplica sobre las transformaciones ya efectuadas.

<sup>22</sup> Dan-El Neil Vila Rosado, "El arte de diseñar robots manipuladores", 2015. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/308556685\\_El\\_arte\\_de\\_diseñar\\_robots\\_manipuladores](https://www.researchgate.net/publication/308556685_El_arte_de_diseñar_robots_manipuladores)

## 2.2.10 Estudio cinemático y dinámico

### Estudio cinemático

“El desarrollo de los modelos matemáticos que definen las cinemáticas del manipulador es el primer paso a realizar para el estudio mecánico que dará el conocimiento del comportamiento del sistema para poder controlarlo. Por ende, con la cinemática directa se podrá conocer la posición de extremo o punto final del manipulador, dado que es el punto de interés donde se encuentra el efector final (herramienta), a través de las posiciones de cada una de las articulaciones. La cinemática inversa, por el contrario, nos permite conocer las posiciones articulares de los datos de la posición y orientación del extremo del manipulador.

Entonces la cinemática es la ciencia que estudia y trata el movimiento sin tener en cuenta las fuerzas que lo causan. Dentro de la cinemática se estudia la posición, velocidad y aceleración, por lo tanto, el estudio de la cinemática de manipuladores se refiere a todas las propiedades geométricas y basadas en el tiempo de los movimientos, ya que implica entre otras cosas suponer cambios en la ubicación de los sistemas de referencia de cada articulación medida que el mecanismo se mueve.”<sup>23</sup>

### Estudio dinámico

En el subtítulo anterior que se hablaba del estudio cinemático, que se estudiaba el movimiento de los manipuladores sin tener en cuenta las fuerzas que lo causan, es decir que no tenía todas las consideraciones en cuenta, ya que las consideraciones que se tenían en cuenta eran las relaciones de posiciones y velocidades estáticas.

Caso contrario en el estudio dinámico que aborda las fuerzas, cuyo estudio o significado se conoce como dinámica, su conocimiento será necesario para tener en cuenta los factores dinámicos reales del manipulador que darán lugar a un

---

<sup>23</sup> Fidel Pérez Menéndez, “Desarrollo de sistema de control para un manipulador de seis grados de libertad”, 2014, p.22. Disponible en: <https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/29532/TFMFidelPerezMenendezProteg.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

control que tiene en cuenta que el funcionamiento del manipulador no es ideal, en las que se representa la relación entre el movimiento, las fuerzas y los pares.

“El estudio dinámico trata de definir y estudiar las características dinámicas de los manipuladores, estas características son los centros de gravedad y tensores de inercia, estos parámetros deben ser conocidos para resolver y plantear las ecuaciones de la dinámica. Al igual que ocurre con el estudio cinemático, existen dos puntos de vista a la hora de estudiar este problema, el primero de ellos consiste en que, dada una trayectoria, velocidad y aceleración del efector final, se calcules los pares que es necesario para poderse los aplicar a las articulaciones para alcanzar esos valores. A esto se le denomina como dinámica inversa y se utiliza para el desarrollo del control del manipulador, el segundo consiste en conocer el comportamiento dinámico del manipulador cuando se le aplica una serie de pares en sus articulaciones y a partir de estos pares se le calculara el movimiento resultante que estos producen, conocido también como planteamiento de la dinámica directa.”<sup>24</sup>

#### 2.2.11 Control cinemático y dinámico

##### Control Cinemático

El control cinemático es una estrategia de control que consiste en un lazo abierto donde por medio de un punto inicial y final de la trayectoria, esta es interpolada y entregando puntos intermedios desde su posición inicial llegando a la final, de esta manera es posible obtener la trayectoria deseada del robot, cuyo objetivo principal es establecer las trayectorias a seguir por cada una de las articulaciones que componen el manipulador a lo largo de un tiempo determinado para conseguir el objetivo final del usuario, estas trayectorias se seleccionarán respondiendo a las restricciones físicas propias de los accionamientos y a ciertos criterios de diseño (morfológicas).

---

<sup>24</sup> Ibid, p.46.

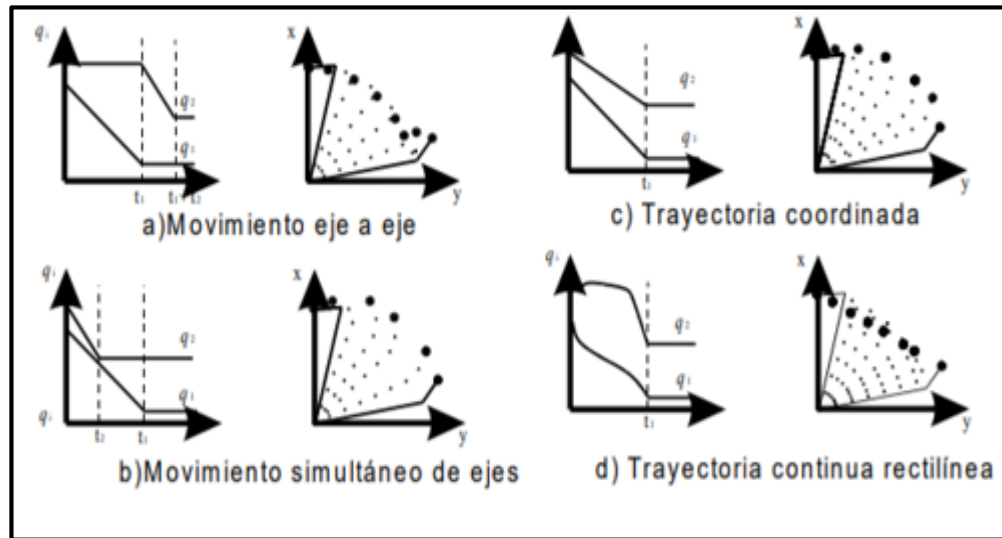


Figura 5. Trayectorias.<sup>25</sup>

## Control Dinámico

“El control dinámico en el marco de la ingeniería robótica hace referencia al modelo dinámico que tiene el robot, su objetivo es conocer qué relación existe entre el movimiento del robot y las fuerzas que son aplicadas a este. Se caracteriza por relacionar matemáticamente múltiples factores, entre estos están la localización del robot, tanto en coordenadas articulares como cartesianas, lo relaciona con las fuerzas y pares que hayan sido aplicados en las articulaciones, así mismo lo hace con los parámetros dimensionales del robot (aquí entra la longitud, las masas y las inercias entre otros) .”<sup>26</sup>

<sup>25</sup> Barrientos, Antonio. Fundamentos de robótica. Madrid-España, McGRAW-HILL/INTERAMERICANA DE ESPAÑA, 2007

<sup>26</sup> Suárez, Ayala, and Suárez., “PROPUESTA DE UNA METODOLÓGICA FORMAL PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE CONTROL CINEMÁTICO Y DINÁMICO EN MANIPULADORES INDUSTRIALES SERIALES PROPOSAL.”

### 2.2.12 Robótica colaborativa

Un robot colaborativo, es un robot capaz de trabajar en concordancia con otros robots y también con el ser humano<sup>27</sup>. Los robots colaborativos son segmentos virtuales o mecánicos, se caracterizan por tener integrado un sistema de seguridad que les permite dejar de funcionar al entrar en contacto con un operario, y trabajar codo a codo con el usuario.

Este tipo de configuración pretenden que los robots involucrados, trabajen o interactúen entre sí pero cada uno tendrá un movimiento único, la utilización de sensores es vital para un funcionamiento óptimo<sup>28</sup>, los robots colaborativos caracterizados por ser fáciles de ensamblar, como se mencionó anteriormente también son llamados cobots a diferencia de los robots industriales estos fueron diseñados para que interactúen con los operadores en un área de trabajo sin necesidad de instalar vallas de seguridad<sup>29</sup>, existen diferentes tipos en la robótica colaborativa por ejemplo guía de la mano, monitorización de la velocidad y la separación, Características fuerza limitada, limitación potencia y fuerza, Su precio es menor al de los robots industriales, por ejemplo, para las pequeñas empresas este tipo de robots tienen una mayor rentabilidad. No necesitan de técnicos especializados en el montaje y puesta en marcha, se pueden reconfigurar para que los robots trabajen en diferentes aplicaciones, y así aumentar la producción en la empresa.<sup>30</sup>

---

<sup>27</sup> Ken Goldberg, "Robots and the return to collaborative intelligence", Nature Machine Intelligence, 1.1 (2019), 2–4< <https://doi.org/10.1038/s42256-018-0008-x>>.

<sup>28</sup> Ximena Vargas, "Que es robótica colaborativa", 2013. Disponible en: <<http://computo-y-mas.blogspot.com/2013/01/que-es-robotica-colaborativa.html>>

<sup>29</sup> Jacob Pascual Pape, " Los robots colaborativos una nueva era en la automatización industrial", 2014. Disponible en: <[www.pharmatech.es/descargar\\_documento/opinion\\_2.pdf](http://www.pharmatech.es/descargar_documento/opinion_2.pdf)>

<sup>30</sup> Miime crunch, " Tipos de energía y su aplicación para el desarrollo de nuevas tecnologías como el robótico y la cibernética", 2014. Disponible en: < <http://0january.blogspot.com.co/>>

## Función y Características

El manipulador es sencillo de usar, dando como ventaja que cualquier persona con los suficientes conocimientos mínimos puede manipular el robot. Funciona de forma independiente y no necesita de la supervisión de personal adicional mientras está en funcionamiento, los robots Colaborativos son pequeños, ligeros y fáciles de usar y poseen ventajas en diferentes campos como, por ejemplo, en recursos financieros, humanos y técnicos. Fáciles de programar y sin necesidad de tener grandes conceptos en robótica, el usuario podrá programarlo a las necesidades o al tipo de aplicación en la cual quiere que el robot trabaje. Gracias a su software fácil de usar y a su sencilla interfaz gráfica amigable con el usuario.<sup>31</sup>

## Modo de colaboración – trabajo entre el hombre y la máquina

Los robots colaborativos funcionan sin vallas de seguridad. Uno de los robots con mayor robustez es CR-35iA de la compañía Fanuc, que en cuanto un operario entre en contacto con el brazo del robot y se ejerza una fuerza de al menos 150 newtons, el brazo del robot deja de funcionar automáticamente, es decir que, si el robot colisiona con el operario, se activará un paro de emergencia interrumpiendo cualquier señal que le llegue a los motores.<sup>32</sup>

“Los brazos robóticos de Universal Robots ayudan, además, a apoyar iniciativas de fabricación flexible. Tanto si es ajustándolos para operar en líneas de productos temporales como configurándolos para realizar diversas tareas en una misma línea de producción, los operarios pueden enseñar a los robots nuevos movimientos a medida que cambia el plan de producción. Así, los trabajadores pueden modificar los movimientos del robot UR sin tener que reprogramarlo tan solo usando la unidad de programación y moviendo el brazo robótico”<sup>33</sup>.

<sup>31</sup> Mathieu Belanger barette, “What Does collaborative robot mean”, 2015. Disponible en: <<http://blog.robotiq.com/what-does-collaborative-robot-mean>>

<sup>32</sup> Fanuc, “Datasheet CR-35iA.pdf”, 2015. Disponible en: <<http://www.fanuc.eu/~media/files/pdf/products/>>

<sup>33</sup> Amazings y NCYT, 2015. Disponible en: <<http://noticiasdelaciencia.com/not/13212/universal-robots-lanza-el-nuevo-ur3-el-robot-colaborativo-de-sobremesa-mas-flexible-y-ligero-de-la-industria/>>

### **3 ESTUDIAR LAS MORFOLOGÍAS DE BIMANIPULADORES, CONTROL CINEMÁTICO Y MÉTODOS DE CONTROL DINÁMICO, ESTRATEGIAS DE ROBÓTICA COLABORATIVA, NORMATIVA ASOCIADA, Y HERRAMIENTAS NECESARIAS PARA EL DESARROLLO DE INTERFACES GRAFICAS APLICADAS EN ROBÓTICA COLABORATIVA.**

En este capítulo, se plantean los diferentes tipos de morfologías más comerciales en cual se basará para el desarrollo del prototipo, evaluando sobre las ventajas y desventajas que me representa., como también los métodos del control cinemático, y control dinámico tanto control monoarticular y multiarticular desde la parte conceptual, al igual que el avance de la robótica colaborativa como su respectiva norma y su zona de control respaldada por medio de una HMI.

#### **3.1 Diseños y concepciones de morfologías de manipuladores**

##### **3.1.1 Morfología del robot cartesiano**

###### **3.1.1.1 Descripción**

Este tipo de morfología tiene como configuración tres articulaciones (PPP). La posición de cada una de las articulaciones es controlada mediante coordenadas cartesianas (x, y, z). Gracias a que los movimientos pueden iniciarse o detenerse simultáneamente en sus tres ejes el movimiento de la herramienta es mucho más suave, lo cual me permite que el robot se mueva directamente a un punto de referencia, en lugar de seguir trayectorias paralelas a cada eje.<sup>34</sup>

---

<sup>34</sup> Cristian Rodriguez, Universidad libre, "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT CARTESIANO CON UN CONTROL DE POSICIÓN PUNTO A PUNTO", Disponible en:< <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle>>

### 3.1.1.2 Ventajas y Desventajas

#### Ventajas:

- una de las ventajas de un robot cartesiano es que sus movimientos son totalmente lineales permitiendo así la implementación de controles más simples, de igual manera tienen un alto grado de rigidez mecánica precisión y Repetibilidad, pueden llevar cargas pesadas a lo largo de su campo de trabajo.

#### Desventajas:

- Se debe tener extremo cuidado en la programación del cambio de herramienta y en la secuencia de operaciones de la misma.
- Costos elevados de mantenimiento, por los sistemas electrónicos y mecánicos complejos

### 3.1.2 Morfología del robot cilíndrico

#### 3.1.2.1 Descripción

Este tipo de morfología tiene un movimiento de rotación sobre una base, una articulación prismática para la altura, y una prismática para el radio. Este robot ajusta bien a los espacios de trabajo redondos. Puede realizar dos movimientos lineales y uno rotacional, o sea, que presenta tres grados de libertad.<sup>35</sup>

---

<sup>35</sup> Robot cilíndrico y sus características, Disponible en:  
<<https://es.lambdageeks.com/cylindricalrobots/#:~:text=Ventajas%20del%20robot%20cil%C3%ADndrico,movimientos%20son%20paralelos%20entre%20s%C3%AD>>

### 3.1.2.2 Ventaja y Desventajas

#### Ventajas:

- Una de sus mayores ventajas es viajar entre los puntos requeridos más rápido que los Robots cartesianos, principalmente cuando estos dos puntos están en un radio idéntico. En ese caso, dos de los tres movimientos son paralelos entre sí.

#### Desventajas:

- Dado que los robots con un eje giratorio deben contrarrestar la inercia del objeto mientras gira.
- La rigidez mecánica general es menor porque el eje de rotación de este robot debe superar la inercia del objeto durante su rotación.
- La Repetibilidad y precisión también son menores en la dirección de rotación.

### 3.1.3 Morfología del robot esférico o polar

#### 3.1.3.1 Descripción

Este tipo de morfología tiene un volumen de trabajo de forma esférica. los robots esféricos capaces de desplazarse según diferentes trayectorias, con un número reducido de componentes y que además permiten un desplazamiento tanto rectilíneo como curvilíneo, es decir, es capaz de desplazarse en diferentes sentidos y según trayectorias distintas.<sup>36</sup>

<sup>36</sup> Universidad de Málaga. Robot esférico. Disponible en: < <http://umapatent.uma.es/es/patent/robot-esferico724/> >

### 3.1.3.2 Ventaja y Desventajas

#### Ventajas:

- Tamaño pequeño frente a otros robots del mercado, lo que hace que pueda introducirse en sitios de dimensiones reducidas.
- Posibilidad de fabricación en mayor tamaño.
- El control del movimiento del robot se lleva a cabo de una manera muy sencilla, siendo fácil su implantación.

#### Desventajas:

- en muchas ocasiones, de determinados inconvenientes, tales como que su movimiento no es continuo sino oscilatorio,
- complejo funcionamiento o necesidad de una precisión de fabricación del interior de la esfera que encarecerían su fabricación

### 3.1.4 Morfología del robot scara

#### 3.1.4.1 Descripción

Esta configuración morfológica se caracteriza por poseer 2 articulaciones rotacionales que ejercen su giro a través del eje Z, las cuales se encargan de trasladar el manipulador a lo largo del plano (X,Y) y de este modo puede ocupar cualquier punto del área de trabajo, una vez ajustada la posición X y Y, presenta una articulación prismática que desplaza el efector final en el eje Z, ajustando de esta manera la posición Z, en último lugar presenta una articulación rotacional nuevamente en el eje Z que ajusta la orientación.<sup>37</sup>

<sup>37</sup> Diseño y Elementos de máquinas, Disponible en:  
<https://machinelements.wordpress.com/2017/03/12/robot-scara/>

### 3.1.4.2 Ventaja y Desventajas

#### Ventajas:

- Los scaras son generalmente más rápidos y sencillos que los sistemas comparables de robots cartesianos.

#### Desventajas:

- presenta restricciones a la hora de ajustar la orientación del efector final, lo cual no lo hace el más indicado para un trabajo que requiera gran versatilidad en el movimiento.
- El área de trabajo es limitada a la parte inferior del robot

### 3.1.5 Morfología del robot articular (6 gdl)

#### 3.1.5.1 Descripción

Este tipo de morfología se asemeja a la de un brazo humano, presentando una especie de hombro, codo, y muñeca. Es la morfología robótica más utilizada debido a que presenta una gran versatilidad a la hora de ajustar posiciones y orientaciones en espacio. “Este modelo morfológico empieza con una rotación en el eje central Z, en donde también se produce una traslación a través del mismo eje, luego cuenta con 2 articulaciones rotacionales perpendiculares a la primera, pero paralelas entre ellas, las cuales se encargan de en gran medida ajustar la posición del manipulador, continua con otra articulación rotacional perpendicular a las dos anteriores, lo cual modifica la orientación del último eslabón, permitiéndole alcanzar un gran libertad a la hora de establecer una orientación, esta articulación viene seguida de otra que se encuentra nuevamente perpendicular a la anterior, permitiendo que el eslabón final tenga sus propios movimientos, lo cual es muy similar a que se tuviera un brazo articular de tres grados de libertad iniciando donde termina otro brazo de 3 grados de libertad.”<sup>38</sup>

<sup>38</sup> Estructura de un Robot Industrial, Disponible en: <  
<https://www.cecyl3.ipn.mx/estudiantes/plan%20continuidad/Archivo%20comprimido2/morfologia%20de%20un%20robot.pdf>>

### 3.1.5.2 Ventaja y Desventajas

#### Ventajas:

- Su versatilidad es que el manipulador puede alcanzar todas las orientaciones en un punto, Además de que la configuración las articulaciones permite ajustar la orientación a cualquier orientación del espacio tridimensional.
- El diseño del manipulador no es una tarea complicada, debido a que solo cuenta con articulaciones rotacionales.

#### Desventajas:

- El cálculo del control cinemático del manipulador es un poco más complejo debido a sus grados de libertad que el de las otras morfologías mencionadas anteriormente.

### 3.2 Contextualización del Control Cinemático

En primer lugar, se dará un breve estado del arte del control cinemático el cual consiste en la forma en que diferentes autores han tratado el control cinemático

El desarrollo de un control cinemático y dinámico combinado para manipuladores de vehículos (VMS), realizado por Louise y Kristin, nos dicen que la clase manipuladores requieren de sistemas de control cinemático para resolver la redundancia cinemático del manipulador y un control dinámico para seguir la referencia dada por el control cinemático<sup>39</sup>. Utilizan el enfoque de marco de prioridad de tareas múltiples robusto de singularidad (SRTMP) para generar una referencia de velocidad combinada con un controlador de velocidad dinámico basado en controlador de modo deslizante robusto (SMC).

Para Zhihao Xu la aplicación de los métodos convencionales de control cinemático han tenido gran éxito en la industria, sin embargo, estos métodos adolecen de varias limitaciones importantes cuando se aplican en escenarios que exigen mayores

<sup>39</sup> IDA-LOUISE G. BORLAUG, KRISTIN Y. PETTERSEN, Jan Tommy Gravdahl, "Combined kinematic and dynamic control of vehicle-manipulator systems", Mechatronics, Volume 69, 2020, 1 p.<<https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2020.102380>>

requerimientos tales como rendimiento, precisión y auto adaptación en tiempo real<sup>40</sup>. El método de resolución propuesto logra el seguimiento de espacio de tarea aun con presencia de obstáculos, utilizando el inverso jacobino calculado una red neuronal en tiempo discreto tipo Taylor.

El estudio de control cinemático descentralizado de múltiples manipuladores redundantes para el problema de ejecución de tareas cooperativas. El problema se formula como un problema de programación cuadrática restringida y luego se propone una red neuronal recurrente con módulos independientes para resolver el problema de manera distribuida. Cada módulo de la red neuronal controla un solo manipulador en tiempo real sin comunicación explícita con otros y todos los módulos juntos resuelven colectivamente la tarea común<sup>41</sup>. Para la demostración de la eficacia de método propuesto se realizan simulaciones orientadas a la aplicación.

En resumen, la cinemática de un robot estudia el movimiento del robot con respecto a un sistema de referencia sin considerar las fuerzas que intervienen, el modelo cinemático de un manipulador se divide en la cinemática directa y la cinemática inversas.

### 3.2.1 Cinemática Directa

Consiste en encontrar el valor de la posición final del manipulador, esta solución es una función de los valores articulares, En la actualidad existen diferentes métodos para resolver este problema, dando la solución en función de los valores articulares (traslación o rotación de articulaciones) con respecto al sistema de coordenadas tomado como referencia.<sup>42</sup>

<sup>40</sup> ZHIHAO Xu, SHUAI Li, XUEFENG Zhou, WU Yan, TAOBO Cheng, DAN Huang, "Dynamic neural networks based kinematic control for redundant manipulators with model uncertainties", Neurocomputing, vol 329, 2019, Pages 255-266. <<https://doi.org/10.1016/j.neucom.2018.11.001>>.

<sup>41</sup> SHUAI Li, SANFENG Chen, Bo Liu, YANGMING Li, YONGSHENG Liang, "Decentralized kinematic control of a class of collaborative redundant manipulators via recurrent neural networks", Neurocomputing, vol 91, 2012, 1-10 p. <<https://doi.org/10.1016/j.neucom.2012.01.034>>.

<sup>42</sup> osé Luis Ramírez Arias and Astrid Rubiano Fonseca, "Modelamiento Matemático de la cinemática directa e inversa de un robot Manipulador de tres grados de libertad", Disponible en: <<https://revistas.ucc.edu.co/index.php/in/article/view/47/48>>

### 3.2.2 Cinemática Inversa

La cinemática inversa de un manipulador es un término usado para denotar el cálculo de los valores articulares (ángulos de las juntas) del manipulador, necesario para posicionar un punto en el espacio referenciado al sistema de coordenadas global del manipulador. La cinemática inversa, al contrario del problema cinemático directo, no es sencilla, se dificulta al buscar la resolución de una serie de ecuaciones altamente dependientes de la configuración asignada del robot, a esto se le añade un grado de complejidad al existir más de una ecuación que dé solución al problema.<sup>43</sup> Basándonos en que el control cinemático es una estrategia de control que consiste en un lazo abierto donde por medio de un punto inicial y final de la trayectoria, esta es interpolada y entregando puntos intermedios desde su posición inicial llegando a la final, de esta manera es posible obtener la trayectoria deseada del robot, cuyo objetivo principal es establecer las trayectorias a seguir por cada una de las articulaciones que componen el manipulador a lo largo de un tiempo determinado para conseguir el objetivo final del usuario, estas trayectorias se seleccionarán respondiendo a las restricciones físicas propias de los accionamientos y a ciertos criterios de diseño (morfológicas).

### 3.2.3 Tipos de trayectoria

La mejora tecnológica ha permitido que los robots puedan realizar trayectorias cada vez más complejas, al poder ser éstas calculadas previamente. A continuación, se cita brevemente una clasificación de los tipos de trayectorias de robots comerciales clásicos

#### 3.2.3.1 Trayectorias Eje a EJE

En este tipo de trayectorias cada articulación se mueve independientemente, sin considerar el efecto del resto de las articulaciones. Dentro de este tipo se engloban las trayectorias con movimiento eje a eje y las de movimiento simultáneo de ejes. En las trayectorias con movimiento eje a eje en primer lugar se actúa sobre un motor, y cuando este ha finalizado su recorrido, se activa el siguiente motor. Este tipo de movimiento tiene como única ventaja el ahorro energético.<sup>44</sup>

---

<sup>43</sup> Ibid, p.4.

<sup>44</sup> Planificación de trayectorias, Disponible en: < <https://nbio.umh.es/files/2012/04/practica5.pdf> >

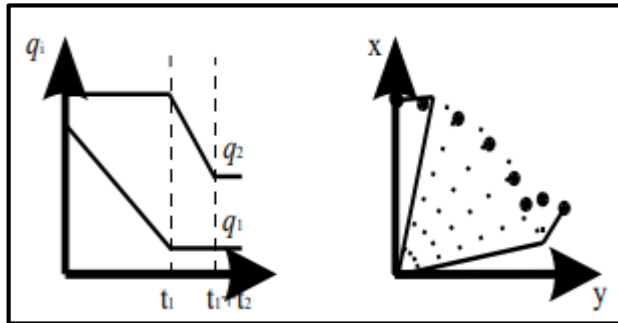


Figura 6. Movimiento eje a eje<sup>45</sup>

### 3.2.3.2 Trayectorias Simultanea

En este tipo de trayectorias el movimiento de todos los actuadores es simultaneo. Donde cada actuador por independiente logra alcanzar la posición requerida y manteniéndose hasta que el actuador que más tarde en llegar a su posición final, de manera que el movimiento es simultaneo, pero con diferentes tiempos de finalización de las otras articulaciones. El tiempo total invertido en el movimiento es el menor posible, y los requerimientos de velocidad y aceleración de los motores son menores que en otro tipo de movimiento. <sup>46</sup>

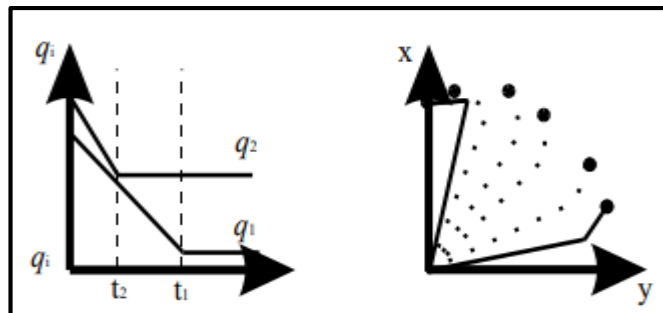


Figura 7. Movimiento simultáneo de ejes<sup>47</sup>

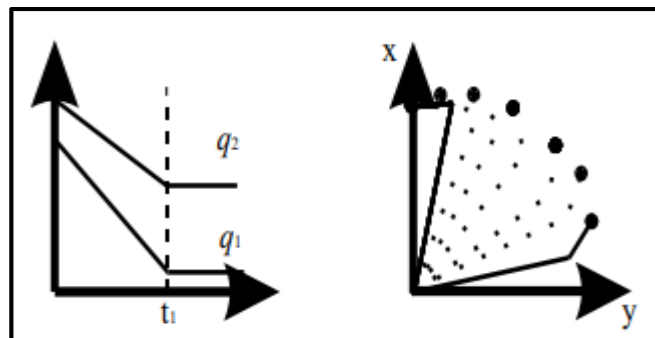
<sup>45</sup> Barrientos, Antonio. Fundamentos de robótica. Op.cit, p.284.

<sup>46</sup> Ibid, p.4.

<sup>47</sup> Barrientos, Antonio. Fundamentos de robótica. Op.cit, p.284.

### 3.2.3.3 Trayectorias Coordinada o Isócrona

En este tipo de trayectorias el movimiento de todos los actuadores sea coordinado e isócrona. Donde el actuador que tarda más tiempo en alcanzar la posición requerida ralentiza al resto de actuadores, de manera que ningún movimiento acaba antes que el de otra articulación. El tiempo total invertido en el movimiento es el menor posible, y los requerimientos de velocidad y aceleración de los motores son menores que en otro tipo de movimiento.<sup>48</sup>



**Figura 8. Trayectoria coordinada<sup>49</sup>**

### 3.2.3.4 Trayectorias Continuas

En este tipo de trayectorias se pretende que el camino seguido por el extremo del robot sea conocido. Para ello las trayectorias articulares deben acomodarse conjuntamente. Cada articulación por separado parece tener un movimiento desordenado, sin embargo, el resultado es que el extremo se mueve siguiendo el camino previsto (en línea recta).

<sup>48</sup> Ibid, p.4.

<sup>49</sup> Ibid, p.284

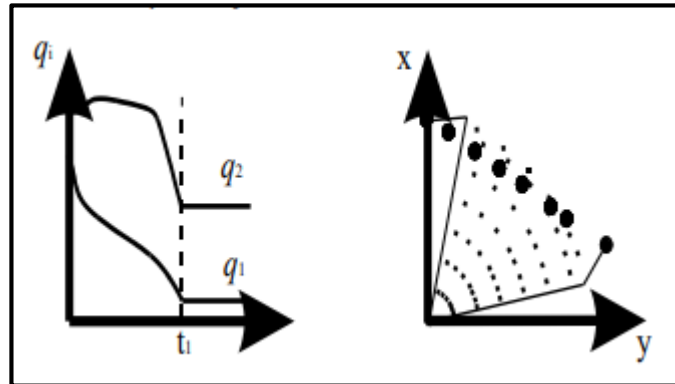


Figura 9. Trayectoria continua<sup>50</sup>

### 3.3 Contextualización del Control Dinámico

En primer lugar, se dará un breve estado del arte del control Dinámico el cual consiste en la forma en que diferentes autores han tratado el control Dinámico.

El control dinámico de los manipuladores es un problema que sigue en continua investigación, aun no se han explorado y analizado a profundidad las diferentes estrategias que permitan ejecutar tareas de mayor complejidad. La mayoría de las aplicaciones actuales de manipuladores se basan en el desarrollo de estrategias de control cinemático. Sin embargo, estos enfoques no están explorando la rica dinámica que implica un manipulador<sup>51</sup>.

El control dinámico para un robot de brazo doble desarrollado por Meiling Wang, En comparación con el sistema de robot de un solo brazo, el robot de doble brazo tiene la capacidad de realizar una destreza y cooperación similares a las humanas. La operación cooperativa de brazo doble ha atraído cada vez más la atención en aplicaciones industriales, como en el ensamblaje de piezas complejas, tareas de fabricación y manipulación de objetos. En este proyecto se propone un método de control unificado. A diferencia de los controladores dinámicos tradicionales, donde la resolución de redundancia independiente se obtiene basándose en niveles

<sup>50</sup> Ibid, p.284

<sup>51</sup> TG THURUTHEL, E. Falotico, F. Renda y C. Laschi, "Aprendizaje por refuerzo basado en modelos para el control dinámico de bucle cerrado de manipuladores robóticos blandos", en IEEE Transactions on Robotics, 2019, 1 p.

particulares de velocidad o aceleración, aquí los dos controladores dinámicos se mejoran combinando una forma cerrada de solución cinemática inversa con niveles de velocidad y aceleración<sup>52</sup>.

Para Balestrino el control dinámico de los manipuladores robóticos se caracteriza por dos niveles. El primero requiere transformaciones de coordenadas para convertir la ruta deseada de espacio cartesiano a articular. El segundo requiere el cálculo de entradas de par generalizadas a partir del conocimiento del modelo dinámico del manipulador. Los problemas en ambos niveles son difíciles de resolver debido a las elevadas no linealidades, variaciones paramétricas e inexactitudes que se producen. Usando leyes de control de adaptación, válidas para plantas no lineales variables en el tiempo, se desarrolla una técnica de control robusta en el segundo nivel que obliga al manipulador controlado a seguir el comportamiento de un sistema invariante en el tiempo lineal desacoplado<sup>53</sup>.

Para Peres Fidel el problema con el control de manipuladores es determinar entradas conjuntas necesarias para hacer que el efector final ejecute un movimiento ordenado. Estas entradas pueden ser de tipo fuerzas conjuntas o pares, siendo estos parámetros de entrada a los actuadores. Hay muchas técnicas de control y metodologías que se pueden usar para el control de los manipuladores, siendo el método elegido particularizado a la tarea que se desea ejecutar con el manipulador, esto debido a que el método aplicados pueden repercutir significativamente en el rendimiento de la tarea ejecutada e inclusivamente la parte mecánica influye notablemente<sup>54</sup>.

### 3.3.1 Control Mono articular

El control mono articular, donde se establece y se recalca que para este tipo de control cada articulación debe de tener una componente reductora, porque entre más alta sea la velocidad más alta será la inercia y hace que se caiga el control mono articular. Es importante resaltar las características mecánicas del

<sup>52</sup> MEILING WANG, Minzhou Luo, Tao Li, Marco Ceccarelli, "A Unified Dynamic Control Method for a Redundant Dual Arm Robot", Journal of Bionic Engineering. 2015, Vol 12.< [https://doi.org/10.1016/S1672-6529\(14\)60128-1](https://doi.org/10.1016/S1672-6529(14)60128-1)>.

<sup>53</sup> A. BALESTRINO, G. De Maria, L. Sciavicco, "Robust Control of Robotic Manipulators", IFAC Proceedings Volumes, vol 17, Issue 2, 1984, p 2435-2440.< [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)61347-8](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)61347-8)>.

<sup>54</sup> PEREZ MENDEZ, Fidel. "Desarrollo de un sistema de control dinámico para un manipulador de seis grados de libertad". Universidad de Oviedo. España. 2014., 60 p.

manipulador, las cuales son peso, dimensiones, tipo de actuadores, entre otras, ya que estas influirán directamente con el tipo de control a utilizar.

En nuestro caso de los servomotores a DC, su dinámica es lineal y fácil de comprender, y el efecto de la reductora es suficientemente grande para desacoplar el sistema reduciendo la inercia de acoplamiento entre articulaciones. No obstante que no sea realista del todo, pero si aceptable (considerando la pérdida de prestaciones), abordaremos la estrategia de control más simple control independiente de articulación. En este tipo de controlador cada eje del manipulador es controlado por un sistema SISO. Todos los demás efectos provocados por acoplamientos entre articulaciones son considerados como perturbaciones.<sup>55</sup>

### 3.3.2 Control Multiarticular

El control multiarticular se define por considerar al robot como un sistema multivariable. En él, la suposición de que el par( $\tau$ ) hace referencia a la influencia del resto de las articulaciones sobre el control de una sola articulación, y no sería válida pues los accionamientos sin reductor ni velocidades elevadas, entonces se debería considerar el sistema como multivariable y acoplado, lo cual eleva la complejidad del estudio <sup>56</sup>, en el cual no es el tema de estudio que aborda este proyecto.

### 3.4 Interfaz- Hombre- Maquina

Se ha demostrado que la locomoción al caminar es una técnica adecuada para el movimiento autónomo en un terreno irregular. Sin embargo, los escenarios naturales pueden ser extremadamente complejos y se requiere la intervención humana con regularidad. En tal caso, un sistema de diálogo conocido como interfaz hombre-máquina (HMI) es esencial para la interrelación entre el hombre y la máquina. En el artículo realizado por González de Santos busca el desarrollo una HMI para un robot de cuatro patas basándose en una interfaz multimodal que integra algunas ideas del control colaborativo. Para el desarrollo de esta interfaz se incluye

<sup>55</sup> Pablo Costas Franco, UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID, "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MANIPULADOR ROBÓTICO DE BAJO COSTE", Madrid, septiembre 2017, Disponible en: < [https://oa.upm.es/48175/1/TFG\\_PABLO\\_COSTAS\\_FRANCO.pdf](https://oa.upm.es/48175/1/TFG_PABLO_COSTAS_FRANCO.pdf)>

<sup>56</sup> Trabajo Fin De Grado, "Control Dinámico Multiarticular Con Optimización Aplicado Al Robot TIAGo," 2019.

algunos métodos de planificación de o definición de trayectorias adaptado al robot andante SILO4.<sup>57</sup>

El control cognitivo es un nuevo método para el control interactivo humano-máquinas de trabajo autónomas, especialmente robots de servicio. en el método de control cognitivo considerado en el modelado del entorno. Suomela y Halme nos dicen que la definición y el control de la tarea se realizan de forma interactiva entre el operador y la máquina utilizando métodos de comunicación, que son fáciles de reconocer para ambas partes. la cognición humana y la máquina son fundamentalmente diferentes, lo que se ha tenido en cuenta al diseñar el (HMI). el modelado y la definición de tareas solo son posibles cuando el operador y la máquina están en el mismo nivel de cognición, es decir, comprenden el entorno y los objetos objetivo de manera similar. el control del robot se basa en el habla y los gestos humanos en lugar del control del teclado o del joystick. el robot también puede responder usando el habla y los gestos. cuando tanto el operador como el robot comprenden el entorno y los objetos de trabajo de manera similar, pueden comunicarse con conceptos y la tarea de trabajo se puede completar en colaboración<sup>58</sup>.

La tendencia en la robotización es el uso cada vez más frecuente de robots industriales en las pequeñas y medianas empresas (PYMES). Es por eso que Thomessen y Kosicki decidieron demostrar una nueva metodología y tecnología para HMI remotas basadas en la Comunicación de Informática Cognitiva que aumenta la eficiencia de la comunicación entre un sistema de robot industrial y un operador remoto que ejerce el control sobre el sistema. Es este estudio se realizó debido a la cantidad de información importante que debe comunicarse para respaldar de manera eficiente un sistema de robot industrial ya que la adquisición de datos tradicional y las interfaces hombre-máquina (HMI) no pueden proporcionar una descripción general completa y eficaz del estado de la celda del robot<sup>59</sup>.

<sup>57</sup> ESTREMER, J. GARCIA, E. GONZALEZ DE SANTOS, P. "A Multi-Modal and Collaborative Human-Machine Interface for a Walking Robot". Journal of Intelligent and Robotic Systems. JOUR. 2002.

<sup>58</sup> JUSSI Suomela, AARNE Halme, "Cognitive Human Machine Interface of Workpartner Robot", IFAC Proceedings Volumes, Volume 34, Issue 19, 51-56 p.< [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)33112-9](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)33112-9)>.

<sup>59</sup> Prof. TRYGVE THOMESSEN, MSc TOMASZ KOSICKI, "Multimodal human-machine interface for remote operation of robot systems", IFAC Proceedings Volumes. vol 45, Issue 22, 2012, p 811-815. < <https://doi.org/10.3182/20120905-3-HR-2030.00138>>.

### 3.5 Avances de la robótica colaborativa

la robótica colaborativa actualmente está creando muchas aplicaciones, una de sus ramas más fuertes y en la que más se enfoca en sistemas de salud, tal es el ejemplo de robots colaborativos afectivos interconectados hacia un asistente de salud autónomo<sup>60</sup>, proponiendo un algoritmo de asignación de tareas de búsqueda basado en el contagio emocional (PTA-CE), sus resultados experimentales basados en simulaciones demuestran que la mayor contribución entre todos los tipos de robots a un grupo es el tipo franco, mientras que los robots simpáticos e indiferentes tienen poco efecto en el progreso del grupo. Además, se muestra que el contagio emocional impacta positivamente en la asignación de tareas y la eficiencia del algoritmo propuesto es competitiva con los métodos más modernos.

Los robots colaborativos actualmente se emplean ampliamente en la industria de manufactura, por ejemplo, el diseño y control colaborativo de tirebot<sup>61</sup>, un asistente robótico que ayuda a los operadores de talleres de neumáticos en el proceso de reemplazo de ruedas. Por otro lado, tenemos a aura, es el primer robot colaborativo de alta carga jamás diseñado, se basa en la comunicación redundante entre una combinación de sensores colocados en la superficie externa, capaces de detectar la proximidad humana. Otra rama importante es la aplicación de estos robots en la agricultura<sup>62</sup>, centrándose en mejorar la mano de obra, la agilidad, la eficiencia y la seguridad de los cultivos. Los robots agrícolas son típicamente sistemas autónomos o semiautónomos que se pueden operar en varias etapas del proceso para resolver problemas exigentes. Los robots agrícolas se han implementado con éxito para tareas repetitivas, tratando de reducir la carga de trabajo del agricultor y optimizar los tiempos y costos del proceso. Actualmente se siguen observando grandes avances en diferentes áreas de la robótica desde el diseño de hardware y

<sup>60</sup> Baofu Fang et al., "Collaborative task assignment of interconnected, affective robots towards autonomous healthcare assistant", *Future Generation Computer Systems*, 92 (2019), 241–51 <<https://doi.org/10.1016/j.future.2018.09.069>>.

<sup>61</sup> Alessio Levratti et al., "TIREBOT: A collaborative robot for the tire workshop", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 57, December 2018 (2019), 129–37, <<https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.11.001>>.

<sup>62</sup> Juan P. Vasconez, George A. Kantor, y Fernando A. Auat Cheein, "Human–robot interaction in agriculture: A survey and current challenges", *Biosystems Engineering*, 179 (2019), 35–48 <<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.12.005>>

mecatrónica, desde los algoritmos de percepción, control y autonomía, hasta las capacidades de planificación, aprendizaje y razonamiento.

### 3.6 Normativa asociada en robótica colaborativa

#### 3.6.1 Norma ISO 10218-1

La norma ISO 10218-1 en su apartado 5.3.8.3 define 4 modos de trabajo diferentes para los robots diseñados para trabajar de manera colaborativa<sup>63</sup>.

#### **Modo 1: Parada monitorizada de seguridad (Safety-rated monitored stop)<sup>64</sup>**

- El robot debe de tener una función de parada segura monitorizada con PL “d”.
- La parada puede realizarse con una función de parada de categoría 0, 1, o 2 de acuerdo con IEC 60204-1 (EN 60204-1).
- El robot debe detenerse y permanecer parado cuando una persona se encuentra en el espacio colaborativo de trabajo.
- El robot puede continuar (reiniciar) su tarea de manera automática cuando la persona abandone el espacio colaborativo de trabajo.
- Una vez realizada, la parada debe monitorizarse continuamente por el sistema de mando relativo a la seguridad.

<sup>63</sup> Otto Görnemann, “Seguridad de los Robots Colaborativos”, 2017. Disponible en: [https://www.osalan.euskadi.eus/contenidos/informacion/ponencias\\_jt170720\\_cursoverano/es\\_def/adjuntos/ponencia\\_jt170720\\_otto\\_goernemann.pdf](https://www.osalan.euskadi.eus/contenidos/informacion/ponencias_jt170720_cursoverano/es_def/adjuntos/ponencia_jt170720_otto_goernemann.pdf)

<sup>64</sup> Ibid, p.20.

## Modo 2 : Guiado Manual<sup>65</sup>

- El robot debe de tener una función de parada segura monitorizada con PL “d”.
- La parada puede realizarse con una función de parada de categoría 0, 1, o 2 de acuerdo con IEC 60204-1 (EN 60204-1).
- El robot debe detenerse y permanecer parado cuando una persona se encuentra en el espacio colaborativo de trabajo.
- El robot puede continuar (reiniciar) su tarea de manera automática cuando la persona abandone el espacio colaborativo de trabajo.
- El robot debe de tener funciones de limitación de ejes y velocidades con PL “d”.
- Las operaciones del robot solo deben ser posibles accionando un mando de validación y con velocidad reducida de manera segura (PL “d”). La velocidad ha de ser lo suficientemente baja para no ocasionar daño alguno.

## Modo 3: Control monitorizado de la velocidad y separación<sup>66</sup>

- Requiere un robot(s) específicamente diseñado(s) para este modo particular de operación.
- La reducción de riesgo se alcanza limitando la potencia y/o la fuerza de la manera siguiente:
  - Diseño mecánico inherentemente seguro (p. e. motores de bajo par, embragues de fricción, válvulas reductoras).
  - Funciones de seguridad de limitación (PL “d”) no parametrizables (p. e. fuerza y par de momento).
  - Dispositivos de protección sensibles (PSPE) a la presión con fuerza de actuación reducida. (PL “d”).

<sup>65</sup> Ibid, p.24.

<sup>66</sup> Ibid, p.27.

- Dispositivos electro sensible (ESPE) para anticipar colisiones y reducir las fuerzas resultantes. (PL “d”).

#### **Modo 4: Limitación de fuerza y potencia<sup>67</sup>**

- La reducción de riesgo se alcanza manteniendo la separación (distancia mínima) entre la persona (operador) y el robot, ya sea reduciendo la velocidad del robot a alterando su trayectoria.
- Se requiere la detección de personas en el espacio colaborativo de trabajo. (PL “d”).
- El robot debe de tener una función de parada segura monitorizada (PL “d”).
- El robot debe de tener funciones de limitación de ejes y velocidades (PL “d”).
- Cuando no sea posible (pe. por un fallo) mantener la distancia mínima entre la persona(s) y el robot (s) en el espacio colaborativo de trabajo se deberá iniciar una parada de protección.
- La función de parada puede ser de categoría 0, 1, o 2 de acuerdo con IEC 60204-1 (EN 60204-1).
- Una vez realizada, la parada debe monitorizarse continuamente. Un fallo que lleve a la perdida de la función de parada o de su monitorización debe iniciar inmediatamente una parada de categoría 0.
- El robot puede continuar (reiniciar) su tarea automáticamente cuando la persona abandone el espacio colaborativo de trabajo.
- Todas las personas presentes en el espacio colaborativo deben ser detectadas. Si esto no es posible (imposibilidad o restricción técnica, fallo de detección) se deberá iniciar una parada de protección.

<sup>67</sup> Ibid, p.36.

### 3.6.2 Normativas generales y específicas en el campo de la robótica colaborativa

Numerosos estudios han demostrado que muchos accidentes relacionados con robots ocurren fuera de las operaciones de producción, por este motivo la seguridad es un prerequisite fundamental en el diseño de productos, máquinas y especialmente lugares de trabajo colaborativos. Las normas principales a tener en cuenta en seguridad en maquina son.<sup>68</sup>

- ISO 12100:2012 Seguridad de las máquinas. Principios generales para el diseño, evaluación del riesgo y reducción del riesgo.
- ISO 10218-1 Robots y dispositivos robóticos. Requisitos de seguridad para robots industriales.
- ISO 10218-2. Robots y dispositivos robóticos. Requisitos de seguridad para robots industriales.
- ISO 11161. Seguridad de las máquinas. Sistemas de fabricación integrados. Requisitos fundamentales.
- ISO 13849-1 Seguridad de las máquinas: Partes de los sistemas de mando relativas a la seguridad. Parte 1. Principios generales de diseño.
- ISO 13850:2016. Seguridad de las máquinas. Función de parada de emergencia. Principios para el diseño.
- ISO 13851. Seguridad de las máquinas. Dispositivos de mando a dos manos. Aspectos funcionales y principios para el diseño. ISO 13855:2010. Seguridad de las máquinas. Posicionamiento de los protectores con respecto a la velocidad de aproximación de partes del cuerpo humano.
- IEC 61508-1 Seguridad funcional de los sistemas eléctricos/electrónicos/electrónicos programables relacionados con la seguridad.
- IEC 60204-1:2007. Seguridad de las máquinas. Equipo eléctrico de las máquinas. Parte 1: Requisitos generales.

<sup>68</sup> Miguel Mariscal Saldaña, "Normativa de Robots Colaborativos y su influencia en la Prevención de Riesgos Laborales", 2019. Disponible en: <<https://www.prevencionintegral.com/canal-orp/papers/orp-2019/normativa-robots-colaborativos-cobots-su-influencia-en-prevencion-riesgos-laborales>>

#### **4 ESTABLECER LOS CRITERIOS DE DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL DINÁMICO DE MANIPULADORES COLABORATIVOS, LA MORFOLOGÍA DEL MANIPULADOR Y COMO DE SU HMI DE CONTROL.**

En este capítulo, se establecerá los criterios en cuanto a la estrategia de control dinámico, como también se establecerá los parámetros necesarios para el diseño de la morfología de los manipuladores y las condiciones mínimas necesarias en la generación de la HMI en las etapas de control de trayectorias de los bimanipuladores.

##### **4.1 Parámetros de diseño de la morfología**

Como se sabe la finalidad de este proyecto es aportar un banco de aprendizaje a la unidad Tecno academia Cúcuta, por lo que desde el principio se contaba con que tipos de actuadores se iban a implementar en la construcción de los manipuladores, a partir de eso se establece una serie de parámetros para el diseño:

1. Establecer la morfología de los manipuladores, ya que dichas morfologías pueden presentar diferentes tipos de configuración de acuerdo a las necesidades que se requiera implementar, por lo que se hace necesario realizar un estudio morfológico en el cual se definen las articulaciones que presentará el manipulador y sus ángulos de trabajo.
2. Realizar los respectivos diseños CADs de las articulaciones de los manipuladores y de los elementos aportados por Tecno academia Cúcuta (servomotores) en donde se puede evidenciar su forma y volumen, para que a la hora del ensamblaje no se presenten inconvenientes.
3. Diseñar elementos requeridos como las bases de los servomotores, así como las bases donde se ubicarán los efectores finales que no se encuentren entre los elementos aportados por tecno academia Cúcuta, también la adquisición de elementos como (rodamientos, tornillería, etc.) de elementos que sirvieran de acople entre las piezas(eslabones).

#### 4.2 Condiciones necesarias en la generación del control dinámico(mono-Articular)

los procesos más usados en los sistemas de control han sido descritos por funciones de transferencia que fueron obtenidas aplicando los principios fundamentales de física para una buena descripción del proceso, en la práctica (como en este caso), muchos de los procesos que son controlados son muy difíciles de describir por la aplicación de estos principios. Ya que Por medio de pruebas experimentales se puede identificar la naturaleza de la dinámica de los procesos y obtener un modelo del proceso para usarse en el diseño de sistemas de control.

En este caso para la identificación, se hará uso de condiciones como se muestra en la Figura 10, donde de los servos(actuadores) se pretende obtener un modelo matemático, el cual me represente el conocimiento del sistema a través de relaciones entrada y salida Correspondiente con la clásica representación caja negra.

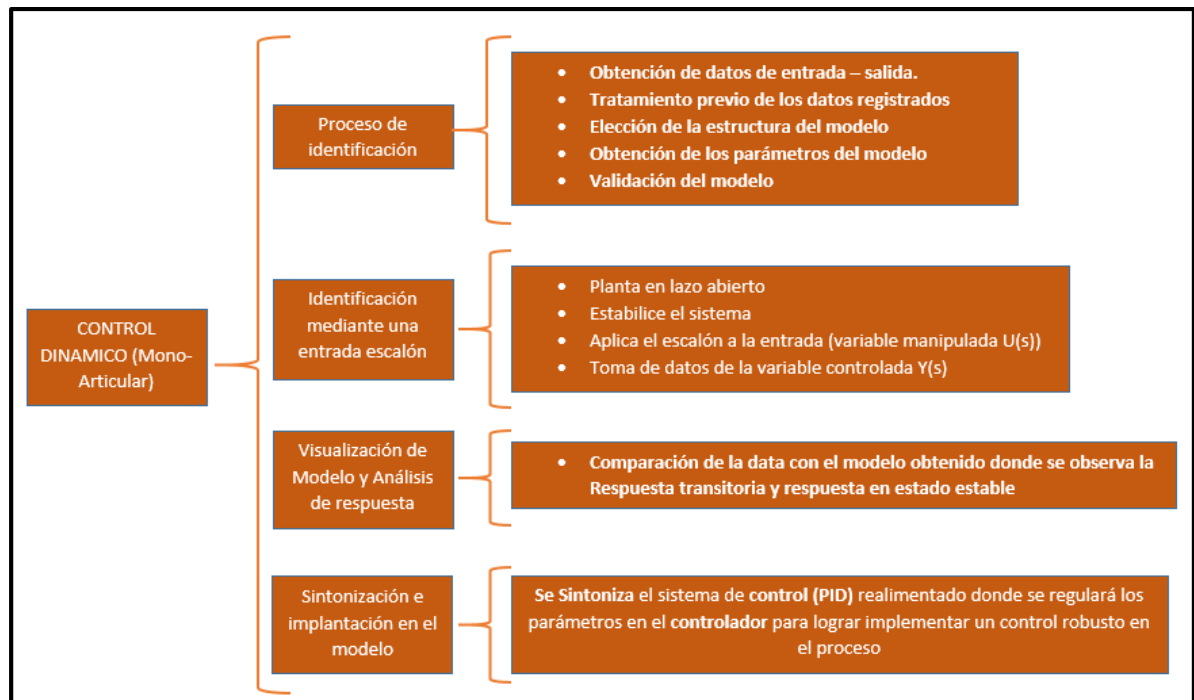
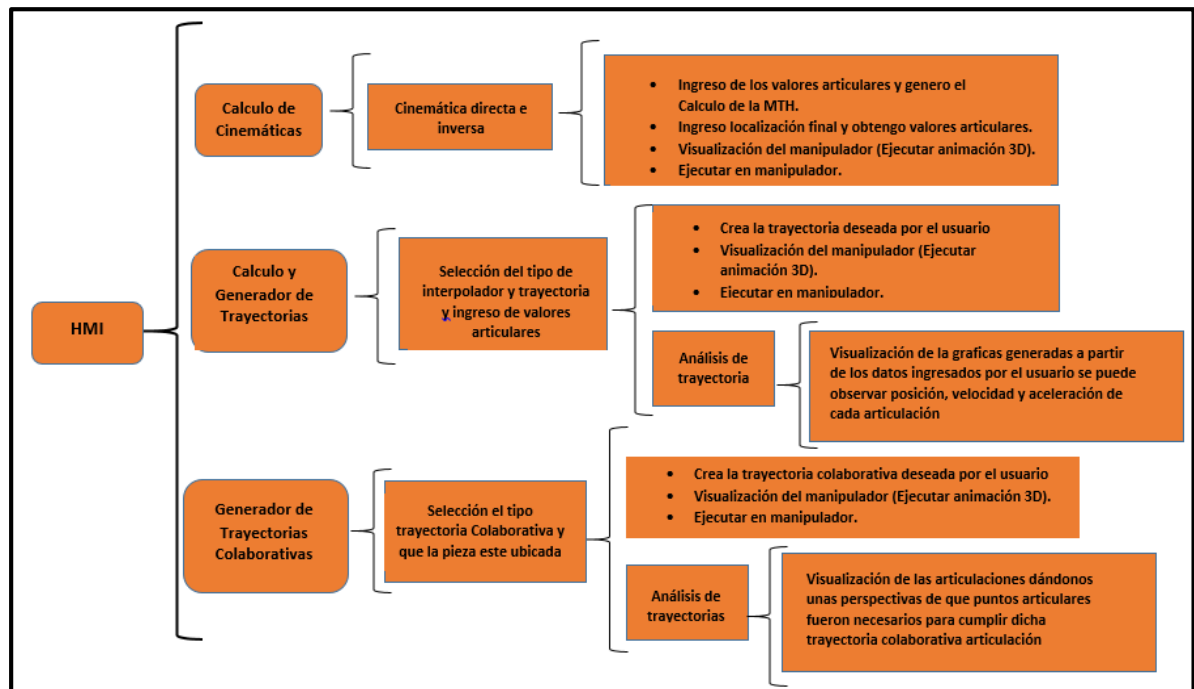


Figura 10. Condiciones necesarias en la generación del control dinámico(mono-Articular)

#### 4.3 Condiciones necesarias en la generación de la HMI

Para las condiciones necesarias (Figura 11) se debe de entender que las HMI se pueden relacionar como una ventana de desarrollo de software en la cual se ven los mímicos de los objetos y elementos que conforman un proceso determinado en este caso el desarrollo de robótica colaborativa, dichas ventanas pueden estar en paneles o botones especiales para operadores que me relacionan modalidades o modo que estén relacionados con la ventana principal. Ahora estas señales o datos que me genera la HMI son conducidas hasta llegar a la tarjeta de entrada y salida del ordenador(computadora), Cabe de resaltar que las tarjetas programables deben mantener una comunicación que entienda de la HMI. Dicho esto, se procederá a la realización de un cuadro sinóptico donde quede más claro las condiciones o modos que debe de contar para el diseño de la HMI, con el objetivo de darle cumplimiento en las etapas de control de trayectorias de los bimanipuladores.



**Figura 11. Condiciones Necesarias en la Generación de la HMI**

## **5 SELECCIONAR LA MORFOLOGÍA DE LOS MANIPULADORES, LOS ACTUADORES, SENSORES, ELEMENTOS DE PROCESAMIENTO, COMUNICACIÓN, VISUALIZACIÓN Y CONTROL NECESARIOS.**

En este capítulo, se seleccionarán de los diferentes tipos de morfologías más comerciales en cual se basará para el desarrollo del prototipo dependiendo de su área de trabajo, así como también la selección del software que se va implementar y hardware de adquisición y procesamiento, mediante el uso de matrices de selección. al igual como los actuadores y demás componentes necesarios (tanto estructural como electrónicos) para dicho control.

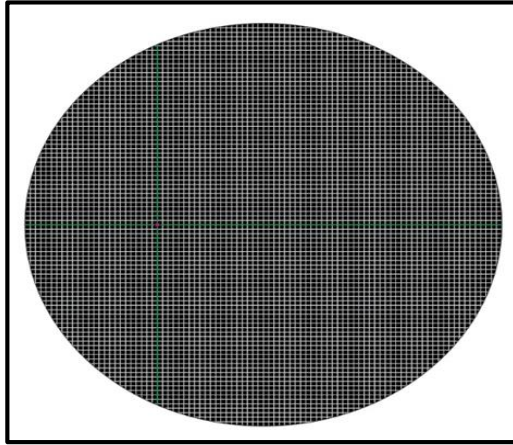
### **5.1 Selección de la morfología**

Antes de la selección del tipo de morfología en la cual será la composición del prototipo de robótica colaborativa, es importante tener en cuenta el volumen de trabajo en tecno academia (Cúcuta) el cual será un elemento fundamental a la hora de dicha selección ya que la realización será con fines académicos.

### **5.2 Volumen de trabajo (montaje físico)**

Cuando se habla de volumen de trabajo tanto en la parte estructural, se debe de tener en cuenta: las piezas o pieza a transportar, dimensiones de los eslabones, como elementos de sujeción, etc. Teniendo en cuenta lo anterior y sabiendo que el prototipo de robótica colaborativa se desarrolló con el objetivo de ser una herramienta de aprendizaje para los aprendices de Tecno academia, su tamaño debe adecuarse a las instalaciones ubicadas en esta.

Ahora bien, si tenemos en cuenta que el módulo quedará a la altura de una mesa promedio de estudio, lo cual no tendrá inconvenientes con los límites del aula la cual es excesiva para el desarrollo del prototipo definirá uno menor. Por ende, se trabajará sobre una base(circular) de 90 centímetros de diámetro, en el cual el espacio de trabajo de cada manipulador será una semiesfera de 25 centímetros.



**Figura 12. Base circular (90cm de diámetro)**

### 5.3 Volumen de trabajo (manipulador)

El área de trabajo de un robot es el volumen espacial que el extremo del robot puede alcanzar. Dicho de otro modo, es el espacio de trabajo de un robot dicho espacio en el cual el mecanismo puede trabajar. Cuando se establece un espacio de trabajo, lo más importante es tener en cuenta su forma y volumen (dimensiones en la estructura), estos aspectos tienen una importancia significativa debido al impacto en el diseño del robot y también en su manipulabilidad.

En este caso se pretende utilizar un robot, sobre su morfología y dimensiones de la estructura tanto de su espacio de trabajo, puesto que se trabajará en robótica colaborativa lo cual se requiere un robot donde su rango de trabajo sea amplio y pueda cumplir con la mayor precisión las trayectorias puesto que la forma es importante para la definición del entorno donde el robot trabajará, sus dimensiones son importantes para la determinación del alcance del efector-final y lo más esencial es la estructura del espacio de trabajo para asegurar las características de las cinemáticas del robot las cuales están relacionadas con la interacción entre el robot y su entorno.

Para la selección de la morfología se tuvo en cuenta las principales morfologías utilizadas en la industria, como se puede observar en la Figura 4, donde lo son:

- Robot Cartesiano
- Robot Scara
- Robot Articular (6 GDL)

En lo cual debemos tener en cuenta algunos factores como:

- Estructura y factor económico
- volumen de trabajo
- Aplicación (modo colaborativo)
- Facilidad de cálculo para su control

En todo proceso a controlar es importante obtener una buena morfología para la fiabilidad del sistema, se analizará cada morfología mencionada anteriormente con el fin de establecer una puntuación respecto a cada factor de selección, pero primero designaremos la importancia de cada factor con una ponderación denominada peso.

La siguiente tabla refleja los pesos asignados para llevar a cabo la elección, siendo la ponderación 0 la menos factible para el diseño y 1 la más adecuada.

| FACTOR                        | DESCRIPCIÓN                                                                                                                                                                                                                     | PESO |
|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Estructura y factor económico | Este factor es importante al ser un proyecto que tiene como objetivo ser una herramienta complementaria de aprendizaje, por ser un prototipo para Tecno academia Cúcuta, ya que se cuenta con el apoyo económico en materiales. | 0.2  |
| volumen de trabajo            | Si bien es un factor de menor relevancia, debido a que las morfologías seleccionadas parecen contar con espacios de trabajo aceptables, más sin embargo, tomaremos en cuenta el más adecuado.                                   | 0.2  |

|                                      |                                                                                                                                                                                      |     |
|--------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Aplicación (modo colaborativo)       | el proyecto busca como finalidad introducirse a una rama nueva de la robótica, que es la robótica colaborativa y es muy importante que el proyecto sea compatible con este concepto. | 0.4 |
| Facilidad de cálculo para su control | Si bien es un factor muy importante, ya que al tener una configuración muy compleja aumenta el tiempo de desarrollo y los posibles inconvenientes durante la ejecución del mismo.    | 0.2 |
| Total :                              |                                                                                                                                                                                      | 1   |

**Tabla 1. Ponderación de los factores de selección morfológica**

#### 5.4 Ponderación de los factores de selección morfológica

##### 5.4.1 Robot cartesiano

**Estructura y factor económico:** la morfología cartesiana es la más sencilla en la parte de su estructura ya que se mueve de forma lineal en los tres ejes (x, y, z), es la que más componentes mecánicos presenta, debido a que debe convertir el movimiento generado de forma giratoria a una forma de movimiento lineal, por lo cual se deben comprar e instalar otros sistemas articulares antes del efector final.

Peso: 0.1

**Volumen de trabajo:** Debido a su composición estructural es la morfología que mejor volumen de trabajo presenta debido a su área de trabajo ya que puede alcanzar cualquier punto del espacio de trabajo.

Peso: 0.2

**Aplicación (modo colaborativo):** como su movimiento se debe a la existencia de mecanismos de conversión de forma giratoria a lineal, hacen que la estructura sea bastante robusta. Otro inconveniente es sobre dimensionar un robot cartesiano de

6 grados de libertad, lo cual es estrictamente necesario si queremos que ambos robots trabajen de modo colaborativo.

Peso: 0

**Facilidad de cálculo para su control:** Es el más sencillo de calcular, ya que las articulaciones son lineales, a diferencia de las rotacionales no presentan modelos trigonométricos, los cuales son complicados de resolver.

Peso: 0.2

#### 5.4.2 Robot Scara

**Estructura y Factor económico:** En la morfología scara su estructura es al igual que el robot cartesiano es sencillo, presenta menor costo que el pero no posee elementos de estructura similares al cartesiano, lo cual lo hace más económica que la cartesiana.

Peso: 0.2

**Volumen de trabajo:** su área de trabajo se presenta una forma de volumen cilíndrica, lo cual es buena para lo que se requiere, pero no es la que mejor se acopla a lo que se busca en este proyecto.

Peso: 0.1

**Aplicación (modo colaborativo):** para empezar su morfología no es de 6 grados de libertad, por lo que al diseñarse se debe modificar para que cumpla estos requisitos de modo que lo hace menos factible para el desarrollo.

Peso: 0.1

**Facilidad de cálculo para su control:** al igual que el cartesiano es sencillo de calcular debido a diversos estudios que se le han hecho por ende facilita su cálculo, pero no posee un cálculo extremadamente complejo.

Peso: 0.2

#### 5.4.3 Robot Articular

**Estructura y Factor económico:** esta morfología en su estructura es la más convencional en la industria lo cual tiene un costo considerable con respecto a las demás, pero adquirible.

Peso: 0.1

**Volumen de trabajo:** Este manipulador presenta una forma de volumen semiesférica, lo cual es bueno para lo que se requiere, y es la que mejor se adapta para la etapa de diseño.

Peso: 0.2

**Aplicación (modo colaborativo):** las morfologías comerciales para el área de la robótica colaborativa son de seis grados de libertad, y existe bastante información al respecto, por ende, es el tipo morfología más utilizado a la hora de fabricar manipuladores industriales. Una de sus cualidades es que es muy versátil, y consume poco espacio.

Peso: 0.4

**Facilidad de cálculo para su control:** Es la morfología que presenta mayor complejidad a la hora de su cálculo debido a que sus articulaciones rotacionales, presentando un gran número de expresiones trigonométricas en las ecuaciones que lo describen.

Peso: 0.1

#### 5.4.4 Matriz de selección de morfologías

| MORFOLOGIA | FACTOR                               | PESO DEL FACTOR | PUNTUACION | PUNTUACIÓN TOTAL |
|------------|--------------------------------------|-----------------|------------|------------------|
| Cartesiana | Estructura y Factor económico        | 0.2             | 0.1        | 0.5              |
|            | Volumen de trabajo                   | 0.2             | 0.2        |                  |
|            | Aplicación (modo colaborativo)       | 0.4             | 0          |                  |
|            | Facilidad de cálculo para su control | 0.2             | 0.2        |                  |

|           |                                      |     |     |     |
|-----------|--------------------------------------|-----|-----|-----|
| Scara     | Estructura y Factor económico        | 0.2 | 0.2 | 0.6 |
|           | Volumen de trabajo                   | 0.2 | 0.1 |     |
|           | Aplicación (modo colaborativo)       | 0.4 | 0.1 |     |
|           | Facilidad de cálculo para su control | 0.2 | 0.2 |     |
| Articular | Estructura y Factor económico        | 0.2 | 0.1 | 0.8 |
|           | Volumen de trabajo                   | 0.2 | 0.2 |     |
|           | Aplicación (modo colaborativo)       | 0.4 | 0.4 |     |
|           | Facilidad de cálculo para su control | 0.2 | 0.1 |     |

**Tabla 2. Matriz de Selección de morfologías articulares**

Con la finalización de la matriz de selección de las diferentes morfologías, se puede apreciar que la que mejor se adapta a los requerimientos necesarios para el desarrollo del prototipo es la morfología articular, la cual se empleó para el diseño de los bimanipuladores.

## 5.5 Selección del hardware para el control del manipulador

Para realizar la selección tendremos en cuenta las principales placas comerciales de desarrollo en el mercado y de conocimientos adquiridos durante el transcurso de la carrera:

- Raspberry
- Arduino
- Tenssy 4.0

Para realizar la adecuada selección de la tarjeta de control, procesamiento y calculo debemos tener en cuenta factores como:

- factor económico
- Velocidad de procesamiento (mínima latencia en transferencia de datos)
- Documentación y ayuda complementaria
- Compatibilidad (como servos, software, etc.)

Para la selección se analizará cada placa de desarrollo con el fin de establecer un peso de cada factor con el fin en la toma de decisión, pero primero designaremos la importancia de cada factor con una ponderación denominada peso.

La siguiente tabla refleja los pesos asignados para llevar a cabo la elección, siendo la ponderación 0 la menos factible para el diseño y 1 la más adecuada.

| FACTOR           | DESCRIPCIÓN                                                                                                                                                                                                                               | PESO |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| factor económico | Este factor es importante al ser un proyecto que tiene como objetivo ser una herramienta complementaria de aprendizaje, por ser un prototipo para Tecno academia Cúcuta, donde se llevara a cabo el control de la ejecución del proyecto. | 0.2  |

|                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |     |
|--------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Velocidad de procesamiento           | Una de las cualidades de la tarjeta de desarrollo, es que se debe tener en cuenta la mínima latencia en transferencia de datos desde el computador hacia el manipulador. Ya que para la ejecución del control cinemático requiere que los datos transmitidos desde la interfaz humano máquina, hacia los elementos generadores de movimiento sean enviados y recibidos en el menor tiempo posible. | 0.4 |
| Documentación y ayuda complementaria | La documentación y la ayuda es necesaria siendo la clave para antes de realizar cualquier tipo de proyecto es obtener la mayor cantidad de documentación necesaria, ya que es importante contar con un respaldo para solucionar eventualidades que se presenten en el desarrollo del proyecto.                                                                                                     | 0.2 |
| Compatibilidad                       | Para la compatibilidad de la placa de desarrollo se nos otorgaron por parte de tecno academia los servomotores XYZ A-16 Debido a que la unidad tecnoacademia doto al proyecto de ciertos elementos como los son los servomotores inteligentes, se tuvo en cuenta de qué manera se comunicaría el software con estos elementos de actuación.                                                        | 0.2 |
| Total :                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 1   |

**Tabla 3. Ponderación de los Factores de la Selección del Hardware de control**

### 5.5.1 Ponderación de los Factores de la Selección del Hardware de control

#### 5.5.1.1 Raspberry PI 3

**Factor económico:** Es una placa robusta, pero desde el punto de vista económico debemos considerar que la placa de desarrollo no se encuentra en a disposición en la unidad Tecnoacademia, por lo que su adquisición deberá compra de esta. Su costo no es tan elevado, pero si considerable.

Peso: 0.1

**Velocidad de procesamiento:** La tarjeta de desarrollo Raspberry PI 3 tiene alrededor de 700 MHz con una velocidad de procesamiento de 1.4GHz, buena para el desarrollo del proyecto que se necesita, aunque debemos tener en cuenta que la placa no solamente ejecuta las tareas de envío de señales sino todo el algoritmo del control cinemático y dinámico, por lo que en realidad requiere mayor nivel de procesamiento.

Peso: 0.2

**Documentación y ayuda complementaria:** debido a que las selecciones de las tarjetas a optar son tarjetas comerciales entonces cualquier tipo de información sobre esta placa en la web, no encontraremos con los aportes de una gran comunidad de desarrolladores, estudiantes y aficionados, por ende, existen muchos tutoriales y blogs al respecto.

Peso: 0.2

**Compatibilidad:** la Compatibilidad con elementos seleccionados de accionamiento, es una pequeña computadora con la capacidad de procesamiento que esta ofrece, puede grabarse en ella, cualquier sistema operativo comercial, con el que se permite el mayor acceso a los sistemas físicos del dispositivo. tiene la desventaja de que no posee compatibilidad directa con los servomotores XYZ robot, ya que estos se manejan a través de comunicación serial, haciendo uso de librerías otorgadas por el fabricante.

Peso: 0.1

#### 5.5.1.2 Arduino

**Factor Económico:** De las tres opciones para elegir, es la más económica, esta es la placa por excelencia. Debido a su bajo coste es comúnmente usada para proyectos simples.

Peso: 0.2

**Velocidad de Procesamiento:** como existen varias placas de este tipo, Optemos por la Arduino Mega 2560 La velocidad de operación de 16 Mhz, algo pequeña haciéndola la menos optima, no obstante, esta tarjeta a diferencia de un sistema embebido no desarrollaría las operaciones del cálculo, sino que estas serían ejecutadas por medio de un ordenador, la cual posee suficiente capacidad de procesamiento para esta tarea la cual se encargaría de las operaciones de comunicación entre os actuadoras (servomotores) y el algoritmo de control.

Peso:0.1

**Documentación y ayuda complementaria:** Las placas de desarrollo Arduino son las más comerciales y populares, debido a su fácil adquisición, eso hace que no exista problemas a la hora de encontrar información al respecto.

Peso:02

**Compatibilidad:** Debido al uso de la comunicación serial, esta placa accede a un gran número de lenguajes de programación que ya cuentan con soporte para esta tecnología, la cual era empleada también por los microcontroladores. Además, la empresa Pololu, suministra la librería para el lenguaje Arduino con funciones predefinidas para el uso de los servomotores XYZ.

Peso:0.2

#### 5.5.1.3 Tenssy 4.0

**Factor Económico:** De las tres opciones para elegir, es la más cara pero no por mucho siendo asequible, esta es la placa por excelencia, comúnmente usada para proyectos donde se requiera reducir la latencia al momento de enviar y leer datos.

Peso:0.1

**Velocidad de Procesamiento:** una tarjeta fabricada en Estados unidos, y distribuida por la empresa PJRC. Es considerada la ideal, ya que cuenta con un procesador ARM Cortex-M7 que puede funcionar a unas altas frecuencias de más de 600MHz esto otorga una gran eficiencia por núcleo, que ofrece una mínima latencia en el momento de leer y escribir datos que es lo que se busca en este proyecto.

Peso:0.4

**Documentación y ayuda complementaria:** Las placas de desarrollo Arduino son las más comerciales y populares, están son parecido al mega que se habló anteriormente pero mucho menor que todas las placas que son usadas para estos

propósitos de robótica, eso hace que no exista problemas a la hora de encontrar información al respecto.

Peso: 0.2

**Compatibilidad:** Debido al uso de la comunicación serial, esta placa accede a un gran número de lenguajes de programación, como lo es lenguaje en arduino, lo cual permite suministra la librería para el lenguaje Arduino con funciones predefinidas para el uso de los servomotores XYZ.

Peso:0.2

#### 5.5.1.4 Matriz de selección de la placa de desarrollo

| PLACA DE DESARROLLO | FACTOR                               | PESO DEL FACTOR | PUNTUACION | PUNTUACIÓN TOTAL |
|---------------------|--------------------------------------|-----------------|------------|------------------|
| Raspberry           | Factor económico                     | 0.2             | 0.1        | 0.6              |
|                     | Velocidad de Procesamiento           | 0.4             | 0.2        |                  |
|                     | Documentación y ayuda complementaria | 0.2             | 0.2        |                  |
|                     | Compatibilidad                       | 0.2             | 0.1        |                  |
|                     | Factor económico                     | 0.2             | 0.2        |                  |
|                     | Velocidad de Procesamiento           | 0.4             | 0.1        |                  |

|            |                                      |     |     |     |
|------------|--------------------------------------|-----|-----|-----|
| Arduino    | Documentación y ayuda complementaria | 0.2 | 0.2 | 0.7 |
|            | Compatibilidad                       | 0.2 | 0.2 |     |
| Tenssy 4.0 | Factor económico                     | 0.2 | 0.1 | 0.9 |
|            | Velocidad de Procesamiento           | 0.4 | 0.4 |     |
|            | Documentación y ayuda complementaria | 0.2 | 0.2 |     |
|            | Compatibilidad                       | 0.2 | 0.2 |     |

**Tabla 4. Matriz de selección de la placa de desarrollo**

Con la finalización de la matriz de selección de las diferentes placas de desarrollo, se puede apreciar que la que mejor se adapta a los requerimientos necesarios para el desarrollo del prototipo es la Tenssy 4.0.

## 5.6 Selección del Software Para el Desarrollo de la HMI

En la actualidad existen varios lenguajes de programación en los cuales desarrollar los algoritmos de cálculo, así como el diseño de la interfaz de usuario, los lenguajes de programación a tener en cuenta serán los más empleados durante la carrera entre ellos:

- C
- Python
- Script de Matlab

Los factores a tener en cuenta serán los siguientes:

- Practicidad al realizar cálculos (matemáticos, trigonométricos, matriciales, etc.).
- Practicidad para generar interfaces de usuario.
- Compatibilidad con comunicación serial.
- Conocimiento previo por parte del desarrollador.

Se compararon los diferentes lenguajes de programación con el fin de establecer una puntuación respecto a cada factor de selección, pero primero designaremos la importancia de cada factor con una ponderación denominada peso.

La siguiente tabla refleja los pesos asignados para llevar a cabo la elección, siendo la ponderación 0 la menos factible para el diseño y 1 la más adecuada.

| FACTOR                                         | DESCRIPCIÓN                                                                                                                                                                                                                                                                                                | PESO |
|------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Practicidad al realizar cálculos               | Todos los lenguajes por defecto ofrecen solución a problemas matriciales, matemáticos y trigonométricos, los cuales algunos emplean librerías las cuales ayudan enormemente a la simplicidad del código generado                                                                                           | 0.2  |
| Practicidad para generar interfaces de usuario | Una de las cualidades más importantes si no las más importante, es la posibilidad de que los aprendices puedan elaborar sus laboratorios de forma práctica, debe existir una interacción con el usuario, por eso se debe tomar en cuenta para evitar elegir un software que nos proporcione esta cualidad. | 0.4  |
| Compatibilidad con comunicación serial.        | La compatibilidad es muy importante porque no todos los lenguajes de programación, están pensados de la misma manera en la parte comunicación serial, a algunos se les hace de manera más sencilla que a otros comunicar de forma serial                                                                   | 0.2  |

|                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |     |
|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Conocimiento previo por parte del desarrollador. | Cuando se aborda un proyecto lo primordial en tener en cuenta es con que herramientas cuenta el desarrollador a niveles de conocimientos previos para que en términos de tiempo y optimización, consigue obtener mejores resultados en menor tiempo, y aumenta la probabilidad de que el proyecto sea ejecutado exitosamente en el tiempo esperado. | 0.2 |
| Total :                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 1   |

**Tabla 5. Ponderación de los Factores de la Selección Para el Desarrollo de la HMI**

#### 5.6.1 Ponderación de los factores de la selección para el desarrollo de la HMI

##### 5.6.1.1 C

**Practicidad al realizar cálculos:** este lenguaje da el uso de vectores y matrices, además de que cuenta con librerías matemáticas, lo que quiere decir que no representa un problema el cálculo de las ecuaciones.

Peso: 0.2

**Practicidad para generar interfaces de usuario:** como bien se sabe el lenguaje C es de muy bajo nivel, por lo que el uso de interfaces de desarrollo no se hace de manera nativa, sino que requiere de otras herramientas, las cuales complican el proceso de la creación de la HMI.

Peso: 0.1

**Compatibilidad con comunicación serial:** Al ser un lenguaje de bajo nivel puede ser que no posea opción de comunicación serial sin ayuda de otras herramientas, lo cual el proceso puede llegar a ser más complicado.

Peso: 0.1

**Conocimiento previo por parte del desarrollador:** como bien se sabe a principios de la carrera inicia en el mundo de la programación con lenguaje C y C++, con lo cual no se realiza proyectos tan complejos con este lenguaje que sirvan de experiencia, debido a un bajo nivel.

Peso: 0.2

#### 5.6.1.2 Python

**Practicidad al realizar cálculos:** Python aplica el uso de librerías entre ellas para la parte de cálculo esta la Numpy para la creación de matrices, de la misma manera que utiliza math para la obtención de funciones trigonométricas, lo cual es buena para lo que se busca.

Peso: 0.2

**Practicidad para generar interfaces de usuario:** De acuerdo con en la practicidad, está estructurada que otros lenguajes, pero al hacerse de manera secuencial, resulta demasiado confuso y de detalle con su sangría ya que suele ocasionar muchos problemas por solo un espacio entre líneas, pero es aceptable a la hora de interfaces.

Peso: 0.2

**Compatibilidad con comunicación serial:** Si bien también posee la opción de comunicación serial. Lo cual no se dificulta el grado de comunicación serial

Peso: 0.2

**Conocimiento previo por parte del desarrollador:** como desarrollador se posee el conocimiento aceptable mas no bueno esto no quiere decir que no se pueda abordar si no que por lo del factor de practicidad de generar interfaces lo hace descartable.

Peso: 0.1

#### 5.6.1.3 Script de Matlab

**Practicidad al realizar cálculos:** Es un software principalmente diseñado para el tratamiento de cálculos matriciales y procedimientos matemáticos complejos, así que Matlab es el software mejor diseñado para las tareas de índole matemática.

Peso: 0.2

**Practicidad para generar interfaces de usuario:** Matlab cuenta con una herramienta para desarrollar interfaces de usuario denominada GUIDE, la cual una herramienta bastante práctica para facilitar el desarrollo de HMI.

Peso: 0.4

**Compatibilidad con comunicación serial:** Matlab cuenta con funciones para realizar la comunicación serial, y son bastante sencillas comparadas con otros lenguajes.

Peso: 0.2

**Conocimiento previo por parte del desarrollador:** el conocimiento es alto debido a que este software en la etapa de aprendizaje de la carrera ha estado familiarizado con el mismo en múltiples aplicaciones como en materias por ejemplo (robótica, control, diseño, etc.).

Peso: 0.2

#### 5.6.1.4 Matriz de selección del software

| SOFTWARE | FACTOR                                         | PESO DEL FACTOR | PUNTUACION | PUNTUACIÓN TOTAL |
|----------|------------------------------------------------|-----------------|------------|------------------|
| C        | Practicidad al realizar cálculos               | 0.2             | 0.2        | 0.6              |
|          | Practicidad para generar interfaces de usuario | 0.4             | 0.1        |                  |
|          | Compatibilidad con comunicación serial         | 0.2             | 0.1        |                  |
|          | Conocimiento previo por parte                  | 0.2             | 0.2        |                  |

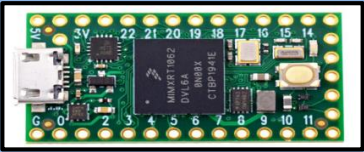
|                  |                                                 |     |     |     |
|------------------|-------------------------------------------------|-----|-----|-----|
|                  | del desarrollador                               |     |     |     |
| Python           | Practicidad al realizar cálculos                | 0.2 | 0.2 | 0.7 |
|                  | Practicidad para generar interfaces de usuario  | 0.4 | 0.2 |     |
|                  | Compatibilidad con comunicación serial          | 0.2 | 0.2 |     |
|                  | Conocimiento previo por parte del desarrollador | 0.2 | 0.1 |     |
| Script de Matlab | Practicidad al realizar cálculos                | 0.2 | 0.2 | 1   |
|                  | Practicidad para generar interfaces de usuario  | 0.4 | 0.4 |     |
|                  | Compatibilidad con comunicación serial          | 0.2 | 0.2 |     |
|                  | Conocimiento previo por parte del desarrollador | 0.2 | 0.2 |     |

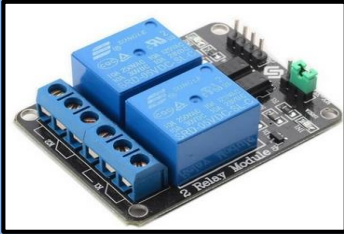
**Tabla 6. Matriz de selección del software de programación**

Con la finalización de la matriz de selección del software de programación, se puede apreciar que la opción más adecuada para desarrollar el cálculo del control cinemático, dinámico y la interfaz gráfica es en el scrip de matlab.

Una vez realizado las matrices de selección de los diferentes ámbitos más relevantes del proyecto a tener en cuenta en el desarrollo del prototipo, se procede como parte complementaria la especificación de los componentes electrónicos y materiales utilizados que hacen partes del desarrollo de la estructura de control.

## 5.7 Selección y especificación de Componentes Electrónicos y Materiales

| NOMBRE                       | IMAGEN                                                                               | DESCRIPCIÓN Y CARACTERÍSTICAS                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tenssy 4.0                   |  | Esta tarjeta es la Tenssy 4.0, una tarjeta fabricada en Estados Unidos, y distribuida por la empresa PJRC. Es considerada la ideal, ya que cuenta con un procesador ARM Cortex-M7 que puede funcionar a unas altas frecuencias de más de 600MHz esto otorga una gran eficiencia por núcleo, que ofrece una mínima latencia en el momento de leer y escribir datos. |
| Servomotores XYZ Robot A1-16 |   | El Servo Inteligente XYZrobot A1-16 es un actuador modular que combina un reductor de velocidades, un motor DC y un tablero de control integrado en un pequeño paquete. El servomotor proporciona el torque necesario para operar un pequeño robot.                                                                                                                |

|                              |                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Módulo Relay(2canales)       |    | Módulo Relay 2 canales, con activación a 5V están diseñados para la conmutación de cargas de potencia de hasta 10A - 250VAC. En las entradas de control se encuentran opto acopladores para minimizar las señales de ruido.                                                            |
| Electroimanes(efector final) |    | Un electroimán es un embobinado o solenoide que fluye corriente eléctrica a través de el para así obtener un campo magnético y lograr atraer materiales magnéticos. Este electroimán cuenta con una fuerza de retención de 2.5Kg Voltaje de entrada:12 VDC Corriente de trabajo: 0.25A |
| Fuente de alimentación       |  | Es el dispositivo encargado de convertir la corriente alterna en una o varias corrientes continuas. Esto sirve para alimentar los circuitos de los componentes que se conectan a la misma.                                                                                             |
| Protoboard                   |  | Es una placa de prueba con orificios que se encuentran conectados eléctricamente entre sí de manera interna, habitualmente siguiendo patrones de líneas, en el cual se pueden insertar componentes electrónicos y cables para el armado y prototipado de circuitos electrónicos.       |

|                     |                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                          |
|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Computador portátil |   | Computador Portátil ACER A315-53G-59TV, Intel Core i5 8th Gen, RAM 8GB, Disco Duro 2TB Negro                                                                                                                                                             |
| Conector tipo jack  |   | El conector Jack es un conector generalmente de audio que transporta señal analógica, aunque en ocasiones también contiene vídeo, alimentación o datos.                                                                                                  |
| Cable Red UTP       |  | Es utilizado en el cableado telefónico y como cable de red de computadora para área local (LAN). Se compone de un número heterogéneo de cables de cobre trenzados formando pares, siendo un modo económico de establecer comunicación entre dispositivos |

**Tabla 7. Selección y especificación de componentes electrónicos y Materiales**

En la siguiente **ANEXO 8**, se observa la tabla (Análisis costo beneficio) en la cual se puede apreciar el valor total del proyecto y cada uno de los materiales usados para la creación de este.

## **6 DISEÑAR LA ESTRUCTURA DEL MANIPULADOR, ASÍ COMO LA DE CONTROL CINEMÁTICO Y DINÁMICO JUNTO AL DESARROLLO DE LA HMI QUE PERMITA ROBÓTICA COLABORATIVA.**

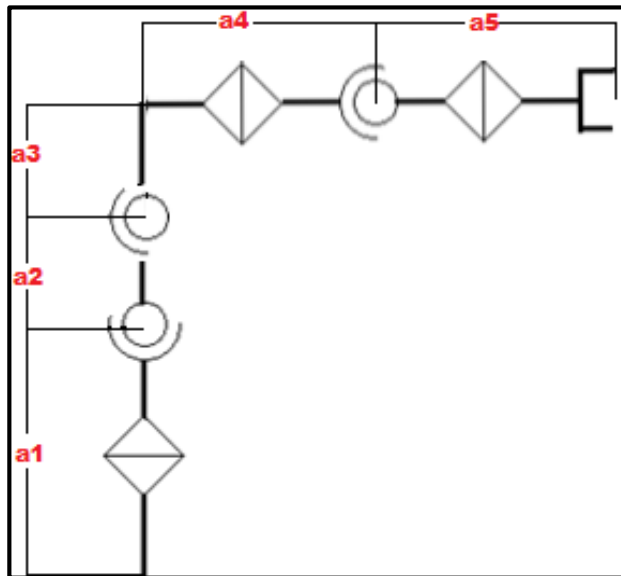
En este capítulo, se diseñará la morfología propuesta y seleccionada en el capítulo anterior, definiendo el espacio de trabajo que determinará los alcances del movimiento del robot tanto articulares como cartesiano, luego se desarrollarán teóricamente los modelos matemáticos necesarios para el control cinemático (modelo directo e inverso) tanto en sus tipos de trayectorias, así como en la colaborativa, como también el control dinámico (mono articular), al igual en la generación de la HMI.

**Nota:** En el apartado que sigue a continuación, se tomara información tanto del diseño como de los CADs, ya que a la hora de realizar este proyecto se contaba con un manipulador diseñado y montado por parte de tecno academia Cúcuta.

### **6.1 Diseño de la Morfología**

Con la selección previamente realizada en el capítulo anterior, donde la morfología más adecuada para los bimanipuladores fue la morfología articular, la morfología articular se ha representado en el orden y tipo de las articulaciones a través de un esquema, donde se evidencie el estado inicial de las articulaciones y de esta manera tener más claro la estructura de los manipuladores.

También se evidenciarán los sistemas solidarios correspondientes a cada articulación, las cuales emplearán primero en el diseño estructural y segundo en los modelos cinemáticos. En la siguiente figura se puede observar el esquema del manipulador en la posición inicial y sus parámetros, donde  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ ,  $a_4$  y  $a_5$  son las distancias morfológicas del manipulador.



**Figura 13. Esquema del manipulador (estado inicial)**

#### 6.1.1 Delimitación del espacio de trabajo

Para la delimitación del espacio de trabajo, previamente se había definido la base en la cual sería la instalación de dichos manipuladores, de acuerdo a esta medida se diseñó el manipulador donde abarcara su área de trabajo, las medidas se tomaron en la unidad de longitud de milímetros (mm) como se especifica en el [ANEXO 1](#), en su sección transversal y en el [ANEXO 2](#), encontramos la delimitación del espacio de trabajo expresada en la unidad internacional de medida en milímetros desde su vista superior.

#### 6.1.2 Elaboración del diseño CAD

A partir de la morfología mencionada y de los elementos que se tenía como actuadores (servomotores), se realizó el diseño de las piezas (articulaciones como eslabones) a través de una herramienta CAD, que, para este caso, se empleó el software de ingeniería SOLIDWORKS como se muestra continuación. Para una mejor visualización de las piezas dirigirse al [ANEXO 3](#).

#### 6.1.2.1 Articulación 1

Para la base de la articulación 1 se tuvo en cuenta un mecanismo como la de un rodamiento el cual me permite una vida útil al servomotor y contribuye al movimiento de el mismo.

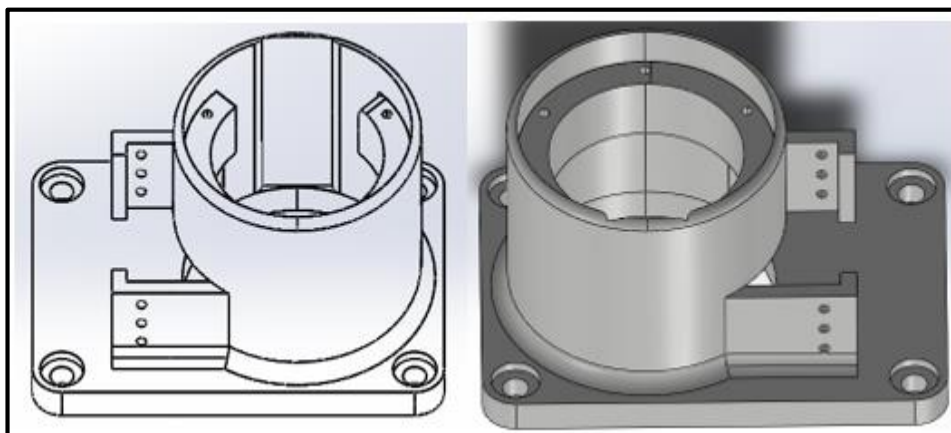


Figura 14. Visualización CAD de la pieza 1(base Articulación 1)

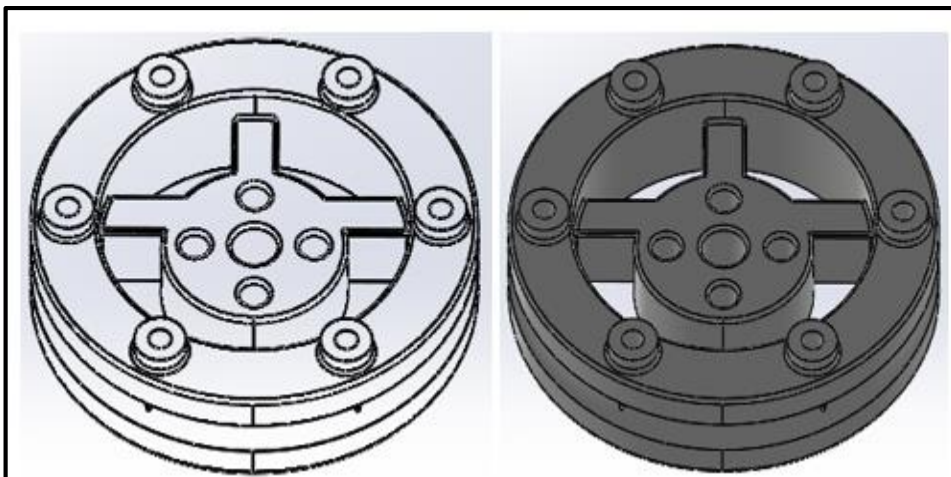
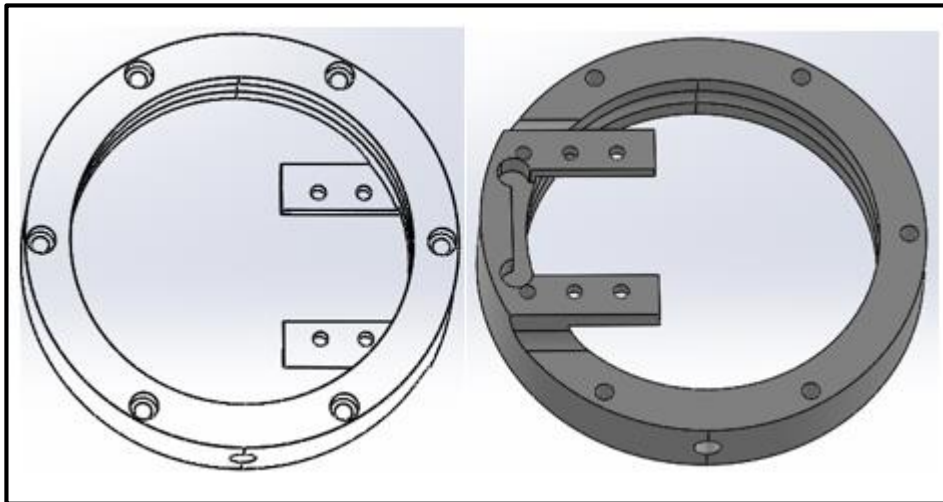


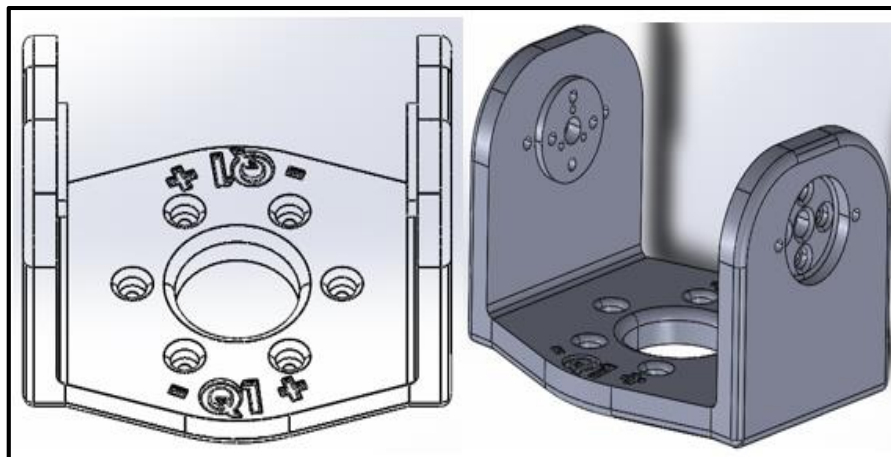
Figura 15. Visualización CAD complemento de la pieza 2(rodamiento)



**Figura 16.** Visualización CAD complemento de la pieza 3 (base del rodamiento)

#### 6.1.2.2 Articulación 2

Al igual que la articulación 1, está también necesita de un soporte o base en la cual la articulación ejercerá el movimiento.



**Figura 17.** Visualización CAD de la pieza 4 (base Articulación 2)

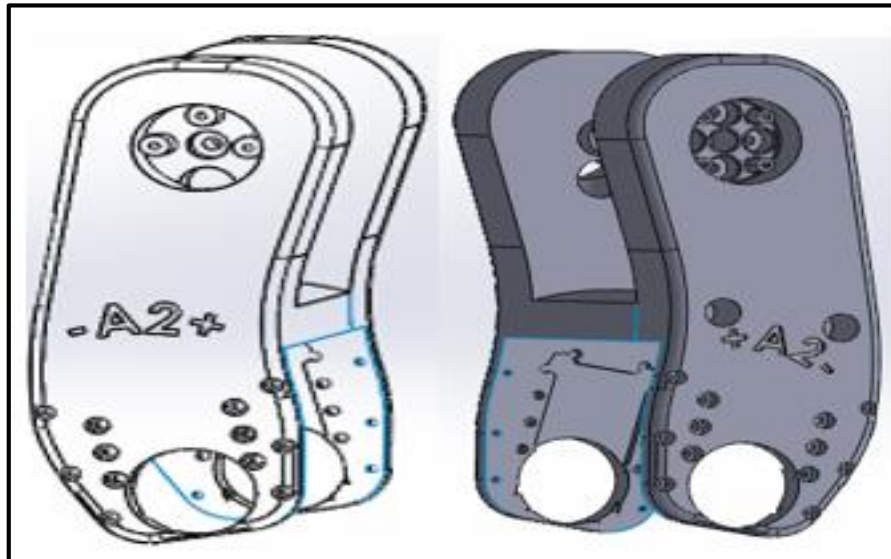


Figura 18. Visualización CAD de la pieza 5 (Articulación 2)

#### 6.1.2.3 Articulación 3 y 4

En este caso para la articulación 3 y 4 no se necesitó del uso de una base ya que están diseñadas con el acople a la articulación dos, pero se dejó estas dos en una misma pieza como se muestra

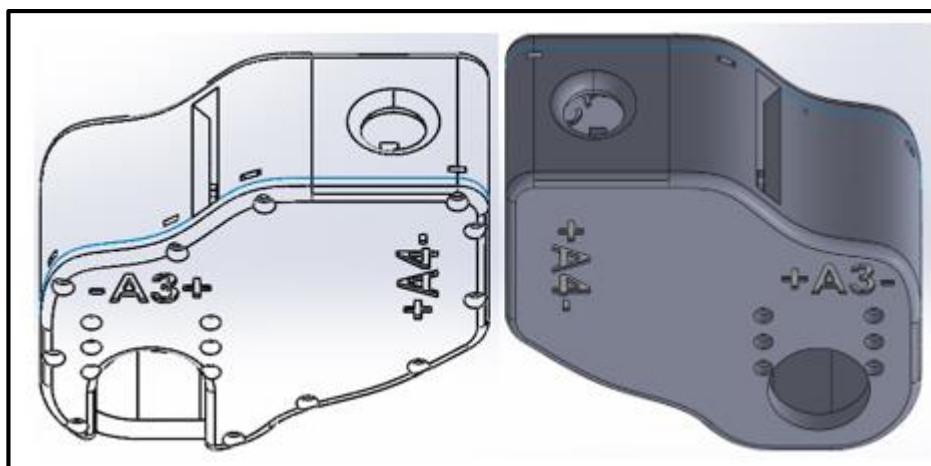
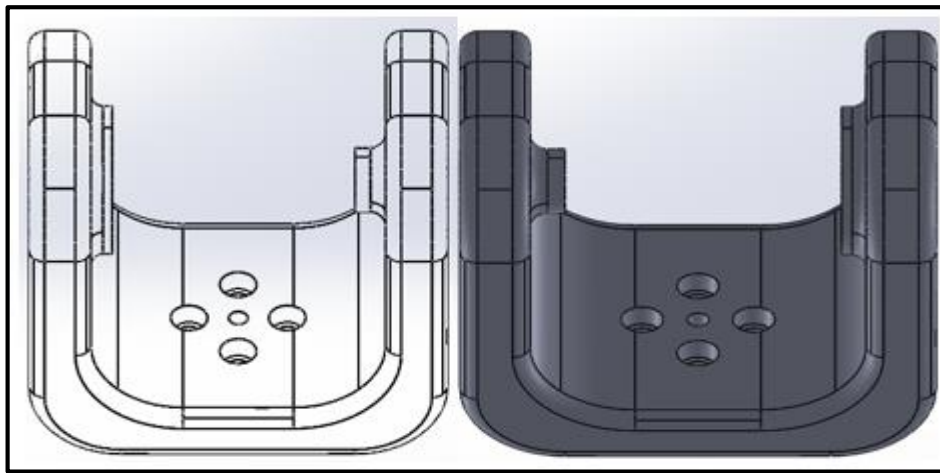


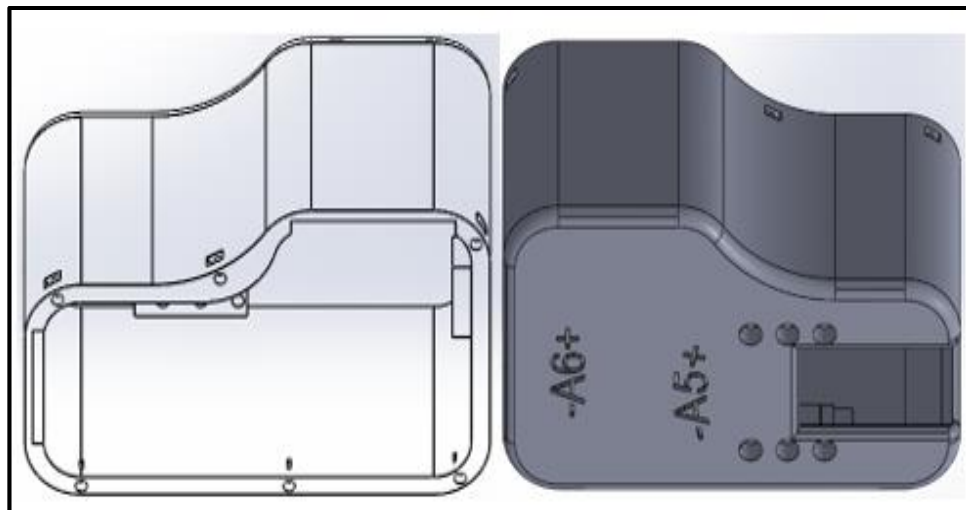
Figura 19. Visualización CAD de la pieza 6 (Articulación 3 y 4)

#### 6.1.2.4 Articulación 5 y 6

Al igual que las articulaciones 3 y 4 la 5 y 6 se dejó en una misma pieza, pero se necesitó de un soporte o base para la cual la articulación 5 ejerciera el movimiento y otra para la articulación 6 que sería el acople del efector final.



**Figura 20. Visualización CAD de la pieza 7 (base Articulación 5)**



**Figura 21. Visualización CAD de la pieza 8 (Articulación 5 y 6)**

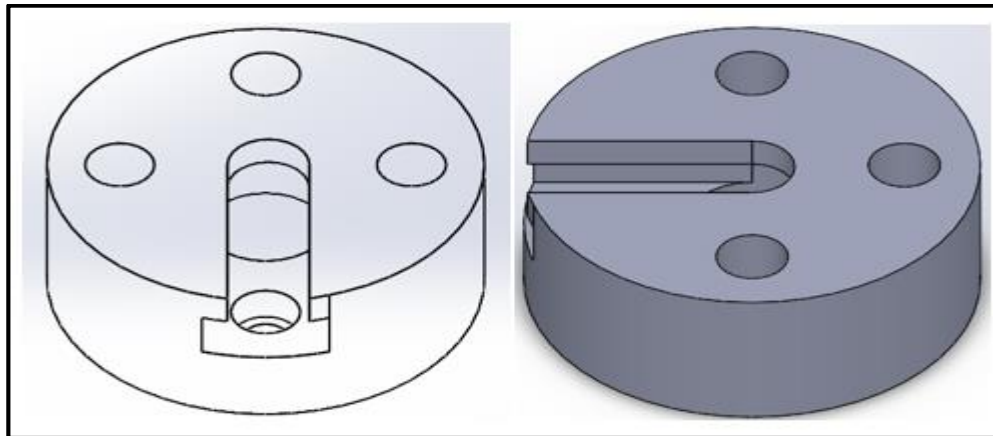


Figura 22. Visualización CAD de la pieza 9 (base del efector final)

#### 6.1.2.5 Ensamblaje CAD del manipulador

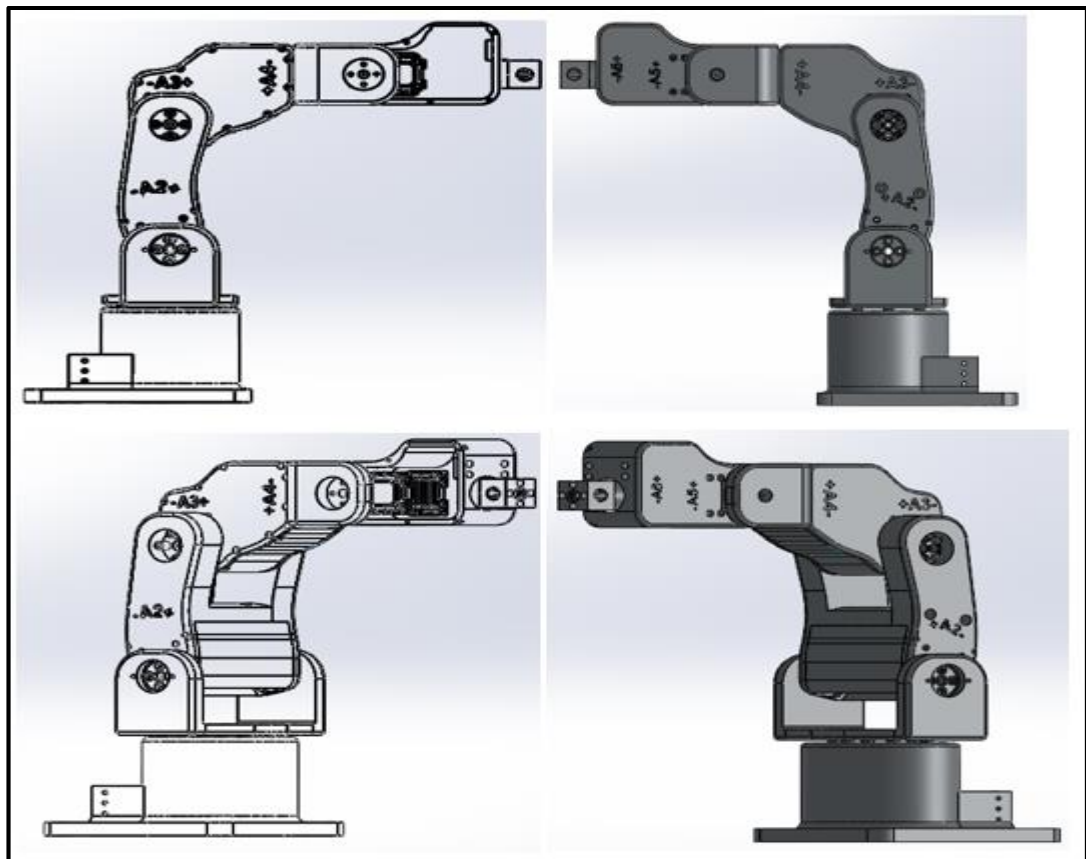
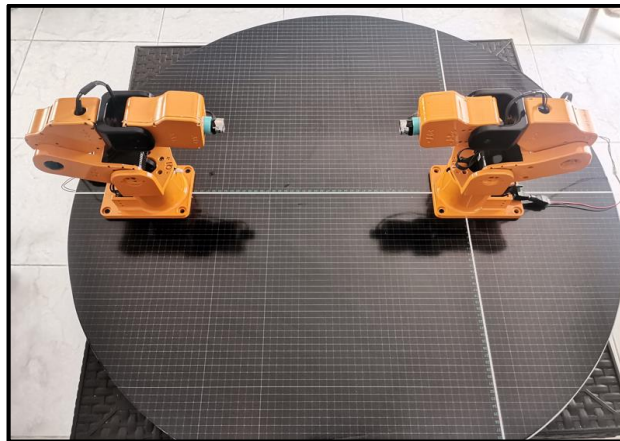


Figura 23. Visualización del ensamblaje CAD del manipulador

Todas estas piezas fueron impresas en 3d, para este se usó, plástico PLA (Ácido Poliláctico) Es un tipo de plástico biodegradable y bastante económico en cuanto a impresión de prototipado se refiere.



**Figura 24. Ensamblaje e instalación de los manipuladores**

### 6.1.3 Diseño de la pieza a transportar

De acuerdo al diseño elaborado de los manipuladores, la pieza a transportar no debe de ser muy grande y pesada debido a sus dimensiones, por otro lado, los movimientos colaborativos, contemplan el proceso de sujetar la pieza luego trasladarla o rotarla, y de trasladarla y rotarla conjuntamente, debido a ello es importante tener en cuenta la dimensión de la pieza, ajustándose correctamente, ya que, si la posición de sujeción no es suficiente pueden ocurrir inconvenientes y soltar la pieza.

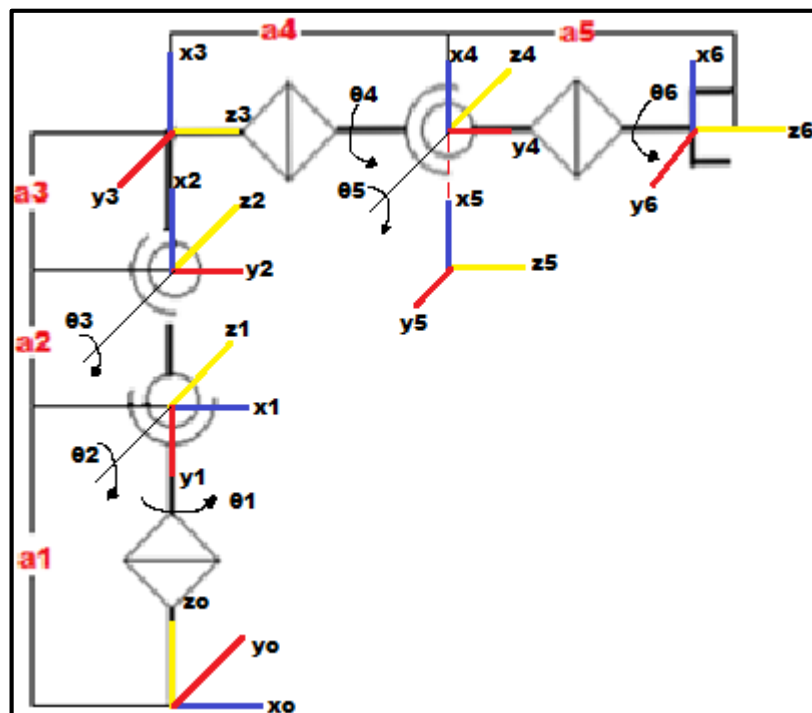
Con lo cual la pieza debe ser tomada por el efector final de ambos manipuladores, se define la forma de la pieza como la sección transversal de un tubo de acero cuyas dimensiones son (5cmx4cm), ya que su efector final (electroimán). Analizando la zona de sujeción se puede considerar como una zona circular cuyo diámetro de sujeción será de 2 cm, debido al diámetro del efector final(electroimán).

## 6.2 Diseño de los modelos cinemáticos

### 6.2.1 Cálculo de la cinemática directa

Para el cálculo de la cinemática directa se empleará el método más comúnmente utilizado el método Denavit-Hartenberg, para esto se toma inicialmente que el manipulador este en su forma inicial donde sus ángulos son  $0^\circ$ , para la implementación de la Directa.

Donde en la Figura 25 se puede observar puede observar el esquema del manipulador en la posición inicial y sus parámetros, donde  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ ,  $a_4$  y  $a_5$  son las distancias morfológicas del manipulador, y cada sistema solidario posee sus tres ejes nombrados de acuerdo al eje solidario que representan y el número de la articulación que le antecede, para el caso del sistema de referencia de la base es 0, al igual se puede observar el sentido del giro realizado por las articulaciones.



**Figura 25. Sistema de referencia manipulador (6GDL)**

A continuación, se muestra la obtención de los parámetros DH, como se puede observar en tabla

| Articulación | $\theta$      | d  | a  | $\alpha$ |
|--------------|---------------|----|----|----------|
| 1            | $\theta_1$    | a1 | 0  | -90      |
| 2            | $\theta_2-90$ | 0  | a2 | 0        |
| 3            | $\theta_3$    | 0  | a3 | -90      |
| 4            | $\theta_4$    | a4 | 0  | 90       |
| 5            | $\theta_5$    | 0  | 0  | -90      |
| 6            | $\theta_6$    | a5 | 0  | 0        |

**Tabla 8. Parámetros D-H**

Se realizaron los respectivos cálculos de multiplicación de matrices para el cálculo del modelo cinemático directo. Para observar el cálculo detallado de la cinemática directa ver [ANEXO 4](#). Proceso que se generó para hallar los valores de la MTH final NOAP a partir de los valores angulares de cada articulación.

### 6.2.2 Cálculo de la cinemática inversa

Para la cinemática inversa, se sabe que se cuenta con un manipulador de 6 GDL por ende se utilizara el método de desacople cinemático, ya que como se puede observar en la figura 26, es aplicable a aquellos robots cuyos tres últimos grados de libertad se cortan en un punto, sacando partido de este hecho, separando los problemas de obtención del modelo cinemático inverso de posición y orientación. Para ello, dada una posición y orientación final deseadas, establece las coordenadas del punto de corte de los 3 últimos ejes (muñeca del robot) calculándose los valores de las tres primeras variables articulares ( $q_1$ ,  $q_2$ ,  $q_3$ ) que consiguen posicionar este punto.

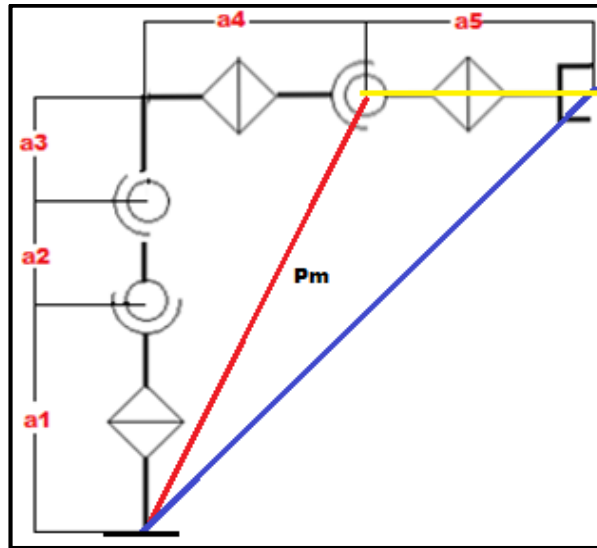


figura 26. Manipulador de 6gdl- Desacople Cinemático

Del cual se obtuvieron las ecuaciones donde estas me representan los ángulos de dichas articulaciones como se muestra a continuación:

$$\theta_1 = \text{Atan2}(P_{my}, p_{mx}) \quad (2)$$

$$\theta_2 = (\pi / 2 - (\alpha + \rho)) \quad (3)$$

$$\theta_3 = (\text{atan2}(a_4 / C, a_3 / C) - \gamma) \quad (4)$$

$$\theta_4 = \text{atan2}(a_x * \sin(q_1) - a_y * \cos(q_1), a_z * \cos(q_2 + q_3) + a_x * \sin(q_2 + q_3) * \cos(q_1) + a_y * \sin(q_2 + q_3) * \sin(q_1)) \quad (5)$$

$$\theta_5 = \text{atan2}(\sin_q5, \cos_q5) \quad (6)$$

$$\theta_6 = \text{atan2}(o_x * \cos(q_2 + q_3) * \cos(q_1) - o_z * \sin(q_2 + q_3) + o_y * \cos(q_2 + q_3) * \sin(q_1), n_x * \cos(q_2 + q_3) * \cos(q_1) - n_z * \sin(q_2 + q_3) + n_y * \cos(q_2 + q_3) * \sin(q_1)) \quad (7)$$

Para observar el cálculo detallado de la cinemática Inversa ver el [ANEXO 5](#). Proceso que se generó para hallar los valores angulares, partir del método desacoplamiento cinemático que trata de dividir el problema de 6 GDL en 2 de 3 GDL.

### 6.3 Diseño del Control Cinemático para la Generación de Trayectorias

Para el diseño del control cinemático se debe de tener en cuenta:

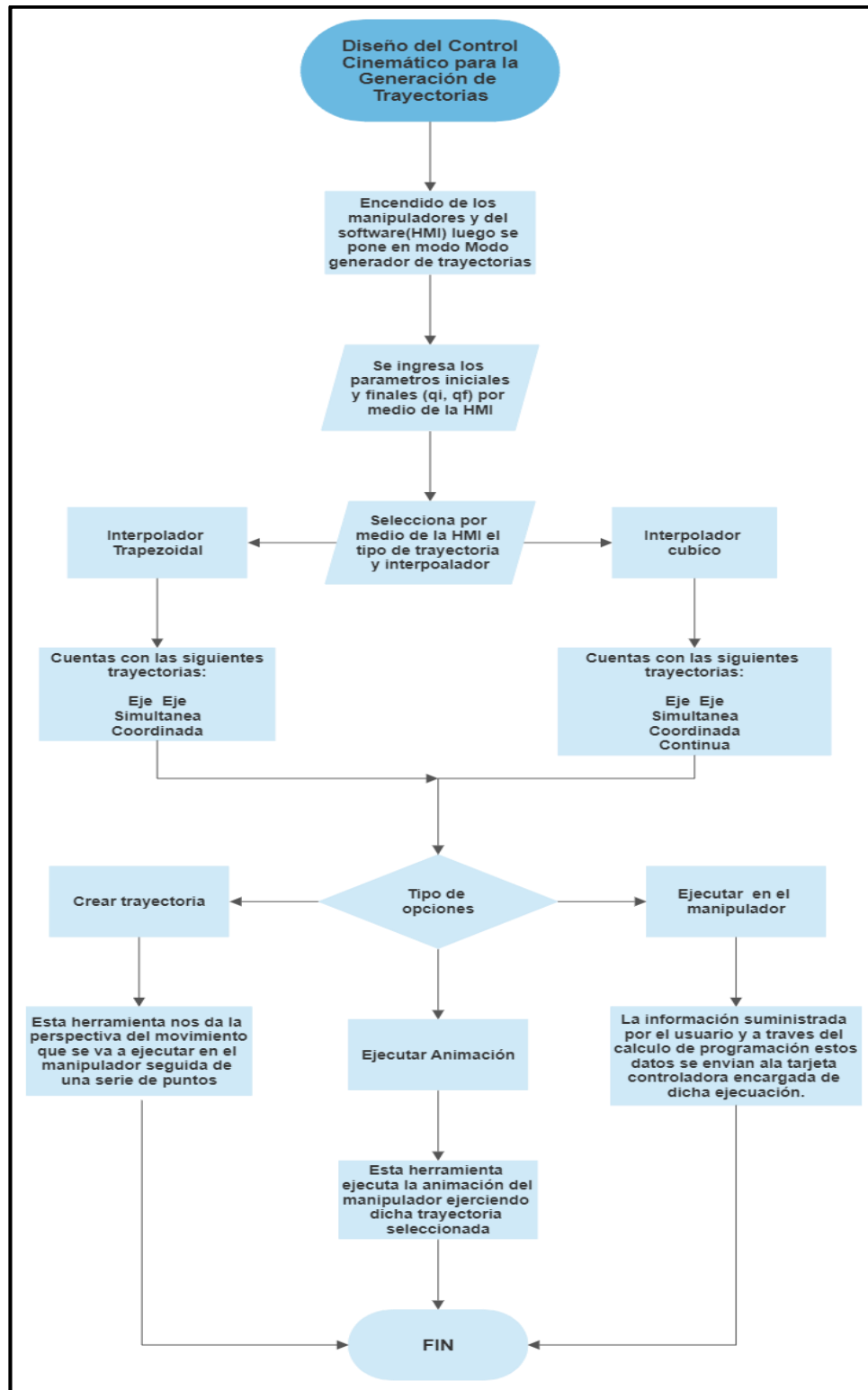
- El espacio de trabajo del manipulador.
- Las restricciones morfológicas con las que cuenta en manipulador

La estructura de control cinemático se llevará a cabo por medio de la HMI de control, entonces una vez teniendo eso en cuenta se procede a ingresar tanto los puntos iniciales ( $q_i$ ) así como los finales ( $q_f$ ) de cada articulación, que es donde se va a mover estas trayectorias, luego analizaremos la creación de cada una de las trayectorias y como es la obtención de los ángulos y él envió de estos datos a los actuadores, en este caso unos Servomotores Inteligentes XYZSmartServo A1-16. para ver el manejo de los actuadores ver el [ANEXO 6](#).

#### 6.3.1 Control de las trayectorias Eje a Eje-Simultanea-coordinada- continua

Para las siguientes estrategias de control, se toman los puntos ( $q_i$ ,  $q_f$ ) establecidos anteriormente cada posición serán ingresadas en el programa (HMI), es aquí donde se obtienen valores articulares para poder empezar el proceso de interpolación, para ello se usó los interpoladores Trapezoidal y cubico. donde junto con sus parámetros de programación serán procesados, donde se observará la creación de la trayectoria en el espacio cartesiano, al igual se ejecutará la animación del manipulador, también las gráficas de las articulaciones de los ángulos a recorrer por cada una y por último la opción de ejecutarse en el manipulador.

A continuación, se procede a dejar un esquema (Diagrama de flujo) de cómo quedaría el diseño del control cinemático para la generación de trayectorias explicada anteriormente, pero de más manera más precisa.



**Figura 27. Diagrama de flujo Diseño del Control Cinemático para la Generación de Trayectorias**

#### 6.4 Diseño del control dinámico (Mono-Articular)

Para el diseño del control dinámico monoarticular se realizará la toma de datos de los servomotores para su respectiva identificación, Se procede entonces a aplicar una entrada sobre cada uno de los servos y se obtienen las curvas representativas de cada uno de ellos. Consistiendo en aplicar sobre un sistema en equilibrio, una entrada en forma de escalón y observar la respuesta del mismo. Posteriormente se analiza esta respuesta, obteniendo un polinomio denominado “función de transferencia” que pretende ser un fiel reflejo del comportamiento del proceso, donde básicamente todos los procesos existentes en la naturaleza pueden clasificarse en sistemas de primer orden y sistemas de segundo orden y de orden superior.

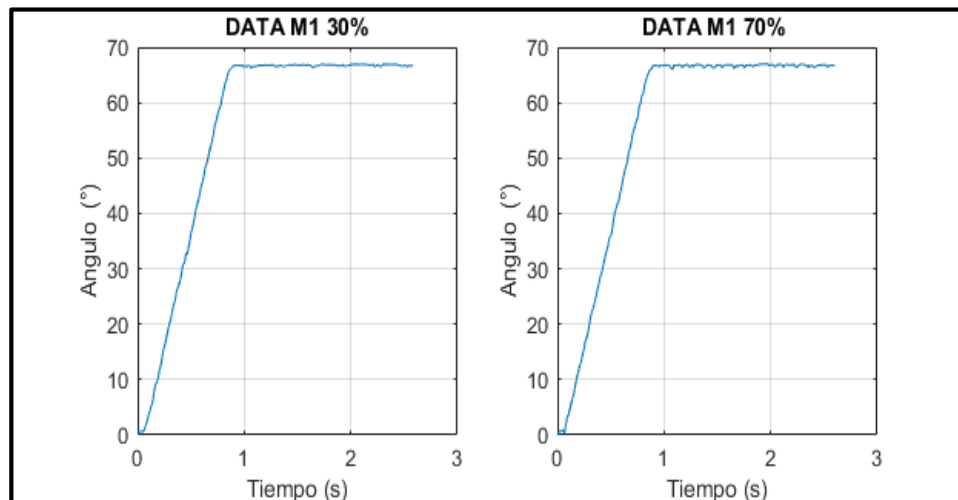
Donde se reflejará un fragmento de las datas(Figura 28-Figura 29-Figura 30-Figura 31-Figura 32-Figura 33-Figura 34) promedios para demostrar que la dinámica del modelo es completamente validada, usando el 70% para identificación del sistema y el 30% para validación. Principalmente usamos un script en Matlab para graficar(Grafica 1-Grafica 2-Grafica 3-Grafica 4-Grafica 5-Grafica 6-Grafica 7) la dinámica del sistema en los dos instantes mencionados (70%, 30%), este mismo proceso se repetirá para el total de servos como se muestra a continuación.

#### 6.4.1 Toma de datos del manipulador 1

##### Motor 1

| DATA PROMEDIO |            | DATA PROMEDIO 70% |            | DATA PROMEDIO 30% |            | ESCALON   |
|---------------|------------|-------------------|------------|-------------------|------------|-----------|
| Tiempo (s)    | Angulo (°) | Tiempo (s)        | Angulo (°) | Tiempo (s)        | Angulo (°) | 512 - 720 |
| 0,00          | 0,42       | 0,00              | 0,60       | 0,00              | 0,00       | 720,00    |
| 0,01          | 0,61       | 0,01              | 0,60       | 0,01              | 0,64       | 720,00    |
| 0,03          | 0,61       | 0,02              | 0,60       | 0,03              | 0,64       | 720,00    |
| 0,04          | 0,61       | 0,04              | 0,60       | 0,04              | 0,64       | 720,00    |
| 0,05          | 8,77       | 0,05              | 0,69       | 0,05              | 0,97       | 720,00    |
| 0,06          | 0,74       | 0,06              | 0,92       | 0,07              | 0,32       | 720,00    |
| 0,08          | 1,74       | 0,07              | 1,66       | 0,08              | 1,93       | 720,00    |
| 0,09          | 2,77       | 0,09              | 2,67       | 0,09              | 3,01       | 720,00    |
| 0,10          | 3,61       | 0,10              | 3,50       | 0,11              | 3,87       | 720,00    |
| 0,12          | 4,51       | 0,11              | 4,37       | 0,12              | 4,83       | 720,00    |
| 0,13          | 5,45       | 0,13              | 5,29       | 0,13              | 5,80       | 720,00    |
| 0,14          | 6,25       | 0,14              | 6,17       | 0,14              | 6,45       | 720,00    |
| 0,16          | 7,70       | 0,15              | 7,73       | 0,16              | 7,63       | 720,00    |
| 0,17          | 9,12       | 0,17              | 9,07       | 0,17              | 9,24       | 720,00    |
| 0,18          | 9,73       | 0,18              | 9,58       | 0,18              | 10,10      | 720,00    |
| 0,20          | 10,83      | 0,19              | 10,54      | 0,20              | 11,49      | 720,00    |
| 0,21          | 11,96      | 0,21              | 11,69      | 0,21              | 12,57      | 720,00    |
| 0,22          | 12,99      | 0,22              | 13,03      | 0,22              | 12,89      | 720,00    |
| 0,23          | 14,34      | 0,23              | 14,23      | 0,24              | 14,61      | 720,00    |
| 0,25          | 15,53      | 0,24              | 15,51      | 0,25              | 15,58      | 720,00    |
| 0,26          | 16,69      | 0,26              | 16,67      | 0,26              | 16,76      | 720,00    |

Figura 28.Datas promedio del motor 1

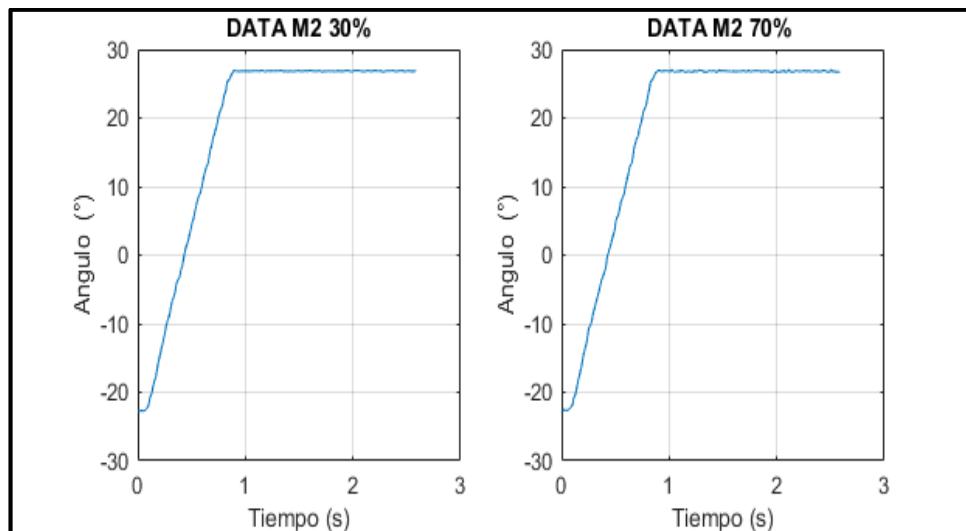


Grafica 1. Salida del comportamiento del motor 1 ante el escalón de entrada

## Motor 2

| DATA PROMEDIO |            | DATA PROMEDIO 70% |            | DATA PROMEDIO 30% |            | ESCALON   |
|---------------|------------|-------------------|------------|-------------------|------------|-----------|
| Tiempo (s)    | Angulo (°) | Tiempo (s)        | Angulo (°) | Tiempo (s)        | Angulo (°) | 512 - 720 |
| 0,00          | -22,82     | 0,00              | -22,79     | 0,00              | -22,88     | 590,00    |
| 0,01          | -22,72     | 0,01              | -22,74     | 0,01              | -22,67     | 590,00    |
| 0,02          | -22,69     | 0,02              | -22,74     | 0,02              | -22,56     | 590,00    |
| 0,04          | -22,62     | 0,04              | -22,65     | 0,03              | -22,56     | 590,00    |
| 0,05          | -22,75     | 0,05              | -22,79     | 0,05              | -22,67     | 590,00    |
| 0,06          | -22,62     | 0,06              | -22,65     | 0,06              | -22,56     | 590,00    |
| 0,08          | -22,49     | 0,08              | -22,51     | 0,07              | -22,45     | 590,00    |
| 0,09          | -22,20     | 0,09              | -22,24     | 0,09              | -22,13     | 590,00    |
| 0,10          | -21,85     | 0,10              | -21,87     | 0,10              | -21,81     | 590,00    |
| 0,11          | -20,79     | 0,11              | -20,76     | 0,11              | -20,84     | 590,00    |
| 0,13          | -20,24     | 0,13              | -20,21     | 0,13              | -20,30     | 590,00    |
| 0,14          | -19,24     | 0,14              | -19,24     | 0,14              | -19,23     | 590,00    |
| 0,15          | -18,37     | 0,15              | -18,37     | 0,15              | -18,37     | 590,00    |
| 0,17          | -17,72     | 0,17              | -17,72     | 0,16              | -17,72     | 590,00    |
| 0,18          | -16,63     | 0,18              | -16,62     | 0,18              | -16,65     | 590,00    |
| 0,19          | -15,60     | 0,19              | -15,61     | 0,19              | -15,58     | 590,00    |
| 0,21          | -14,60     | 0,21              | -14,59     | 0,20              | -14,61     | 590,00    |
| 0,22          | -13,60     | 0,22              | -13,63     | 0,22              | -13,54     | 590,00    |
| 0,23          | -12,83     | 0,23              | -12,84     | 0,23              | -12,78     | 590,00    |
| 0,25          | -11,86     | 0,25              | -11,92     | 0,24              | -11,71     | 590,00    |
| 0,26          | -10,67     | 0,26              | -10,68     | 0,25              | -10,63     | 590,00    |

Figura 29.Datas promedio del motor 2

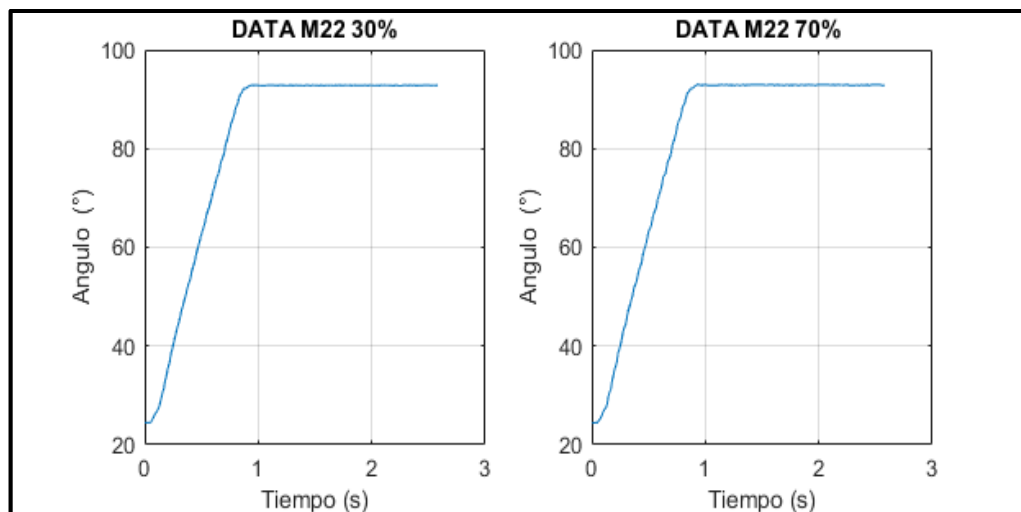


Grafica 2.Salida del comportamiento del motor 2 ante el escalón de entrada

## Motor 2-2

| DATA PROMEDIO |            | DATA PROMEDIO 70% |            | DATA PROMEDIO 30% |            | ESCALON |
|---------------|------------|-------------------|------------|-------------------|------------|---------|
| Tiempo (s)    | Angulo (°) | Tiempo (s)        | Angulo (°) | Tiempo (s)        | Angulo (°) | 590-800 |
| 0,00          | 24,49      | 0,00              | 24,49      | 0,00              | 24,49      | 800,00  |
| 0,01          | 24,46      | 0,01              | 24,49      | 0,01              | 24,38      | 800,00  |
| 0,02          | 24,46      | 0,02              | 24,49      | 0,02              | 24,38      | 800,00  |
| 0,04          | 24,49      | 0,04              | 24,49      | 0,04              | 24,49      | 800,00  |
| 0,05          | 24,49      | 0,05              | 24,49      | 0,05              | 24,49      | 800,00  |
| 0,06          | 24,88      | 0,06              | 24,91      | 0,06              | 24,81      | 800,00  |
| 0,08          | 25,39      | 0,08              | 25,41      | 0,08              | 25,35      | 800,00  |
| 0,09          | 26,17      | 0,09              | 26,24      | 0,09              | 26,00      | 800,00  |
| 0,10          | 26,52      | 0,10              | 26,47      | 0,10              | 26,64      | 800,00  |
| 0,11          | 27,07      | 0,11              | 27,02      | 0,11              | 27,18      | 800,00  |
| 0,13          | 27,78      | 0,13              | 27,81      | 0,13              | 27,71      | 800,00  |
| 0,14          | 29,04      | 0,14              | 29,10      | 0,14              | 28,90      | 800,00  |
| 0,15          | 30,20      | 0,15              | 30,20      | 0,15              | 30,19      | 800,00  |
| 0,17          | 31,36      | 0,17              | 31,35      | 0,17              | 31,37      | 800,00  |
| 0,18          | 33,10      | 0,18              | 33,10      | 0,18              | 33,09      | 800,00  |
| 0,19          | 33,90      | 0,19              | 33,93      | 0,19              | 33,84      | 800,00  |
| 0,20          | 35,48      | 0,20              | 35,50      | 0,20              | 35,45      | 800,00  |
| 0,22          | 36,77      | 0,22              | 36,88      | 0,22              | 36,52      | 800,00  |
| 0,23          | 38,35      | 0,23              | 38,35      | 0,23              | 38,35      | 800,00  |
| 0,24          | 39,51      | 0,24              | 39,55      | 0,24              | 39,42      | 800,00  |
| 0,26          | 41,02      | 0,26              | 41,11      | 0,26              | 40,82      | 800,00  |

Figura 30. Datos promedio del motor 2-2

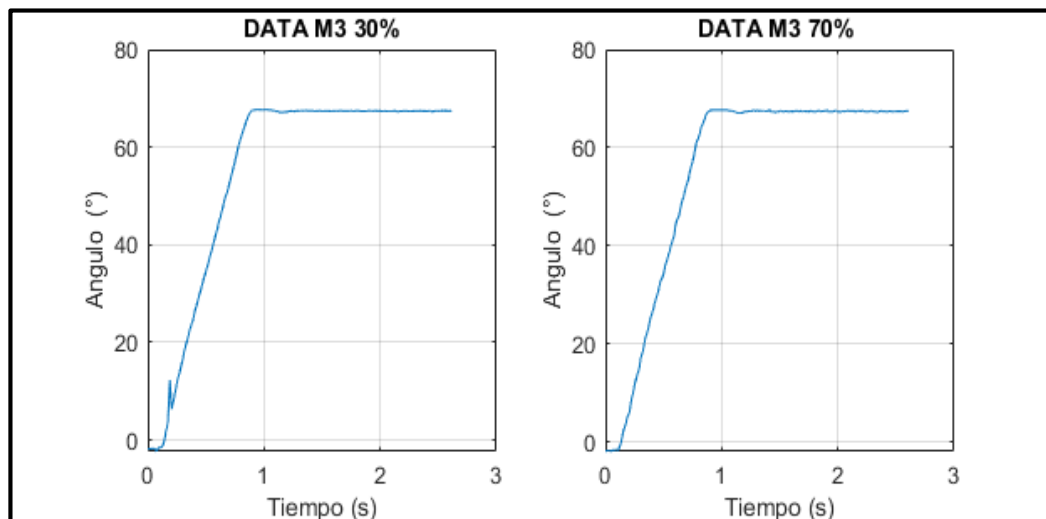


Grafica 3. Salida del comportamiento del motor 2-2 ante el escalón de entrada

### Motor 3

| DATA PROMEDIO |            | DATA PROMEDIO 70% |            | DATA PROMEDIO 30% |            | ESCALON   |
|---------------|------------|-------------------|------------|-------------------|------------|-----------|
| Tiempo (s)    | Angulo (°) | Tiempo (s)        | Angulo (°) | Tiempo (s)        | Angulo (°) | 512 - 720 |
| 0,00          | -1,80      | 0,00              | -1,84      | 0,00              | -1,72      | 720,00    |
| 0,01          | -1,84      | 0,01              | -1,80      | 0,01              | -1,93      | 720,00    |
| 0,02          | -1,80      | 0,02              | -1,84      | 0,02              | -1,72      | 720,00    |
| 0,04          | -1,77      | 0,04              | -1,75      | 0,04              | -1,83      | 720,00    |
| 0,05          | -1,80      | 0,05              | -1,75      | 0,05              | -1,93      | 720,00    |
| 0,06          | -1,68      | 0,06              | -1,70      | 0,06              | -1,61      | 720,00    |
| 0,08          | -2,16      | 0,08              | -2,35      | 0,08              | -1,72      | 720,00    |
| 0,09          | -1,48      | 0,09              | -1,47      | 0,09              | -1,50      | 720,00    |
| 0,10          | -1,64      | 0,10              | -1,61      | 0,10              | -1,72      | 720,00    |
| 0,12          | -1,45      | 0,13              | -1,34      | 0,11              | -1,72      | 720,00    |
| 0,14          | -0,06      | 0,14              | 0,00       | 0,13              | -0,21      | 720,00    |
| 0,16          | 1,84       | 0,16              | 2,07       | 0,15              | 1,29       | 720,00    |
| 0,17          | 3,16       | 0,17              | 3,45       | 0,16              | 2,47       | 720,00    |
| 0,19          | 9,67       | 0,19              | 12,29      | 0,17              | 3,54       | 720,00    |
| 0,20          | 5,90       | 0,21              | 6,31       | 0,19              | 4,94       | 720,00    |
| 0,22          | 7,54       | 0,22              | 8,19       | 0,21              | 6,02       | 720,00    |
| 0,23          | 9,51       | 0,24              | 9,81       | 0,23              | 8,81       | 720,00    |
| 0,25          | 11,15      | 0,25              | 11,42      | 0,24              | 10,53      | 720,00    |
| 0,26          | 12,50      | 0,26              | 12,75      | 0,25              | 11,92      | 720,00    |
| 0,27          | 13,70      | 0,28              | 14,00      | 0,27              | 13,00      | 720,00    |
| 0,29          | 15,08      | 0,29              | 15,38      | 0,28              | 14,39      | 720,00    |

Figura 31.Datas promedio del motor 3

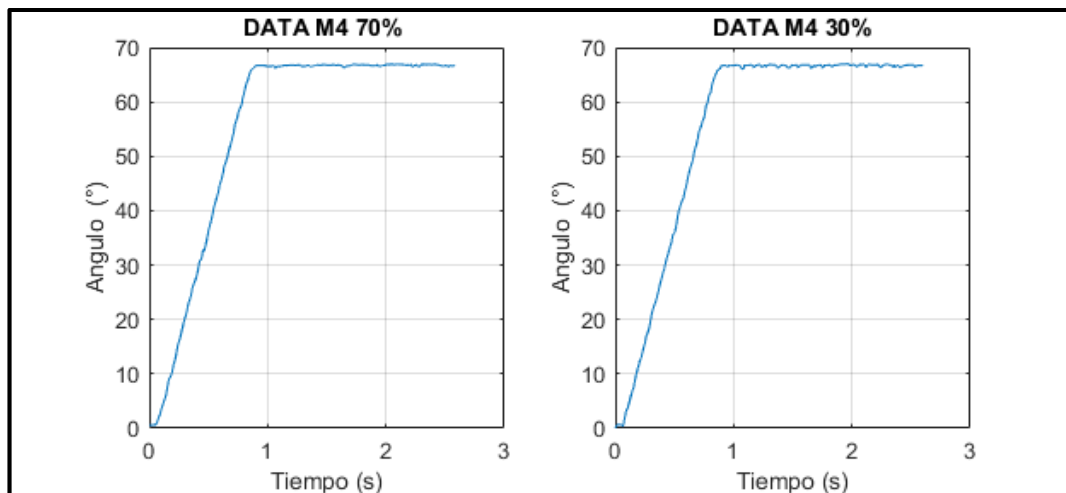


Grafica 4.Salida del comportamiento del motor 3 ante el escalón de entrada

## Motor 4

| DATA PROMEDIO |            | DATA PROMEDIO 70% |            | DATA PROMEDIO 30% |            | ESCALON   |
|---------------|------------|-------------------|------------|-------------------|------------|-----------|
| Tiempo (s)    | Angulo (°) | Tiempo (s)        | Angulo (°) | Tiempo (s)        | Angulo (°) | 512 - 720 |
| 0,00          | 0,42       | 0,00              | 0,00       | 0,00              | 0,60       | 720,00    |
| 0,01          | 0,61       | 0,01              | 0,64       | 0,01              | 0,60       | 720,00    |
| 0,03          | 0,61       | 0,03              | 0,64       | 0,02              | 0,60       | 720,00    |
| 0,04          | 0,61       | 0,04              | 0,64       | 0,04              | 0,60       | 720,00    |
| 0,05          | 8,77       | 0,05              | 0,64       | 0,05              | 0,69       | 720,00    |
| 0,06          | 0,74       | 0,07              | 0,32       | 0,06              | 0,92       | 720,00    |
| 0,08          | 1,74       | 0,08              | 1,93       | 0,07              | 1,66       | 720,00    |
| 0,09          | 2,77       | 0,09              | 3,01       | 0,09              | 2,67       | 720,00    |
| 0,10          | 3,61       | 0,11              | 3,87       | 0,10              | 3,50       | 720,00    |
| 0,12          | 4,51       | 0,12              | 4,83       | 0,11              | 4,37       | 720,00    |
| 0,13          | 5,45       | 0,13              | 5,80       | 0,13              | 5,29       | 720,00    |
| 0,14          | 6,25       | 0,14              | 6,45       | 0,14              | 6,17       | 720,00    |
| 0,16          | 7,70       | 0,16              | 7,63       | 0,15              | 7,73       | 720,00    |
| 0,17          | 9,12       | 0,17              | 9,24       | 0,17              | 9,07       | 720,00    |
| 0,18          | 9,73       | 0,18              | 10,10      | 0,18              | 9,58       | 720,00    |
| 0,20          | 10,83      | 0,20              | 11,49      | 0,19              | 10,54      | 720,00    |
| 0,21          | 11,96      | 0,21              | 12,57      | 0,21              | 11,69      | 720,00    |
| 0,22          | 12,99      | 0,22              | 12,89      | 0,22              | 13,03      | 720,00    |
| 0,23          | 14,34      | 0,24              | 14,61      | 0,23              | 14,23      | 720,00    |
| 0,25          | 15,53      | 0,25              | 15,58      | 0,24              | 15,51      | 720,00    |
| 0,26          | 16,69      | 0,26              | 16,76      | 0,26              | 16,67      | 720,00    |

Figura 32.Datas promedio del motor 4

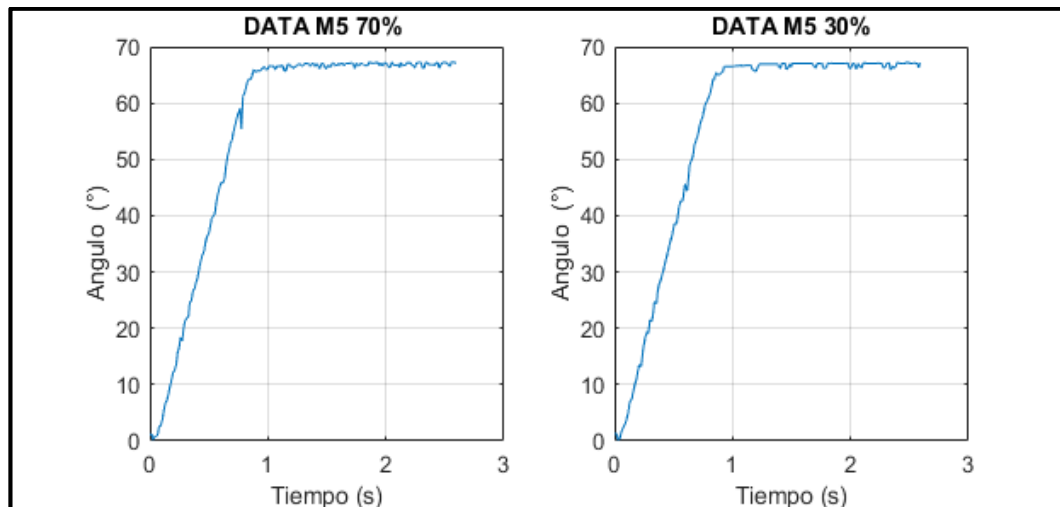


Grafica 5.Salida del comportamiento del motor 4 ante el escalón de entrada

## Motor 5

| DATA PROMEDIO |            | DATA PROMEDIO 70% |            | DATA PROMEDIO 30% |            | ESCALON   |
|---------------|------------|-------------------|------------|-------------------|------------|-----------|
| Tiempo (s)    | Angulo (°) | Tiempo (s)        | Angulo (°) | Tiempo (s)        | Angulo (°) | 512 - 720 |
| 0,00          | 1,19       | 0,00              | 1,29       | 0,00              | 1,15       | 720,00    |
| 0,01          | 1,22       | 0,02              | 1,29       | 0,01              | 1,20       | 720,00    |
| 0,03          | 0,19       | 0,03              | 0,21       | 0,03              | 0,18       | 720,00    |
| 0,04          | 0,61       | 0,04              | 0,21       | 0,04              | 0,78       | 720,00    |
| 0,05          | 1,00       | 0,06              | 1,40       | 0,05              | 0,83       | 720,00    |
| 0,07          | 1,42       | 0,07              | 2,04       | 0,07              | 1,15       | 720,00    |
| 0,08          | 2,64       | 0,08              | 2,69       | 0,08              | 2,62       | 720,00    |
| 0,09          | 2,87       | 0,10              | 3,33       | 0,09              | 2,67       | 720,00    |
| 0,11          | 3,90       | 0,11              | 4,30       | 0,11              | 3,73       | 720,00    |
| 0,12          | 5,19       | 0,12              | 5,16       | 0,12              | 5,20       | 720,00    |
| 0,13          | 6,77       | 0,13              | 6,98       | 0,13              | 6,68       | 720,00    |
| 0,15          | 7,28       | 0,15              | 7,41       | 0,14              | 7,23       | 720,00    |
| 0,16          | 8,35       | 0,16              | 8,49       | 0,16              | 8,29       | 720,00    |
| 0,17          | 9,67       | 0,17              | 9,88       | 0,17              | 9,58       | 720,00    |
| 0,19          | 10,89      | 0,19              | 10,96      | 0,18              | 10,86      | 720,00    |
| 0,20          | 12,25      | 0,20              | 12,35      | 0,20              | 12,20      | 720,00    |
| 0,21          | 12,73      | 0,21              | 13,54      | 0,21              | 12,38      | 720,00    |
| 0,22          | 13,37      | 0,23              | 13,21      | 0,22              | 13,44      | 720,00    |
| 0,24          | 15,60      | 0,24              | 15,25      | 0,24              | 15,74      | 720,00    |
| 0,25          | 16,60      | 0,25              | 16,87      | 0,25              | 16,48      | 720,00    |
| 0,26          | 18,37      | 0,26              | 18,37      | 0,26              | 18,37      | 720,00    |

Figura 33. Datos promedio del motor 5

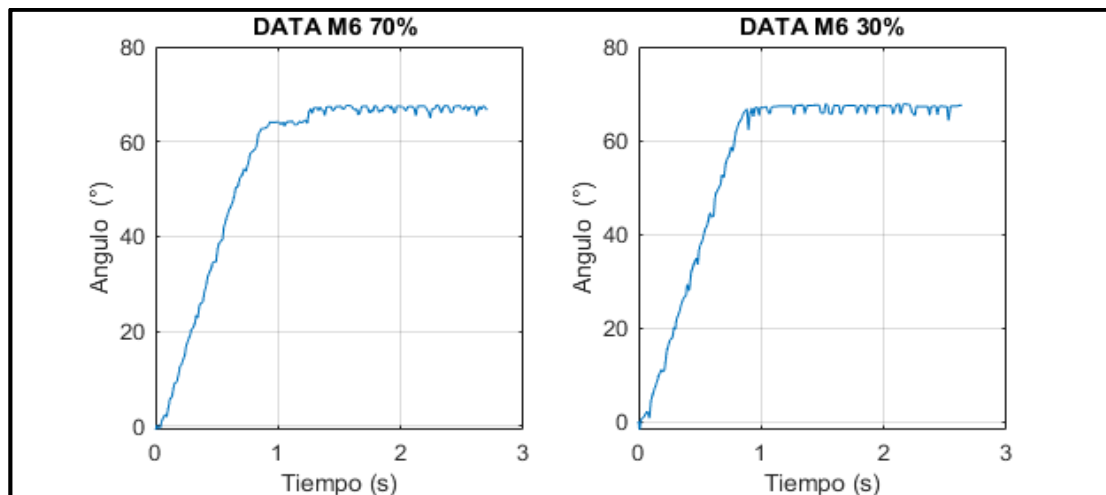


Grafica 6. Salida del comportamiento del motor 5 ante el escalón de entrada

## Motor 6

| DATA PROMEDIO |            | DATA PROMEDIO 70% |            | DATA PROMEDIO 30% |            | ESCALON   |
|---------------|------------|-------------------|------------|-------------------|------------|-----------|
| Tiempo (s)    | Angulo (°) | Tiempo (s)        | Angulo (°) | Tiempo (s)        | Angulo (°) | 512 - 720 |
| 0,00          | -0,55      | 0,00              | 0,11       | 0,00              | -0,83      | 720,00    |
| 0,01          | -0,42      | 0,01              | -1,72      | 0,01              | 0,14       | 720,00    |
| 0,02          | -0,19      | 0,02              | 0,54       | 0,02              | -0,51      | 720,00    |
| 0,04          | -0,03      | 0,04              | 0,86       | 0,04              | -0,41      | 720,00    |
| 0,05          | 1,00       | 0,05              | 1,29       | 0,05              | 0,87       | 720,00    |
| 0,06          | 1,64       | 0,06              | 1,83       | 0,06              | 1,57       | 720,00    |
| 0,07          | 2,32       | 0,07              | 2,26       | 0,08              | 2,35       | 720,00    |
| 0,09          | 1,56       | 0,09              | 0,75       | 0,09              | 1,91       | 720,00    |
| 0,11          | 4,03       | 0,10              | 4,19       | 0,11              | 3,96       | 720,00    |
| 0,12          | 5,67       | 0,11              | 5,59       | 0,12              | 5,71       | 720,00    |
| 0,13          | 6,41       | 0,13              | 7,20       | 0,13              | 6,08       | 720,00    |
| 0,15          | 7,93       | 0,15              | 8,16       | 0,15              | 7,83       | 720,00    |
| 0,16          | 9,06       | 0,16              | 9,13       | 0,16              | 9,02       | 720,00    |
| 0,17          | 9,44       | 0,17              | 9,99       | 0,17              | 9,21       | 720,00    |
| 0,19          | 11,02      | 0,19              | 11,17      | 0,19              | 10,96      | 720,00    |
| 0,20          | 12,02      | 0,20              | 10,63      | 0,20              | 12,61      | 720,00    |
| 0,21          | 12,34      | 0,21              | 11,17      | 0,21              | 12,84      | 720,00    |
| 0,23          | 14,42      | 0,23              | 15,04      | 0,23              | 14,16      | 720,00    |
| 0,24          | 15,31      | 0,24              | 16,22      | 0,24              | 14,92      | 720,00    |
| 0,25          | 17,08      | 0,25              | 17,29      | 0,25              | 16,99      | 720,00    |
| 0,27          | 18,05      | 0,28              | 17,94      | 0,27              | 18,09      | 720,00    |

Figura 34.Datas promedio del motor 6



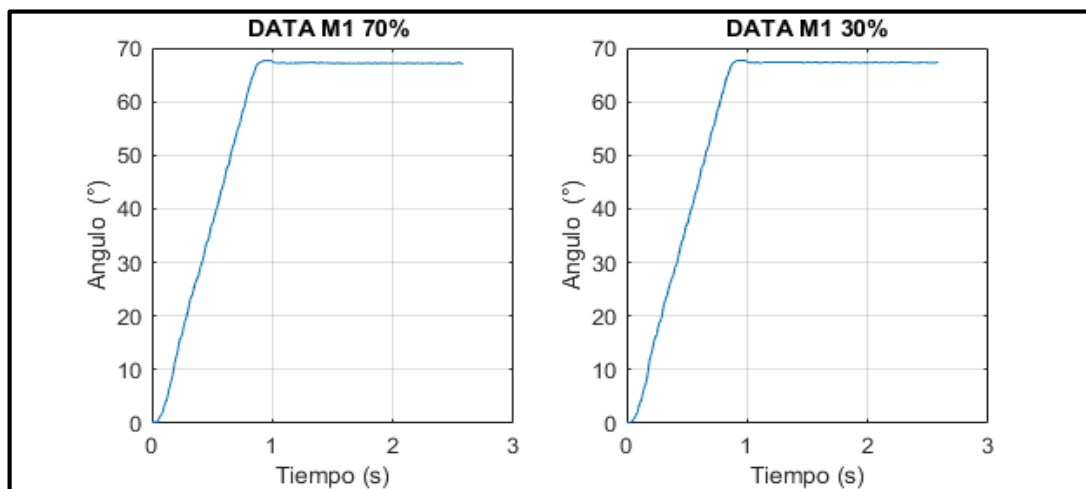
Grafica 7.Salida del comportamiento del motor 6 ante el escalón de entrada

#### 6.4.2 Toma de datos del manipulador 2

##### Motor 1

| DATA PROMEDIO |            | DATA PROMEDIO 70% |            | DATA PROMEDIO 30% |            | ESCALON   |
|---------------|------------|-------------------|------------|-------------------|------------|-----------|
| Tiempo (s)    | Angulo (°) | Tiempo (s)        | Angulo (°) | Tiempo (s)        | Angulo (°) | 512 - 720 |
| 0,00          | 0,23       | 0,00              | 0,21       | 0,00              | 0,23       | 720,00    |
| 0,01          | 0,23       | 0,01              | 0,21       | 0,01              | 0,23       | 720,00    |
| 0,03          | 0,19       | 0,03              | 0,11       | 0,02              | 0,23       | 720,00    |
| 0,04          | 0,26       | 0,04              | 0,32       | 0,04              | 0,23       | 720,00    |
| 0,05          | 0,29       | 0,05              | 0,43       | 0,05              | 0,23       | 720,00    |
| 0,06          | 1,03       | 0,07              | 1,07       | 0,06              | 1,01       | 720,00    |
| 0,08          | 1,64       | 0,08              | 1,72       | 0,08              | 1,61       | 720,00    |
| 0,09          | 1,97       | 0,09              | 1,93       | 0,09              | 1,98       | 720,00    |
| 0,10          | 3,16       | 0,10              | 3,22       | 0,10              | 3,13       | 720,00    |
| 0,12          | 4,19       | 0,12              | 4,19       | 0,12              | 4,19       | 720,00    |
| 0,13          | 4,96       | 0,13              | 5,05       | 0,13              | 4,93       | 720,00    |
| 0,14          | 6,25       | 0,14              | 6,23       | 0,14              | 6,26       | 720,00    |
| 0,16          | 7,38       | 0,16              | 7,41       | 0,15              | 7,37       | 720,00    |
| 0,17          | 8,64       | 0,17              | 8,59       | 0,17              | 8,66       | 720,00    |
| 0,18          | 9,93       | 0,18              | 10,10      | 0,18              | 9,85       | 720,00    |
| 0,19          | 11,54      | 0,19              | 11,82      | 0,19              | 11,42      | 720,00    |
| 0,21          | 13,05      | 0,21              | 13,32      | 0,21              | 12,94      | 720,00    |
| 0,22          | 14,24      | 0,22              | 14,39      | 0,22              | 14,18      | 720,00    |
| 0,23          | 15,53      | 0,23              | 15,68      | 0,23              | 15,47      | 720,00    |
| 0,25          | 16,47      | 0,25              | 16,54      | 0,25              | 16,44      | 720,00    |
| 0,26          | 17,66      | 0,26              | 17,72      | 0,26              | 17,63      | 720,00    |

Figura 35.Datas promedio del motor 1

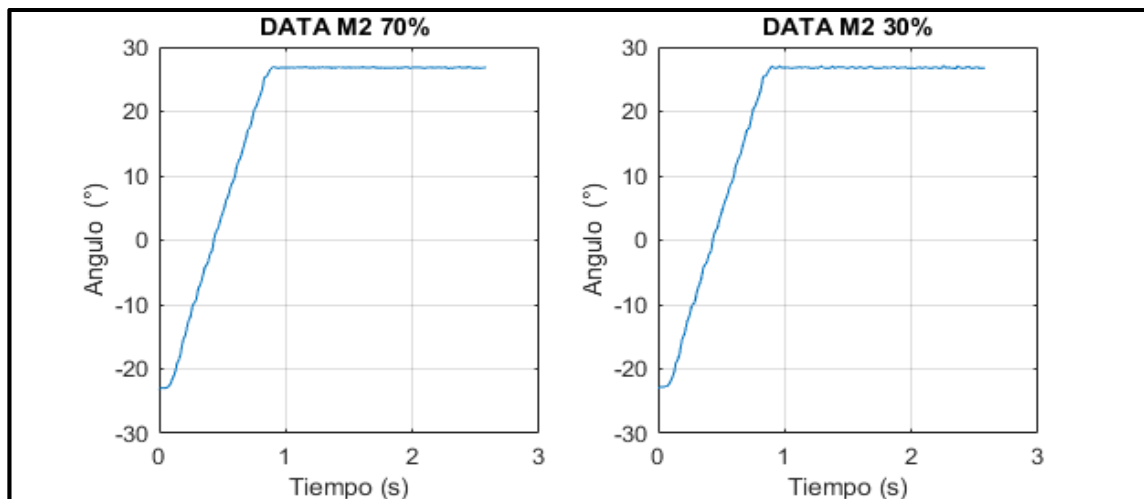


Grafica 8.Salida del comportamiento del motor 1 ante el escalón de entrada

## Motor 2

| DATA PROMEDIO |            | DATA PROMEDIO 70% |            | DATA PROMEDIO 30% |            | ESCALON   |
|---------------|------------|-------------------|------------|-------------------|------------|-----------|
| Tiempo (s)    | Angulo (°) | Tiempo (s)        | Angulo (°) | Tiempo (s)        | Angulo (°) | 512 - 720 |
| 0,00          | -22,82     | 0,00              | -22,79     | 0,00              | -22,88     | 590,00    |
| 0,01          | -22,72     | 0,01              | -22,74     | 0,01              | -22,67     | 590,00    |
| 0,02          | -22,69     | 0,02              | -22,74     | 0,02              | -22,56     | 590,00    |
| 0,04          | -22,62     | 0,04              | -22,65     | 0,03              | -22,56     | 590,00    |
| 0,05          | -22,75     | 0,05              | -22,79     | 0,05              | -22,67     | 590,00    |
| 0,06          | -22,62     | 0,06              | -22,65     | 0,06              | -22,56     | 590,00    |
| 0,08          | -22,49     | 0,08              | -22,51     | 0,07              | -22,45     | 590,00    |
| 0,09          | -22,20     | 0,09              | -22,24     | 0,09              | -22,13     | 590,00    |
| 0,10          | -21,85     | 0,10              | -21,87     | 0,10              | -21,81     | 590,00    |
| 0,11          | -20,79     | 0,11              | -20,76     | 0,11              | -20,84     | 590,00    |
| 0,13          | -20,24     | 0,13              | -20,21     | 0,13              | -20,30     | 590,00    |
| 0,14          | -19,24     | 0,14              | -19,24     | 0,14              | -19,23     | 590,00    |
| 0,15          | -18,37     | 0,15              | -18,37     | 0,15              | -18,37     | 590,00    |
| 0,17          | -17,72     | 0,17              | -17,72     | 0,16              | -17,72     | 590,00    |
| 0,18          | -16,63     | 0,18              | -16,62     | 0,18              | -16,65     | 590,00    |
| 0,19          | -15,60     | 0,19              | -15,61     | 0,19              | -15,58     | 590,00    |
| 0,21          | -14,60     | 0,21              | -14,59     | 0,20              | -14,61     | 590,00    |
| 0,22          | -13,60     | 0,22              | -13,63     | 0,22              | -13,54     | 590,00    |
| 0,23          | -12,83     | 0,23              | -12,84     | 0,23              | -12,78     | 590,00    |
| 0,25          | -11,86     | 0,25              | -11,92     | 0,24              | -11,71     | 590,00    |
| 0,26          | -10,67     | 0,26              | -10,68     | 0,25              | -10,63     | 590,00    |

Figura 36.Datas promedio del motor 2

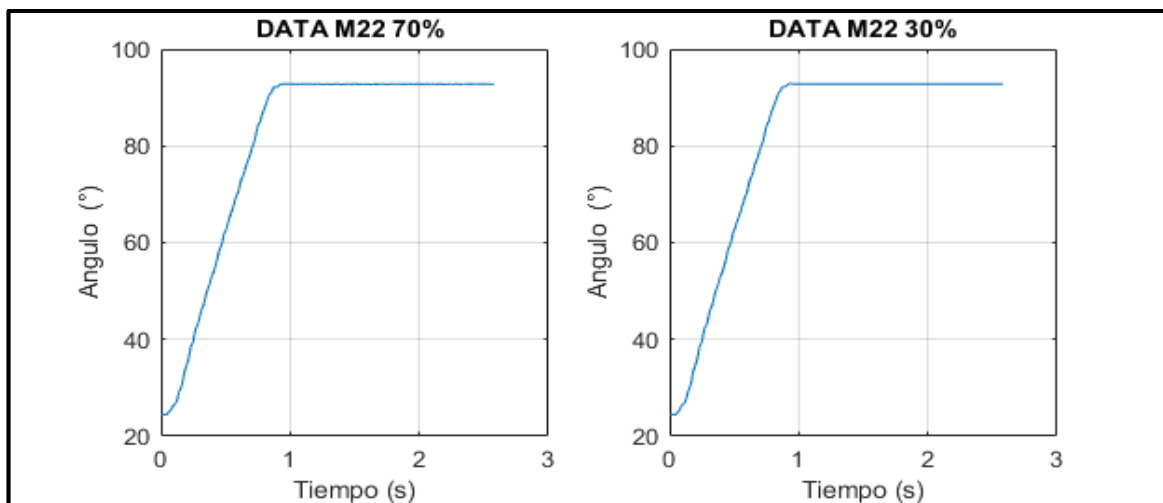


Grafica 9.Salida del comportamiento del motor 2 ante el escalón de entrada

## Motor 2-2

| DATA PROMEDIO |            | DATA PROMEDIO 70% |            | DATA PROMEDIO 30% |            | ESCALON |
|---------------|------------|-------------------|------------|-------------------|------------|---------|
| Tiempo (s)    | Angulo (°) | Tiempo (s)        | Angulo (°) | Tiempo (s)        | Angulo (°) | 590-800 |
| 0,00          | 24,49      | 0,00              | 24,49      | 0,00              | 24,49      | 800,00  |
| 0,01          | 24,49      | 0,01              | 24,49      | 0,01              | 24,49      | 800,00  |
| 0,03          | 24,49      | 0,03              | 24,49      | 0,03              | 24,49      | 800,00  |
| 0,04          | 24,49      | 0,04              | 24,49      | 0,04              | 24,49      | 800,00  |
| 0,05          | 24,49      | 0,05              | 24,49      | 0,05              | 24,49      | 800,00  |
| 0,06          | 24,94      | 0,06              | 24,81      | 0,06              | 25,00      | 800,00  |
| 0,08          | 25,46      | 0,08              | 25,46      | 0,08              | 25,46      | 800,00  |
| 0,09          | 26,20      | 0,09              | 26,32      | 0,09              | 26,15      | 800,00  |
| 0,10          | 26,43      | 0,10              | 26,43      | 0,10              | 26,43      | 800,00  |
| 0,12          | 27,04      | 0,12              | 27,07      | 0,12              | 27,02      | 800,00  |
| 0,13          | 27,88      | 0,13              | 27,71      | 0,13              | 27,95      | 800,00  |
| 0,14          | 29,10      | 0,14              | 29,00      | 0,14              | 29,14      | 800,00  |
| 0,16          | 30,26      | 0,16              | 30,29      | 0,16              | 30,25      | 800,00  |
| 0,17          | 31,32      | 0,17              | 31,26      | 0,17              | 31,35      | 800,00  |
| 0,18          | 33,06      | 0,18              | 33,09      | 0,18              | 33,06      | 800,00  |
| 0,19          | 33,90      | 0,19              | 33,84      | 0,19              | 33,93      | 800,00  |
| 0,21          | 35,48      | 0,21              | 35,45      | 0,21              | 35,50      | 800,00  |
| 0,22          | 36,80      | 0,22              | 36,63      | 0,22              | 36,88      | 800,00  |
| 0,23          | 38,35      | 0,23              | 38,35      | 0,23              | 38,35      | 800,00  |
| 0,25          | 39,51      | 0,25              | 39,53      | 0,25              | 39,50      | 800,00  |
| 0,26          | 41,06      | 0,26              | 40,93      | 0,26              | 41,11      | 800,00  |

Figura 37.Datas promedio del motor 2-2

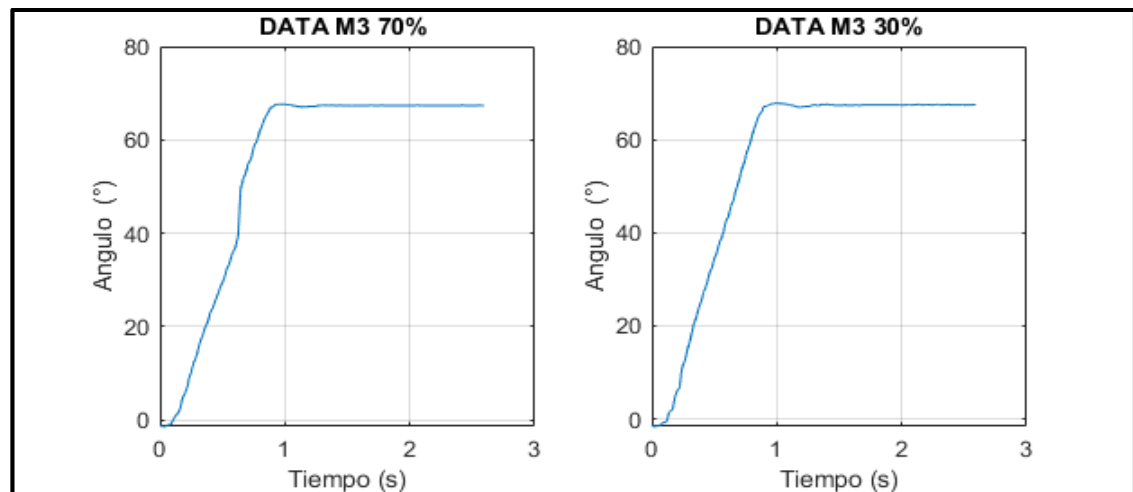


Grafica 10.Salida del comportamiento del motor 2-2 ante el escalón de entrada

### Motor 3

| DATA PROMEDIO |            | DATA PROMEDIO 70% |            | DATA PROMEDIO 30% |            | ESCALON   |
|---------------|------------|-------------------|------------|-------------------|------------|-----------|
| Tiempo (s)    | Angulo (°) | Tiempo (s)        | Angulo (°) | Tiempo (s)        | Angulo (°) | 512 - 720 |
| 0,00          | -0,55      | 0,00              | 0,11       | 0,00              | -0,83      | 720,00    |
| 0,01          | -0,42      | 0,01              | -1,72      | 0,01              | 0,14       | 720,00    |
| 0,02          | -0,19      | 0,02              | 0,54       | 0,02              | -0,51      | 720,00    |
| 0,04          | -0,03      | 0,04              | 0,86       | 0,04              | -0,41      | 720,00    |
| 0,05          | 1,00       | 0,05              | 1,29       | 0,05              | 0,87       | 720,00    |
| 0,06          | 1,64       | 0,06              | 1,83       | 0,06              | 1,57       | 720,00    |
| 0,07          | 2,32       | 0,07              | 2,26       | 0,08              | 2,35       | 720,00    |
| 0,09          | 1,56       | 0,09              | 0,75       | 0,09              | 1,91       | 720,00    |
| 0,11          | 4,03       | 0,10              | 4,19       | 0,11              | 3,96       | 720,00    |
| 0,12          | 5,67       | 0,11              | 5,59       | 0,12              | 5,71       | 720,00    |
| 0,13          | 6,41       | 0,13              | 7,20       | 0,13              | 6,08       | 720,00    |
| 0,15          | 7,93       | 0,15              | 8,16       | 0,15              | 7,83       | 720,00    |
| 0,16          | 9,06       | 0,16              | 9,13       | 0,16              | 9,02       | 720,00    |
| 0,17          | 9,44       | 0,17              | 9,99       | 0,17              | 9,21       | 720,00    |
| 0,19          | 11,02      | 0,19              | 11,17      | 0,19              | 10,96      | 720,00    |
| 0,20          | 12,02      | 0,20              | 10,63      | 0,20              | 12,61      | 720,00    |
| 0,21          | 12,34      | 0,21              | 11,17      | 0,21              | 12,84      | 720,00    |
| 0,23          | 14,42      | 0,23              | 15,04      | 0,23              | 14,16      | 720,00    |
| 0,24          | 15,31      | 0,24              | 16,22      | 0,24              | 14,92      | 720,00    |
| 0,25          | 17,08      | 0,25              | 17,29      | 0,25              | 16,99      | 720,00    |
| 0,27          | 18,05      | 0,28              | 17,94      | 0,27              | 18,09      | 720,00    |

Figura 38.Datas promedio del motor 3

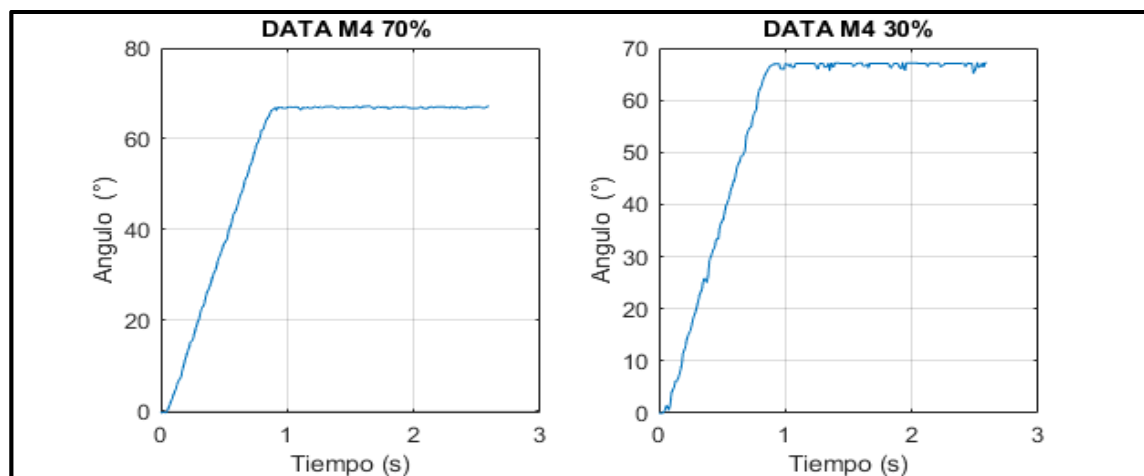


Gráfica 11.Salida del comportamiento del motor 3 ante el escalón de entrada

## Motor 4

| DATA PROMEDIO |            | DATA PROMEDIO 70% |            | DATA PROMEDIO 30% |            | ESCALON   |
|---------------|------------|-------------------|------------|-------------------|------------|-----------|
| Tiempo (s)    | Angulo (°) | Tiempo (s)        | Angulo (°) | Tiempo (s)        | Angulo (°) | 512 - 720 |
| 0,00          | -0,55      | 0,00              | 0,11       | 0,00              | -0,83      | 720,00    |
| 0,01          | -0,42      | 0,01              | -1,72      | 0,01              | 0,14       | 720,00    |
| 0,02          | -0,19      | 0,02              | 0,54       | 0,02              | -0,51      | 720,00    |
| 0,04          | -0,03      | 0,04              | 0,86       | 0,04              | -0,41      | 720,00    |
| 0,05          | 1,00       | 0,05              | 1,29       | 0,05              | 0,87       | 720,00    |
| 0,06          | 1,64       | 0,06              | 1,83       | 0,06              | 1,57       | 720,00    |
| 0,07          | 2,32       | 0,07              | 2,26       | 0,08              | 2,35       | 720,00    |
| 0,09          | 1,56       | 0,09              | 0,75       | 0,09              | 1,91       | 720,00    |
| 0,11          | 4,03       | 0,10              | 4,19       | 0,11              | 3,96       | 720,00    |
| 0,12          | 5,67       | 0,11              | 5,59       | 0,12              | 5,71       | 720,00    |
| 0,13          | 6,41       | 0,13              | 7,20       | 0,13              | 6,08       | 720,00    |
| 0,15          | 7,93       | 0,15              | 8,16       | 0,15              | 7,83       | 720,00    |
| 0,16          | 9,06       | 0,16              | 9,13       | 0,16              | 9,02       | 720,00    |
| 0,17          | 9,44       | 0,17              | 9,99       | 0,17              | 9,21       | 720,00    |
| 0,19          | 11,02      | 0,19              | 11,17      | 0,19              | 10,96      | 720,00    |
| 0,20          | 12,02      | 0,20              | 10,63      | 0,20              | 12,61      | 720,00    |
| 0,21          | 12,34      | 0,21              | 11,17      | 0,21              | 12,84      | 720,00    |
| 0,23          | 14,42      | 0,23              | 15,04      | 0,23              | 14,16      | 720,00    |
| 0,24          | 15,31      | 0,24              | 16,22      | 0,24              | 14,92      | 720,00    |
| 0,25          | 17,08      | 0,25              | 17,29      | 0,25              | 16,99      | 720,00    |
| 0,27          | 18,05      | 0,28              | 17,94      | 0,27              | 18,09      | 720,00    |

Figura 39.Datas promedio del motor 4

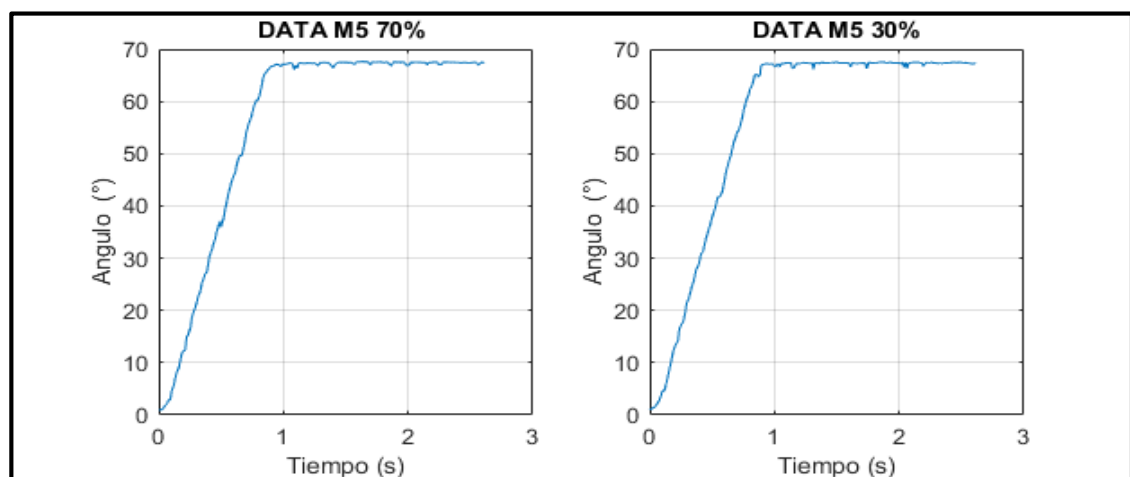


Grafica 12.Salida del comportamiento del motor 4 ante el escalón de entrada

## Motor 5

| DATA PROMEDIO |            | DATA PROMEDIO 70% |            | DATA PROMEDIO 30% |            | ESCALON   |
|---------------|------------|-------------------|------------|-------------------|------------|-----------|
| Tiempo (s)    | Angulo (°) | Tiempo (s)        | Angulo (°) | Tiempo (s)        | Angulo (°) | 512 - 720 |
| 0,00          | 0,97       | 0,00              | 1,07       | 0,00              | 0,92       | 720,00    |
| 0,01          | 1,03       | 0,01              | 1,18       | 0,01              | 0,97       | 720,00    |
| 0,03          | 1,16       | 0,03              | 1,40       | 0,03              | 1,06       | 720,00    |
| 0,04          | 1,39       | 0,04              | 1,50       | 0,04              | 1,34       | 720,00    |
| 0,05          | 1,77       | 0,05              | 1,83       | 0,05              | 1,75       | 720,00    |
| 0,07          | 2,26       | 0,07              | 2,36       | 0,07              | 2,21       | 720,00    |
| 0,08          | 2,96       | 0,08              | 3,01       | 0,08              | 2,95       | 720,00    |
| 0,09          | 3,09       | 0,09              | 3,65       | 0,09              | 2,85       | 720,00    |
| 0,10          | 4,61       | 0,10              | 4,51       | 0,10              | 4,65       | 720,00    |
| 0,12          | 5,51       | 0,12              | 4,73       | 0,12              | 5,85       | 720,00    |
| 0,13          | 6,74       | 0,13              | 5,91       | 0,13              | 7,09       | 720,00    |
| 0,14          | 7,67       | 0,14              | 6,77       | 0,14              | 8,06       | 720,00    |
| 0,16          | 9,09       | 0,16              | 9,02       | 0,16              | 9,12       | 720,00    |
| 0,17          | 10,22      | 0,17              | 9,99       | 0,17              | 10,31      | 720,00    |
| 0,18          | 11,47      | 0,18              | 11,28      | 0,18              | 11,56      | 720,00    |
| 0,20          | 12,34      | 0,19              | 12,57      | 0,20              | 12,25      | 720,00    |
| 0,21          | 12,70      | 0,21              | 13,54      | 0,21              | 12,34      | 720,00    |
| 0,22          | 14,65      | 0,23              | 14,18      | 0,22              | 14,85      | 720,00    |
| 0,24          | 15,66      | 0,24              | 16,44      | 0,24              | 15,33      | 720,00    |
| 0,26          | 16,98      | 0,26              | 17,51      | 0,26              | 16,76      | 720,00    |
| 0,27          | 18,30      | 0,27              | 17,62      | 0,27              | 18,60      | 720,00    |

Figura 40.Datas promedio del motor 5

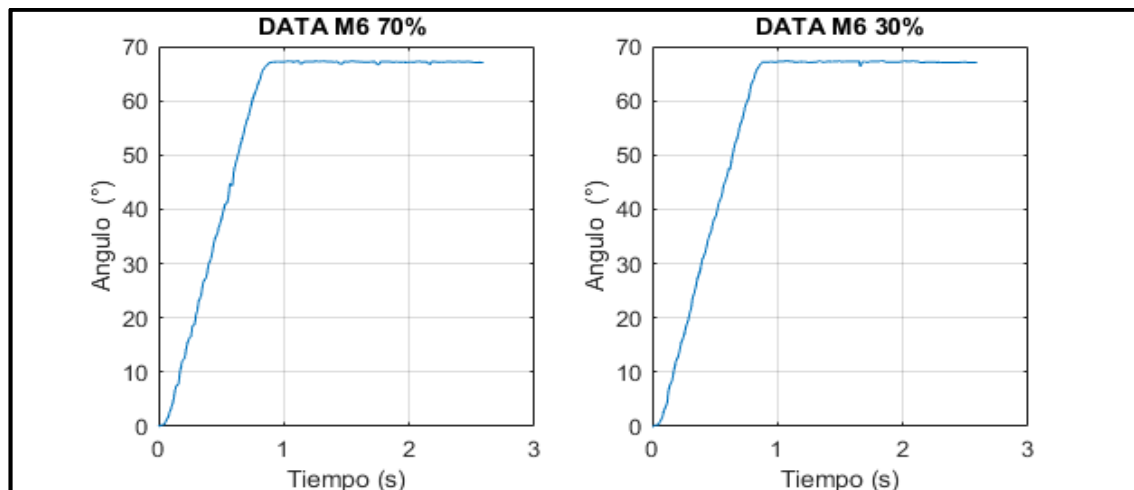


Gráfica 13.Salida del comportamiento del motor 5 ante el escalón de entrada

## Motor 6

| DATA PROMEDIO |            | DATA PROMEDIO 70% |            | DATA PROMEDIO 30% |            | ESCALON   |
|---------------|------------|-------------------|------------|-------------------|------------|-----------|
| Tiempo (s)    | Angulo (°) | Tiempo (s)        | Angulo (°) | Tiempo (s)        | Angulo (°) | 512 - 720 |
| 0,00          | 0,00       | 0,00              | 0,00       | 0,00              | 0,00       | 720,00    |
| 0,01          | 0,06       | 0,01              | 0,00       | 0,01              | 0,09       | 720,00    |
| 0,03          | 0,32       | 0,03              | 0,32       | 0,03              | 0,32       | 720,00    |
| 0,04          | 0,29       | 0,04              | 0,21       | 0,04              | 0,32       | 720,00    |
| 0,05          | 0,42       | 0,05              | 0,32       | 0,05              | 0,46       | 720,00    |
| 0,06          | 1,03       | 0,06              | 0,97       | 0,06              | 1,06       | 720,00    |
| 0,08          | 1,74       | 0,08              | 1,61       | 0,08              | 1,80       | 720,00    |
| 0,09          | 2,67       | 0,09              | 2,58       | 0,09              | 2,72       | 720,00    |
| 0,10          | 3,22       | 0,10              | 3,22       | 0,10              | 3,22       | 720,00    |
| 0,12          | 4,67       | 0,12              | 4,30       | 0,12              | 4,83       | 720,00    |
| 0,13          | 6,45       | 0,13              | 6,55       | 0,13              | 6,40       | 720,00    |
| 0,14          | 7,44       | 0,14              | 7,52       | 0,14              | 7,41       | 720,00    |
| 0,16          | 7,99       | 0,16              | 8,49       | 0,16              | 7,78       | 720,00    |
| 0,17          | 9,86       | 0,17              | 9,88       | 0,17              | 9,85       | 720,00    |
| 0,18          | 10,96      | 0,18              | 10,96      | 0,18              | 10,96      | 720,00    |
| 0,19          | 12,08      | 0,19              | 12,03      | 0,19              | 12,11      | 720,00    |
| 0,21          | 12,70      | 0,21              | 13,00      | 0,21              | 12,57      | 720,00    |
| 0,22          | 14,15      | 0,22              | 14,07      | 0,22              | 14,18      | 720,00    |
| 0,23          | 15,34      | 0,23              | 15,36      | 0,23              | 15,33      | 720,00    |
| 0,25          | 16,50      | 0,25              | 16,44      | 0,25              | 16,53      | 720,00    |
| 0,26          | 16,73      | 0,26              | 17,29      | 0,26              | 16,48      | 720,00    |

Figura 41. Datos promedio del motor 6

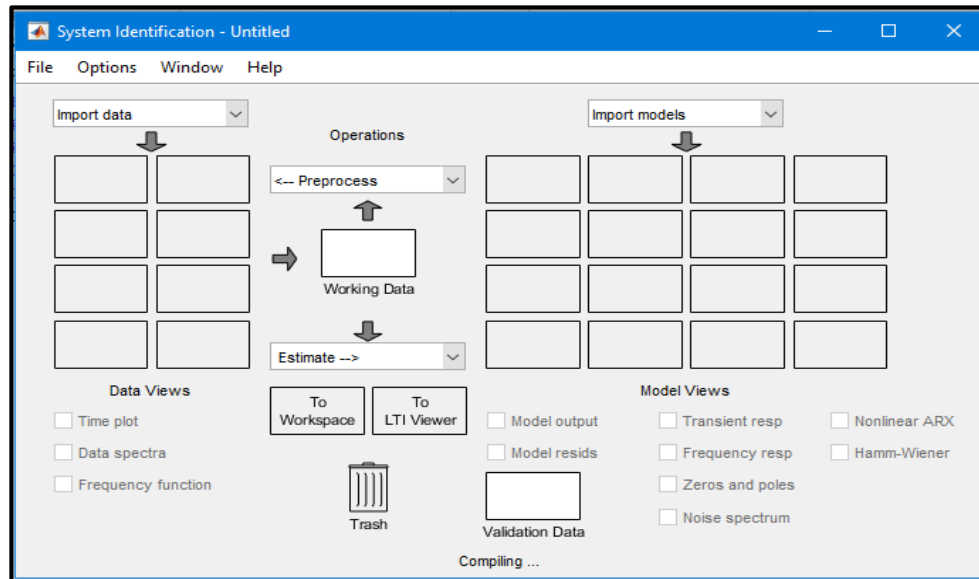


Gráfica 14. Salida del comportamiento del motor 6 ante el escalón de entrada

### 6.4.3 Identificación del Manipulador 1

#### Motor 1

Como primer paso se escribe en el command window “systemIdentification” y se le abrirá la siguiente ventana como se muestra en la Figura 42.



**Figura 42. Interfaz System Identificación**

El cual consta de tres partes principales como se muestra en la Figura 43, las cuales son:

1. Importar los datos
2. Operaciones
3. Visualización de modelos

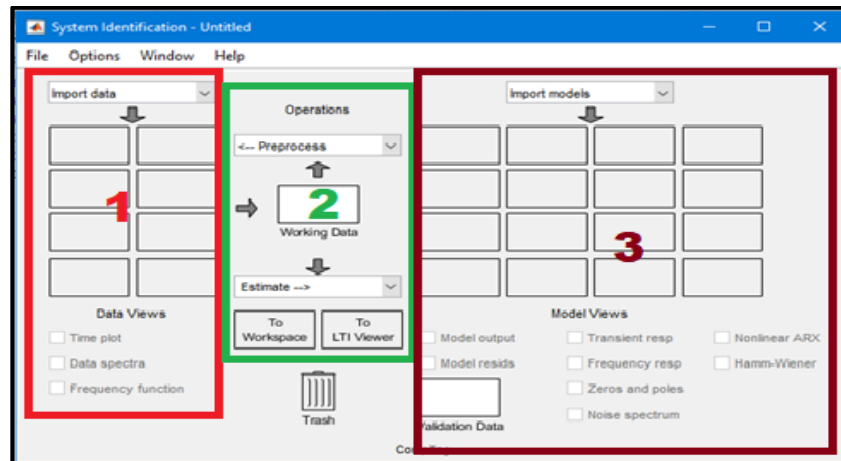


Figura 43. Partes de la interfaz System Identificación

**Importar Datos:** En esta opción se importarán los datos ya recopilados anteriormente de cada servo, lo cual se ingresarán de la siguiente manera como se muestra en la Figura 44.

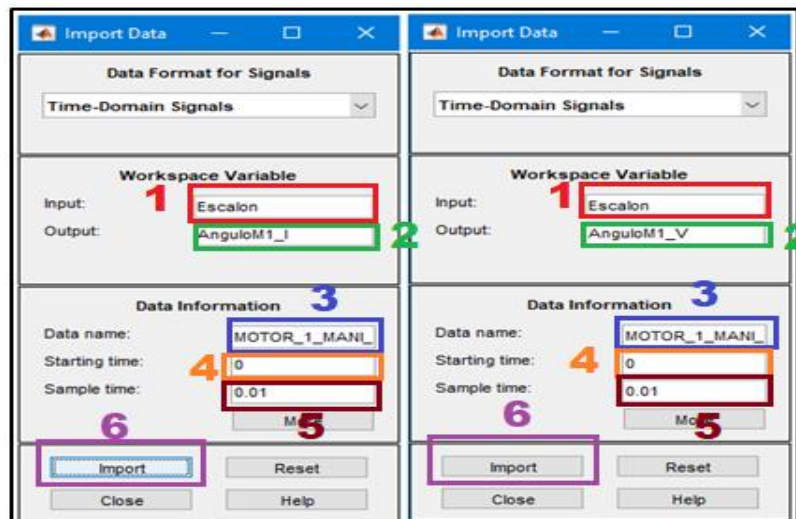
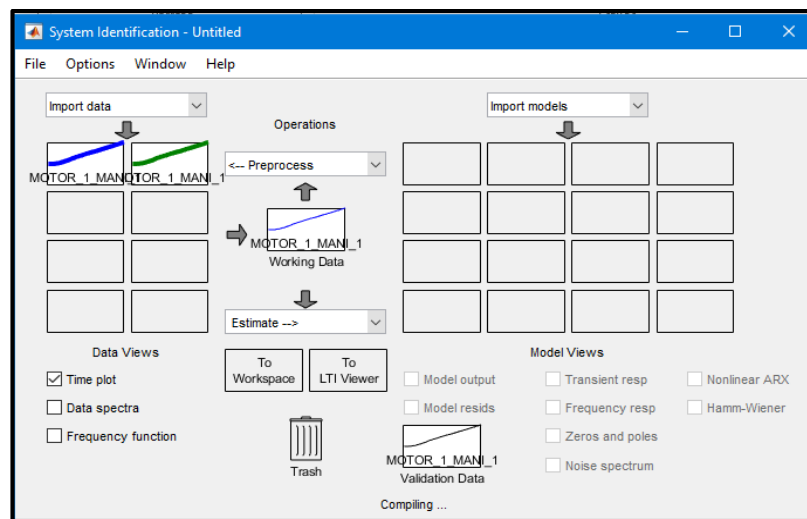


Figura 44. Importación de datos de identificación y validación del sistema

Donde:

1. Se ingresa la data del escalón debe de la misma dimensión que la salida.
2. Se ingresa la data de salida del servo recopilada anteriormente.
3. Se le asigna un nombre a variable de identificación.
4. Se pone la hora de inicio (en este caso es cero).
5. Se asigna el tiempo de muestreo que debe de ser el mismo tiempo en cual se tomaron las datas.
6. Se importa a la interfaz general System Identificación.

Realizado este paso nos quedaría de la siguiente manera en la ventana principal donde se observa en la Figura 45, la data de identificación y la de validación.



**Figura 45.** Importación de las datas en la interfaz System Identificación Toolbox

En la “opción time plot” se puede visualizar tanto la data de identificación como la de validación junto al escalón como se muestra en la siguiente Figura 46.

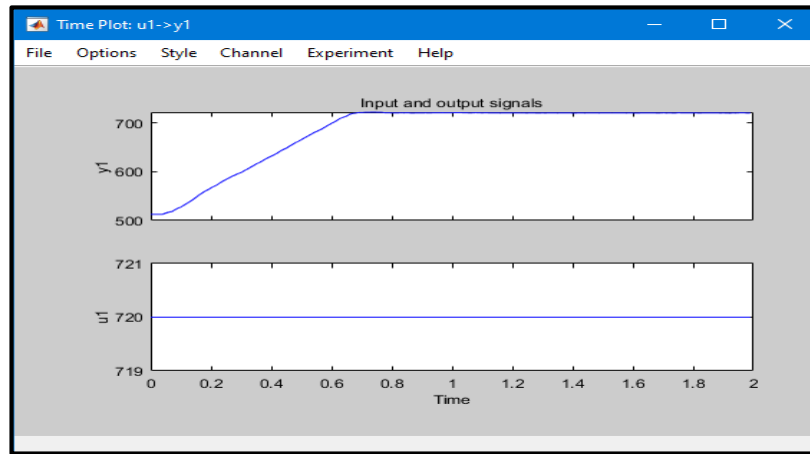


Figura 46. Visualización de las datas importadas

**Operaciones:** En esta opción seleccionamos los parámetros de la estructura de la función de transferencia como se observa a continuación Figura 47.

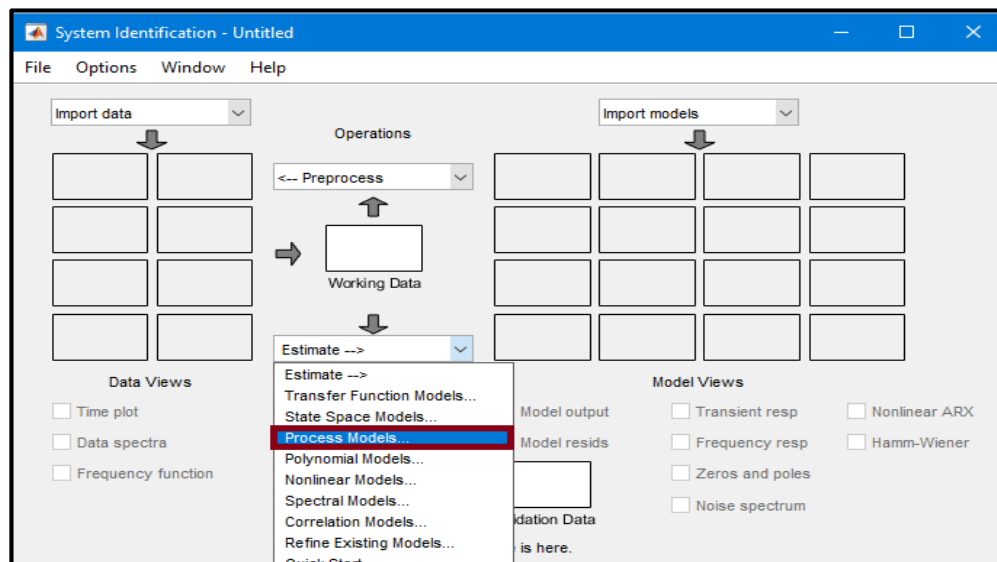


Figura 47. Opción modelos de procesos

| Par | Known                    | Value | Initial Guess | Bounds     |
|-----|--------------------------|-------|---------------|------------|
| K   | <input type="checkbox"/> |       | Auto          | [-Inf Inf] |
| Tp1 | <input type="checkbox"/> |       | Auto          | [0 Inf]    |
| Tp2 | <input type="checkbox"/> |       | Auto          | [0 Inf]    |
| Tp3 | <input type="checkbox"/> | 0     | 0             | [0 Inf]    |
| Tz  | <input type="checkbox"/> | 0     | 0             | [-Inf Inf] |
| Td  | <input type="checkbox"/> | 0     | 0             | [0 0.3]    |

**Figura 48.**Parámetros de estimación función de transferencia

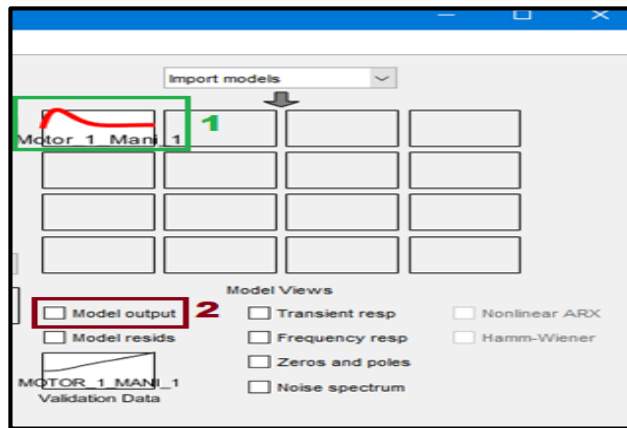
Donde:

1. Se visualiza la estructura de la función de transferencia.
2. Asignación de números de polos que quiere que tenga la función.
3. Asignación de ceros, tiempo muerto o un integrador que quiere que tenga la función.
4. Luego se estima la función de transferencia.
5. Se visualiza el valor de las constantes representadas en la función de transferencia.

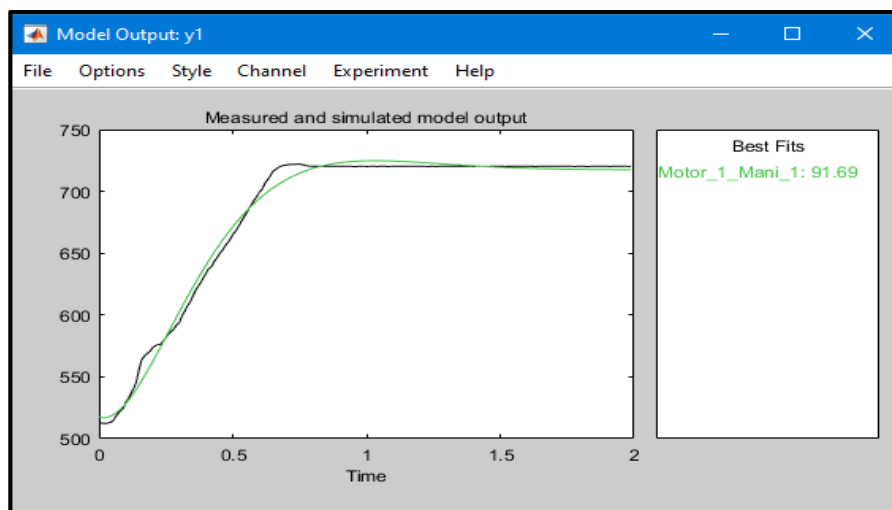
**Visualización de Modelos:** Una vez realizados los pasos anteriores solo queda visualizar y analizar el modelo con respecto a la data como se mira en la Figura 49.

Donde:

1. Se observa el modelo hallado una vez seleccionado los parámetros de estimación.
2. En la opción salida del modelo se observa como se ve reflejado el modelo con respecto a la data de identificación el cual nos arroja un porcentaje de estimación.

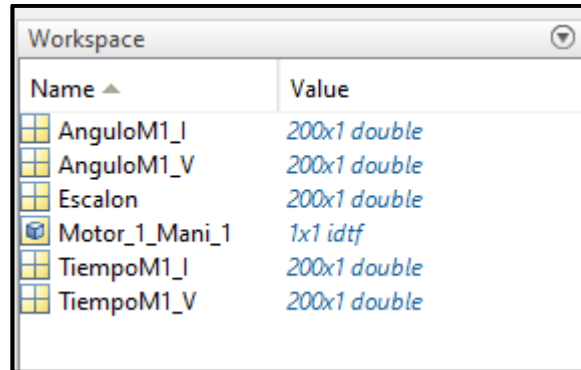


**Figura 49. Visualización del Modelo**



**Grafica 15. Comparación del modelo hallado con la data real del motor 1 (91.69% de estimación)**

Verificado el modelo de la función de transferencia se procede a exportarlo al Workspace de matlab como se observa en la Figura 50.



| Name           | Value        |
|----------------|--------------|
| AnguloM1_I     | 200x1 double |
| AnguloM1_V     | 200x1 double |
| Escalon        | 200x1 double |
| Motor_1_Mani_1 | 1x1 idtf     |
| TiempoM1_I     | 200x1 double |
| TiempoM1_V     | 200x1 double |

**Figura 50.**Exportación de la función de transferencia obtenida

Con la finalización de los pasos anteriores, da como finalidad el resultado de la función de transferencia del servo 1, como se muestra en la Figura 51.

```
Motor_1_Mani_1 =
Process model with transfer function:
      Kp
G(s) = -----
      (1+Tp1*s) (1+Tp2*s)

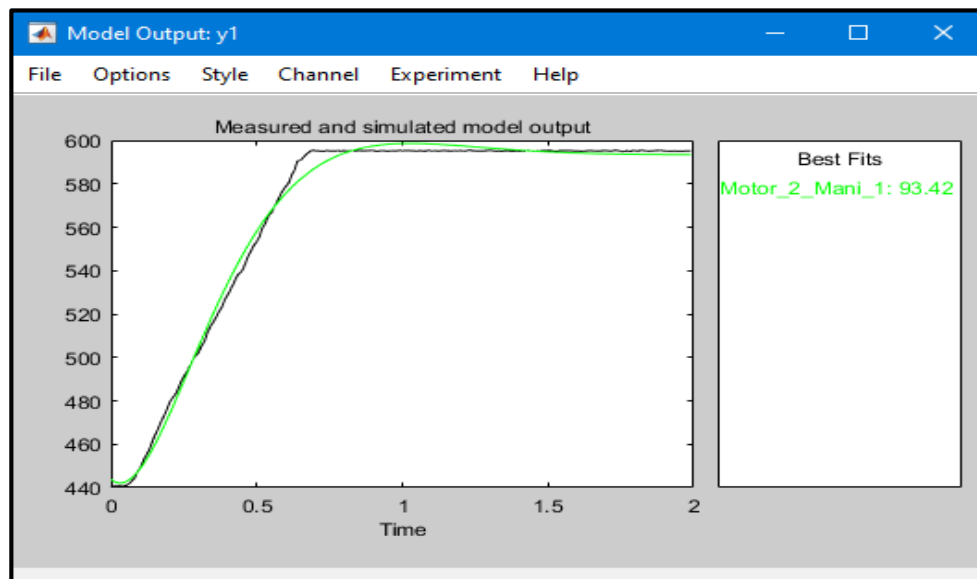
      Kp = 1.0028
      Tp1 = 0.18849
      Tp2 = 0.18791

Motor_1_Mani_1 =
      1
      -----
      0.03541 s^2 + 0.3764 s + 1
```

**Figura 51.**función de transferencia obtenida motor 1

Se procede a mostrar los resultados de las diferentes identificaciones de los servos, aplicando el método anteriormente explicado.

## Motor 2



**Grafica 16.**Comparacion del modelo hallado con la data real del motor 2(93.42% de estimación)

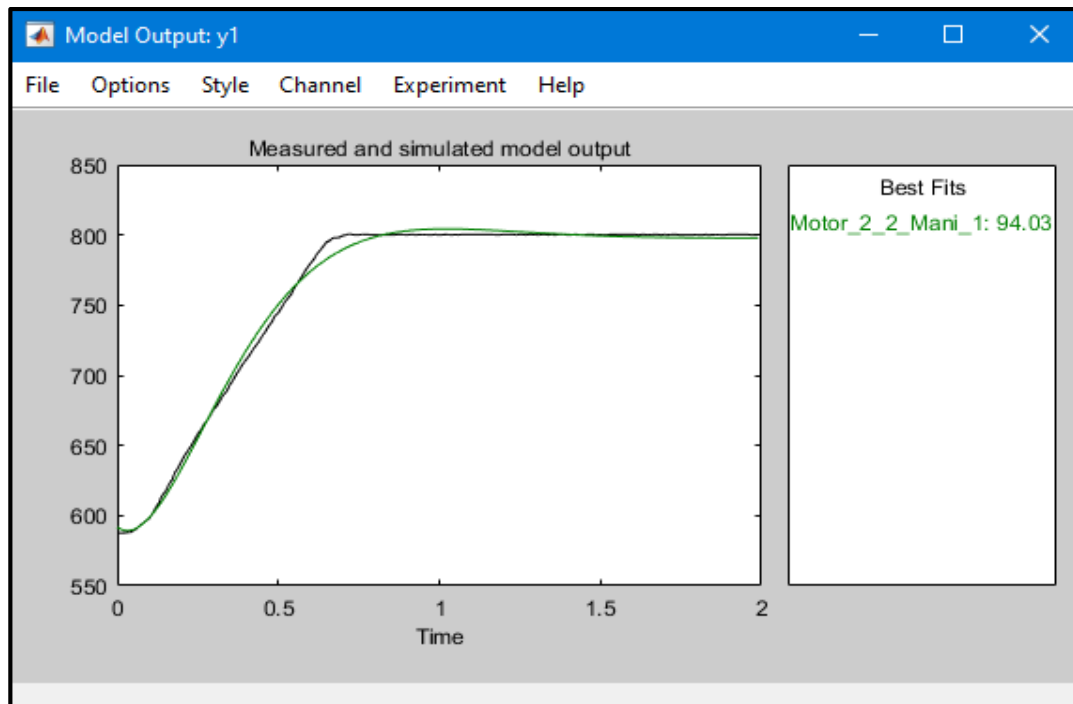
```
Motor_2_Mani_1 =
Process model with transfer function:
      Kp
G(s) = -----
      (1+Tp1*s) (1+Tp2*s)

      Kp = 1.0005
      Tp1 = 0.20986
      Tp2 = 0.21012

Motor_2_Mani_1 =
      1
      -----
      0.04409 s^2 + 0.4199 s + 1
```

**Figura 52.**función de transferencia obtenida motor 2

## Motor 2-2



Grafica 17.Comparacion del modelo hallado con la data real del motor 2-2 (94.03% de estimación)

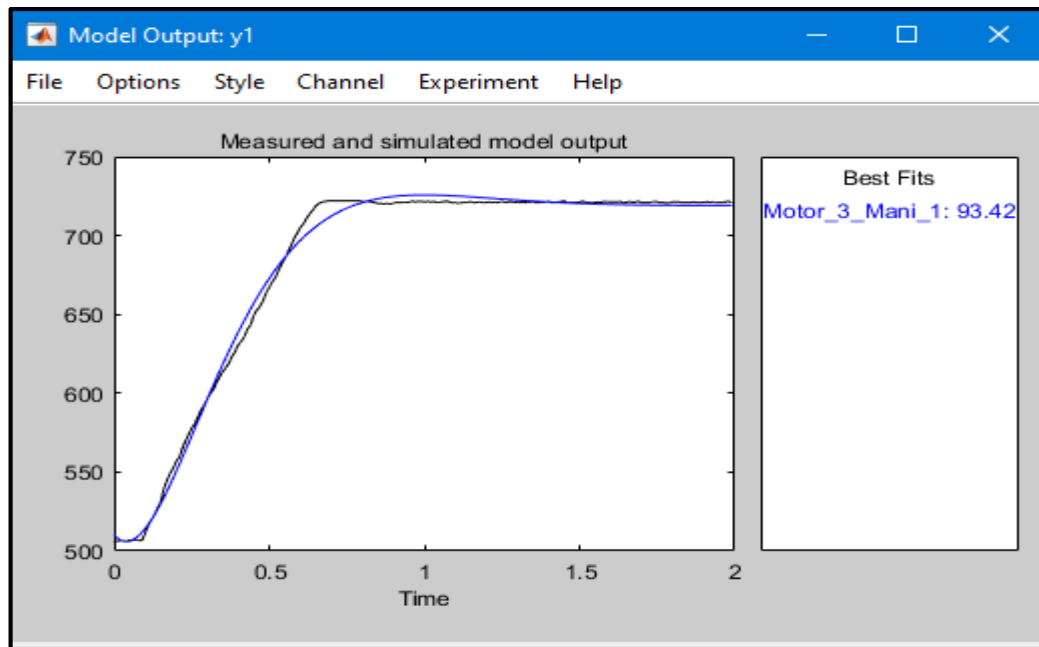
```
Motor_2_2_Mani_1 =
Process model with transfer function:
      Kp
G(s) = -----
      (1+Tp1*s) (1+Tp2*s)

      Kp = 0.99231
      Tp1 = 0.20483
      Tp2 = 0.20508

Motor_2_2_Mani_1 =
      1
      -----
      0.042 s^2 + 0.4099 s + 1
```

Figura 53.función de transferencia obtenida motor 2-2

### Motor 3



Grafica 18.Comparacion del modelo hallado con la data real del motor 3 (93.42% de estimación)

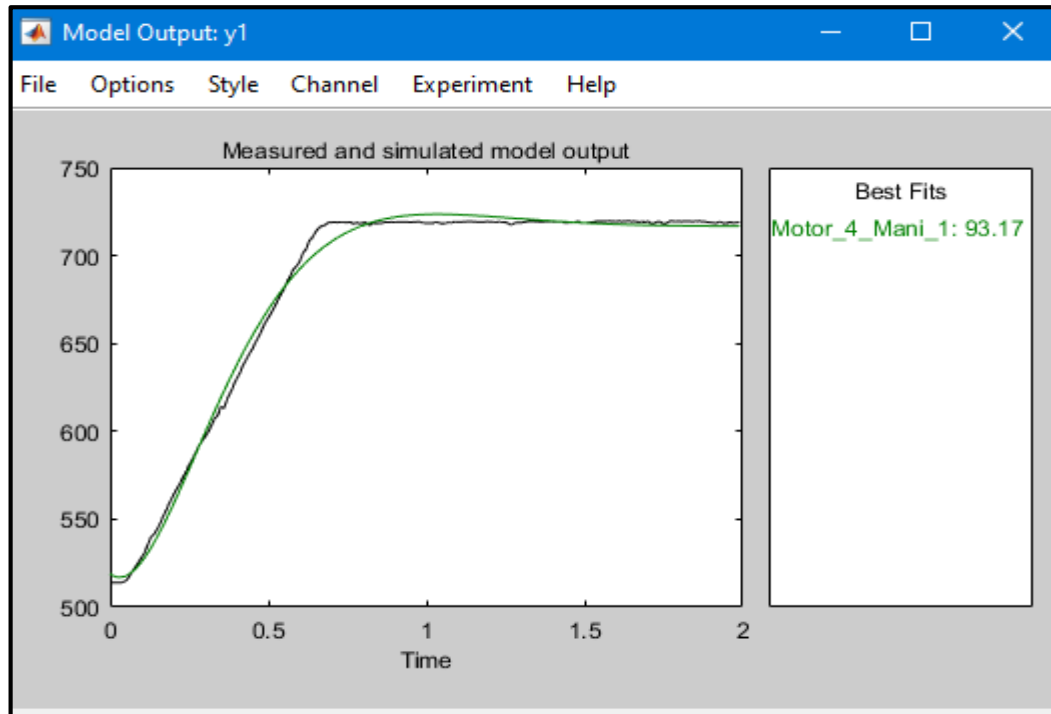
```
Motor_3_Mani_1 =
Process model with transfer function:
      Kp
G(s) = -----
      (1+Tp1*s) (1+Tp2*s)

      Kp = 1.0049
      Tp1 = 0.1578
      Tp2 = 0.15857

Motor_3_Mani_1 =
      1
      -----
      0.02502 s^2 + 0.3163 s + 1
```

Figura 54.función de transferencia obtenida motor 3

## Motor 4



Grafica 19.Comparacion del modelo hallado con la data real del motor 4 (93.17% de estimación)

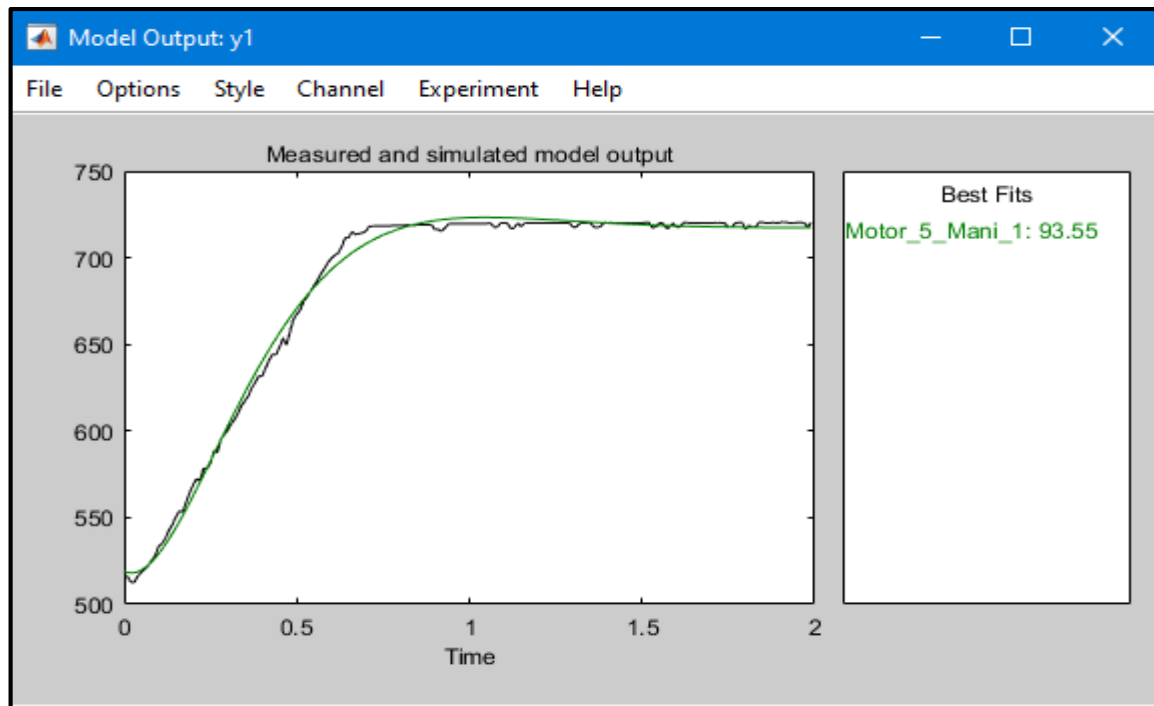
```
Motor_4_Mani_1 =
Process model with transfer function:
      Kp
G(s) = -----
      (1+Tp1*s) (1+Tp2*s)

      Kp = 0.99886
      Tp1 = 0.17491
      Tp2 = 0.17222

Motor_4_Mani_1 =
      1
      -----
      0.03012 s^2 + 0.3471 s + 1
```

Figura 55.función de transferencia obtenida motor 4

## Motor 5



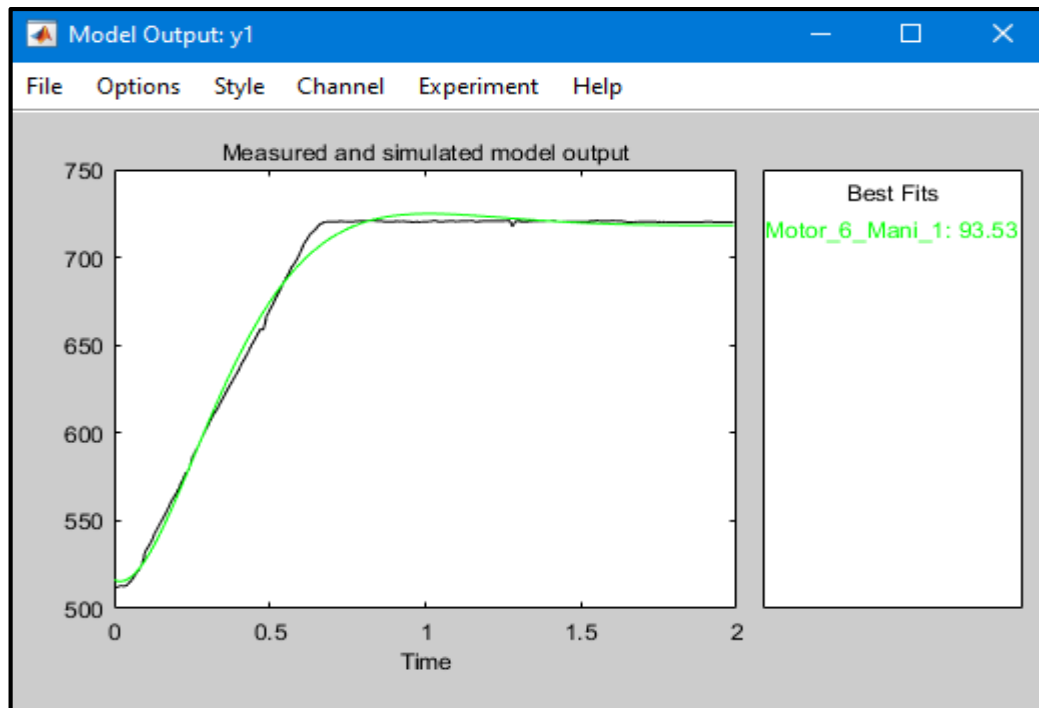
Grafica 20.Comparacion del modelo hallado con la data real del motor 5 (93.55% de estimación)

```
Motor_5_Mani_1 =
Process model with transfer function:
      Kp
G(s) = -----
      (1+Tp1*s) (1+Tp2*s)      Motor_5_Mani_1 =
                                   1
                                   -----
                                   0.0299 s^2 + 0.3461 s + 1

Kp = 0.99944
Tp1 = 0.17976
Tp2 = 0.16634
```

Figura 56.función de transferencia obtenida motor 5

## Motor 6



Grafica 21.Comparacion del modelo hallado con la data real del motor 6 (93.53% de estimación)

```
Motor_6_Mani_1 =
Process model with transfer function:

      Kp
G(s) = -----
      (1+Tp1*s) (1+Tp2*s)

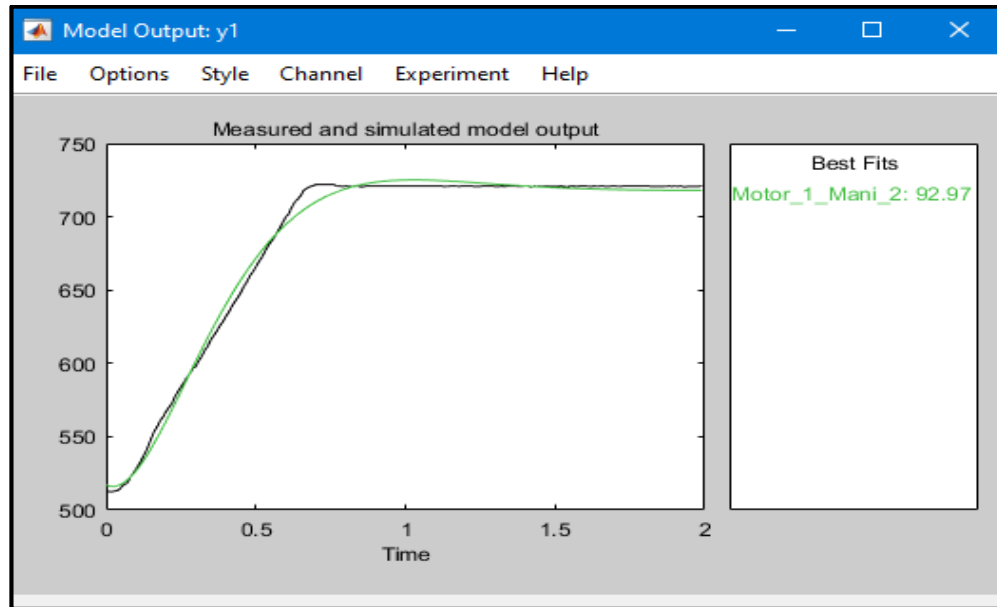
      Kp = 1.0006
      Tp1 = 0.17043
      Tp2 = 0.16937

Motor_6_Mani_1 =
      1
      -----
      0.0288 s^2 + 0.3398 s + 1
```

Figura 57.función de transferencia obtenida motor 6

#### 6.4.4 Identificación del Manipulador 2

##### Motor 1



**Grafica 22.**Comparacion del modelo hallado con la data real del motor 1 (92.97% de estimación)

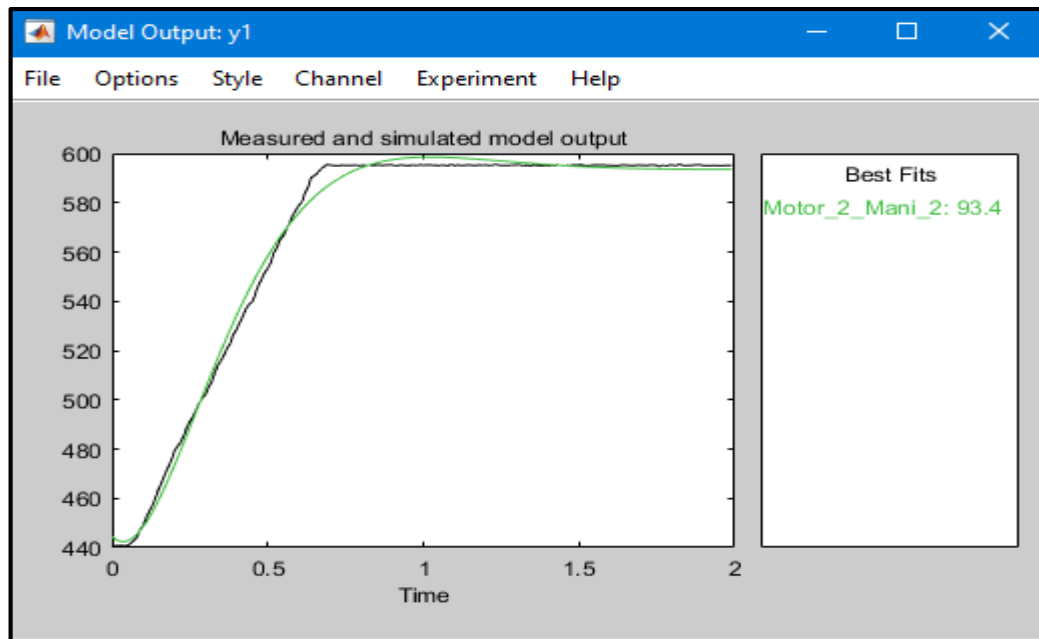
```
Motor_1_Mani_2 =
Process model with transfer function:
      Kp
G(s) = -----
      (1+Tp1*s) (1+Tp2*s)

      Kp = 0.99212
      Tp1 = 0.23957
      Tp2 = 0.23963

Motor_1_Mani_2 =
      1
      -----
      0.0574 s^2 + 0.4792 s + 1
```

**Figura 58.**Función de transferencia obtenida motor 1

## Motor 2



**Grafica 23.**Comparacion del modelo hallado con la data real del motor 2 (93.4% de estimación)

```
Motor_2_Mani_2 =
Process model with transfer function:

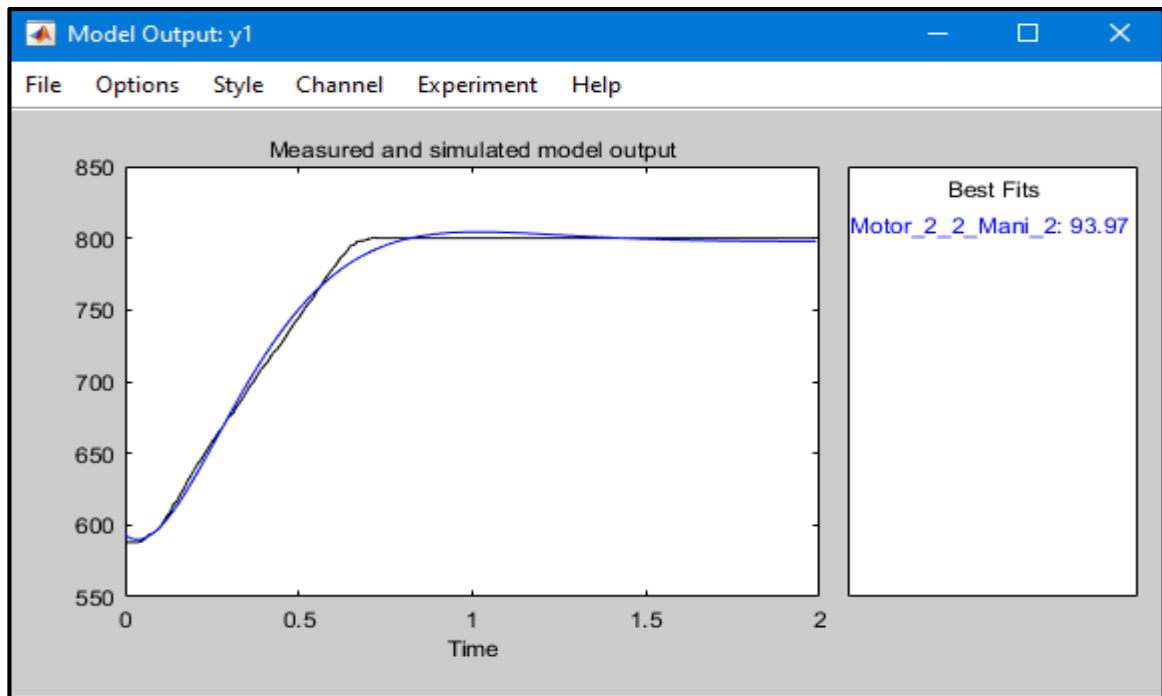
      Kp
G(s) = -----
      (1+Tp1*s) (1+Tp2*s)

      Kp = 0.99992
      Tp1 = 0.21023
      Tp2 = 0.21083

Motor_2_Mani_2 =
      1
      -----
      0.04432 s^2 + 0.421 s + 1
```

**Figura 59.**Función de transferencia obtenida motor 2

## Motor 2-2



Grafica 24.Comparacion del modelo hallado con la data real del motor 2-2 (93.97% de estimación)

```
Motor_2_2_Mani_2 =
Process model with transfer function:

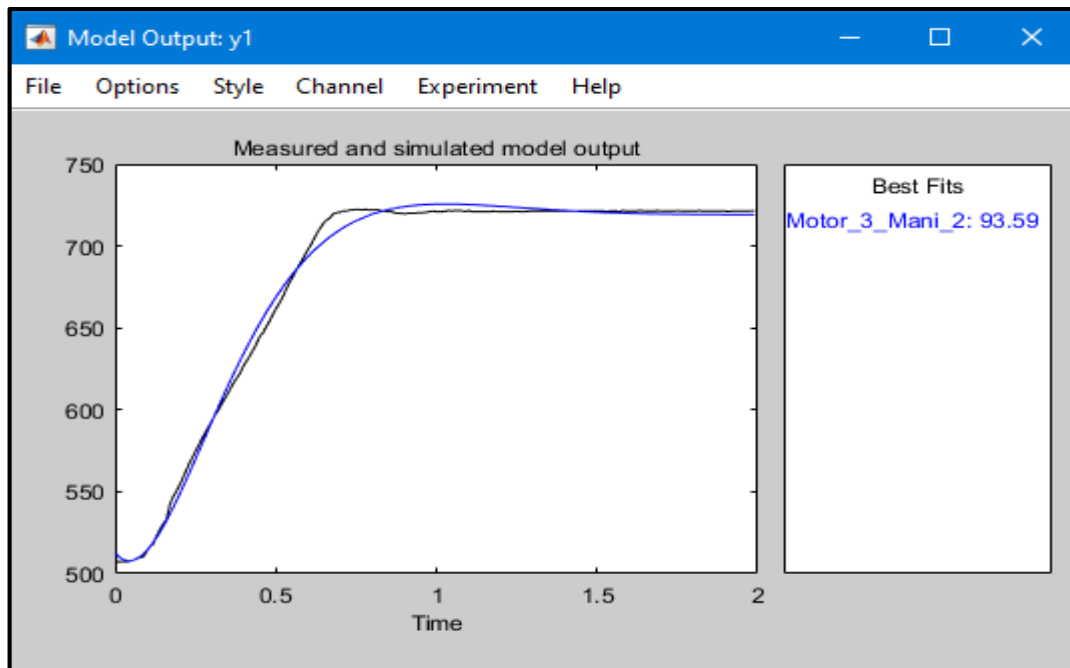
      Kp
G(s) = -----
      (1+Tp1*s) (1+Tp2*s)

      Kp = 0.99222
      Tp1 = 0.20479
      Tp2 = 0.2051

Motor_2_2_Mani_2 =
      1
      -----
      0.042 s^2 + 0.4099 s + 1
```

Figura 60.Función de transferencia obtenida motor 2-2

### Motor 3



Grafica 25.Comparacion del modelo hallado con la data real del motor 3 (93.59% de estimación)

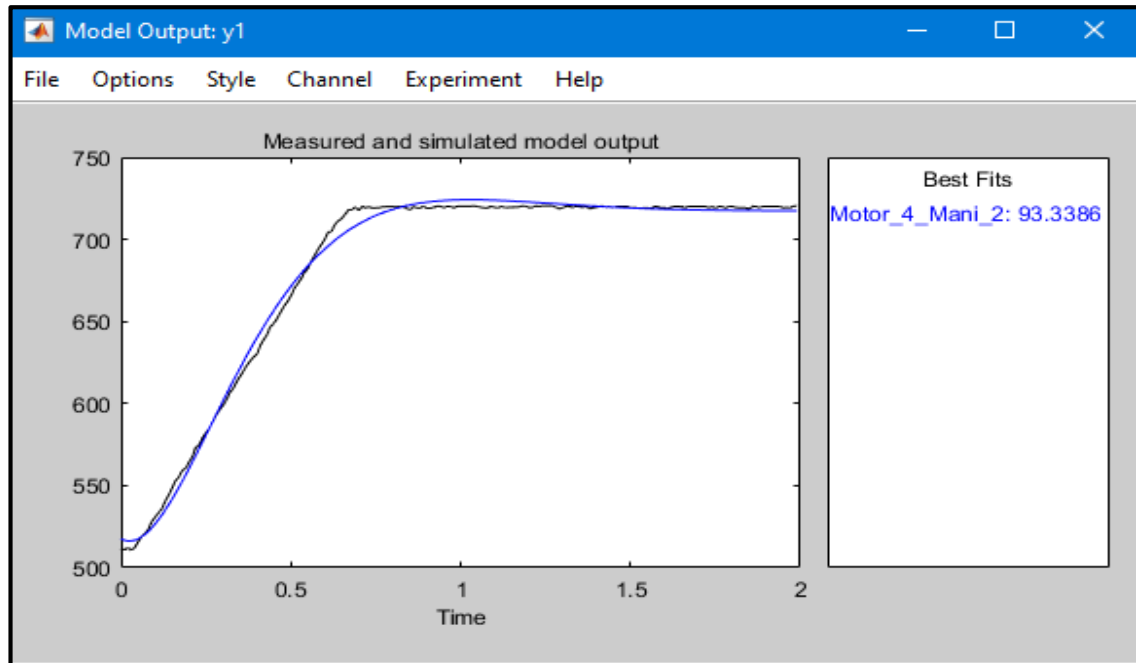
```
Motor_3_Mani_2 =
Process model with transfer function:
      Kp
G(s) = -----
      (1+Tp1*s) (1+Tp2*s)

      Kp = 1.0106
      Tp1 = 0.18714
      Tp2 = 0.18702

      Motor_3_Mani_2 =
      1
      -----
      0.0349 s^2 + 0.3741 s + 1
```

Figura 61.Función de transferencia obtenida motor 3

## Motor 4



Grafica 26.Comparacion del modelo hallado con la data real del motor 4 (93.33% de estimación)

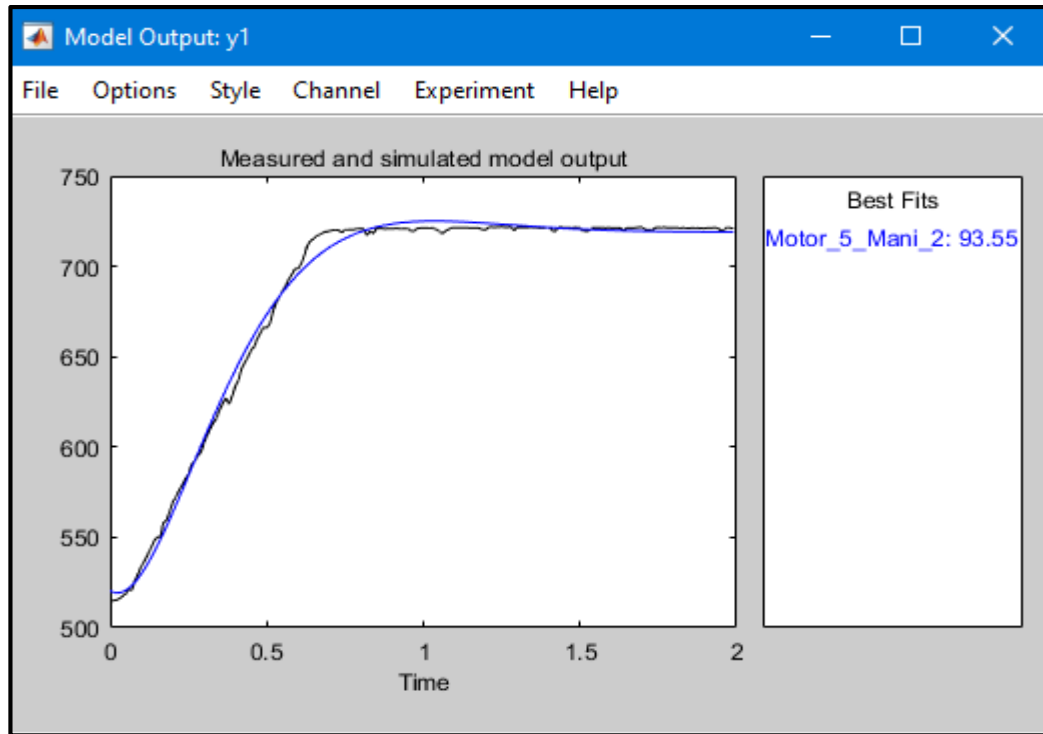
```
Motor_4_Mani_2 =
Process model with transfer function:
      Kp
G(s) = -----
      (1+Tp1*s) (1+Tp2*s)

      Kp = 0.98566
      Tp1 = 0.21016
      Tp2 = 0.2061

Motor_4_Mani_2 =
      1
      -----
      0.0433 s^2 + 0.4162 s + 1
```

Figura 62.Función de transferencia obtenida motor 4

## Motor 5



Grafica 27.Comparación del modelo hallado con la data real del motor 5 (93.55% de estimación)

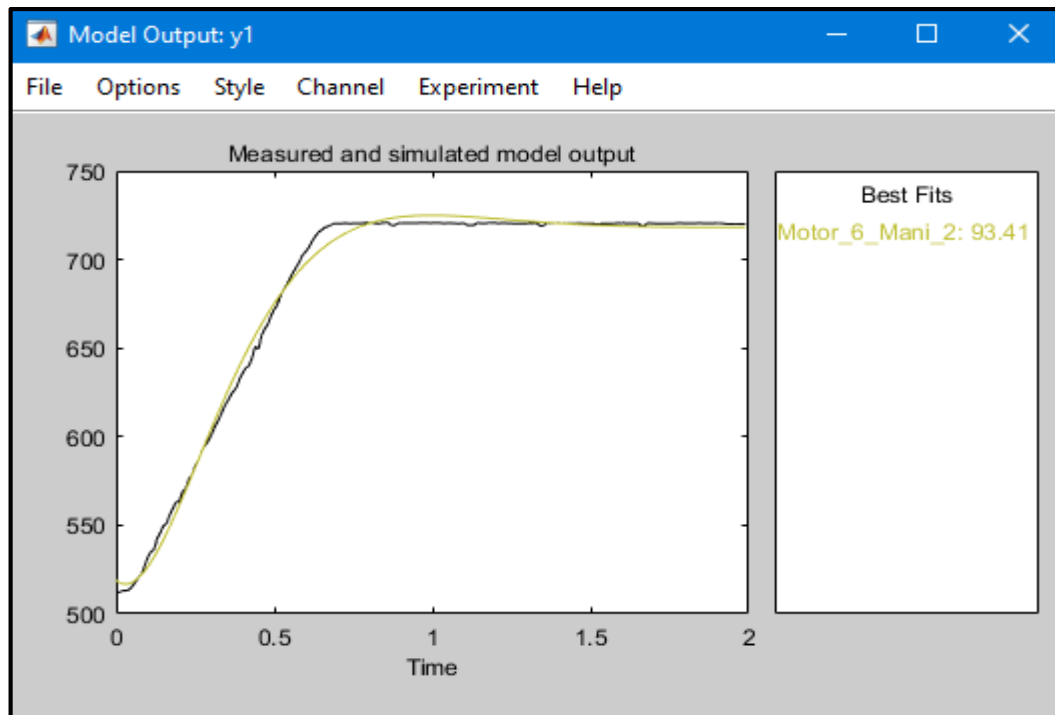
```
Motor_5_Mani_2 =
Process model with transfer function:
      Kp
G(s) = -----
      (1+Tp1*s) (1+Tp2*s)

      Kp = 1.0016
      Tp1 = 0.17524
      Tp2 = 0.16886

Motor_5_Mani_2 =
      1
      -----
      0.0295 s^2 + 0.3441 s + 1
```

Figura 63.Función de transferencia obtenida motor 5

## Motor 6



Grafica 28.Comparación del modelo hallado con la data real del motor 6 (93.41% de estimación)

```
Motor_6_Mani_2 =
Process model with transfer function:

      Kp
G(s) = -----
      (1+Tp1*s) (1+Tp2*s)

      Kp = 1.0006
      Tp1 = 0.17043
      Tp2 = 0.16937

Motor_6_Mani_2 =
      1
      -----
      0.0288 s^2 + 0.3398 s + 1
```

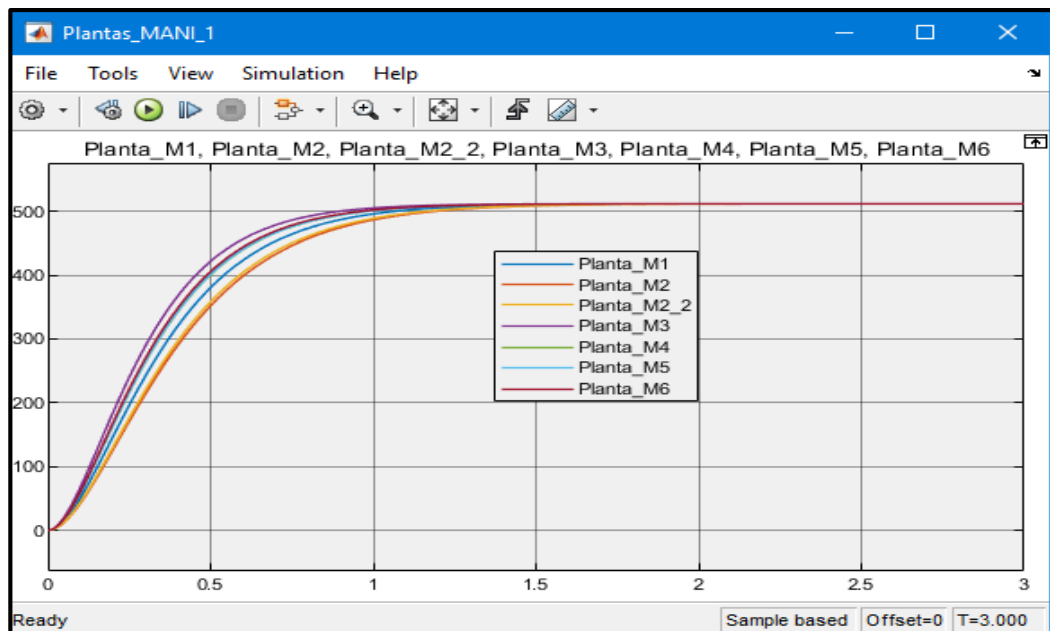
Figura 64.Función de transferencia obtenida motor 6

se realiza la sintonización, donde se le aplicará tres métodos distintos a cada servo, donde nos basaremos en lo más comunes y menos complejos debido a la gran cantidad (14 plantas) de plantas que toca sintonizar.

#### 6.4.5 Sintonización del manipulador 1

##### 1. Método: Sintonización de controlador por el método de tune Matlab

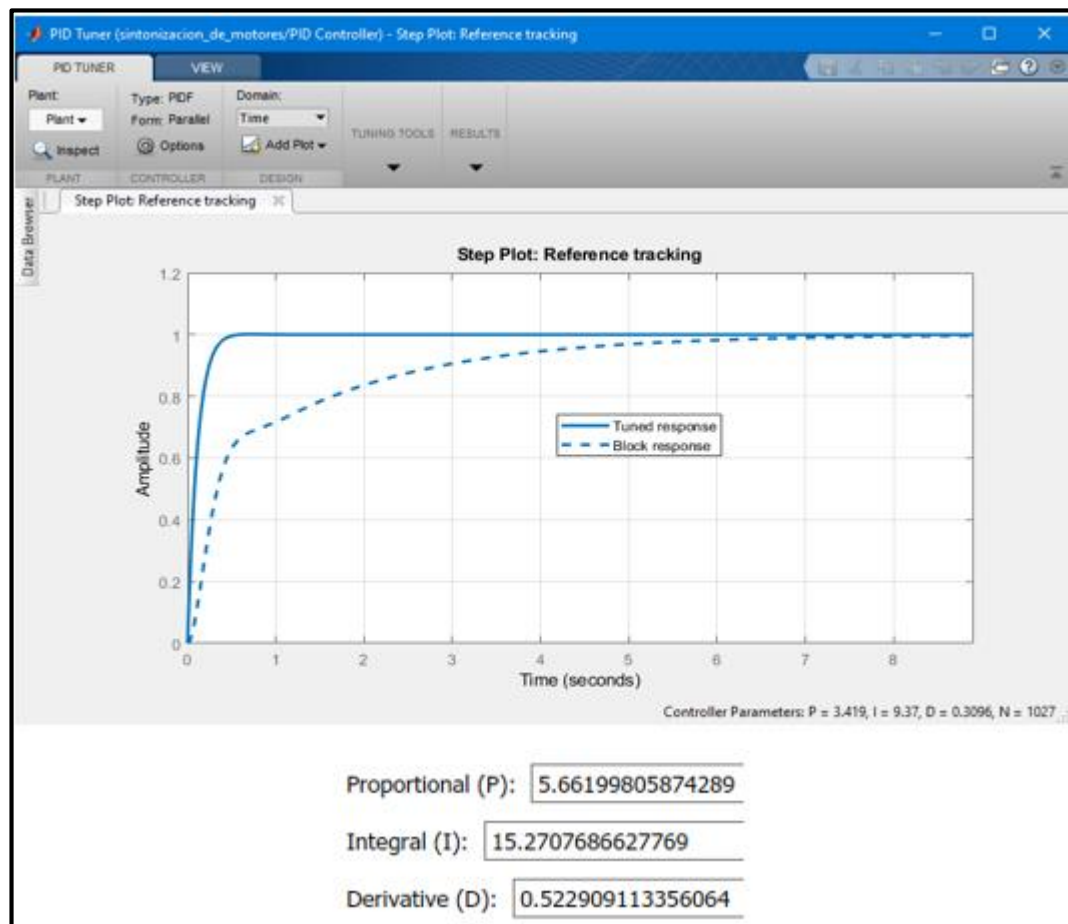
Para el método de PID Tune de Matlab se usa las funciones de transferencia calculadas con anterioridad, se crea en Simulink donde los bloques definen cada una de las plantas halladas, luego se observa la salida de cada uno de los motores ante un escalón de 512 ( $0^\circ$ ) como se observa Grafica 29, para luego aplicar el tune y mejorar la salida.



**Grafica 29. Salida de las plantas del manipulador 1**

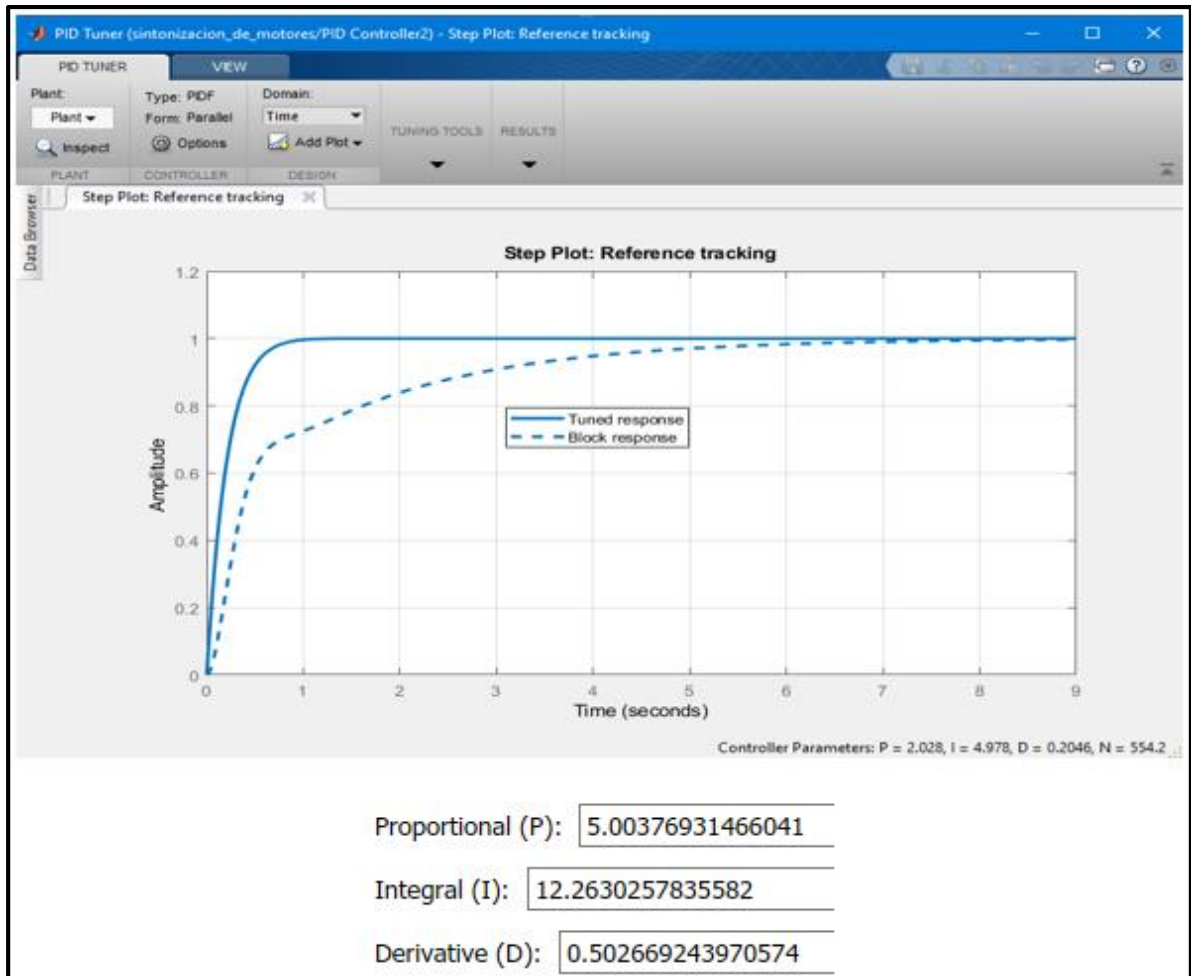
Luego de aplicar el tune se obtiene que el software arroja unas constantes de sintonización para cada uno de los motores como se muestra a continuación:

## Motor 1



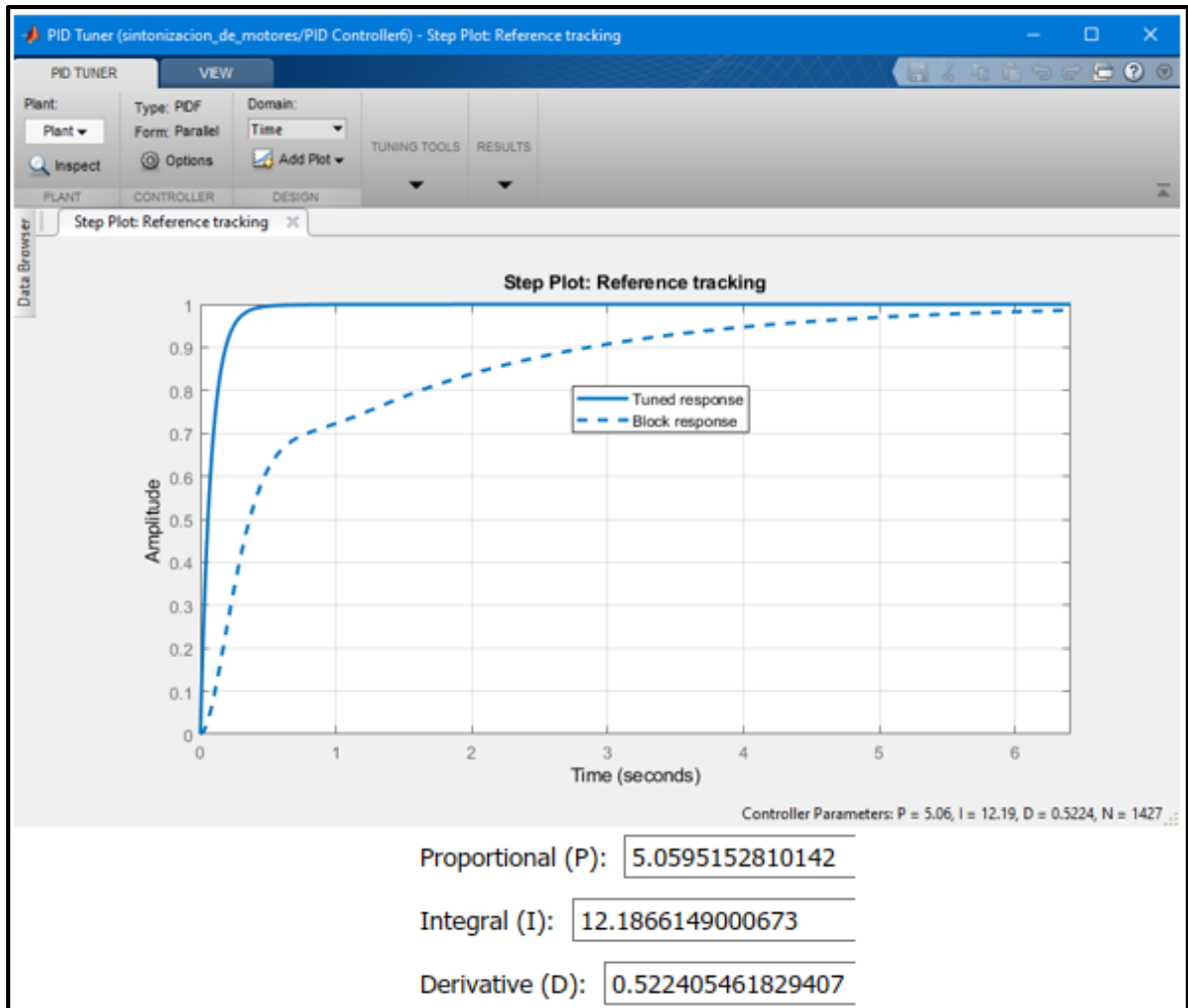
Grafica 30. Salida del controlador Tune más las constantes del controlador del motor 1

## Motor 2



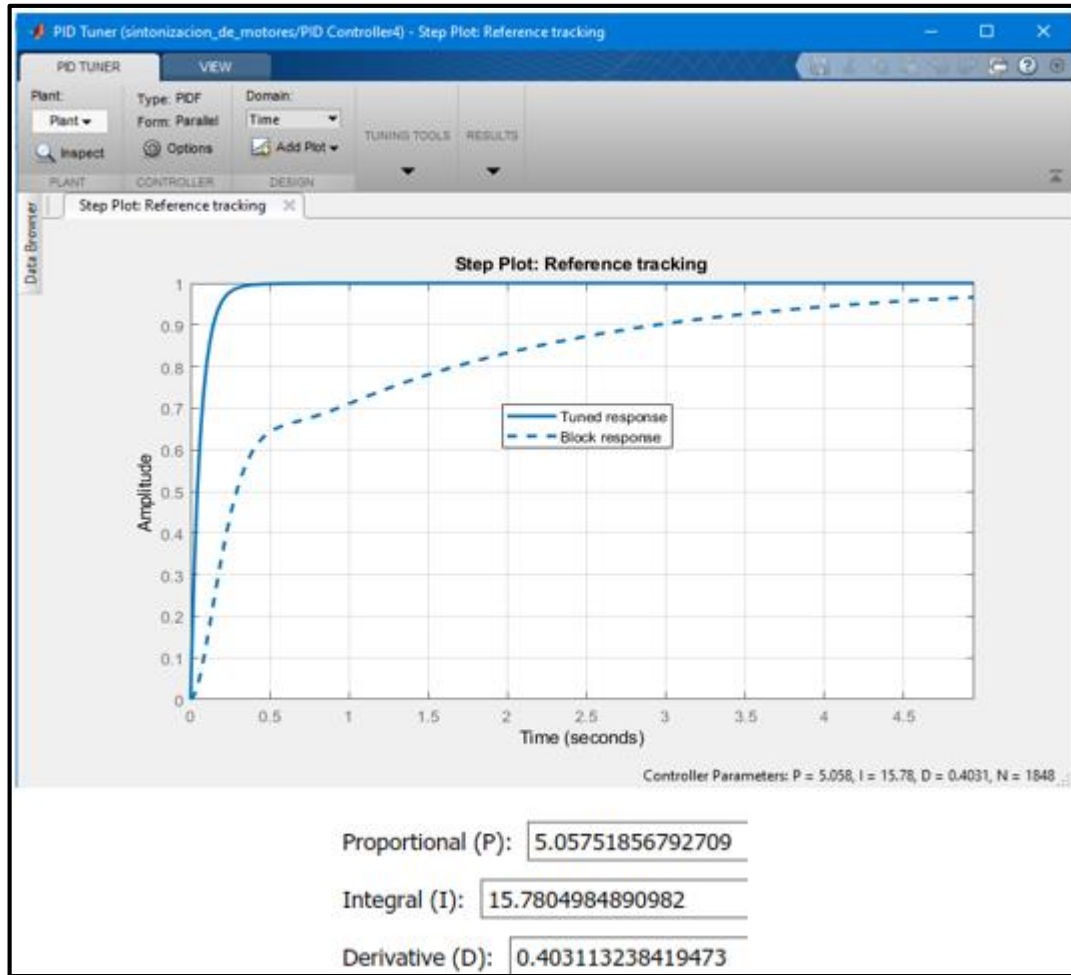
Grafica 31. Salida del controlador Tune más las constantes del controlador del motor 2

## Motor 2-2



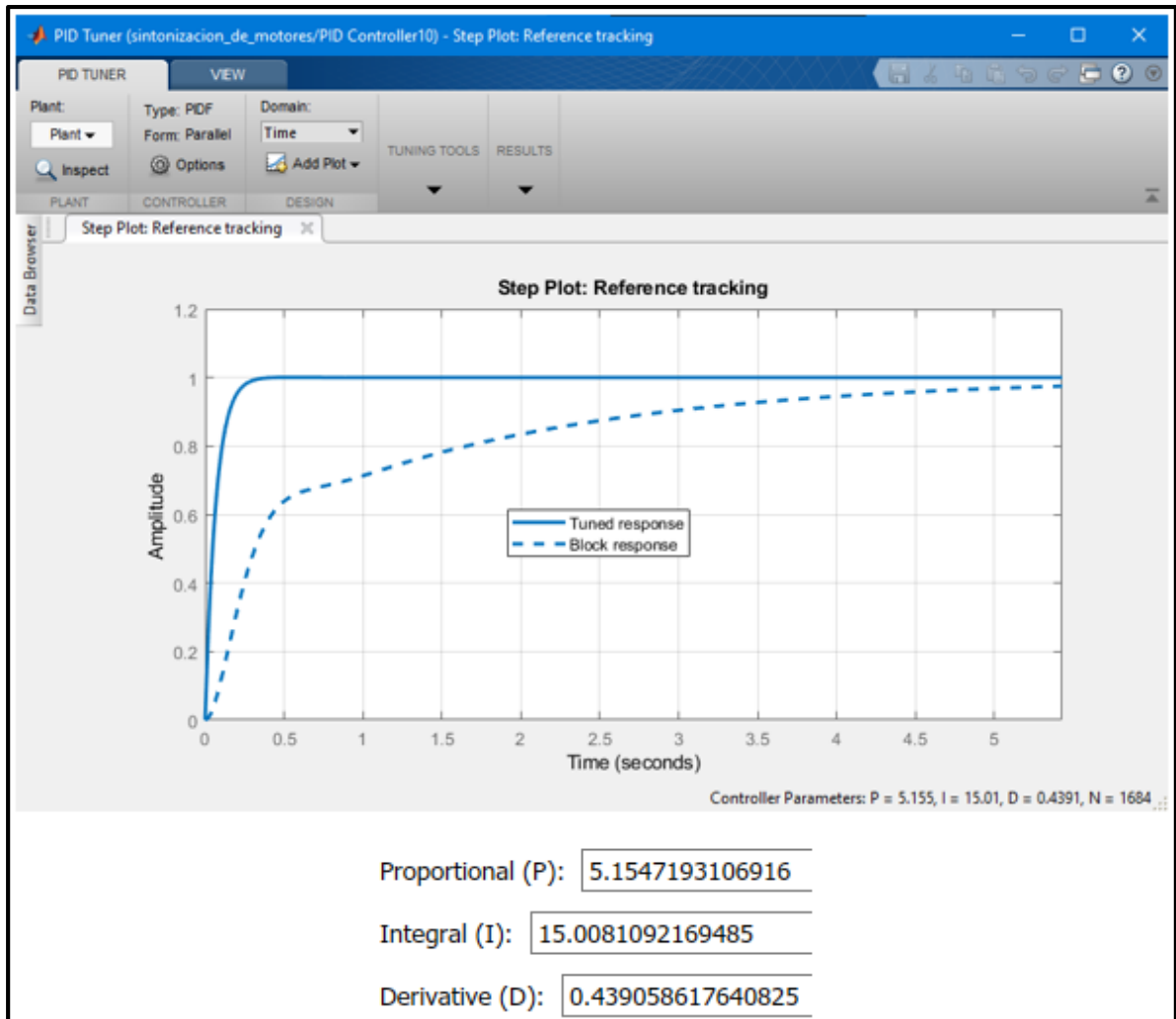
**Grafica 32.** Salida del controlador Tune más las constantes del controlador del motor 2-2

### Motor 3



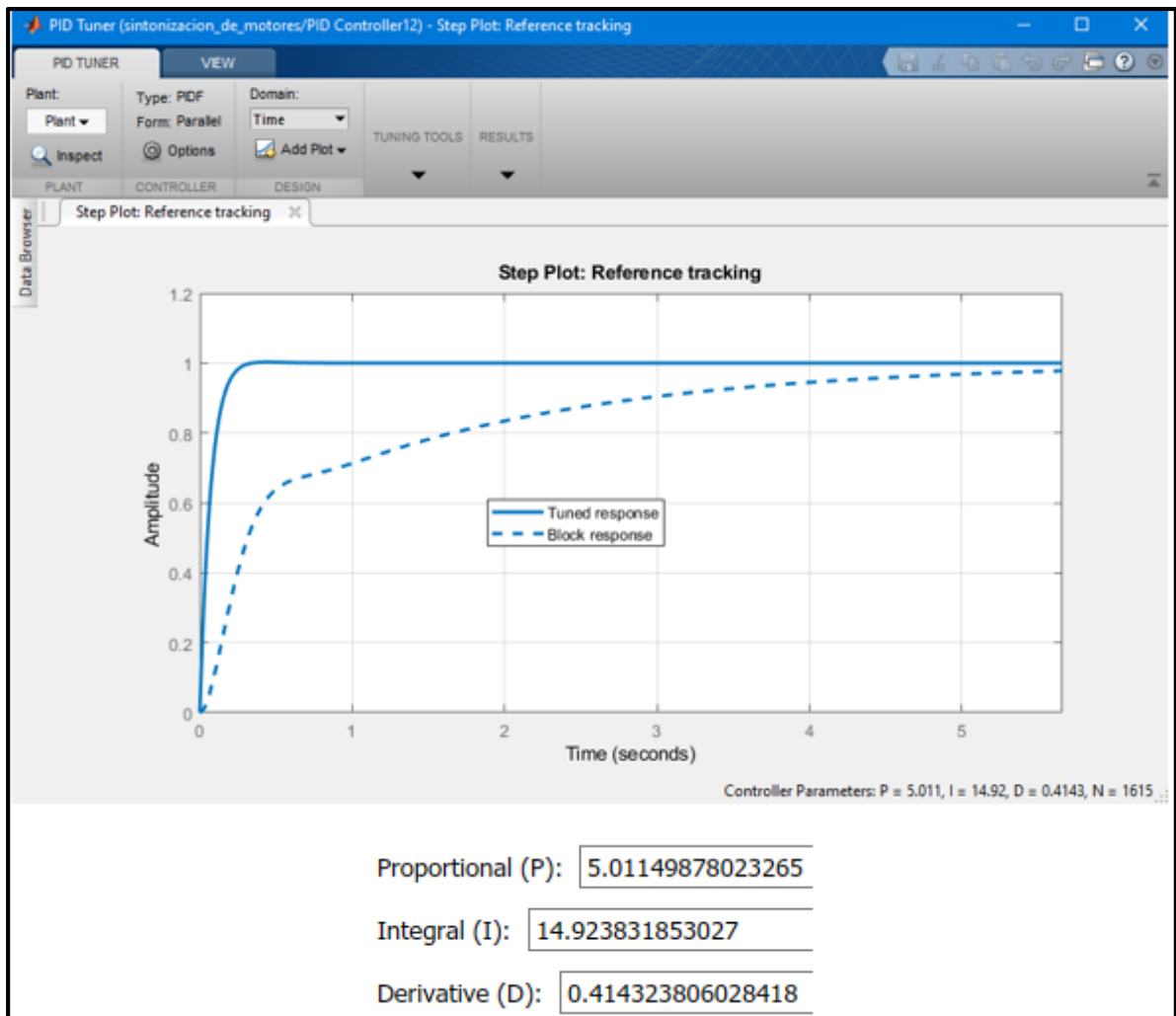
Grafica 33. Salida del controlador Tune más las constantes del controlador del motor 3

## Motor 4



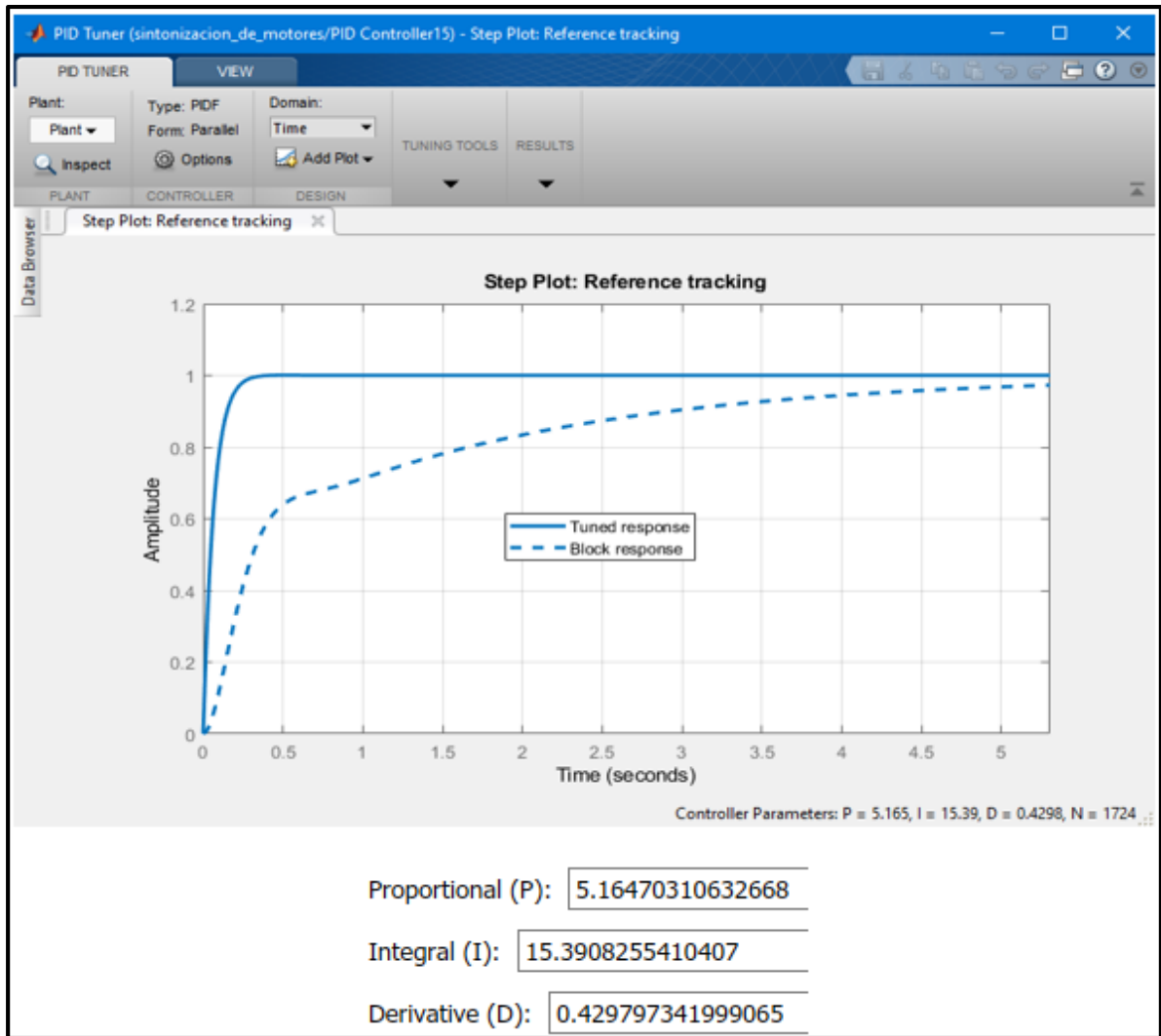
**Grafica 34.** Salida del controlador Tune más las constantes del controlador del motor 4

## Motor 5



Grafica 35. Salida del controlador Tune más las constantes del controlador del motor 5

## Motor 6



Grafica 36. Salida del controlador Tune más las constantes del controlador del motor 6

## 2. Método: Sintonización de controlador por el método síntesis de controlador

Para el cálculo del controlador de las plantas se utilizará este método que permite arrojar valores de acuerdo con el comportamiento que se requiera del sistema.

### Motor 1

$$C(s) = \frac{1}{0.03541s^2 + 0.3764s + 1}$$

$$C(s) = \frac{0.03541s^2 + 0.3764s + 1}{1} * \frac{1}{s}$$

$$C(s) = \frac{0.03541s^2 + 0.3764s + 1}{s}$$

$$C(s) = \frac{0.03541s^2}{s} + \frac{0.3764s}{s} + \frac{1}{s}$$

$$Kp = \frac{0.3764}{1}$$

$$Ki = \frac{1}{1}$$

$$Kd = \frac{0.03541}{1}$$

### Motor 2

$$C(s) = \frac{1}{0.04409s^2 + 0.4199s + 1}$$

$$C(s) = \frac{0.04409s^2 + 0.4199s + 1}{1} * \frac{1}{s}$$

$$C(s) = \frac{0.04409s^2 + 0.4199s + 1}{s}$$

$$C(s) = \frac{0.04409s^2}{s} + \frac{0.4199s}{s} + \frac{1}{s}$$

$$Kp = \frac{0.4199}{1}$$

$$Ki = \frac{1}{1}$$

$$Kd = \frac{0.04409}{1}$$

## Motor 2-2

$$C(s) = \frac{1}{0.042s^2 + 0.4099s + 1}$$

$$C(s) = \frac{0.042s^2 + 0.4099s + 1}{1} * \frac{1}{s}$$

$$C(s) = \frac{0.042s^2 + 0.4099s + 1}{s}$$

$$C(s) = \frac{0.042s^2}{s} + \frac{0.4099s}{s} + \frac{1}{s}$$

$$Kp = \frac{0.4099}{1}$$

$$Ki = \frac{1}{1}$$

$$Kd = \frac{0.042}{1}$$

## Motor 3

$$C(s) = \frac{1}{0.02502s^2 + 0.3163s + 1}$$

$$C(s) = \frac{0.02502s^2 + 0.3163s + 1}{1} * \frac{1}{s}$$

$$C(s) = \frac{0.02502s^2 + 0.3163s + 1}{s}$$

$$C(s) = \frac{0.02502s^2}{s} + \frac{0.3163s}{s} + \frac{1}{s}$$

$$Kp = \frac{0.3163}{1}$$

$$Ki = \frac{1}{1}$$

$$Kd = \frac{0.02502}{1}$$

#### Motor 4

$$C(s) = \frac{1}{0.03012s^2 + 0.3471s + 1}$$

$$C(s) = \frac{0.03012s^2 + 0.3471s + 1}{1} * \frac{1}{s}$$

$$C(s) = \frac{0.03012s^2 + 0.3471s + 1}{s}$$

$$C(s) = \frac{0.03012s^2}{s} + \frac{0.3471s}{s} + \frac{1}{s}$$

$$Kp = \frac{0.3471}{1}$$

$$Ki = \frac{1}{1}$$

$$Kd = \frac{0.03012}{1}$$

#### Motor 5

$$C(s) = \frac{1}{0.0299s^2 + 0.3461s + 1}$$

$$C(s) = \frac{0.0299s^2 + 0.3461s + 1}{1} * \frac{1}{s}$$

$$C(s) = \frac{0.0299s^2 + 0.3461s + 1}{s}$$

$$C(s) = \frac{0.0299s^2}{s} + \frac{0.3461s}{s} + \frac{1}{s}$$

$$Kp = \frac{0.3461}{1}$$

$$Ki = \frac{1}{1}$$

$$Kd = \frac{0.0299}{1}$$

## Motor 6

$$C(s) = \frac{1}{0.0288s^2 + 0.3398s + 1}$$

$$C(s) = \frac{0.0288s^2 + 0.3398s + 1}{1} * \frac{1}{s}$$

$$C(s) = \frac{0.0288s^2 + 0.3398s + 1}{s}$$

$$C(s) = \frac{0.0288s^2}{s} + \frac{0.3398s}{s} + \frac{1}{s}$$

$$Kp = \frac{0.3398}{1}$$

$$Ki = \frac{1}{1}$$

$$Kd = \frac{0.0288}{1}$$

3. Método: Sintonización del controlador por el método Z&N para sistemas mayor a primer orden(Figura 65).

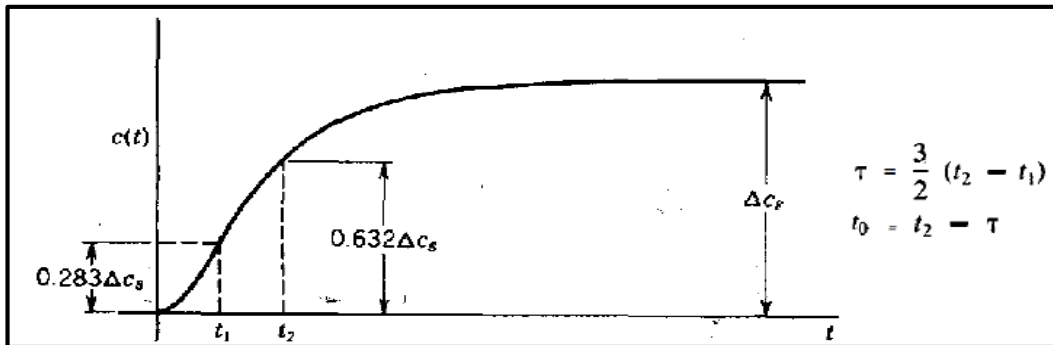


Figura 65. Z&N para sistemas mayor a primer orden.<sup>69</sup>

| Tipo de controlador              |     | Ganancia proporcional<br>$K_c$                       | Tiempo de integración<br>$\tau_i$ | Tiempo de derivación<br>$\tau_D$ |
|----------------------------------|-----|------------------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| Proporcional                     | P   | $\frac{1}{K} \left( \frac{t_0}{\tau} \right)^{-1}$   | —                                 | —                                |
| Proporcional-integral            | PI  | $\frac{0.9}{K} \left( \frac{t_0}{\tau} \right)^{-1}$ | $3.33 t_0$                        | —                                |
| Proporcional-integral-derivativo | PID | $\frac{1.2}{K} \left( \frac{t_0}{\tau} \right)^{-1}$ | $2.0 t_0$                         | $\frac{1}{2} t_0$                |

Figura 66. Fórmulas para el ajuste para respuesta de razón de asentamiento<sup>70</sup>

A continuación, se realizará la sintonización del controlador para el motor 1, en el cual se mostrará el desarrollo completo del cálculo de los parámetros para dicho controlador.

<sup>69</sup> Carlos Smith, Armando Corripio, libro "CONTROL AUTOMATICO DE PROCESOS TEORIA Y PRACTICA", primera edición 1991.

<sup>70</sup> Carlos Smith, Armando Corripio.

## Motor 1

Como primer paso se procede a realizar el diagrama de bloques (Figura 67) donde:

1. Step, con un setpoint de 512 (0°).
2. La función de transferencia que me representa la dinámica del motor 1.
3. Scope, medio por el cual se visualiza la salida de la función.
4. Simout, donde se recopila los datos de la dinámica con un muestreo de 0.01 y me los arroja en el workspace de matlab.

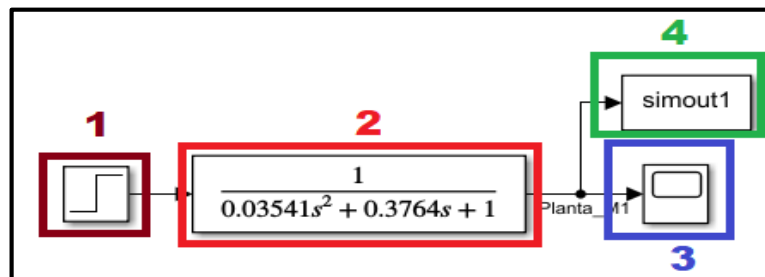


Figura 67. Diagramas de bloques para la sintonización del motor 1

Se identifican los puntos T1, T2, en este caso por criterio propio se va a calcular un tiempo muerto denominado Tm.

$$T1 = (512 * 0.283) = 144.896$$

$$T2 = (512 * 0.632) = 323.584$$

$$Tm = (512 * 0.03) = 15.36$$

Luego se busca los valores en la data recopilada en el simout 1

| Time   | Data:1   |
|--------|----------|
| 0.1978 | 144.8620 |
| 0.1978 | 144.8720 |
| 0.1978 | 144.8820 |
| 0.1978 | 144.8920 |
| 0.1978 | 144.9020 |
| 0.1978 | 144.9120 |

**Figura 68.Ubicación T1 en la data**

| Time   | Data:1   |
|--------|----------|
| 0.4038 | 323.5648 |
| 0.4038 | 323.5716 |
| 0.4038 | 323.5784 |
| 0.4038 | 323.5853 |
| 0.4038 | 323.5921 |
| 0.4038 | 323.5989 |

**Figura 69.Ubicación T2 en la data**

| Time   | Data:1  |
|--------|---------|
| 0.0503 | 15.3474 |
| 0.0503 | 15.3530 |
| 0.0503 | 15.3586 |
| 0.0504 | 15.3641 |
| 0.0504 | 15.3697 |
| 0.0504 | 15.3753 |

**Figura 70.Ubicación Tm en la data**

Una vez obtenidos los valores de las constantes, se procede a calcular el  $\tau$  y tiempo muerto del sistema.

$$\tau = \frac{3}{2}(T2 - T1) = 0.309$$

$$T_o = T2 - \tau + Tm = 0.144$$

Luego se calcula el valor de las constantes del controlador  $K_c$ ,  $T_i$ ,  $T_d$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  según la tabla de Z&N como se observa.

$$K_c = \frac{1.2}{k} \left( \frac{T_o}{\tau} \right)^{-1} = 2.1458$$

$$T_i = 2 * T_o = 0.288$$

$$T_d = \frac{1}{2} * T_o = 0.072$$

$$K_i = \frac{K_c}{T_i} = 7.4506$$

$$K_d = K_c * T_d = 0.1545$$

Se procede a mostrar los resultados de las diferentes sintonizaciones de los motores, aplicando el método 3 anteriormente explicado.

## Motor 2

$$Kc = 2.65$$

$$Ki = 8.5044$$

$$Kd = 0.2064$$

## Motor 2\_2

$$Kc = 2.6365$$

$$Ki = 8.6047$$

$$Kd = 0.2019$$

## Motor 3

$$Kc = 2.4055$$

$$Ki = 9.2804$$

$$Kd = 0.1558$$

#### Motor 4

$$Kc = 2.4890$$

$$Ki = 9.0574$$

$$Kd = 0.1709$$

#### Motor 5

$$Kc = 2.4650$$

$$Ki = 8.9117$$

$$Kd = 0.1704$$

#### Motor 6

$$Kc = 2.4726$$

$$Ki = 9.1307$$

$$Kd = 0.1673$$

Una vez terminado los métodos de sintonización para los motores del manipulador 1, se procede a realizar la respectiva comparativa de los métodos hallados para evaluar cuál es la mejor opción de control para cada motor.

#### 6.4.5.1 Aplicación de los métodos de sintonización manipulador 1

##### Motor 1

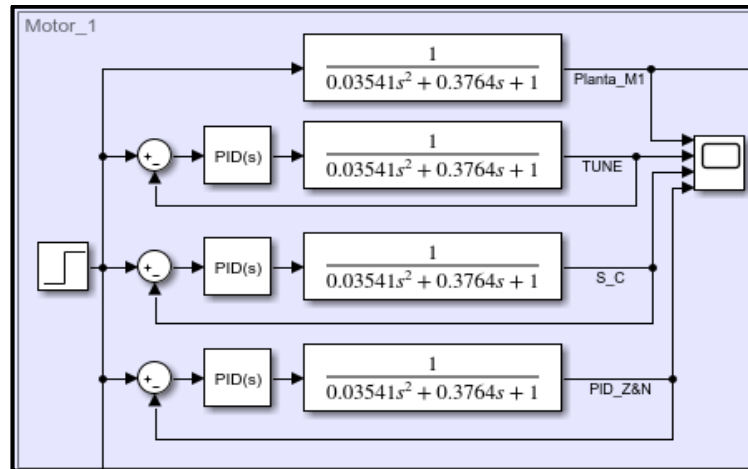
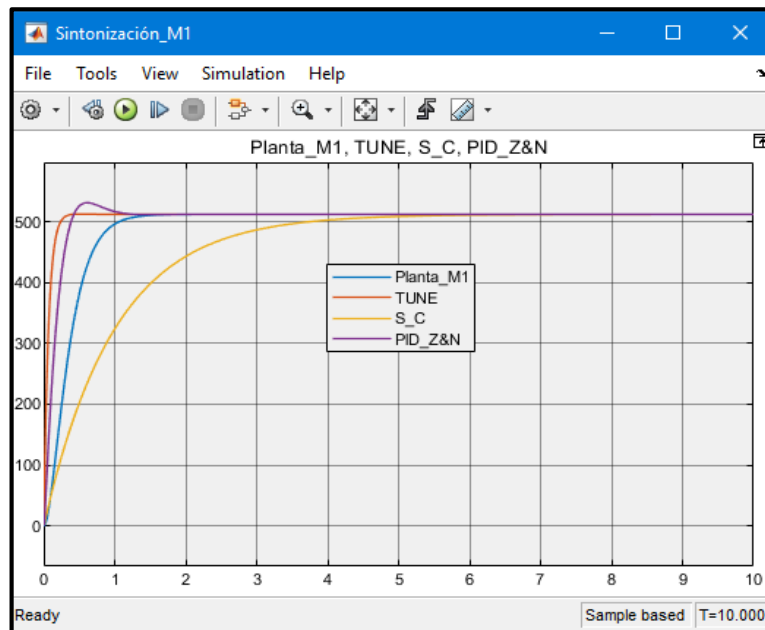


Figura 71. Digrama de bloques métodos de sintonización motor 1



Grafica 37. Salida de los métodos de sintonización motor 1

## Motor 2

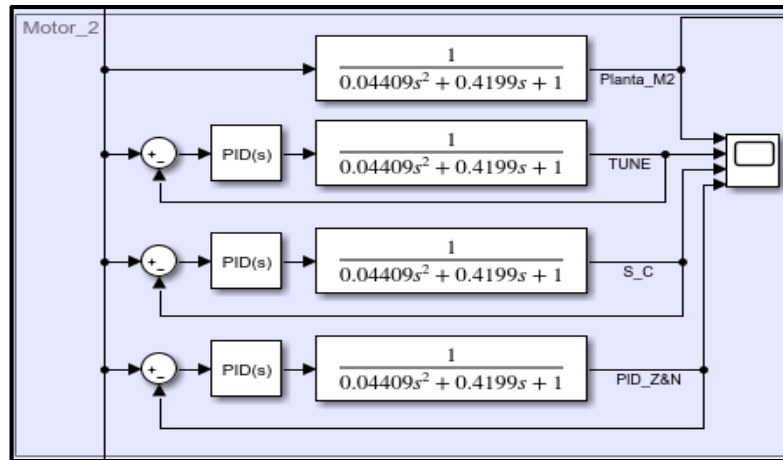
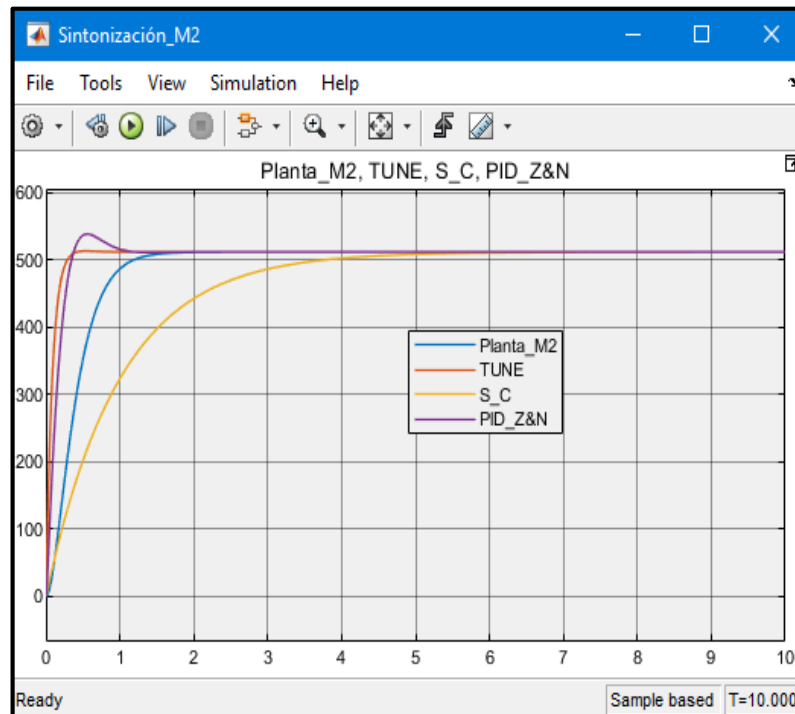


Figura 72. Digrama de bloques métodos de sintonización motor 2



Grafica 38. Salida de los métodos de sintonización motor 2

## Motor 2-2

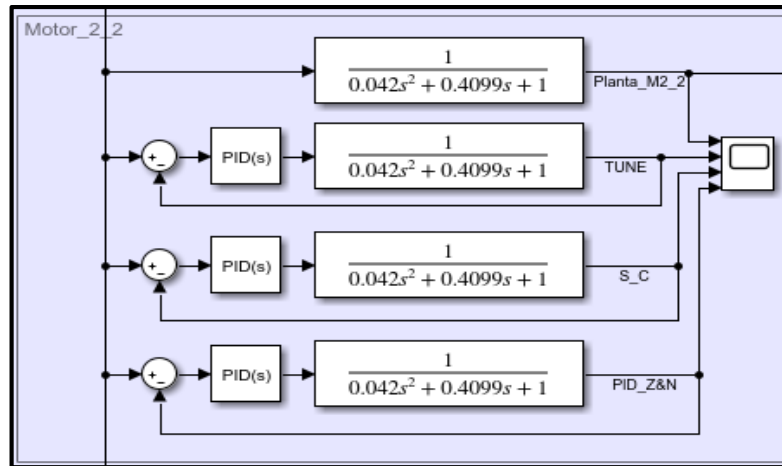
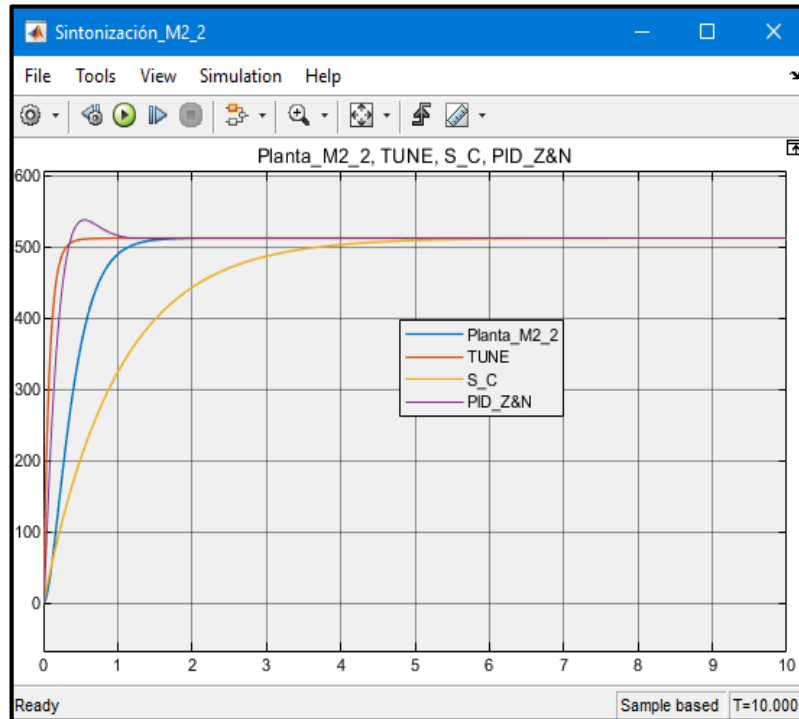


Figura 73. Digrama de bloques métodos de sintonización motor 2-2



Grafica 39. Salida de los métodos de sintonización motor 2-2

### Motor 3

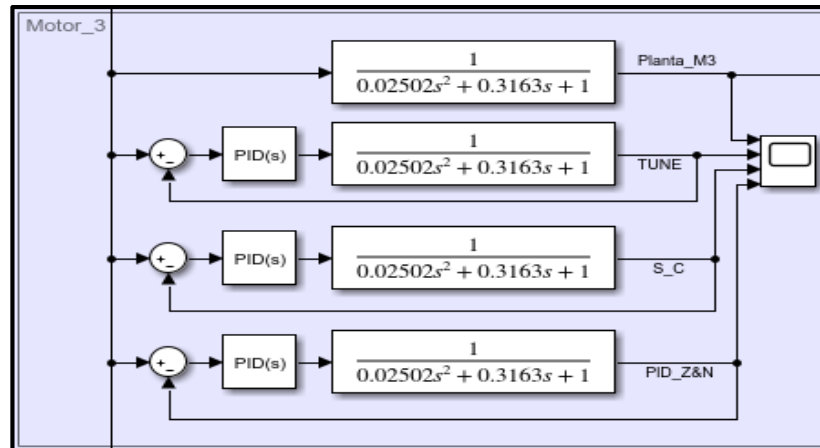
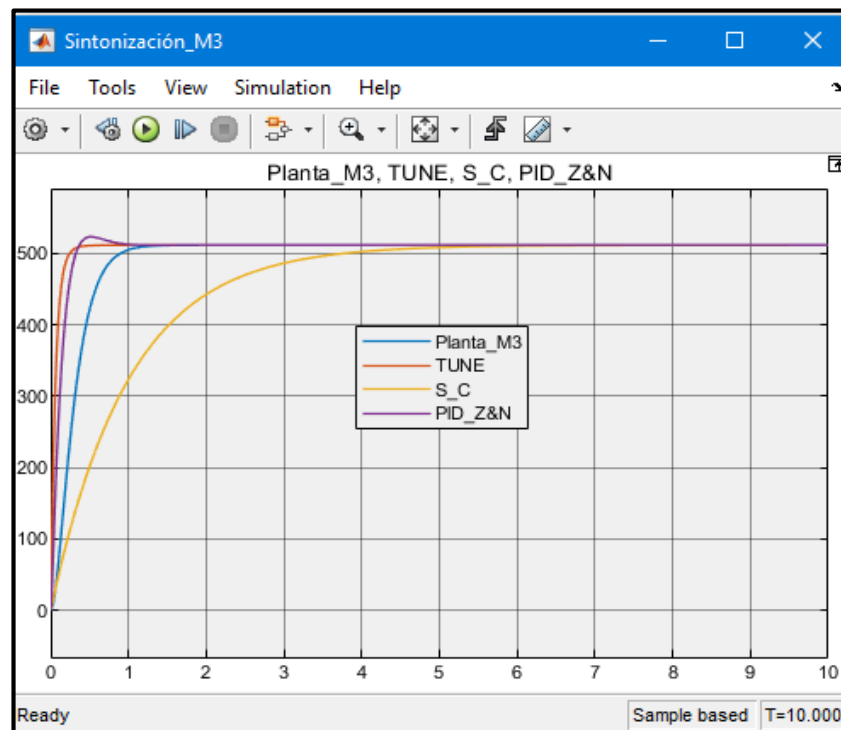


Figura 74. Digrama de bloques métodos de sintonización motor 3



Grafica 40. Salida de los métodos de sintonización motor 3

## Motor 4

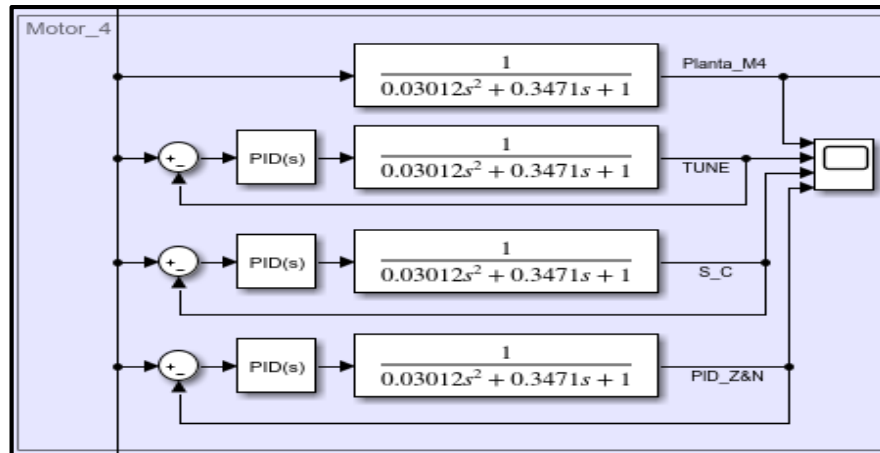
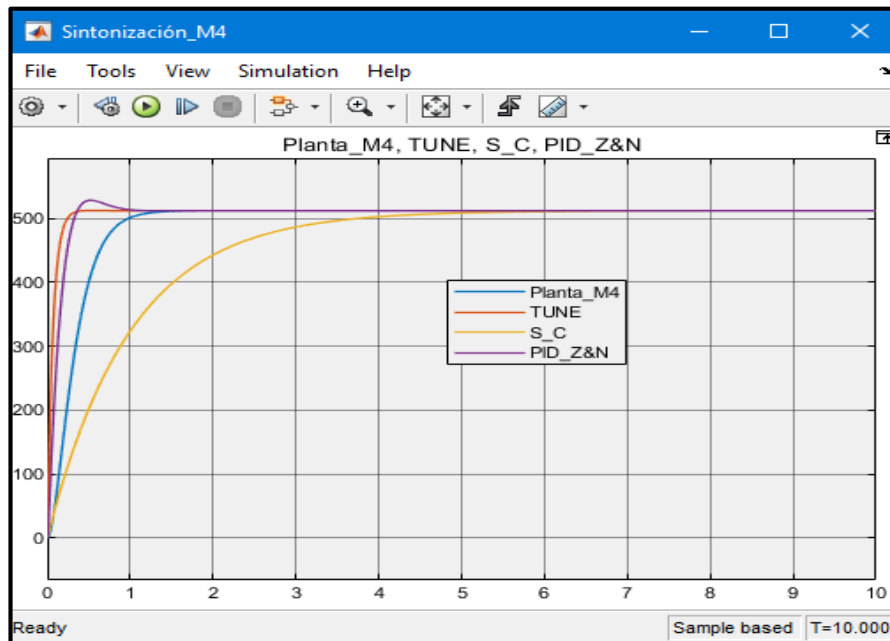


Figura 75. Digrama de bloques métodos de sintonización motor 4



Grafica 41. Salida de los métodos de sintonización motor 4

## Motor 5

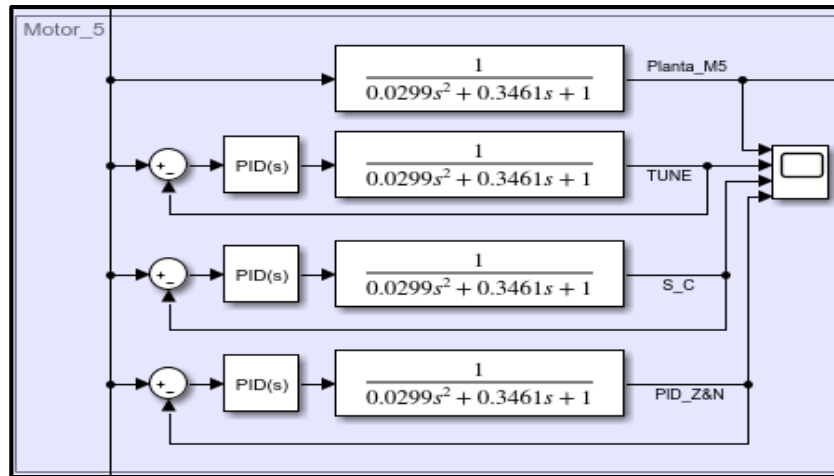
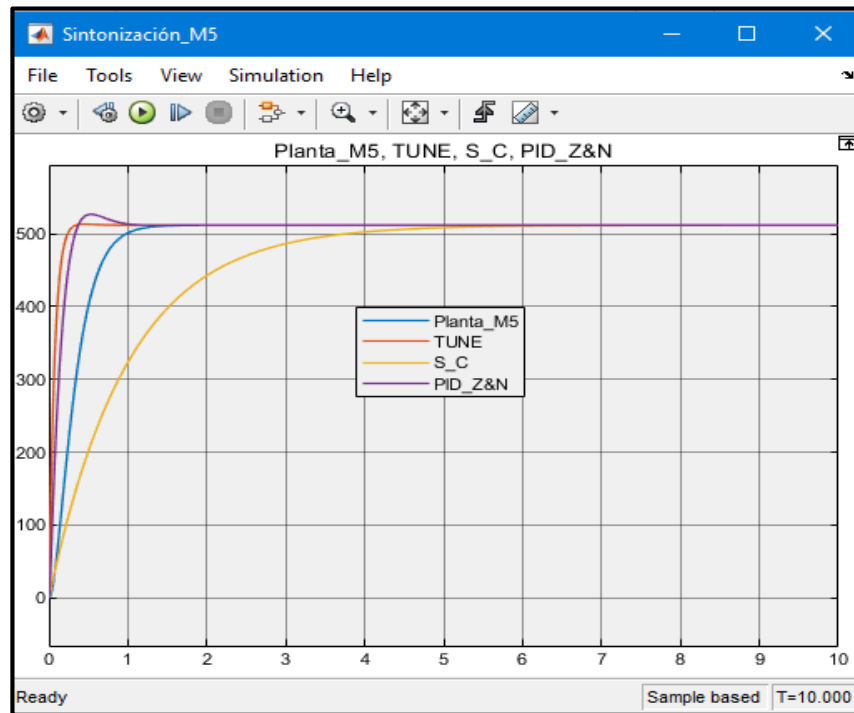


Figura 76. Diagrama de bloques métodos de sintonización motor 5



Grafica 42. Salida de los métodos de sintonización motor 5

## Motor 6

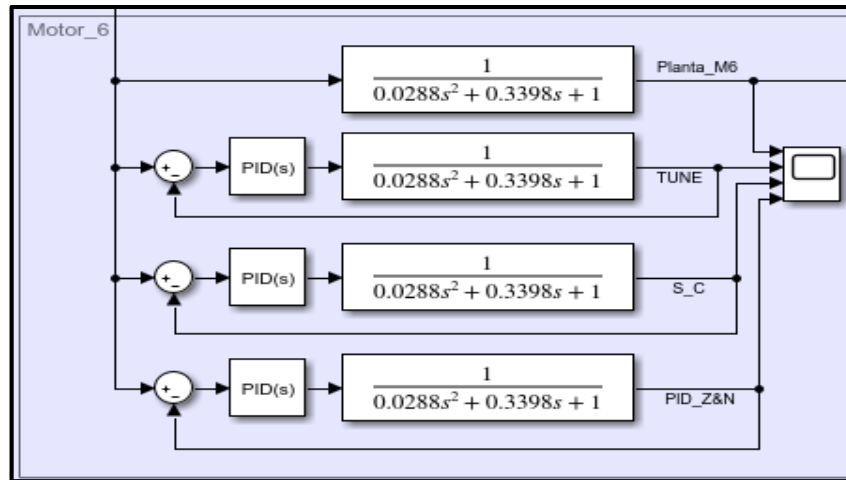
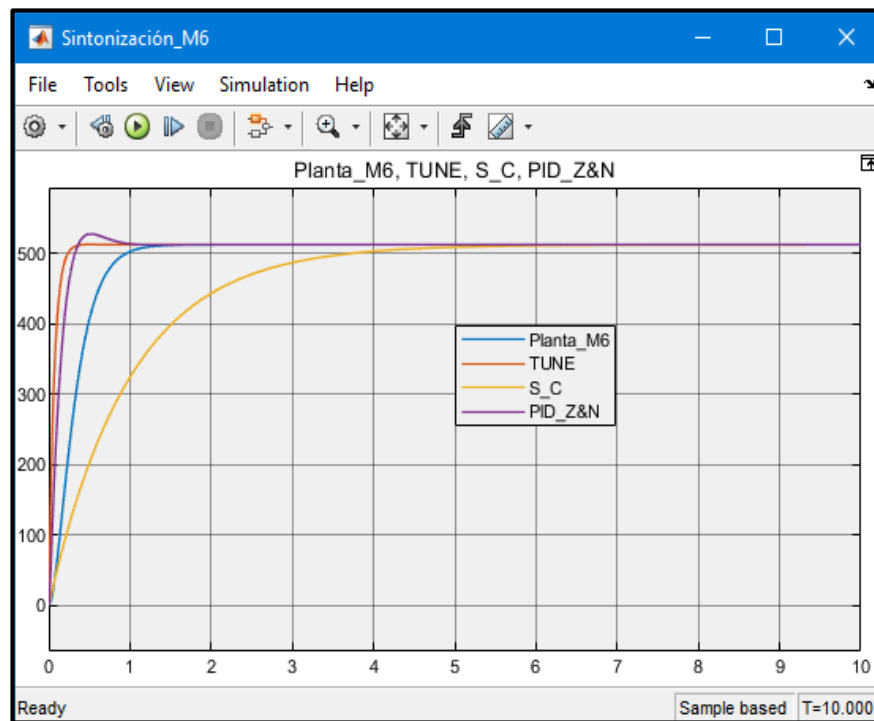


Figura 77. Digrama de bloques métodos de sintonización motor 6

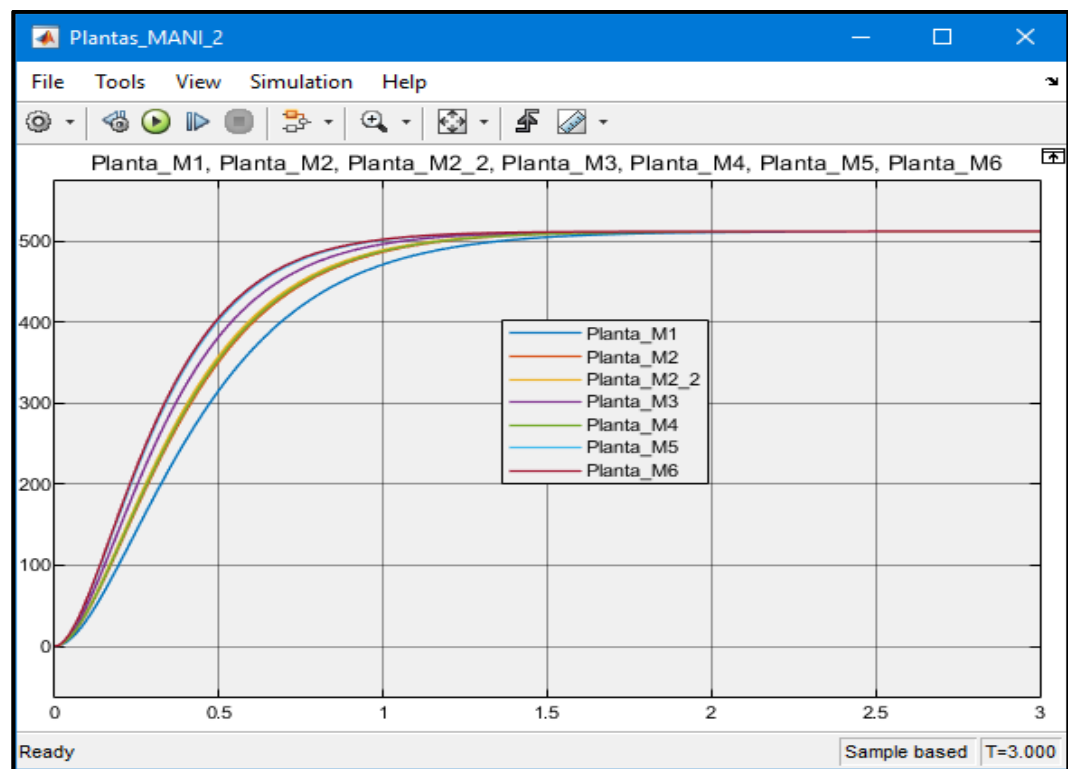


Grafica 43. Salida de los métodos de sintonización motor 6

#### 6.4.6 Sintonización del manipulador 2

##### 1. Método: Sintonización de controlador por el método de tune Matlab

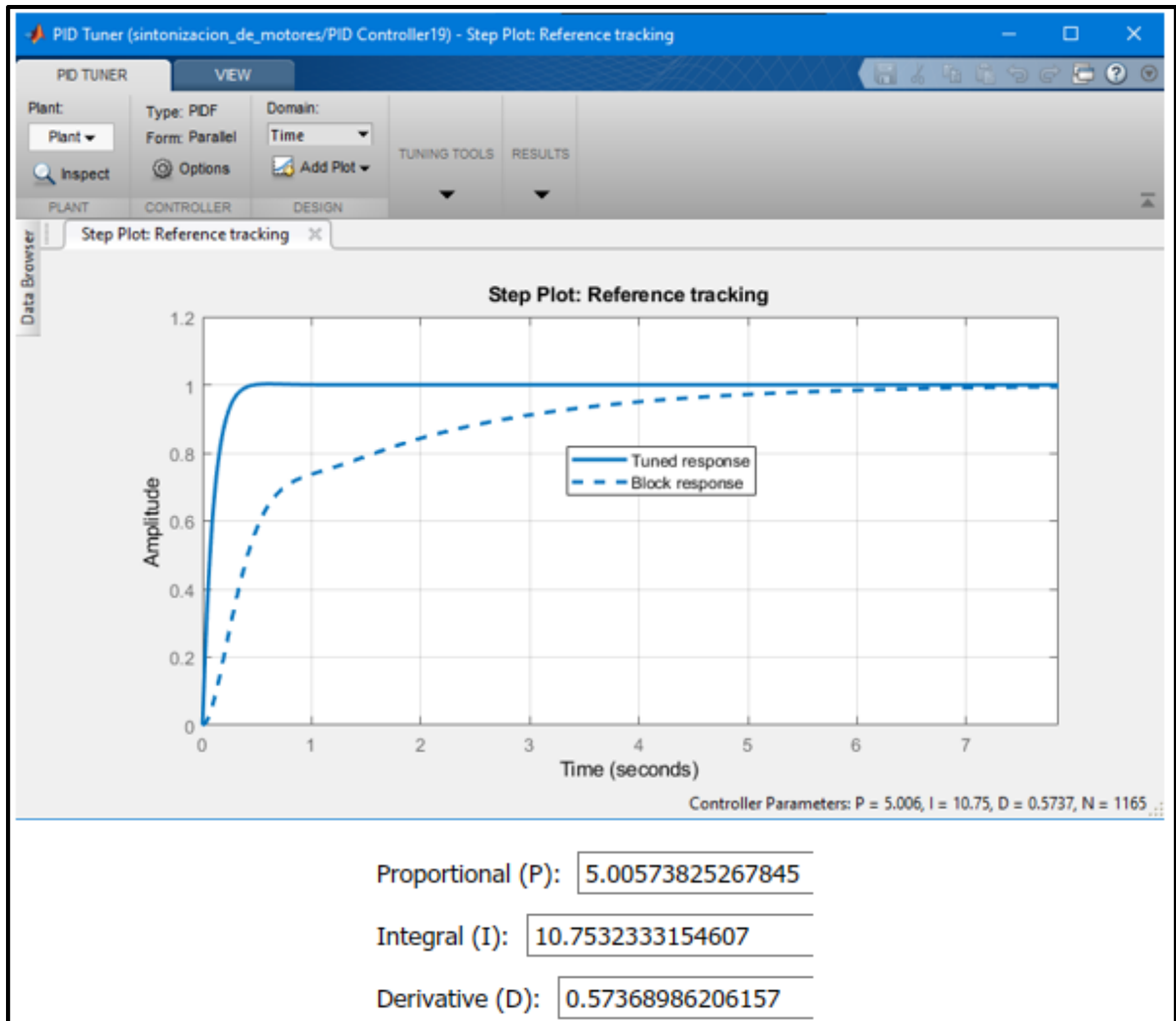
Para el método de PID Tune de Matlab se usa las funciones de transferencia calculadas con anterioridad, se crea en Simulink donde los bloques definen cada una de las plantas halladas, luego se observa la salida de cada uno de los motores ante un escalón de 512 ( $0^\circ$ ) como se observa Grafica 44, para luego aplicar el tune y mejorar la salida.



**Grafica 44. Salida de las plantas del manipulador 2**

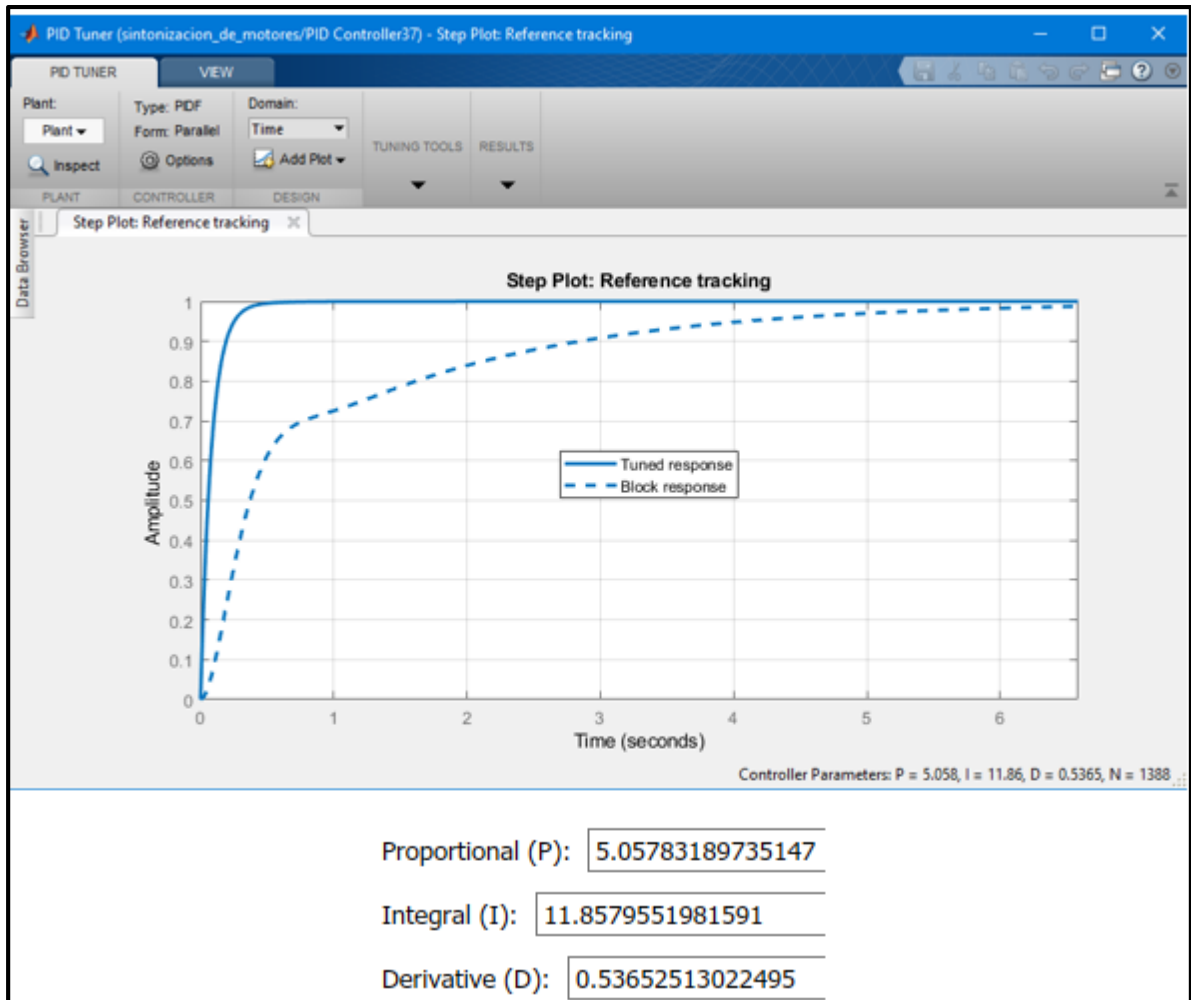
Luego de aplicar el tune se obtiene que el método arroja las siguientes constantes de sintonización para cada uno de los motores como se muestra a continuación:

## Motor 1



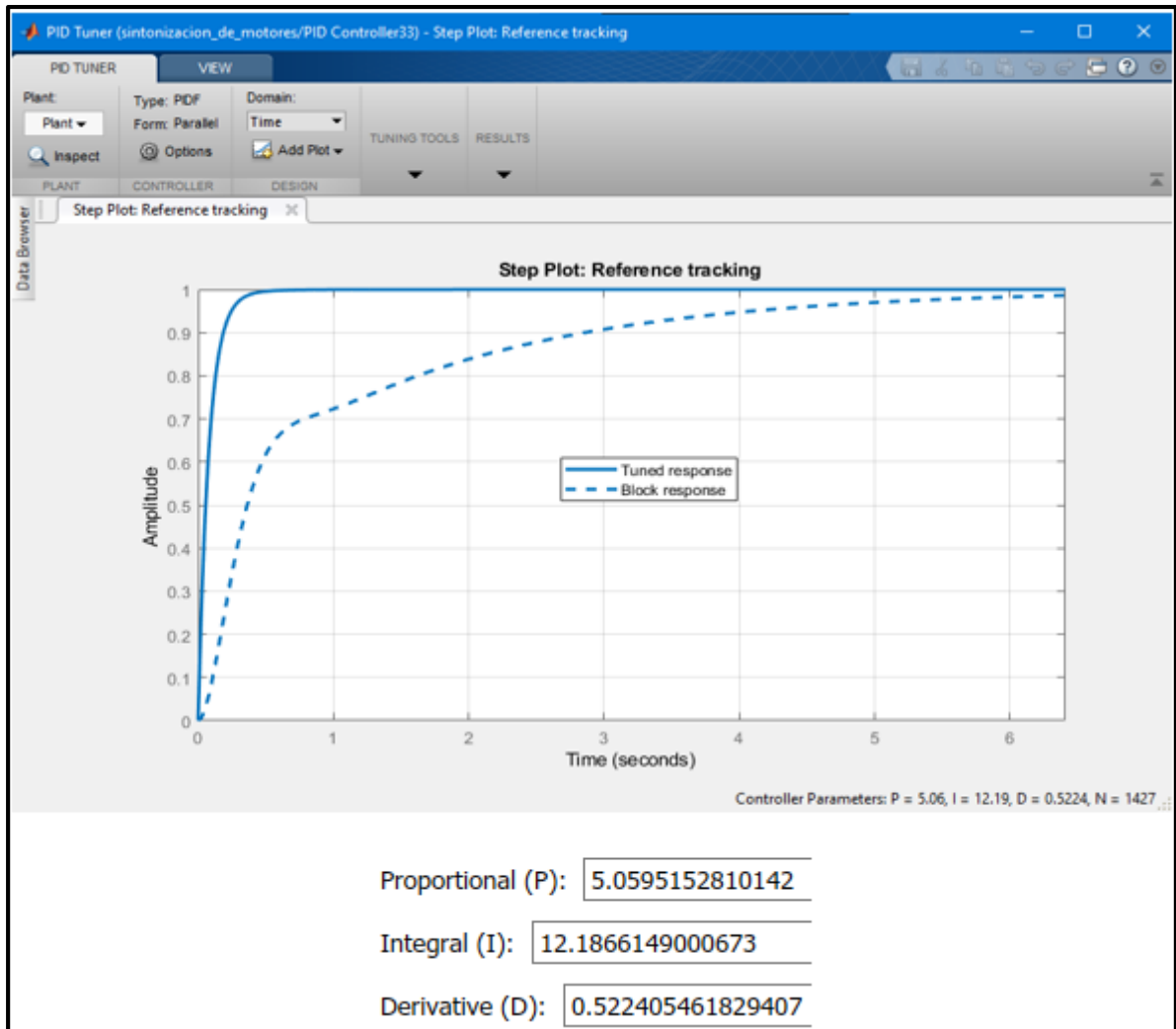
**Grafica 45.** Salida del controlador Tune más las constantes del controlador del motor 1

## Motor 2



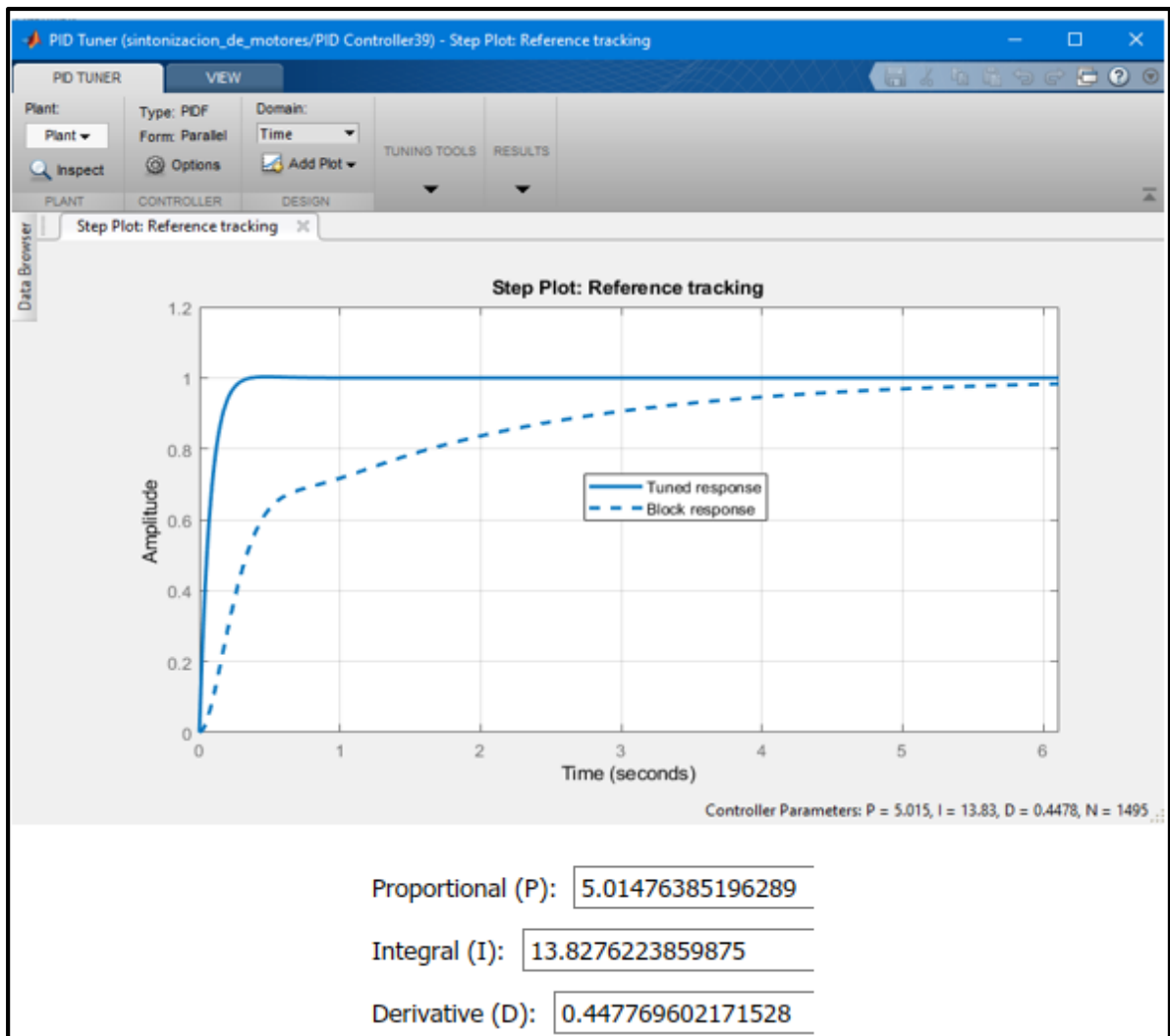
**Grafica 46.** Salida del controlador Tune más las constantes del controlador del motor 2

## Motor 2-2



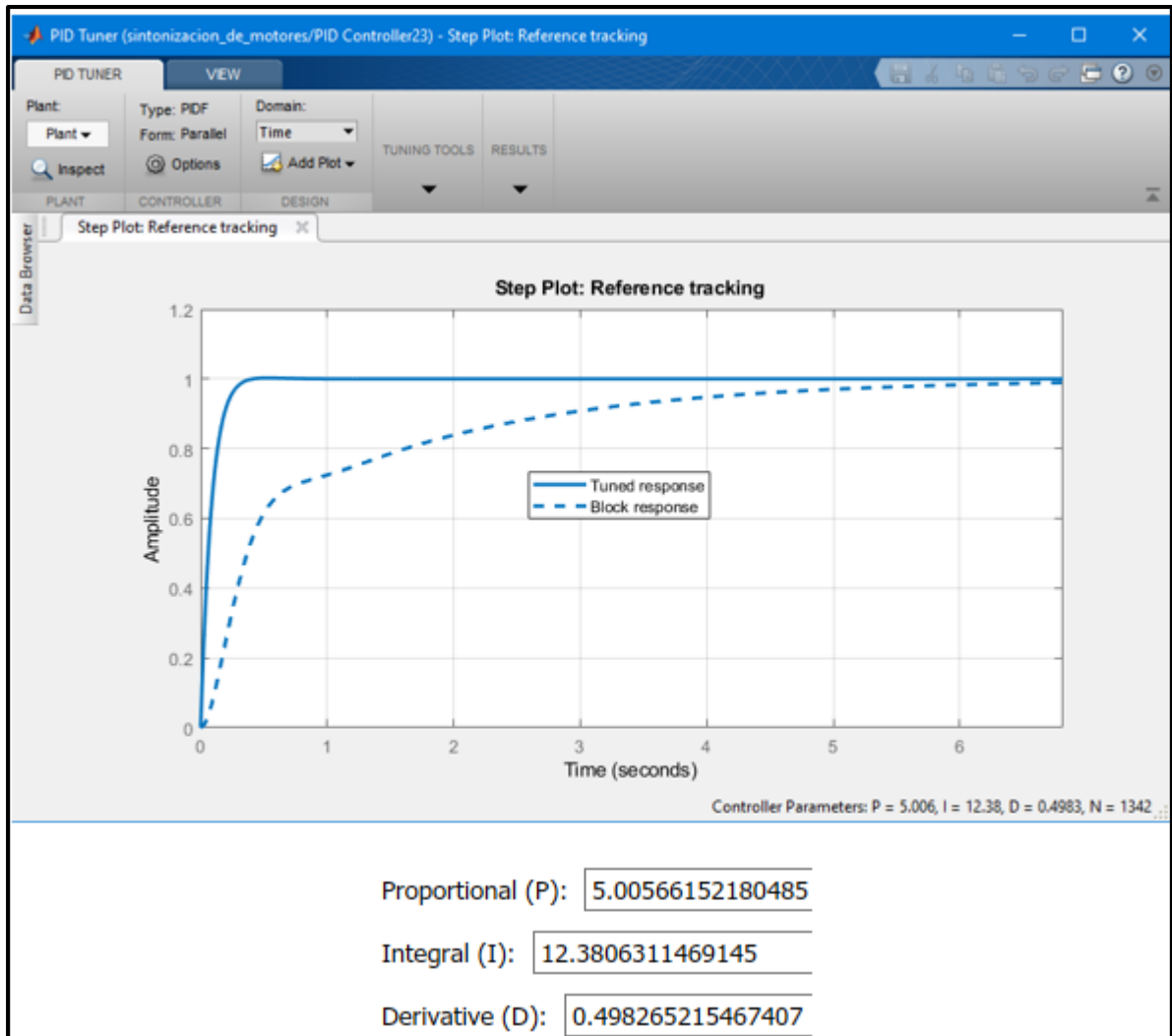
Grafica 47. Salida del controlador Tune más las constantes del controlador del motor 2-2

### Motor 3



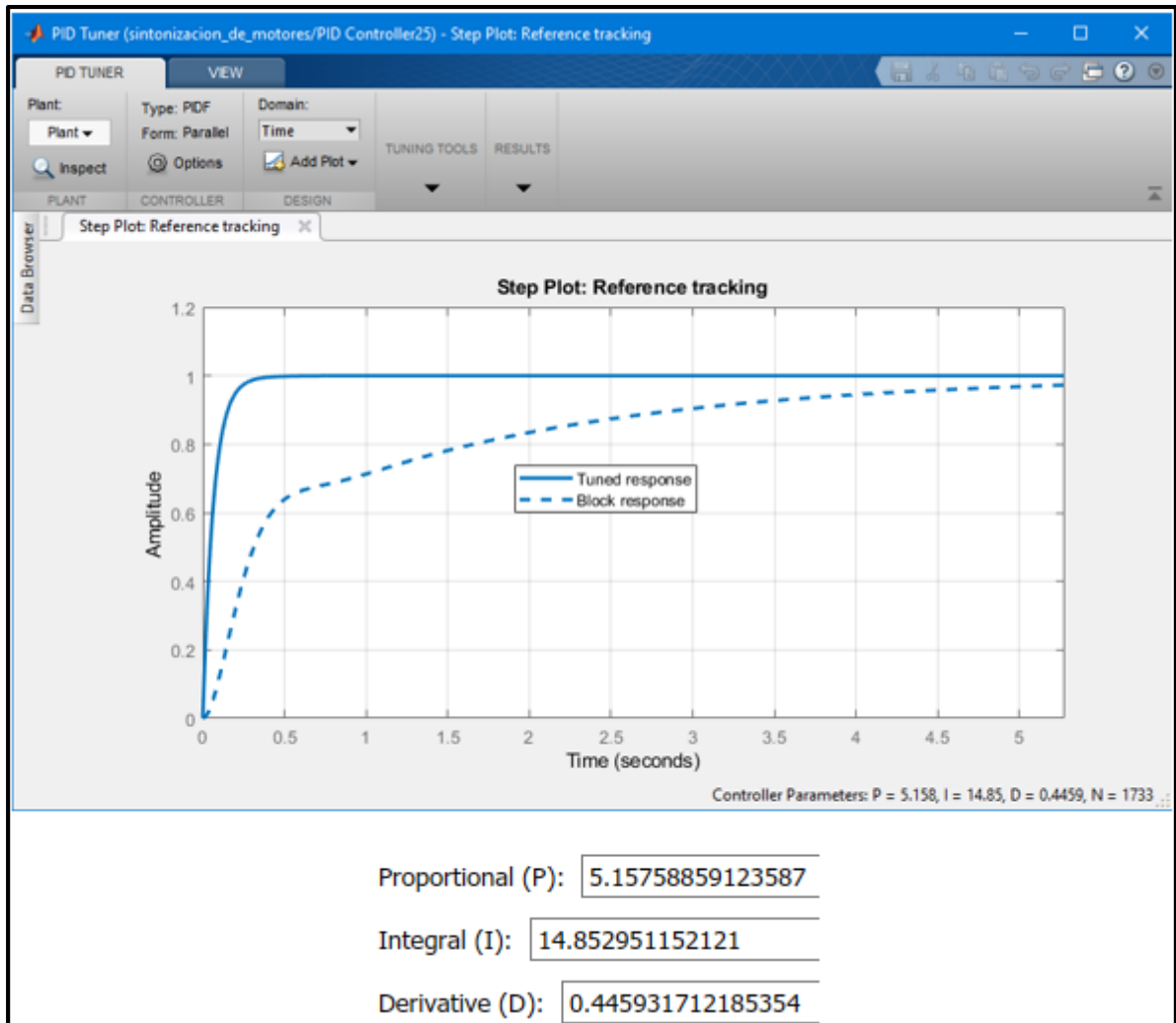
**Grafica 48.** Salida del controlador Tune más las constantes del controlador del motor 3

## Motor 4



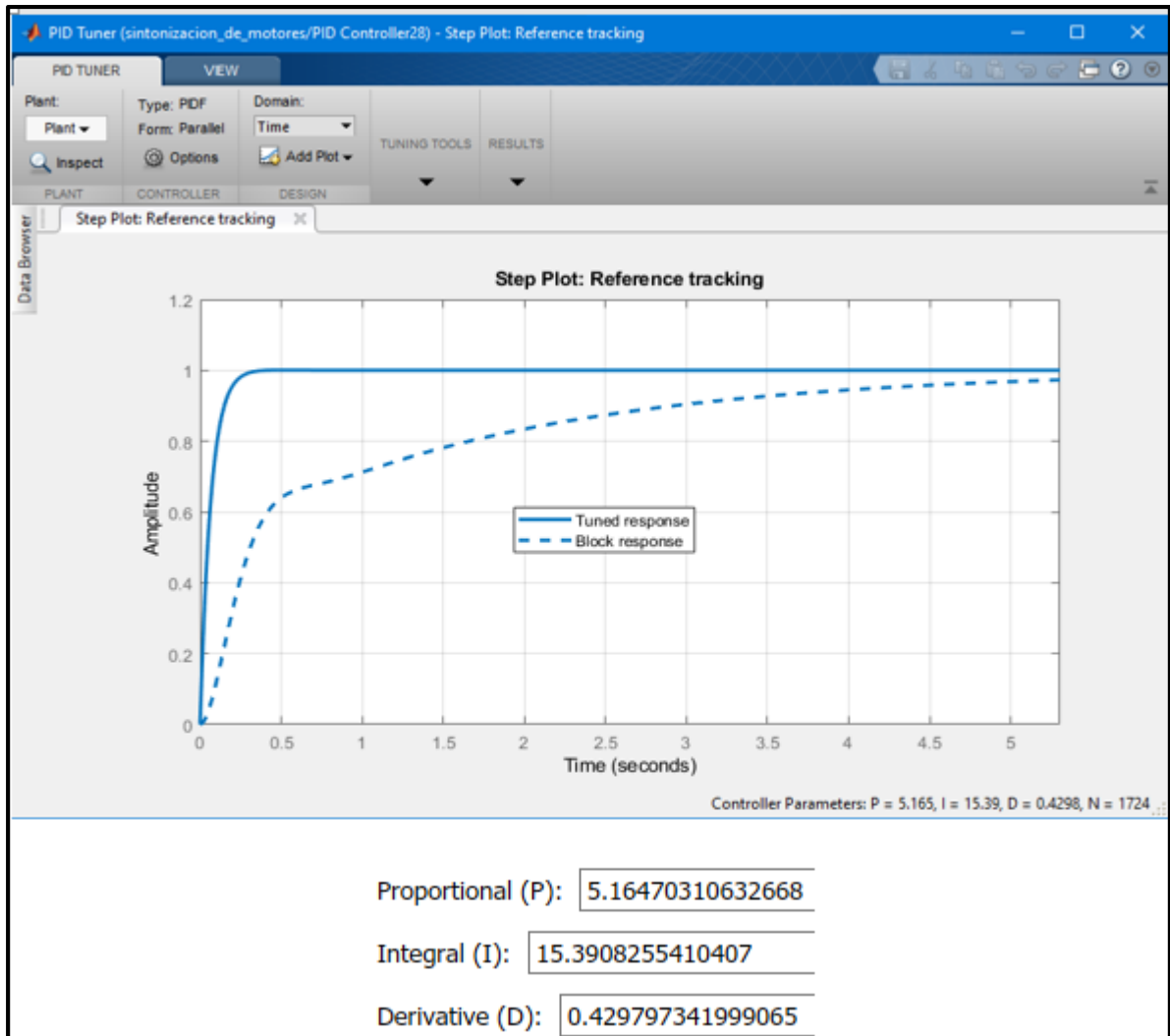
**Grafica 49.** Salida del controlador Tune más las constantes del controlador del motor 4

## Motor 5



**Grafica 50.** Salida del controlador Tune más las constantes del controlador del motor 5

## Motor 6



**Grafica 51.** Salida del controlador Tune más las constantes del controlador del motor 6

## 2. Método: Sintonización de controlador por el método síntesis de controlador

Para el cálculo del controlador de las plantas se utilizará este método que permite arrojar valores de acuerdo con el comportamiento que se requiera del sistema.

### Motor 1

$$C(s) = \frac{1}{0.05741s^2 + 0.4792s + 1}$$

$$C(s) = \frac{0.05741s^2 + 0.4792s + 1}{1} * \frac{1}{s}$$

$$C(s) = \frac{0.05741s^2 + 0.4792s + 1}{s}$$

$$C(s) = \frac{0.05741s^2}{s} + \frac{0.4792s}{s} + \frac{1}{s}$$

$$Kp = \frac{0.4792}{1}$$

$$Ki = \frac{1}{1}$$

$$Kd = \frac{0.05741}{1}$$

### Motor 2

$$C(s) = \frac{1}{0.04432s^2 + 0.421s + 1}$$

$$C(s) = \frac{0.04432s^2 + 0.421s + 1}{1} * \frac{1}{s}$$

$$C(s) = \frac{0.04432s^2 + 0.421s + 1}{s}$$

$$C(s) = \frac{0.04432s^2}{s} + \frac{0.421s}{s} + \frac{1}{s}$$

$$Kp = \frac{0.421}{1}$$

$$Ki = \frac{1}{1}$$

$$Kd = \frac{0.04432}{1}$$

### Motor 2-2

$$C(s) = \frac{1}{0.042s^2 + 0.4099s + 1}$$

$$C(s) = \frac{0.042s^2 + 0.4099s + 1}{1} * \frac{1}{s}$$

$$C(s) = \frac{0.042s^2 + 0.4099s + 1}{s}$$

$$C(s) = \frac{0.042s^2}{s} + \frac{0.4099s}{s} + \frac{1}{s}$$

$$Kp = \frac{0.4099}{1}$$

$$Ki = \frac{1}{1}$$

$$Kd = \frac{0.042}{1}$$

### Motor 3

$$C(s) = \frac{1}{0.0349s^2 + 0.3741s + 1}$$

$$C(s) = \frac{0.0349s^2 + 0.3741s + 1}{1} * \frac{1}{s}$$

$$C(s) = \frac{0.0349s^2 + 0.3741s + 1}{s}$$

$$C(s) = \frac{0.0349s^2}{s} + \frac{0.3741s}{s} + \frac{1}{s}$$

$$Kp = \frac{0.3741}{1}$$

$$Ki = \frac{1}{1}$$

$$Kd = \frac{0.0349}{1}$$

#### Motor 4

$$C(s) = \frac{1}{0.0433s^2 + 0.4162s + 1}$$

$$C(s) = \frac{0.0433s^2 + 0.4162s + 1}{1} * \frac{1}{s}$$

$$C(s) = \frac{0.0433s^2 + 0.4162s + 1}{s}$$

$$C(s) = \frac{0.0433s^2s^2}{s} + \frac{0.4162s}{s} + \frac{1}{s}$$

$$Kp = \frac{0.4162}{1}$$

$$Ki = \frac{1}{1}$$

$$Kd = \frac{0.0433}{1}$$

#### Motor 5

$$C(s) = \frac{1}{0.0295s^2 + 0.3441s + 1}$$

$$C(s) = \frac{0.0295s^2 + 0.3441s + 1}{1} * \frac{1}{s}$$

$$C(s) = \frac{0.0295s^2 + 0.3441s + 1}{s}$$

$$C(s) = \frac{0.0295}{s} + \frac{0.3441s}{s} + \frac{1}{s}$$

$$Kp = \frac{0.3441}{1}$$

$$Ki = \frac{1}{1}$$

$$Kd = \frac{0.0295}{1}$$

## Motor 6

$$C(s) = \frac{1}{0.0288s^2 + 0.3398s + 1}$$

$$C(s) = \frac{0.0288s^2 + 0.3398s + 1}{1} * \frac{1}{s}$$

$$C(s) = \frac{0.0288s^2 + 0.3398s + 1}{s}$$

$$C(s) = \frac{0.0288s^2}{s} + \frac{0.3398s}{s} + \frac{1}{s}$$

$$Kp = \frac{0.3398}{1}$$

$$Ki = \frac{1}{1}$$

$$Kd = \frac{0.0288}{1}$$

3. Método: Sintonización del controlador por el método Z&N para sistemas mayor a primer orden.

Se realiza el mismo procedimiento explicado en el método 3 de la Sintonización del manipulador 1, arrojando los siguientes resultados.

### Motor 1

$$K_c = 2.4726$$

$$K_i = 9.1307$$

$$K_d = 0.1673$$

### Motor 2

$$K_c = 2.6567$$

$$K_i = 8.5096$$

$$K_d = 0.2073$$

### Motor 2\_2

$$K_c = 2.6365$$

$$K_i = 8.6047$$

$$K_d = 0.2019$$

### Motor 3

$$K_c = 2.56$$

$$K_i = 8.88$$

$$K_d = 0.1843$$

#### Motor 4

$$Kc = 2.6488$$

$$Ki = 8.55$$

$$Kd = 0.2050$$

#### Motor 5

$$Kc = 2.4862$$

$$Ki = 9.1136$$

$$Kd = 0.1695$$

#### Motor 6

$$Kc = 2.4726$$

$$Ki = 9.1307$$

$$Kd = 0.1673$$

terminado los métodos de sintonización para los motores del manipulador 2, se realizar la respectiva comparativa de los métodos hallados para evaluar cuál es la mejor opción de control para cada motor.

#### 6.4.6.1 aplicación de los métodos de sintonización manipulador 2

##### Motor 1

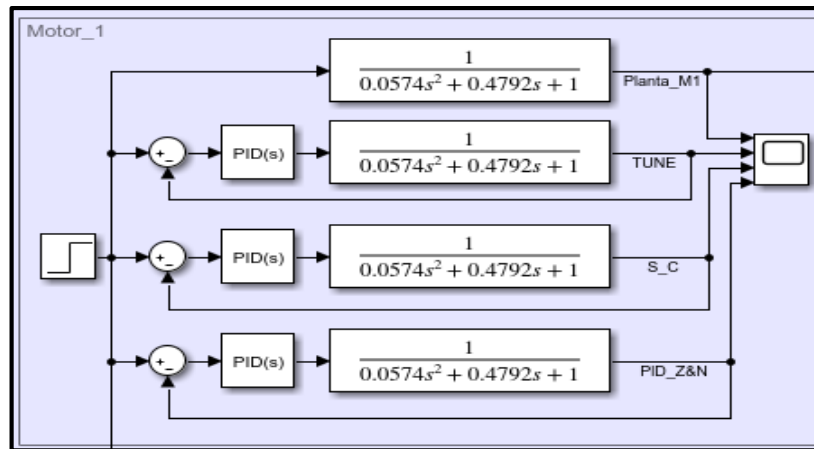
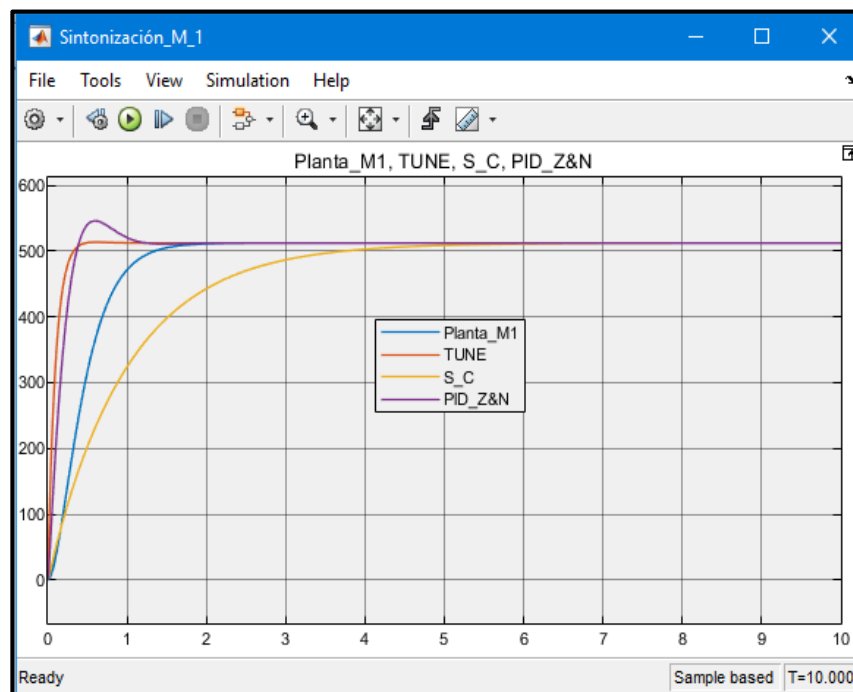


Figura 78. Digrama de bloques métodos de sintonización motor 1



Grafica 52. Salida de los métodos de sintonización motor 1

## Motor 2

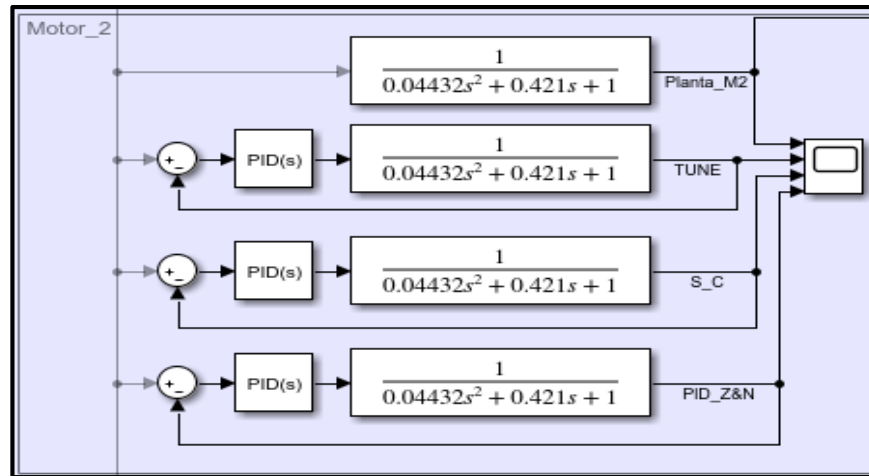
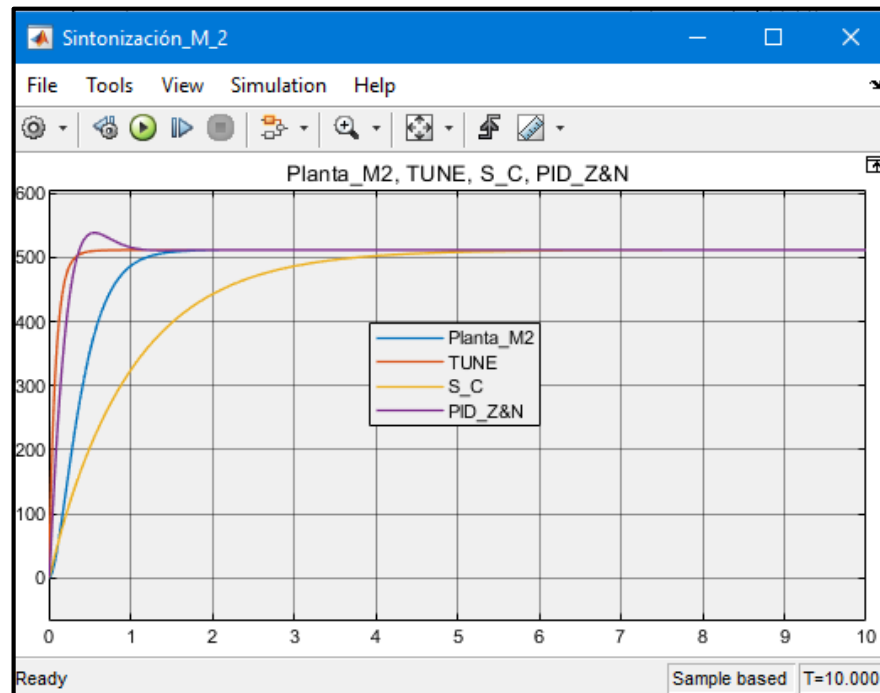


Figura 79. Digrama de bloques métodos de sintonización motor 2



Grafica 53. Salida de los métodos de sintonización motor 2

## Motor 2-2

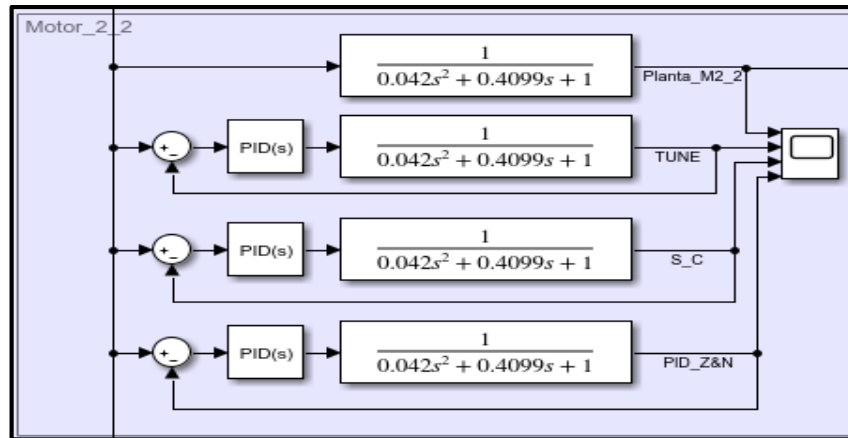
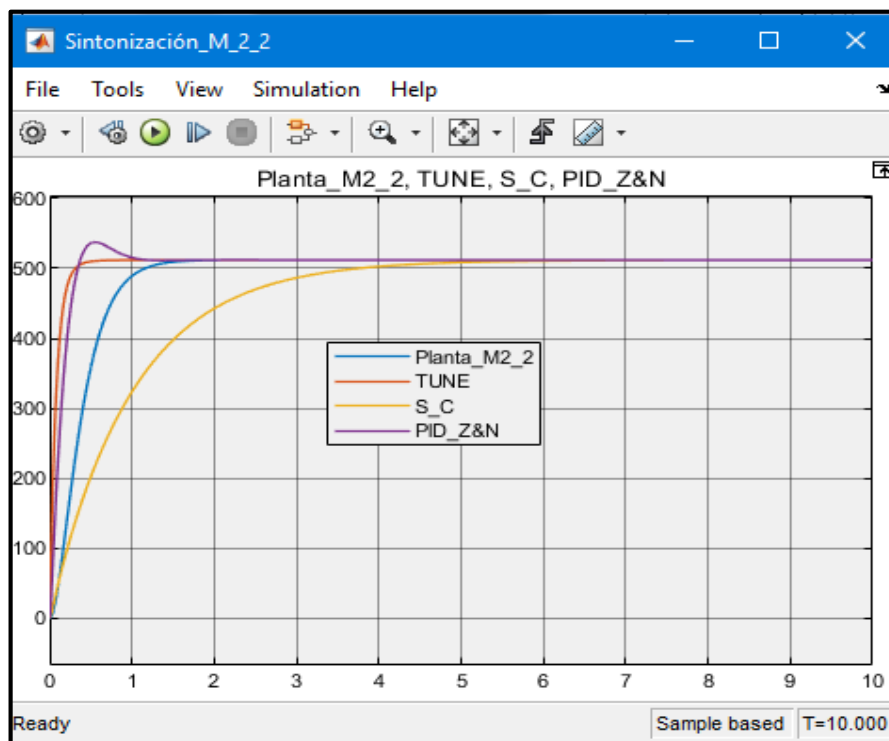


Figura 80. Digrama de bloques métodos de sintonización motor 2-2



Grafica 54. Salida de los métodos de sintonización motor 2-2

## Motor 3

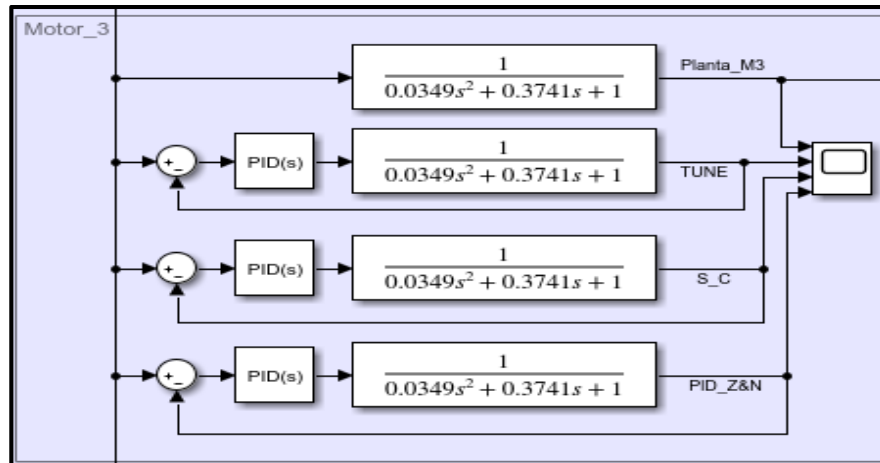
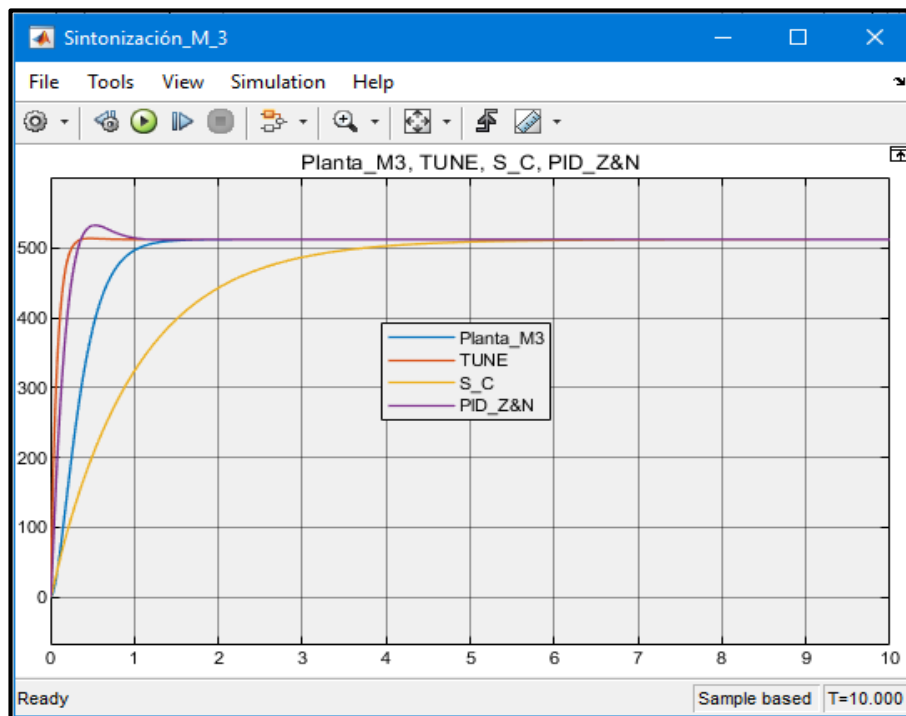


Figura 81. Digrama de bloques métodos de sintonización motor 3



Grafica 55. Salida de los métodos de sintonización motor 3

## Motor 4

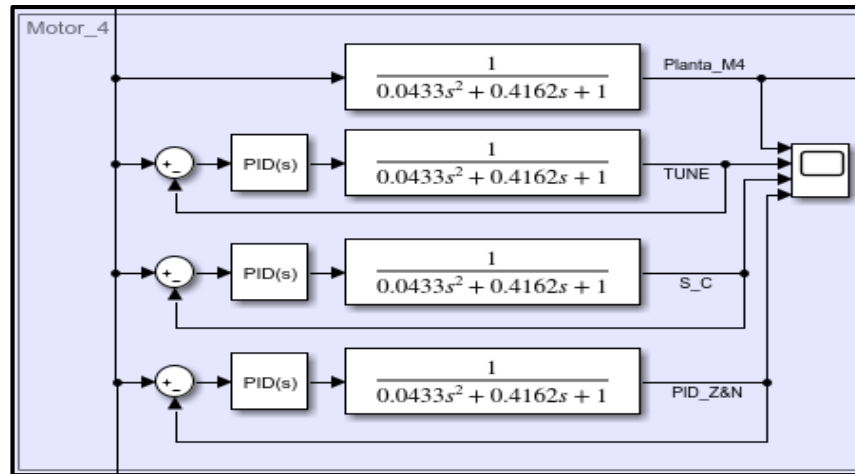
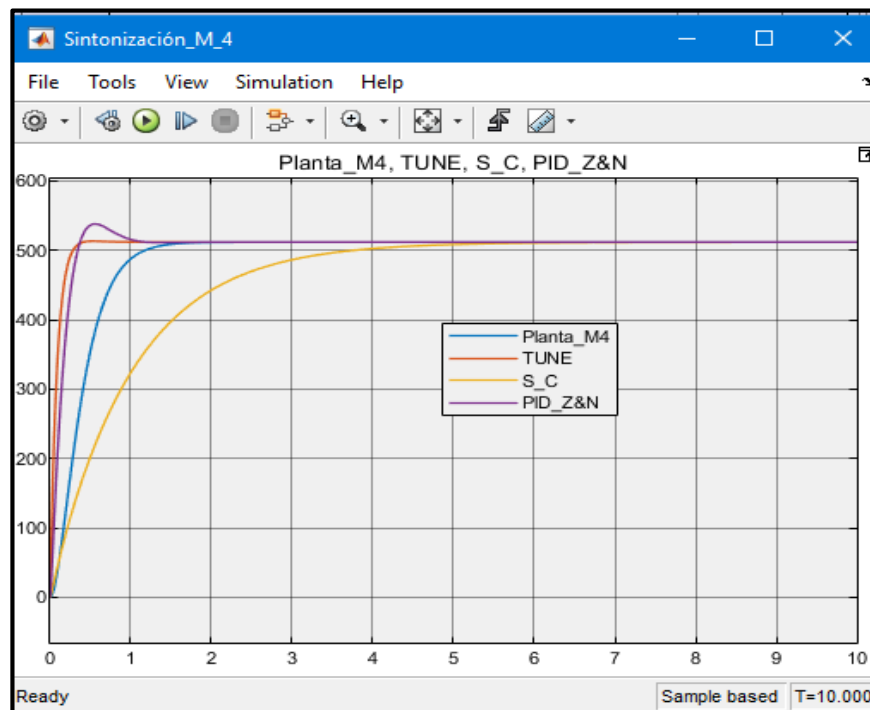


Figura 82. Digrama de bloques métodos de sintonización motor 4



Grafica 56. Salida de los métodos de sintonización motor 4

## Motor 5

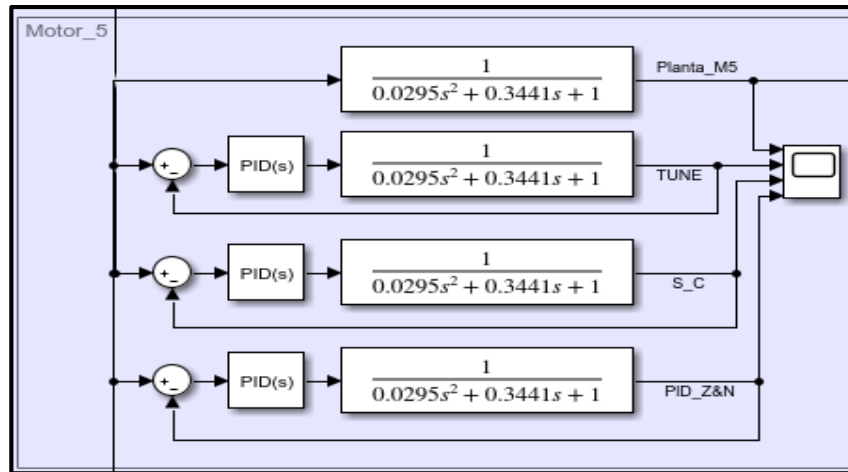
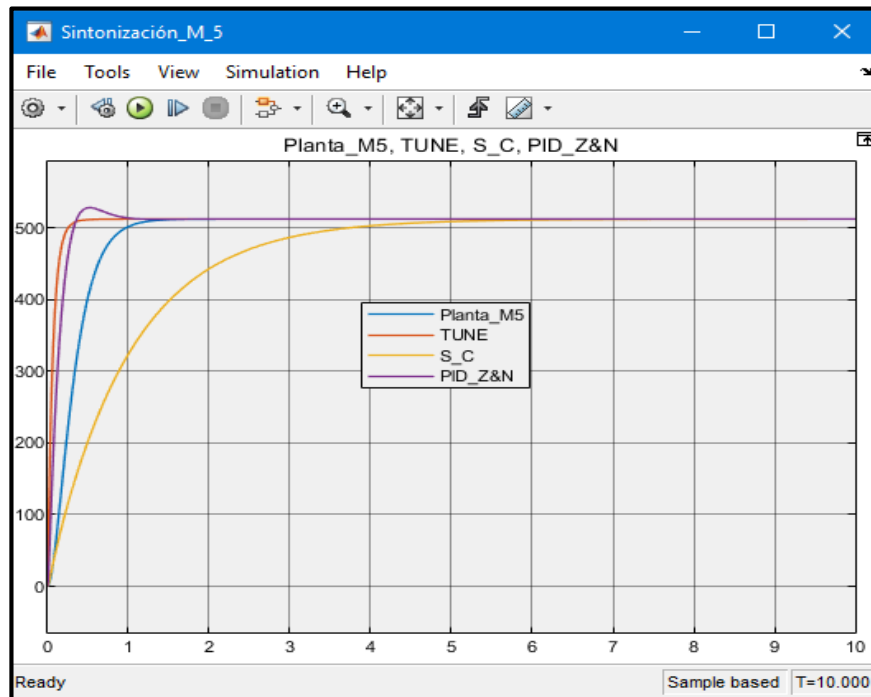


Figura 83. Digrama de bloques métodos de sintonización motor 5



Grafica 57. Salida de los métodos de sintonización motor 5

## Motor 6

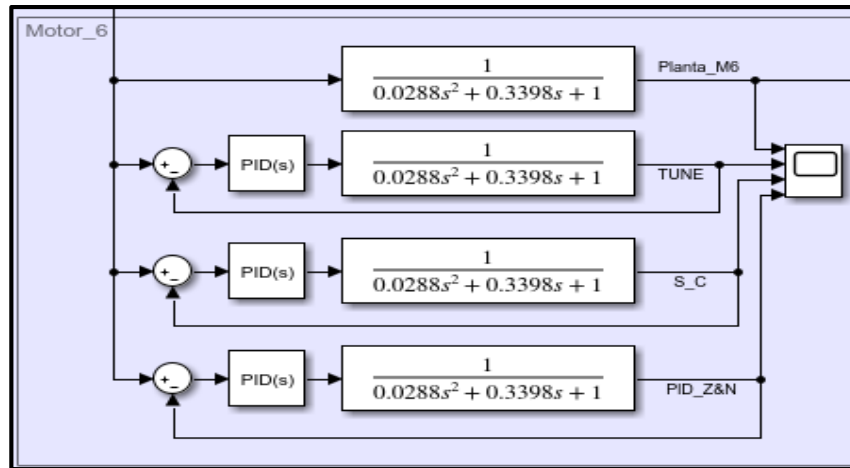
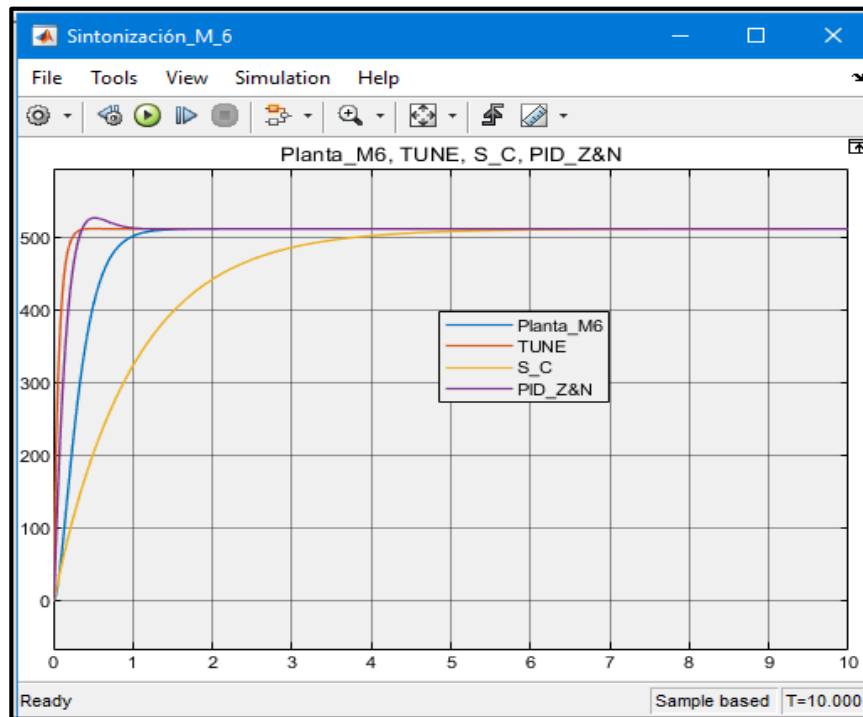


Figura 84. Digrama de bloques métodos de sintonización motor 6



Grafica 58. Salida de los métodos de sintonización motor 6

## 6.5 Diseño del Control Cinemático Colaborativo

Para la elaboración de la robótica colaborativa en los bimanipuladores se tuvo en cuenta los siguientes factores:

### 6.5.1 Control cinemático

Se debe de tener la elaboración y ejecución del control cinemático de los manipuladores, con su receptiva validación para la eficacia a la hora de la implementación de la robótica colaborativa. ya que la estrategia de control colaborativo fue diseñada para llevar a cabo el transporte de un objeto.

### 6.5.2 Modelos matemáticos

haber desarrolló el modelado cinemático tanto de la directa e inversa de los manipuladores de forma individual ya que representan las mismas características, pero uno esta rotado  $180^\circ$  con referente al otro. Ya que, al poseer los modelos cinemáticos, se puede hallar la relación matemática entre la matriz de transformación homogénea del efector final, y la del origen (base del manipulador) de cada manipulador, empleando el uso de matrices de transformación homogéneas, las cuales, a través de herramientas matemáticas, relacionan la localización de un objeto en el espacio cartesiano con otro sistema de referencia, para hallar tanto posiciones como orientaciones relativas entre los diferentes elementos del sistema.

### 6.5.3 Montaje de los manipuladores

Los manipuladores se deben de encontrar instalados de manera segura a la base, con una localización inicial totalmente fija tanto del primero como del segundo. Ya que, al estar sujetos y adheridos a la tabla, siempre presentaran la misma localización espacial respecto al plano cartesiano.

### 6.5.4 Diseño de la pieza a transportar

Las piezas a transportar fueron diseñadas de manera correcta, de tal forma que se puedan sujetar con el efector final de los manipuladores, al conocer las medidas de diseño de la pieza de transporte puedo conocer la distancia y orientación de las zonas de sujeción de la pieza, como el centro de la misma.

### 6.5.5 Diseño estructural del sistema colaborativo

En primer lugar, se observa el área de trabajo, cuando se posee la pieza a transportar, con el fin de buscar la relación del manipulador con la pieza de transporte.

#### 6.5.5.1 Relación de los manipuladores con la pieza de transporte

buscando la relación del manipulador con la pieza de transporte, era necesario ubicar las matrices de transformación homogéneas en cada punto del sistema, los cuales fueron:

- los orígenes de los manipuladores.
- los efectores finales de los manipuladores.
- Los sistemas de referencia el centro de la pieza, así como las zonas de sujeción, que dicha zona es donde dirigirán los efectores finales al momento de sujetar la pieza.

Para la representación de las MTH se establece un manipulador como el maestro que este estará ubicado en el origen del plano cartesiano de la base y el otro denominado esclavo, el cual estará trasladado en el eje x 50 cm.

Donde:

Mth1: Es el sistema origen del manipulador maestro.

Mth2: Es el sistema de coordenadas del efector final del manipulador maestro.

Mth3: Es el sistema origen del manipulador esclavo trasladado del maestro.

Mth4: Es el sistema de coordenadas del efector final del manipulador esclavo.

Mth5: Es el sistema de coordenadas origen de la pieza a transportar.

Mth6: Es el sistema de coordenadas del punto de sujeción 1 de la pieza.

Mth7: Es el sistema de coordenadas del punto de sujeción 2 de la pieza.

A continuación, se dará el procedimiento de cómo obtener las Mths mencionadas anteriormente que hace referencia a la relación de los manipuladores con la pieza, como uno de los manipuladores es el maestro el estará ubicado en el origen del sistema tridimensional de coordenadas, por este motivo, su MTH es una matriz identidad:

$$Mth1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Para el sistema de coordenadas del efector final del manipulador maestro, este se tomará como sus articulaciones estén en cero grados por ende tanto en los valores de px, py y pz dependerán única y exclusivamente de las distancias morfológicas.

$$Mth2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 229.5 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 262 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Por otra parte, el segundo manipulador al cual denominamos esclavo si posee una translación de 50 cm y una rotación de 180° respecto al origen, no obstante, no se debe hallar en cada vez que se muevan los manipuladores ya que su base es fija.

$$Mth3 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 500 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Para el sistema de coordenadas del efector final del manipulador esclavo, al igual que al maestro este se tomará como sus articulaciones estén en cero grados, pero esta vez se tomará en cuenta la traslación y rotación de el mismo.

$$Mth4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 270.5 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 262 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Para el sistema de coordenadas de las zonas del centro de la pieza y de las sujeciones son fijas ya que la pieza, nunca cambia de posición, siendo que este en el mismo lugar por ende se pueden conocer las Mths que esta contenga, no cambian a menos de que se cambie la pieza a mover, si es así se deben de agregar al momento de cambiar de pieza en el algoritmo de control, cabe recalcar que cada pieza tiene unas MTH de relación centro-agarre diferentes, pero que no cambiarán al moverse.

$$Mth5 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 230 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 120 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$M_{th6} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 250 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 120 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$M_{th7} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 270 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 120 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Una vez teniendo en cuenta las Mths descritas anteriormente se procede a generar dichas relaciones que se pueden generar entre sí, sabiendo que la Mth5 me representa la localización del centro de la pieza a transportar, el objetivo del sistema busca mover y rotar este sistema de coordenadas, tanto en su posición y orientación varia a lo largo de la trayectoria de la trayectoria colaborativa que se esté ejecutando, pero al conocer la localización del sistema Mth5, también automáticamente conozco la matriz M15 (Representa al sistema de coordenadas 5 vistos desde el sistema 1) que solo será una traslación tanto x y z positivo.

Al tener la localización central de la pieza a transportar, y conociendo con anterioridad como se describió antes las matrices de transformación homogéneas de las zonas de sujeción respecto a su centro, se obtiene M56 Y M57, por ende, se puede calcular la posición de la pieza de las zonas de sujeción con respecto al manipulador maestro como se muestra a continuación

$${}^1_6M = {}^1_5M * {}^5_6M \quad (15)$$

$${}^1_7M = {}^1_5M * {}^5_7M \quad (16)$$

De la misma manera puedo conocer los sistemas de coordenadas que existen, pero en este caso del manipulador esclavo con respecto a la pieza a transportar

$${}^3_6M = {}^3_5M * {}^5_6M \quad (17)$$

$${}^3_7M = {}^3_5M * {}^5_7M \quad (18)$$

Ahora se dispuso de una zona llamada zona de preparación la cual se hace como prevención de que se estrellé el efector final con la pieza a transportar, el cual se representa como un sistema solidario con la misma orientación que los sistemas 6 y 7. Solo que por detrás de la dirección de sujeción de la pieza.

$${}^1_6M_{prep} = \begin{bmatrix} nx6 & ox6 & ax6 & px6 - x * ax6 \\ ny6 & oy6 & ay6 & py6 - x * ay6 \\ nz6 & oz6 & az6 & pz6 - x * az6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$${}^3_7M_{prep} = \begin{bmatrix} nx7 & ox7 & ax7 & px7 - x * ax7 \\ ny7 & oy7 & ay7 & py7 - x * ay7 \\ nz7 & oz7 & az7 & pz7 - x * az7 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

Donde x va hacer la distancia correspondiente a dicha zona de preparación y la tercera columna de la (NOAP), debido a que a que la orientación del eje z es a través de la cual va a sujetar la pieza de forma correcta.

Luego se realiza una trayectoria rectilínea (trayectoria continua) hasta los M16 y M37 reales de la pieza. A partir de aquí se toma la pieza y el sistema de referencia 6 y 7, son los mismo que los sistemas 2 y 4, por lo que los ángulos que se deben de tener en el manipulador para obtener dicha ubicación se pueden obtener a través del modelo cinemático inverso, mientras hace la trayectoria deseada.

#### 6.5.5.2 Diseño de las rutinas de trayectorias colaborativas

La rutina de movimiento colaborativo se ejecuta de la siguiente forma:

1. Se inicia con el encendido de los manipuladores y del software(HMI) luego se pone en el modo Robótica colaborativa.
2. Luego se selecciona por medio de la HMI el tipo de trayectoria colaborativa que se desea ejecutar.
3. Se procede a seleccionar las opciones con las cuales cuenta la ventana colaborativa como (crear trayectoria, ejecutar animación, ejecutar en manipulador)
4. Después da la opción de crear la trayectoria colaborativa esta herramienta nos da las perspectivas del movimiento que se va a ejecutar en los manipuladores seguida de unas series de puntos plateados.
5. Luego tiene como opción de ejecutar la animación de los manipuladores ejerciendo dicha trayectoria colaborativa brevemente seleccionada.
6. Ahora en la opción de ejecutar en el manipulador en el cual se le enviara la trayectoria deseada por el usuario, esta se le enviara a la tarjeta controladora la cual se encarga de dicha ejecución.
7. En este punto los valores articulares de ambos manipuladores se ajustan al valor inicial, es decir todas las articulaciones a 0 grados que es su posición inicial en el modo colaborativo.
8. Luego sigue una trayectoria llamada zona de preparación, el cual es una zona que se había mencionado con anterioridad en lo cual está por detrás de las zonas de sujeción de la pieza. para este desplazamiento se realiza una trayectoria coordinada por ser la de menor tiempo de ciclo y que no esfuerza los servomotores.
9. se procede a desplazarse a los puntos de sujeción esto se logra a través de una trayectoria rectilínea (trayectoria continua) horizontal hasta que los efectores finales lleguen a los puntos de sujeción preestablecidos.

10. Una vez sujeta la pieza y de acuerdo a lo elegido por medio de la HMI, se puede tener diferentes tipos de trayectorias colaborativa:

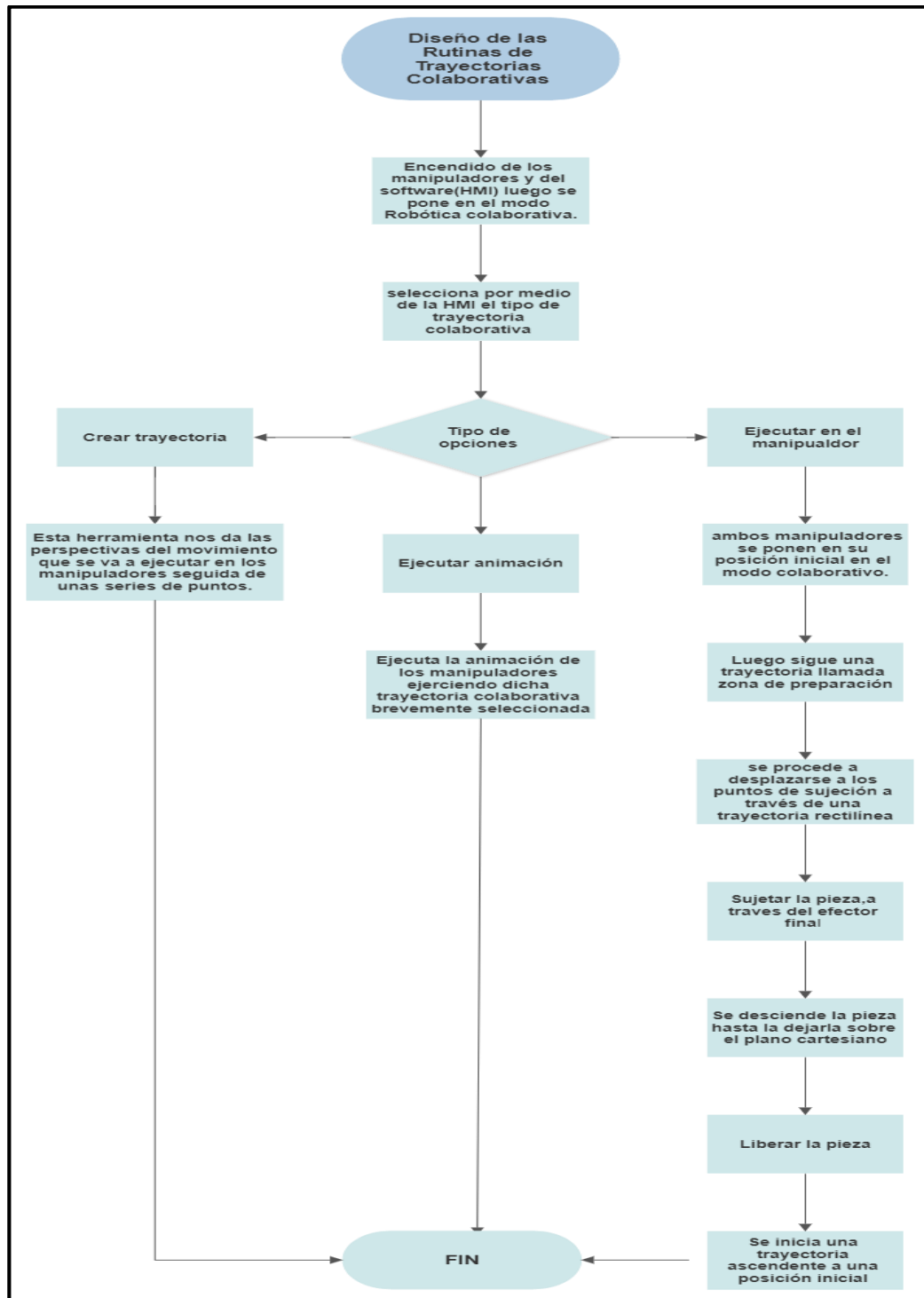
- Translación en Y (+) y Z (+)
- Translación en Y (-) y Z (+)
- Translación en Y (+) y Z (+), Rotación en Z
- Translación en Y (-) y Z (+), Rotación en Z
- Translación Z (+), Rotación en Z
- Trayectoria Cuadrada
- Trayectoria Circular

11. Luego se desciende la pieza hasta la dejarla sobre el plano cartesiano(base).

12. Una vez terminada la trayectoria colaborativa, se libera la pieza.

13. Se inicia una trayectoria ascendente llevando los manipuladores a una posición de reposo inicial que es cuando su articulación está en cero grados.

A continuación, se procede a dejar un esquema (Diagrama de flujo Figura 85) de cómo quedaría el diseño de las rutinas de robótica colaborativa explicada anteriormente, pero de más manera más resumida y precisa.



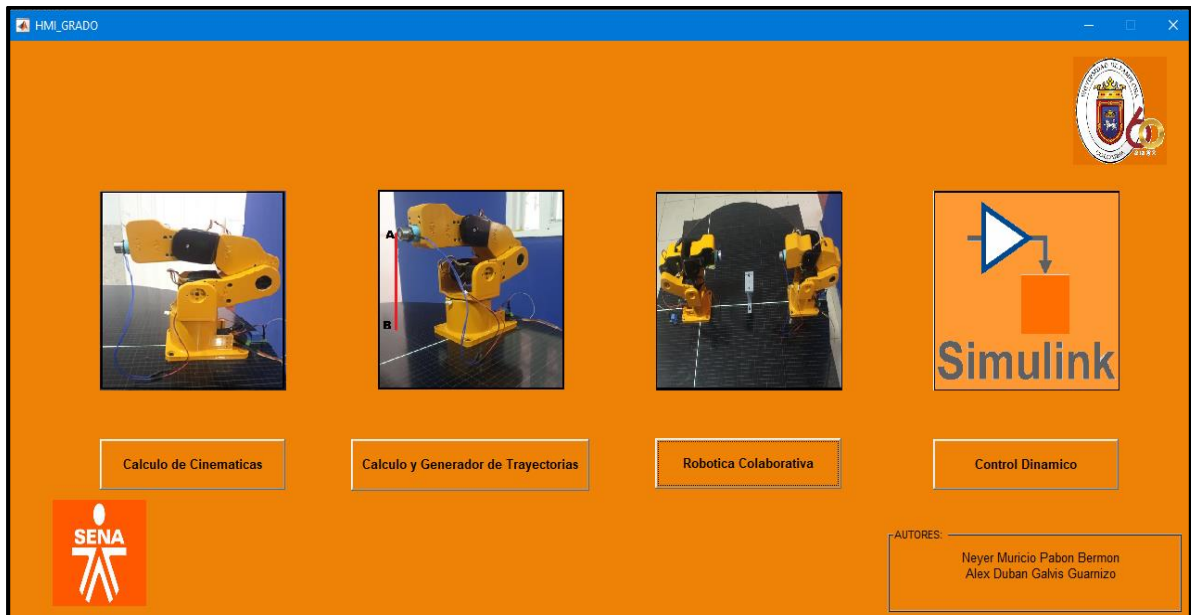
**Figura 85. Diagrama de flujo diseño de rutinas colaborativas**

## 6.6 Diseño de la Estructura e Interfaz de control (HMI)

De acuerdo a lo propuesto en el desarrollo de este proyecto se debe desarrollar una aplicación que permita la ejecución de los temas expuestos con anterioridad en este capítulo entre los cuales son:

- Cinemática Directa e Inversa de los manipuladores
- Control cinemático en lo cual se conforma de:
  - Generación de Trayectorias (eje a eje, simultanea, coordinada, continua)
- Control cinemático colaborativo
- Control dinámico mono-articular(simulink)

Para la ejecución de la aplicación se diseñó una ventana principal (Tipo menú), en lo cual se debe de seleccionar los tipos de modos de la aplicación y una vez seleccionada transporta al usuario a otras ventanas de acuerdo a la opción seleccionada como se observa en la Figura 86.



**Figura 86. Ventana Principal de la HMI**

En las cuales se puede observar las opciones de la aplicación, las cuales me proporcionan ventanas adicionales con diferentes funciones y características las cuales fueron:

- Cálculo de Cinemáticas
- Cálculo y Generador de Trayectorias
- Robótica Colaborativa
- Control Dinámico

#### 6.5.6 Cálculo de cinemáticas

La primera opción (Cálculo de cinemáticas) de la ventana principal se encargará de los siguientes casos:

- Cálculo de Cinemática directa.
- Cálculo de Cinemática Inversa.
- Visualización simulada del manipulador en una posición determinada por el usuario.
- Ejecutar en el manipulador dicha posición determinada.

Para las diferentes opciones se agregaron los campos en el cual el usuario debe de ingresar:

Para el primer caso los valores articulares como se muestra en la Figura 87.

**Cinemática Directa**

|    |                                |    |                                |
|----|--------------------------------|----|--------------------------------|
| q1 | <input type="text" value="0"/> | q4 | <input type="text" value="0"/> |
| q2 | <input type="text" value="0"/> | q5 | <input type="text" value="0"/> |
| q3 | <input type="text" value="0"/> | q6 | <input type="text" value="0"/> |

**Calcular MTH**

**Figura 87. Calculo de la Cinemática Directa**

Para el segundo caso se debe de ingresar una la localización final para la ubicación del efector final como se observa en la Figura 88, en este apartado como en el anterior se deben de tener en cuenta las restricciones morfológicas de los manipuladores, así como del ingreso de valores reales.

**MTH**

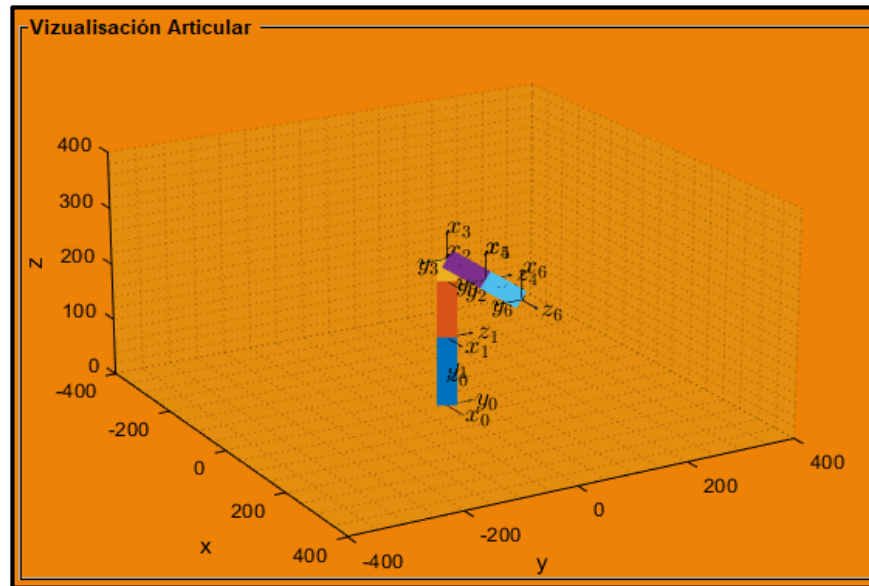
**Ingrese MTH final**

| N | O | A | P |
|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 |

**Calcular Cinematica Inversa**

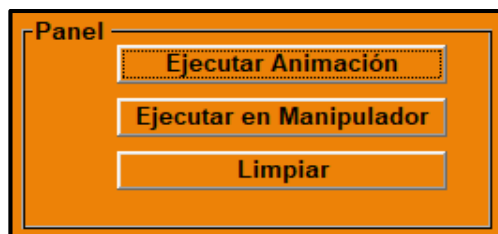
**Figura 88. Calculo de la Cinemática Inversa**

Para el caso 3 se implementó la visualización articular donde por medio de código interno de programación de la HMI, plotea el manipulador en una posición determinada por el usuario ingresada en el caso 1 y 2 como se puede ver en la Figura 89.



**Figura 89. Visualización Articular del Manipulador**

En el caso 4, en la venta se cuenta con la opción de un botón (Ejecutar en el manipulador) como se observa en la Figura 90, en lo cual este se encarga de enviar a la tarjeta controladora dichos parámetros ingresados por el usuario para posicionar el manipulador(real) y así ver su dinámica de posicionamiento



**Figura 90. Opción Ejecutar en el Manipulador**

A continuación, en la Figura 91 se muestra el panorama general en el cual está compuesta la ventana cálculo de cinemáticas, así como de sus opciones de diseño.

**Cinemática Directa**

q1  0 q4  0  
 q2  0 q5  0  
 q3  0 q6  0  
 Calcular MTH

**Restricciones**

q1 -165° -0° -165°  
 q2 -90° -0° -90°  
 q3 -90° -0° -60°  
 q4 -90° -0° -90°  
 q5 -90° -0° -90°  
 q6 -165° -0° -165°

**Cinemática Inversa**  
 Obtención de los valores articulares

q1  0 q4  0  
 q2  0 q5  0  
 q3  0 q6  0

**MTH**

Ingrese MTH final

| N | O  | A | P     |
|---|----|---|-------|
| 0 | 0  | 1 | 229.5 |
| 0 | -1 | 0 | 0     |
| 1 | 0  | 0 | 262   |
| 0 | 0  | 0 | 1     |

Calcular Cinemática Inversa

**Visualización Articular**

Panel

Ejecutar Animación  
 Ejecutar en Manipulador  
 Limpiar  
 Salir

**Figura 91. Ventana Cálculo de Cinemáticas**

### 6.5.7 Cálculo y generador de trayectorias

La segunda opción (Cálculo y Generador de Trayectorias) de la ventana principal se encargará de los siguientes casos:

- Ingreso de los valores articulares tanto iniciales como finales, así como la obtención de sus respectivas Mths.
- Creación de la trayectoria.
- Visualización simulada del manipulador de la trayectoria determinada por el usuario.
- Análisis de Trayectorias.
- Ejecutar en el manipulador dicha trayectoria determinada.

Para el caso 1 del ingreso de los valores articulares se dispuso de una opción en el cual el usuario debe de ingresar las posiciones iniciales( $q_i$ ) del manipulador y finales ( $q_f$ ) como se muestra en la Figura 92, se hace de esta manera debido a su gran comodidad ya que la ingresar localización inicial y final se vuelve más tedioso y se corre el riesgo de ingresar un valor erróneo provocándole accidentes al manipulador ya que solo recibe mths correctas correspondientes a su área de trabajo.

Ingrese los valores articulares

| $q_i$ |   | $q_f$ |   | Restricciones       |
|-------|---|-------|---|---------------------|
| q1    | 0 | q1    | 0 | q1 -165° -0°-- 165° |
| q2    | 0 | q2    | 0 | q2 -90° -0°--90°    |
| q3    | 0 | q3    | 0 | q3 -90° -0°--60°    |
| q4    | 0 | q4    | 0 | q4 -90° -0°-- 90°   |
| q5    | 0 | q5    | 0 | q5 -90° -0°-- 90°   |
| q6    | 0 | q6    | 0 | q6 -165° -0°--165°  |

Calcular MTHS

Limpiar

MTH Inicial

| N | O | A | P |
|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 |

MTH Final

| N | O | A | P |
|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 |

Figura 92. Ingreso de los valores articulares  $q_i$ ,  $q_f$  y sus MTHS correspondientes

en el caso 2 (Creación de la trayectoria) esta será calculada con los valores ingresados por el usuario en el caso anterior, con lo cual será visualizada por medio de una opción llamada “crear trayectoria” como se muestra en el ejemplo desarrollado en la Figura 93, cabe aclarar que las trayectorias cuentan con puntos intermedio por ende esta casilla llamada “número de puntos” debe de estar ocupada con el número de puntos dispuesto por el usuario como se puede observar en la Figura 94.

Ejemplo de creación de la trayectoria:

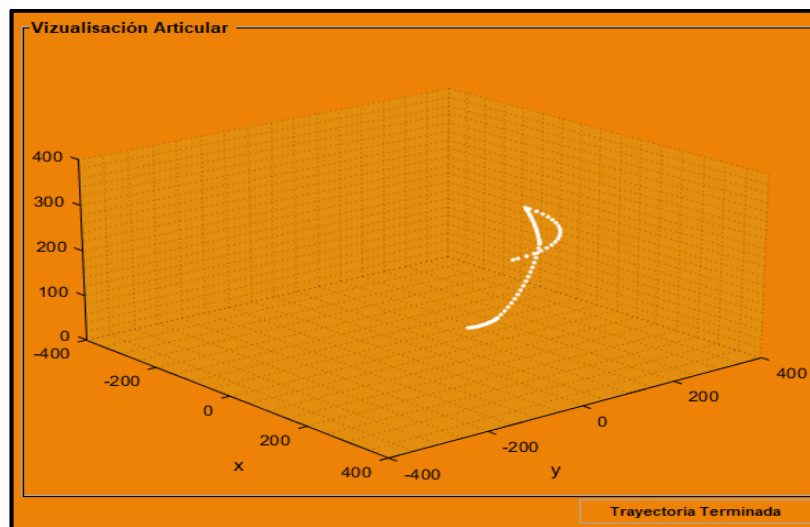
Para esto se utilizará los siguientes parámetros de entrada:

$$q_i = [0,0,0,0,0,0]$$

$$q_f = [90,20,45,10,30,60]$$

$$\text{Numero de puntos} = 20$$

y se utilizara el interpolador trapezoidal en la opción de tipo de trayectoria eje a eje para una mejor visualización de cada movimiento de las articulaciones.



**Figura 93. Creación de la trayectoria eje a eje por trapezoidal**

Numero de Puntos

20

Crear Trayectoria

Figura 94. Opcion Creación de la trayectoria junto con el número de puntos

Para el caso 3, se implementó la visualización simulada del manipulador, donde por medio de código interno de programación de la HMI, ingresada en el caso 1 y 2 de la trayectoria determinada por el usuario se plotea la trayectoria en el manipulador.

Continuando con el ejemplo anterior se pueden observar en las Figura 95Figura 96, como parte desde su posición inicial ( $q_i$ ) hasta su posición final ( $q_f$ ), predefinidas con anterioridad por el usuario.

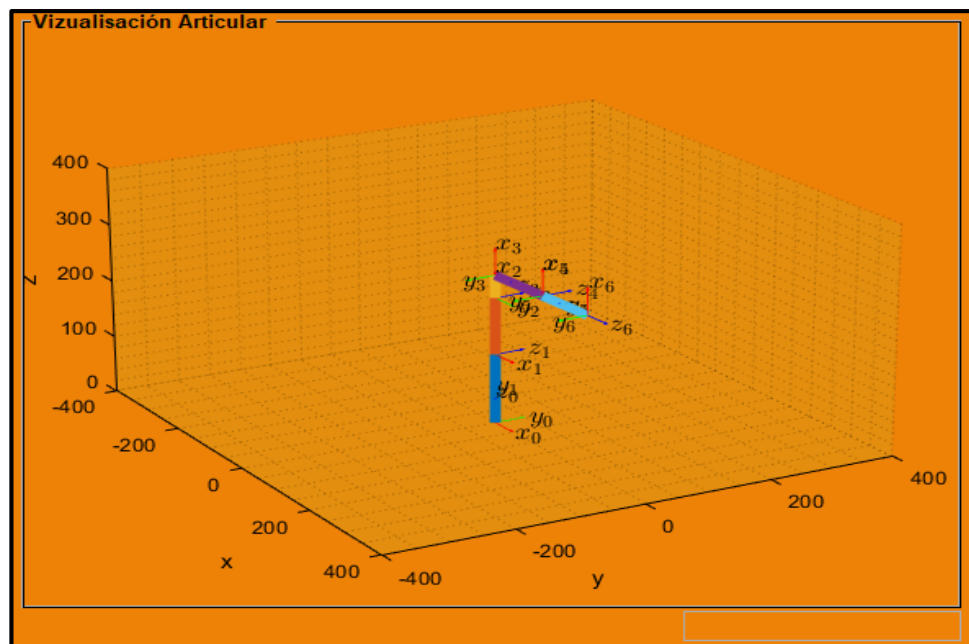
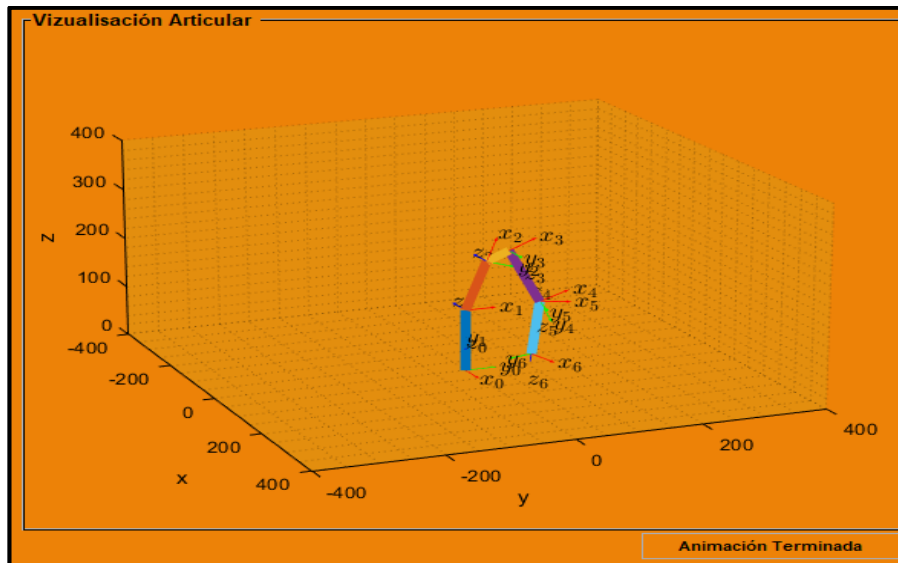
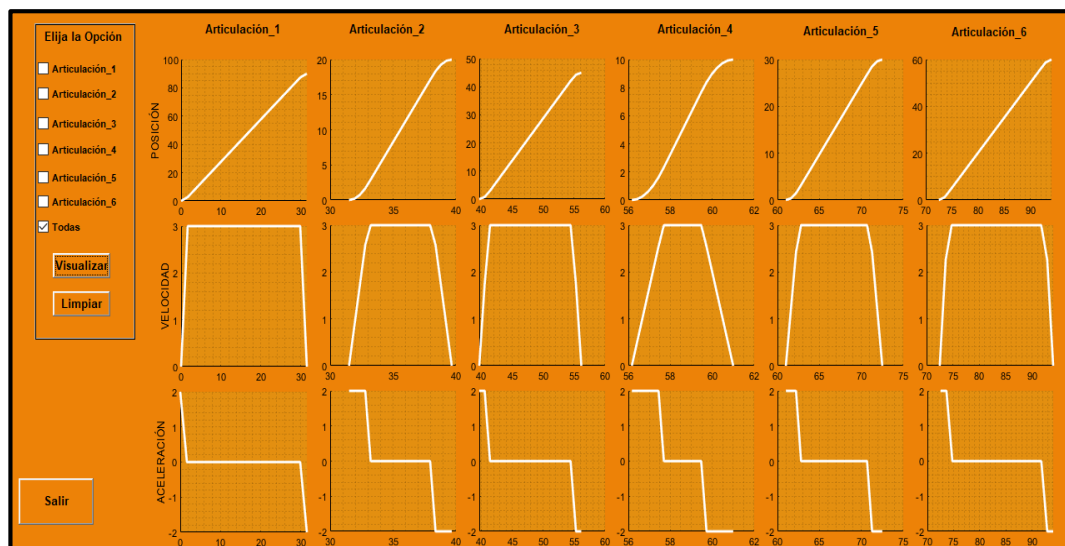


Figura 95. Visualización de Posición Inicial del Manipulador



**Figura 96. Visualización de Posición Final del Manipulador**

En el caso 4, en la venta se cuenta con la opción de un botón (Análisis de Trayectoria), en el cual me creara una ventana auxiliar donde se puede visualizar y analizar las articulaciones tanto la posición, velocidad y aceleración de estas mismas como se observa en la Figura 97, donde se puede visualizar y analizar articulación por articulación o la opción de todas.



**Figura 97. Visualización y Análisis Articular**

*"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"*

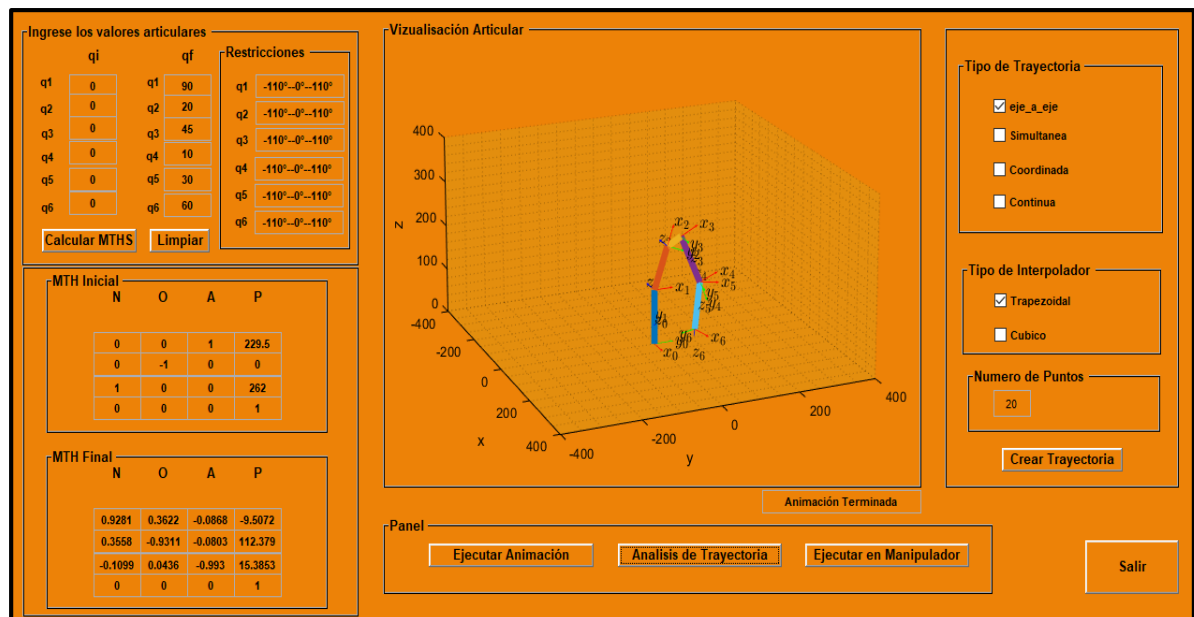
Universidad de Pamplona  
 Pamplona - Norte de Santander - Colombia  
 Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750

Para el caso 5, en la venta se cuenta con la opción de un botón (Ejecutar en el manipulador) como se observa en la Figura 98, en lo cual este se encarga de enviar a la tarjeta controladora dichos parámetros ingresados por el usuario para ejecutar la trayectoria en el manipulador(real) y así ver su ejecución.



**Figura 98. Opción Ejecutar Trayectoria en el Manipulador**

A continuación, en la Figura 99 se muestra el panorama general en el cual está compuesta la ventana Calculo y Generador de Trayectorias, así como de las demás opciones de diseño.



**Figura 99. ventana Calculo y Generador de Trayectorias**

### 6.5.8 Robótica colaborativa

La tercera opción (Robótica colaborativa) de la ventana principal se encargará de los siguientes casos:

- Seleccionar el tipo de trayectoria colaborativa y ubicación de la pieza.
- Creación de la trayectoria colaborativa.
- Visualización simulada del manipulador de la trayectoria colaborativa determinada por el usuario.
- Análisis de Trayectorias.
- Ejecutar en el manipulador dicha trayectoria colaborativa determinada.

Para las diferentes opciones de robótica colaborativa se agregaron los campos en el cual el usuario debe de ingresar, Para el primer caso (Seleccionar el tipo de trayectoria colaborativa como se puede ver en la Figura 101 y ubicación de la pieza como se muestra en la Figura 100) el usuario debe de asesorarse primero que la pieza a transportar este en la ubicación predispuesta en los algoritmos de control que dicha ubicación ya es fija y segundo debe de seleccionar el tipo de trayectoria colaborativa.



**Figura 100. Selección de la pieza ubicada**

**Tipo de Trayectoria Colaborativa**

☐ Translacion en Y(+)y Z(+)

☐ Translacion en Y(-) y Z(+)

☐ Translacion en Y(+)y Z(+),Rotacion en Z

☐ Translacion en Y(-) y Z(+),Rotacion en Z

☐ Translacion Z(+),Rotacion en Z

☐ Trayectoria Cuadrada

☐ Trayectoria Circular

**Figura 101. Tipo de Trayectoria Colaborativa**

en el caso 2 (Creación de la trayectoria colaborativa) esta será calculada con la trayectoria colaborativa seleccionada por el usuario en el caso anterior, con lo cual será visualizada por medio de una opción llamada “crear trayectoria” como se muestra en el ejemplo desarrollado en la Figura 102.

**Tipo de Trayectoria Colaborativa**

☐ Translacion en Y(+)y Z(+)

☐ Translacion en Y(-) y Z(+)

☐ Translacion en Y(+)y Z(+),Rotacion en Z

☐ Translacion en Y(-) y Z(+),Rotacion en Z

☐ Translacion Z(+),Rotacion en Z

☐ Trayectoria Cuadrada

☐ Trayectoria Circular

**Crear Trayectoria**

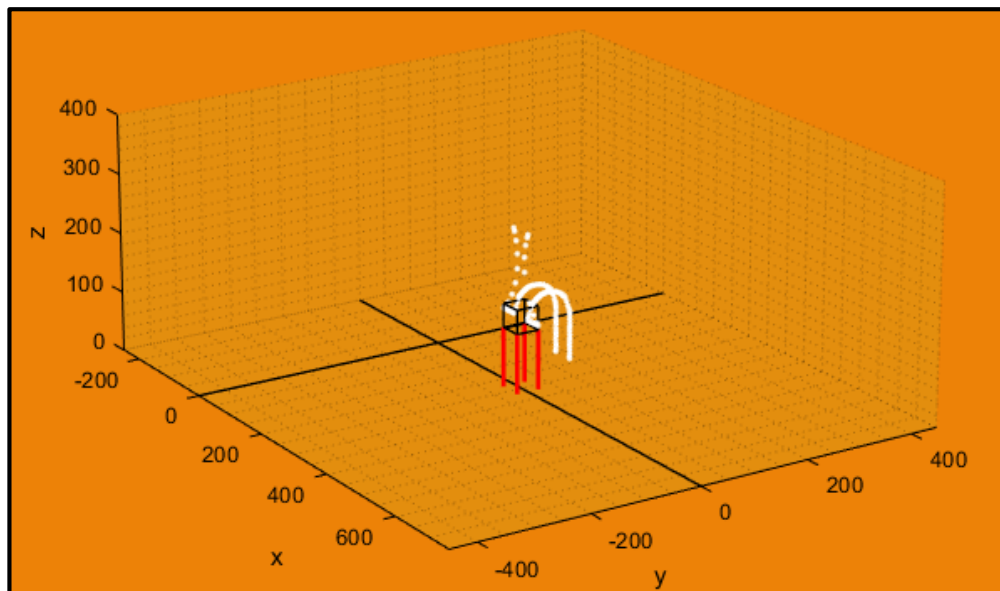
**Figura 102. Opción Crear Trayectoria Colaborativa**

## Ejemplo de creación de la trayectoria colaborativa

Para esto se utilizará los siguientes parámetros de entrada:

tipo de trayectoria colaborativa = **translación en el eje Y y Z positivo**

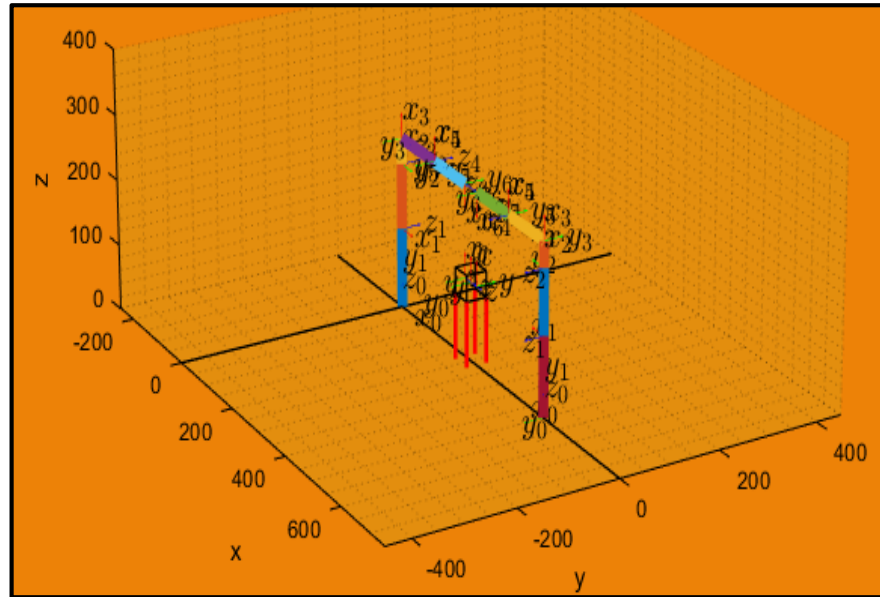
Pieza ubicada = **SI**



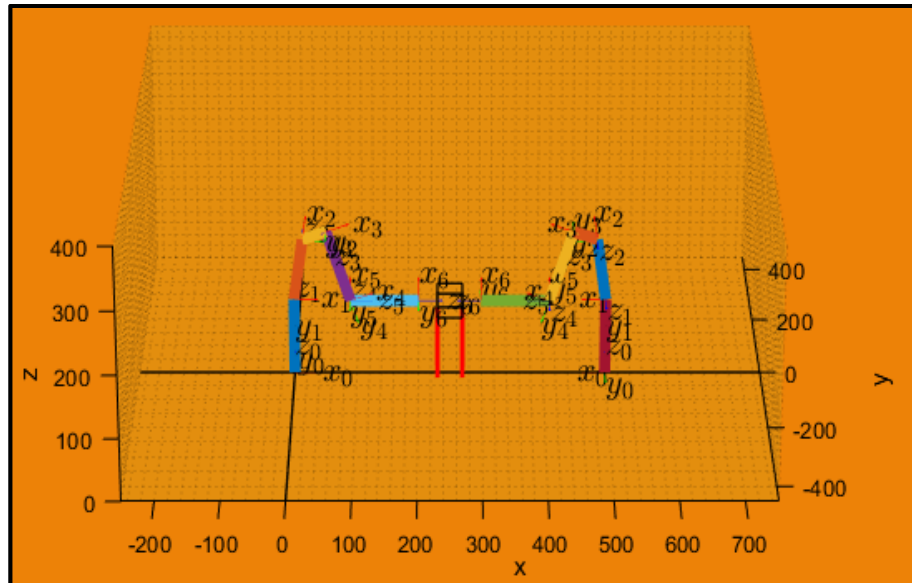
**Figura 103. Creación de la trayectoria colaborativa**

Para el caso 3, se implementó la visualización simulada del manipulador, donde por medio de código interno de programación de la HMI, se plotea la trayectoria colaborativa en el manipulador determinada por el usuario.

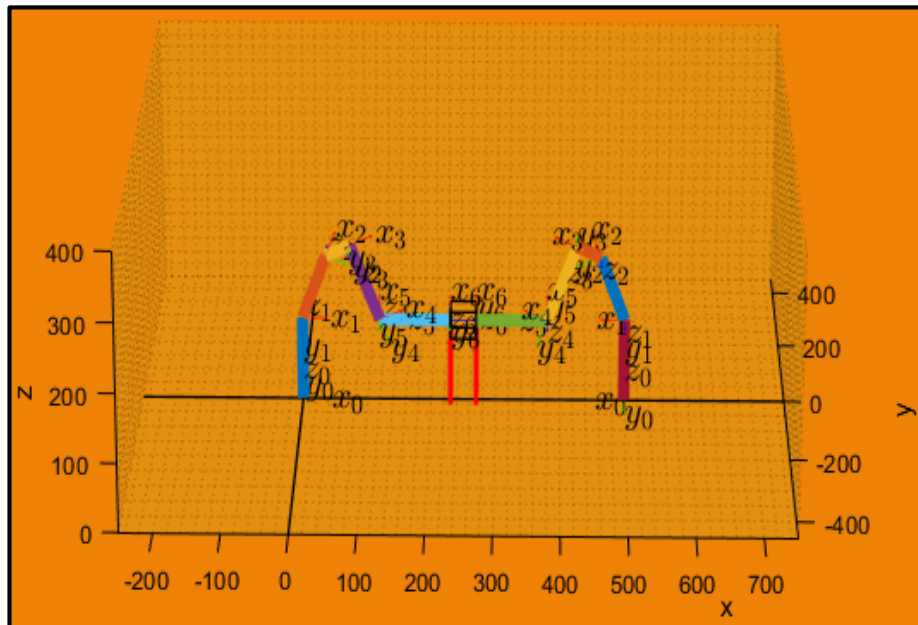
Continuando con el ejemplo anterior se pueden observar en las Figura 104(muestra la posición inicial de cada manipulador),Figura 105 (la zona de preparación), Figura 106(trayectoria continua para la sujeción de la pieza) y en la Figura 107(ejecución de la trayectoria colaborativa).



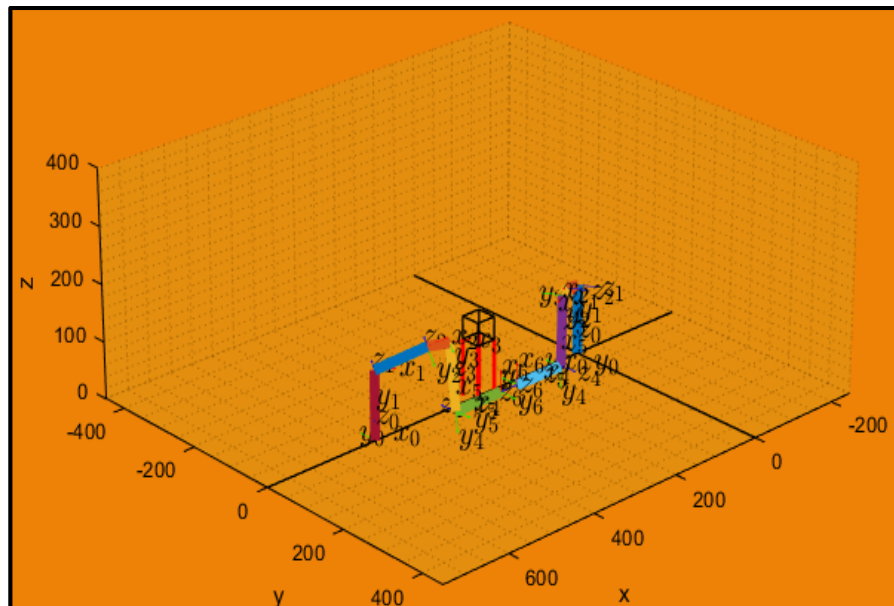
**Figura 104. Posición inicial de los manipuladores**



**Figura 105. Zona de preparación de los manipuladores**

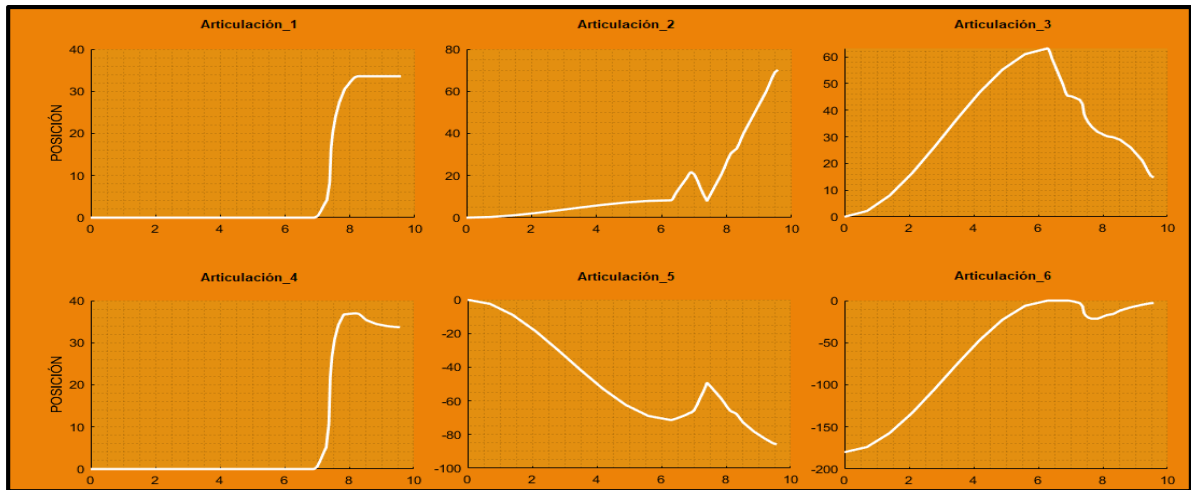


**Figura 106. Sujeción de la pieza**



**Figura 107. Ejecución de la trayectoria colaborativa**

En el caso 4, en la ventana se cuenta con la opción de un botón (Análisis de Trayectoria Figura 108), en el cual se creará una ventana auxiliar donde se puede visualizar y analizar las posiciones de las articulaciones generadas a partir de la trayectoria colaborativa.



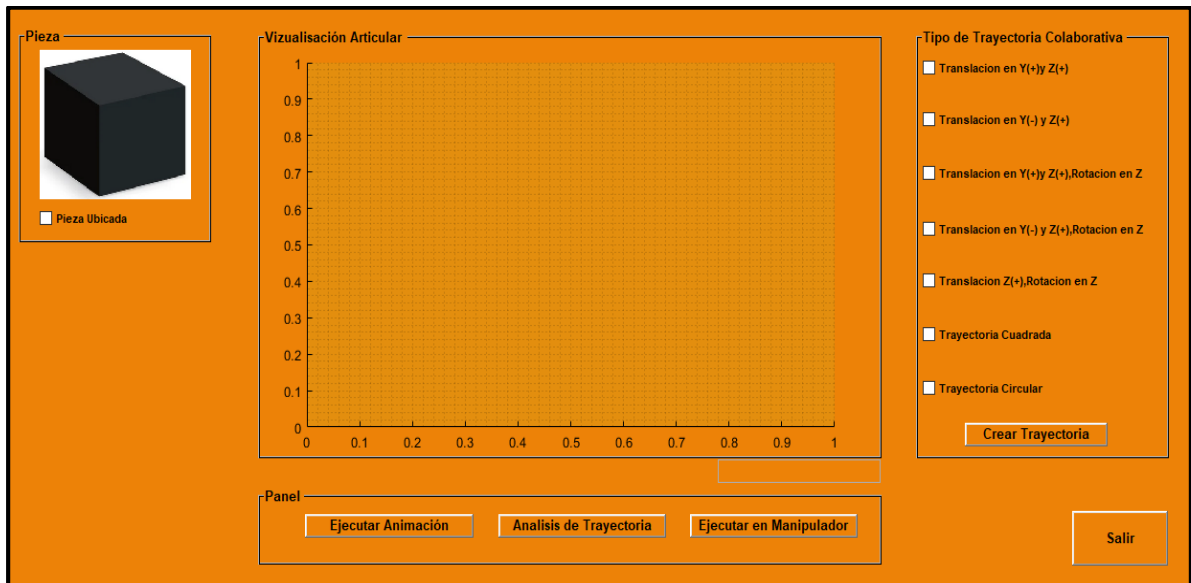
**Figura 108. Análisis de trayectoria colaborativa**

Para el caso 5, en la ventana se cuenta con la opción de un botón (Ejecutar en el manipulador) como se observa en la Figura 109, en lo cual este se encarga de enviar a la tarjeta controladora dichos parámetros ingresados por el usuario para ejecutar la trayectoria colaborativa en los manipuladores (real) y así ver su ejecución.



**Figura 109. Opción Ejecutar trayectoria colaborativa en los manipuladores**

A continuación, en la Figura 110, se muestra el panorama general en el cual está compuesta la ventana Robótica Colaborativa, así como de las demás opciones de diseño.



**Figura 110. Ventana Robótica Colaborativa**

## **7 VALIDAR LA ARQUITECTURA DE CONTROL CINEMÁTICO Y DINÁMICO PROPUESTO, A TRAVÉS DE LA HMI GARANTIZANDO EL FUNCIONAMIENTO DEL ROBOT COLABORATIVO.**

En este capítulo se realizará la validación del funcionamiento de la HMI dándole el direccionamiento a los manipuladores permitiéndome evaluar los siguientes puntos:

- Cinemática directa
- Cinemática Inversa
- Generación de trayectoria eje a eje
- Generación de trayectoria simultanea
- Generación de trayectoria coordinada
- Generación de trayectoria continua
- Generación de trayectorias colaborativas
- Control dinámico (mono-articular)

### **7.1 Validación de cinemática directa**

En aplicación desarrollada para el uso del banco de robótica ofrece la posibilidad de realizar la cinemática directa, en la cual se le ingresa los valores articulares como se muestra en la Figura 111 , donde se desee posicionar el manipulador.

Para esto se procede a realizar una prueba completa tanto desde la interfaz gráfica como en la ejecución en el manipulador, en esta prueba se ingresan los valores articulares (en grados) para  $q_1$ ,  $q_2$ ,  $q_3$ ,  $q_4$ ,  $q_5$  y  $q_6$ , y se verifica su correcto cálculo en dichos puntos. Lo ideal es hacer una prueba al menos por cada cuadrante para corroborar la efectividad de la cinemática directa en los cuatro posibles cuadrantes del plano cartesiano, pero para no congestionar (fotos, recortes de animación, etc.) la información que se quiere brindar se procede solo hacer una prueba, más sin embargo por parte de los autores en el desarrollo del proyecto, dichas pruebas fueron realizadas constatando su completa funcionalidad.

#### **Prueba:**

Se ingresaran los siguientes valores articulares en el Manipulador a  $(-25^\circ, 20^\circ, 40^\circ, 0^\circ, -50^\circ, 90^\circ)$  , como se muestra en la Figura 111, y el efector final ubicado en el cuarto Cuadrante.

**Cinemática Directa**

|    |     |    |     |
|----|-----|----|-----|
| q1 | -25 | q4 | 0   |
| q2 | 20  | q5 | -50 |
| q3 | 40  | q6 | 90  |

**Calcular MTH**

**Restricciones**

|    |                  |
|----|------------------|
| q1 | -165° -0°-- 165° |
| q2 | -90° -0°-- 90°   |
| q3 | -90° -0°-- 60°   |
| q4 | -90° -0°-- 90°   |
| q5 | -90° -0°-- 90°   |
| q6 | -165° -0°-- 165° |

**Figura 111. Validación de la cinemática directa (ingreso de valores articulares)**

Ingresado los valores articulares se procede con el cálculo de la MTH final que me representa la orientación y posición del efector final como se muestra en la Figura 112.

**MTH**

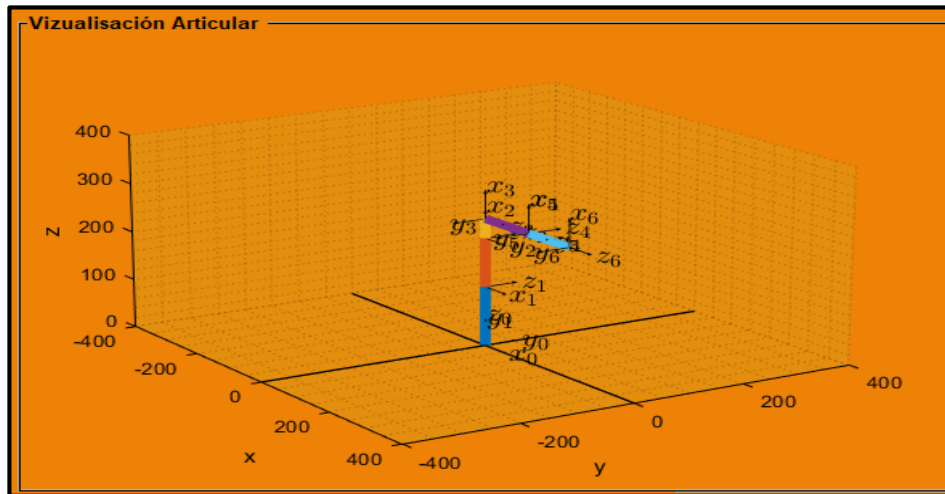
**Ingrese MTH final**

| N       | O       | A       | P        |
|---------|---------|---------|----------|
| -0.4226 | -0.1574 | 0.8925  | 214.505  |
| -0.9063 | 0.0734  | -0.4162 | -100.025 |
| 0       | -0.9848 | -0.1736 | 113.032  |
| 0       | 0       | 0       | 1        |

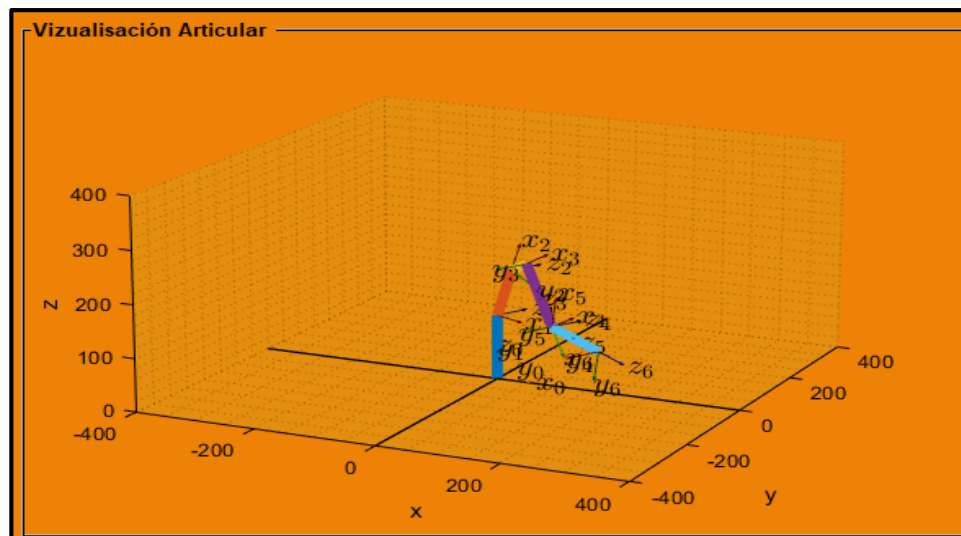
**Calcular Cinematica Inversa**

**Figura 112. Obtención de la MTH final**

Una vez finalizado el cálculo de la MTH final, se realiza la respectiva ejecución de la animación el cual brinda una perspectiva de cómo debería de quedar el manipulador una vez realizado la ejecución real, como se muestra en la Figura 113-Figura 114.



**Figura 113. Localización inicial del manipulador (animación C-D)**



**Figura 114. Localización final del manipulador (animación C-D)**

con la perspectiva de cómo quedaría el manipulador se realiza la ejecución en el manipulador, en el cual basándose del vector de posición de la MTH final calculada se procede a tomar las medidas reales una vez ejecutada en el manipulador, esto se hace como medio de verificación dándonos la validación de la cinemática directa como se observa en la Figura 115-Figura 116.

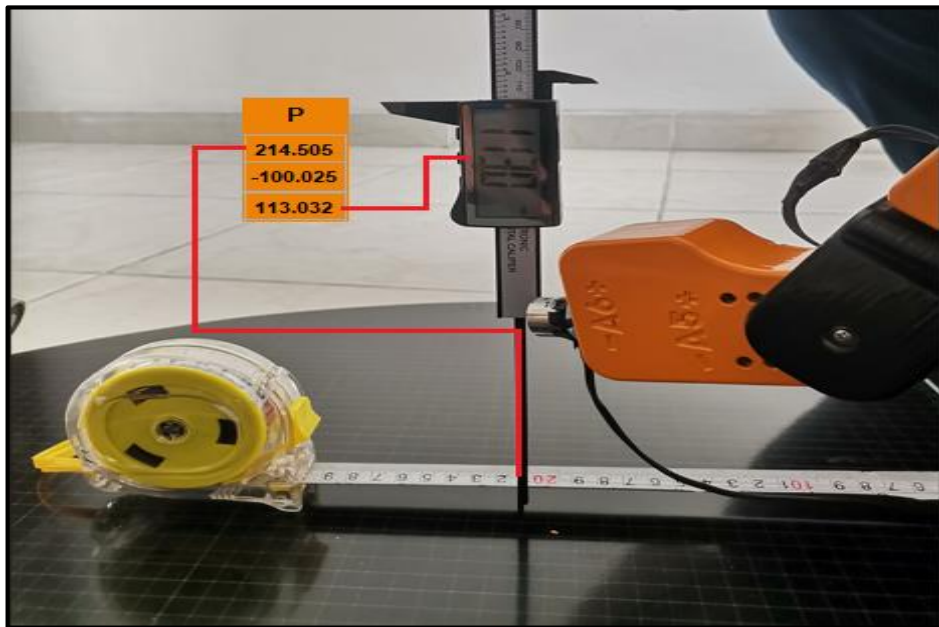


Figura 115. Validación de la Cinemática Directa (manipulador real en X y Z)

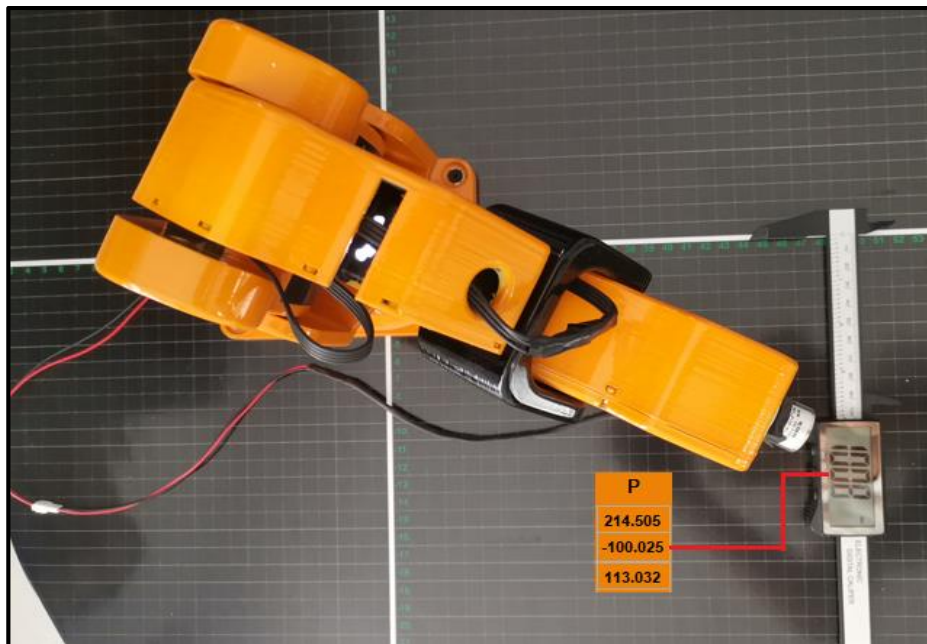


Figura 116. Validación de la Cinemática Directa (manipulador real en Y)

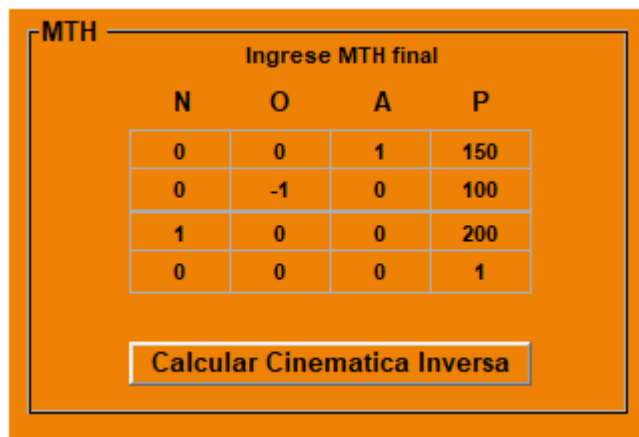
## 7.2 Validación de Cinemática Inversa

Al igual que en la validación de la cinemática directa, la aplicación desarrollada cuenta con la posibilidad de realizar la cinemática inversa, en la cual se le ingresa los valores de la MTH final como se muestra en la Figura 117, donde se desea localizar el manipulador.

Para esto se realiza una prueba completa tanto desde la interfaz gráfica como en la ejecución en el manipulador, en esta prueba se ingresan los valores de la MTH final para obtener los ángulos de  $q_1$ ,  $q_2$ ,  $q_3$ ,  $q_4$ ,  $q_5$  y  $q_6$ . Lo ideal es hacer una prueba al menos por cada cuadrante para corroborar la efectividad de la cinemática inversa en los cuatro posibles cuadrantes del plano cartesiano, pero para no congestionar (fotos, recortes de animación, etc.) la información que se quiere brindar se procede solo hacer una prueba, más sin embargo por parte de los autores en el desarrollo del proyecto, dichas pruebas fueron realizadas constatando su completa funcionalidad.

### Prueba:

Se ingresarán los siguientes valores de la MTH final en el cual consta de la NOA que es la orientación del efector final y P que es la posición de dicho efector. efector final ubicado en el primer Cuadrante.



| Ingreso MTH final |    |   |     |
|-------------------|----|---|-----|
| N                 | O  | A | P   |
| 0                 | 0  | 1 | 150 |
| 0                 | -1 | 0 | 100 |
| 1                 | 0  | 0 | 200 |
| 0                 | 0  | 0 | 1   |

**Calcular Cinematica Inversa**

**Figura 117. Validación de la Cinemática Inversa (ingreso MTH final)**

Ingresado los valores de la MTH final se procede con el cálculo de los ángulos de  $q_1$ ,  $q_2$ ,  $q_3$ ,  $q_4$ ,  $q_5$ ,  $q_6$  que me representa la orientación y posición del efector final como se muestra en la Figura 118.

| Cinemática Inversa                   |         |       |          |  |  |
|--------------------------------------|---------|-------|----------|--|--|
| Obtención de los valores articulares |         |       |          |  |  |
| $q_1$                                | 67.9521 | $q_4$ | 79.3076  |  |  |
| $q_2$                                | -9.7409 | $q_5$ | -70.6043 |  |  |
| $q_3$                                | 37.5295 | $q_6$ | -60.379  |  |  |

Figura 118. Obtención de los ángulos a través de la C-I

Una vez hecho el cálculo de la cinemática inversa se procede a realizar la respectiva ejecución de animación el cual nos brinda una perspectiva de cómo nos debería de quedar el manipulador una vez realizado la ejecución real, como se muestra en la Figura 119-Figura 120.

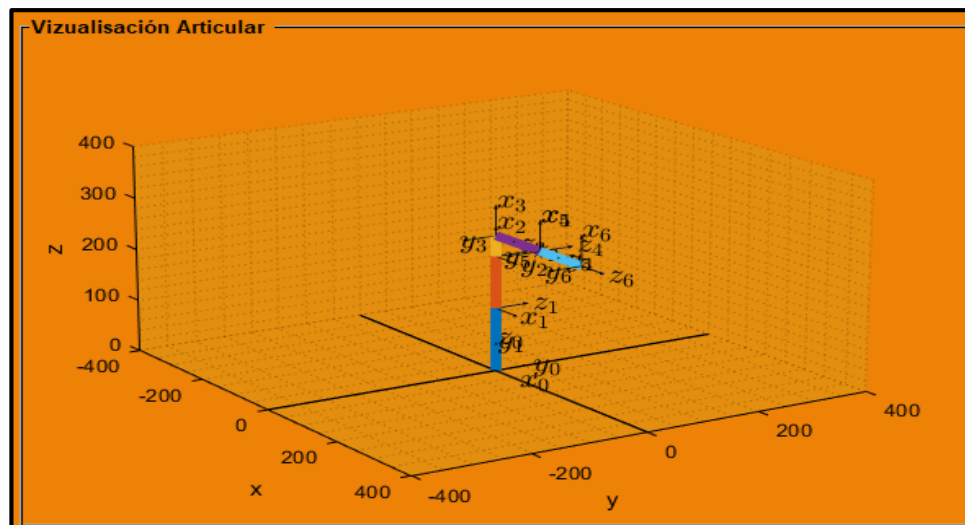
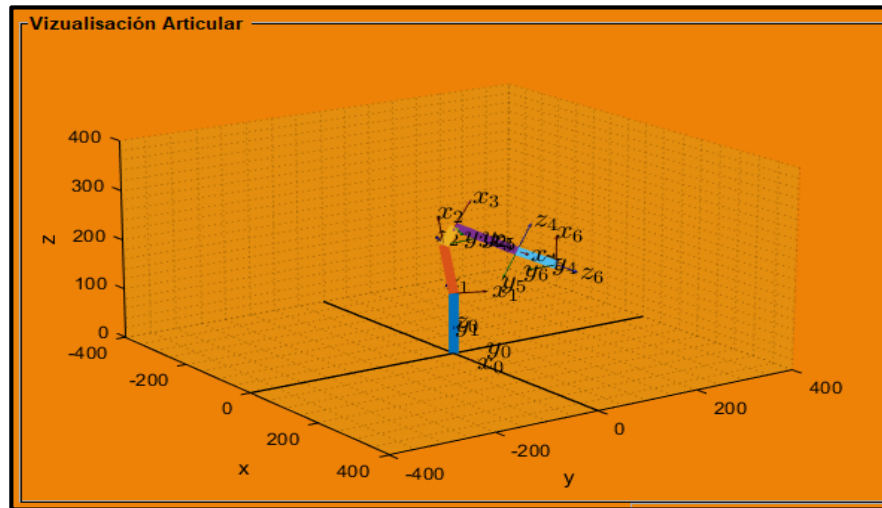
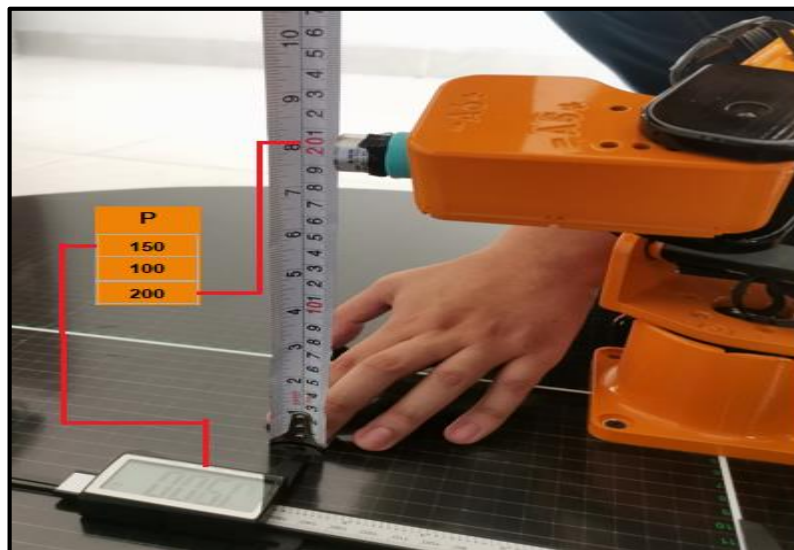


Figura 119. Posición inicial del manipulador (animación C-I)



**Figura 120. Posición final del manipulador (animación C-I)**

Teniendo la perspectiva de cómo quedaría el manipulador se procede hacer la realización de la ejecución en el manipulador, en el cual basándose del vector de posición de la MTH final ingresada se procede a tomar las medidas reales una vez ejecutada en el manipulador, esto se hace como medio de verificación dándonos la validación de la cinemática inversa como se observa en la Figura 121 .



**Figura 121. Validación de la Cinemática Inversa (manipulador real)**

Para las validaciones del control cinemático se tomará en cuenta diferentes pruebas, pero con las mismas condiciones iniciales y finales, esto se hace para demostrar los diferentes comportamientos articulares que se llevan con la ejecución de las distintas trayectorias e interpoladores propuestas en el capítulo anterior, menos en la trayectoria continua con el interpolador cubico.

Condiciones iniciales y finales:

$$q_i = [ 0, -10, 0, -20, 25, 30 ]$$

$$q_f = [ 45, 20, 30, 40, 50, 60 ]$$

### 7.3 Validación del Control Cinemático (Interpolador Trapezoidal)

#### 7.3.1 Generación de Trayectoria Eje a Eje

Para la validación de la siguiente trayectoria se toman dos puntos, iniciales y finales por cada articulación como se muestra en la Figura 122 .

**Ingrese los valores articulares**

| q <sub>i</sub> |     | q <sub>f</sub> |    | Restricciones                                                                   |
|----------------|-----|----------------|----|---------------------------------------------------------------------------------|
| q1             | 0   | q1             | 45 | q1 <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">-165° -0°-- 165°</span> |
| q2             | -10 | q2             | 20 | q2 <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">-90° -0°--90°</span>    |
| q3             | 0   | q3             | 30 | q3 <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">-90° -0°--60°</span>    |
| q4             | -20 | q4             | 40 | q4 <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">-90° -0°-- 90°</span>   |
| q5             | 25  | q5             | 50 | q5 <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">-90° -0°-- 90°</span>   |
| q6             | 30  | q6             | 60 | q6 <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">-165° -0°--165°</span>  |

Calcular MTHS
Limpiar

Figura 122. Validación Trayectoria Eje a Eje (ingreso de valores q<sub>i</sub>, q<sub>f</sub>)

Luego se calculan las MTH finales tanto para las articulaciones iniciales como las finales, esto se hace para validar por medio del vector de posición de cada una de estas para tomar las respectivas medidas en el manipulador real como se muestra en la Figura 123.

| MTH Inicial |         |         |         |          |
|-------------|---------|---------|---------|----------|
|             | N       | O       | A       | P        |
|             | 0.2027  | -0.1856 | 0.9615  | 199.15   |
|             | -0.2014 | -0.9688 | -0.1445 | -15.8276 |
|             | 0.9583  | -0.1644 | -0.2337 | 255.119  |
|             | 0       | 0       | 0       | 1        |

| MTH Final |         |         |         |         |
|-----------|---------|---------|---------|---------|
|           | N       | O       | A       | P       |
|           | 0.6211  | -0.6888 | -0.3739 | 59.4528 |
|           | -0.6093 | -0.7244 | 0.3225  | 135.705 |
|           | -0.493  | 0.0275  | -0.8696 | 54.5335 |
|           | 0       | 0       | 0       | 1       |

**Figura 123. Validación Trayectoria Eje a Eje (MTH finales)**

posteriormente se establecen los parámetros iniciales como lo es la selección del tipo de trayectoria (Eje a Eje), el tipo de interpolador (Trapezoidal) y el número de puntos para la interpolación entre ellos como se observa en la Figura 124.

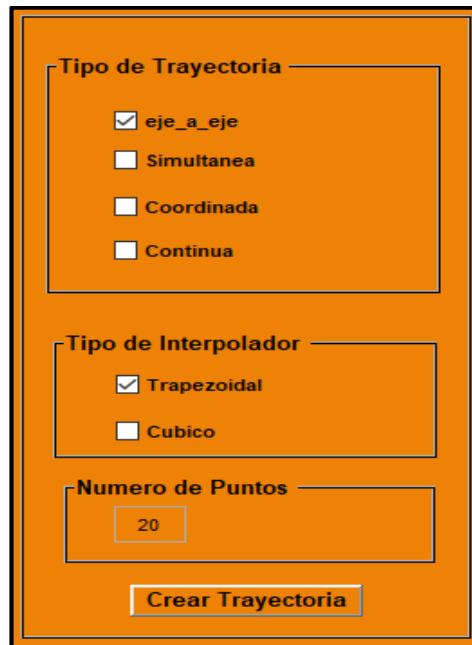


Figura 124. Validación Trayectoria Eje a Eje (selección de parámetros iniciales)

Realizado hasta este punto se procede en darle la opción “Crear Trayectoria” esta será calculada con los valores ingresados por el usuario anteriormente, lo cual me representa la trayectoria a seguir del manipulador como se mira en las Figura 125-Figura 126.

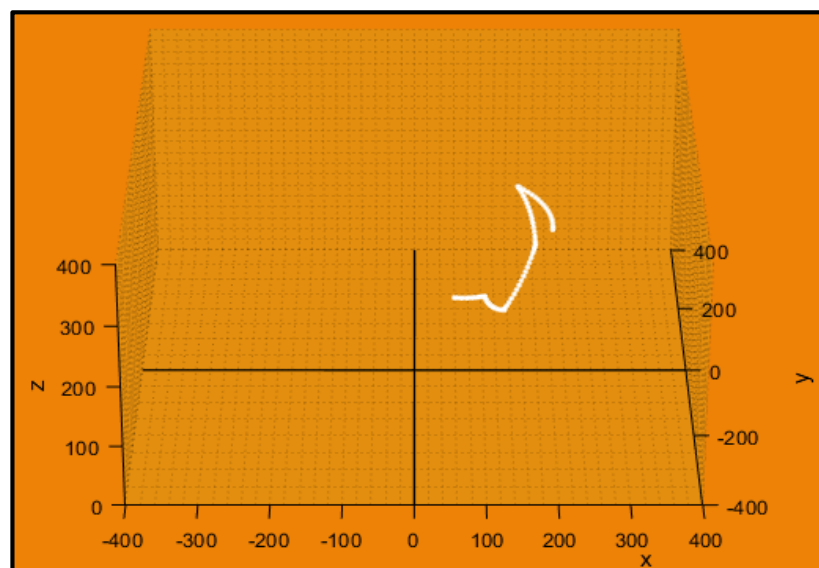
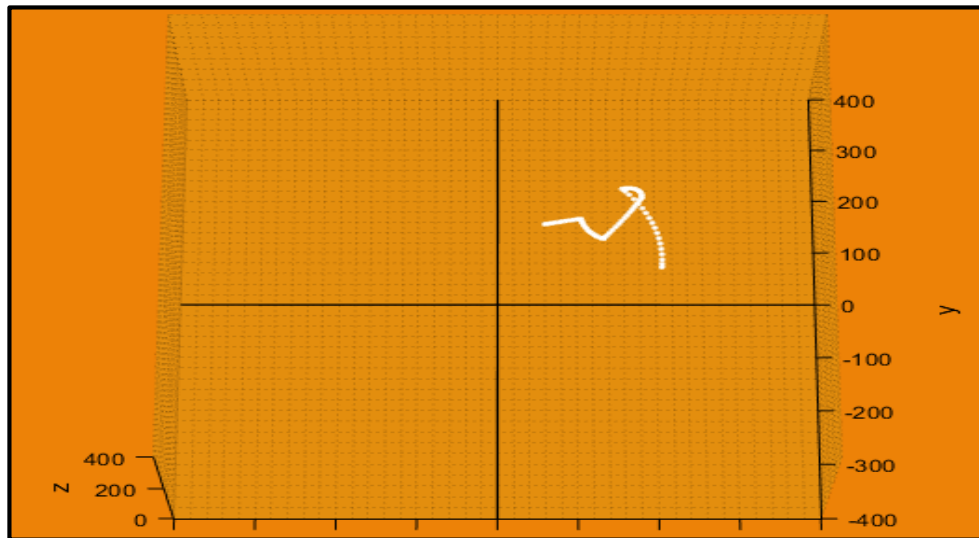
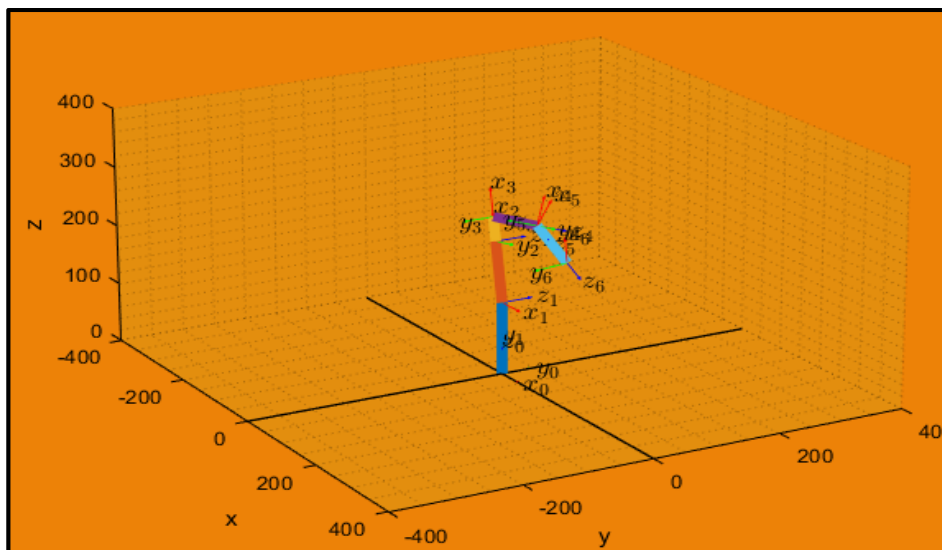


Figura 125. Validación Trayectoria Eje a Eje (crear trayectoria vista lateral)

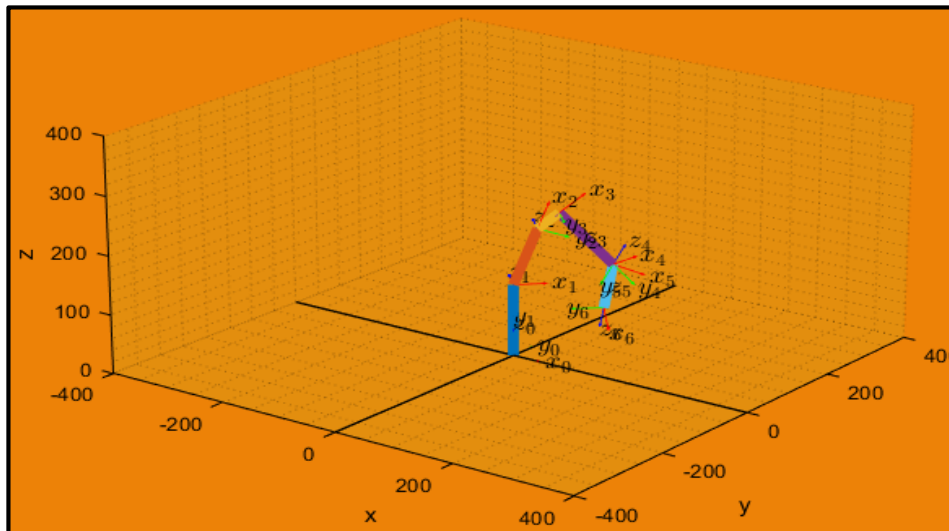


**Figura 126. Validación Trayectoria Eje a Eje (crear trayectoria vista superior)**

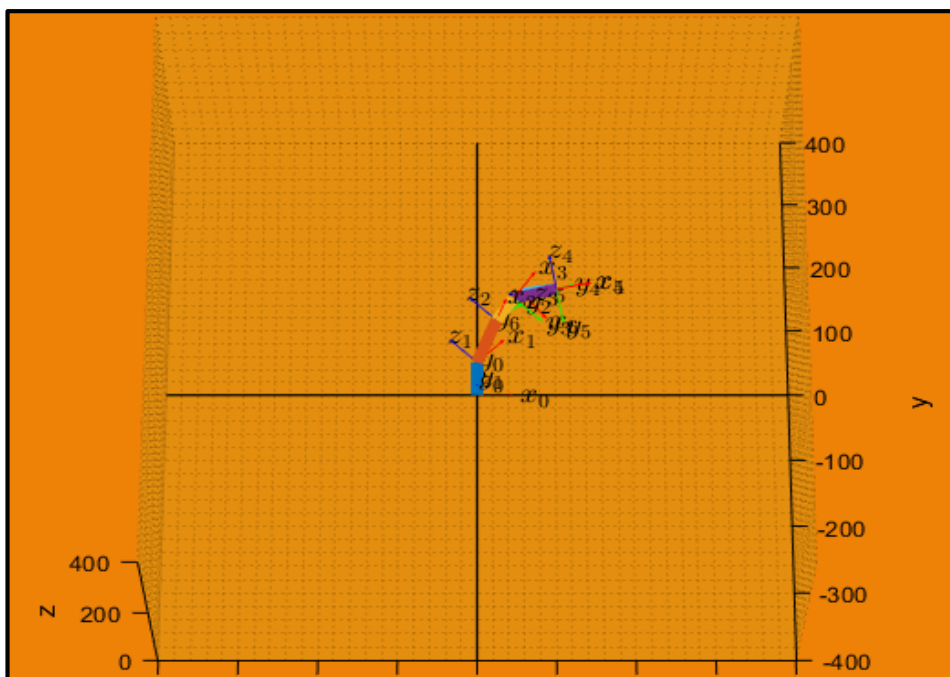
Realizada la creación de la trayectoria se ejecuta la animación, en el cual se observará de manera en 3d el movimiento del manipulador tanto de su posición inicial(Figura 127) y final(Figura 128-Figura 129), como se observa en el cuándo se requiera implementar esta trayectoria en el manipulador real.



**Figura 127. Validación Trayectoria Eje a Eje (posición inicial)**

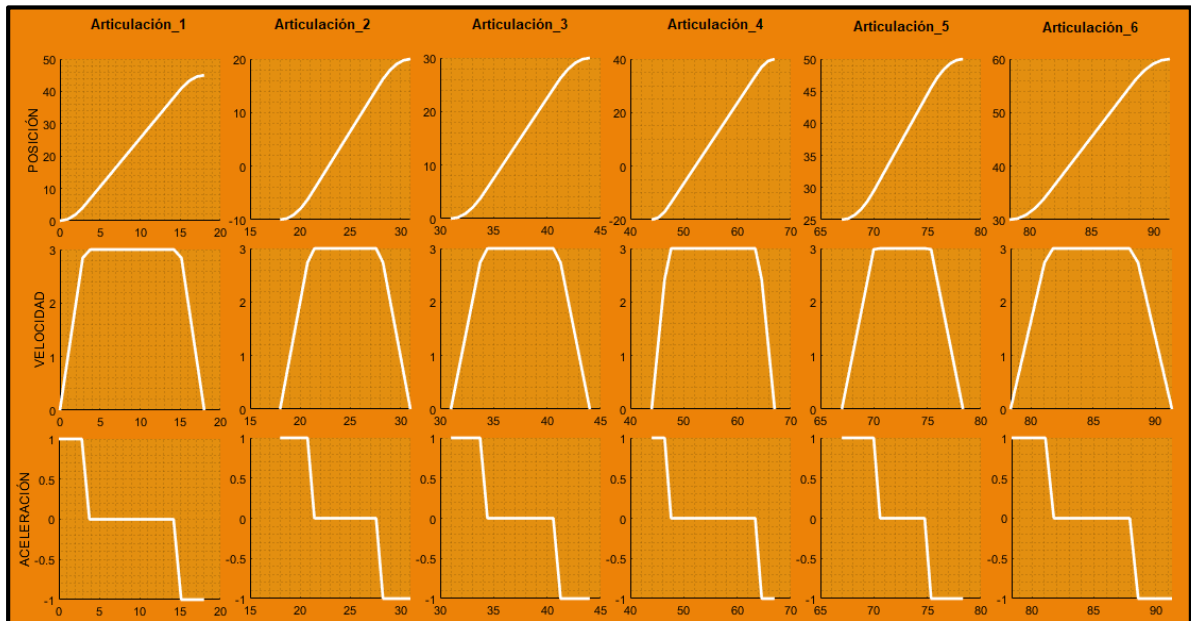


**Figura 128. Validación Trayectoria Eje a Eje (posición final-vista lateral)**



**Figura 129. Validación Trayectoria Eje a Eje (posición final-vista superior)**

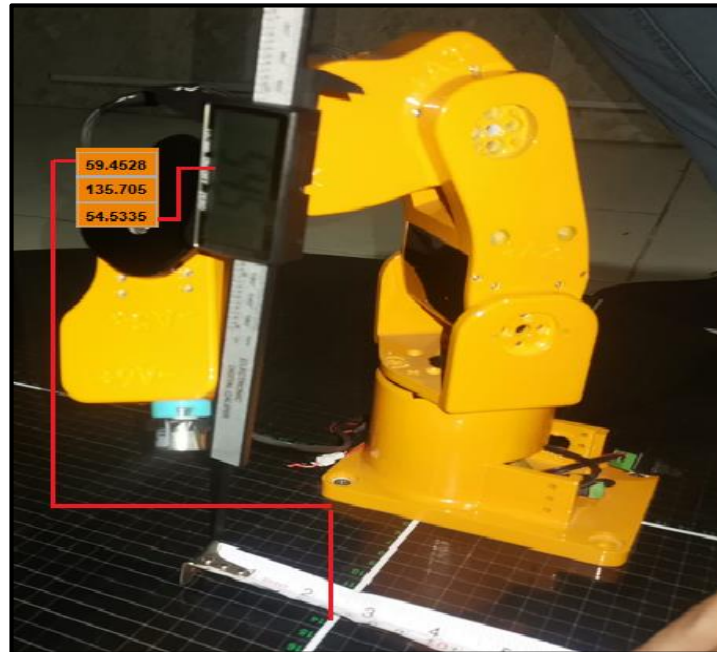
Posteriormente de la ejecución de la animación se procede a analizar y visualizar las gráficas de cada articulación tanto en la posición-velocidad-aceleración como se observa en la Figura 130, esto se hace con el fin de validar tanto los valores inicial y final de cada articulación, cuyos datos fueron ingresados por el usuario.



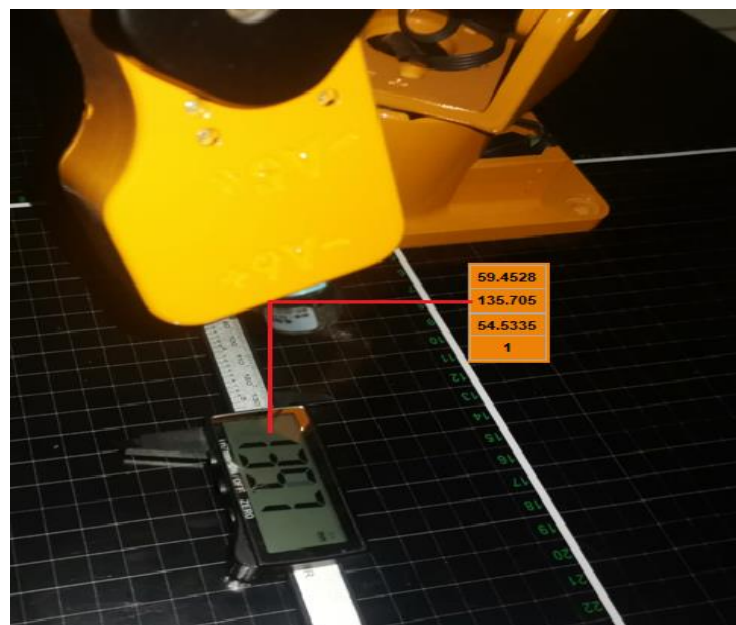
**Figura 130. Validación Trayectoria Eje a Eje (análisis de trayectoria)**

En lo cual si se compara las gráficas con los datos ingresados ( $q_i$ ,  $q_f$ ), vemos como los valores angulares tanto iniciales y finales cumple con lo predestinado por el usuario.

Teniendo la perspectiva de cómo quedaría el manipulador se procede hacer la realización de la ejecución en el manipulador, en el cual basándose del vector de posición de la MTH final calculada se procede a tomar las medidas reales una vez ejecutada en el manipulador, esto se hace como medio de verificación dándonos la validación de la generación de trayectoria eje a eje como se observa en la Figura 131-Figura 132.



**Figura 131. Validación de la Trayectoria Eje a Eje (manipulador real en X y Z)**



**Figura 132. Validación de la Trayectoria Eje a Eje (manipulador real en X y Z)**

### 7.3.2 Generación de trayectoria simultanea

Para la validación de la siguiente trayectoria simultanea se toman dos puntos, iniciales y finales por cada articulación como se muestra en la Figura 133.

**Ingrese los valores articulares**

| qi |     | qf |    | Restricciones       |
|----|-----|----|----|---------------------|
| q1 | 0   | q1 | 45 | q1 -165° -0°-- 165° |
| q2 | -10 | q2 | 20 | q2 -90° -0°--90°    |
| q3 | 0   | q3 | 30 | q3 -90° -0°--60°    |
| q4 | -20 | q4 | 40 | q4 -90° -0°-- 90°   |
| q5 | 25  | q5 | 50 | q5 -90° -0°-- 90°   |
| q6 | 30  | q6 | 60 | q6 -165° -0°--165°  |

Calcular MTHS    Limpiar

Figura 133. Validación Trayectoria Simultanea (ingreso de valores qi, qf)

Se calculan las MTH finales tanto para las articulaciones iniciales como las finales, esto se hace para luego validar por medio del vector de posición de cada una de estas para tomar las respectivas medidas en el manipulador real como se muestra en la Figura 134.

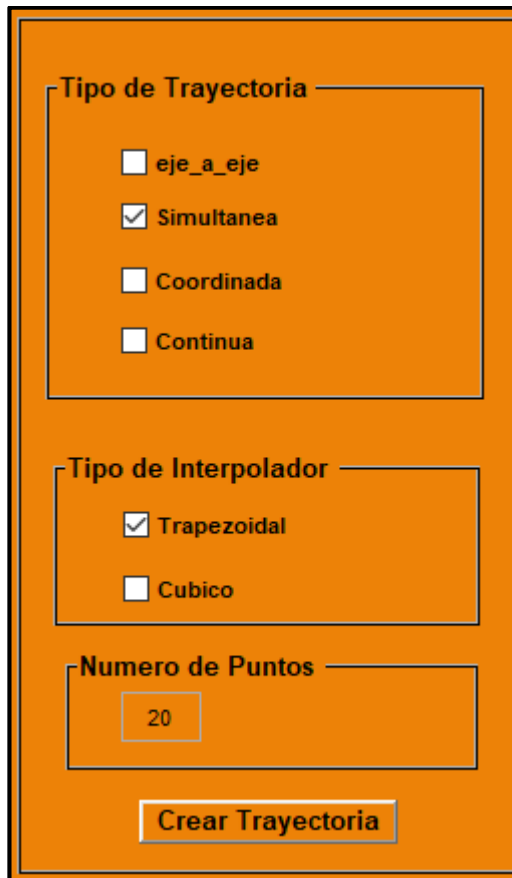
| MTH Inicial |         |         |         |          |
|-------------|---------|---------|---------|----------|
|             | N       | O       | A       | P        |
|             | 0.2027  | -0.1856 | 0.9615  | 199.15   |
|             | -0.2014 | -0.9688 | -0.1445 | -15.8276 |
|             | 0.9583  | -0.1644 | -0.2337 | 255.119  |
|             | 0       | 0       | 0       | 1        |

| MTH Final |         |         |         |         |
|-----------|---------|---------|---------|---------|
|           | N       | O       | A       | P       |
|           | 0.6211  | -0.6888 | -0.3739 | 59.4528 |
|           | -0.6093 | -0.7244 | 0.3225  | 135.705 |
|           | -0.493  | 0.0275  | -0.8696 | 54.5335 |
|           | 0       | 0       | 0       | 1       |

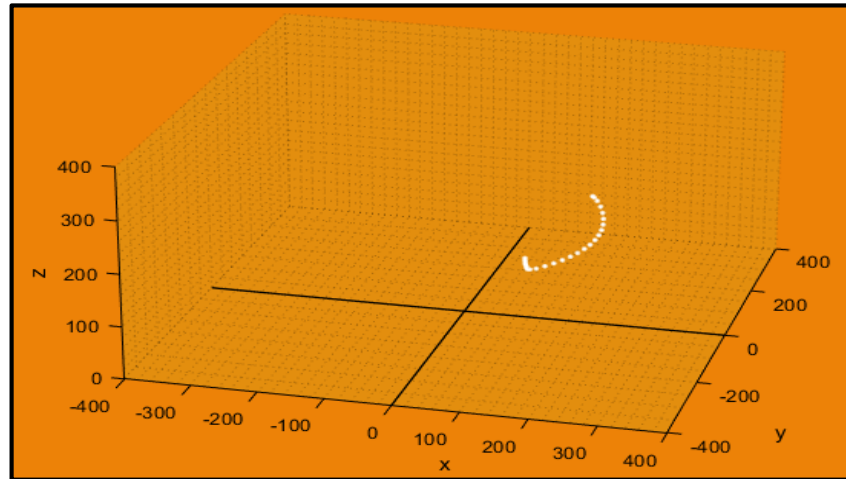
Figura 134. Validación Trayectoria Simultanea (MTH finales)

posteriormente se establecen los parámetros iniciales como lo es la selección del tipo de trayectoria (Simultanea), el tipo de interpolador (Trapezoidal) y el número de puntos para la interpolación entre ellos como se observa en la Figura 135.

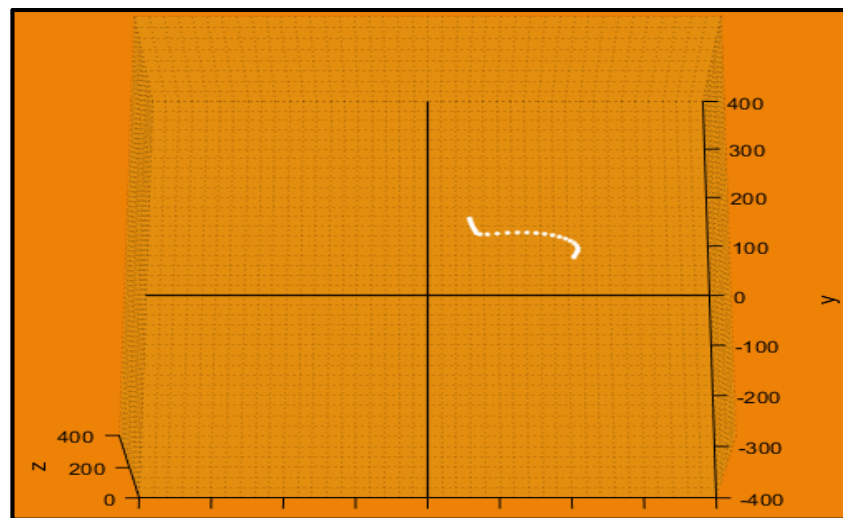


**Figura 135.**Validación Trayectoria Simultanea (selección de parámetros iniciales)

luego se procede en darle la opción “Crear Trayectoria” esta será calculada con los valores ingresados por el usuario anteriormente, lo cual me representa la trayectoria a seguir del manipulador como se mira en la Figura 136-Figura 137.

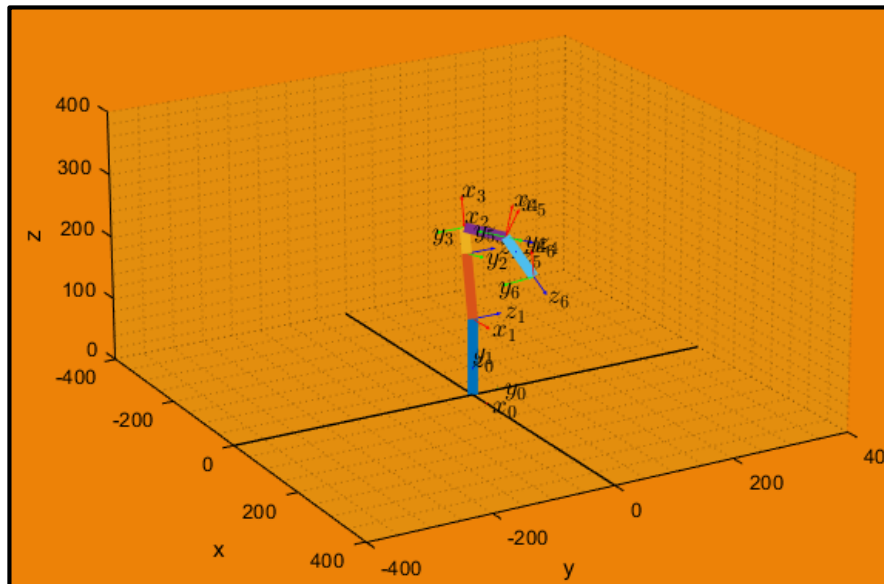


**Figura 136. Validación Trayectoria Simultanea (crear trayectoria vista lateral)**

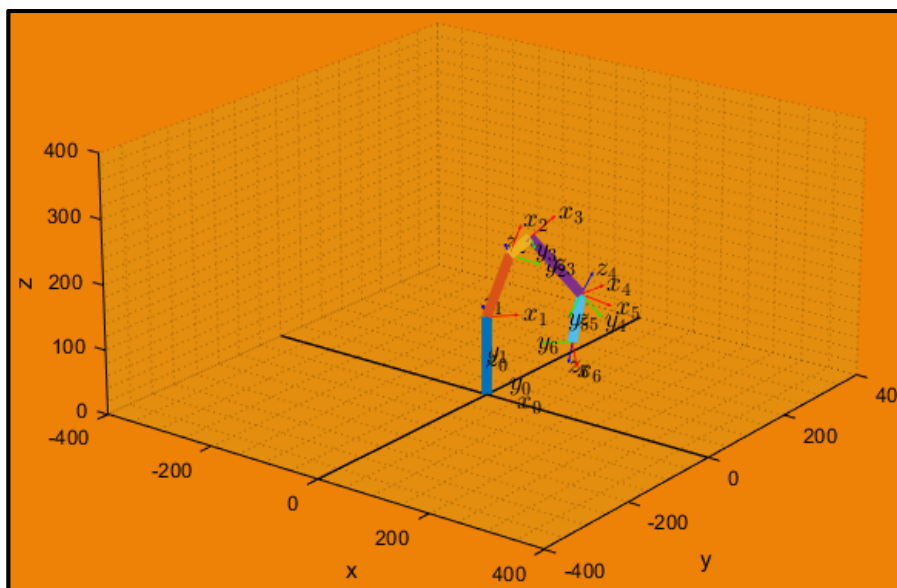


**Figura 137. Validación Trayectoria Simultanea (crear trayectoria vista superior)**

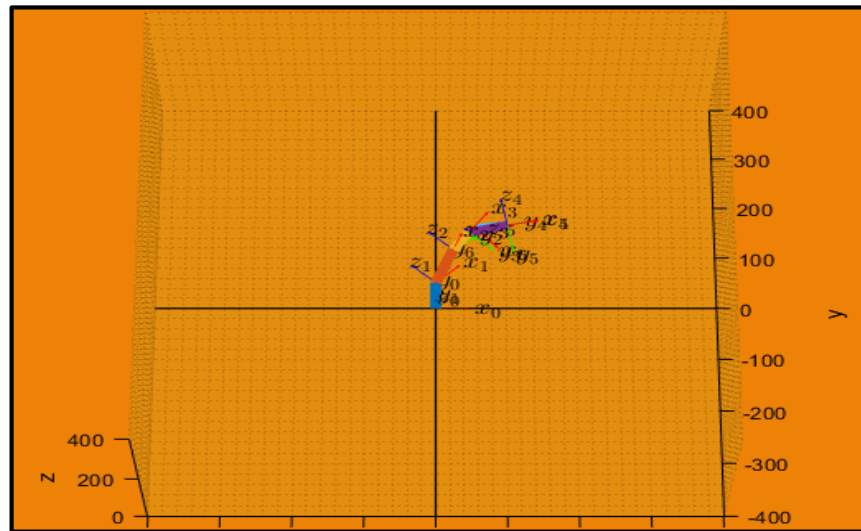
Realizada la creación de la trayectoria se procede a la ejecución de la animación, en el cual se observará de manera 3d el movimiento del manipulador tanto de su posición inicial(Figura 138) y final(Figura 139-Figura 140), como se observa en el cuándo se requiera implementar esta trayectoria en el manipulador real.



**Figura 138. Validación Trayectoria Simultanea (posición inicial)**

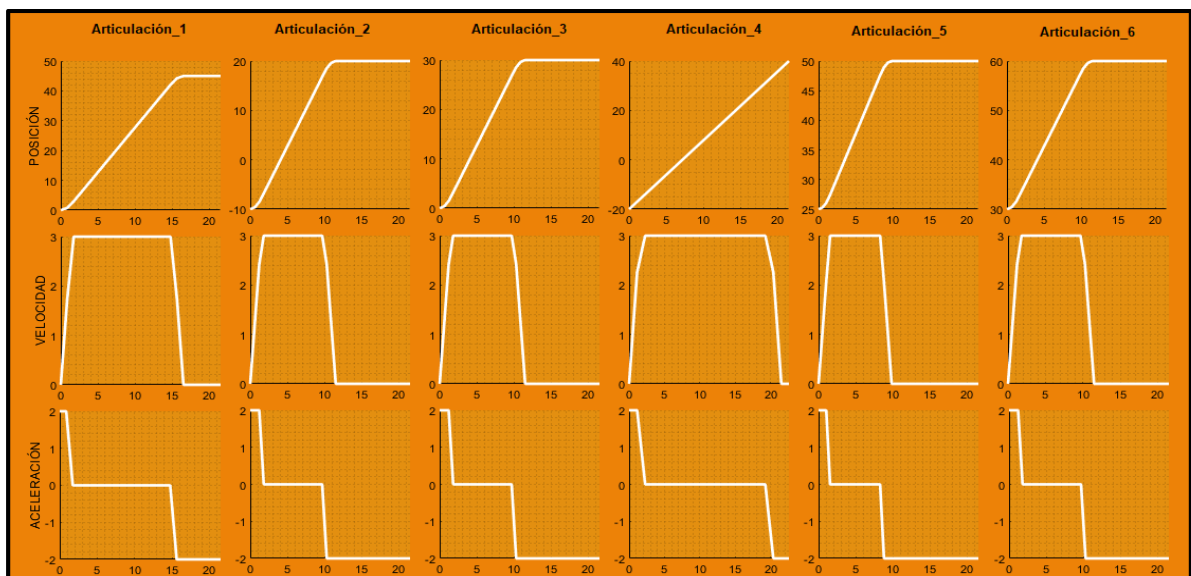


**Figura 139. Validación Trayectoria Simultanea (posición final-vista lateral)**



**Figura 140. Validación Trayectoria Simultanea (posición final-vista superior)**

Posterior de la ejecución de la animación se procede a analizar y visualizar las gráficas de cada articulación tanto en la posición-velocidad-aceleración como se muestra en la Figura 141, esto se hace con el fin de validar tanto los valores inicial y final de cada articulación, cuyos datos fueron ingresados por el usuario.



**Figura 141. Validación Trayectoria Simultanea (análisis de trayectoria)**

En lo cual si se compara las gráficas con los datos ingresados ( $q_i$ ,  $q_f$ ), vemos como los valores angulares tanto iniciales y finales cumple con lo predestinado por el usuario. Se procede hacer la realización de la ejecución en el manipulador, en el cual basándose del vector de posición de la MTH final calculada se procede a tomar las medidas reales una vez ejecutada en el manipulador, esto se hace como medio de verificación dándonos la validación de la generación de trayectoria Simultanea como se observa en la Figura 131-Figura 132.

### 7.3.3 Generación de trayectoria coordinada

Para la validación de la siguiente trayectoria coordinada se toman dos puntos, iniciales y finales por cada articulación como se muestra en la Figura 142.

**Ingrese los valores articulares**

|                                                                                                                                                                                                                                  | $q_i$ |       | $q_f$ |                                                                                                                                                                       |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $q_1$                                                                                                                                                                                                                            | 0     | $q_1$ | 45    | <b>Restricciones</b><br>$q_1$ -165° -0°-- 165°<br>$q_2$ -90° -0°--90°<br>$q_3$ -90° -0°--60°<br>$q_4$ -90° -0°-- 90°<br>$q_5$ -90° -0°-- 90°<br>$q_6$ -165° -0°--165° |
| $q_2$                                                                                                                                                                                                                            | -10   | $q_2$ | 20    |                                                                                                                                                                       |
| $q_3$                                                                                                                                                                                                                            | 0     | $q_3$ | 30    |                                                                                                                                                                       |
| $q_4$                                                                                                                                                                                                                            | -20   | $q_4$ | 40    |                                                                                                                                                                       |
| $q_5$                                                                                                                                                                                                                            | 25    | $q_5$ | 50    |                                                                                                                                                                       |
| $q_6$                                                                                                                                                                                                                            | 30    | $q_6$ | 60    |                                                                                                                                                                       |
| <div style="display: inline-block; border: 1px solid black; padding: 5px 10px; margin: 5px;">Calcular MTHS</div> <div style="display: inline-block; border: 1px solid black; padding: 5px 10px; margin: 5px 10px;">Limpiar</div> |       |       |       |                                                                                                                                                                       |

**Figura 142. Validación Trayectoria Coordinada (ingreso de valores  $q_i$ ,  $q_f$ )**

Se procede a calcular las MTH finales tanto para las articulaciones iniciales como las finales, esto se hace para luego validar por medio del vector de posición de cada una de estas para tomar las respectivas medidas en el manipulador real como se muestra en la Figura 143.

| MTH Inicial |         |         |          |
|-------------|---------|---------|----------|
| N           | O       | A       | P        |
| 0.2027      | -0.1856 | 0.9615  | 199.15   |
| -0.2014     | -0.9688 | -0.1445 | -15.8276 |
| 0.9583      | -0.1644 | -0.2337 | 255.119  |
| 0           | 0       | 0       | 1        |

| MTH Final |         |         |         |
|-----------|---------|---------|---------|
| N         | O       | A       | P       |
| 0.6211    | -0.6888 | -0.3739 | 59.4528 |
| -0.6093   | -0.7244 | 0.3225  | 135.705 |
| -0.493    | 0.0275  | -0.8696 | 54.5335 |
| 0         | 0       | 0       | 1       |

Figura 143. Validación Trayectoria Coordinada (MTH finales)

se establecen los parámetros iniciales como lo es la selección del tipo de trayectoria (Coordinada), el tipo de interpolador (Trapezoidal) y el número de puntos para la interpolación entre ellos como se observa en la Figura 144.

Tipo de Trayectoria

☐ eje\_a\_eje  
☐ Simultanea  
☒ Coordinada  
☐ Continua

Tipo de Interpolador

☒ Trapezoidal  
☐ Cubico

Numero de Puntos

20

Crear Trayectoria

Figura 144. Validación Trayectoria Coordinada (selección de parámetros iniciales)

luego se procede en darle la opción “Crear Trayectoria” esta será calculada con los valores ingresados por el usuario anteriormente, lo cual me representa la trayectoria a seguir del manipulador como se mira en la Figura 145-Figura 146.

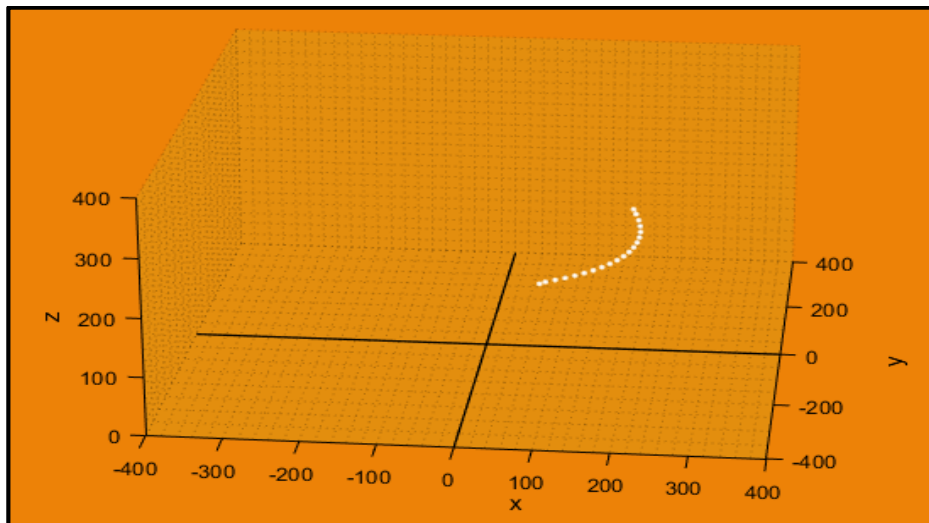


Figura 145. Validación Trayectoria Coordinada (crear trayectoria vista lateral)

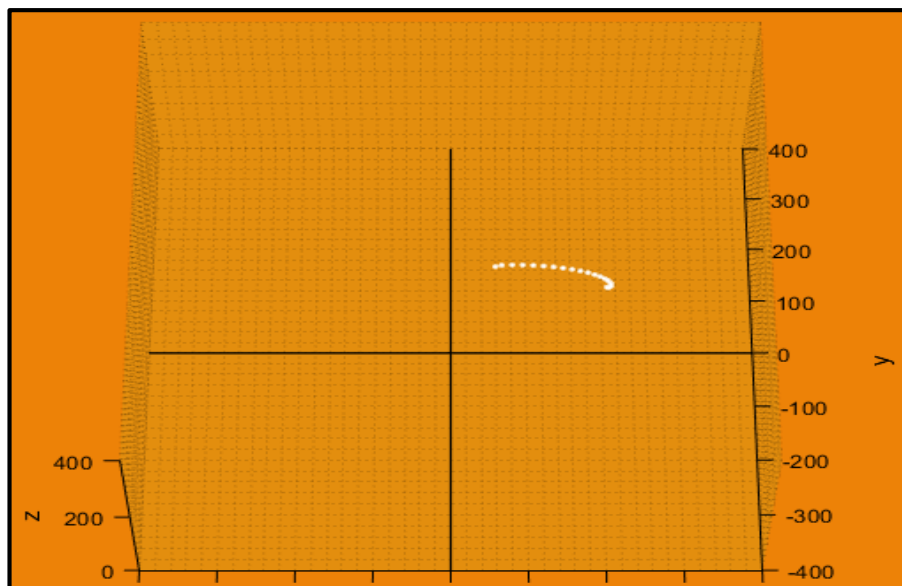
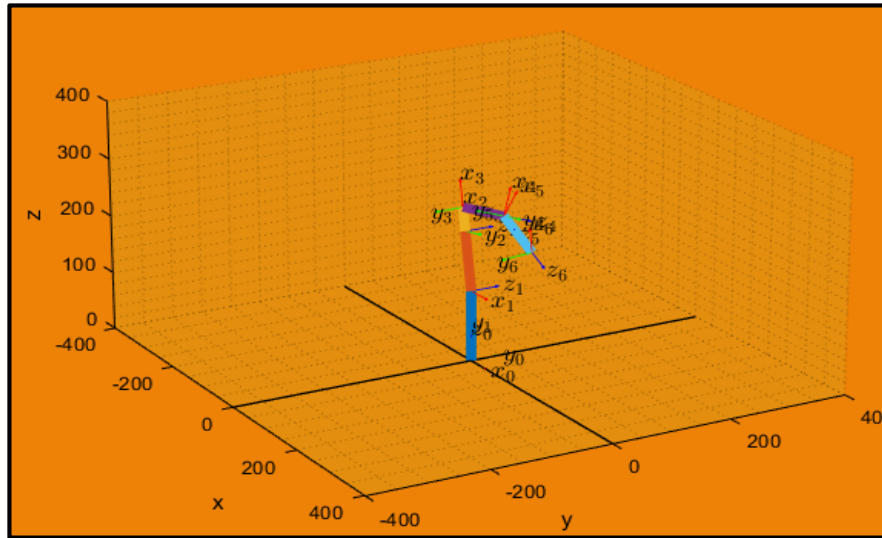
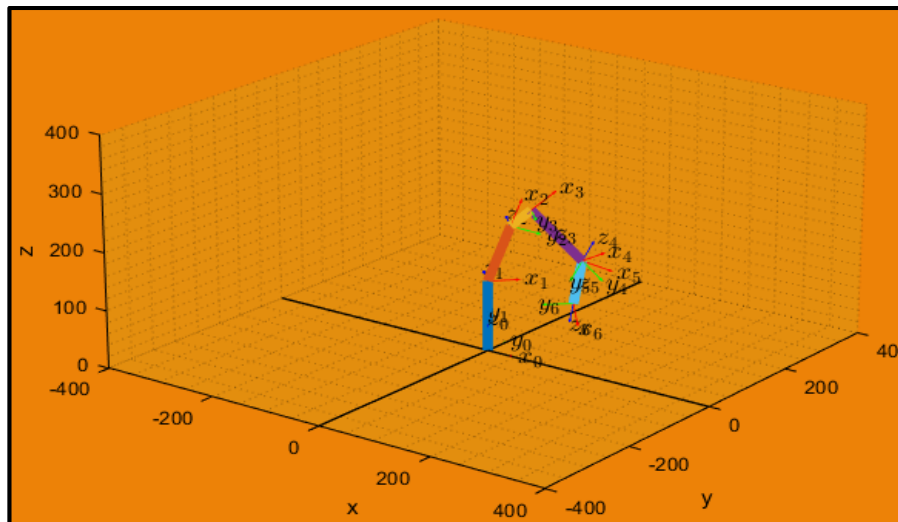


Figura 146. Validación Trayectoria Coordinada (crear trayectoria vista superior)

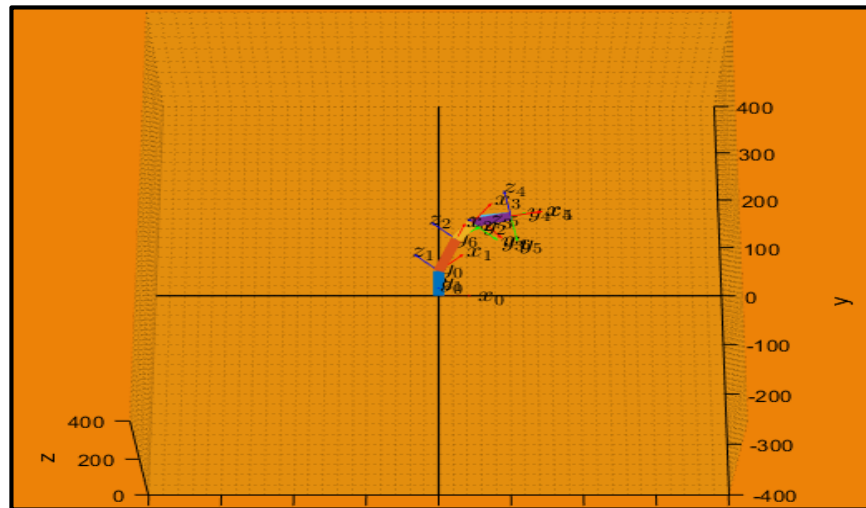
Terminada la creación de la trayectoria se procede a la ejecución de la animación, en el cual se observará de manera 3d el movimiento del manipulador tanto de su posición inicial(Figura 147) y final(Figura 148-Figura 149), como se observa en el cuándo se requiera implementar esta trayectoria en el manipulador real.



**Figura 147. Validación Trayectoria Coordinada (posición inicial)**

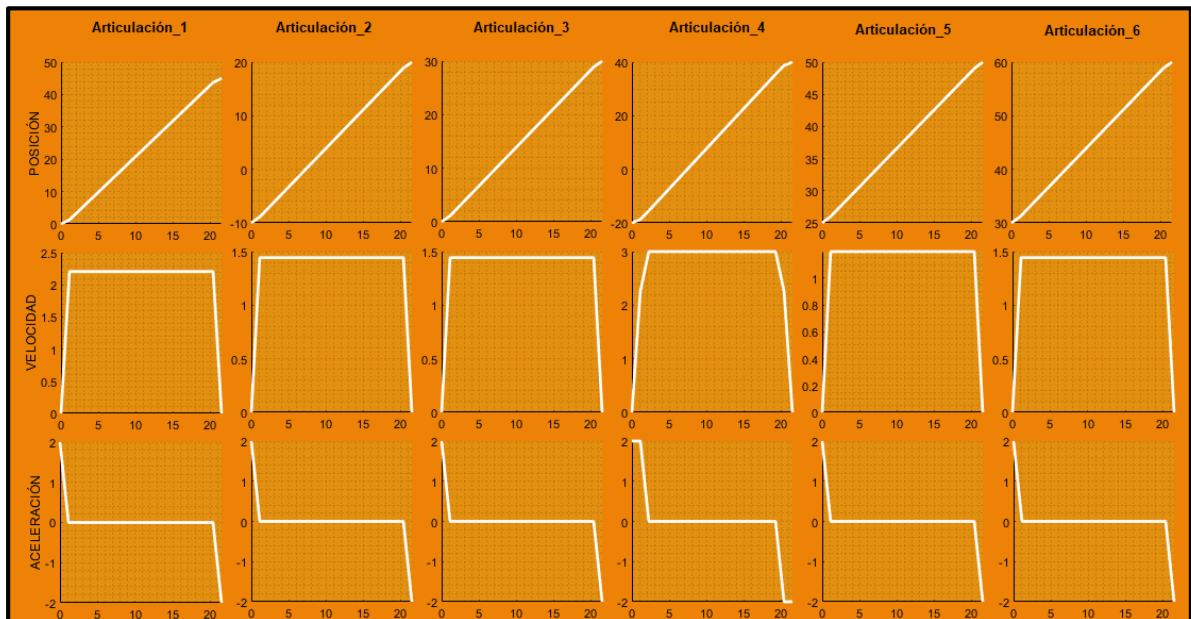


**Figura 148. Validación Trayectoria Coordinada (posición final-vista lateral)**



**Figura 149. Validación Trayectoria Coordinada (posición final-vista superior)**

Después de la ejecución de la animación se procede a analizar y visualizar las gráficas de cada articulación tanto en la posición-velocidad-aceleración como se muestra en la Figura 150, esto se hace con el fin de validar tanto los valores inicial y final de cada articulación, cuyos datos fueron ingresados por el usuario.



**Figura 150. Validación Trayectoria Coordinada (análisis de trayectoria)**

si se compara las gráficas mostradas con anterioridad con los datos ingresados ( $q_i$ ,  $q_f$ ), vemos como los valores angulares tanto iniciales y finales cumple con lo predestinado por el usuario. Se procede hacer la realización de la ejecución en el manipulador, en el cual basándose del vector de posición de la MTH final calculada se procede a tomar las medidas reales una vez ejecutada en el manipulador, esto se hace como medio de verificación dándonos la validación de la generación de trayectoria coordinada como se observa en la Figura 131-Figura 132.

#### 7.4 Validación del Control Cinemático (Interpolador cubico)

##### 7.4.1 Generación de trayectoria eje a eje

Para la validación de la siguiente trayectoria eje a eje se toman dos puntos, iniciales y finales por cada articulación como se muestra en la Figura 151.

**Ingrese los valores articulares**

| $q_i$ |     | $q_f$ |    | Restricciones      |
|-------|-----|-------|----|--------------------|
| q1    | 0   | q1    | 45 |                    |
| q2    | -10 | q2    | 20 | q2 -90° -0°--90°   |
| q3    | 0   | q3    | 30 | q3 -90° -0°--60°   |
| q4    | -20 | q4    | 40 | q4 -90° -0°-- 90°  |
| q5    | 25  | q5    | 50 | q5 -90° -0°-- 90°  |
| q6    | 30  | q6    | 60 | q6 -165° -0°--165° |

Calcular MTHS
Limpiar

Figura 151. Validación Trayectoria Eje a Eje (ingreso de valores  $q_i$ ,  $q_f$ )

se procede a calcular las MTH finales tanto para las articulaciones iniciales como las finales, esto se hace para luego validar por medio del vector de posición de cada una de estas para tomar las respectivas medidas en el manipulador real como se muestra en la Figura 152.

| MTH Inicial |         |         |          |
|-------------|---------|---------|----------|
| N           | O       | A       | P        |
| 0.2027      | -0.1856 | 0.9615  | 199.15   |
| -0.2014     | -0.9688 | -0.1445 | -15.8276 |
| 0.9583      | -0.1644 | -0.2337 | 255.119  |
| 0           | 0       | 0       | 1        |

| MTH Final |         |         |         |
|-----------|---------|---------|---------|
| N         | O       | A       | P       |
| 0.6211    | -0.6888 | -0.3739 | 59.4528 |
| -0.6093   | -0.7244 | 0.3225  | 135.705 |
| -0.493    | 0.0275  | -0.8696 | 54.5335 |
| 0         | 0       | 0       | 1       |

Figura 152. Validación Trayectoria Eje a Eje (MTH finales)

posteriormente se establecen los parámetros iniciales como lo es la selección del tipo de trayectoria (Eje a Eje), el tipo de interpolador (Cubico) y el número de puntos para la interpolación entre ellos como se observa en la Figura 153.

Tipo de Trayectoria

☒ eje\_a\_eje  
☐ Simultanea  
☐ Coordinada  
☐ Continua

Tipo de Interpolador

☐ Trapezoidal  
☒ Cubico

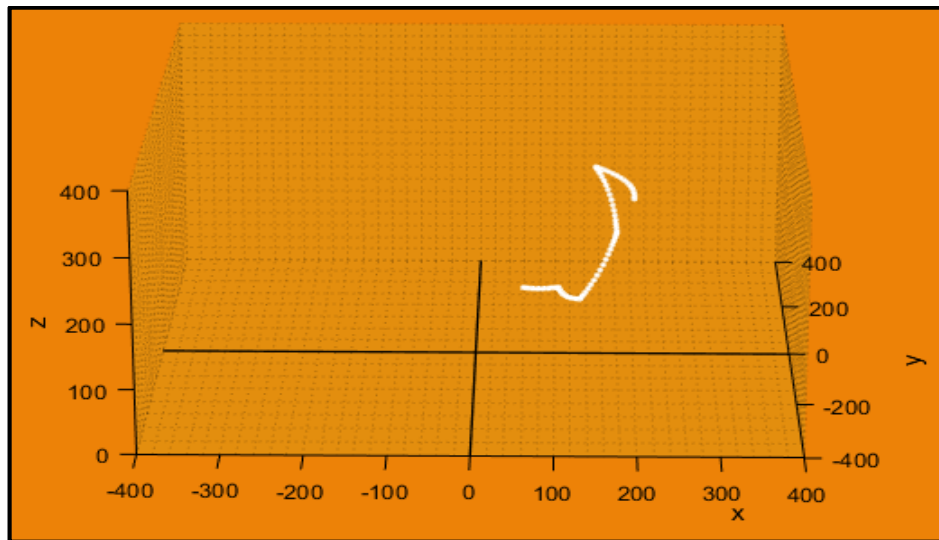
Numero de Puntos

20

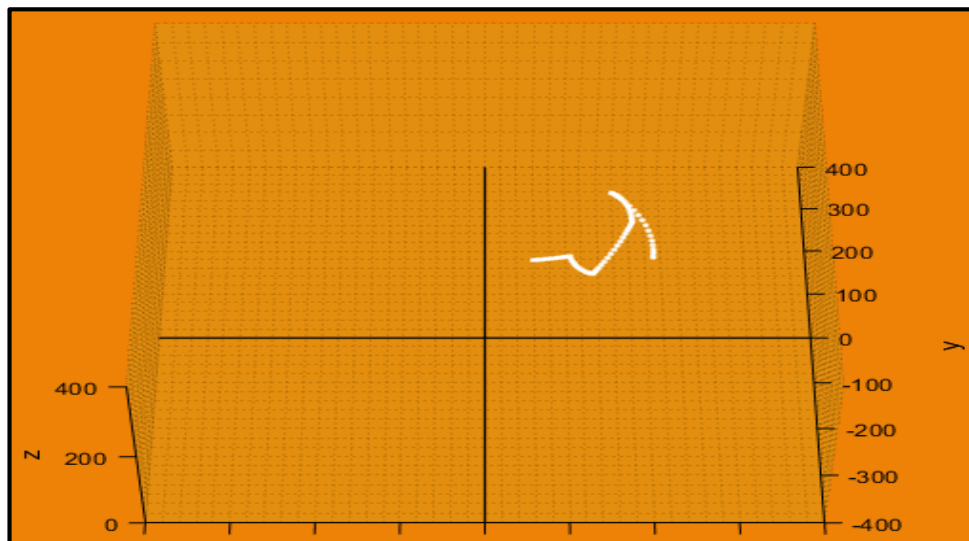
Crear Trayectoria

Figura 153. Validación Trayectoria Eje a Eje (selección de parámetros iniciales)

se procede en darle la opción “Crear Trayectoria” esta será calculada con los valores ingresados por el usuario anteriormente, lo cual me representa la trayectoria a seguir del manipulador como se mira en las Figura 154-Figura 155.

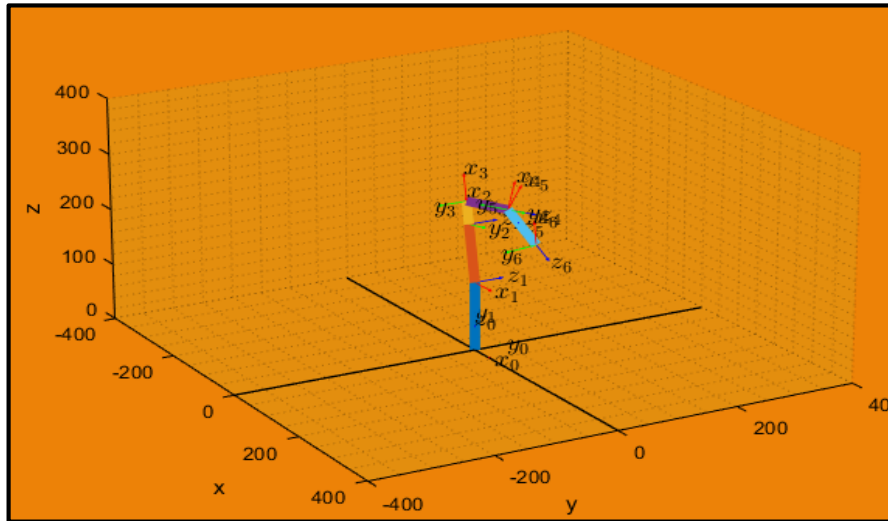


**Figura 154. Validación Trayectoria Eje a Eje (crear trayectoria vista lateral)**

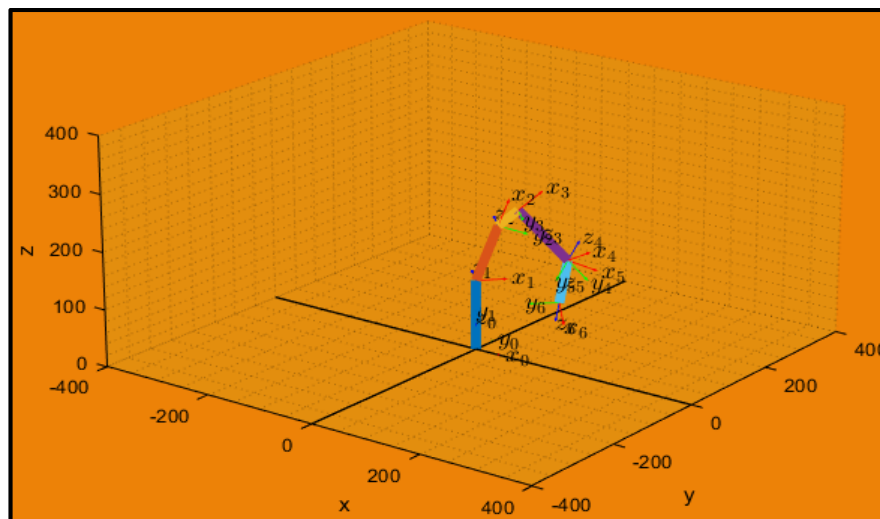


**Figura 155. Validación Trayectoria Eje a Eje (crear trayectoria vista superior)**

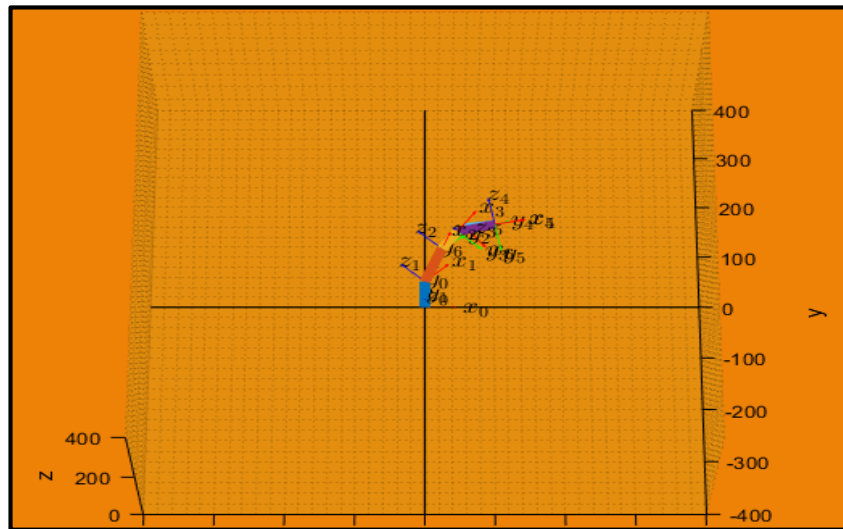
Realizada la creación de la trayectoria se procede a la ejecución de la animación, en el cual se observará de manera 3d el movimiento del manipulador tanto de su posición inicial(Figura 156) y final(Figura 157-Figura 158), como se observa en el cuándo se requiera implementar esta trayectoria en el manipulador real.



**Figura 156. Validación Trayectoria Eje a Eje (posición inicial)**

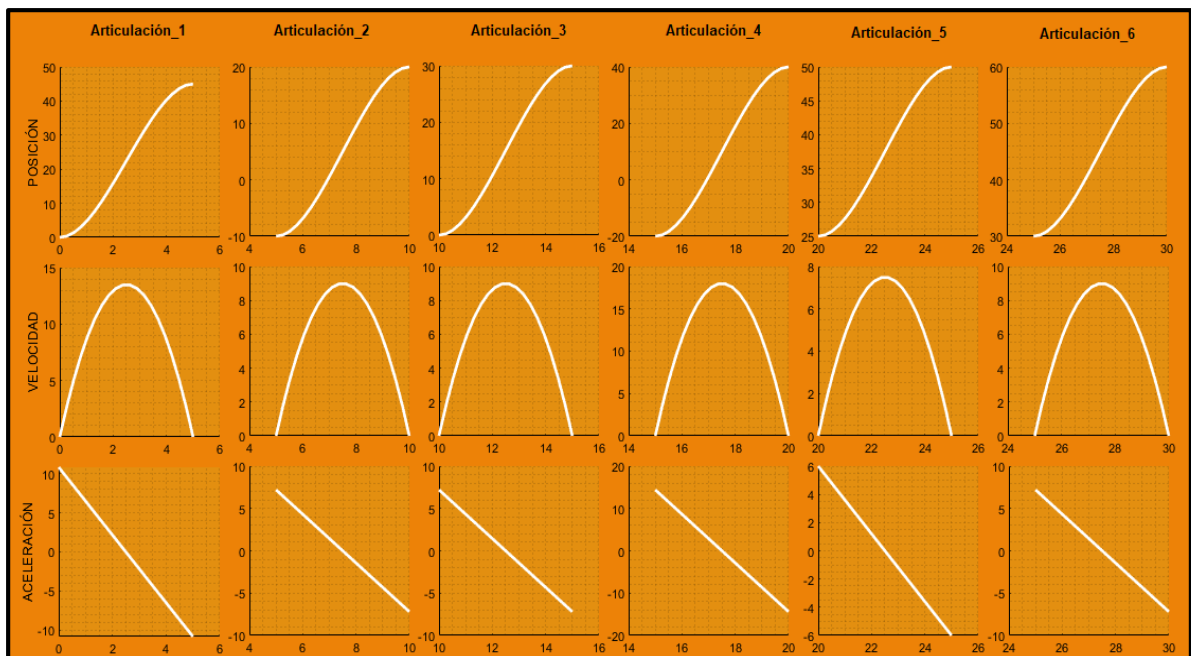


**Figura 157. Validación Trayectoria Eje a Eje (posición final-vista lateral)**



**Figura 158. Validación Trayectoria Eje a Eje (posición final-vista superior)**

Posteriormente de la ejecución de la animación se procede a analizar y visualizar las gráficas de cada articulación tanto en la posición-velocidad-aceleración como se observa en la Figura 159, esto se hace con el fin de validar tanto los valores inicial y final de cada articulación, cuyos datos fueron ingresados por el usuario.



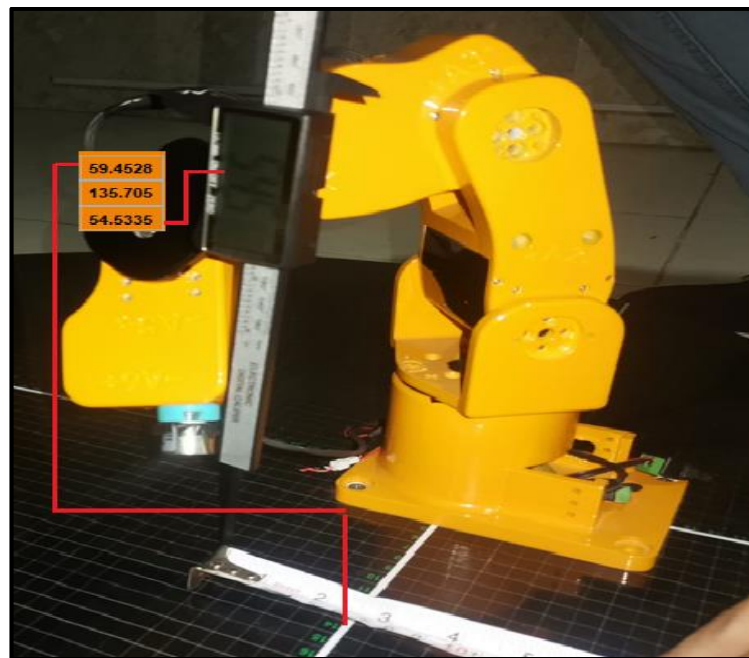
**Figura 159. Validación Trayectoria Eje a Eje (análisis de trayectoria)**

*"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"*

Universidad de Pamplona  
Pamplona - Norte de Santander - Colombia  
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750

Ahora si se compara las gráficas con los datos ingresados ( $q_i$ ,  $q_f$ ), vemos como los valores angulares tanto iniciales y finales cumple con lo predestinado por el usuario.

con la perspectiva de cómo quedaría el manipulador se procede hacer la realización de la ejecución en el manipulador, en el cual basándose del vector de posición de la MTH final calculada se procede a tomar las medidas reales una vez ejecutada en el manipulador, esto se hace como medio de verificación dándonos la validación de la generación de trayectoria eje a eje como se observa en la Figura 160-Figura 161.



**Figura 160. Validación de la Trayectoria Eje a Eje (manipulador real en X y Z)**

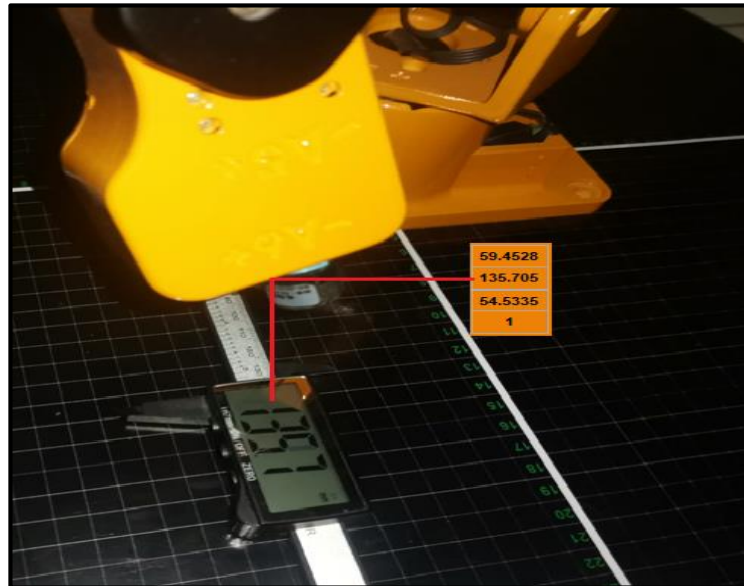


Figura 161. Validación de la Trayectoria Eje a Eje (manipulador real en Y)

#### 7.4.2 Generación de Trayectoria Simultanea

Para la validación de la siguiente trayectoria simultanea se toman dos puntos, iniciales y finales por cada articulación como se muestra en la Figura 162.

Ingrese los valores articulares

|    | qi  |    | qf |
|----|-----|----|----|
| q1 | 0   | q1 | 45 |
| q2 | -10 | q2 | 20 |
| q3 | 0   | q3 | 30 |
| q4 | -20 | q4 | 40 |
| q5 | 25  | q5 | 50 |
| q6 | 30  | q6 | 60 |

Calcular MTHS

Limpiar

Restricciones

|    |                     |
|----|---------------------|
| q1 | -165° -- 0° -- 165° |
| q2 | -90° -- 0° -- 90°   |
| q3 | -90° -- 0° -- 60°   |
| q4 | -90° -- 0° -- 90°   |
| q5 | -90° -- 0° -- 90°   |
| q6 | -165° -- 0° -- 165° |

Figura 162. Validación Trayectoria Simultanea (ingreso de valores qi, qf)

Se calculan las MTH finales tanto para las articulaciones iniciales como las finales, esto se hace para luego validar por medio del vector de posición de cada una de estas para tomar las respectivas medidas en el manipulador real como se muestra en la Figura 163.

| MTH Inicial |         |         |          |  |
|-------------|---------|---------|----------|--|
| N           | O       | A       | P        |  |
| 0.2027      | -0.1856 | 0.9615  | 199.15   |  |
| -0.2014     | -0.9688 | -0.1445 | -15.8276 |  |
| 0.9583      | -0.1644 | -0.2337 | 255.119  |  |
| 0           | 0       | 0       | 1        |  |

| MTH Final |         |         |         |  |
|-----------|---------|---------|---------|--|
| N         | O       | A       | P       |  |
| 0.6211    | -0.6888 | -0.3739 | 59.4528 |  |
| -0.6093   | -0.7244 | 0.3225  | 135.705 |  |
| -0.493    | 0.0275  | -0.8696 | 54.5335 |  |
| 0         | 0       | 0       | 1       |  |

Figura 163. Validación Trayectoria Simultanea (MTH finales)

Luego se establecen los parámetros iniciales como lo es la selección del tipo de trayectoria (Simultanea), el tipo de interpolador (Cubico) y el número de puntos para la interpolación entre ellos como se observa en la Figura 164.

Tipo de Trayectoria

☐ eje\_a\_eje  
☒ Simultanea  
☐ Coordinada  
☐ Continua

Tipo de Interpolador

☐ Trapezoidal  
☒ Cubico

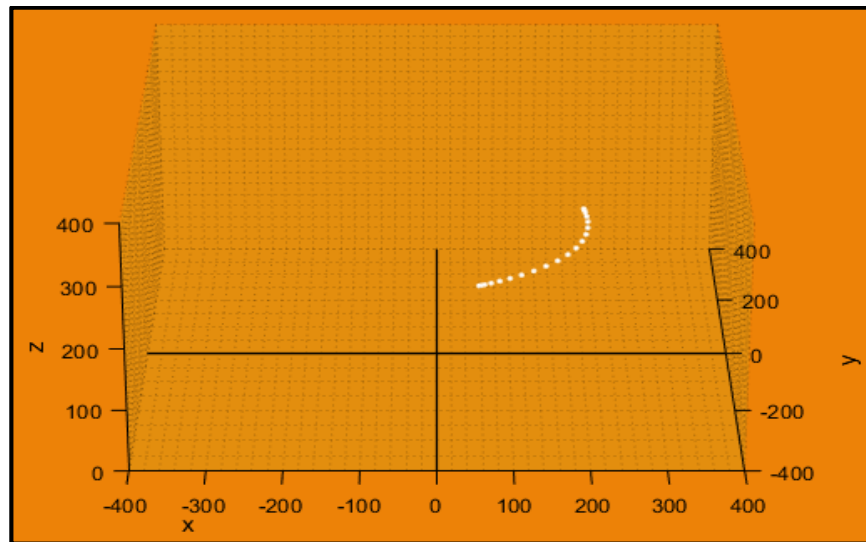
Numero de Puntos

20

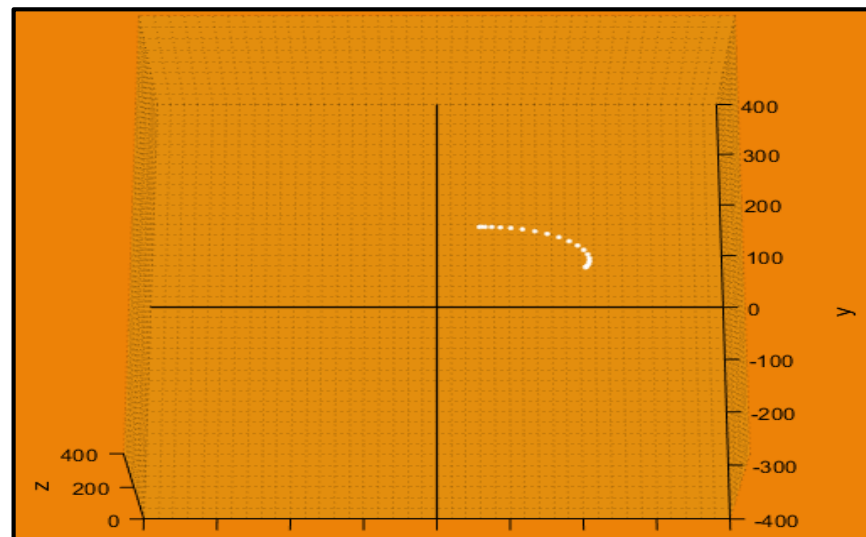
Crear Trayectoria

Figura 164. Validación Trayectoria Simultanea (selección de parámetros iniciales)

En la opción “Crear Trayectoria” esta será calculada con los valores ingresados por el usuario anteriormente, lo cual me representa la trayectoria a seguir del manipulador como se mira en la Figura 165-Figura 166.

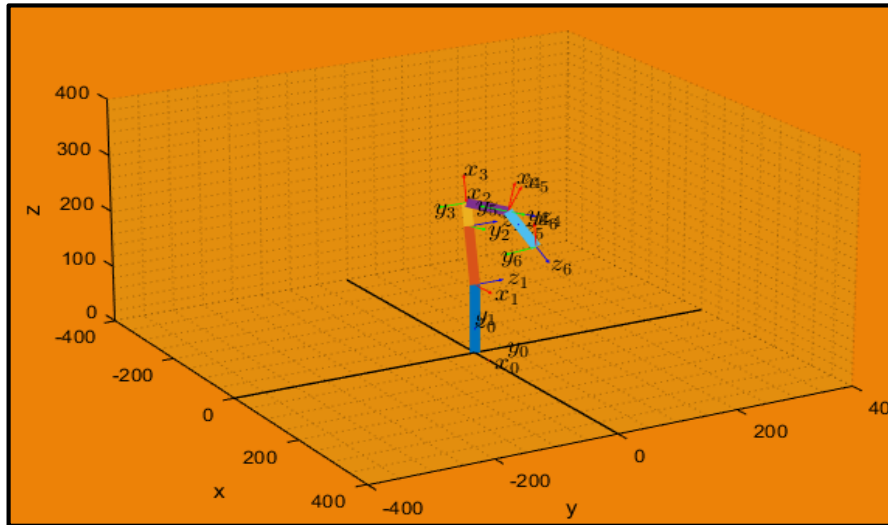


**Figura 165. Validación Trayectoria Simultanea (crear trayectoria vista lateral)**

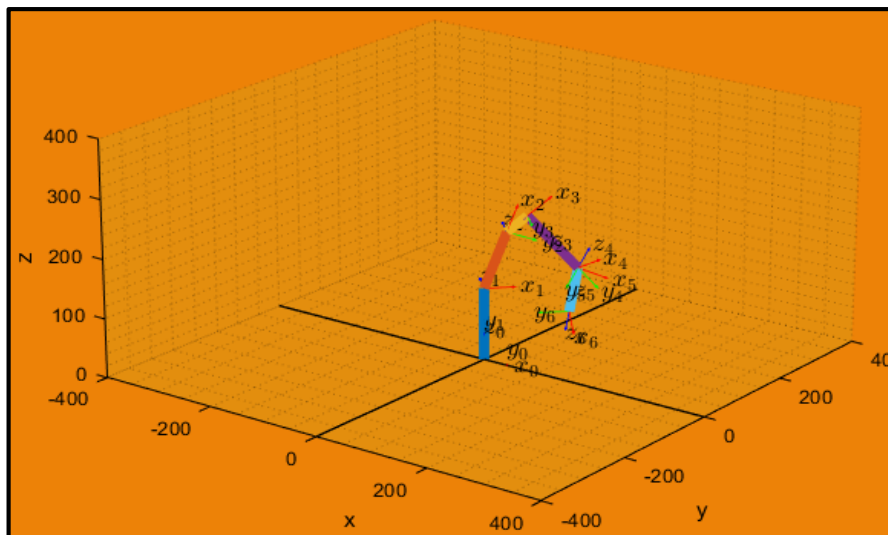


**Figura 166. Validación Trayectoria Simultanea (crear trayectoria vista superior)**

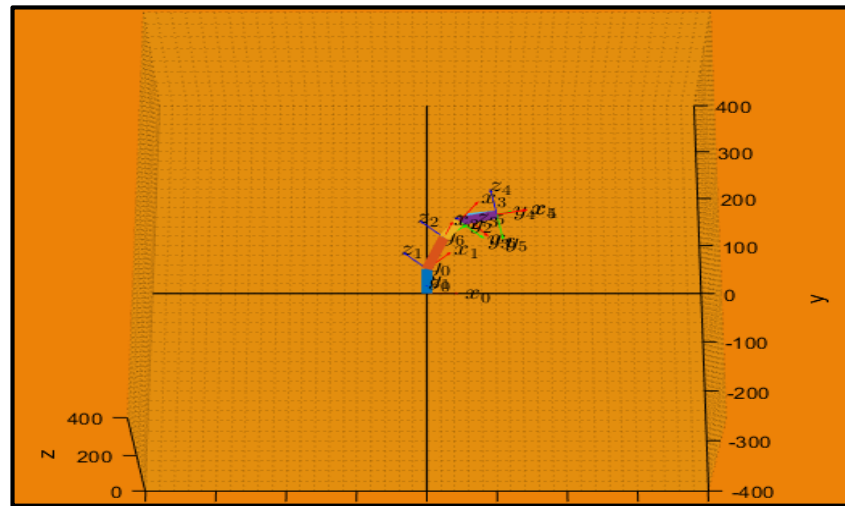
Realizada la creación de la trayectoria se procede a la ejecución de la animación, en el cual se observará de manera 3d el movimiento del manipulador tanto de su posición inicial(Figura 167) y final(Figura 168-Figura 169), como se observa en el cuándo se requiera implementar esta trayectoria en el manipulador real.



**Figura 167. Validación Trayectoria Simultanea (posición inicial)**

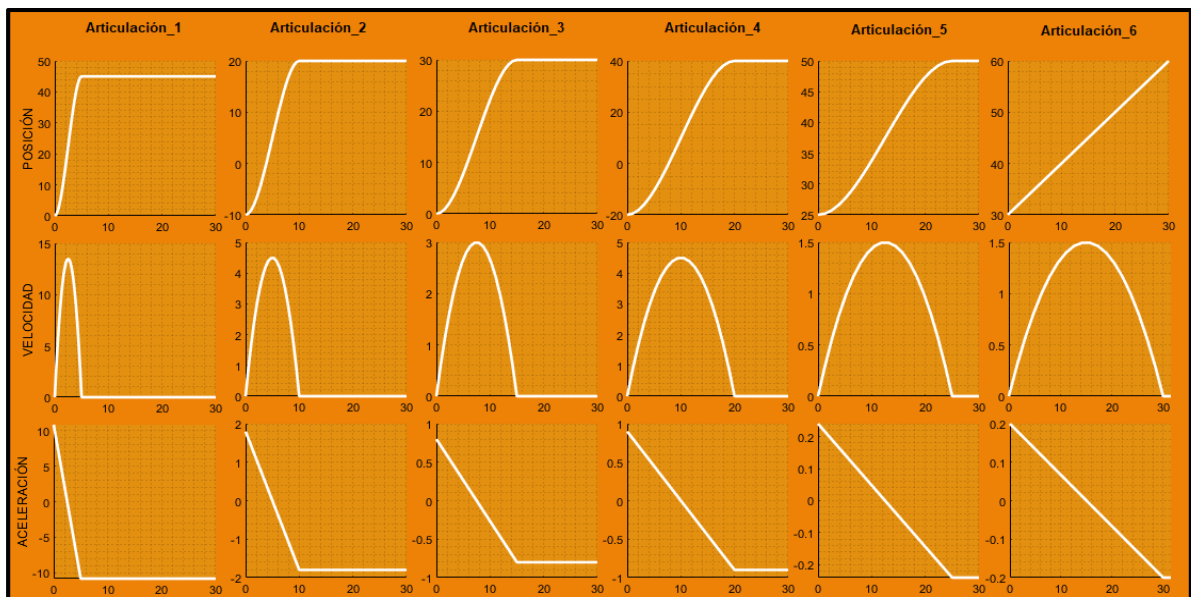


**Figura 168. Validación Trayectoria Simultanea (posición final-vista lateral)**



**Figura 169. Validación Trayectoria Simultanea (posición final- vista superior)**

Después de la ejecución de la animación se procede a analizar y visualizar las gráficas de cada articulación tanto en la posición-velocidad-aceleración como se observa en la Figura 170, esto se hace con el fin de validar tanto los valores inicial y final de cada articulación, cuyos datos fueron ingresados por el usuario.

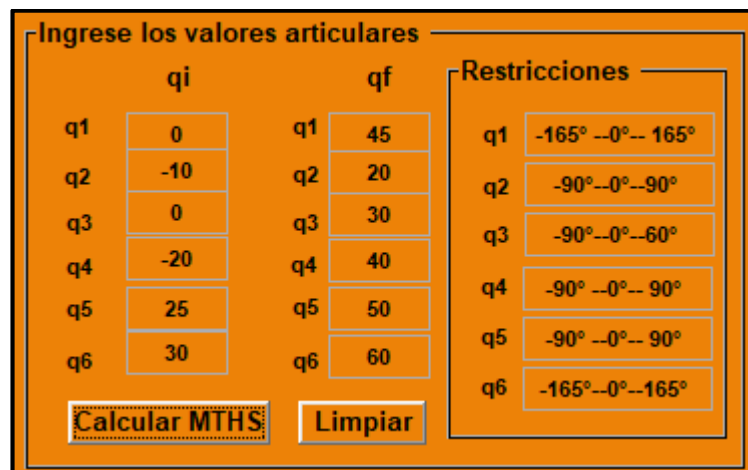


**Figura 170. Validación Trayectoria Simultanea (análisis de trayectoria)**

Ahora si se compara las gráficas con los datos ingresados ( $q_i$ ,  $q_f$ ), vemos como los valores angulares tanto iniciales y finales cumple con lo predestinado por el usuario. con la perspectiva de cómo nos quedaría el manipulador se procede hacer la realización de la ejecución en el manipulador, en el cual basándose del vector de posición de la MTH final calculada se procede a tomar las medidas reales una vez ejecutada en el manipulador, esto se hace como medio de verificación dándonos la validación de la generación de trayectoria simultanea como se observa en la Figura 160-Figura 161.

### 7.4.3 Generación de Trayectoria Coordinada

En la validación de la siguiente trayectoria Coordinada se toman dos puntos, iniciales y finales por cada articulación como se muestra en la Figura 171.



**Ingrese los valores articulares**

| $q_i$ |     | $q_f$ |    | <b>Restricciones</b>  |
|-------|-----|-------|----|-----------------------|
| $q_1$ | 0   | $q_1$ | 45 |                       |
| $q_2$ | -10 | $q_2$ | 20 | $q_2$ -90° -0° -90°   |
| $q_3$ | 0   | $q_3$ | 30 | $q_3$ -90° -0° -60°   |
| $q_4$ | -20 | $q_4$ | 40 | $q_4$ -90° -0° -90°   |
| $q_5$ | 25  | $q_5$ | 50 | $q_5$ -90° -0° -90°   |
| $q_6$ | 30  | $q_6$ | 60 | $q_6$ -165° -0° -165° |

**Calcular MTHS** **Limpiar**

Figura 171. Validación Trayectoria Coordinada (ingreso de valores  $q_i$ ,  $q_f$ )

Se calculan las MTH finales tanto para las articulaciones iniciales como las finales, esto se hace para luego validar por medio del vector de posición de cada una de estas para tomar las respectivas medidas en el manipulador real como se muestra en la Figura 172.

**MTH Inicial**

| N       | O       | A       | P        |
|---------|---------|---------|----------|
| 0.2027  | -0.1856 | 0.9615  | 199.15   |
| -0.2014 | -0.9688 | -0.1445 | -15.8276 |
| 0.9583  | -0.1644 | -0.2337 | 255.119  |
| 0       | 0       | 0       | 1        |

**MTH Final**

| N       | O       | A       | P       |
|---------|---------|---------|---------|
| 0.6211  | -0.6888 | -0.3739 | 59.4528 |
| -0.6093 | -0.7244 | 0.3225  | 135.705 |
| -0.493  | 0.0275  | -0.8696 | 54.5335 |
| 0       | 0       | 0       | 1       |

**Figura 172. Validación Trayectoria Coordinada (MTH finales)**

Luego se establecen los parámetros iniciales como lo es la selección del tipo de trayectoria (Coordinada), el tipo de interpolador (Cubico) y el número de puntos para la interpolación entre ellos como se observa en la Figura 173.

**Tipo de Trayectoria**

☐ eje\_a\_eje  
☐ Simultanea  
☒ Coordinada  
☐ Continua

**Tipo de Interpolador**

☐ Trapezoidal  
☒ Cubico

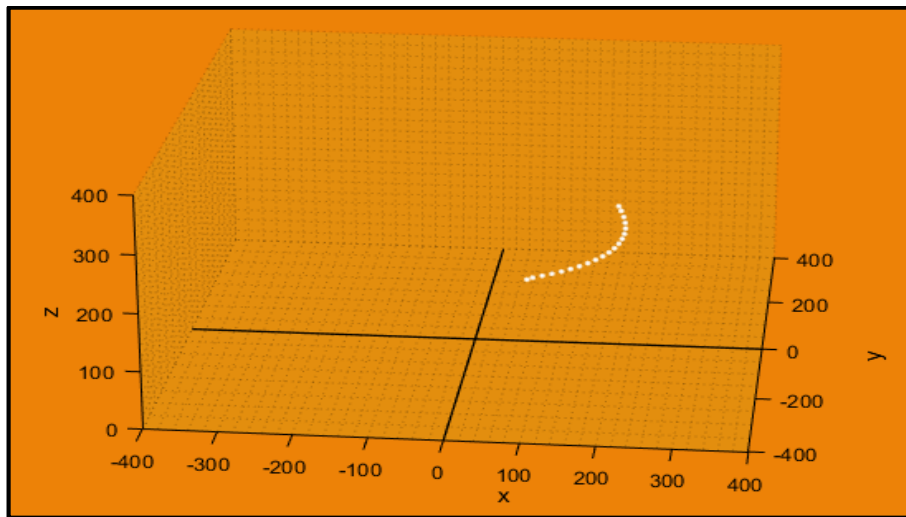
**Numero de Puntos**

20

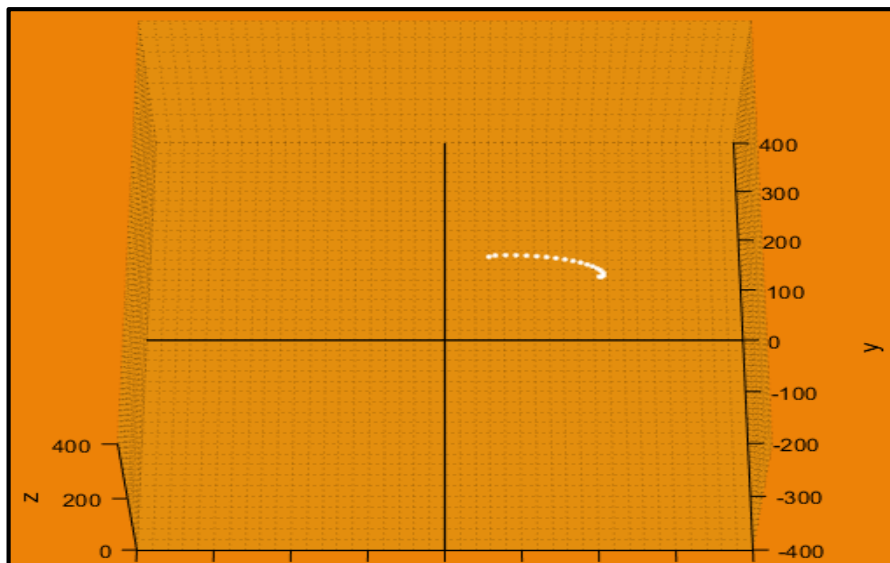
**Crear Trayectoria**

**Figura 173. Validación Trayectoria Coordinada (selección de parámetros iniciales)**

Con la opción “Crear Trayectoria” esta será calculada con los valores ingresados por el usuario anteriormente, lo cual me representa la trayectoria a seguir del manipulador como se mira en la Figura 174-Figura 175.

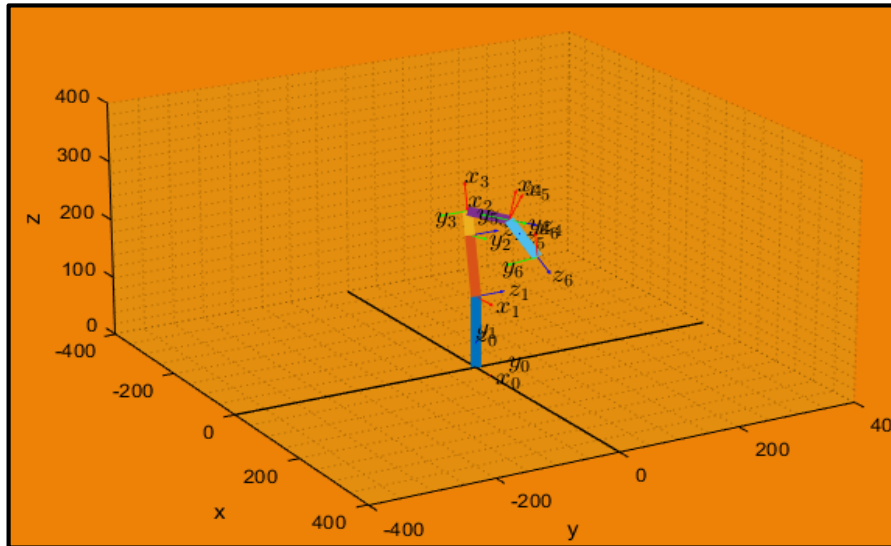


**Figura 174. Validación Trayectoria Coordinada (crear trayectoria vista lateral)**

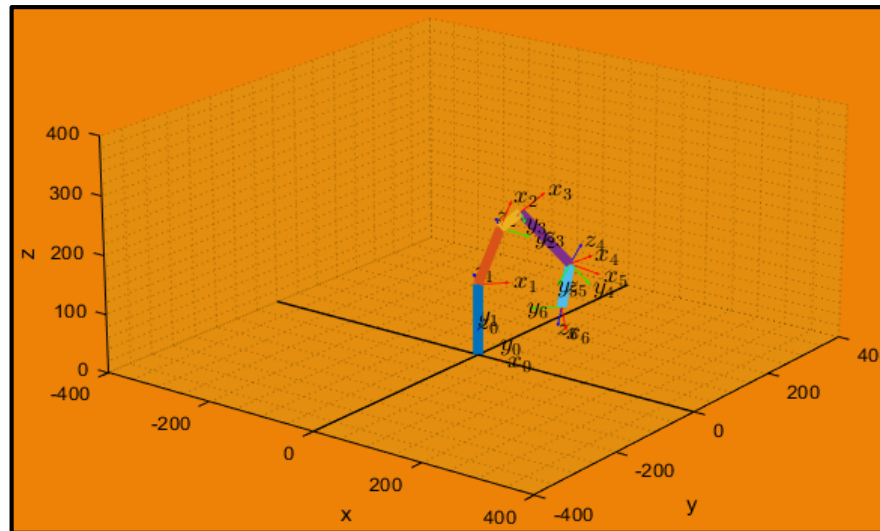


**Figura 175. Validación Trayectoria Coordinada (crear trayectoria vista superior)**

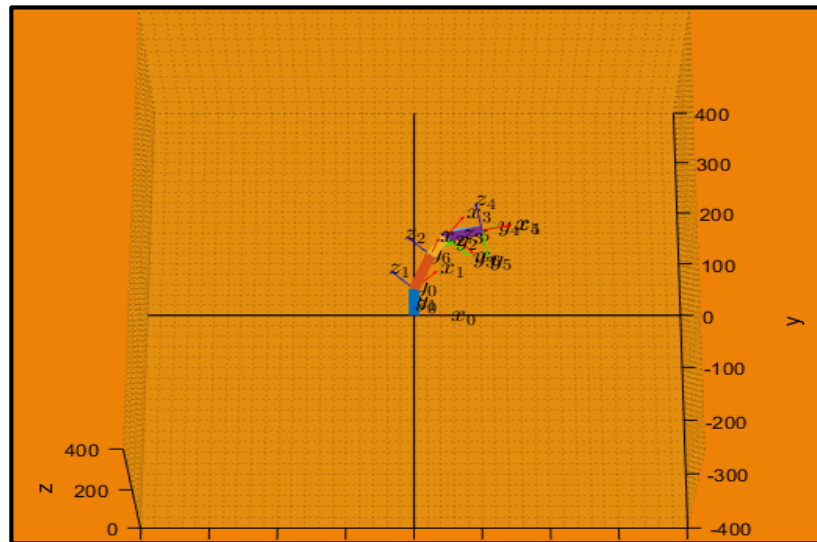
con la creación de la trayectoria se procede a la ejecución de la animación, en el cual se observará de manera 3d el movimiento del manipulador tanto de su posición inicial(Figura 176) y final(Figura 177-Figura 178), como se observa en el cuándo se requiera implementar esta trayectoria en el manipulador real.



**Figura 176. Validación Trayectoria Coordinada (posición inicial)**

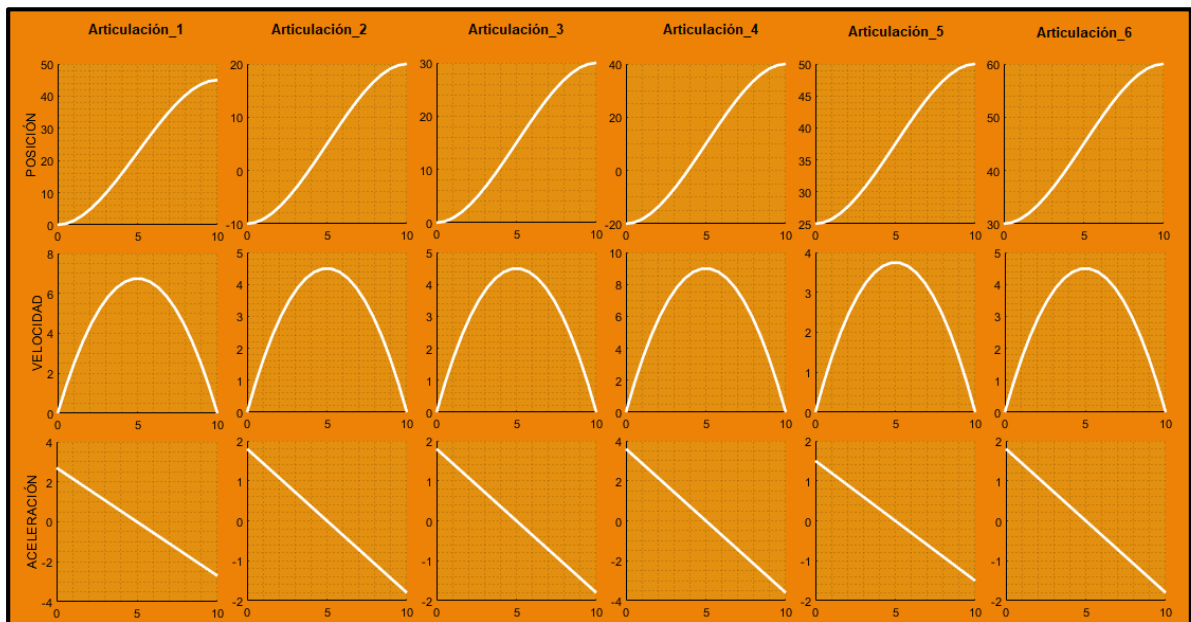


**Figura 177. Validación Trayectoria Coordinada (posición final-vista lateral)**



**Figura 178. Validación Trayectoria Coordinada (posición final-vista superior)**

De la ejecución de la animación se procede a analizar y visualizar las gráficas de cada articulación tanto en la posición-velocidad-aceleración como se observa en la Figura 179, esto se hace con el fin de validar tanto los valores inicial y final de cada articulación, cuyos datos fueron ingresados por el usuario.



**Figura 179. Validación Trayectoria Coordinada (análisis de trayectoria)**

si se compararan las gráficas con los datos ingresados ( $q_i$ ,  $q_f$ ), vemos como los valores angulares tanto iniciales y finales cumple con lo ingresado por el usuario. Con la animación de cómo quedaría el manipulador se procede hacer la realización de la ejecución en el manipulador, en el cual basándose del vector de posición de la MTH final calculada se procede a tomar las medidas reales una vez ejecutada en el manipulador, esto se hace como medio de verificación dándonos la validación de la generación de trayectoria coordinada como se observa en la Figura 160-Figura 161.

#### 7.4.4 Generación de Trayectoria Continua

En la validación de la siguiente trayectoria continua, se toman como valores de entrada la MTH inicial y final como se muestra en la Figura 180, esta trayectoria lo que busca es generar una línea continua en el manipulador es por eso que se ubican con la misma orientación en las NOA y en los vectores de posición(P) se ubica coordenadas que me generen dicha línea.

**MTH Inicial**

**Ingrese MTH Inicial**

| N | O  | A | P   |
|---|----|---|-----|
| 0 | 0  | 1 | 220 |
| 0 | -1 | 0 | 60  |
| 1 | 0  | 0 | 180 |
| 0 | 0  | 0 | 1   |

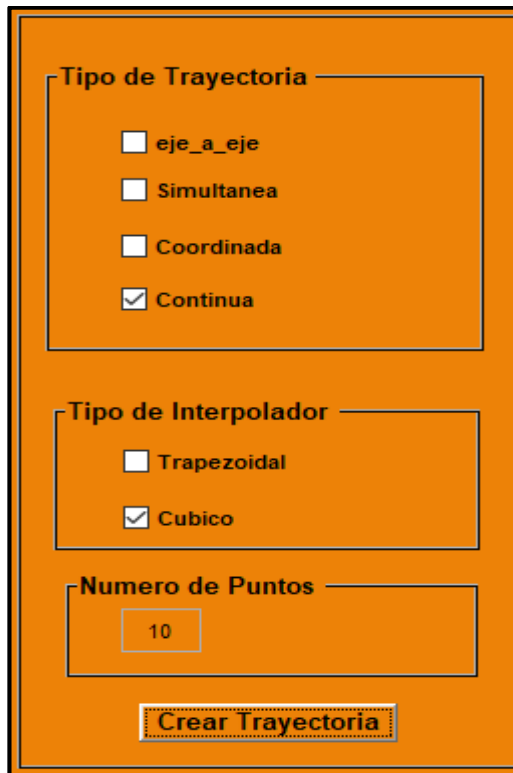
**MTH Final**

**Ingrese MTH Final**

| N | O  | A | P   |
|---|----|---|-----|
| 0 | 0  | 1 | 220 |
| 0 | -1 | 0 | -60 |
| 1 | 0  | 0 | 280 |
| 0 | 0  | 0 | 1   |

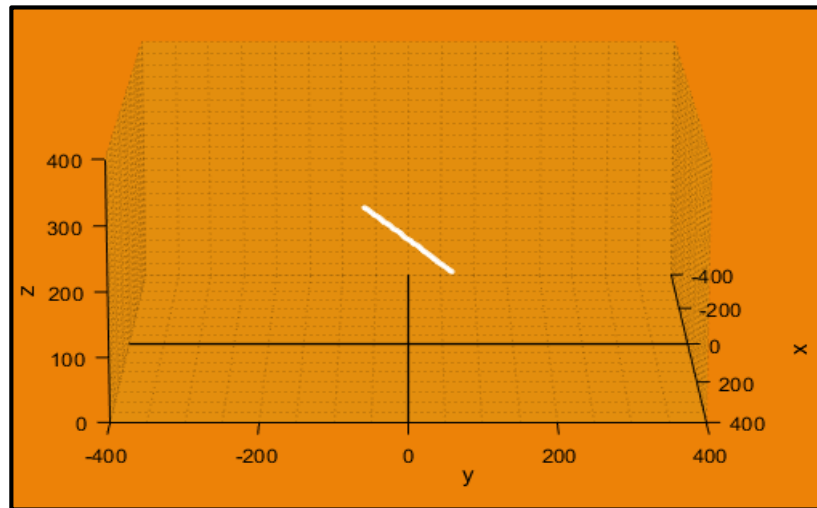
**Figura 180. Validación Trayectoria Continua (ingreso de MTHS inicial y final)**

Luego se establecen los parámetros iniciales como lo es la selección del tipo de trayectoria (Continua), el tipo de interpolador (Cubico) y el número de puntos para la interpolación entre ellos como se observa en la Figura 181.

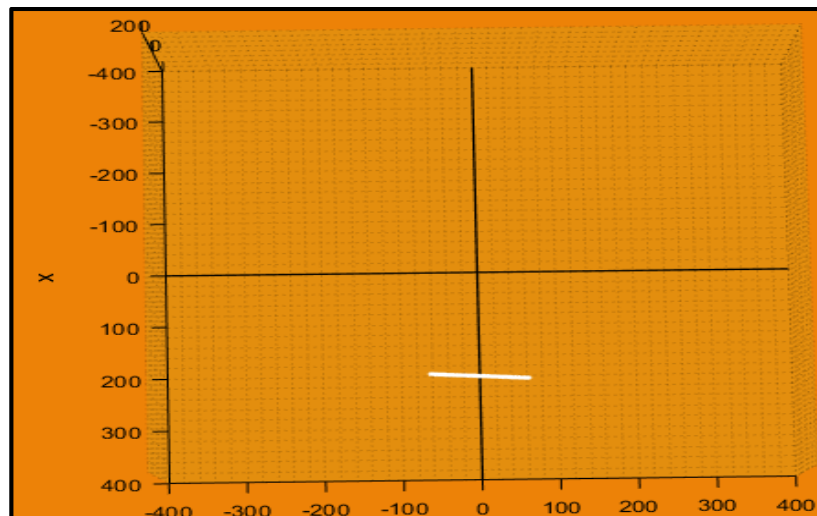


**Figura 181.**Validación Trayectoria Continua (selección de parámetros iniciales)

Con la opción “Crear Trayectoria” esta será calculada con los valores ingresados por el usuario anteriormente, lo cual me representa la trayectoria a seguir del manipulador como se observa en la Figura 182-Figura 183.

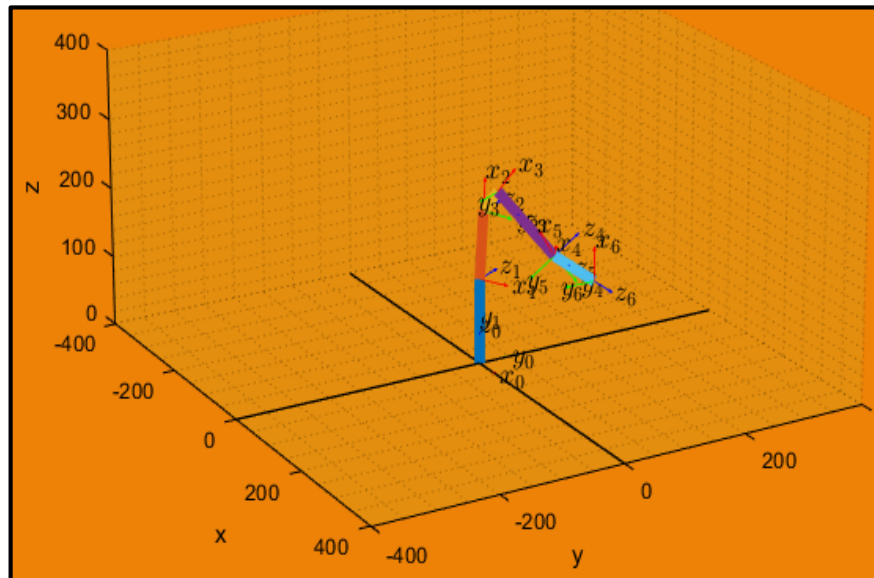


**Figura 182. Validación Trayectoria Continua (crear trayectoria vista frontal)**

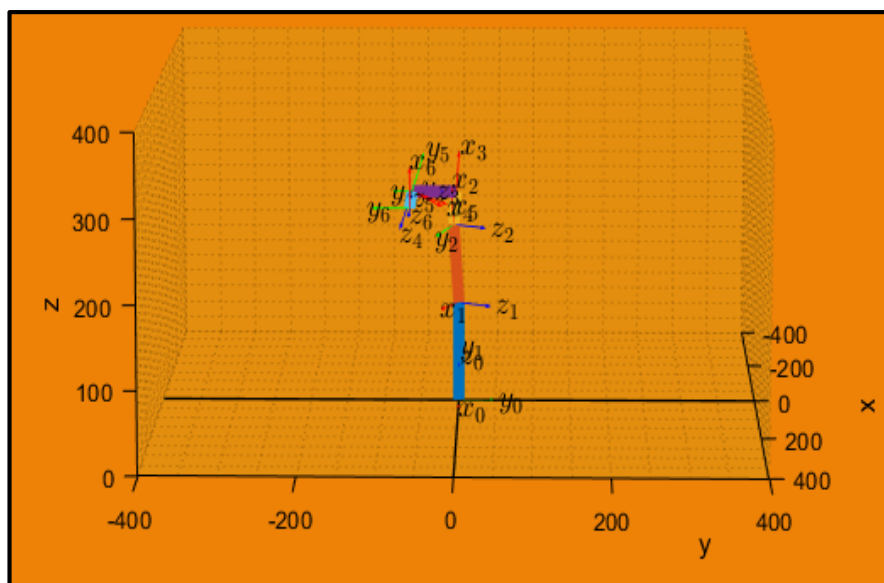


**Figura 183. Validación Trayectoria Continua (crear trayectoria vista superior)**

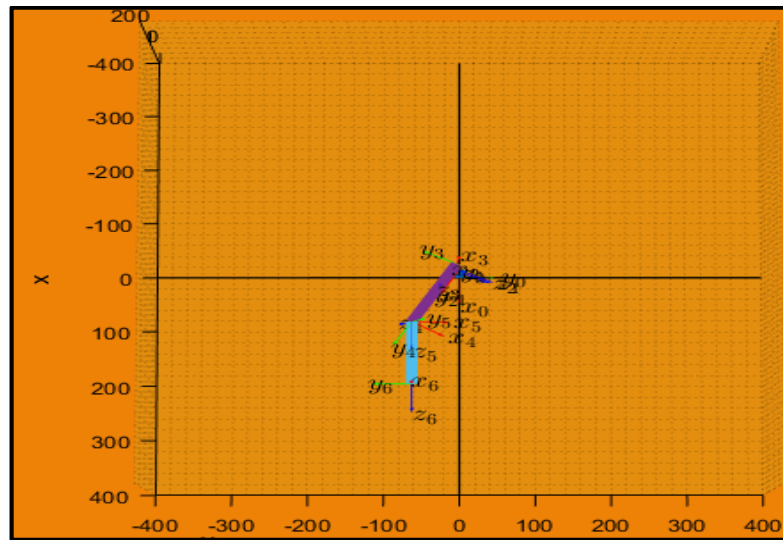
con la creación de la trayectoria se procede a la ejecución de la animación, en el cual se observará de manera 3d el movimiento del manipulador tanto de su posición inicial (Figura 184) y final (Figura 185-Figura 186), como se observaría en el cuándo se requiera implementar esta trayectoria en el manipulador real.



**Figura 184. Validación Trayectoria Continua (posición inicial)**

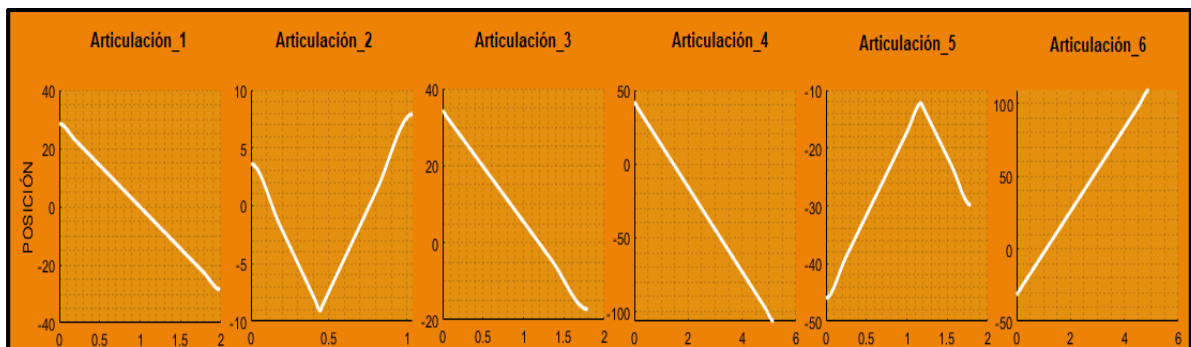


**Figura 185. Validación Trayectoria Continua (posición final-vista frontal)**



**Figura 186. Validación Trayectoria Continua (posición final-vista superior)**

Después de la ejecución de la animación se procede a analizar y visualizar las gráficas de cada articulación tanto en las posiciones que tuvo que hacer para cumplir dicha trayectoria como se observa en la Figura 187, esto se hace con el fin de validar tanto los valores inicial y final de cada articulación, cuyos datos fueron ingresados por el usuario.



**Figura 187. Validación Trayectoria Continua (análisis de trayectoria)**

con la animación de cómo quedaría el manipulador, se procede hacer la realización de la ejecución en el manipulador, en el cual basándose del vector de posición de la MTH final ingresada se procede a tomar las medidas reales, una vez ejecutada en el manipulador, esto se hace como medio de verificación dándonos la validación de la generación de trayectoria continua como se observa en la Figura 188-Figura 189.

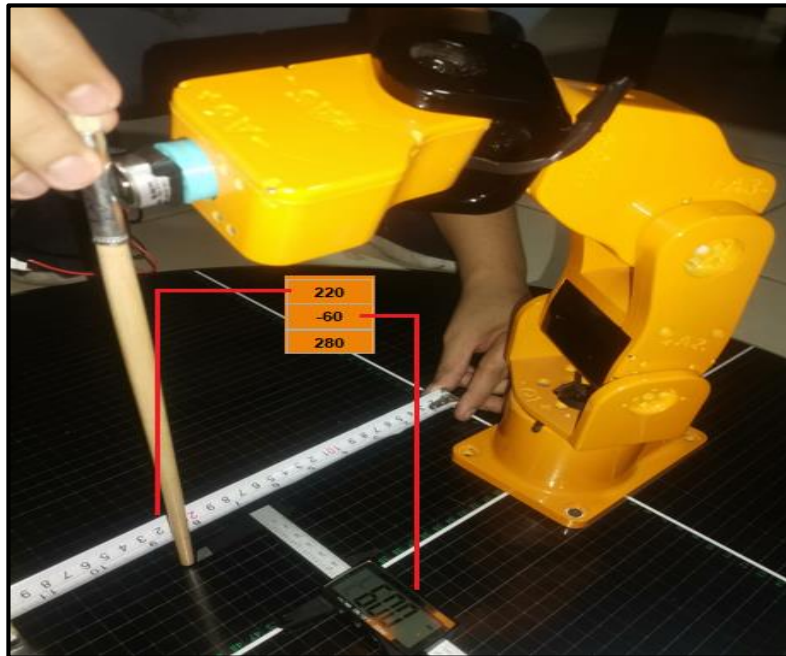


Figura 188. Validación de la Trayectoria Continua (manipulador real en X y Z)



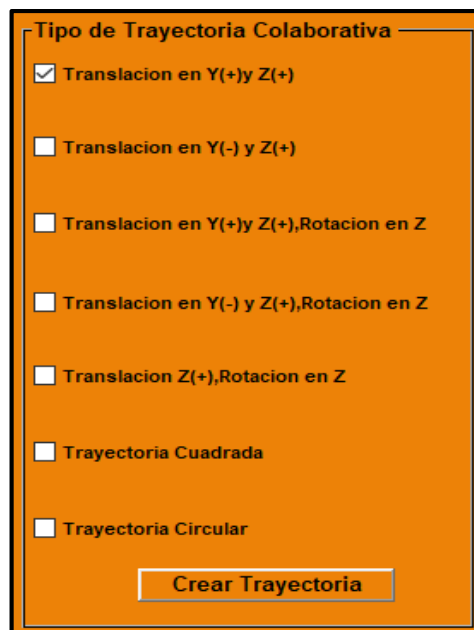
Figura 189. Validación de la Trayectoria Continua (manipulador real en y)

## 7.5 Validación de trayectorias colaborativas

En la validación de las siguientes trayectorias colaborativas, se toman como valores de entrada la MTHS iniciales y finales, las cuales me conforman todo el recorrido de dicha trayectoria colaborativa ya predefinidas dentro del código de control. Con lo cual el usuario solo debe seleccionar el tipo de trayectoria colaborativa que se quiera ejecutar.

### 7.5.1 Trayectoria colaborativa (translación en y (+) y z (+))

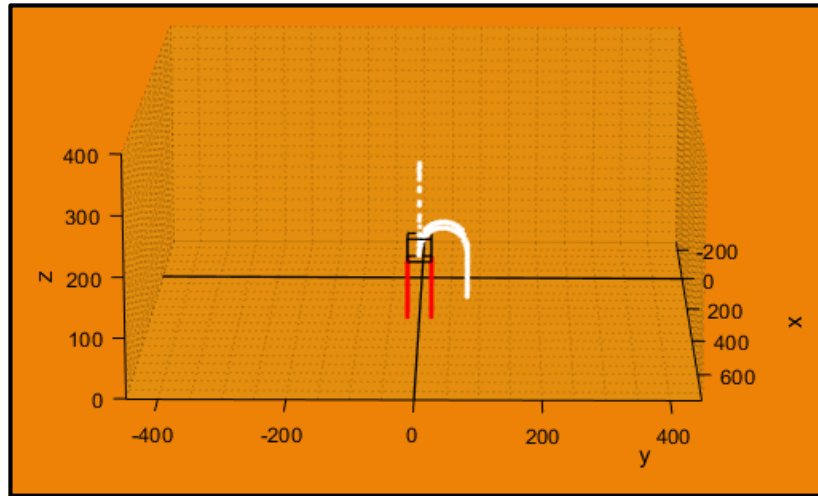
se establecen los parámetros iniciales como lo es la selección del tipo de trayectoria colaborativa, y la selección de la ubicación de la pieza se observa en la Figura 190.



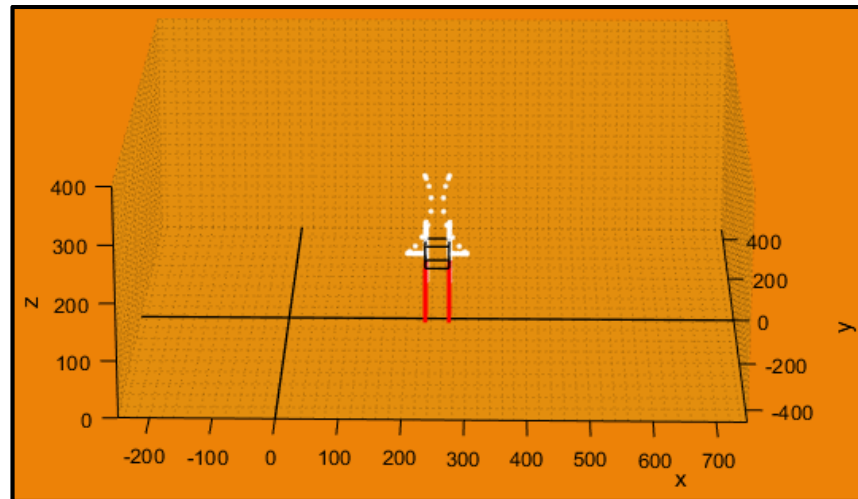
Formulario de selección de tipo de trayectoria colaborativa. El formulario tiene un título "Tipo de Trayectoria Colaborativa" y una lista de opciones con casillas de verificación. La primera opción, "Translacion en Y(+)y Z(+)", está seleccionada. Las otras opciones son: "Translacion en Y(-) y Z(+)", "Translacion en Y(+)y Z(+),Rotacion en Z", "Translacion en Y(-) y Z(+),Rotacion en Z", "Translacion Z(+),Rotacion en Z", "Trayectoria Cuadrada" y "Trayectoria Circular". En la parte inferior del formulario hay un botón que dice "Crear Trayectoria".

Figura 190. Trayectoria Colaborativa (Translación en Y (+) y Z (+))

Con la opción "Crear Trayectoria" esta será calculada con la opción ingresada por el usuario anteriormente, lo cual me representa la trayectoria colaborativa a seguir de los manipuladores como se observa en la Figura 191-Figura 192.

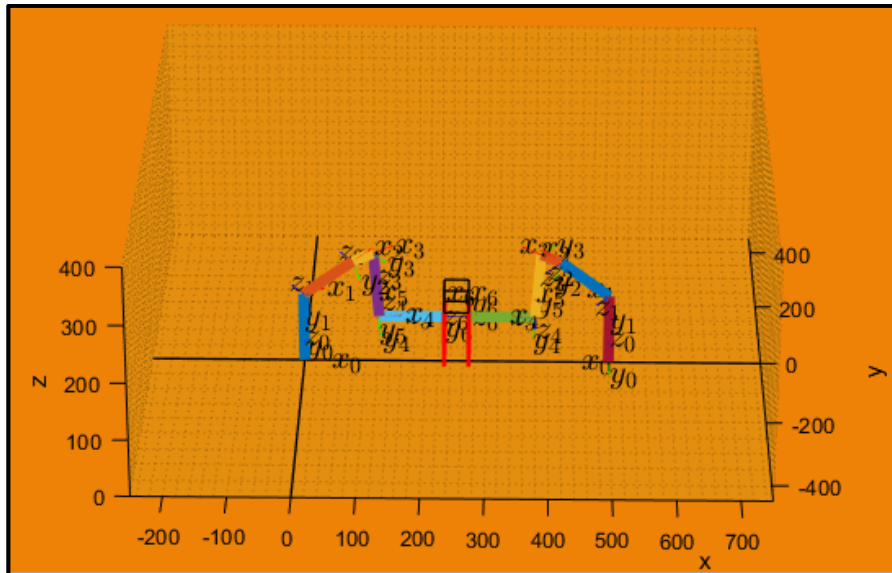
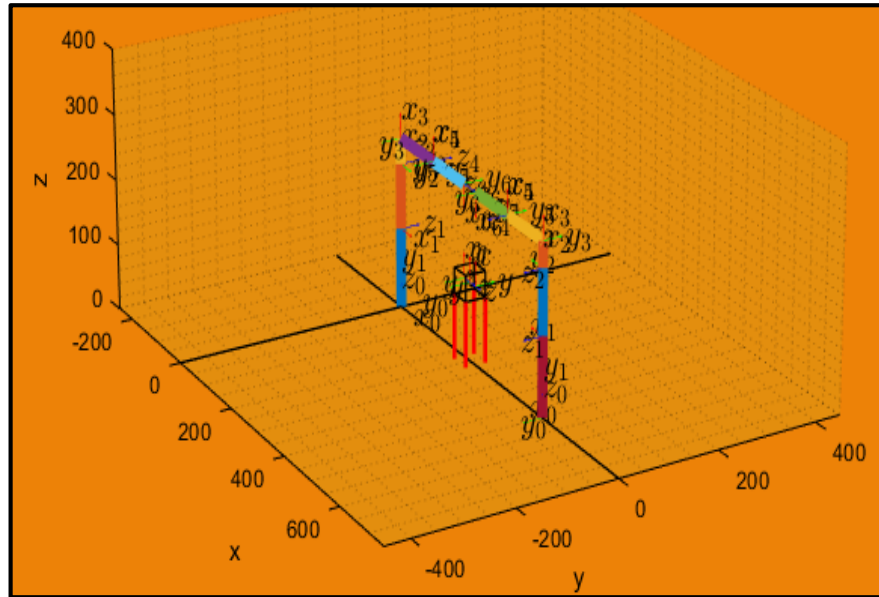


**Figura 191. Translación en Y (+) y Z (+) (vista frontal)**



**Figura 192. Translación en Y (+) y Z (+) (vista lateral)**

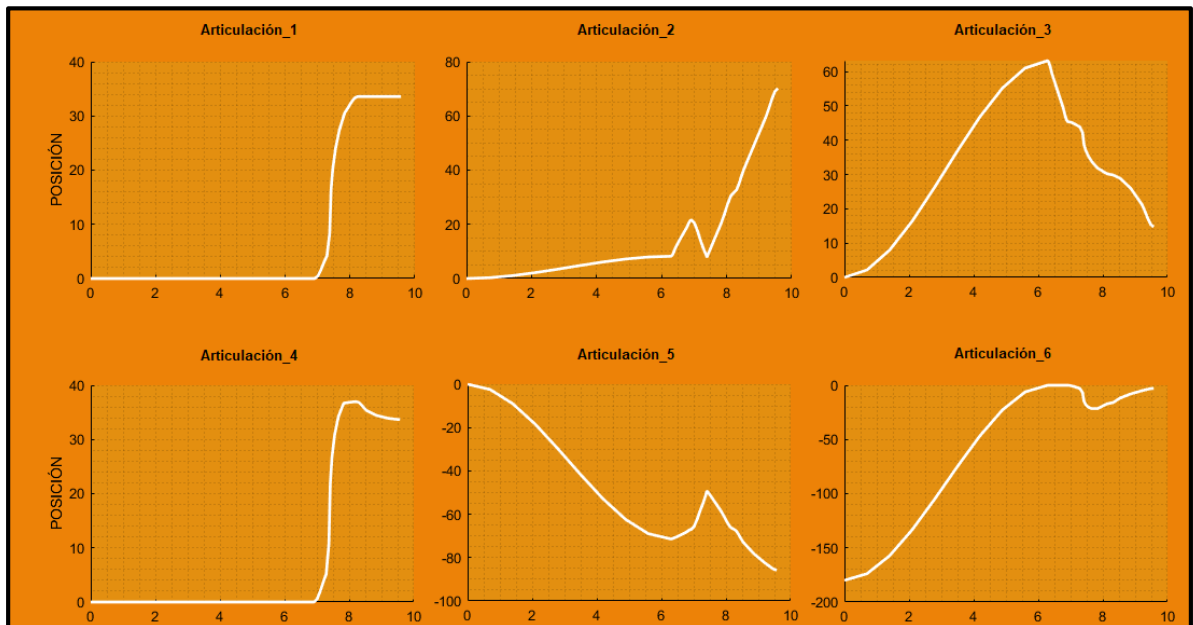
con la creación de la trayectoria se procede a la ejecución de la animación, en el cual se observará de manera 3d el movimiento del manipulador tanto de su posición inicial (Figura 193) y final (Figura 194-Figura 195), como se observaría en el cuándo se requiera implementar esta trayectoria colaborativa en el manipulador real.





**Figura 195. Posición final de los manipuladores (vista superior)**

Después de la ejecución de la animación se procede a analizar y visualizar las gráficas de cada articulación tanto en las posiciones que tuvo que hacer para cumplir dicha trayectoria como se observa en la Figura 196.



**Figura 196. Translación en Y (+) y Z (+) (Análisis de grafica)**

### 7.5.2 Trayectoria Colaborativa (translación en y (-) y z (+))

se indica los parámetros iniciales como lo es la selección del tipo de trayectoria colaborativa, y la selección de la ubicación de la pieza se observa en la Figura 197.

**Tipo de Trayectoria Colaborativa**

☐ Translacion en Y(+)y Z(+)

☒ Translacion en Y(-) y Z(+)

☐ Translacion en Y(+)y Z(+),Rotacion en Z

☐ Translacion en Y(-) y Z(+),Rotacion en Z

☐ Translacion Z(+),Rotacion en Z

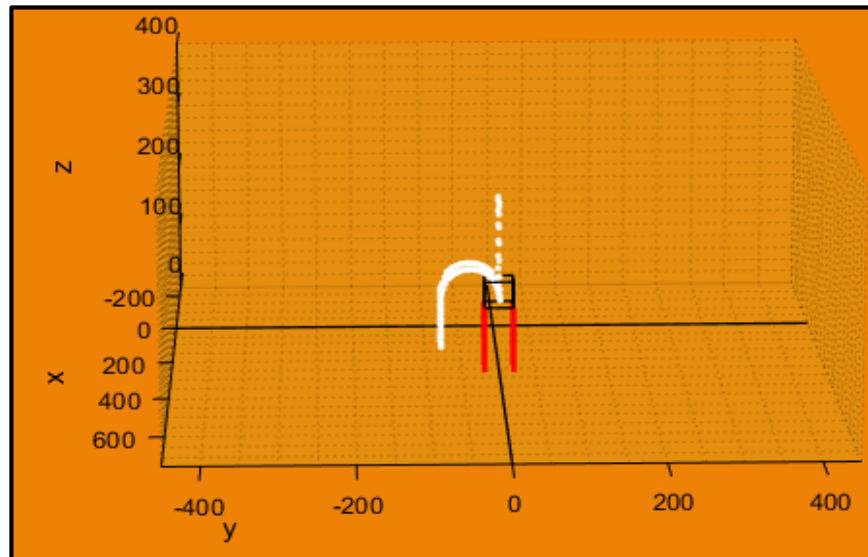
☐ Trayectoria Cuadrada

☐ Trayectoria Circular

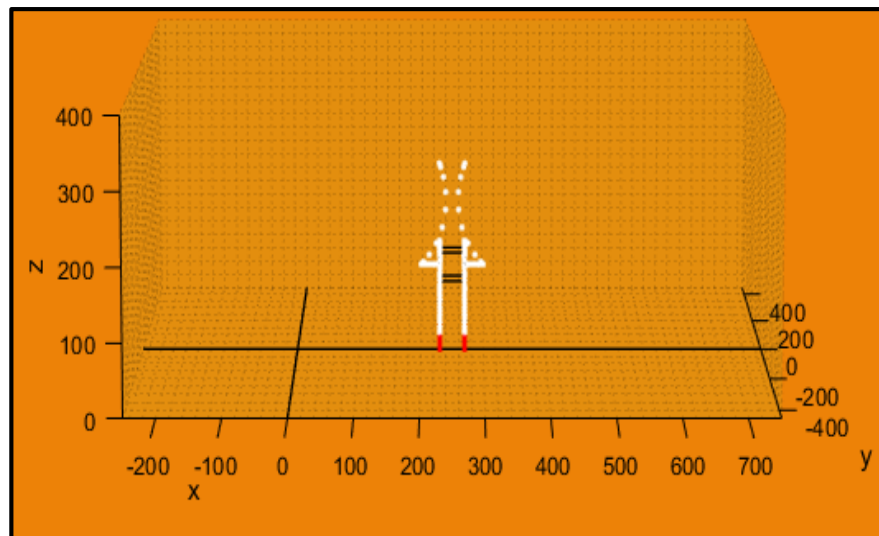
**Crear Trayectoria**

**Figura 197. Trayectoria Colaborativa (Translación en Y (-) y Z (+))**

Luego la opción “Crear Trayectoria” esta será calculada con la opción ingresada por el usuario anteriormente, lo cual me representa la trayectoria colaborativa a seguir de los manipuladores como se observa en la Figura 198-Figura 199.

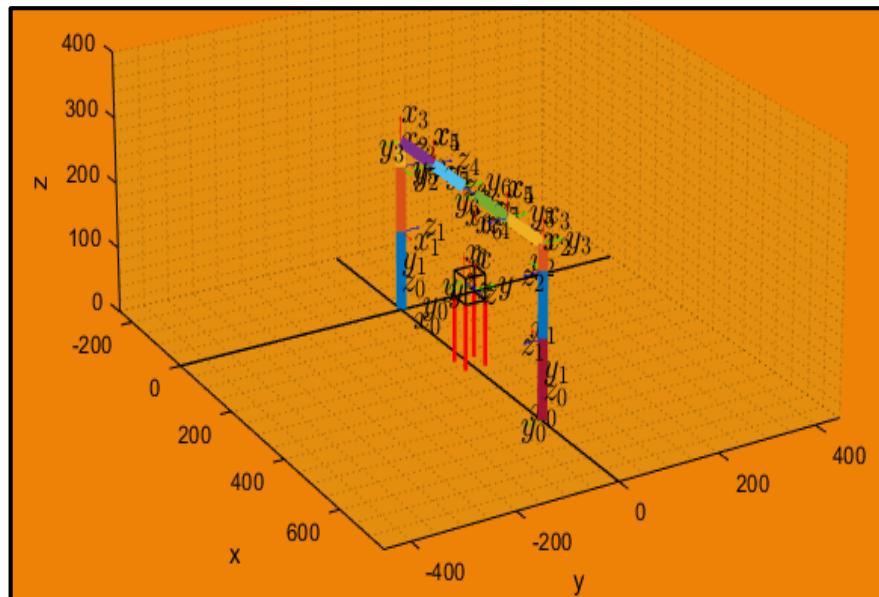


**Figura 198. Translación en Y (-) y Z (+) (vista frontal)**

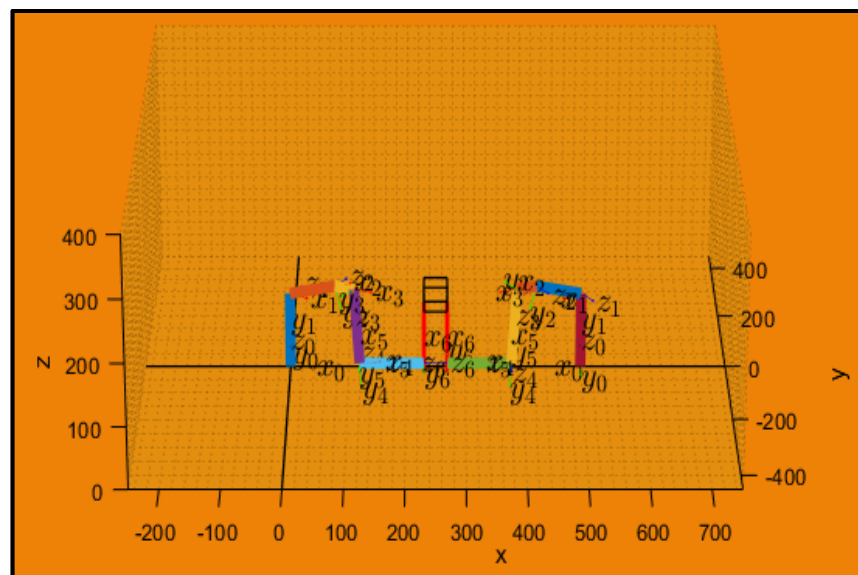


**Figura 199. Translación en Y (-) y Z (+) (vista lateral)**

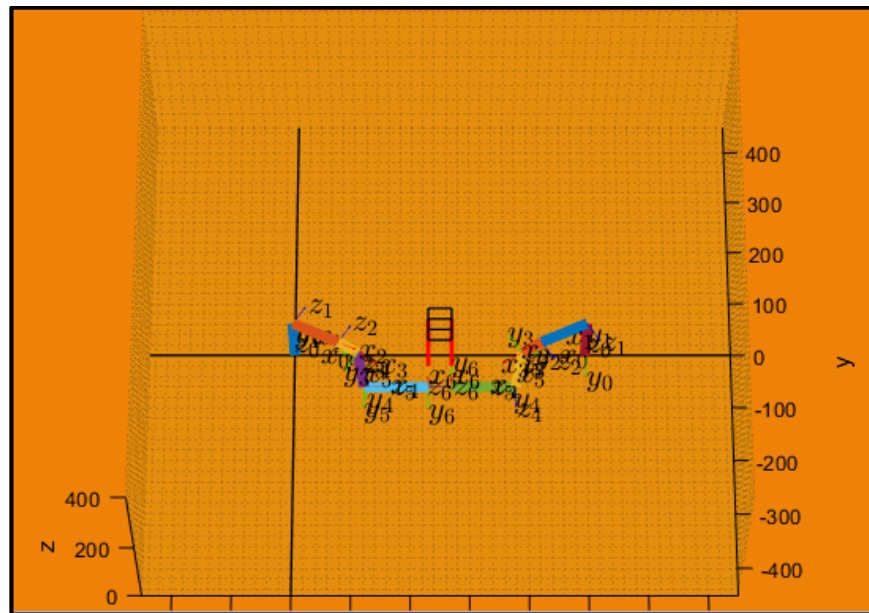
con la creación de la trayectoria se procede a la ejecución de la animación, en el cual se observará de manera 3d el movimiento del manipulador tanto de su posición inicial (Figura 200) y final (Figura 201-Figura 202), como se observaría en el cuándo se requiera implementar esta trayectoria colaborativa en el manipulador real.



**Figura 200. Posición inicial de los manipuladores (vista lateral)**

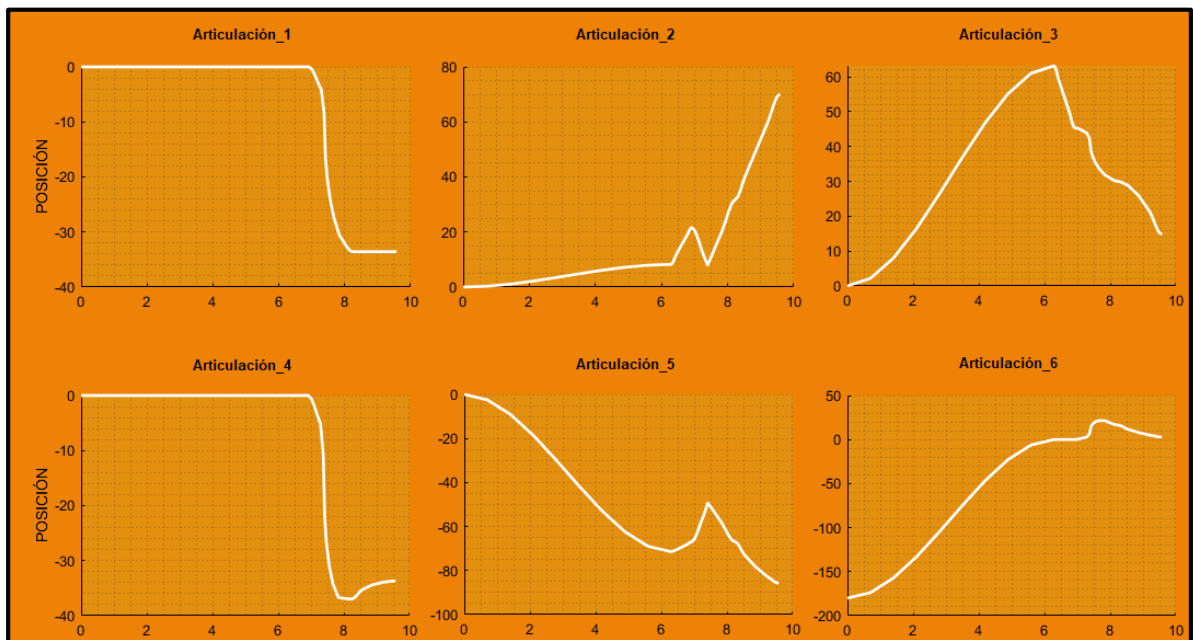


**Figura 201. Posición final de los manipuladores (vista lateral)**



**Figura 202. Posición final de los manipuladores (vista superior)**

Después de la ejecución de la animación se procede a analizar y visualizar las gráficas de cada articulación tanto en las posiciones que tuvo que hacer para cumplir dicha trayectoria como se observa en la Figura 203.



**Figura 203. Translación en Y (-) y Z (+) (Análisis de grafica)**

### 7.5.3 Trayectoria colaborativa (translación en y (+) y z (+), rotación en z)

se establecen los parámetros iniciales como lo es la selección del tipo de trayectoria colaborativa, solo que en este caso lleva una rotación en el efector final, y la selección de la ubicación de la pieza, como se observa en la Figura 204.

**Tipo de Trayectoria Colaborativa**

☐ Translacion en Y(+)y Z(+)

☐ Translacion en Y(-) y Z(+)

☒ Translacion en Y(+)y Z(+),Rotacion en Z

☐ Translacion en Y(-) y Z(+),Rotacion en Z

☐ Translacion Z(+),Rotacion en Z

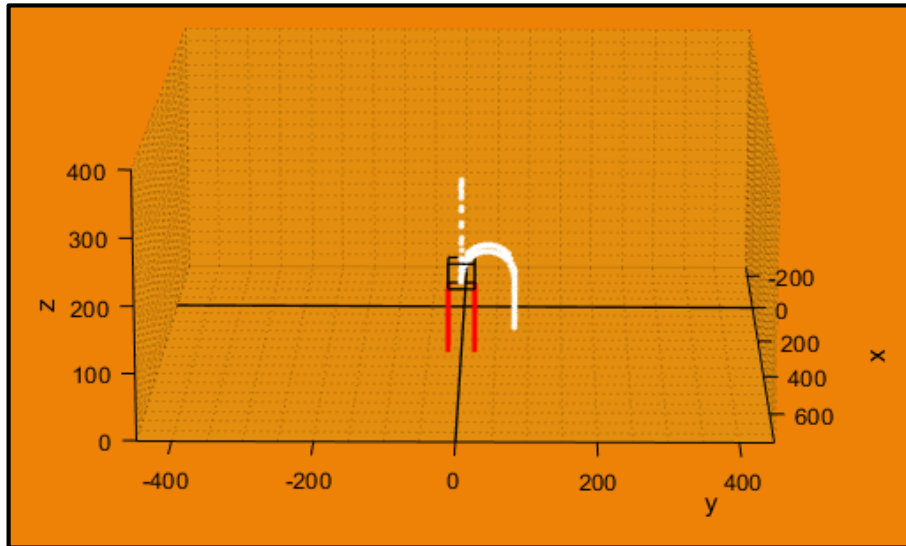
☐ Trayectoria Cuadrada

☐ Trayectoria Circular

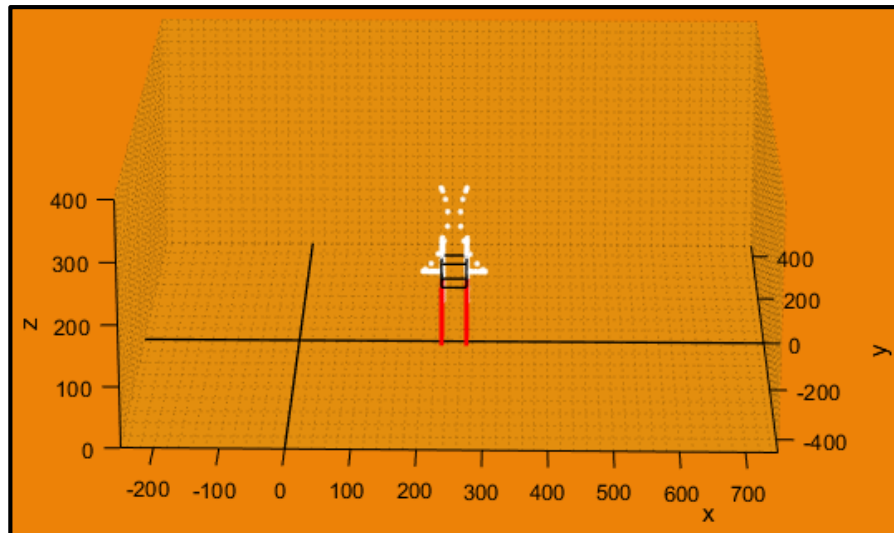
**Crear Trayectoria**

Figura 204. Trayectoria Colaborativa (Translación en Y (+) y Z (+), rotación en z)

Con la opción “Crear Trayectoria” esta será calculada con la opción ingresada por el usuario anteriormente, lo cual me representa la trayectoria colaborativa a seguir de los manipuladores como se observa en la Figura 205-Figura 206.

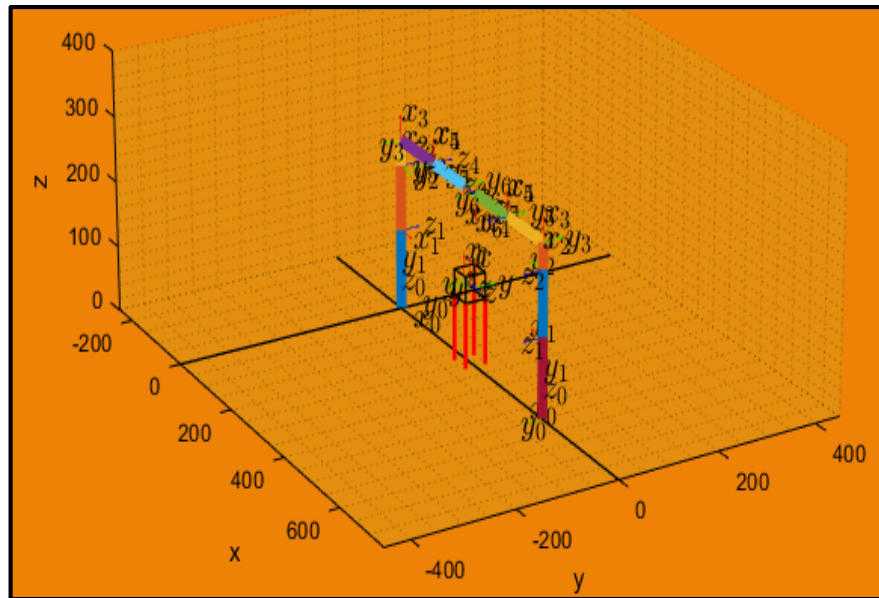


**Figura 205. Translación en Y (+) y Z (+), rotación en z (vista frontal)**

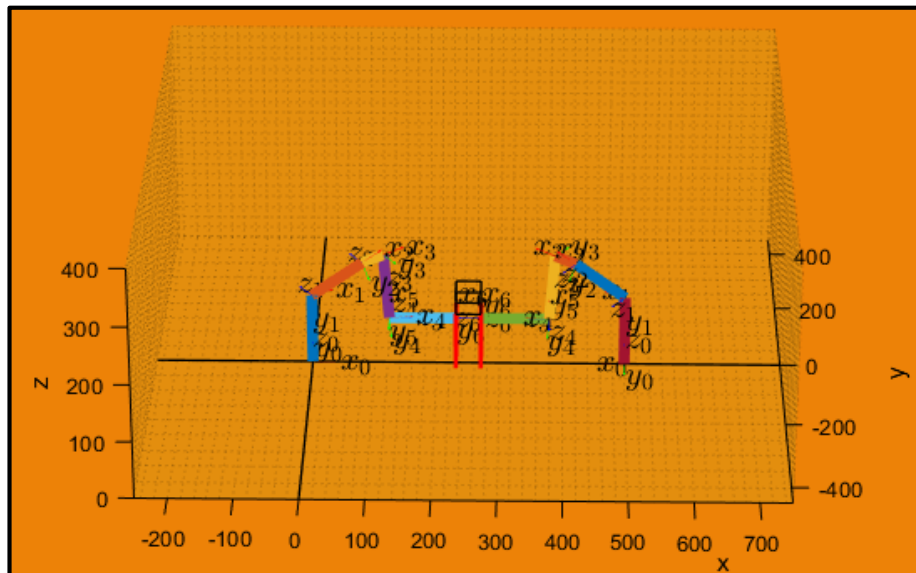


**Figura 206. Translación en Y (+) y Z (+), rotación en z (vista lateral)**

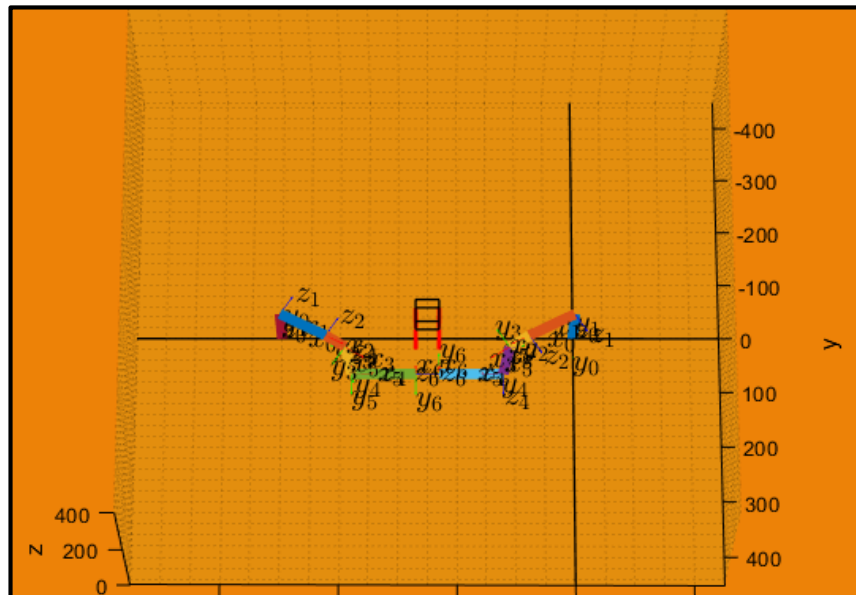
con la creación de la trayectoria se procede a la ejecución de la animación, en el cual se observará de manera 3d el movimiento del manipulador tanto de su posición inicial (Figura 207) y final (Figura 208-Figura 209), como se observaría en el cuándo se requiera implementar esta trayectoria colaborativa en el manipulador real.



**Figura 207. Posición inicial de los manipuladores (vista lateral)**

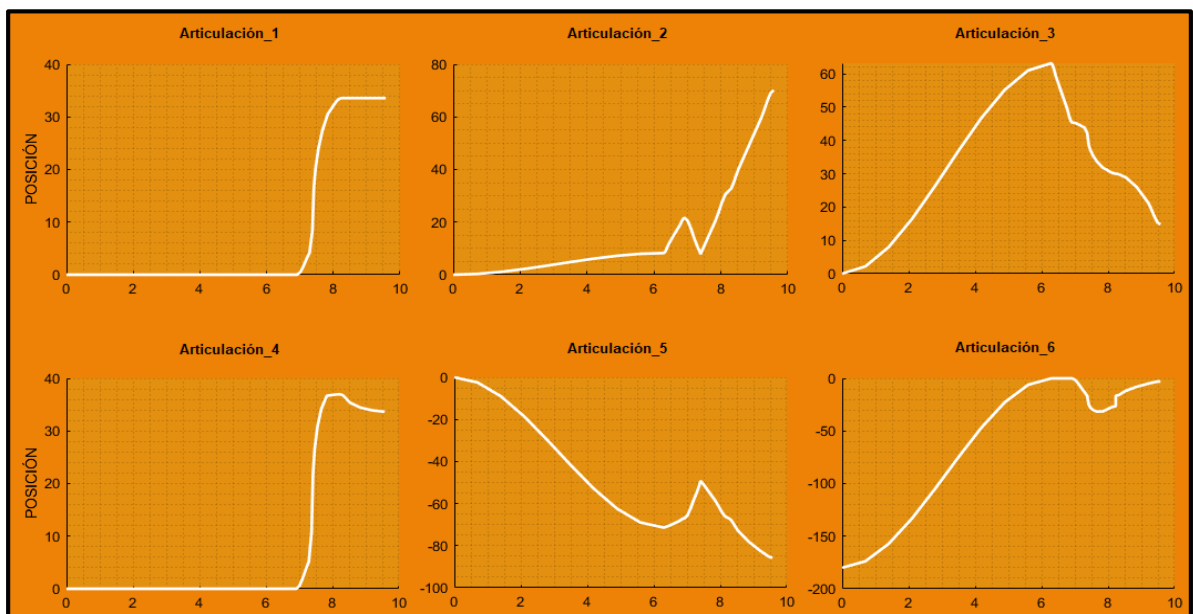


**Figura 208. Posición final de los manipuladores (vista lateral)**



**Figura 209. Posición final de los manipuladores (vista superior)**

Después de la ejecución de la animación se procede a analizar y visualizar las gráficas de cada articulación tanto en las posiciones que tuvo que hacer para cumplir dicha trayectoria como se observa en la Figura 210.



**Figura 210. Translación en Y (+) y Z (+), rotación en z (Análisis de grafica)**

#### 7.5.4 Trayectoria colaborativa (translación en y (-) y z (+), rotación en z)

indicando los parámetros iniciales, como lo es la selección del tipo de trayectoria colaborativa, y la selección de la ubicación de la pieza se observa en la Figura 211.

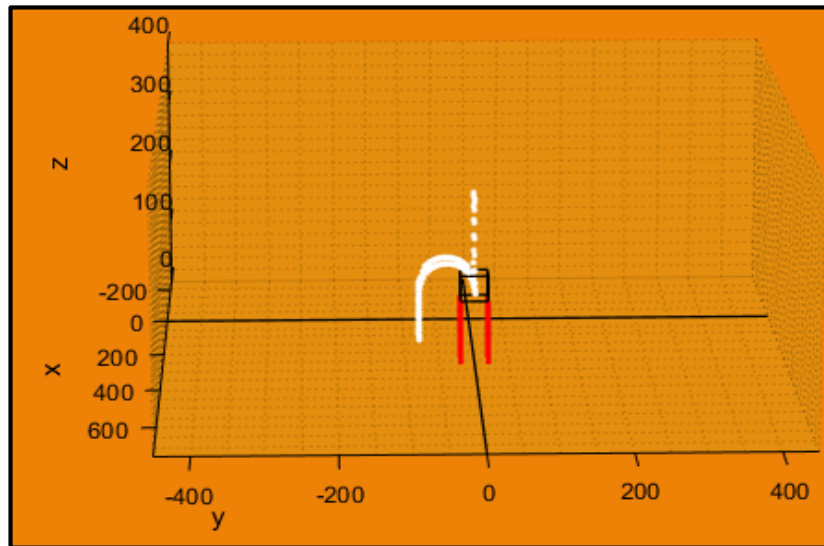
**Tipo de Trayectoria Colaborativa**

- ☐ Translación en Y(+) y Z(+)
- ☐ Translación en Y(-) y Z(+)
- ☐ Translación en Y(+) y Z(+), Rotación en Z
- ☒ Translación en Y(-) y Z(+), Rotación en Z
- ☐ Translación Z(+), Rotación en Z
- ☐ Trayectoria Cuadrada
- ☐ Trayectoria Circular

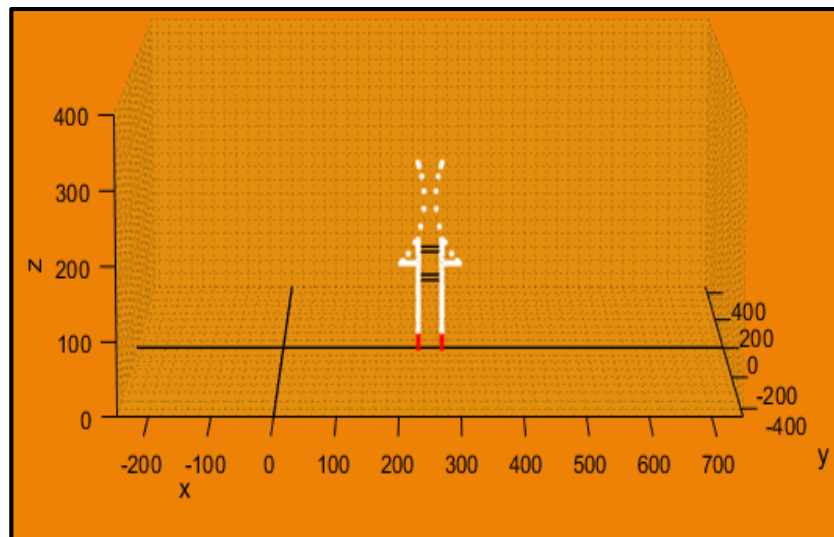
**Crear Trayectoria**

**Figura 211. Trayectoria Colaborativa (Translación en Y (-) y Z (+), rotación en z)**

Luego la opción “Crear Trayectoria” esta será calculada con la opción ingresada por el usuario anteriormente, lo cual me representa la trayectoria colaborativa a seguir de los manipuladores como se observa en la Figura 212-Figura 213 .

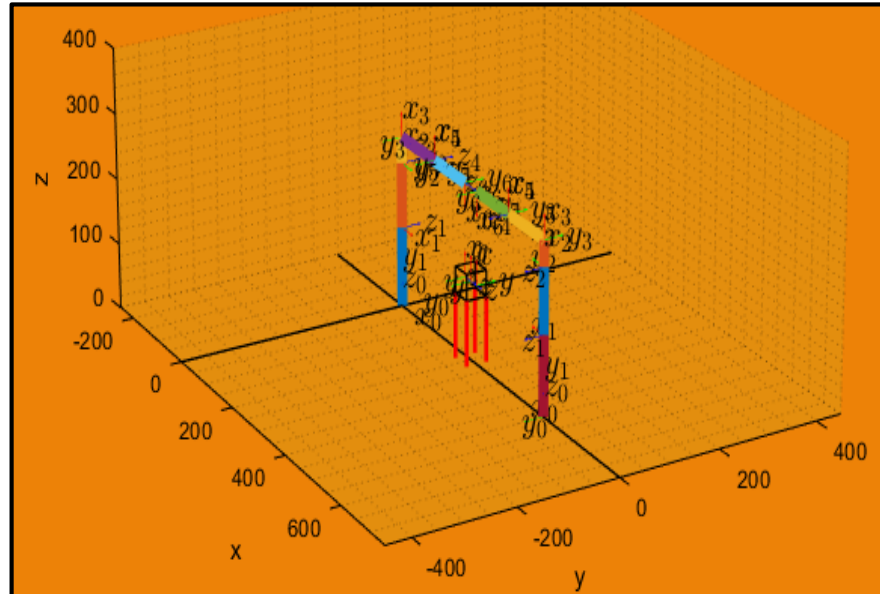


**Figura 212. Translación en Y (-) y Z (+) (vista frontal)**

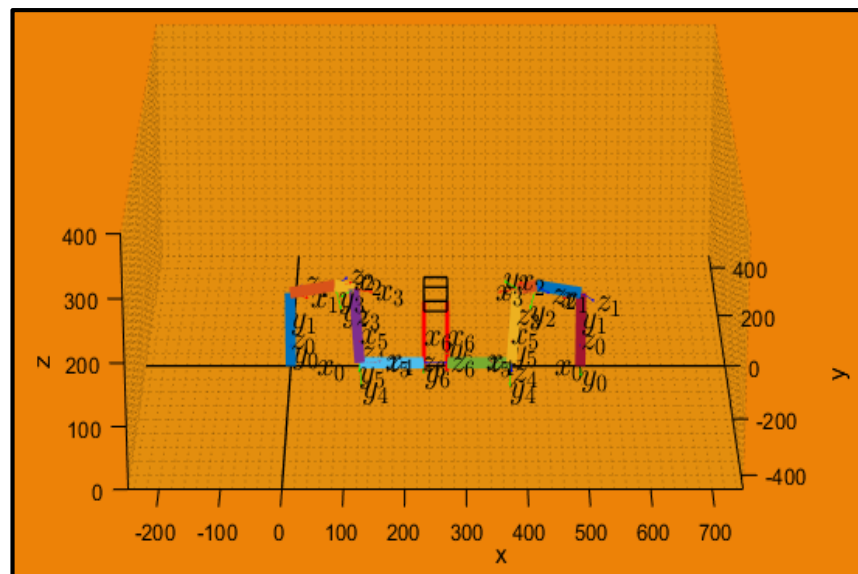


**Figura 213. Translación en Y (-) y Z (+) (vista lateral)**

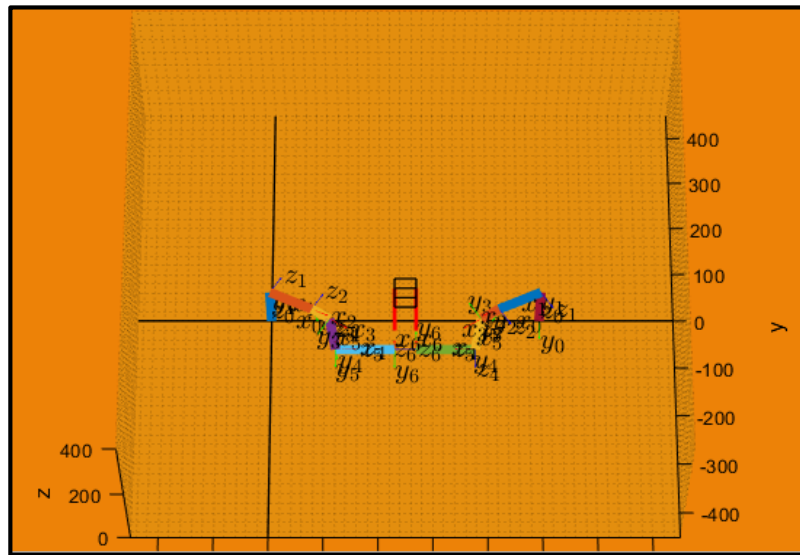
con la creación de la trayectoria se procede a la ejecución de la animación, en el cual se observará de manera 3d el movimiento del manipulador tanto de su posición inicial (Figura 214) y final (Figura 215-Figura 216), como se observaría en el cuándo se requiera implementar esta trayectoria colaborativa en el manipulador real.



**Figura 214. Posición inicial de los manipuladores (vista lateral)**

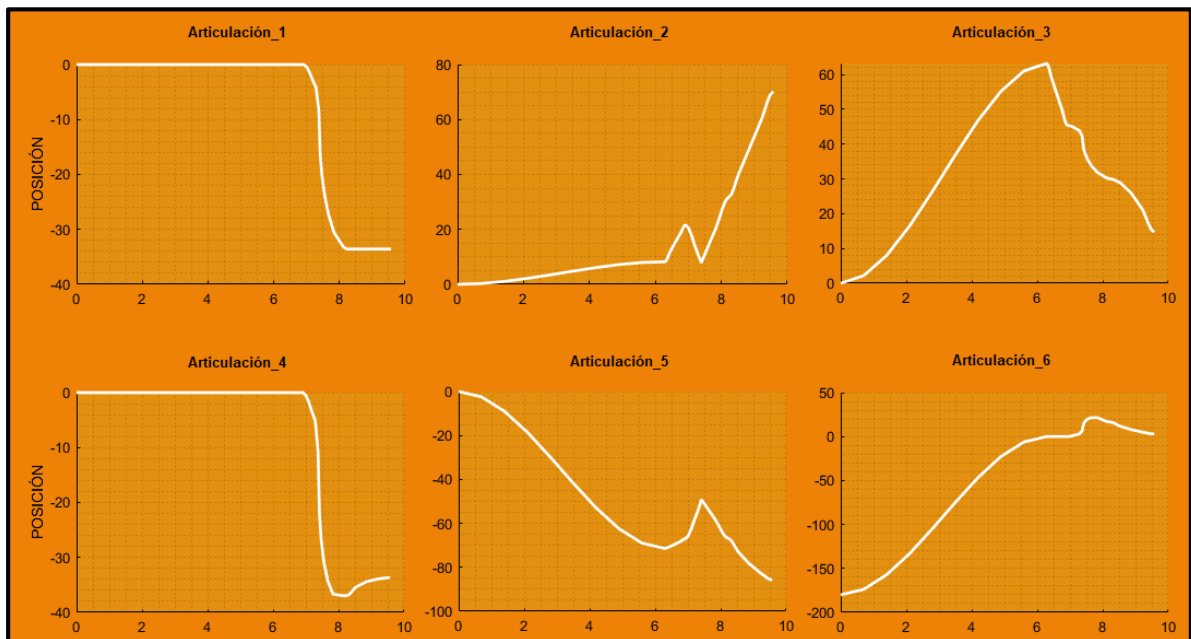


**Figura 215. Posición final de los manipuladores (vista lateral)**



**Figura 216. Posición final de los manipuladores (vista superior)**

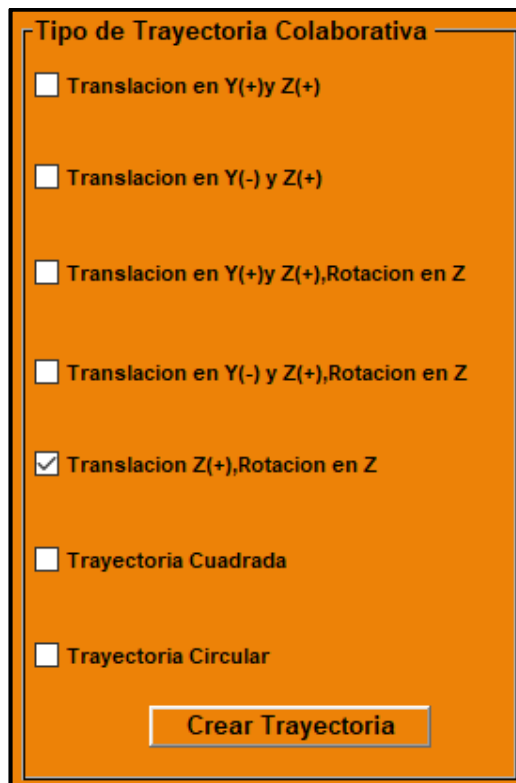
Después de la ejecución de la animación se procede a analizar y visualizar las gráficas de cada articulación tanto en las posiciones que tuvo que hacer para cumplir dicha trayectoria como se observa en la Figura 217.



**Figura 217. Translación en Y (-) y Z (+), rotación en z (Análisis de grafica)**

#### 7.5.5 Trayectoria colaborativa (translación en z (+), rotación z)

indicando los parámetros iniciales, como lo es la selección del tipo de trayectoria colaborativa, y la selección de la ubicación de la pieza se observa en la Figura 218.



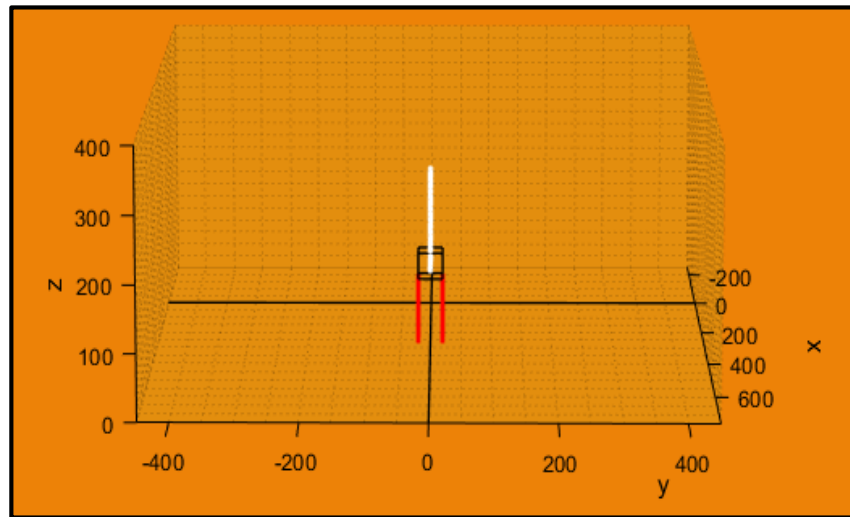
**Tipo de Trayectoria Colaborativa**

- ☐ Translacion en Y(+)y Z(+)
- ☐ Translacion en Y(-) y Z(+)
- ☐ Translacion en Y(+)y Z(+),Rotacion en Z
- ☐ Translacion en Y(-) y Z(+),Rotacion en Z
- ☒ Translacion Z(+),Rotacion en Z
- ☐ Trayectoria Cuadrada
- ☐ Trayectoria Circular

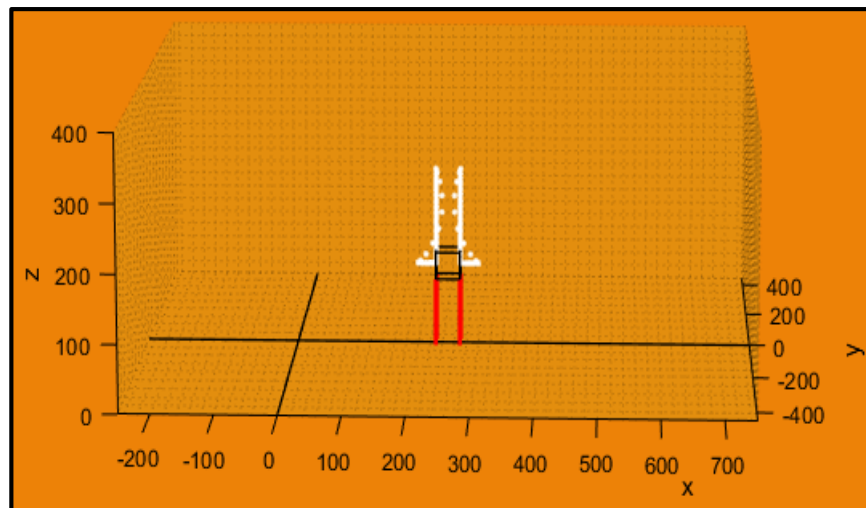
**Crear Trayectoria**

**Figura 218. Trayectoria Colaborativa (Translación en Z (+), rotación en z)**

Con la opción “Crear Trayectoria” esta será calculada con la opción ingresada por el usuario anteriormente, lo cual me representa la trayectoria colaborativa a seguir de los manipuladores como se observa en la Figura 219-Figura 220.

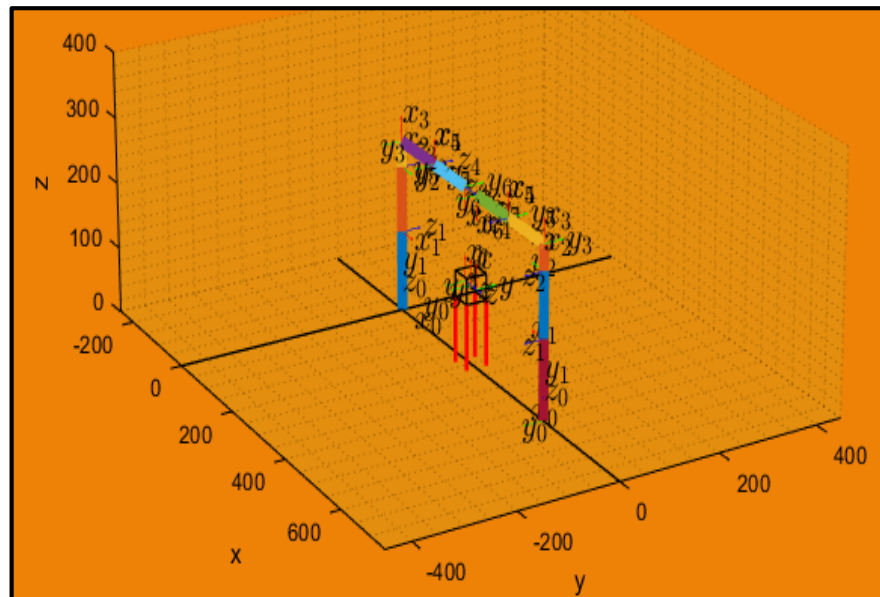


**Figura 219. Translación en Z (+), rotación en z (vista frontal)**



**Figura 220. Translación en Z (+), rotación en z (vista lateral)**

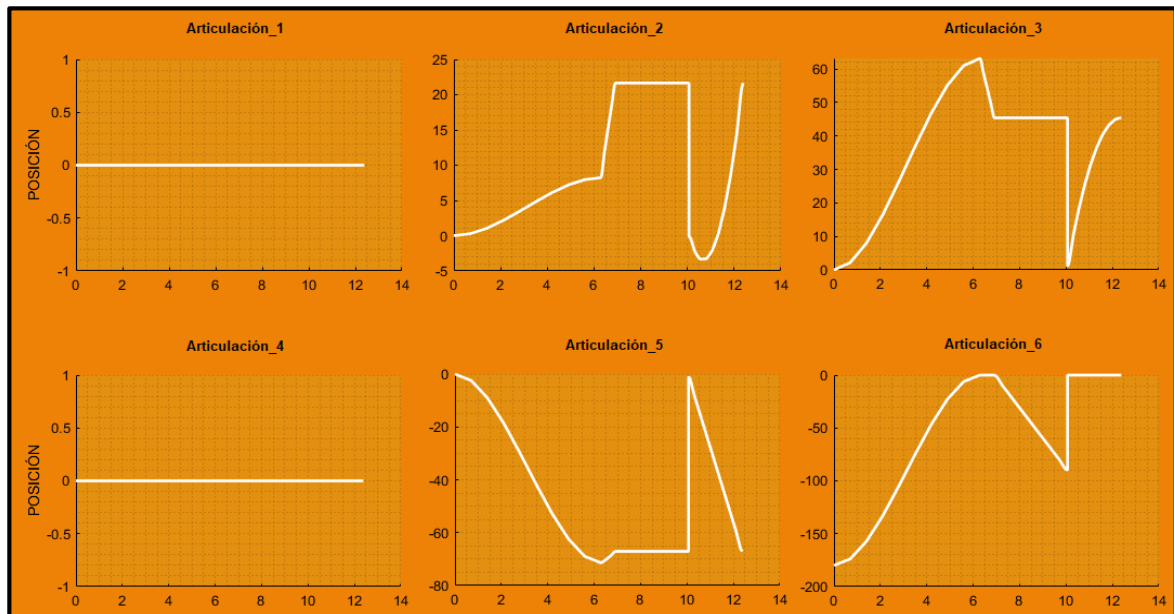
con la creación de la trayectoria se procede a la ejecución de la animación, en el cual se observará de manera 3d el movimiento del manipulador tanto de su posición inicial (Figura 221) y final (Figura 222-Figura 223), como se observaría en el cuándo se requiera implementar esta trayectoria colaborativa en el manipulador real.





**Figura 223. Posición final de los manipuladores (vista superior)**

Después de la ejecución de la animación se procede a analizar y visualizar las gráficas de cada articulación tanto en las posiciones que tuvo que hacer para cumplir dicha trayectoria como se observa en la Figura 224.



**Figura 224. Translación en Z (+), rotación en z (Análisis de grafica)**

#### 7.5.6 Trayectoria Colaborativa (Cuadrada)

Se selecciona los parámetros iniciales, como lo es la selección del tipo de trayectoria colaborativa, y la selección de la ubicación de la pieza se observa en la Figura 225.

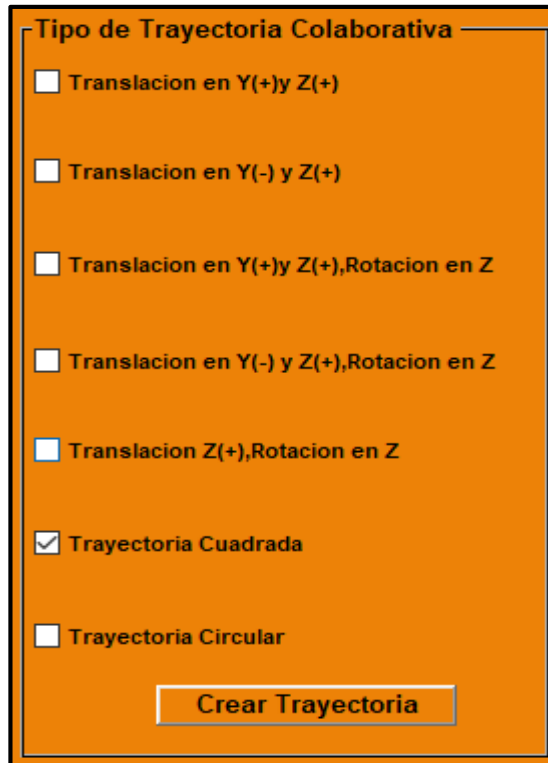
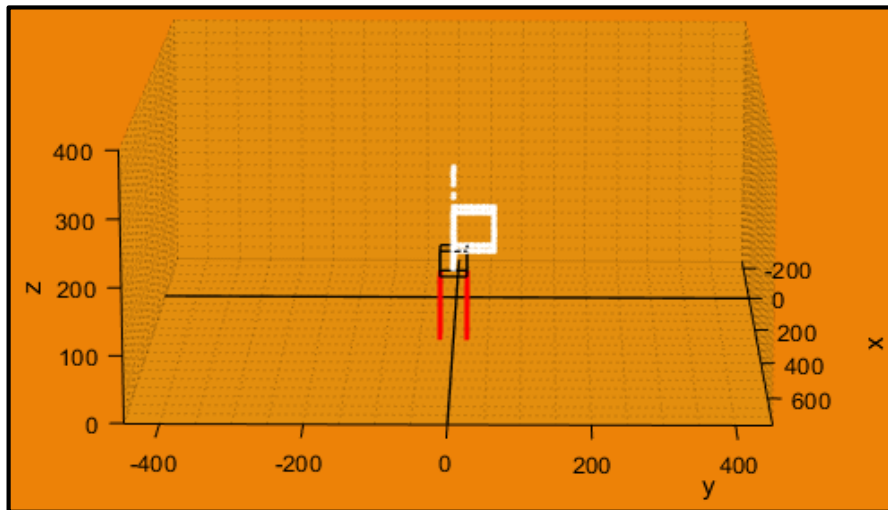
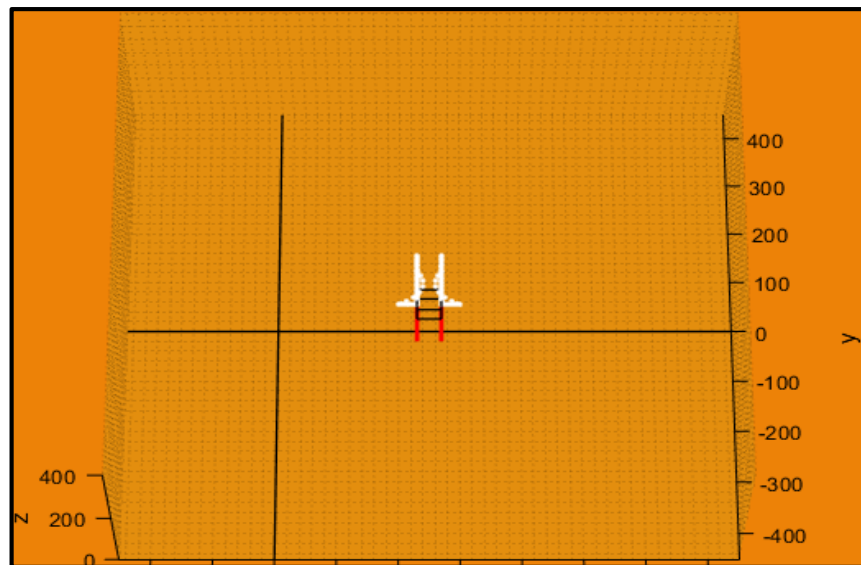


Figura 225.Trayectoria Colaborativa(Cuadrada)

Con la opción “Crear Trayectoria” esta será calculada con la opción ingresada por el usuario anteriormente, lo cual me representa la trayectoria colaborativa a seguir de los manipuladores como se observa en la Figura 226-Figura 227.

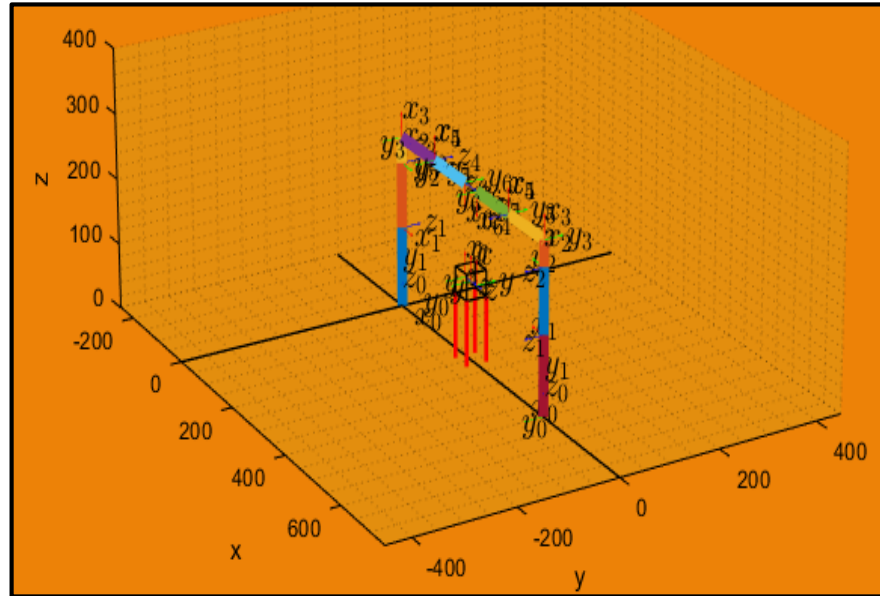


**Figura 226. Trayectoria Cuadrada (vista frontal)**

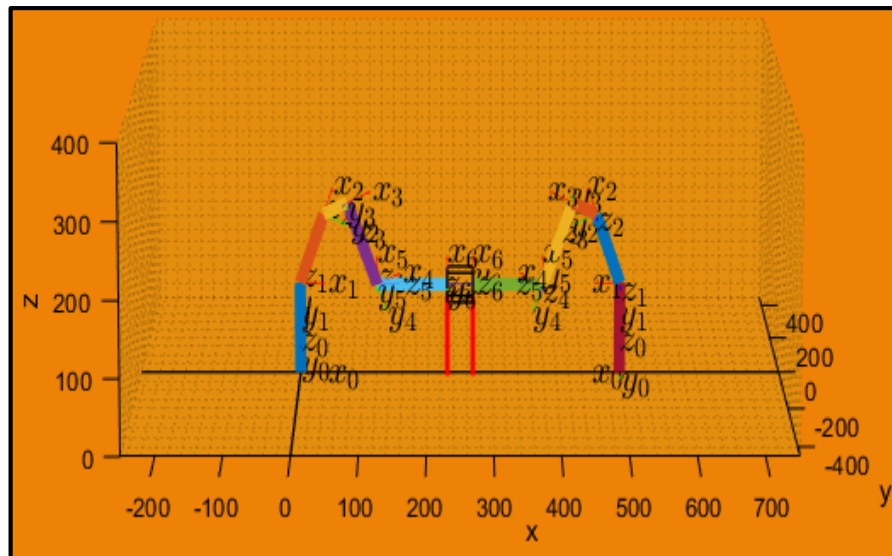


**Figura 227. Trayectoria Cuadrada (vista superior)**

con la creación de la trayectoria se procede a la ejecución de la animación, en el cual se observará de manera 3d el movimiento del manipulador tanto de su posición inicial (Figura 228) y final (Figura 229-Figura 230), como se observaría en el cuándo se requiera implementar esta trayectoria colaborativa en el manipulador real.



**Figura 228. Posición inicial de los manipuladores (vista lateral)**

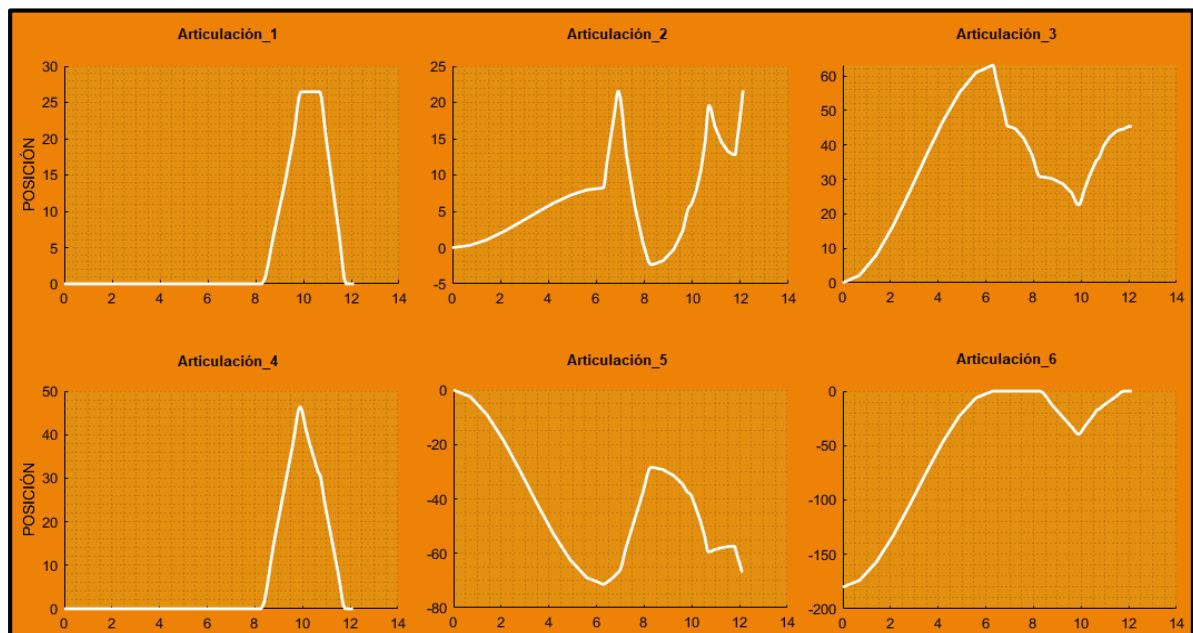


**Figura 229. Posición final de los manipuladores (vista lateral)**



**Figura 230. Posición final de los manipuladores (vista superior)**

Después de la ejecución de la animación se procede a analizar y visualizar las gráficas de cada articulación tanto en las posiciones que tuvo que hacer para cumplir dicha trayectoria como se observa en la Figura 231.



**Figura 231. Trayectoria Cuadrada (Análisis de grafica)**

*"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"*

Universidad de Pamplona  
 Pamplona - Norte de Santander - Colombia  
 Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750

### 7.5.7 Trayectoria colaborativa (circular)

Se selecciona los parámetros iniciales, como lo es la selección del tipo de trayectoria colaborativa, y la selección de la ubicación de la pieza se observa en la Figura 232.

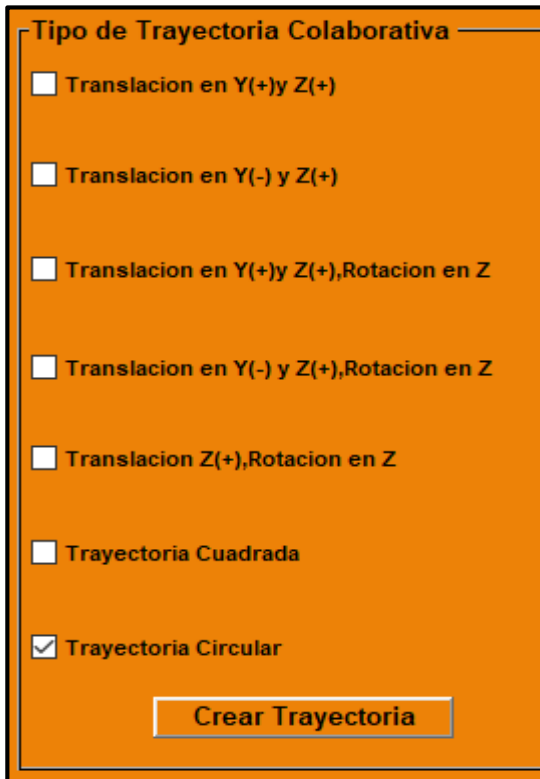
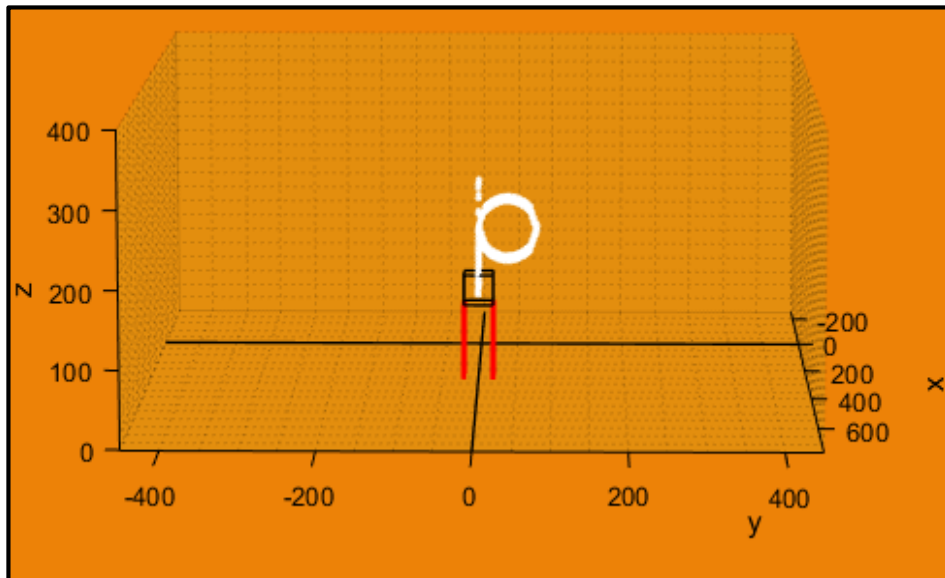
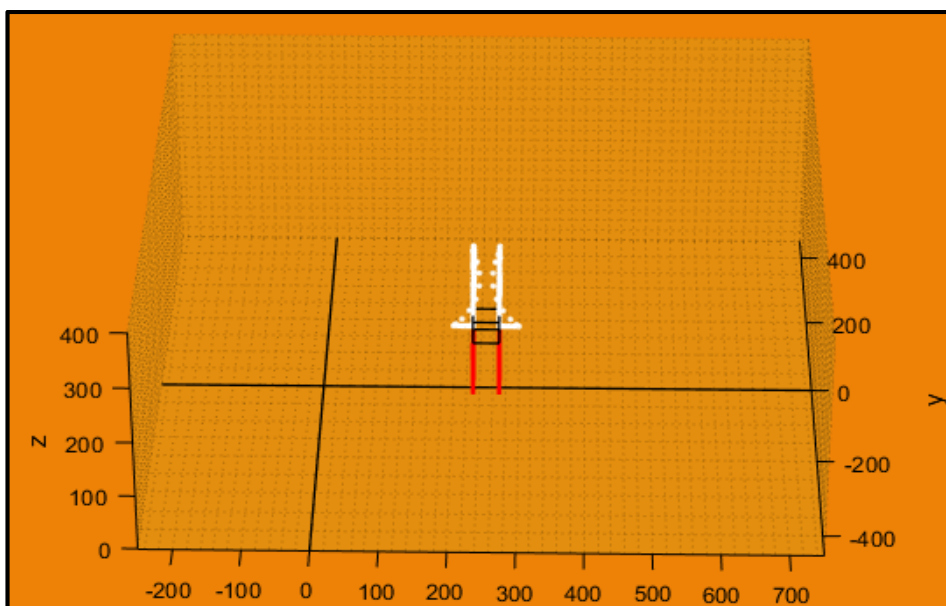


Figura 232.Trayectoria Colaborativa(Circular)

Luego en la opción “Crear Trayectoria” esta será calculada con la opción ingresada por el usuario anteriormente, lo cual me representa la trayectoria colaborativa a seguir de los manipuladores como se observa en la Figura 233-Figura 234.

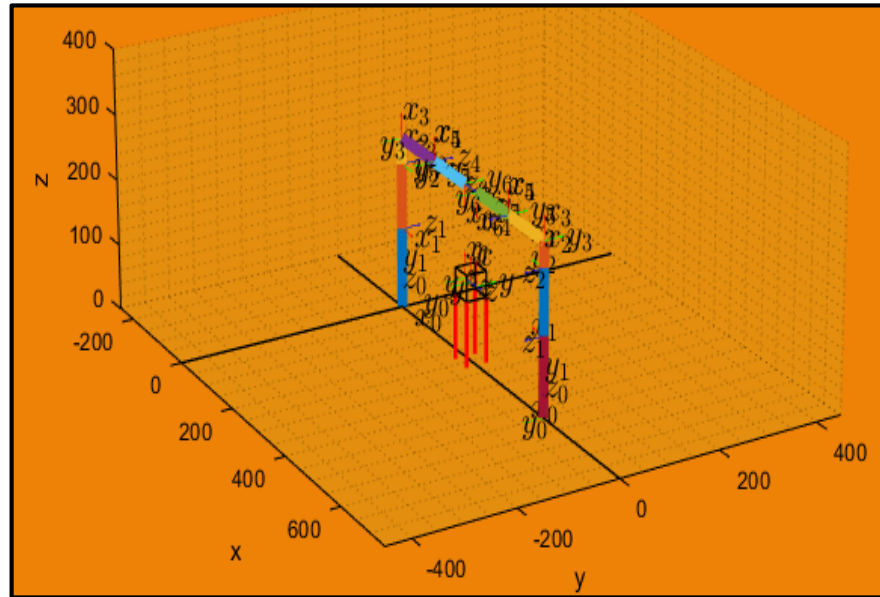


**Figura 233. Trayectoria Circular (vista frontal)**

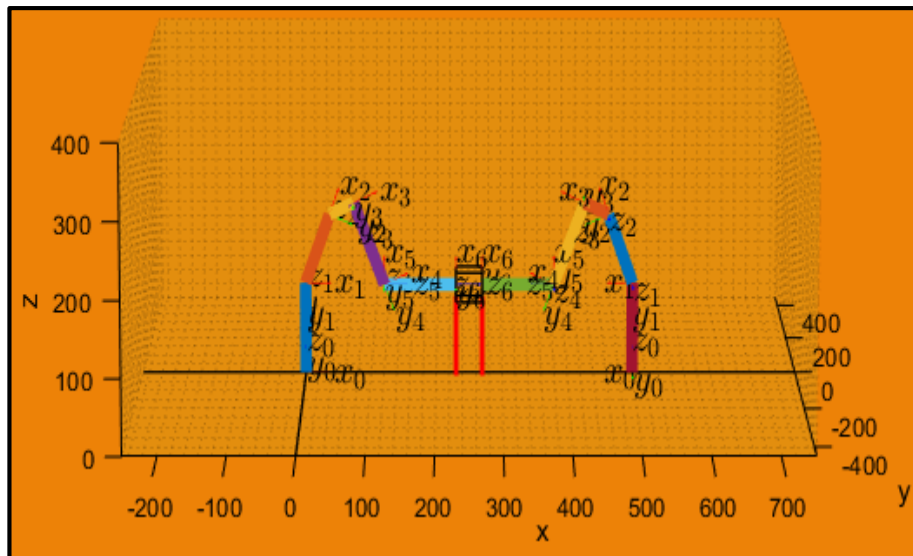


**Figura 234. Trayectoria Circular (vista superior)**

Realizada la creación de la trayectoria se procede a la ejecución de la animación, en el cual se observará de manera 3d el movimiento del manipulador tanto de su posición inicial (Figura 235) y final (Figura 236-Figura 237), como se observaría en el cuándo se requiera implementar esta trayectoria colaborativa en el manipulador real.



**Figura 235. Posición inicial de los manipuladores (vista lateral)**

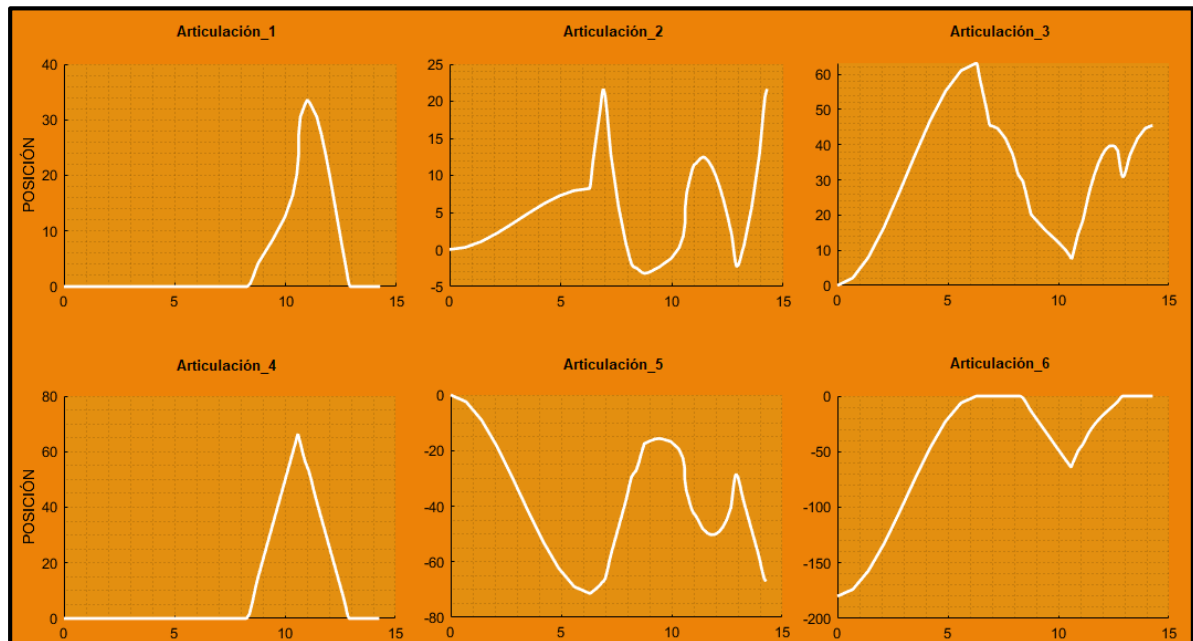


**Figura 236. Posición final de los manipuladores (vista lateral)**



**Figura 237. Posición final de los manipuladores (vista superior)**

Después de la ejecución de la animación se procede a analizar y visualizar las gráficas de cada articulación tanto en las posiciones que tuvo que hacer para cumplir dicha trayectoria como se observa en la Figura 238.



**Figura 238. Trayectoria Circular (Análisis de grafica)**

## 7.6 Validación del control dinámico (mono-articular) con el método seleccionado (tune de matlab)

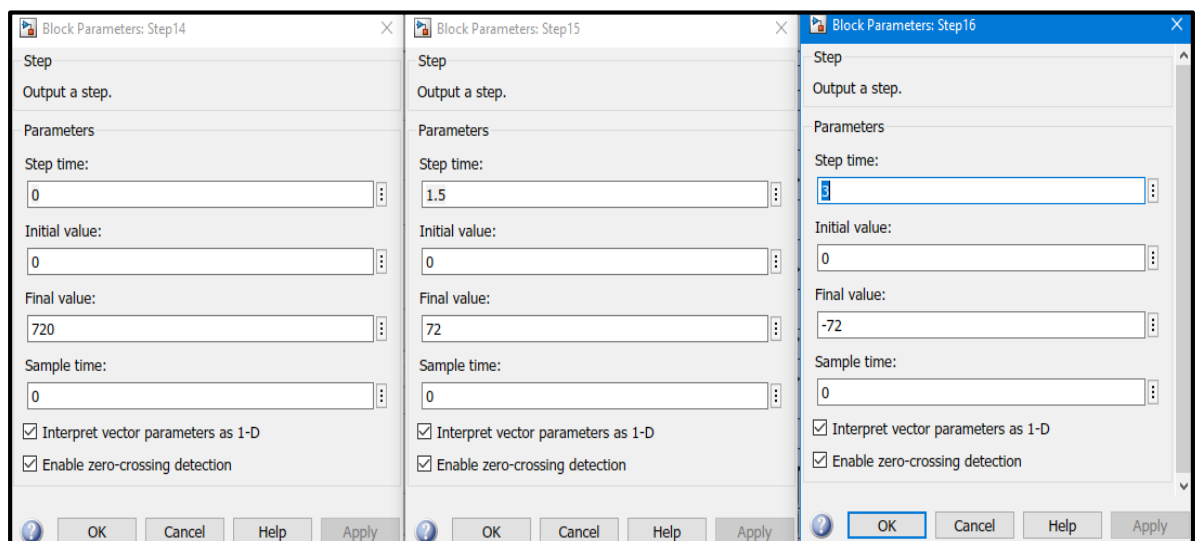
Para realizar la validación del método se usarán 2 pruebas Donde:

- la primera, aplicando perturbaciones al controlador seleccionado para observar la respuesta del sistema mediante simulink.
- la segunda se realizó directamente en los manipuladores, realizando una oposición leve(objeto) al movimiento y observando el cumplimiento del Angulo previsto, haciendo uso del mismo experimento con la data con la cual se muestreo.

### 7.6.1.1 Validación del control dinámico manipulador 1

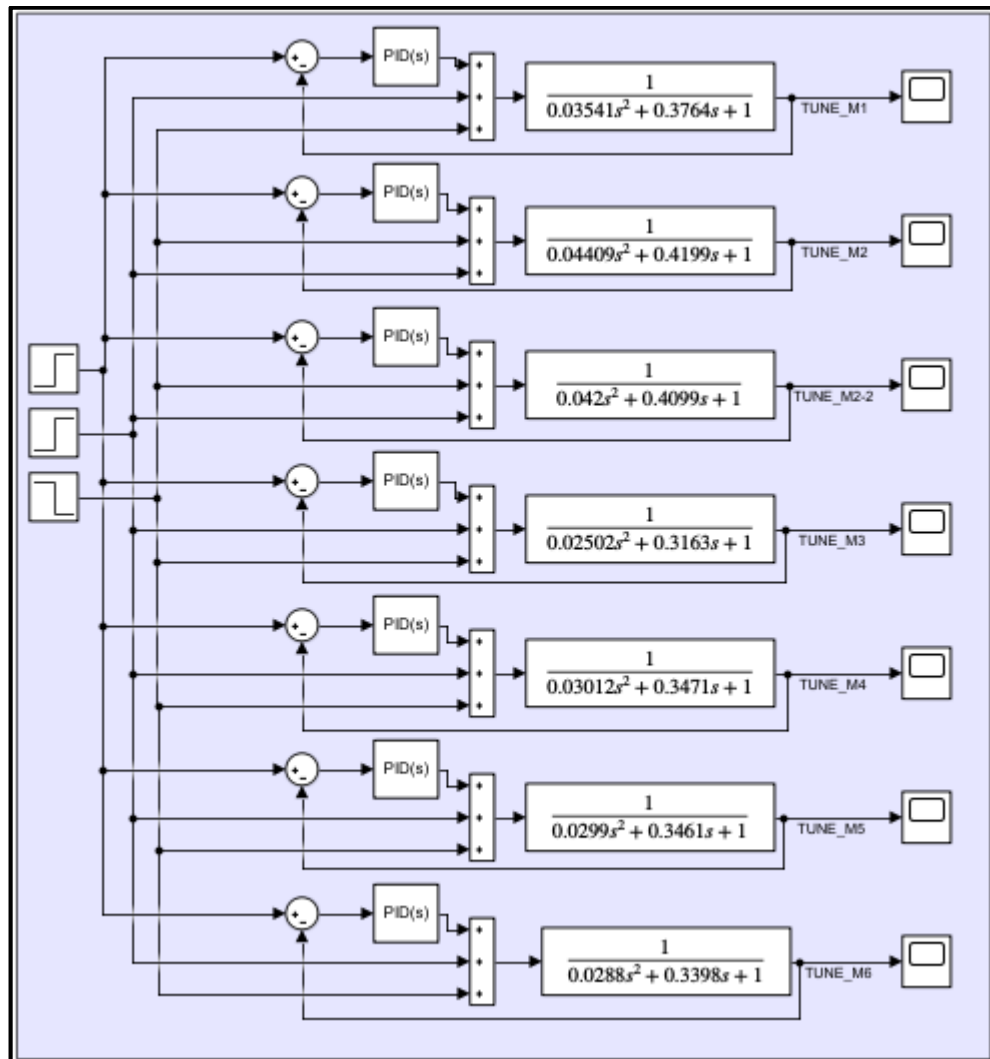
**Método 1:** Validación del sistema aplicando perturbación, usando Simulink Matlab

Donde se aplica un setpoint de 720 y una perturbación del 10% positivo y negativo.



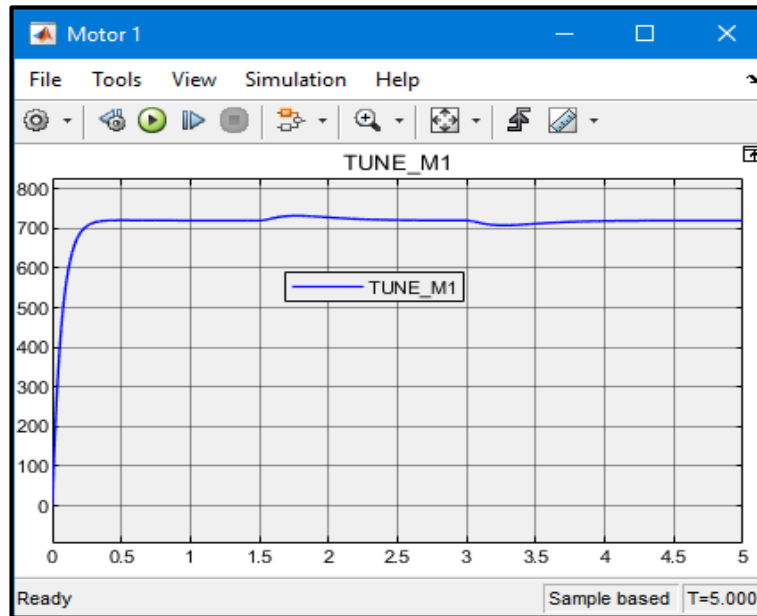
**Figura 239. Setpoints de validación del manipulador 1**

Para ello se organiza de este modo como se observa en Figura 240, para hacer la realización de la validación de manera simultánea donde se analizará el comportamiento del controlador de cada una de la planta.



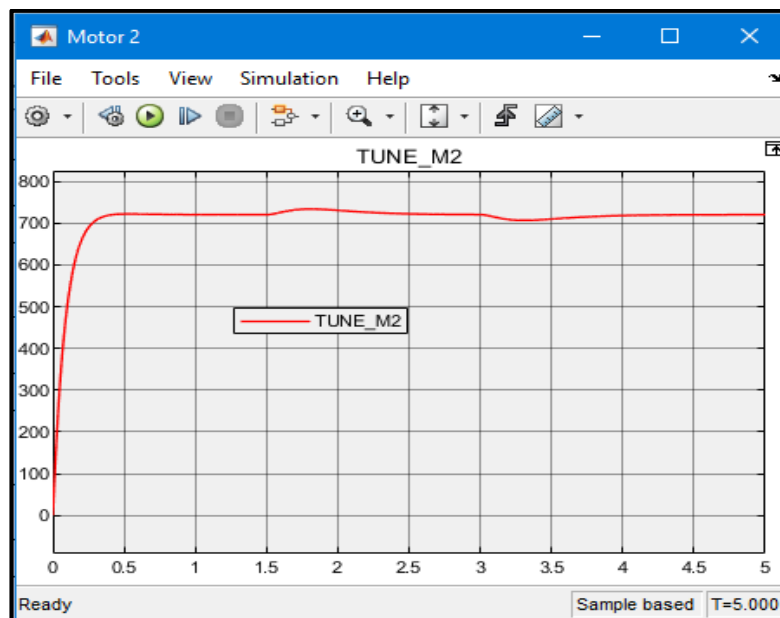
**Figura 240. Diagrama de bloques de las plantas que componen el manipulador 1**

## Motor 1



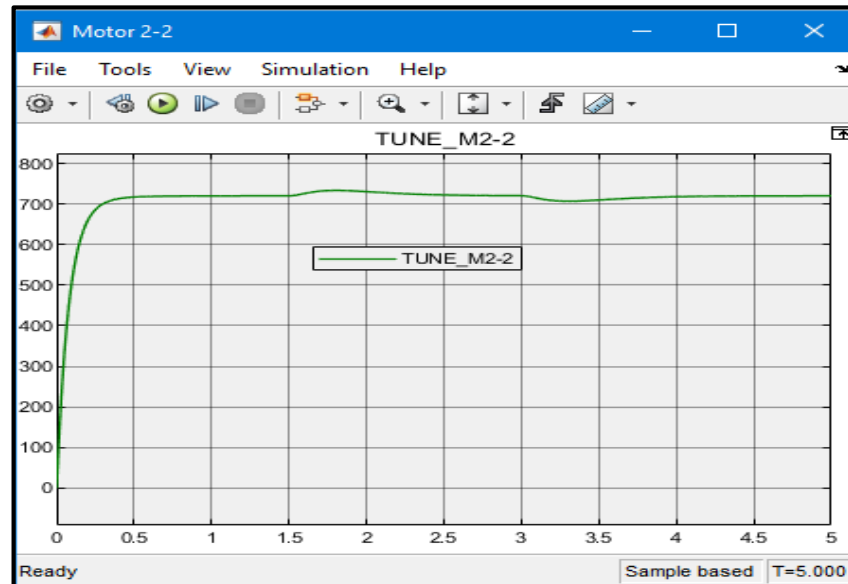
**Grafica 59. Salida de control del motor 1 ante perturbaciones**

## Motor 2



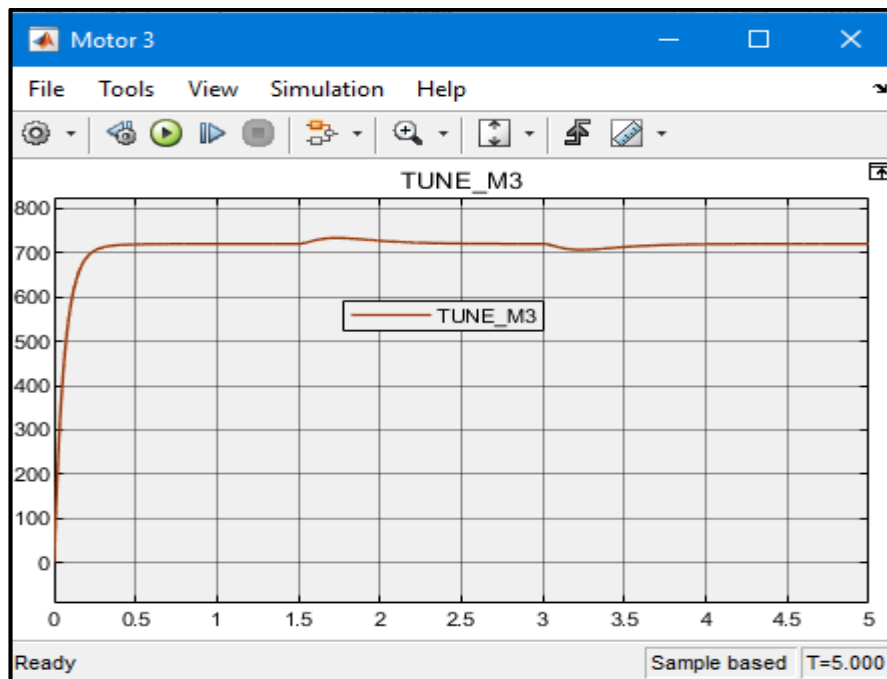
**Grafica 60. Salida de control del motor 2 ante perturbaciones**

## Motor 2-2



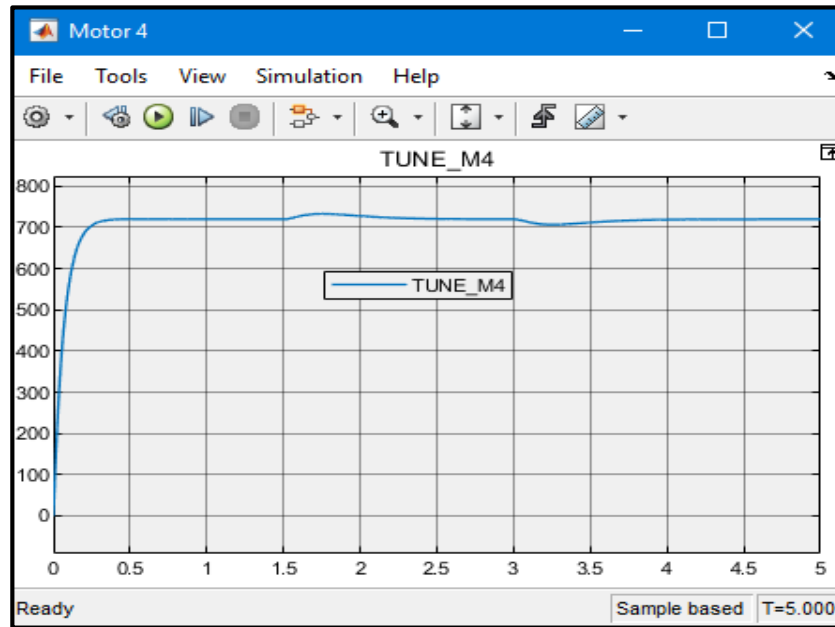
**Grafica 61.** Salida de control del motor 2-2 ante perturbaciones

## Motor 3



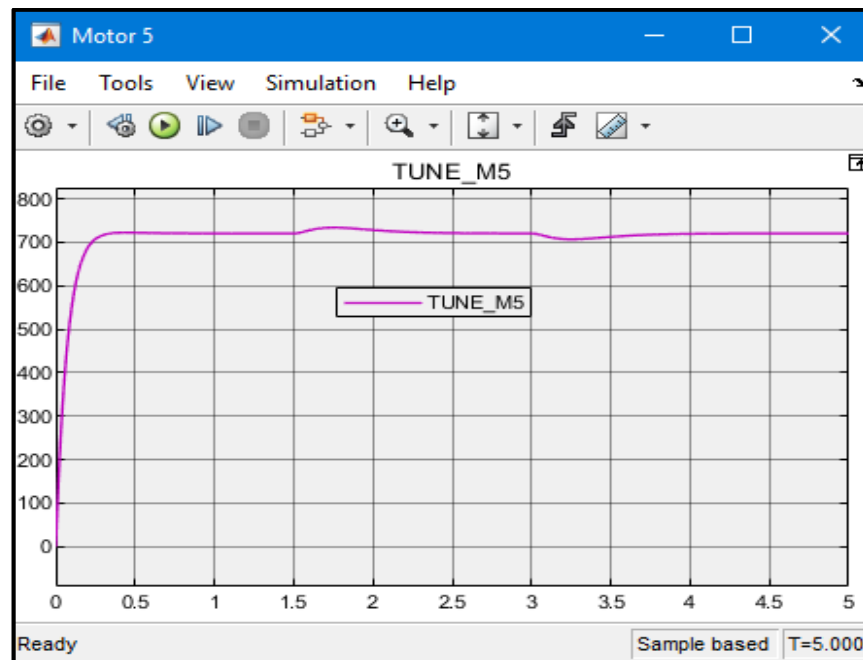
**Grafica 62.** Salida de control del motor 3 ante perturbaciones

## Motor 4



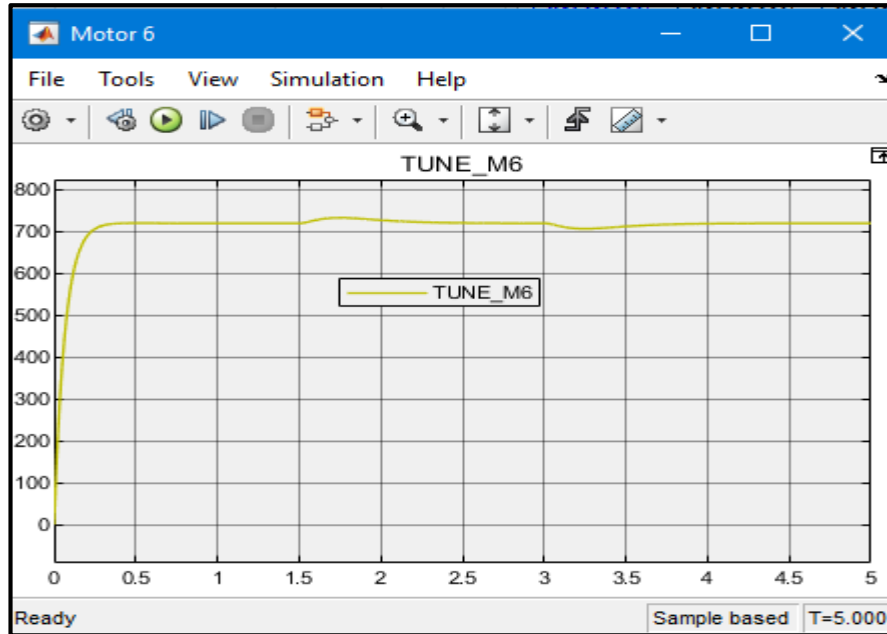
Grafica 63. Salida de control del motor 4 ante perturbaciones

## Motor 5



Grafica 64. Salida de control del motor 5 ante perturbaciones

## Motor 6



**Grafica 65.** Salida de control del motor 6 ante perturbaciones

Luego de analizar cada una de las gráficas anteriores se observa la buena respuesta del controlador hallado, donde se llegó a notar buen comportamiento en el sistema de control de cada uno de nuestros motores donde el OverShoot en cada uno de ellos es de menos de 4.4% ante la entrada de perturbación en el sistema.

### **Método 2:** Validación del sistema real en el motor ante perturbaciones

Para esta validación se hicieron los cambios internos de las constantes de cada motor, ya que para poder realizar el control se debían cambiar las constantes de cada uno de estos donde por defecto de fábrica vienen como se muestra en la Figura 241. Donde muestra un controlador tipo PD donde se cambiara por un PDI, resultados obtenidos unas vez sintonizados.

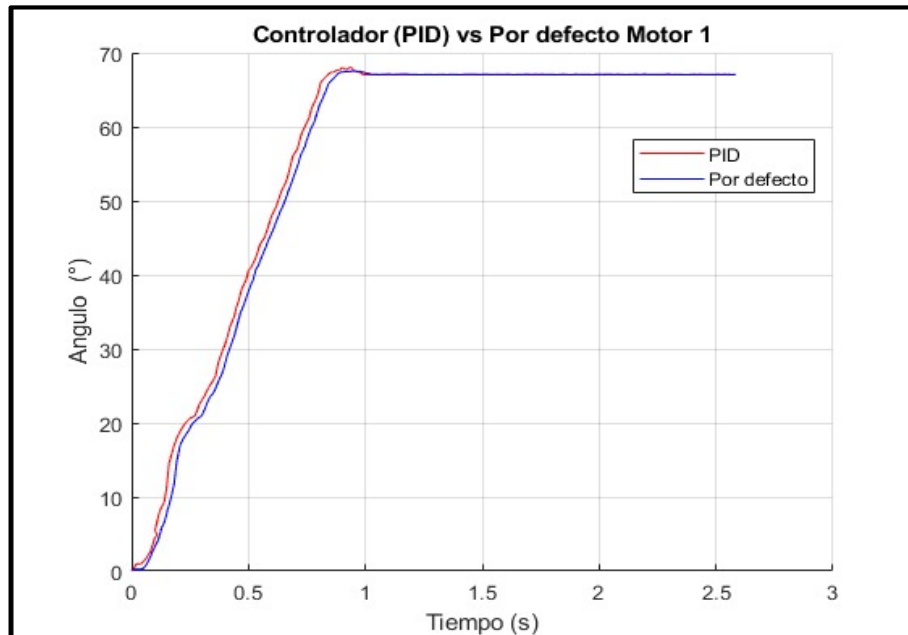
Position\_Kp: 3840  
 Position\_Kd: 2048  
 Position\_Ki: 0

**Figura 241. Constantes por defecto de fabrica de los motores**

| Nombre    | Constantes de control                                                 |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------|
| Motor 1   | Kp= 5.66199805874289<br>Ki= 15.2707686627769<br>Kd= 0.522909113356064 |
| Motor 2   | Kp= 5.00376931466041<br>Ki= 12.2630257835582<br>Kd= 0.502669243970574 |
| Motor 2-2 | Kp= 5.0595152810142<br>Ki= 12.1866149000673<br>Kd= 0.522405461829407  |
| Motor 3   | Kp= 5.05751856792709<br>Ki= 15.7804984890982<br>Kd= 0.403113238419473 |
| Motor 4   | Kp= 5.1547193106916<br>Ki= 15.0081092169485<br>Kd= 0.439058617640825  |
| Motor 5   | Kp= 5.01149878023265<br>Ki= 14.923831853027<br>Kd= 0.414323806028418  |
| Motor 6   | Kp= 5.16470310632668<br>Ki= 15.3908255410407<br>Kd= 0.429797341999065 |

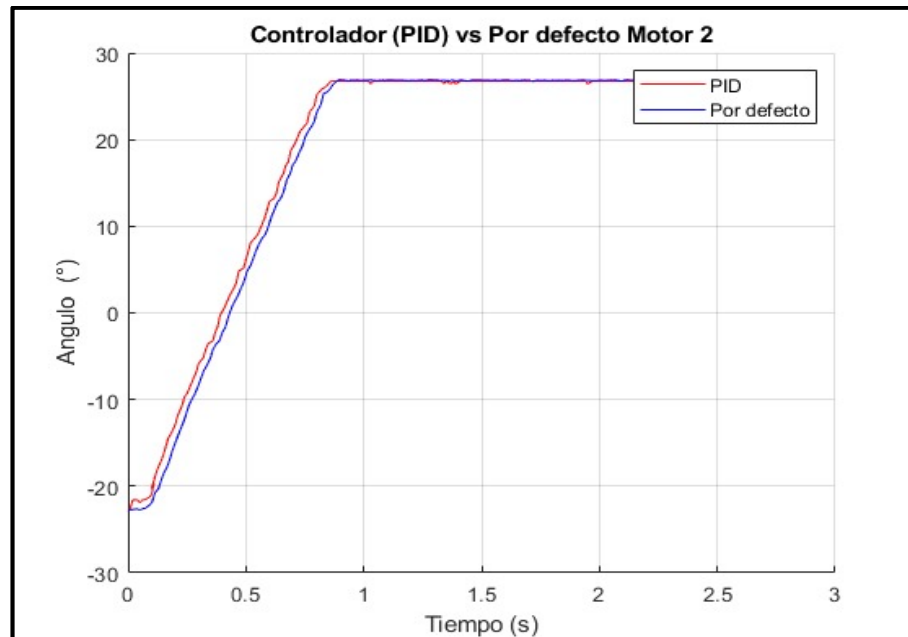
**Tabla 9. Cambio de constantes de los motores del manipulador 1**

## Motor 1



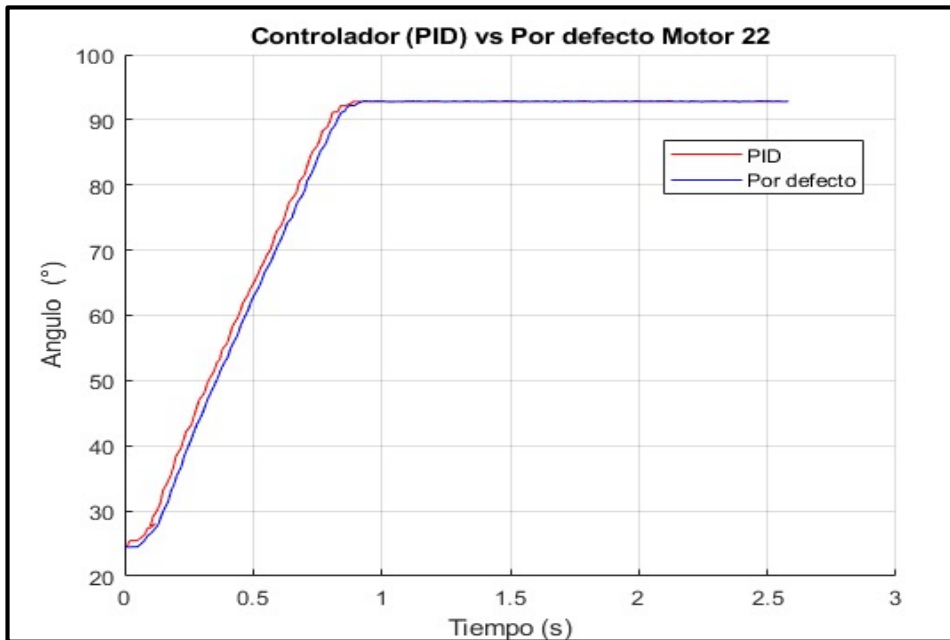
Grafica 66. Salida de control real del motor 1 ante perturbaciones (PID vs por defecto)

## Motor 2



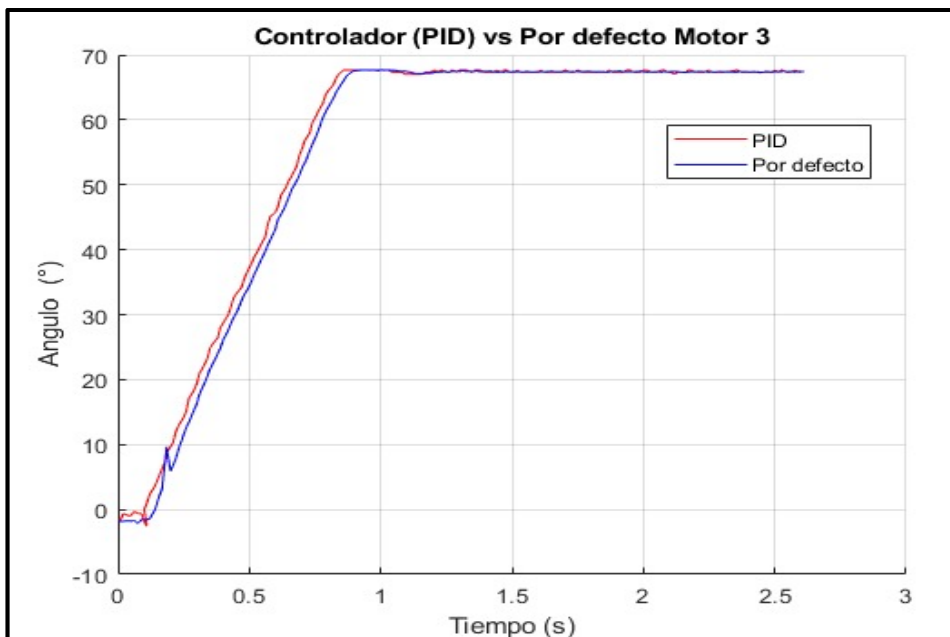
Grafica 67. Salida de control real del motor 2 ante perturbaciones (PID vs por defecto)

## Motor 2-2



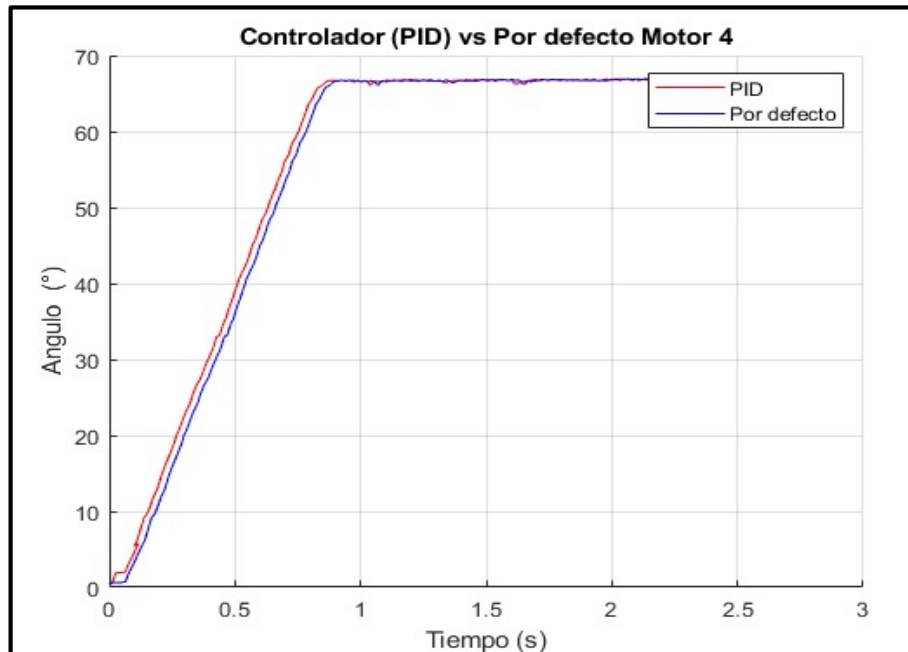
Grafica 68. Salida de control real del motor 2-2 ante perturbaciones (PID vs por defecto)

## Motor 3



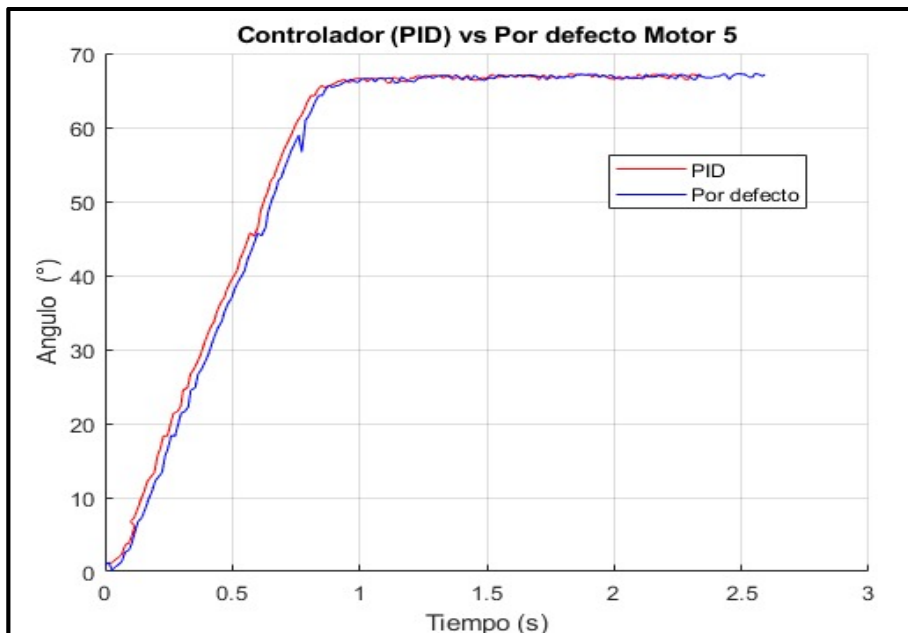
Grafica 69. Salida de control real del motor 3 ante perturbaciones (PID vs por defecto)

## Motor 4



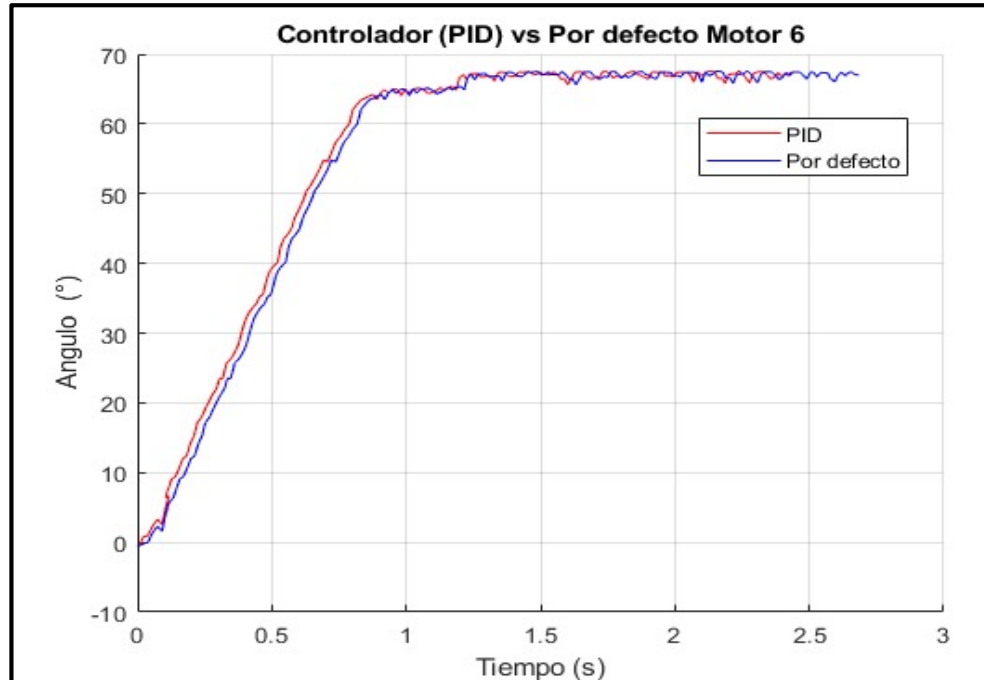
Grafica 70. Salida de control real del motor 4 ante perturbaciones (PID vs por defecto)

## Motor 5



Grafica 71. Salida de control real del motor 5 ante perturbaciones (PID vs por defecto)

## Motor 6



**Grafica 72. Salida de control real del motor 6 ante perturbaciones (PID vs por defecto)**

Luego de analizar cada una de las gráficas reales de los motores, se observa la buena respuesta del controlador (PID) hallado, llegándose a notar la diferencia en la comparativa del antes y después de las constantes cambiadas de control en cada uno, donde se obtuvo un buen comportamiento en el sistema de control de cada uno de nuestros motores donde el OverShoot en cada uno de ellos es de menos de 2%, al igual en la etapa de respuesta transitoria siéndola más rápida.

### 7.6.1.2 Validación del control dinámico manipulador 2

**Método 1:** Validación del sistema aplicando perturbación, usando Simulink Matlab

Al igual que la validación del manipulador 1 (método 1) se aplica las mismas condiciones iniciales de entrada.

Para ello se organiza de este modo como se observa en la Figura 242, para hacer la realización de la validación de manera simultánea donde se analizará el comportamiento del controlador de cada una de la planta.

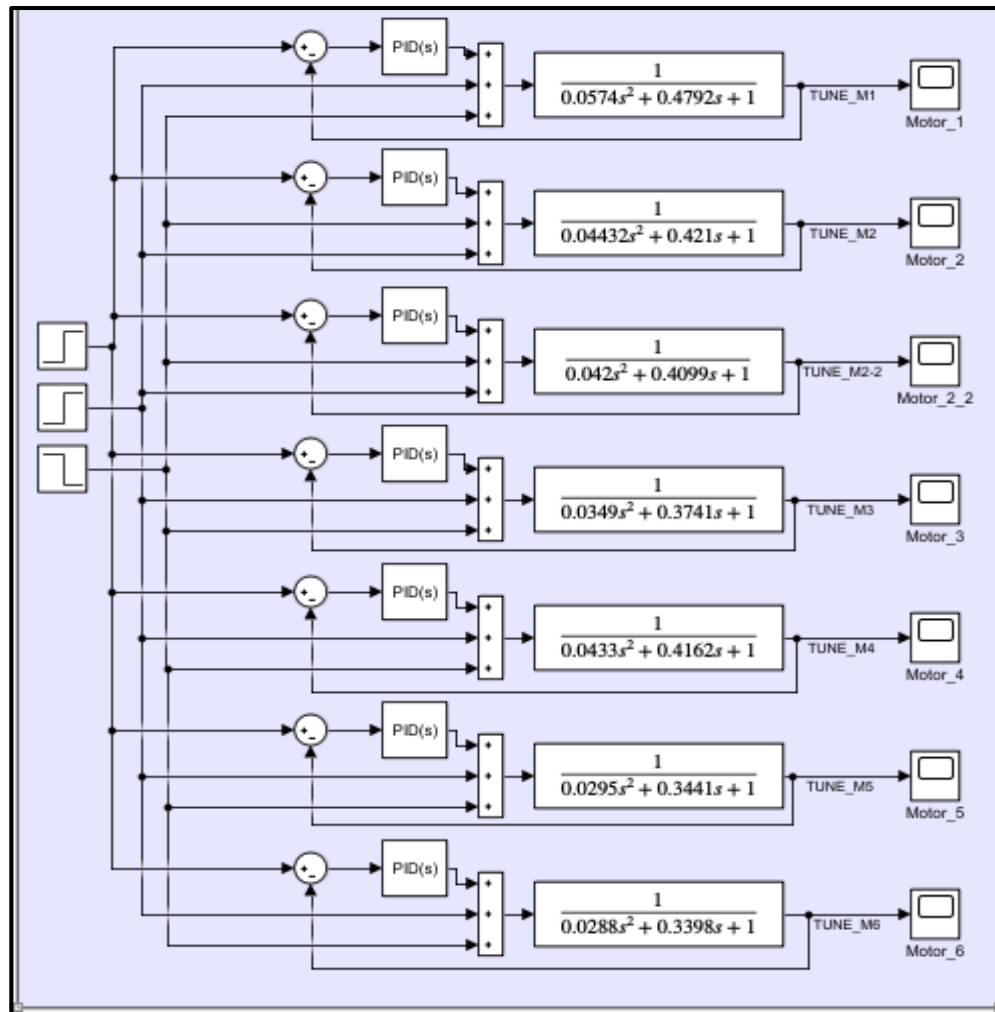
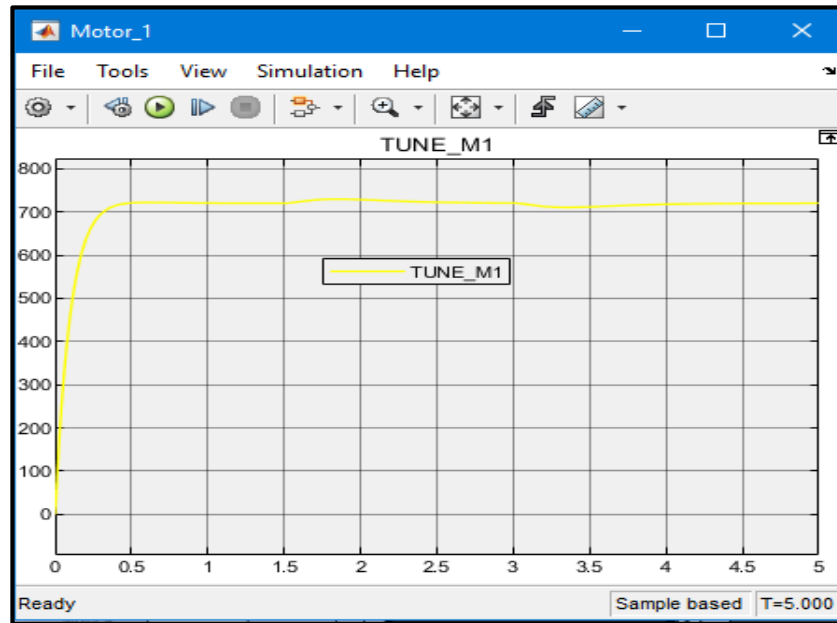


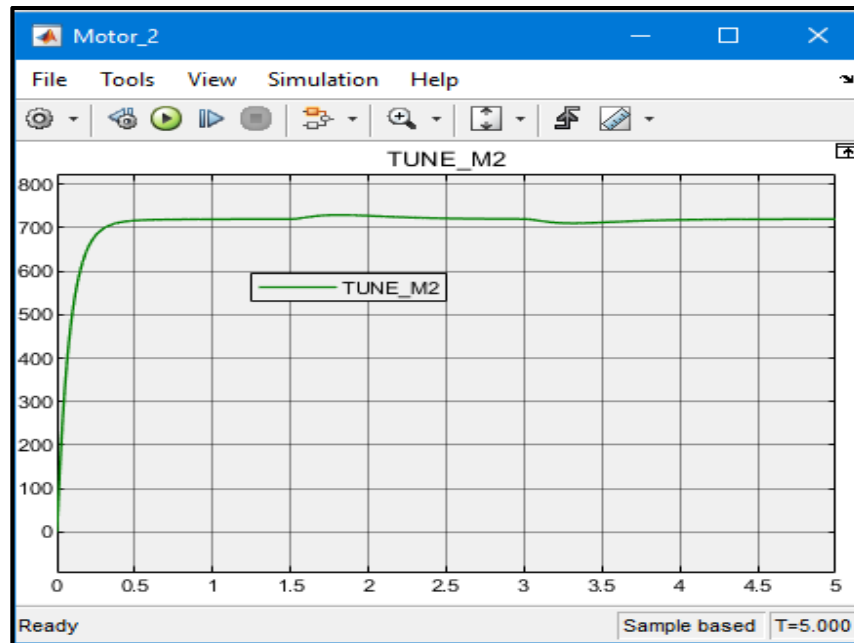
Figura 242. Diagrama de bloques de las plantas que componen el manipulador 2

## Motor 1



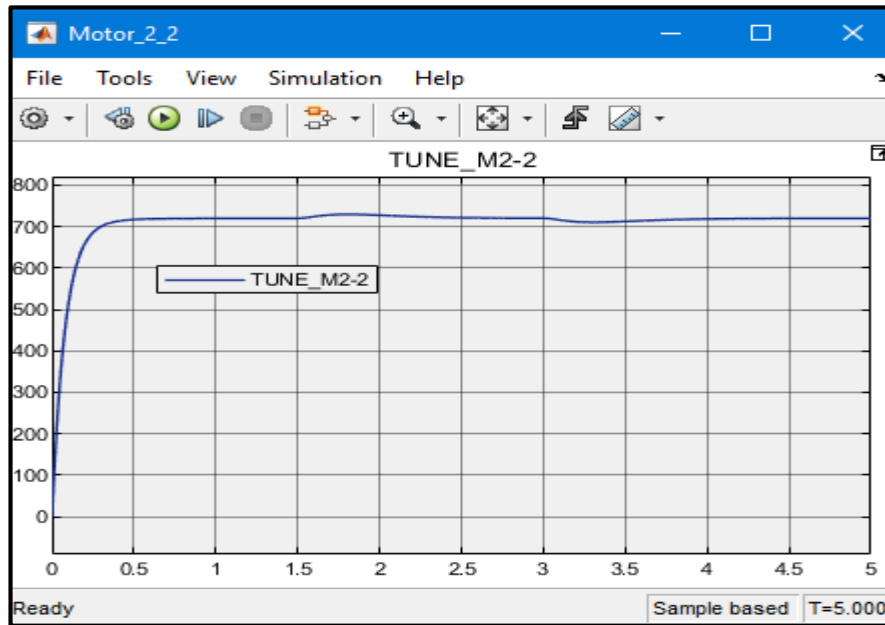
**Grafica 73. Salida de control del motor 1 ante perturbaciones**

## Motor 2



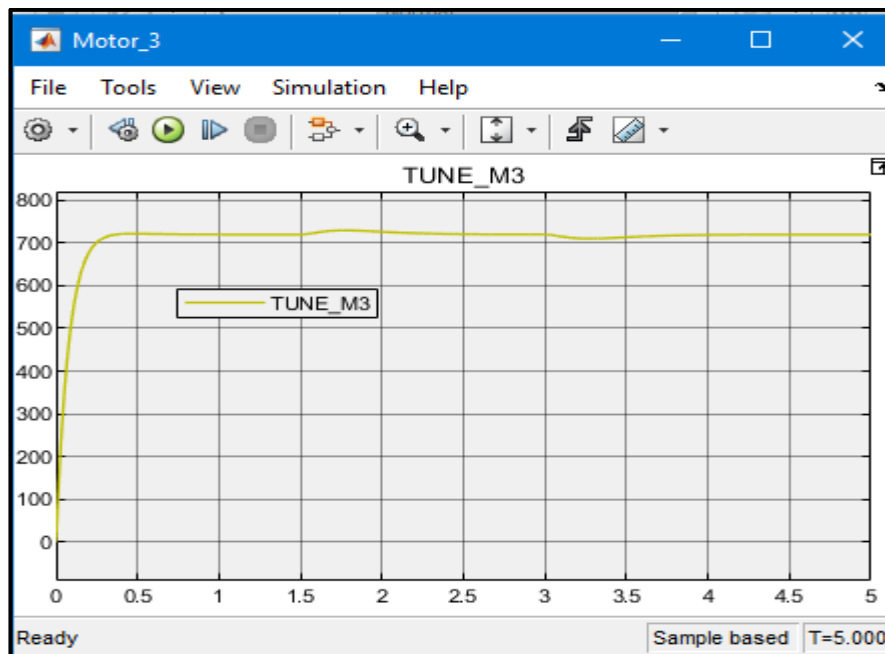
**Grafica 74. Salida de control del motor 2 ante perturbaciones**

## Motor 2-2



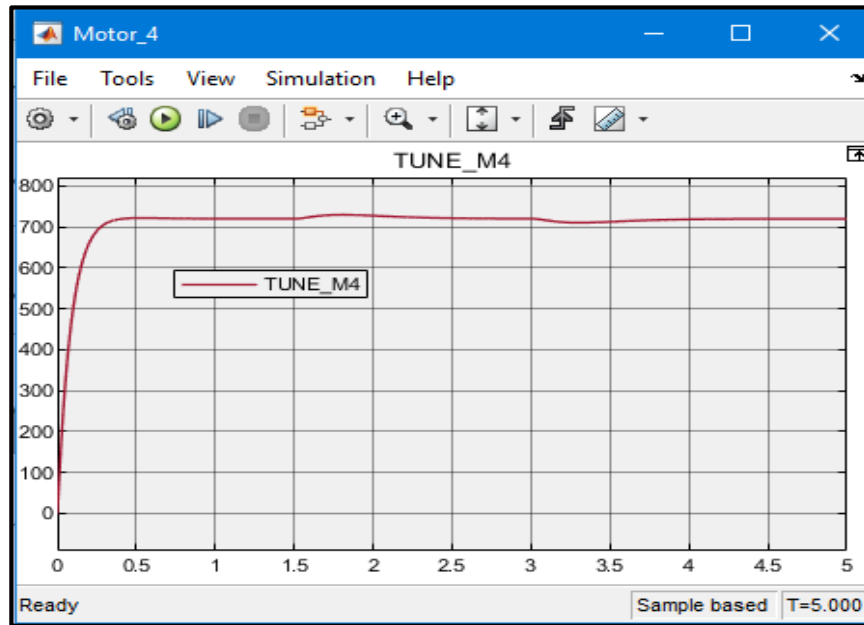
Grafica 75. Salida de control del motor 2-2 ante perturbaciones

## Motor 3



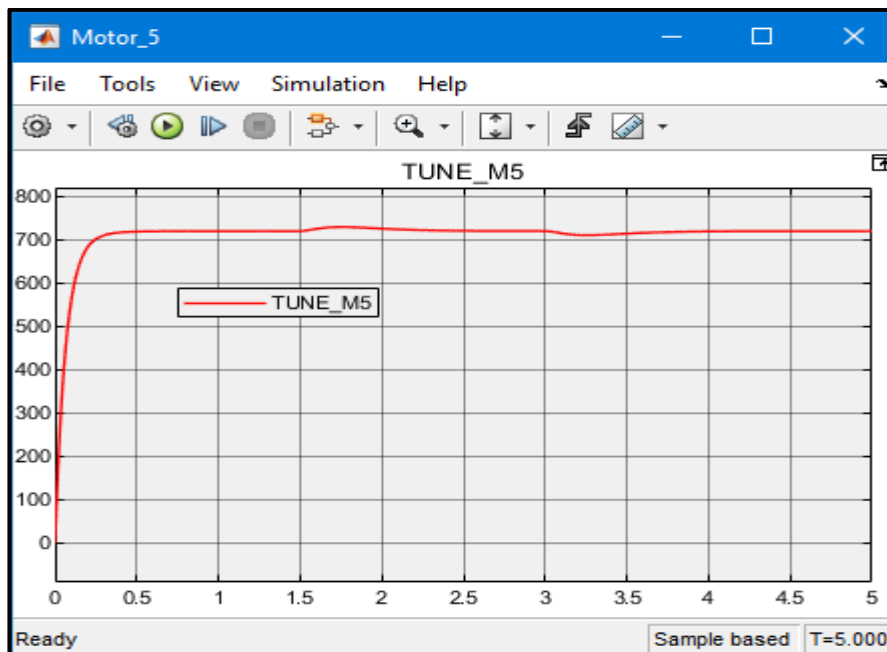
Grafica 76. Salida de control del motor 3 ante perturbaciones

## Motor 4



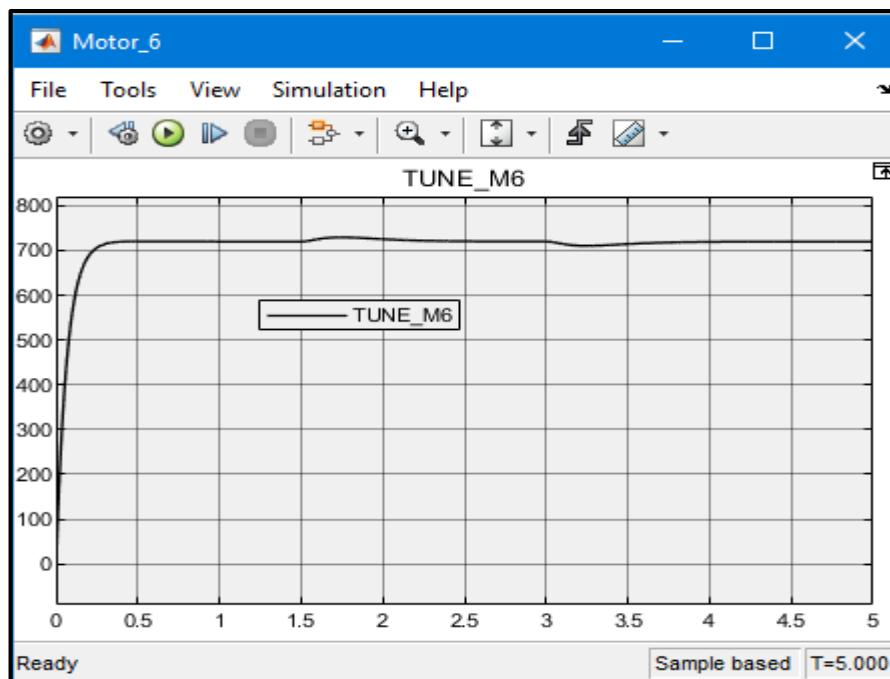
Grafica 77. Salida de control del motor 4 ante perturbaciones

## Motor 5



Grafica 78. Salida de control del motor 5 ante perturbaciones

## Motor 6



**Grafica 79. Salida de control del motor 6 ante perturbaciones**

Luego de analizar cada una de las gráficas anteriores se observa la buena respuesta del controlador hallado, donde se llegó a notar buen comportamiento en el sistema de control de cada uno de nuestros motores donde el OverShoot promedio en cada uno de ellos es de menos de 4.4% ante la entrada de perturbación en el sistema.

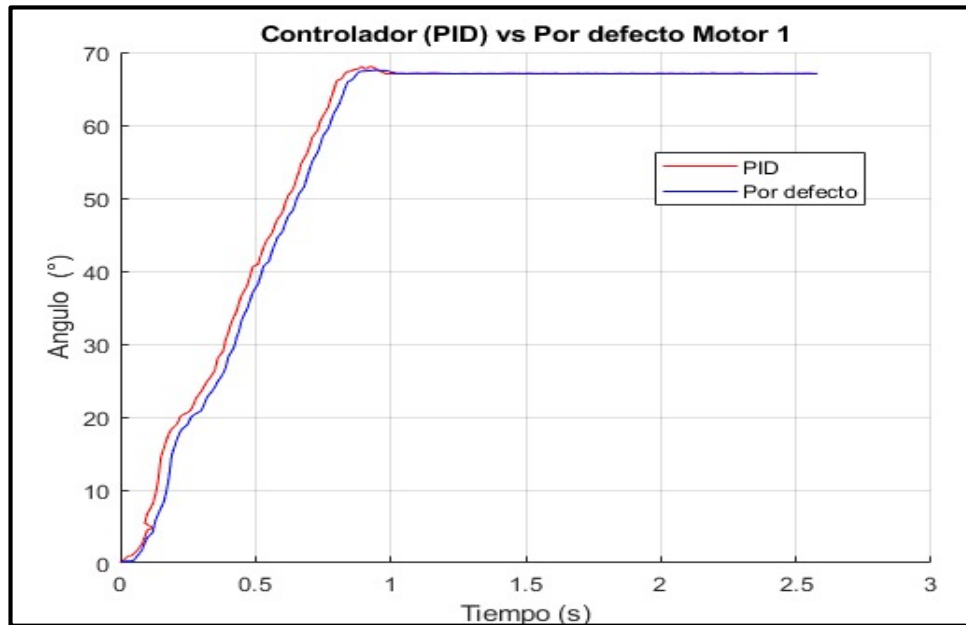
**Método 2:** Validación del sistema real en el motor ante perturbaciones

Al igual que en la validación del manipulador 1 (método 2), se hicieron los cambios internos de las constantes de cada motor, ya que para poder realizar el control se debían cambiar las constantes de cada uno de estos donde por defecto de fábrica.

| Nombre    | Constantes de control                                                 |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------|
| Motor 1   | Kp= 5.00573825267845<br>Ki= 10.7532333154607<br>Kd= 0.57368986206157  |
| Motor 2   | Kp= 5.05783189735147<br>Ki= 11.8579551981591<br>Kd= 0.53652513022495  |
| Motor 2-2 | Kp= 5.0595152810142<br>Ki= 12.1866149000673<br>Kd= 0.522405461829407  |
| Motor 3   | Kp= 5.01476385196289<br>Ki= 13.8276223859875<br>Kd= 0.447769602171528 |
| Motor 4   | Kp= 5.00566152180485<br>Ki= 12.3806311469145<br>Kd= 0.498265215467407 |
| Motor 5   | Kp= 5.15758859123587<br>Ki= 14.852951152121<br>Kd= 0.445931712185354  |
| Motor 6   | Kp= 5.16470310632668<br>Ki= 15.3908255410407<br>Kd= 0.429797341999065 |

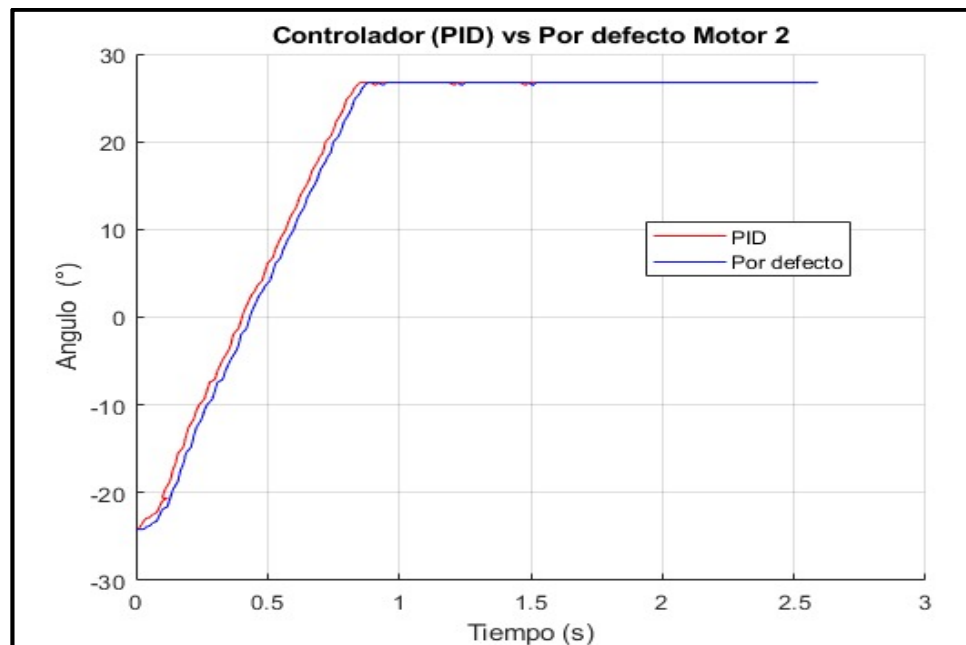
**Tabla 10. Cambio de constantes de los motores del manipulador 2**

## Motor 1



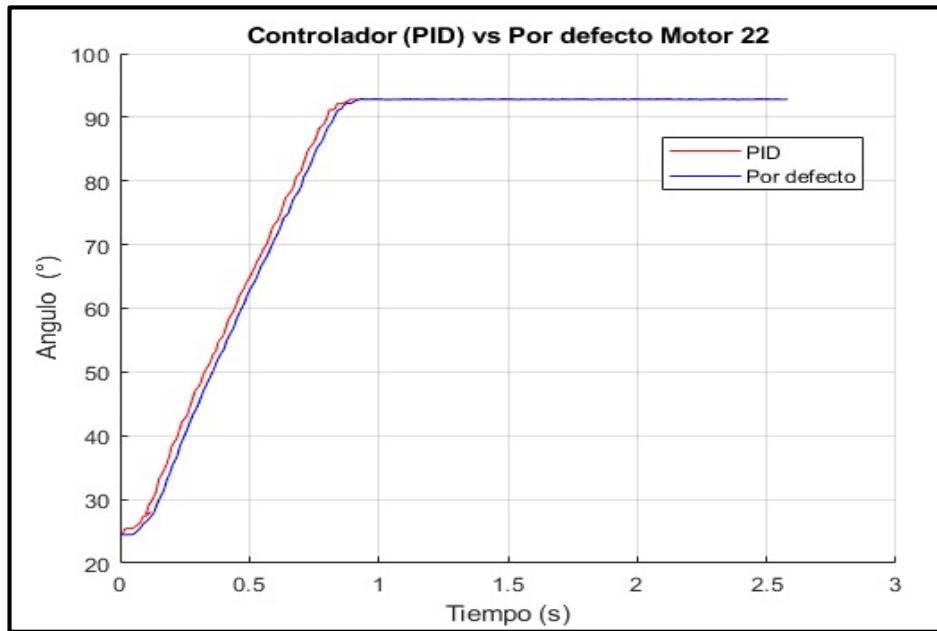
Grafica 80. Salida de control real del motor 1 ante perturbaciones (PID vs por defecto)

## Motor 2



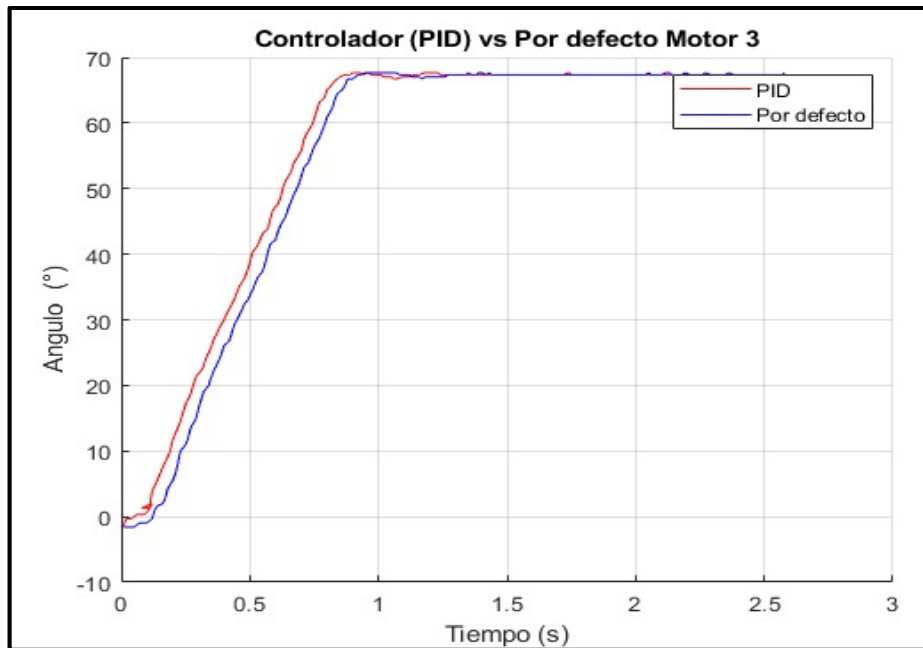
Grafica 81. Salida de control real del motor 2 ante perturbaciones (PID vs por defecto)

## Motor 2-2



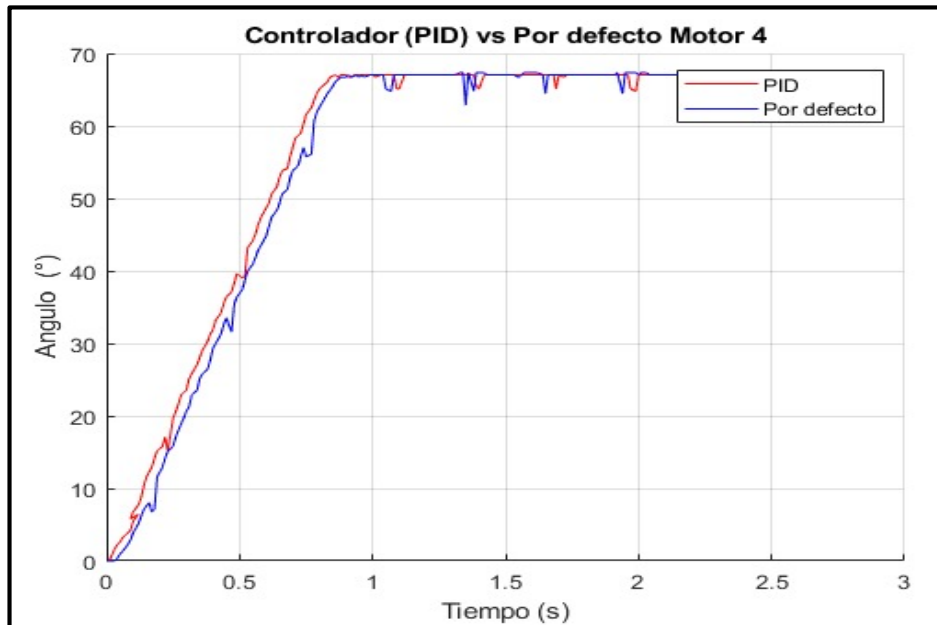
Grafica 82. Salida de control real del motor 2-2 ante perturbaciones (PID vs por defecto)

## Motor 3



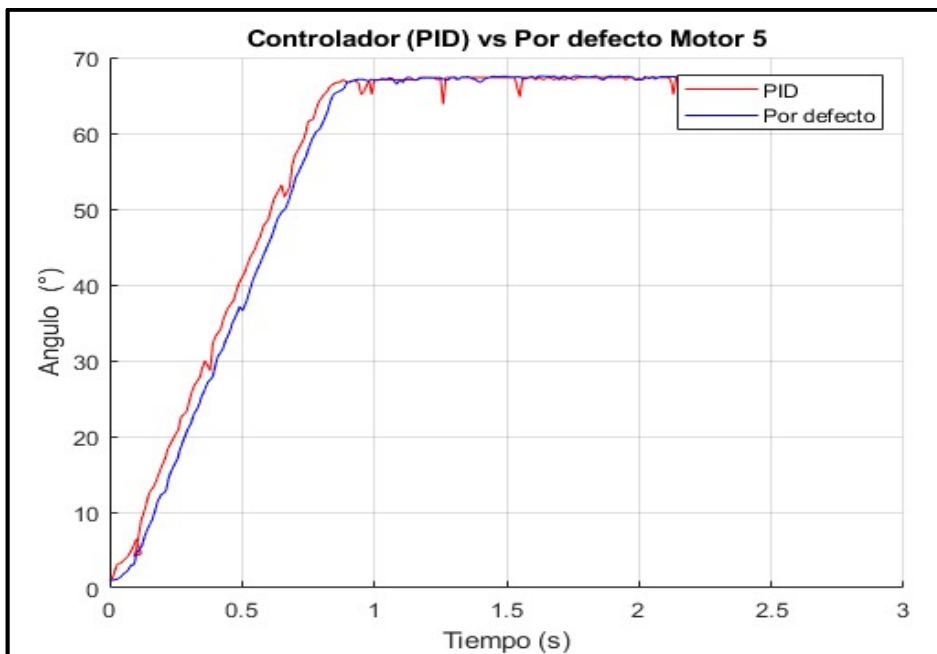
Grafica 83. Salida de control real del motor 3 ante perturbaciones (PID vs por defecto)

## Motor 4



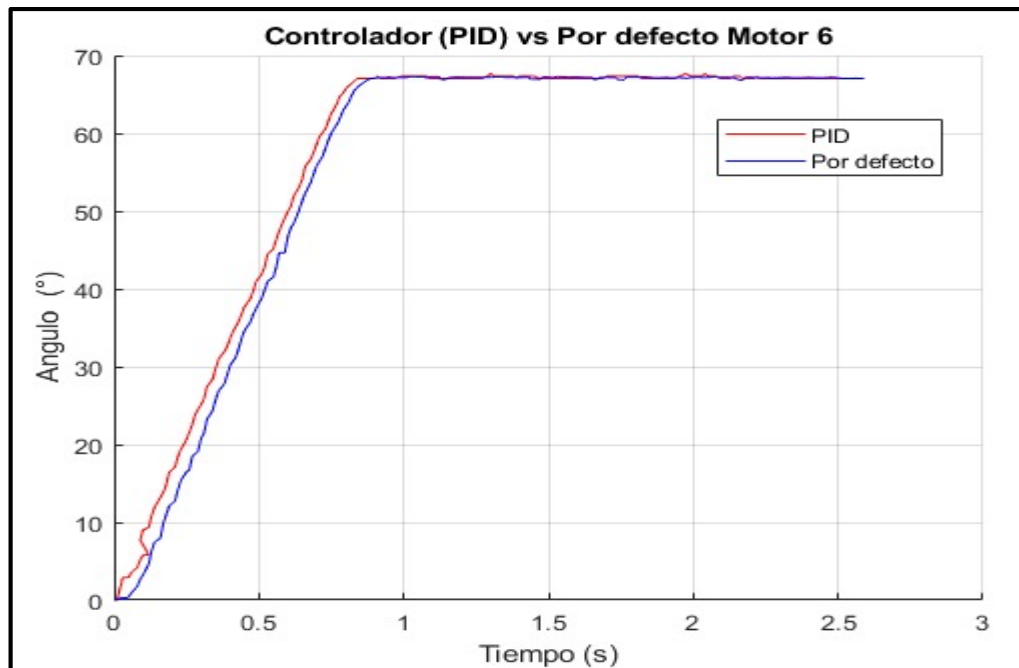
Grafica 84. Salida de control real del motor 4 ante perturbaciones (PID vs por defecto)

## Motor 5



Grafica 85. Salida de control real del motor 5 ante perturbaciones (PID vs por defecto)

## Motor 6



**Grafica 86. Salida de control real del motor 6 ante perturbaciones (PID vs por defecto)**

Luego de analizar cada una de las gráficas reales de los motores, se observa la buena respuesta del controlador (PID) hallado, llegándose a notar la diferencia en la comparativa del antes y después de las constantes cambiadas de control en cada uno, donde se obtuvo un buen comportamiento en el sistema de control de cada uno de nuestros motores donde el OverShoot en cada uno de ellos es de menos de 2%, al igual en la etapa de respuesta transitoria siéndola más rápida.

## **8 PROPONER UNA METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DE CONTROL DINÁMICO MONOARTICULAR DE BIMANIPULADORES.**

En este capítulo se llevará acabo el desarrollo de la metodología del control dinámico mono-articular, calculado y validado con anterioridad, partiendo desde cero, esto se hace con el fin de brindar una nueva perspectiva a la hora de su implementación para futuras generaciones que estén dispuestas en aprender el campo de la robótica colaborativa. Partir de eso, se realizó la metodología basándonos en el desarrollo de este proyecto de manera secuencial como se puede observar en la Figura 243 que me representa los siguientes pasos:

1. Estructuración y recopilación de la información necesaria para el desarrollo de las diferentes etapas en la metodología.
2. Desarrollo matemático de la cinemática directa, a partir de la documentación recopilada afrontando el problema cinemático directo del manipulador.
3. Desarrollo matemático de la cinemática inversa, para el manipulador dado atreves del método geométrico(desacople).
4. Realización de la Simulación, validación e implementación de los sistemas de control cinemático para el manipulador. con el fin de comprobar la corrección de los mismos y realizar posteriormente ajustes en caso de ser necesario en su modelado.
5. Desarrollo matemático e implementación de la dinámica, con los modelos cinemáticos realizados, avanzando un paso más considerando el movimiento en relación a las fuerzas que lo originan.
6. Desarrollo de la simulación del manipulador, realizando los diferentes modelos obtenidos que me representan virtualmente las características cinemáticas y dinámicas del manipulador.
7. Implementación del sistema de control, realización de los lazos de control de acuerdo con los modelos implementados en el software con el fin de comprobar la corrección de los mismos y realizar posteriormente las pruebas al sistema de control.

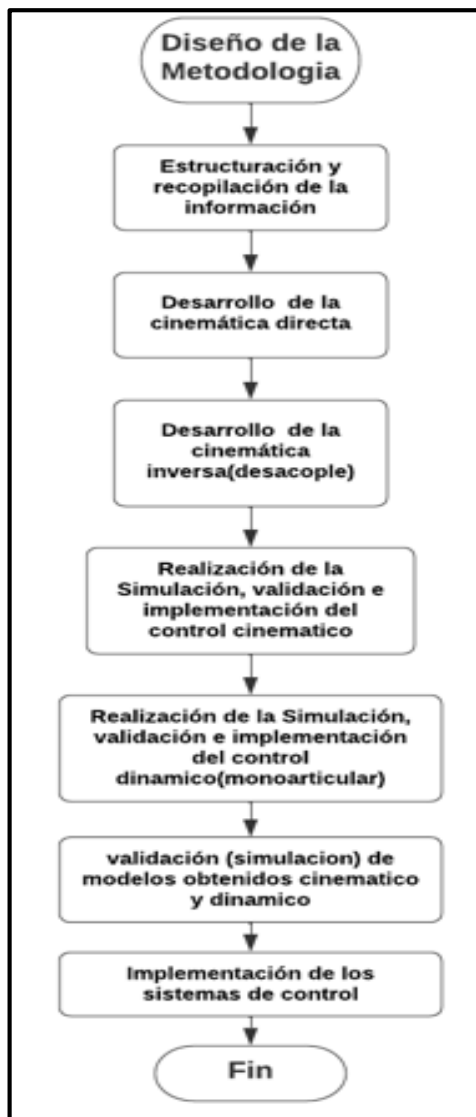


Figura 243. Diseño de la metodología

## 8.1 Estructuración y recopilación

En este apartado se abordará el estado actual de la robótica, características de los robots, las causas de la falta de presión, y la descripción del manipulador de forma general.

### 8.1.1 Estado actual de la robótica

Para entender sobre la robótica es necesario conocer primero las posibilidades actuales de la robótica, especialmente a los manipuladores de seis grados de

libertad, ya que estos son los usualmente utilizados en la industria y fue el que se utilizó en el desarrollo de este proyecto.

Partiendo de que la robótica industrial se define como el estudio, diseño y uso de robots para la ejecución de procesos industriales, bajo una normativa estándar la cual es la norma ISO 8373:1994 (Robots Industriales Manipuladores) que se define como un robot industrial o como un manipulador programable de tres o más ejes multipropósito que es controlado automáticamente y ser reprogramable. Estos robots cumplen en la industria tareas cíclicas como pintado, la soldadura o la manipulación de objetos, ahora los robots desarrollados en la actualidad hasta el momento son capaces y siguen demostrando ser muy eficientes sustituyendo y mejorando labores que se realizaban de forma manual.

No obstante, estos tipos de robots industriales traen consigo una serie de desventajas, como lo puede ser su elevado costo, pero en La robótica este costo es de gran ayuda en la productividad dada, presentándose como una alternativa ventajosa de automatización para procesos como los anteriormente mencionados.

Con lo cual se puede decir que las necesidades actuales que se presentan en la actualidad, estos robots nos satisfacen con facilidad y velocidad la obtención de:

- Mayor precisión de posicionamiento en los robots o manipuladores, tanto de forma puntual como a lo largo de una trayectoria, a fin de garantizar la fabricación.

- Mejora en la continuidad en las trayectorias generadas, a fin de alcanzar productividades y acabados similares a las de una máquina herramienta de herramienta convencional.

#### 8.1.2 Características actuales de los robots

A partir de lo dicho anteriormente de las múltiples tareas que se pueden realizar con la implementación de un robot o manipulador, algunas de las características más destacadas como principales virtudes de la robótica industrial actual es la velocidad de ejecución y la flexibilidad.

Cuando hablamos de su flexibilidad es que reside en que la programación y el cambio de herramienta que se le pueda adaptar haciéndolo cambiar a lo largo de su vida útil con una simple reconfiguración de sus parámetros. A estas características también hay que sumarle la repetitividad que presentan en la posición alcanzada y ya por último cabe destacar la alta productividad que consiguen gracias a que la ligereza de la estructura posibilita movimientos haciéndolos muy veloces.

Ahora en cuanto a las limitaciones, las más importantes es la dificultad de programación, ya que esta me representa la baja precisión de posicionamiento alcanzable y en la falta de continuidad en trayectorias con una gran cantidad de puntos intermedios. Respecto a la falta de precisión, cabe mencionar que es debida principalmente a la elasticidad de su estructura, que produce deflexiones importantes difíciles de modelar de forma precisa cuando el robot o manipulador lleva un tiempo considerable operando.

De este modo, la precisión se ve afectada por errores como de programación, computacionales, fabricación, daños en los eslabones. Pero este error resulta ser aproximadamente constante, por lo que cada vez que el robot va a un punto lo hará desviándose del punto objetivo una distancia igual al valor de la precisión, pero siempre caerá dentro del valor de la repetitividad. En cuanto a la falta de continuidad de las trayectorias, ésta es ejecutada por los motores que en algunos casos suele ser más lenta que la que demanda para el movimiento del manipulador.

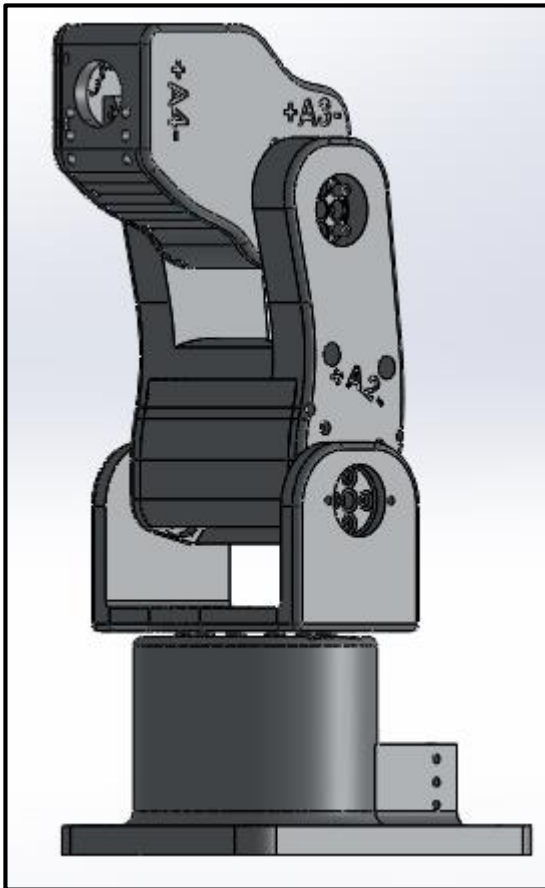
### 8.1.3 Descripción del manipulador

Un manipulador robótico es un conjunto de cuerpos conectados en una cadena por medio de juntas o articulaciones. Estos cuerpos se denominan eslabones. Ahora cada una de las articulaciones une a dos eslabones consecutivos para así ir formando la cadena. Ahora en los manipuladores pueden existir dos tipos de articulaciones las cuales son como la prismática y la rotacional. Una articulación prismática, también conocida como junta deslizante, esta nos posibilita a un eslabón el movimiento lineal sobre el otro eslabón que conecta la a esa articulación y una articulación rotacional permite el giro de un eslabón con respecto al otro eslabón que conecta la articulación.

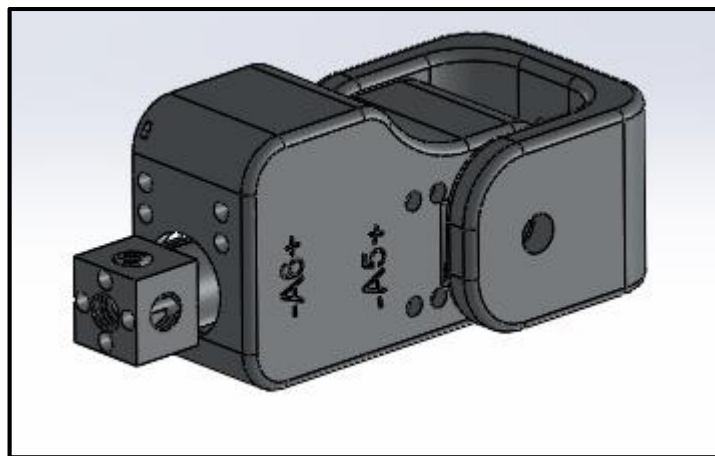
Ahora en nuestro caso es un manipulador en el que todas las articulaciones que lo conforman son de tipo rotacional y cada una de ellas a su vez establece los grados de libertad, por lo que el manipulador seleccionado tiene 6 articulaciones.

La elección de esta morfología del manipulador se dio por ser un modelo que se iba a ejecutar en robótica colaborativa siendo este el más apto, Además, ofrece una capacidad de carga y un espacio de trabajo mucho mayor, y prolonga considerablemente las distancias entre los puntos de gravedad de referencia. Además, posee una alimentación de energía directamente al cuerpo del manipulador, lo cual le permite reducir los contornos de perturbación de manera que la superficie de colocación del robot resulta mucho más aprovechable a la hora de las trayectorias colaborativas.

A continuación, se muestran las siguientes figuras del manipulador donde se separa la estructura del manipulador para diferenciar las partes fundamentales que lo componen.



**Figura 244. Brazo del manipulador**



**Figura 245. Muñeca del manipulador**

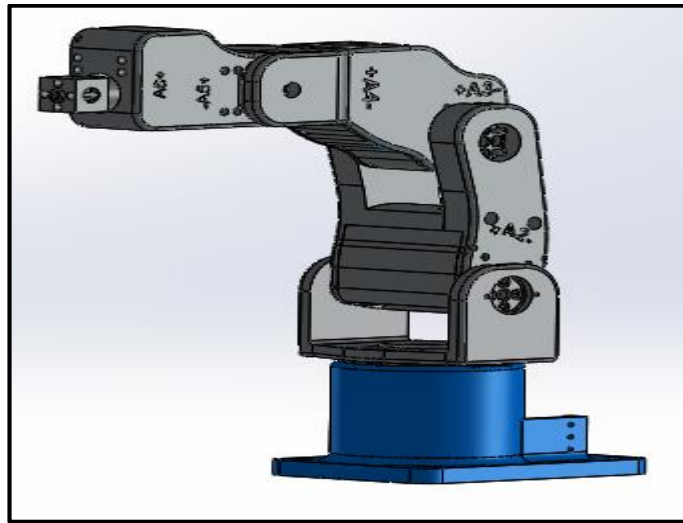
Donde Figura 244 constituye el brazo del manipulador y es el responsable de su posicionamiento en el espacio, caso contrario de la Figura 245, que constituye la muñeca del sistema y se encargara de darle la orientación final del sistema de coordenadas del extremo del robot (efector final).

Con lo cual la posición y orientación alcanzadas finalmente no dependerán únicamente de las partes mencionadas anteriormente, sino que será un conjunto de ambas, ya que la muñeca posiciona el efector final en función del posicionamiento previo del brazo. Al igual le sucede con el brazo respecto de la muñeca. Tanto el brazo como la muñeca forman un conjunto, que es lo que resulta ser el manipulador, y deben coordinarse conjuntamente para posicionar y orientar el efector final para su finalidad. Ahora cada una de las dos partes estará unida a través de eslabones conectados y través de las articulaciones rotativas.

#### 8.1.3.1 Eslabones

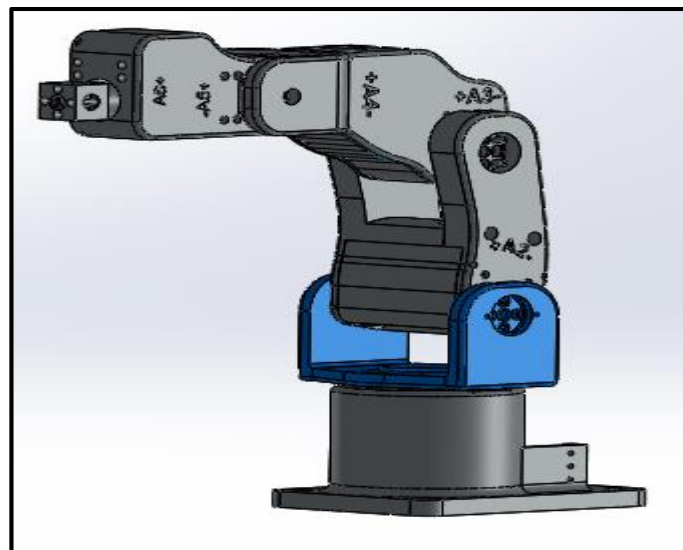
Se procede a mostrar cada eslabón que conforman el manipulador de manera independiente del resto del manipulador, se resaltara con un color diferente frente al resto de eslabones, para diferenciar las partes fundamentales que lo componen.

El primer eslabón se mostrará en dos partes que lo componen, ya que está compuesto por dos piezas que es la base junto con un rodamiento que forman el conjunto que se estudia en relación al movimiento de la articulación. La primera de ellas es la base Figura 246.



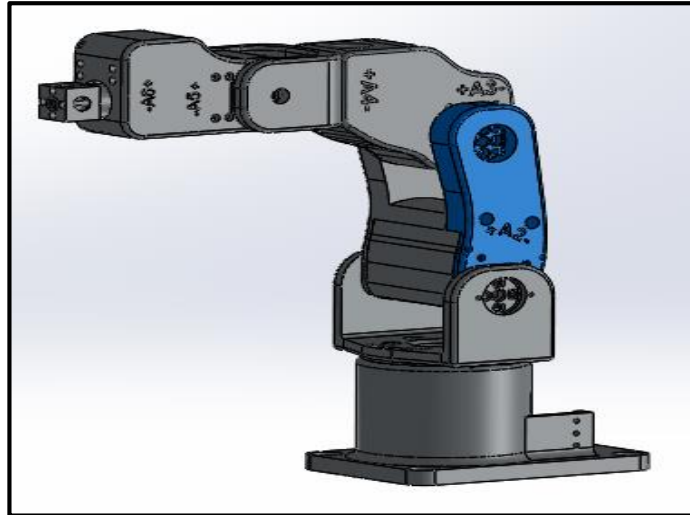
**Figura 246. Base (primer eslabón)**

En la base se encuentra el sistema de referencia o mi sistema cero del manipulador. Es una parte fija sobre la que se ancla el manipulador a la superficie de trabajo, por ello el sistema de referencia está situado en ella, y es el punto al que se refieren los datos de posición y orientación del efector final. La segunda pieza que conforma el primer eslabón se muestra en la siguiente Figura 247.



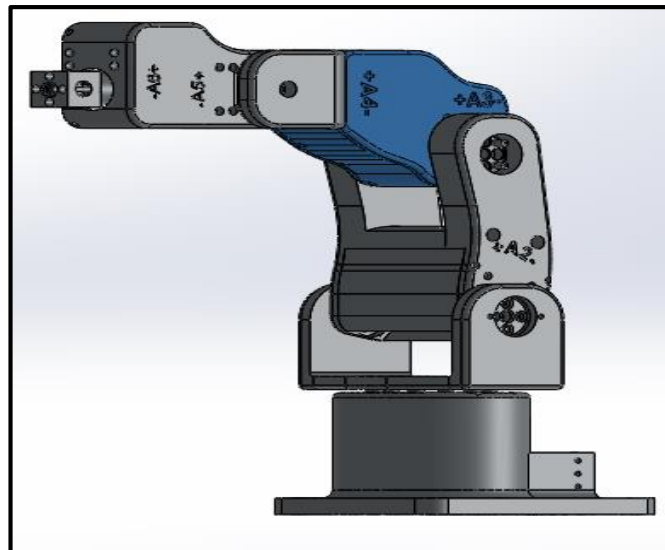
**Figura 247. Primer eslabón**

Ahora el segundo eslabón es el siguiente:



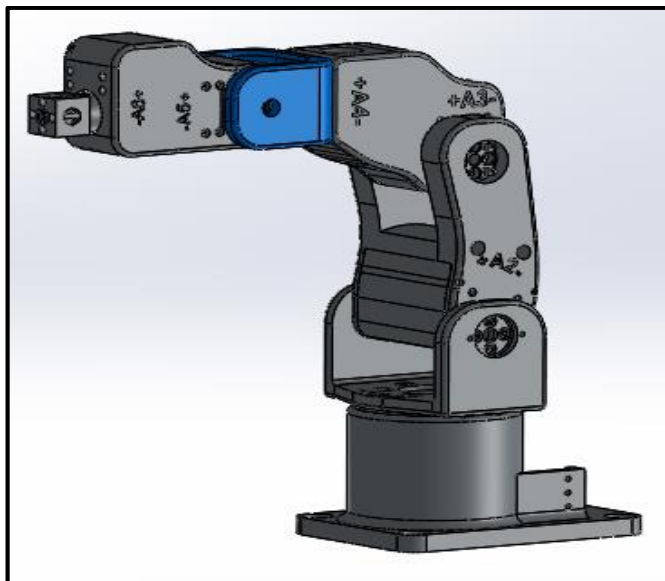
**Figura 248. Segundo eslabón**

Donde este segundo(Figura 248) eslabón está formado por una única pieza, al igual que el resto de los eslabones siguientes. El tercer eslabón se muestra a continuación en la Figura 249, este es el último eslabón que conforma el brazo.

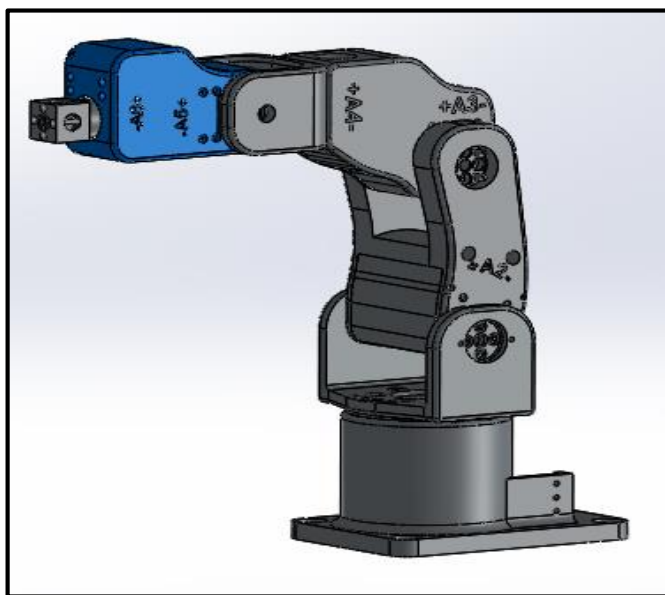


**Figura 249. Tercer eslabón**

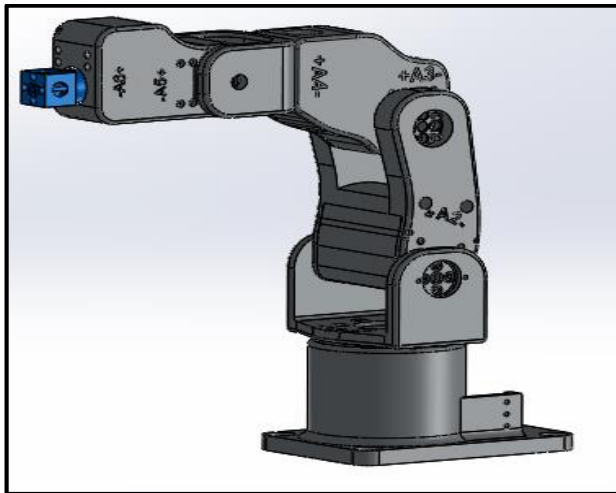
Los siguientes forman parte de la muñeca del manipulador (Figura 250, Figura 251, Figura 252). Todos ellos se muestran a continuación.



**Figura 250. Cuarto eslabón**



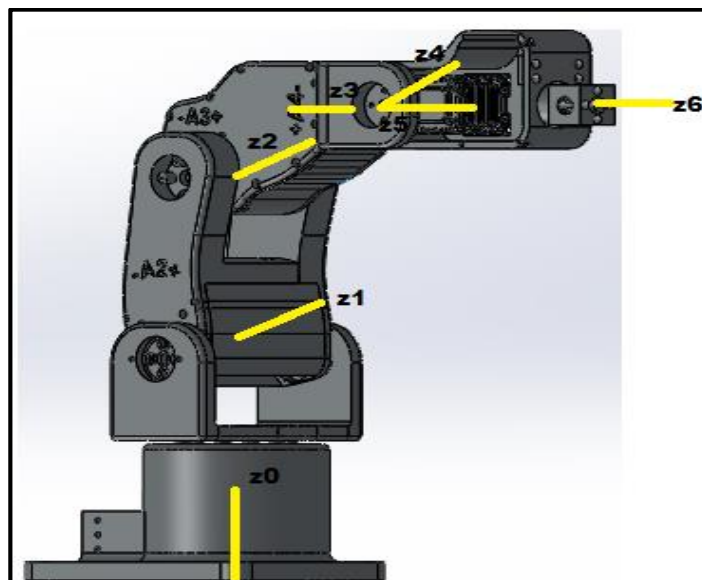
**Figura 251. Quinto eslabón**



**Figura 252. Sexto eslabón**

### 8.1.3.2 Articulaciones

otra parte fundamental para su estudio son las articulaciones. Como es un manipulador de seis grados de libertad y cada uno de ellos es aportado por cada una de sus seis articulaciones, siendo todas estas rotacionales. En la siguiente Figura 253 se representa el manipulador con el eje de giro de cada una de ellas.



**Figura 253. Ejes de rotación**

*"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"*

Universidad de Pamplona  
 Pamplona - Norte de Santander - Colombia  
 Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750

## 8.2 Desarrollo matemático de la cinemática directa

Tras la descripción del manipulador anteriormente explicada, se ha procedido a su descripción matemática, desarrollada a continuación para poder ser implementada más adelante mediante el uso del software de script de matlab. El uso de este software, nos permitirá tener un modelo sobre el que implementar los conceptos de control cinemático propuesto y probar los resultados previamente a su desarrollo sobre el hardware de control.

El desarrollo de los modelos matemáticos que definen las cinemáticas del manipulador es el primer paso a realizar para el estudio estructural que dará el conocimiento del como es el comportamiento de los sistemas de referencia para poder controlarlo. A través de la cinemática directa se podrá conocer la posición del extremo o del efector final del manipulador, que será el punto de interés dado que es donde se encontrará la herramienta que se utilizará para realizar el trabajo a realizador por el manipulador, a través de las posiciones de cada uno de sus sistemas de referencias de las articulaciones.

Por lo tanto, el estudio de la cinemática directa del manipulador implica, entre otras cosas, suponer cambios en la ubicación de los sistemas de referencia de cada articulación a medida que el mecanismo se mueve. Ahora para la notación de los sistemas de referencia se hará comenzando desde la base (primera articulación) hasta el efector final (sexta articulación), siguiendo la cadena mecánica que forma el manipulador.

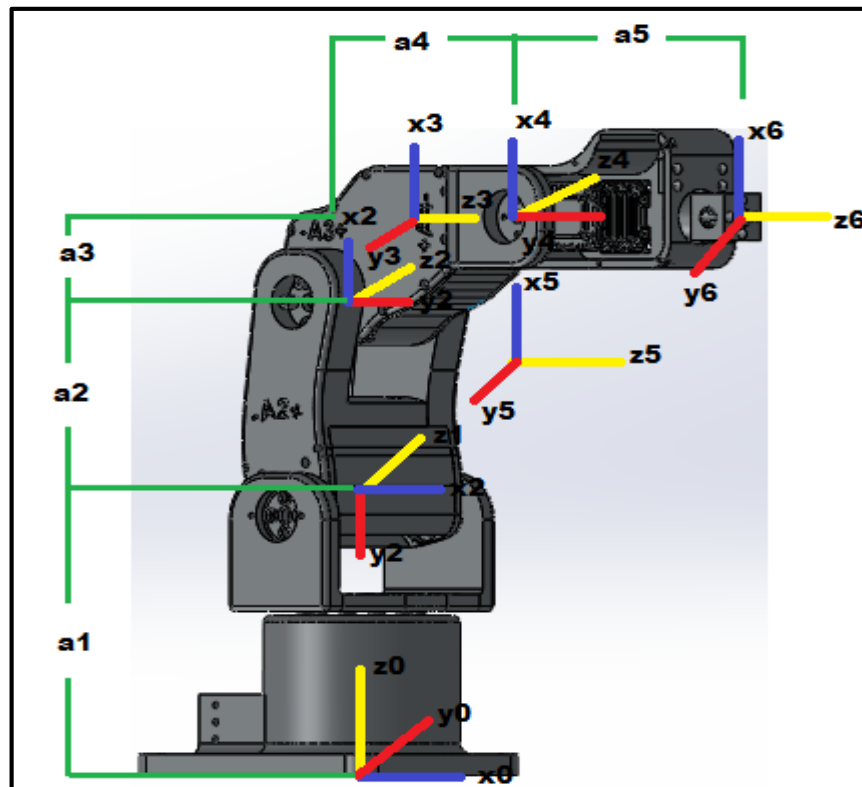
### 8.2.1 parámetros denavit-hartenberg

Para el desarrollo de la cinemática directa, se utilizará la representación de Denavit-Hartenberg, se trata de un procedimiento que asigna a cada una de las articulaciones un sistema de referencia con lo cual es el método más común a la hora de implementación en calcular la cinemática directa, lo cual se sitúa un sistema origen sobre el eje de la primera articulación de dicho sistema, está compuesto por los tres ejes (X, Y, Z) y se establecen así las coordenadas cartesianas o coordenadas rectangulares, que son un tipo de coordenadas ortogonales usadas para la representación del movimiento o posición en física del manipulador, las coordenadas cartesianas se definen, así como la distancia al origen de un punto dado sobre cada uno de los ejes de rotación.

Ahora para la implementación de los sistemas de referencia se definen de la siguiente manera:

- El eje Z se coloca en la dirección del eje de cada articulación.
- El eje X es paralelo a la normal de la línea común entre  $Z_{n-1}$ ,  $Z_n$ , Si no hay una única normal común (ejes Z paralelos).
- El eje Y es orto-normal a los dos anteriores según la regla de la mano derecha.

A continuación, se muestra en la Figura 254 como quedara aplicado estas tres reglas anterior mente explicada, cabe aclarar que se representaran al igual las cotas de las distancias morfológicas.

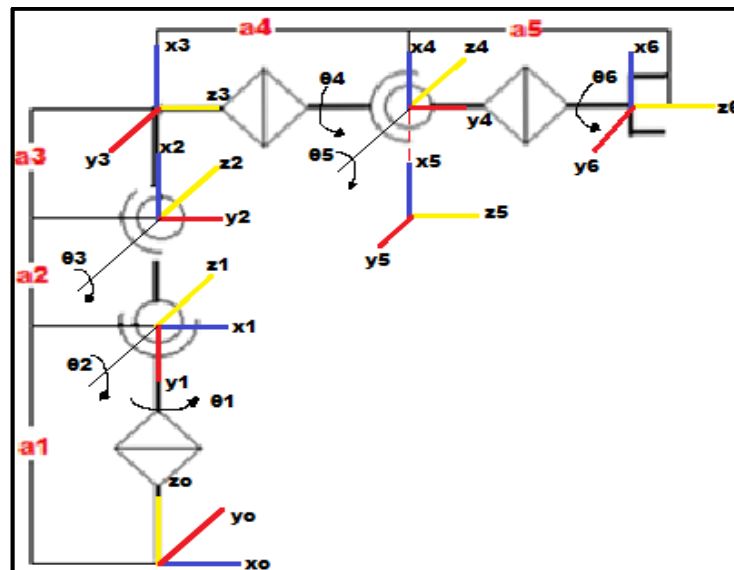


**Figura 254. Sistemas de referencia del manipulador**

Los parámetros de Denavit-Hartenberg permiten el paso de un eslabón al siguiente eslabón, es decir, son eslabones unidos por una articulación, con lo cual mediante cuatro transformaciones básicas que dan este método podemos obtener las matrices de transformación de mis sistemas. Las transformaciones dependen única y exclusivamente de las características de diseño y construcción del manipulador. Estas transformaciones básicas son:

- Rotación  $\theta_i$  alrededor del eje  $z^i$  es el ángulo entre  $x^{i-1}$  y  $x^i$
- Traslación  $d_i$  a lo largo del eje  $z^i$  entre  $x^{i-1}$  y  $x^i$
- Traslación  $a_i$  a lo largo del eje  $x^{i-1}$  entre  $z^{i-1}$  y  $z^i$
- Rotación  $\alpha_i$  alrededor del eje  $x^{i-1}$  es el ángulo entre  $z^{i-1}$  y  $z^i$

estas características pueden variar respecto del eje de referencia utilizado, es decir una vez establecido el sistema origen de cómo quedara situado el manipulador este no se puede cambiar, es importante tener en cuenta la definición establecida y no cambiarla en ningún momento para que los parámetros utilizados conduzcan al resultado correcto de las cinemáticas directa. En la siguiente Figura 255, se muestra una mejor visualización de cómo quedaría empleado los parámetros anteriormente las transformaciones básicas de Denavit-Hartenberg.



**Figura 255. Parámetros D-H del manipulador**

Conociendo cómo deben colocarse los sistemas de cada articulación y como se realizan las transformaciones básicas, se procede ahora a obtener los parámetros de Denavit- Hartenberg para el manipulador. Se colocarán en la siguiente tabla, que recoge los parámetros de cada uno de ellos.

| Articulación | $\Theta$      | d  | a  | $\alpha$ |
|--------------|---------------|----|----|----------|
| 1            | $\Theta_1$    | a1 | 0  | -90      |
| 2            | $\Theta_2-90$ | 0  | a2 | 0        |
| 3            | $\Theta_3$    | 0  | a3 | -90      |
| 4            | $\Theta_4$    | a4 | 0  | 90       |
| 5            | $\Theta_5$    | 0  | 0  | -90      |
| 6            | $\Theta_6$    | a5 | 0  | 0        |

**Tabla 11. tabla de parámetros de D-H del manipulador**

### 8.2.2 Matrices de transformación homogéneas

Continuando con el método de Denavit-Hartenberg, se puede obtener una matriz de transformación homogénea (MTH) para cada grado de libertad, en la cual ya estarán incluidos todos los parámetros hallados anteriormente, utilizando las matrices homogéneas, es posible representar las traslaciones y rotaciones de mis sistemas de referencia entre los distintos eslabones que componen el manipulador.

Las matrices de transformación homogénea se representan generalmente con la letra T, precedida de un subíndice y un superíndice, que representan el sistema de referencia de la articulación precedente (i-1), y del posterior (i) respectivamente.

Ahora para poder expresar en sus términos matriciales se hace de la siguiente manera:

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i * \cos\alpha_{i-1} & \sin\theta_i * \sin\alpha_{i-1} & a_i * \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i * \cos\alpha_{i-1} & -\cos\theta_i * \sin\alpha_{i-1} & a_i * \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

De esta forma se obtiene de manera general la matriz de transformación homogénea, que expresa la transformación entre los sistemas de coordenadas de dos eslabones consecutivos. Así se puede obtener una matriz de transformación que será muy importante para los desarrollos cinemáticos y dinámicos del manipulador, la matriz de transformación final entre la base y el efector final, esta me expresará la orientación y posición del efector final en las coordenadas cartesianas.

Ahora cada una de las columnas expresa en sus tres primeras filas, comenzando por la izquierda y hacia la derecha, el vector de orientación en el eje X, el Y, el Z conocida como la NOA del sistema y el vector de posición en el mismo orden de coordenadas. Por lo tanto, las tres primeras columnas corresponden con la matriz de rotación entre los eslabones tratados, y la última será el vector de posición, la última fila se utiliza para que la matriz sea cuadrada y poder realizar operaciones de matriciales de manera más sencilla.

Una vez que se han definido los parámetros de Denavit-Hartenberg y según se definan las matrices de transformación de toda la cadena cinemática del manipulador, el planteamiento de las ecuaciones de la cinemática directa del manipulador se hace de forma directa.

El primer paso consiste entonces en determinar cada una de las matrices de transformación, esto será por medio del mencionado con anterioridad el script de matlab de manera simbólica como se muestra a continuación.

```
A01_S =

[ cos(q1),  0, -sin(q1),  0]
[ sin(q1),  0,  cos(q1),  0]
[      0, -1,      0, a1]
[      0,  0,      0,  1]
```

Figura 256. MTH Simbólica(A01)

```
A02_S =

[ cos(q1)*sin(q2), cos(q1)*cos(q2), -sin(q1), a2*cos(q1)*sin(q2) ]
[ sin(q1)*sin(q2), cos(q2)*sin(q1),  cos(q1), a2*sin(q1)*sin(q2) ]
[      cos(q2),      -sin(q2),      0,  a1 + a2*cos(q2) ]
[      0,      0,      0,  1]
```

Figura 257. MTH Simbólica(A02)

```
A03_S =

[ sin(q2 + q3)*cos(q1),  sin(q1), cos(q2 + q3)*cos(q1),
[ sin(q2 + q3)*sin(q1), -cos(q1), cos(q2 + q3)*sin(q1),
[      cos(q2 + q3),      0,      -sin(q2 + q3),
[      0,      0,      0,
      cos(q1)*(a3*sin(q2 + q3) + a2*sin(q2)) ]
      sin(q1)*(a3*sin(q2 + q3) + a2*sin(q2)) ]
      a1 + a3*cos(q2 + q3) + a2*cos(q2) ]
      1]
```

Figura 258. MTH Simbólica(A03)

```
A04_S =

[ sin(q1)*sin(q4) + sin(q2 + q3)*cos(q1)*cos(q4), cos(q2 + q3)*cos(q1),
[ sin(q2 + q3)*cos(q4)*sin(q1) - cos(q1)*sin(q4), cos(q2 + q3)*sin(q1),
[
cos(q2 + q3)*cos(q4), -sin(q2 + q3),
[
0, 0,
sin(q2 + q3)*cos(q1)*sin(q4) - cos(q4)*sin(q1),
cos(q1)*cos(q4) + sin(q2 + q3)*sin(q1)*sin(q4),
cos(q2 + q3)*sin(q4),
0,
cos(q1)*(a3*sin(q2 + q3) + a2*sin(q2)) + a4*cos(q2 + q3)*cos(q1)]
sin(q1)*(a3*sin(q2 + q3) + a2*sin(q2)) + a4*cos(q2 + q3)*sin(q1)]
a1 + a3*cos(q2 + q3) - a4*sin(q2 + q3) + a2*cos(q2)]
1]
```

Figura 259. MTH Simbólica(A04)

```
A05_S =

[ cos(q5)*(sin(q1)*sin(q4) + sin(q2 + q3)*cos(q1)*cos(q4)) + cos(q2 + q3)*cos(q1)*sin(q5),
[ cos(q2 + q3)*sin(q1)*sin(q5) - cos(q5)*(cos(q1)*sin(q4) - sin(q2 + q3)*cos(q4)*sin(q1)),
[
cos(q2 + q3)*cos(q4)*cos(q5) - sin(q2 + q3)*sin(q5),
[
0,
cos(q4)*sin(q1) - sin(q2 + q3)*cos(q1)*sin(q4),
- cos(q1)*cos(q4) - sin(q2 + q3)*sin(q1)*sin(q4),
-cos(q2 + q3)*sin(q4),
0,
cos(q2 + q3)*cos(q1)*cos(q5) - sin(q5)*(sin(q1)*sin(q4) + sin(q2 + q3)*cos(q1)*cos(q4)),
sin(q5)*(cos(q1)*sin(q4) - sin(q2 + q3)*cos(q4)*sin(q1)) + cos(q2 + q3)*cos(q5)*sin(q1),
- sin(q2 + q3)*cos(q5) - cos(q2 + q3)*cos(q4)*sin(q5),
0,
cos(q1)*(a3*sin(q2 + q3) + a2*sin(q2)) + a4*cos(q2 + q3)*cos(q1)]
sin(q1)*(a3*sin(q2 + q3) + a2*sin(q2)) + a4*cos(q2 + q3)*sin(q1)]
a1 + a3*cos(q2 + q3) - a4*sin(q2 + q3) + a2*cos(q2)]
1]
```

Figura 260. MTH Simbólica(A05)

```
A06_S =

[ sin(q6)*(cos(q4)*sin(q1) - sin(q2 + q3)*cos(q1)*sin(q4)) + cos(q6)*(cos(q5)*
[ - sin(q6)*(cos(q1)*cos(q4) + sin(q2 + q3)*sin(q1)*sin(q4)) - cos(q6)*(cos(q5)*
[ - cos(q6)*(sin(
[

cos(q6)*(cos(q4)*sin(q1) - sin(q2 + q3)*cos(q1)*sin(q4)) - sin(q6)*(cos(q5)*(sin
sin(q6)*(cos(q5)*(cos(q1)*sin(q4) - sin(q2 + q3)*cos(q4)*sin(q1)) - cos(q2 + q3)
sin(q6)*(sin(q2

cos(q2 + q3)
sin(q5)*(co

cos(q1)*(a3*sin(q2 + q3) + a2*sin(q2)) - a5*(sin(q5)*(sin(q1)*sin(q4) + sin(q2 +
a5*(sin(q5)*(cos(q1)*sin(q4) - sin(q2 + q3)*cos(q4)*sin(q1)) + cos(q2 + q3)*cos(
a1 + a3*cos(q2 + q3) - a4*sin(q

sin(q4) + sin(q2 + q3)*cos(q1)*cos(q4)) + cos(q2 + q3)*cos(q1)*sin(q5)),
sin(q4) - sin(q2 + q3)*cos(q4)*sin(q1)) - cos(q2 + q3)*sin(q1)*sin(q5)),
*sin(q5) - cos(q2 + q3)*cos(q4)*cos(q5)) - cos(q2 + q3)*sin(q4)*sin(q6),
0,

(q4) + sin(q2 + q3)*cos(q1)*cos(q4)) + cos(q2 + q3)*cos(q1)*sin(q5)),
*sin(q5)) - cos(q6)*(cos(q1)*cos(q4) + sin(q2 + q3)*sin(q1)*sin(q4)),
1(q5) - cos(q2 + q3)*cos(q4)*cos(q5)) - cos(q2 + q3)*cos(q6)*sin(q4),
0,

)*cos(q5) - sin(q5)*(sin(q1)*sin(q4) + sin(q2 + q3)*cos(q1)*cos(q4)),
n(q4) - sin(q2 + q3)*cos(q4)*sin(q1)) + cos(q2 + q3)*cos(q5)*sin(q1),
- sin(q2 + q3)*cos(q5) - cos(q2 + q3)*cos(q4)*sin(q5),
0,

(q1)*cos(q4)) - cos(q2 + q3)*cos(q1)*cos(q5)) + a4*cos(q2 + q3)*cos(q1)]
q1)) + sin(q1)*(a3*sin(q2 + q3) + a2*sin(q2)) + a4*cos(q2 + q3)*sin(q1)]
+ a2*cos(q2) - a5*(sin(q2 + q3)*cos(q5) + cos(q2 + q3)*cos(q4)*sin(q5))]
1]
```

Figura 261. MTH Simbólica(A06)

Para finalizar con el desarrollo del cálculo de la cinemática directa se realizó una prueba desde el script de matlab como se observa a continuación.

% ARTICULACIONES | Qi | di | ai | alfa |

%-----

% 1 |theta1 | 11 | 0 | -90 |

% 2 |theta2-90 | 0 | 12 | 0 |

% 3 |theta3 | 0 | 13 | -90 |

% 4 |theta4 | 14 | 0 | 90 |

% 5 |theta5 | 0 | 0 | -90 |

% 6 |theta6 | 15 | 0 | 0 |

%-----

clear all,

clear;

clc;

pi=sym('pi');

%-----DISTANCIAS MORFOLOGICAS-----

l1=122;

l2=100;

l3=40;

l4=120;

l5=109.5;

%-----ANGULOS-----

th1=deg2rad(0);

th2=deg2rad(0);

th3=deg2rad(0);

th4=deg2rad(0);

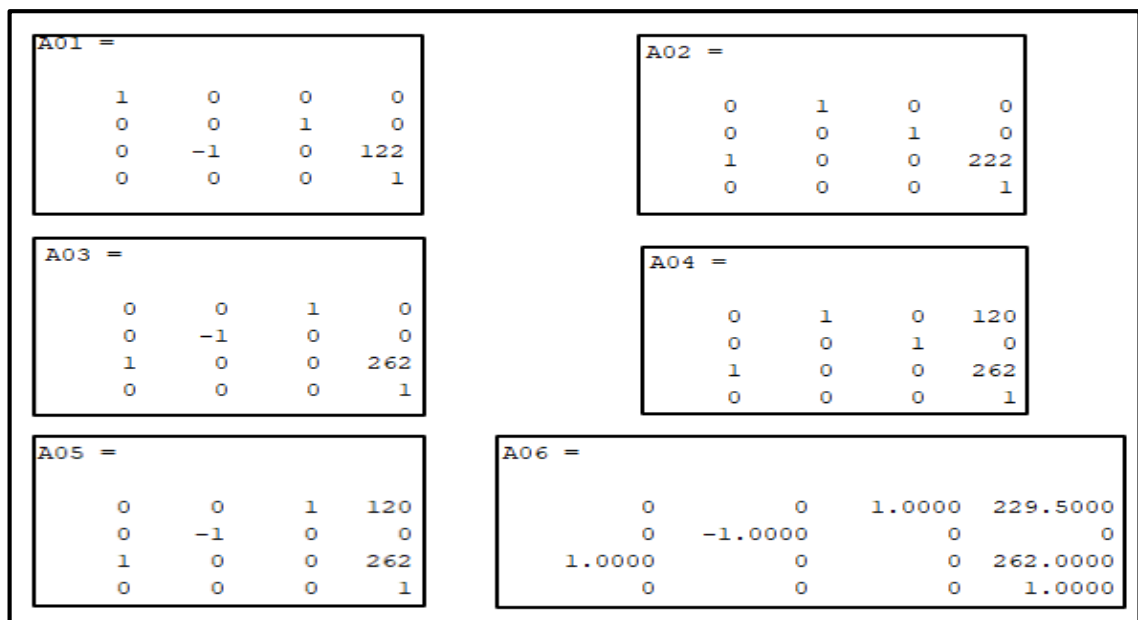
th5=deg2rad(0);

th6=deg2rad(0);

-----CINEMATICA DIRECTA-----

```
A00=eye (4) ;
A01=double (denavit (th1, l1,0,-pi/2));
A12=denavit(th2-(pi/2),0, l2,0);
A23=denavit(th3,0,l3,-pi/2);
A34=denavit(th4,l4,0,pi/2);
A45=denavit(th5,0,0,-pi/2);
A56=denavit(th6,l5,0,0);
A02=double (A01*A12);
A03=double (A02*A23);
A04=double (A03*A34);
A05=double (A04*A45);
A06=double (A05*A56)
```

Con el uso de la función denavit, el cual nos arroja las siguientes matrices de referencias de nuestro manipulador de 6 GDL.



**Figura 262. MTH de casa sistema de referencia**

Donde A06 me representa la matriz de transformación final del efector final con respecto al sistema origen de la base del manipulador.

Por último, se plotea como nos quedaría el manipulador con los sistemas de referencia visto en el espacio cartesiano

```
%-----VIZUALISACION-----  
  
figure(1)  
  
clf;  
  
hold on;  
  
grid on;  
  
axis equal  
  
axis([-1 1 -1 1 0 1]*400);  
  
cameratoolbar;  
  
view([160 25]);  
  
camlight('left');  
  
camproj('perspective');  
  
xlabel('x');  
  
ylabel('y');  
  
zlabel('z');  
  
%-----ORIGEN DE LOS SISTEMAS-----  
  
[origen0]=Sistema3D(A00,30,'x_0','y_0','z_0',15);  
[origen1]=Sistema3D(A01,30,'x_1','y_1','z_1',15);  
[origen2]=Sistema3D(A02,30,'x_2','y_2','z_2',15);  
[origen3]=Sistema3D(A03,30,'x_3','y_3','z_3',15);  
[origen4]=Sistema3D(A04,30,'x_4','y_4','z_4',15);  
[origen5]=Sistema3D(A05,30,'x_5','y_5','z_5',15);  
[origen6]=Sistema3D(A06,30,'x_6','y_6','z_6',15);
```

```
plot3([A00(1,4),A01(1,4)], [A00(2,4),A01(2,4)], [A00(3,4),A01(3,4)], [A01(1,4),A02(1,4)], [A01(2,4),A02(2,4)], [A01(3,4),A02(3,4)], [A02(1,4),A03(1,4)], [A02(2,4),A03(2,4)], [A02(3,4),A03(3,4)], 'Linewidth',8);
```

```
plot3([A03(1,4),A04(1,4)], [A03(2,4),A04(2,4)], [A03(3,4),A04(3,4)], [A04(1,4),A05(1,4)], [A04(2,4),A05(2,4)], [A04(3,4),A05(3,4)], [A05(1,4),A06(1,4)], [A05(2,4),A06(2,4)], [A05(3,4),A06(3,4)], 'Linewidth',8);
```

```
title('cinemática directa del robot');
```

```
function T=denavit(theta,d,a,alfa)
```

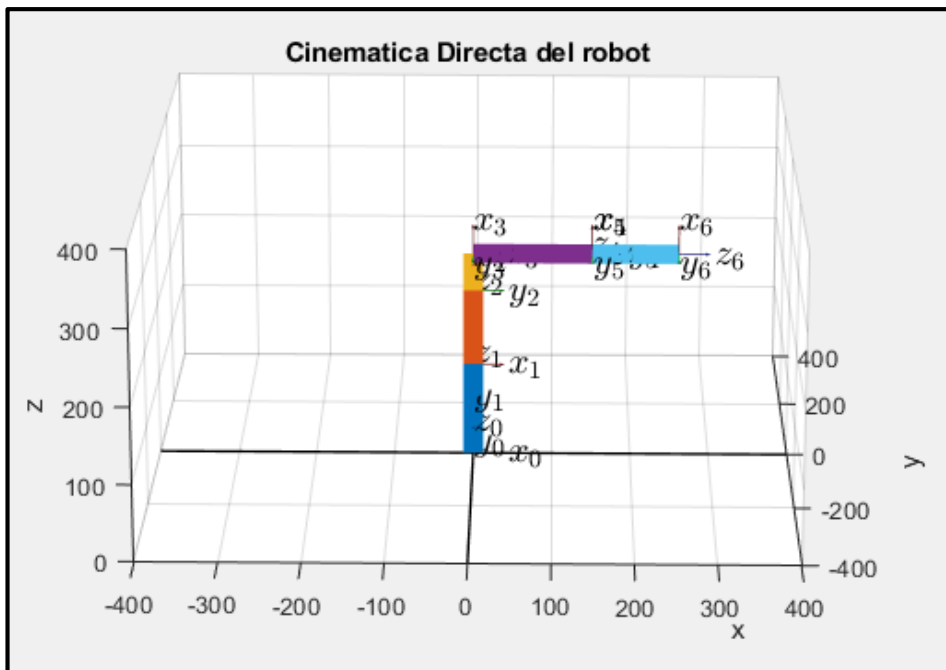
```
T=[cos(theta) -cos(alfa)*sin(theta) sin(alfa)*sin(theta) a*cos(theta);
```

```
sin(theta) cos(alfa)*cos(theta) -sin(alfa)*cos(theta) a*sin(theta);
```

```
0 sin(alfa) cos(alfa) d;
```

```
0 0 0 1];
```

```
End
```

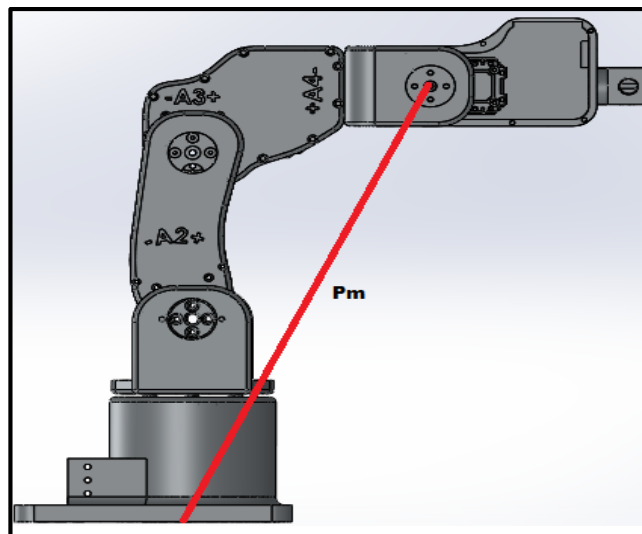


**Figura 263. Implementación de la cinemática directa en el manipulador**

### 8.3 Desarrollo matemático de la cinemática inversa

Para el desarrollo de la cinemática inversa existen diferentes métodos. El método elegido se basa en el estudio de la geometría del manipulador respecto de cada una de las articulaciones rotativas que lo componen. Dado que cualquier método conduce a la resolución de los valores articulares para una posición y orientación dadas del efector final, se eligió un método de sencilla resolución desde el punto de vista computacional y humano, factor importante para finalmente conseguir que los modelos se ejecuten rápidamente para conseguir una alta frecuencia de funcionamiento de el mismo en la parte de su control.

Para su cálculo se sabe que se cuenta con un manipulador de 6 GDL por ende se utilizara el método de desacople cinemático, ya que es aplicable a aquellos robots cuyos tres últimos grados de libertad se cortan en un punto. Para ello, dada una posición y orientación final deseadas, establece las coordenadas del punto de corte de los 3 últimos ejes (muñeca del robot) calculándose los valores de las tres primeras variables articulares ( $q_1$ ,  $q_2$ ,  $q_3$ ) que consiguen posicionar este punto como se puede observar en la Figura 264 .



**Figura 264. Método de Desacople Cinemático**

Para una mejor optimización en el cálculo se procede a llevar el manipulador a su esquema morfológico para así poder apreciar de una mejor manera el método a emplear como se observa en la Figura 265.

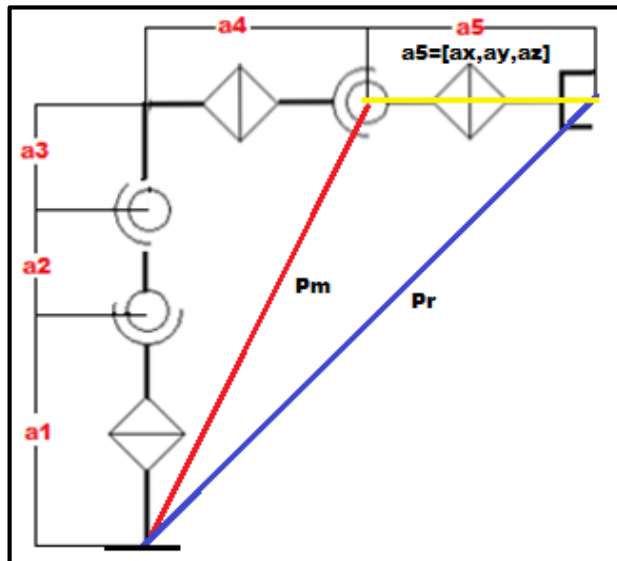


Figura 265. Método de Desacople cinemático(esquema)

Ese punto será la ubicación de la quinta articulación, por tanto, se llamará punto de muñeca. Para calcularlo, la posición marcada por la posición y orientación del efector final, se deben restar estas dimensiones. Recordar que en la cinemática directa ya se le dio las distancias morfológicas.

Donde el vector  $P_r$  se obtiene a través de la matriz de transformación final de la cinemática directa siendo este el vector de posición de dicha matriz.

$$P_r = [p_x; p_y; p_z]$$

Por ende el vector punto de muñeca sería el vector  $P_r$  calculado anteriormente menos la distancia morfológica  $a_5$  por el vector  $z$  de la noa de la MTH final.

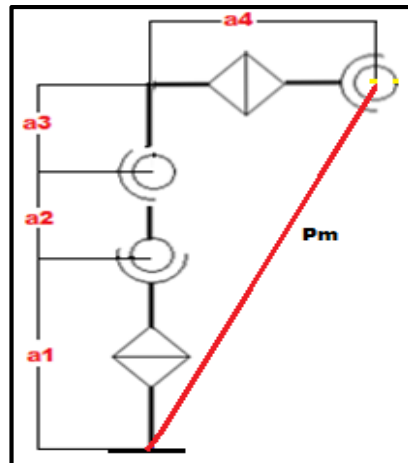
$$P_m = P_r - a_5 * [a_x; a_y; a_z]$$

$$P_{mx} = P_m(1);$$

$$P_{my} = P_m(2);$$

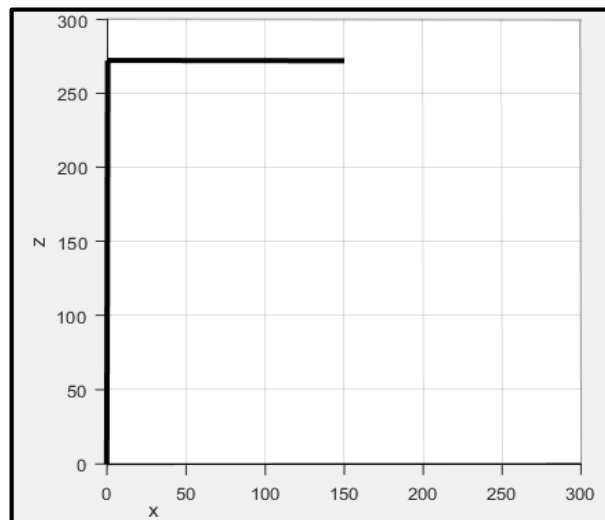
$$P_{mz} = P_m(3);$$

Ahora solo se analizará los primeros tres grados de libertad como se muestra en la Figura 266 para su obtención a través del método geométrico



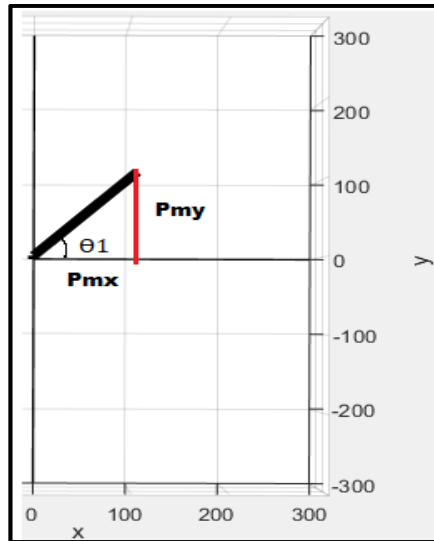
**Figura 266. Método de Desacople cinemático (desarticulado)**

Como se explica en el método los tres primeros ángulos de las articulaciones se hallarán de manera geométrica dándole movimiento a la articulación para su análisis, en lo cual se optó por plotear el manipulador en los tres primeros Ángulos para así poder sacar las vistas para su respectivo análisis geométrico.



**Figura 267. Plot del Manipulador (tres primeros ángulos)**

A continuación, se muestra como es el cálculo para  $q_1$ , basándonos en la siguiente figura.



**Figura 268. Vista superior del manipulador (3 primeros DDL)**

Para la obtención de  $\theta_1$  resulta ser muy sencillo debido a su posicionamiento desde la vista superior como se observa en la Figura 268, por lo cual se obtiene de la siguiente manera:

$$\theta_1 = \arctan(P_{my}/P_{mx})$$

Obtenido  $\theta_1$  se procede a cambiar de vista como lo es la vista lateral en el cual se puede apreciar de una mejor manera la ubicación de los ángulos restantes como se observa en la Figura 269.

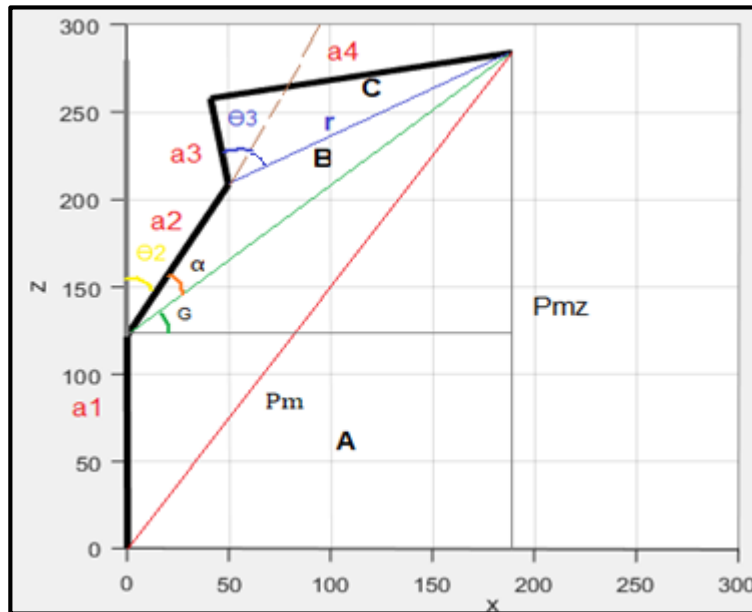


Figura 269. Vista lateral del manipulador (3 primeros DDL)

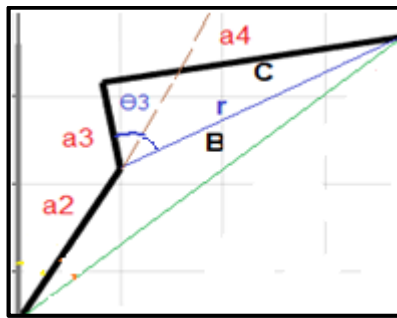
se procede a sacar unas variables necesarias para el desarrollo en el cálculo geométrico como lo son las variables A, B, C.

$$A = \sqrt{(Pmx^2) + (Pmy^2)}$$

$$B = \sqrt{(Pmz - a1)^2 + A^2}$$

$$C = \sqrt{(a3^2) + (a4^2)}$$

una vez realizado esto se procede hacer un zoom a la figura anterior para abordar los ángulos requeridos en este sistema como se observa en la Figura 270 .



**Figura 270. Geometría para el cálculo de theta 3**

Se procede a aplicar el teorema del coseno para hallar a r:

Donde:

$$B^2 = a2^2 + C^2 - 2(a2)(C)\cos(180 - r)$$

Luego aplicamos la identidad trigonométrica para la resta de dos ángulos para coseno:

$$\cos(180 - r) = \cos(180) * \cos(r) + \sen(180) * \sen(r)$$

Resolviendo nos queda de la siguiente manera:

$$\cos(180 - r) = \cos(r)$$

Remplazando en la ecuación:

$$B^2 = a2^2 + C^2 + 2(a2)(C)\cos(r)$$

Despejando cos (r) obtenemos que:

$$\cos(r) = (B^2 - a2^2 - C^2) / 2(a2)(C)$$

Obteniendo el cos (r) se procede a aplicar la siguiente identidad trigonométrica:

$$\text{sen}^2(x) + \text{cos}^2(x) = 1$$

con lo cual obtenemos sen (r):

$$\text{sen}(r) = \sqrt{1 - \text{cos}^2(r)}$$

para así obtener como el resultado de r como:

$$r = \arctan(\text{sen}(r)/\text{cos}(r))$$

obtenido el Angulo restante que conforma a  $\Theta 3$  decimos que:

$$\text{sen}(\Theta 3 + r) = \frac{a4}{c}$$

$$\text{cos}(\Theta 3 + r) = \frac{a3}{c}$$

luego despejando obtenemos a  $\Theta 3$ :

$$(\Theta 3 + r) = \arctan\left(\frac{\text{sen}(\Theta 3 + r)}{\text{cos}(\Theta 3 + r)}\right) = \text{aux}$$

$$\Theta 3 = \text{aux} - r$$

Una vez hallado el Angulo  $\Theta 3$  se procede de igual manera para hallar a  $\Theta 2$  hallando los ángulos complementarios de alfa y gamma como se muestra en la Figura 271.

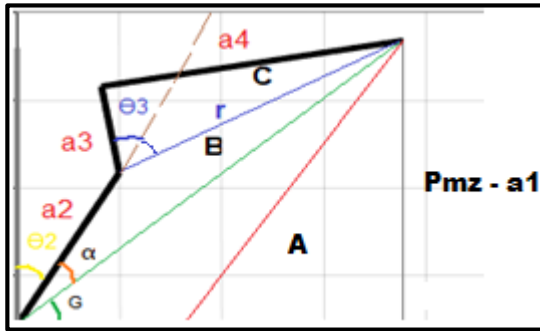


Figura 271. Geometría para el cálculo de theta 2

para eso decimos que:

$$\text{sen}(G) = \frac{\text{Pmz} - a1}{B}$$

$$\cos(G) = \frac{A}{B}$$

donde G es igual a:

$$G = \frac{\text{sen}(G)}{\cos(G)}$$

Ahora de igual manera con el teorema del coseno se obtiene el cos alfa:

$$C^2 = B^2 + a2^2 - 2(B)(a2)\cos(\alpha)$$

$$\cos(\alpha) = (C^2 - B^2 - a2^2) / -2(a2)(B)$$

Aplicando siguiente la identidad trigonométrica se obtuvo el seno alfa:

$$\text{sen}^2(x) + \cos^2(x) = 1$$

$$\text{sen}(\alpha) = \sqrt{1 - \cos^2(\alpha)}$$

ahora obtenemos  $\alpha$  como:

$$\alpha = \arctan \left( \frac{\text{sen}(\alpha)}{\text{cos}(\alpha)} \right)$$

obtenido los ángulos restantes que conforma a  $\Theta_2$  decimos que:

$$\Theta_2 = 90 - (\alpha - G)$$

Anteriormente se obtuvo el cálculo para los ángulos de  $q_1$ ,  $q_2$ ,  $q_3$  mediante el método geométrico. Queda ahora obtener los valores de  $q_4$ ,  $q_5$ , y  $q_6$  que consiguen la orientación deseada del extremo. Para ello se denominando como  $R_{06}$  a la submatriz de rotación de o  $A_{06}$ , matriz que se conoce de la cinemática directa realizada con anterioridad.

Por ende:

$$R_{06} = [NOA] = R_{03} * R_{36}$$

Dónde:

- $R_{06}$  es conocida por ser la submatriz de rotación final del robot.
- $R_{03}$  está definida por  $R_{03} = R_{01} * R_{02} * R_{03}$ , que también será conocida a partir de los valores ya obtenidos a través del método geométrico de  $q_1$ ,  $q_2$  y  $q_3$ .

Por lo tanto, teniendo en cuenta lo anterior se puede expresar la siguiente formulación que me dará como consecuencia la obtención de los ángulos restantes ( $q_4$ ,  $q_5$ ,  $q_6$ ).

$$R_{36} = (R_{03})^{-1} * R_{06}$$

En otras palabras, se puede expresar la ecuación descrita anterior mente como:

- R36 corresponde con la submatriz de rotación de la matriz de transformación homogénea T36 que relaciona el sistema S3 con el S6.
- $(R03)^{-1} * R06$  es una matriz resultante cuyos componentes son conocidas, ya que parte de la matriz de transformación final y de los tres primeros ángulos hallados con anterioridad

A continuación, se procedo por medio de un escript de Matlab de la cinemática directa planteada con anterioridad, la obtención de dichas matrices de rotación en la cual se calcularon de manera simbólicas para sus receptivos cálculos.

Primero se obtinene las matrcies componenetes de la matriz de rotación R36 cuyas componentes son las que se van a hallar.

|                                                                                                                  |                                                                                                                   |                                                                                                                  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>R34 =</b><br>$\begin{bmatrix} \cos(q4) & \sin(q4) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \sin(q4) & -\cos(q4) & 0 \end{bmatrix}$ | <b>R45 =</b><br>$\begin{bmatrix} \cos(q5) & \sin(q5) & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ -\sin(q5) & \cos(q5) & 0 \end{bmatrix}$ | <b>R56 =</b><br>$\begin{bmatrix} \cos(q6) & \sin(q6) & 0 \\ -\sin(q6) & \cos(q6) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

**Figura 272. matrices componentes de R36**

Donde aplicando la formula  $R36 = R34 * R45 * R56$  ,obtenemos las siguientes 12 ecuaciones como se observa en la Figura 273, que es donde se sacaran las fórmulas para hallar los ángulos  $q4, q5, q6$ .

$$R_{36} = \begin{bmatrix} \cos(q_4) \cos(q_5) \cos(q_6) - \sin(q_4) \sin(q_6), & -\cos(q_6) \sin(q_4) - \cos(q_4) \cos(q_5) \sin(q_6), & -\cos(q_4) \sin(q_5) \\ \cos(q_4) \sin(q_6) + \cos(q_5) \cos(q_6) \sin(q_4), & \cos(q_4) \cos(q_6) - \cos(q_5) \sin(q_4) \sin(q_6), & -\sin(q_4) \sin(q_5) \\ \cos(q_6) \sin(q_5), & -\sin(q_5) \sin(q_6), & \cos(q_5) \end{bmatrix}$$

**Figura 273. Matriz de rotación R36**

Obteniendo la matriz R36 ahora buscamos su igualdad la cual es  $(R_{03})^{-1} * R_{06}$

$$R_{03} = \begin{bmatrix} \sin(q_2 + q_3) \cos(q_1), & \sin(q_2 + q_3) \sin(q_1), & \cos(q_2 + q_3) \\ \sin(q_1), & -\cos(q_1), & 0 \\ \cos(q_2 + q_3) \cos(q_1), & \cos(q_2 + q_3) \sin(q_1), & -\sin(q_2 + q_3) \end{bmatrix}$$

**Figura 274. Matriz de rotación R03**

Para la matriz de rotación final ( $R_{06}$ ) se dispuso de manera simbólica de la siguiente manera, no obstante, esta matriz ya se conoce que es la MTH final de los parámetros D-H.

$$R_{06} = \begin{bmatrix} n_x, & o_x, & a_x \\ n_y, & o_y, & a_y \\ n_z, & o_z, & a_z \end{bmatrix}$$

**Figura 275. Matriz de rotación R06**

Ahora multiplicando ambas matrices se obtiene  $(R_{03})^{-1} * R_{06}$  en el cual la representaremos como  $mth\_f$  como se observa en la Figura 276.

```

mth_f =

[ nz*cos(q2 + q3) + nx*sin(q2 + q3)*cos(q1) + ny*sin(q2 + q3)*sin(q1),
  [                                     nx*sin(q1) - ny*cos(q1),
  [ nx*cos(q2 + q3)*cos(q1) - nz*sin(q2 + q3) + ny*cos(q2 + q3)*sin(q1),

    oz*cos(q2 + q3) + ox*sin(q2 + q3)*cos(q1) + oy*sin(q2 + q3)*sin(q1),
                                     ox*sin(q1) - oy*cos(q1),
    ox*cos(q2 + q3)*cos(q1) - oz*sin(q2 + q3) + oy*cos(q2 + q3)*sin(q1),

    az*cos(q2 + q3) + ax*sin(q2 + q3)*cos(q1) + ay*sin(q2 + q3)*sin(q1) ]
                                     ax*sin(q1) - ay*cos(q1) ]
    ax*cos(q2 + q3)*cos(q1) - az*sin(q2 + q3) + ay*cos(q2 + q3)*sin(q1) ]
  
```

Figura 276. Matriz mth\_f

Una vez calculada las matrices procedemos con el cálculo de hallar las ecuaciones necesarias para hallar q4, q5, q6, haciendo la igualación de ambas matrices calculadas anteriormente.

Donde:

$$\cos_{q5} = ax * \cos(q2 + q3) * \cos(q1) - az * \sin(q2 + q3) + ay * \cos(q2 + q3) * \sin(q1)$$

$$\sin_{q5} = \sqrt{1 - \cos_{q5}^2};$$

$$q5 = \text{atan2}(\sin_{q5}, \cos_{q5})$$

$$q4 = \text{atan2}(ax * \sin(q1) - ay * \cos(q1), az * \cos(q2 + q3) + ax * \sin(q2 + q3) * \cos(q1) + ay * \sin(q2 + q3) * \sin(q1))$$

$$q6 = \text{atan2}(-1 * (ox * \cos(q2 + q3) * \cos(q1) - oz * \sin(q2 + q3) + oy * \cos(q2 + q3) * \sin(q1)), nx * \cos(q2 + q3) * \cos(q1) - nz * \sin(q2 + q3) + ny * \cos(q2 + q3) * \sin(q1))$$

Obtenidos las ecuaciones para el respectivo cálculo de los ángulos (q1, q2, q3, q4, q5, q6) de las articulaciones, realizo una prueba desde el script de matlab como se observa a continuación:

```
%-----DISTANCIAS MORFOLOGICAS-----
l1=122;
l2=100;
l3=50;
l4=150;
l5=109.5;

%-----ANGULOS-----
--
th1=deg2rad(0);
th2=deg2rad(0);
th3=deg2rad(0);
th4=deg2rad(0);
th5=deg2rad(0);
th6=deg2rad(0);

%-----CINEMATICA DIRECTA-----
--
A00=eye(4);
A01=double(denavit(th1,l1,0,-pi/2));
A12=denavit(th2-(pi/2),0,l2,0);
A23=denavit(th3,0,l3,-pi/2);
A34=denavit(th4,l4,0,pi/2);
A45=denavit(th5,0,0,-pi/2);
A56=denavit(th6,l5,0,0);
A02=double(A01*A12);
A03=double(A02*A23);
A04=double(A03*A34);
A05=double(A04*A45);
A06=double(A05*A56);

%-----CINEMATICA INVERSA-----
nx=A06(1,1);
ny=A06(2,1);
nz=A06(3,1);
ox=A06(1,2);
oy=A06(2,2);
oz=A06(3,2);
ax=A06(1,3);
ay=A06(2,3);
az=A06(3,3);
px=A06(1,4);
py=A06(2,4);
pz=A06(3,4);
```

%Punto de muñeca



*"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"*

Universidad de Pamplona  
 Pamplona - Norte de Santander - Colombia  
 Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750

SC-CER96940

```
Pr = [px;py;pz];
Pm = Pr - a5*[ax;ay;az];
Pmx = Pm(1);
Pmy = Pm(2);
Pmz = Pm(3);
```

*%Obtencion de los angulos*

```
%-----
q1 = round(atan2(Pmy,Pmx), 8);
%-----
```

```
A = sqrt( (Pmx^2) + (Pmy^2) );
B = sqrt( ( (Pmz - a1)^2 ) + A^2);
C = sqrt( (a3^2) + (a4^2) );
```

```
cos_gamma = ( (B^2) - (a2^2) - (C^2) ) / (2 * a2 * C);
sen_gamma = sqrt( 1 - (cos_gamma^2) );
gamma = atan2(sen_gamma, cos_gamma);
```

```
%-----
--
q3 =round( (atan2(a4 / C, a3 / C) - gamma)*-1, 8);
%-----
```

```
sen_rho = (Pmz - a1) / B;
cos_rho = A / B;
rho = atan2(sen_rho, cos_rho);
cos_alfa = ( (C^2) - (a2^2) - (B^2) ) / (-2 * a2 * B);
sen_alfa = sqrt( 1 - (cos_alfa^2) );
alfa = atan2(sen_alfa, cos_alfa);
```

```
%-----
-----
q2 = round(double(pi / 2 - (alfa + rho)), 8);
%-----
-----
```

```
cos_q5 = ax*cos(q2 + q3)*cos(q1) - az*sin(q2 + q3) + ay*cos(q2 +
q3)*sin(q1);
sen_q5 = sqrt(1 - cos_q5^2);
```

```
if az >= 0
    sen_q5 = -sqrt(1 - cos_q5^2);
    q5 = atan2(sen_q5, cos_q5);
    q4 = atan2(ax*sin(q1) - ay*cos(q1) , az*cos(q2 + q3) + ax*sin(q2 +
q3)*cos(q1) + ay*sin(q2 + q3)*sin(q1) ) + double(pi) - double(pi);
    q6 = atan2( -1*(ox*cos(q2 + q3)*cos(q1) - oz*sin(q2 + q3) + oy*cos(q2
+ q3)*sin(q1)), nx*cos(q2 + q3)*cos(q1) - nz*sin(q2 + q3) + ny*cos(q2 +
q3)*sin(q1)) + double(pi);
```

else

```

sen_q5 = sqrt(1 - cos_q5^2);
q5 = atan2(sen_q5, cos_q5);
q4 = atan2(ax*sin(q1) - ay*cos(q1) , az*cos(q2 + q3) + ax*sin(q2 +
q3)*cos(q1) + ay*sin(q2 + q3)*sin(q1) ) + double(pi);
q6 = atan2( -1*(ox*cos(q2 + q3)*cos(q1) - oz*sin(q2 + q3) + oy*cos(q2
+ q3)*sin(q1)), nx*cos(q2 + q3)*cos(q1) - nz*sin(q2 + q3) + ny*cos(q2 +
q3)*sin(q1));
end

if rad2deg(q4) > 165
    q4 = double(q4 - 2*pi);
elseif rad2deg(q4) < -165
    q4 = double(q4 + 2*pi);
end

if rad2deg(q6) > 165
    q6 = double(q6 - 2*pi);
elseif rad2deg(q6) < -165
    q6 = double(q6 + 2*pi);
end

q1=th1; q2=th2; q3=th3; q4=th4; q5=th5; q6=th6;

A00=eye(4);
A01=double(denavit(th1,l1,0,-pi/2));
A12=denavit(th2-(pi/2),0,l2,0);
A23=denavit(th3,0,l3,-pi/2);
A34=denavit(th4,l4,0,pi/2);
A45=denavit(th5,0,0,-pi/2);
A56=denavit(th6,l5,0,0);
A02=double(A01*A12);
A03=double(A02*A23);
A04=double(A03*A34);
A05=double(A04*A45);
A06=double(A05*A56);

figure(1);
clf;
hold on;
grid on;
axis equal
axis([-1 1 -1 1 0 1]*400);
cameratoolbar;
view([160 25]);
camlight('left');
camproj('perspective');
xlabel('x');
ylabel('y');
zlabel('z');

%Origen de los sistemas
[origen0]=Sistema3D(A00,20,'x_0','y_0','z_0',15);
[origen1]=Sistema3D(A01,20,'x_1','y_1','z_1',15);

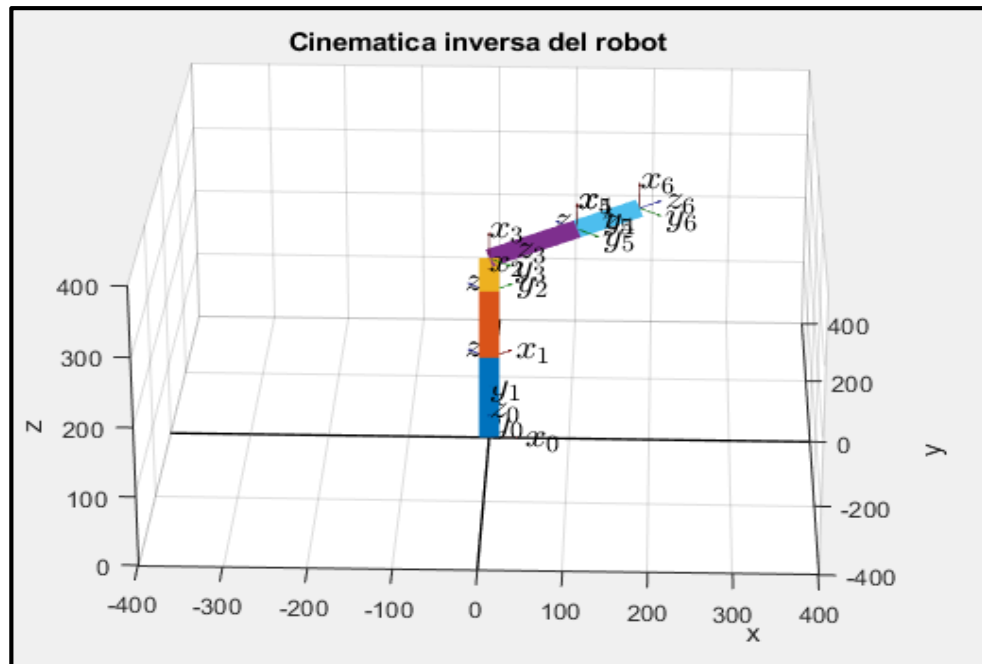
```

```
[origen2]=Sistema3D(A02,20,'x_2','y_2','z_2',15);
[origen3]=Sistema3D(A03,20,'x_3','y_3','z_3',15);
[origen4]=Sistema3D(A04,20,'x_4','y_4','z_4',15);
[origen5]=Sistema3D(A05,20,'x_5','y_5','z_5',15);
[origen6]=Sistema3D(A06,20,'x_6','y_6','z_6',15);
```

```
plot3([A00(1,4),A01(1,4)],[A00(2,4),A01(2,4)],[A00(3,4),A01(3,4)],[A01(1,4),A02(1,4)],[A01(2,4),A02(2,4)],[A01(3,4),A02(3,4)],[A02(1,4),A03(1,4)],[A02(2,4),A03(2,4)],[A02(3,4),A03(3,4)], 'Linewidth',10);
```

```
plot3([A03(1,4),A04(1,4)],[A03(2,4),A04(2,4)],[A03(3,4),A04(3,4)],[A04(1,4),A05(1,4)],[A04(2,4),A05(2,4)],[A04(3,4),A05(3,4)],[A05(1,4),A06(1,4)],[A05(2,4),A06(2,4)],[A05(3,4),A06(3,4)], 'Linewidth',10);
title('Cinematica Inversa del robot');
```

```
function T=denavit(theta,d,a,alfa)
T=[cos(theta) -cos(alfa)*sin(theta) sin(alfa)*sin(theta) a*cos(theta);
    sin(theta) cos(alfa)*cos(theta) -sin(alfa)*cos(theta) a*sin(theta);
    0 sin(alfa) cos(alfa) d;
    0 0 0 1];
end
```



**Figura 277. Implementación de la cinemática inversa en el manipulador**

## 8.4 Control cinemático y trayectorias

El control cinemático es una estrategia de control que consiste en un lazo abierto donde por medio de un punto inicial y final se obtiene una trayectoria realizable por un robot o manipulador, por lo cual se encarga que a partir de una trayectoria de referencia, realiza un muestreo (interpolación) a través de una serie de puntos finitos pertenecientes a dicha trayectoria, apoyándose en el modelo cinemático directo e inverso, donde se obtienen los valores angulares de las articulaciones en cada uno de esos puntos, de modo que a partir de ellos se obtenga una expresión que se aproxime a esos puntos en función del tiempo y que sea realizable por los actuadores reales que han de implementar dicha trayectoria articular. Estas trayectorias se seleccionarán respondiendo a las restricciones físicas propias de los accionamientos y a los criterios de diseño (morfológicas).

### 8.4.1 Tipos de Trayectorias

Los robots o manipuladores puedan realizar trayectorias cada vez más complejas, al poder ser éstas calculadas previamente en el modelo cinemático directo e inverso. A continuación, se cita brevemente una clasificación de tipos de trayectorias de los robots comerciales clásicos.

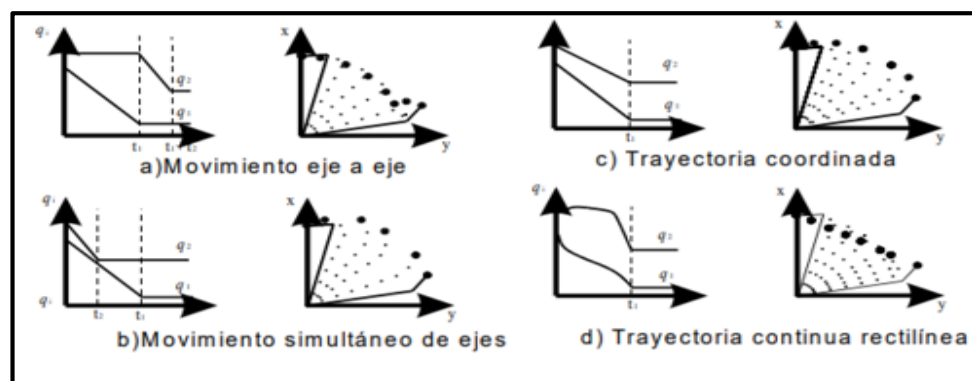


Figura 278. Tipos de trayectoria.<sup>71</sup>

<sup>71</sup> Barrientos, Antonio. Fundamentos de robótica. Op.cit, p.284.

#### 8.4.1.1 Trayectoria Eje a Eje

En este tipo de trayectorias cada articulación se mueve independientemente, sin considerar el efecto del resto de las articulaciones. Dentro de este tipo se engloban las trayectorias con movimiento eje a eje y las de movimiento simultáneo de ejes. En las trayectorias con movimiento eje a eje en primer lugar se actúa sobre un motor, y cuando este ha finalizado su recorrido, se activa el siguiente motor. Este tipo de movimiento tiene como única ventaja el ahorro energético.

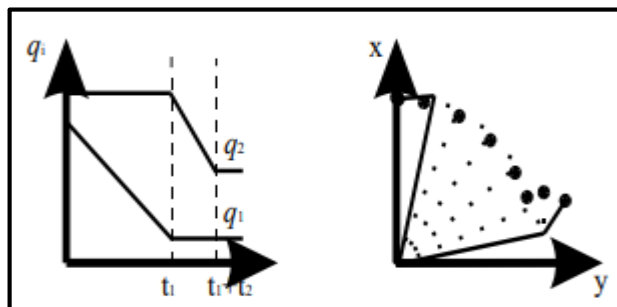


Figura 279. Movimiento eje a eje<sup>72</sup>

#### 8.4.1.2 Trayectoria Simultanea

En este tipo de trayectorias el movimiento de todos los actuadores es simultáneo. Donde cada actuador por independiente logra alcanzar la posición requerida y manteniéndose hasta que el actuador que más tarde en llegar a su posición final, de manera que el movimiento es simultáneo, pero con diferentes tiempos de finalización de las otras articulaciones. El tiempo total invertido en el movimiento es el menor posible, y los requerimientos de velocidad y aceleración de los motores son menores que en otro tipo de movimiento.

<sup>72</sup> Ibid, p.284

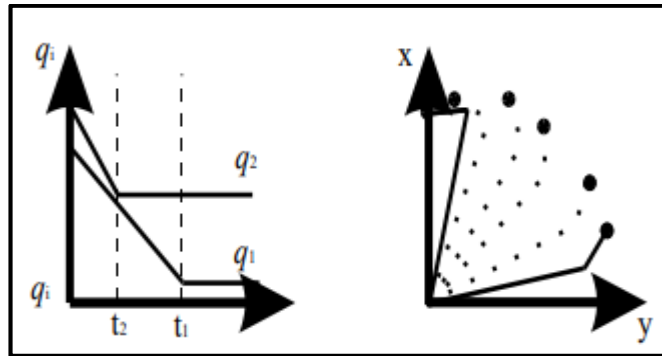


Figura 280. Movimiento Simultáneo<sup>73</sup>

#### 8.4.1.3 Trayectoria coordinada o isócrona

En este tipo de trayectorias el movimiento de todos los actuadores sea coordinado e isócrona. Donde el actuador que tarda más tiempo en alcanzar la posición requerida ralentiza al resto de actuadores, de manera que ningún movimiento acaba antes que el de otra articulación. El tiempo total invertido en el movimiento es el menor posible, y los requerimientos de velocidad y aceleración de los motores son menores que en otro tipo de movimiento.

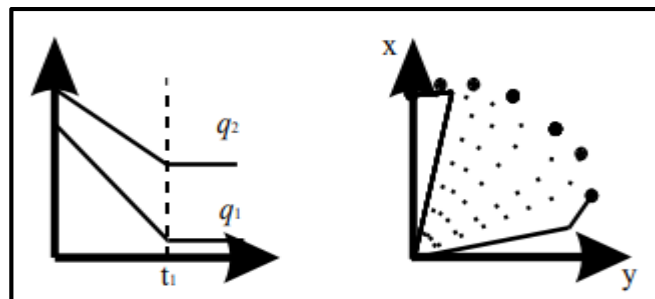


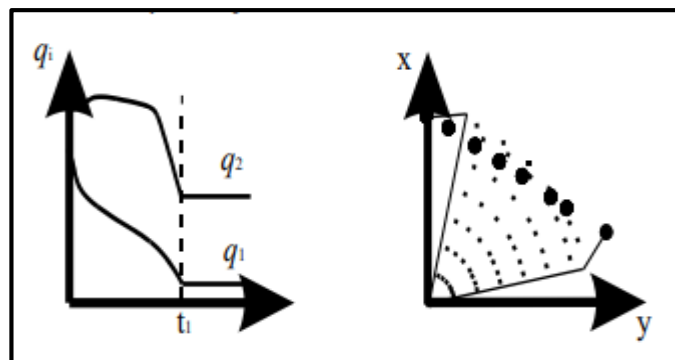
Figura 281. Movimiento Coordinado<sup>74</sup>

<sup>73</sup> Ibid, p.284

<sup>74</sup> Ibid, p.284

#### 8.4.1.4 Trayectoria continua

En este tipo de trayectorias se pretende que el camino seguido por el extremo del robot sea conocido. Para ello las trayectorias articulares deben acomodarse conjuntamente. Cada articulación por separado parece tener un movimiento desordenado, sin embargo, el resultado es que el extremo se mueve siguiendo el camino previsto (en línea recta).



**Figura 282. Trayectoria Continua.**<sup>75</sup>

#### 8.5 Funciones del control cinemático

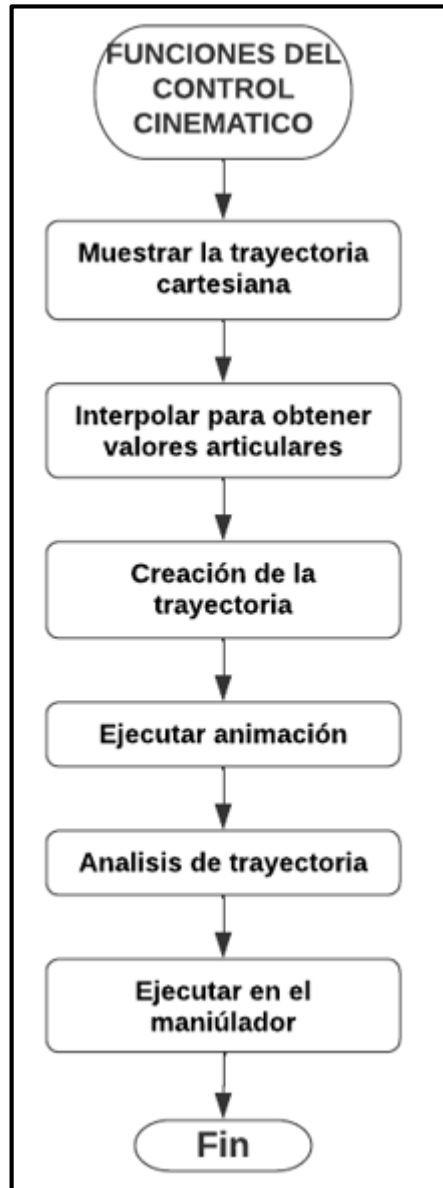
A continuación, se especifica el método de programación del control cinemático ejecutando los diferentes tipos de trayectorias con lo cual obtenemos los siguientes pasos:

1. Interpretar la toma de datos realizada a través de la HMI de control generada, dada en el programa.
2. Muestrear la trayectoria cartesiana, obteniendo un número de puntos intermedios de dicha trayectoria. Utilizando la transformación homogénea

<sup>75</sup> Ibid, p.284

tanto de la directa como de la inversa, convirtiendo cada uno de estos puntos calculados en sus correspondientes valores articulares ( $q_1$ ,  $q_2$ ,  $q_3$ ,  $q_4$ ,  $q_5$ ,  $q_6$ ). ahora debe de tenerse en cuenta la posibilidad de ausencia de solución y puntos singulares en algunos casos esto se debe a como esta morfológicamente diseñado el manipulador, de modo que se asegure la continuidad de la trayectoria.

3. Una vez muestra da la trayectoria estos valores serán Interpolados para así arrojar los valores articulares que se necesitan para la ejecución de la trayectoria misma, generando para cada variable articular una expresión  $q(t)$ , por lo cual se transforma en una trayectoria cartesiana lo más aproximada a la especificada en la HMI por el usuario.
4. Obtenido el procedimiento anterior se procede a la creación de la trayectoria misma arroja en dicho cálculo, lo cual se puede visualizar por medio de la HMI como quedaría planificada.
5. Se ejecuta la animación del manipulador, en lo cual el manipulador cumple dicha trayectoria, de modo que se tenga una perspectiva del manipulador real a la hora de proceder en la ejecución.
6. cuenta con una opción donde se puede visualizar el comportamiento de cada articulación tanto de la posición, velocidad y aceleración.
7. Para finalizar tiene la opción de ejecutar en el manipulador real, lo que hace es transformar en paquetes los valores angulares calculados anteriormente, para él envió a los actuadores.



**Figura 283. Funciones del Control Cinemático**

Descrito el funcionamiento del control cinemático(Figura 283) se procede hacer diferentes validaciones de simulación del control cinemático, se tomará en cuenta diferentes pruebas, pero con las mismas condiciones iniciales y finales, esto se hace para demostrar los diferentes comportamientos articulares que se llevan con la ejecución de las distintas trayectorias e interpoladores, menos en la trayectoria continua con el interpolador cubico.

The interface includes the following sections:

- 1 (Red):** 'Ingreso los valores articulares' section with input fields for initial (qi) and final (qf) joint angles for 6 joints, and a 'Restricciones' table for joint limits.
- 2 (Yellow):** 'MTH Inicial' and 'MTH Final' sections with input fields for initial and final Manipulator Trajectory Hand Set (MTHS) values.
- 3 (Green):** Control buttons: 'Ejecutar Animación', 'Análisis de Trayectoria', 'Ejecutar en Manipulador', and 'Salir'.
- 4 (Blue):** 'Tipo de Trayectoria' (eje\_a\_eje, Simultanea, Coordinada, Continua) and 'Tipo de Interpolador' (Trapezoidal, Cubico) settings.
- 5 (Orange):** 'Vizualización Articular' plot area showing the trajectory on a grid.

**Figura 284. Panel general del cálculo y generador de trayectoria**

A continuación se dará una breve explicación de cada elemento que me conforma el panel general del cálculo y generador de trayectorias, esto será a través de la enumeración y diferenciación de colores como se observa en la Figura 284.

| ENUMERACIÓN | COLOR    | DESCRIPCIÓN                                                                                                                                                                                                                     |
|-------------|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1           | Rojo     | Ingreso de los valores articulares, se dispuso de una opción en el cual el usuario debe de ingresar las posiciones iniciales(qi) del manipulador y finales (qf), tanto de las trayectorias, eje a eje, simultánea y coordinada. |
| 2           | amarillo | Ingreso de MTHS inicial y final para la trayectoria continua, no debe ingresar un valor erróneo provocándole accidentes al manipulador ya que solo recibe mths correctas correspondientes a su área de trabajo.                 |
|             |          | Panel de control este calculara las diferentes opciones que representa que son: ejecutar                                                                                                                                        |

|   |       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|---|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 3 | verde | animación, Análisis de trayectoria y ejecutar en el manipulador, con los valores ingresados por el usuario en el caso anterior.                                                                                                                                                                  |
| 4 | Azul  | El usuario debe de seleccionar el tipo de interpolador así como el tipo de trayectoria que se desea ejecutar en el manipulador, como también la opción de crear trayectoria en la cual me desarrollara una serie de puntos en el plano cartesiano dándome la trayectoria deseada por el usuario. |
| 5 | Gris  | visualización articular donde por medio de código interno de programación de la HMI, plotea el manipulador en una posición determinada por el usuario ingresada ejecutando la trayectoria.                                                                                                       |

**Tabla 12. Enumeración y diferenciación de colores (cálculo y generador de trayectorias)**

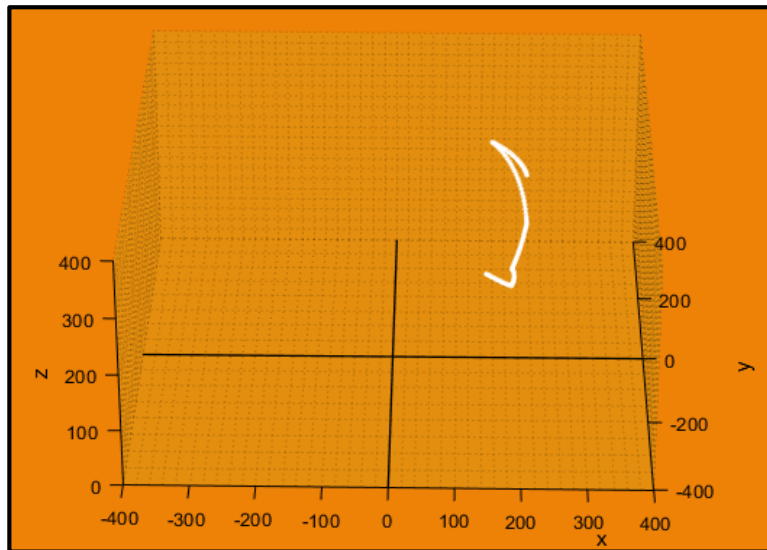
Condiciones iniciales y finales:

$$\mathbf{q_i} = [ 10 , 0 , -10 , 20 , -15 , 0 ]$$

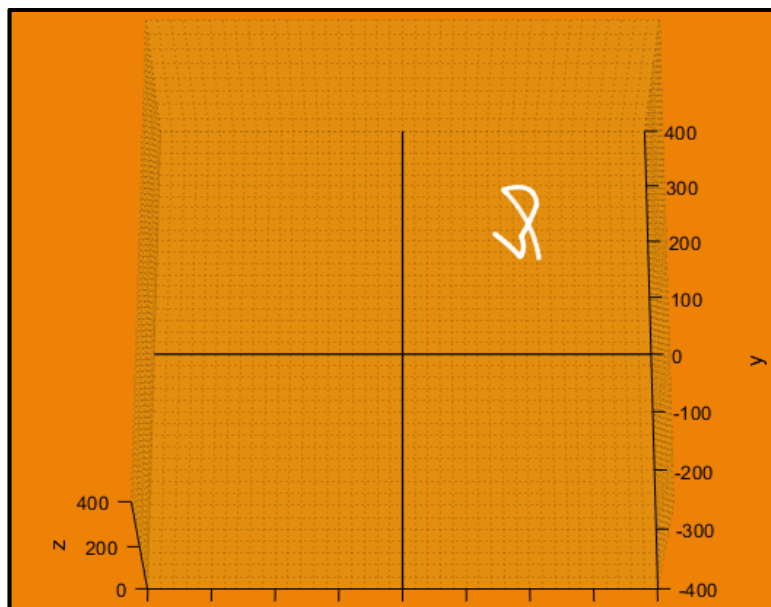
$$\mathbf{q_f} = [ 45 , 40 , 10 , 90 , 15 , 180 ]$$

### 8.5.1 Simulación del interpolador trapezoidal

Trayectoria Eje a Eje



**Figura 285. Creación de la trayectoria eje a eje por trapezoidal (vista lateral)**



**Figura 286. Creación de la trayectoria eje a eje por trapezoidal (vista superior)**

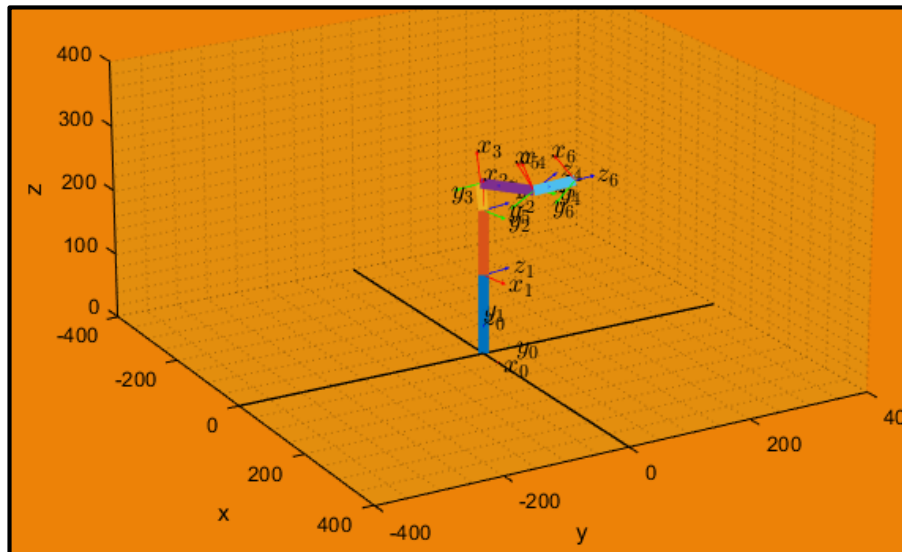


Figura 287. Visualización de la posición inicial del manipulador (vista lateral)

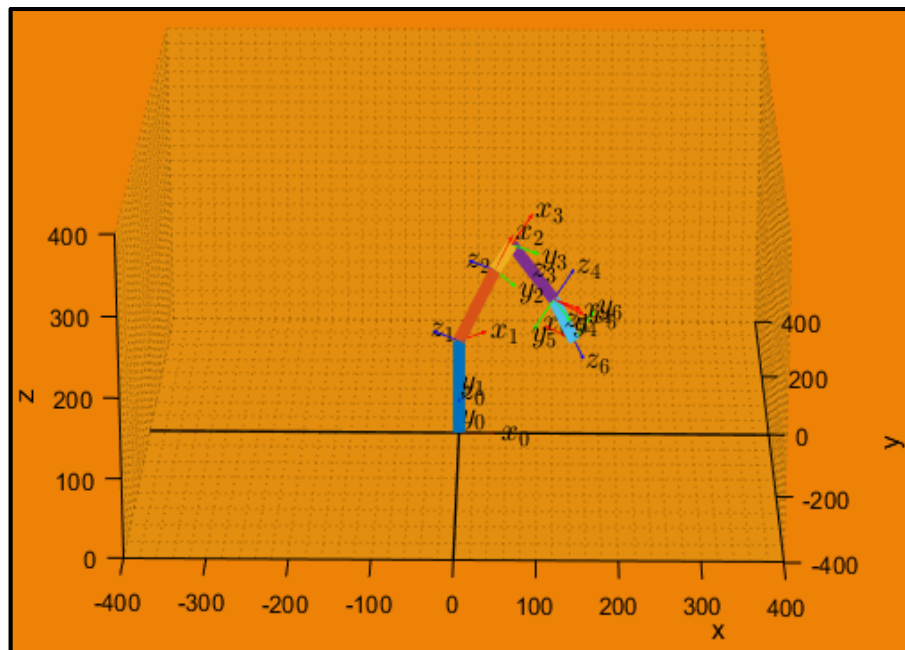


Figura 288. Visualización de la posición final del manipulador (vista lateral)

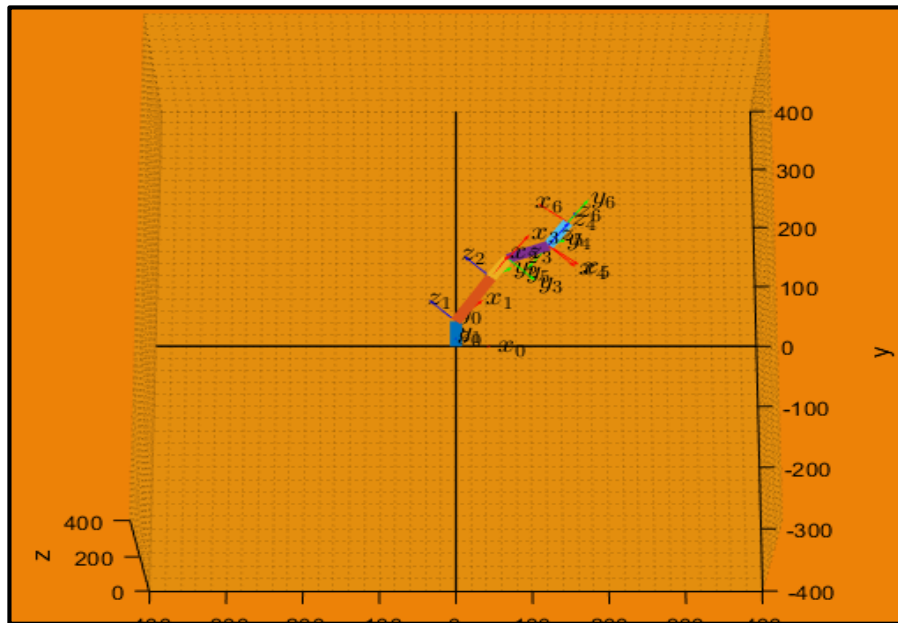


Figura 289. Visualización de la posición final del manipulador(superior)

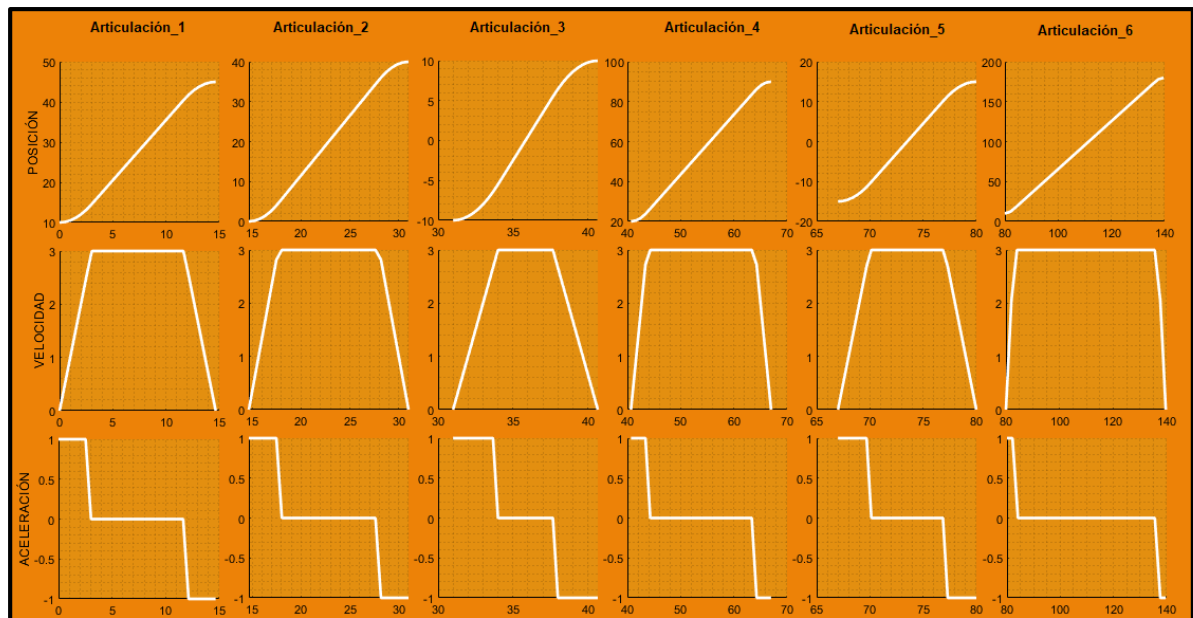
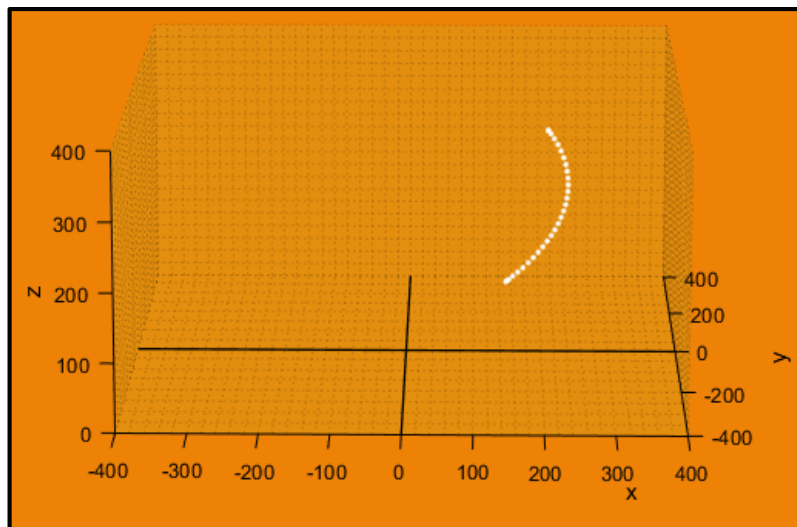
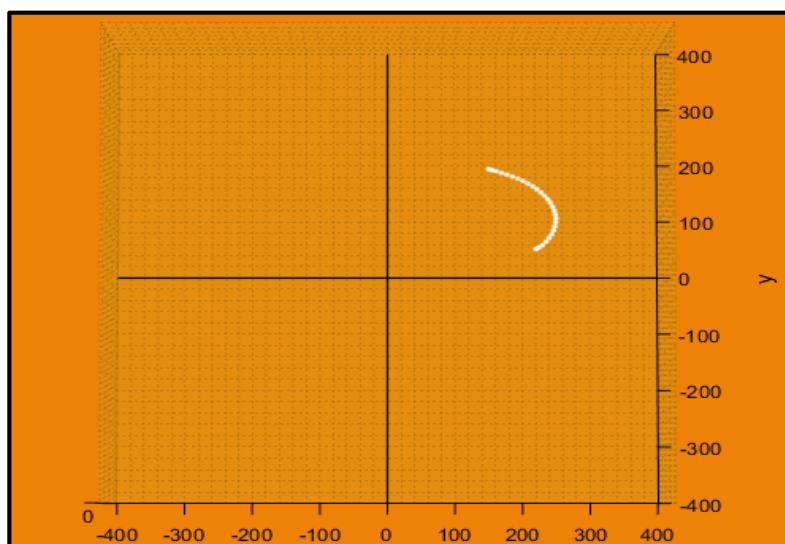


Figura 290. Análisis de trayectoria (Trayectoria Eje a Eje)

## Trayectoria Simultanea



**Figura 291. Creación de la trayectoria simultanea por trapezoidal (vista lateral)**



**Figura 292. Creación de la trayectoria simultanea por trapezoidal (vista superior)**

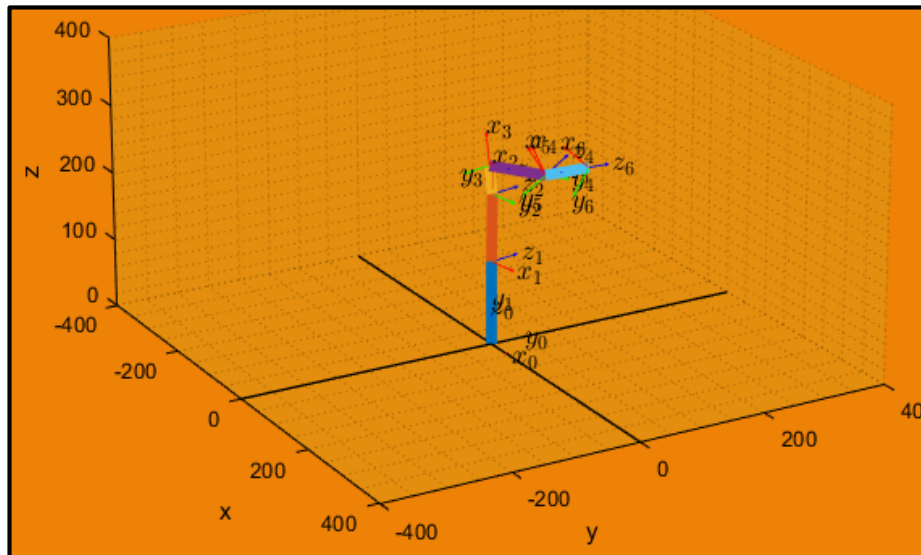


Figura 293. Visualización de la posición inicial del manipulador(vista lateral)

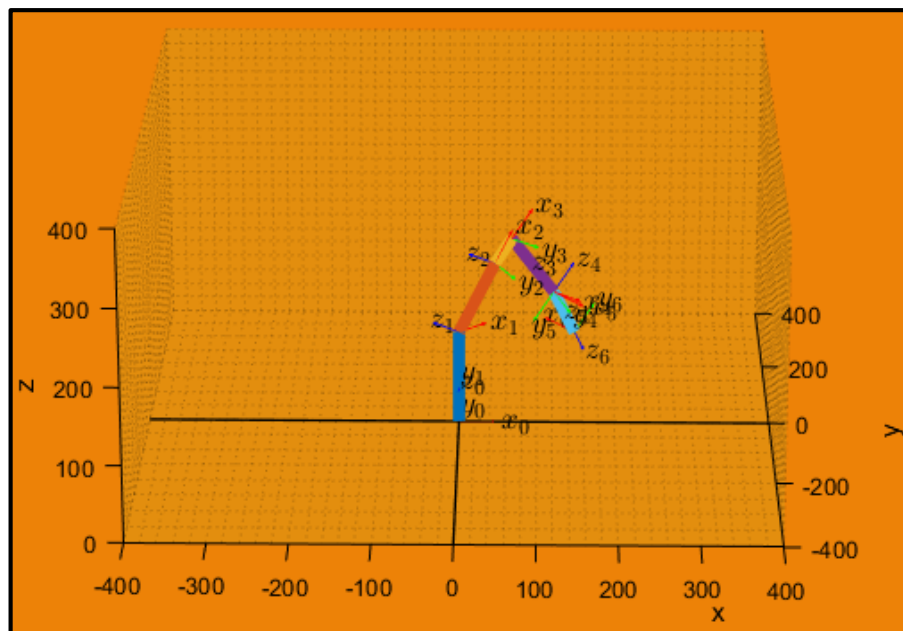
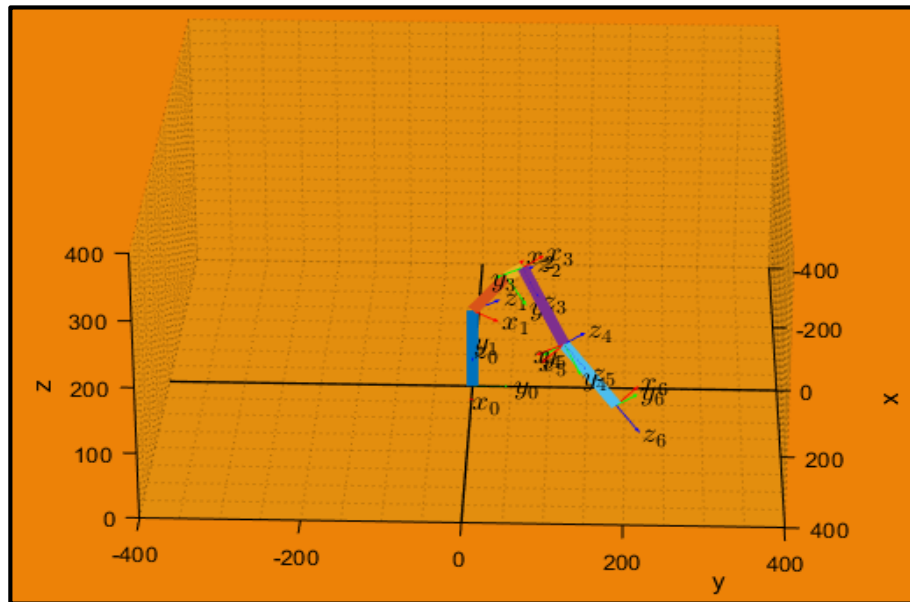
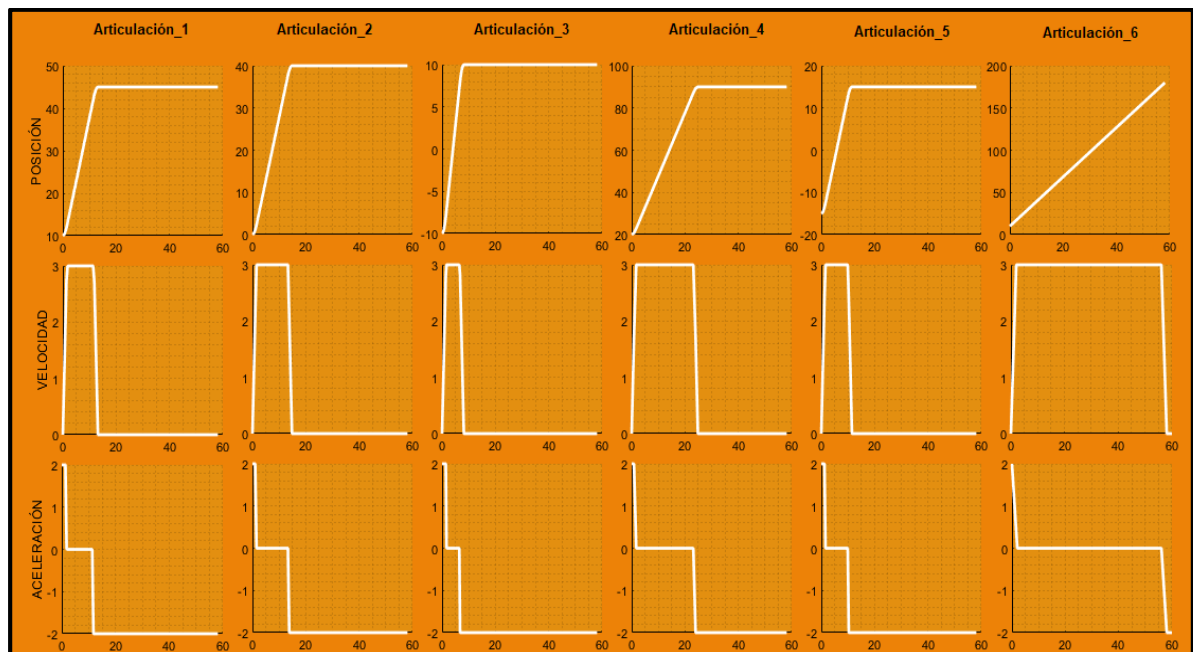


Figura 294. Visualización de la posición final del manipulador(vista lateral)

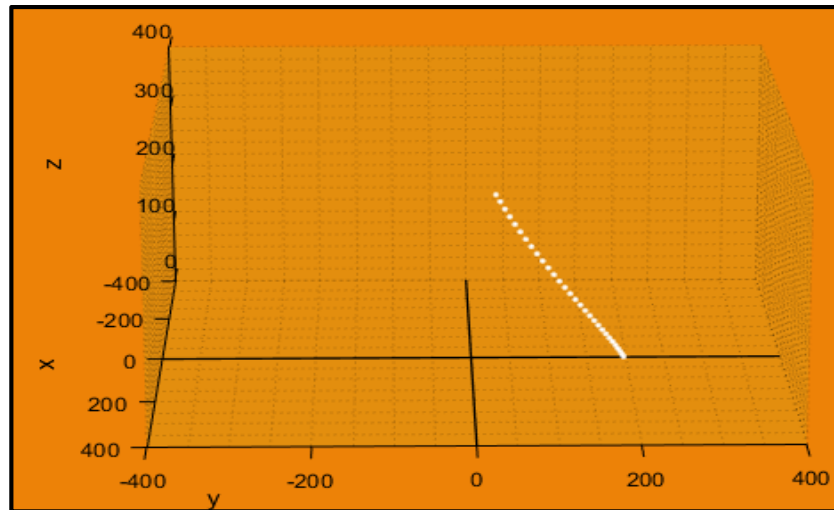


**Figura 295.** Visualización de la posición final del manipulador (vista frontal)

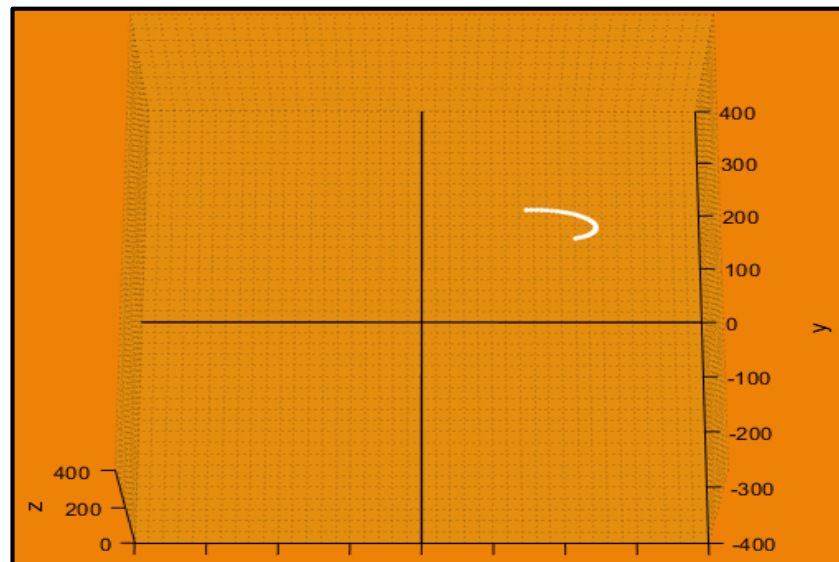


**Figura 296.** Análisis de trayectoria (Trayectoria simultanea)

## Trayectoria Coordinada



**Figura 297.** Creación de la trayectoria coordinada por trapezoidal (vista frontal)



**Figura 298.** Creación de la trayectoria coordinada por trapezoidal (vista superior)

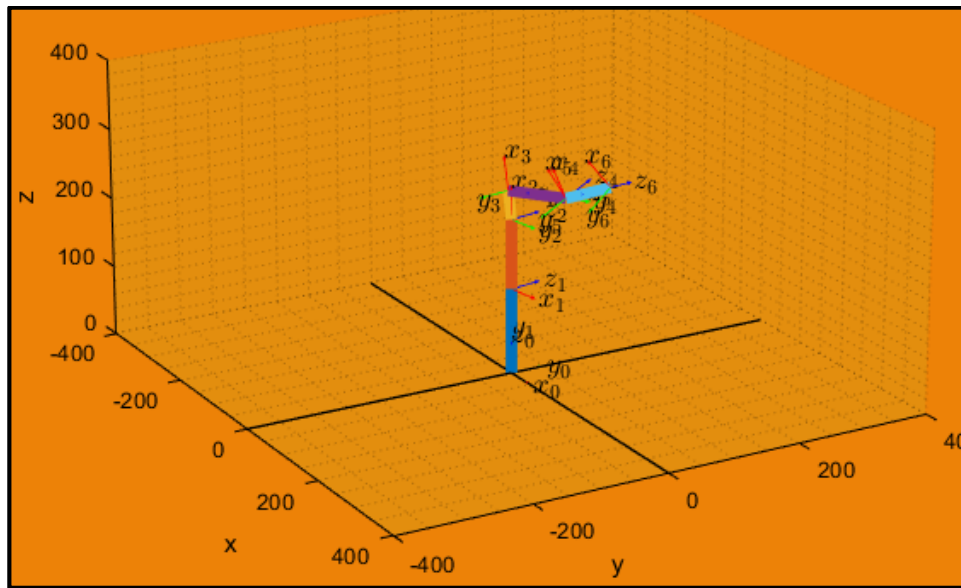


Figura 299. Visualización de la posición inicial del manipulador (vista lateral)

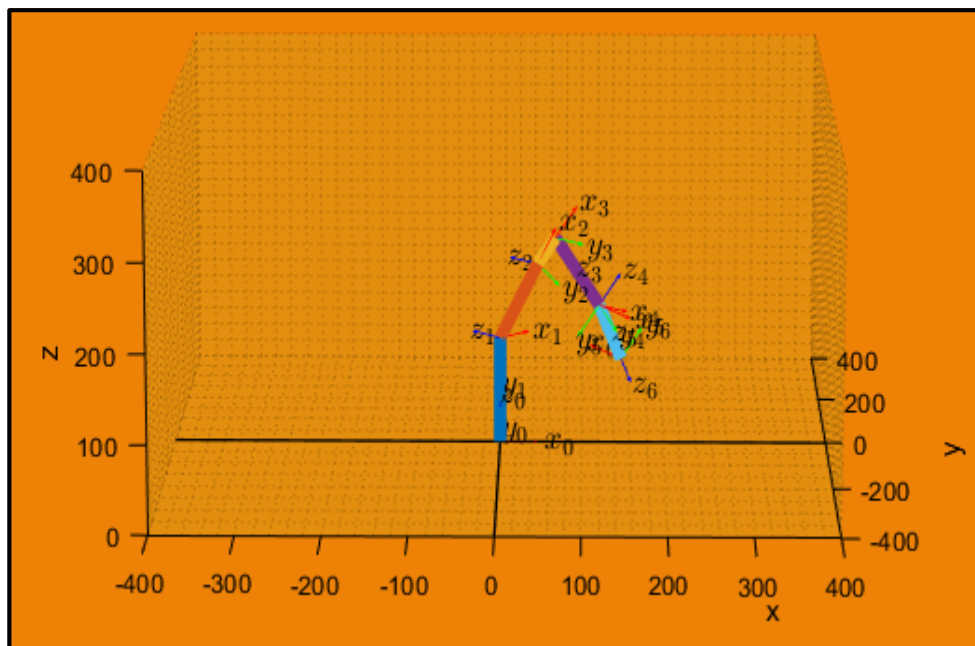
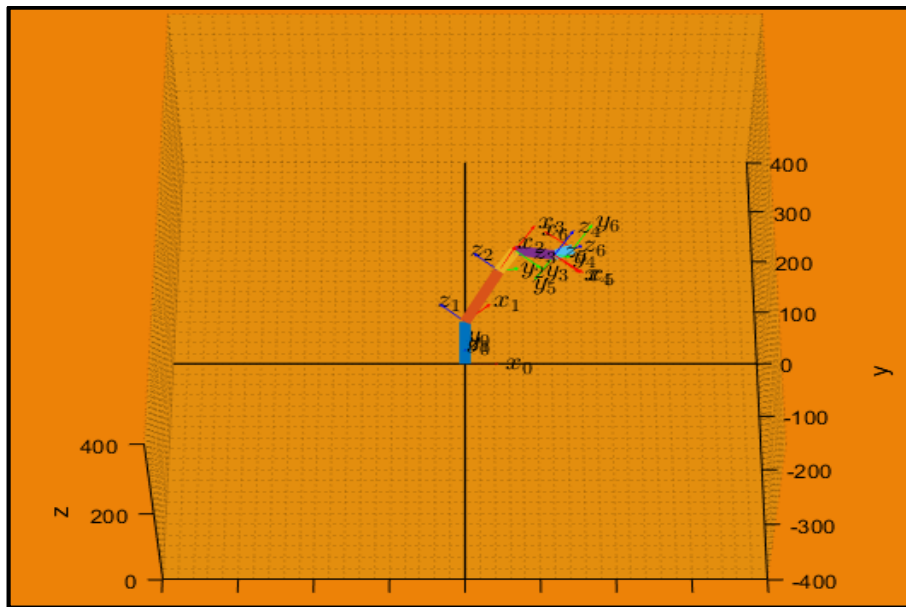
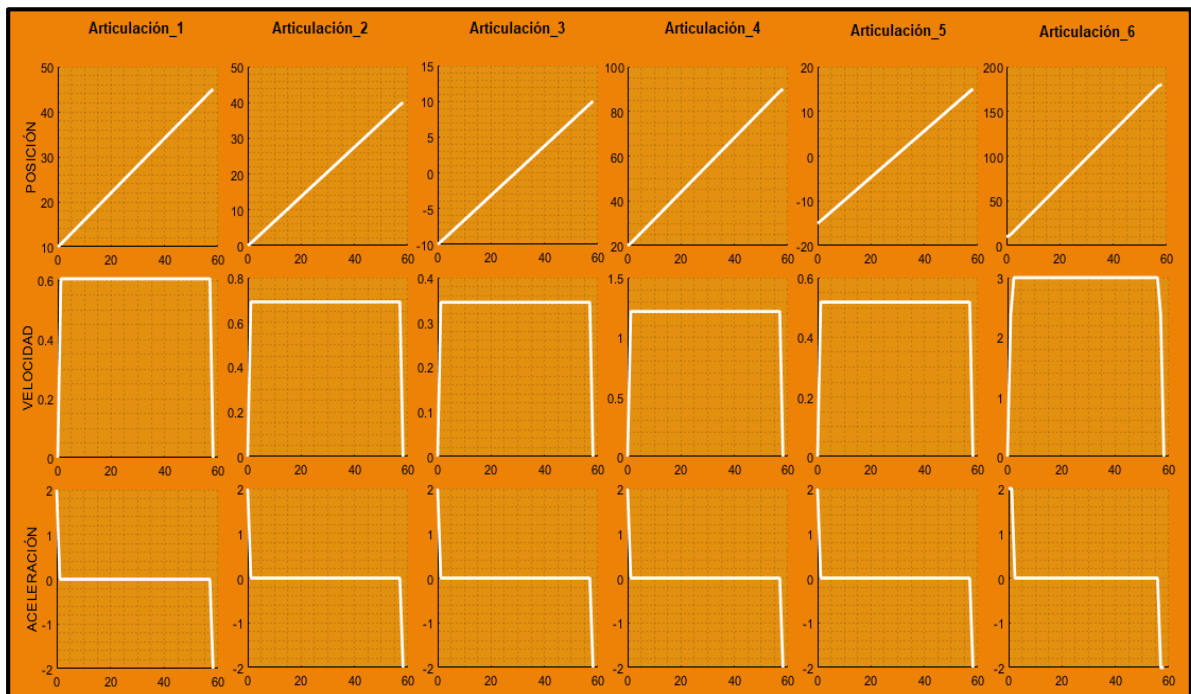


Figura 300. Visualización de la posición final del manipulador (vista lateral)



**Figura 301.** Visualización de la posición final del manipulador (vista superior)



**Figura 302.** Análisis de trayectoria (Trayectoria coordinada)

## 8.5.2 Simulación del interpolador cubico

Condiciones iniciales y finales:

$$q_i = [0, -20, 0, -30, 0, -90]$$

$$q_f = [-45, 40, 10, 60, 30, 90]$$

Trayectoria Eje a Eje

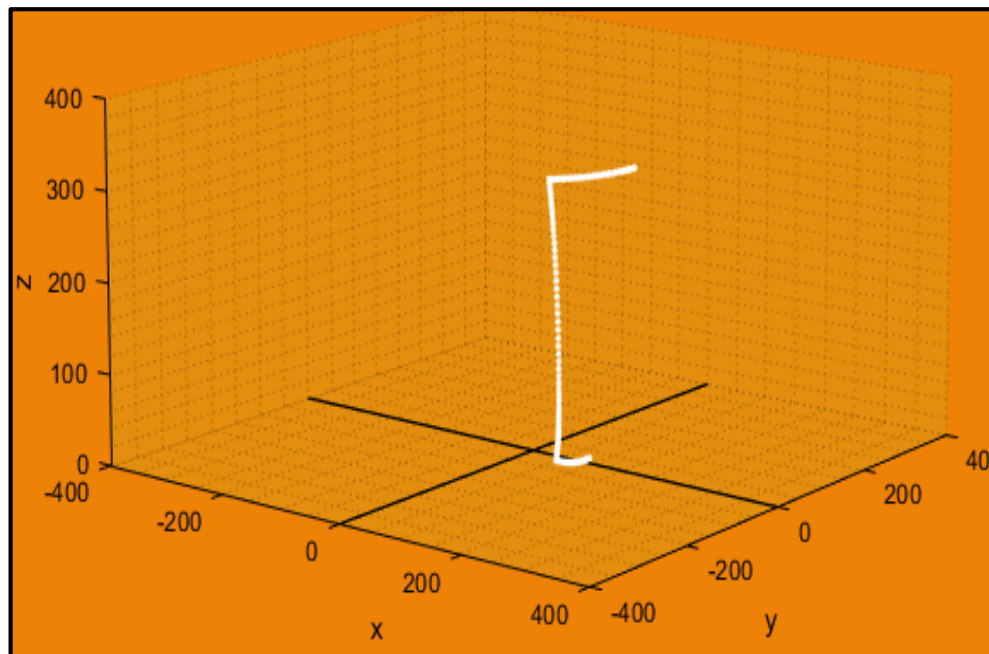


Figura 303. Creación de la trayectoria eje a eje por cubica (vista lateral)

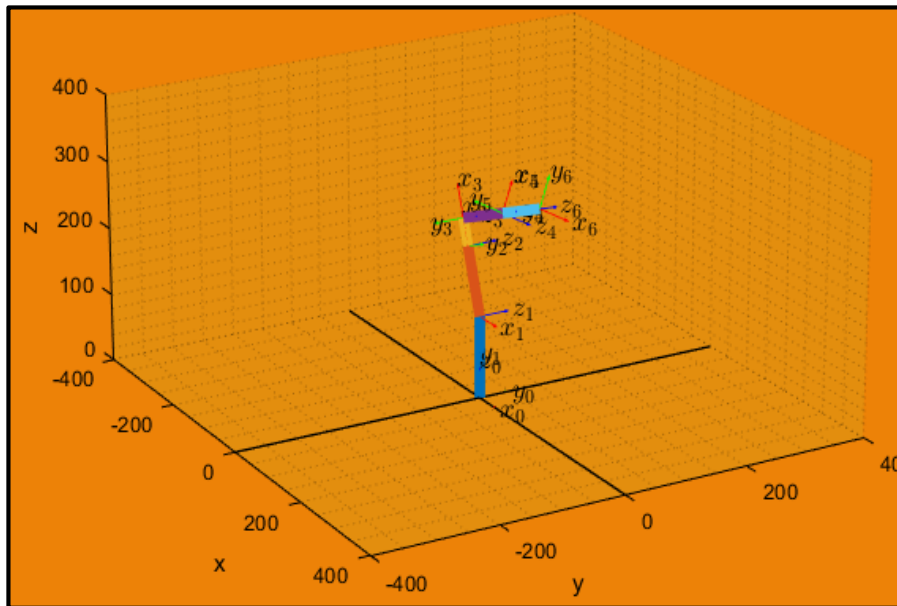


Figura 304. Visualización de la posición inicial del manipulador(vista lateral)

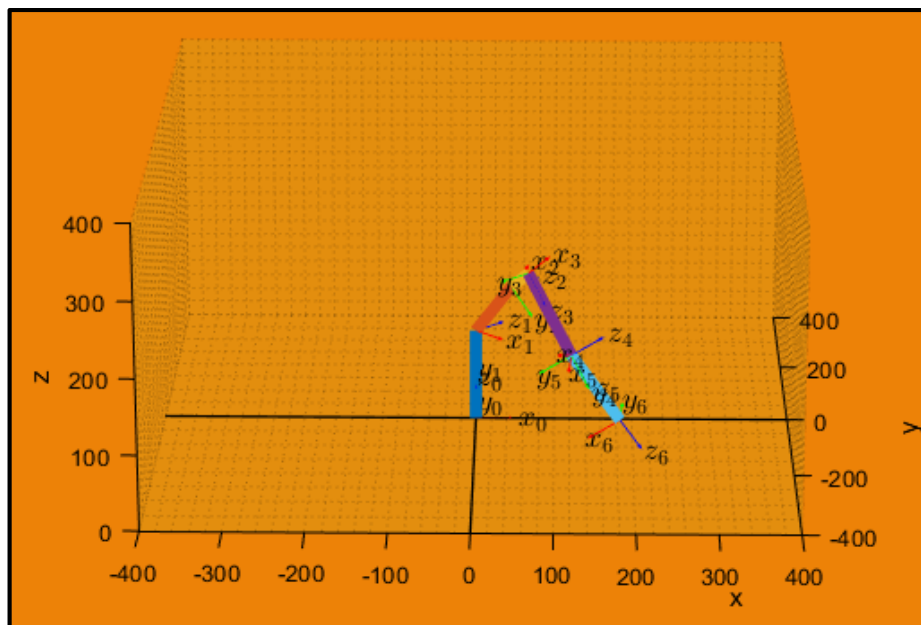
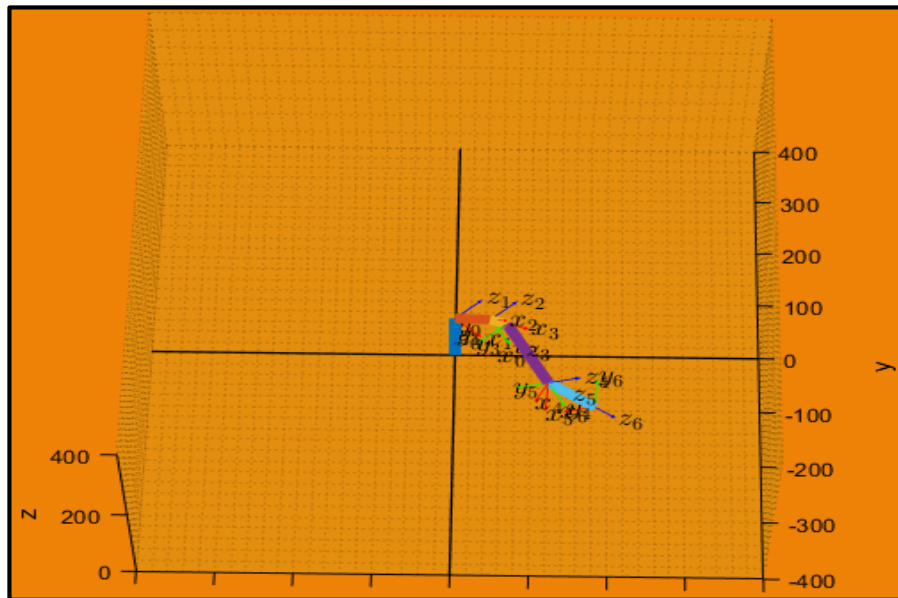
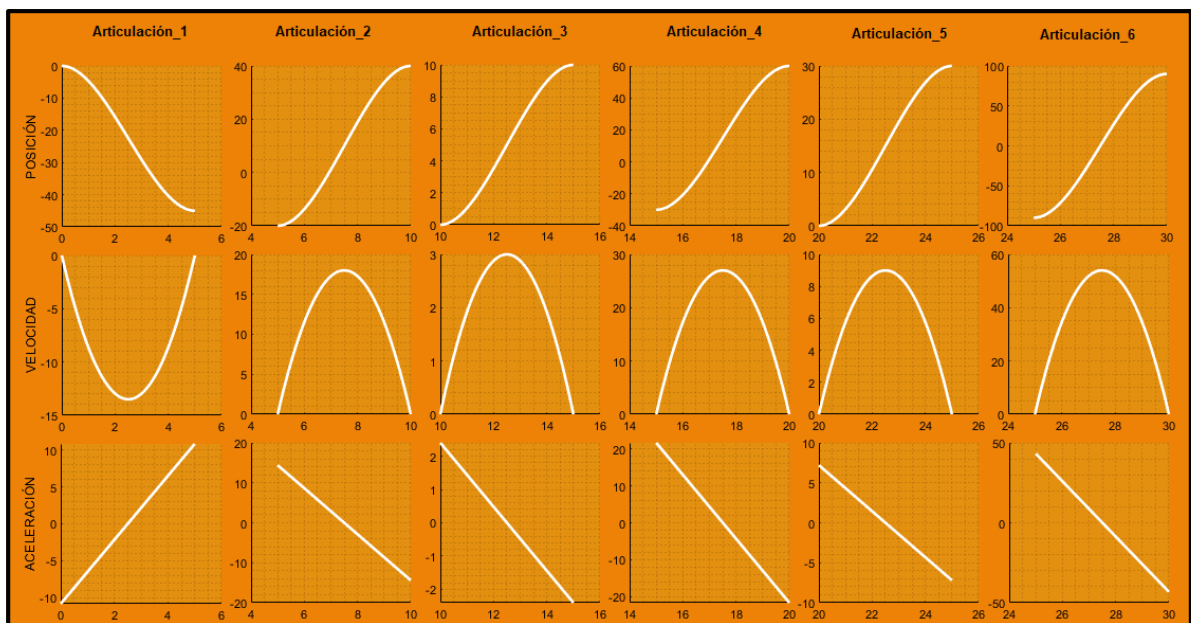


Figura 305. Visualización de la posición final del manipulador(vista lateral)



**Figura 306.** Visualización de la posición final del manipulador(superior)



**Figura 307.** Análisis de trayectoria (Trajectory Eje a Eje)

## Trayectoria Simultanea

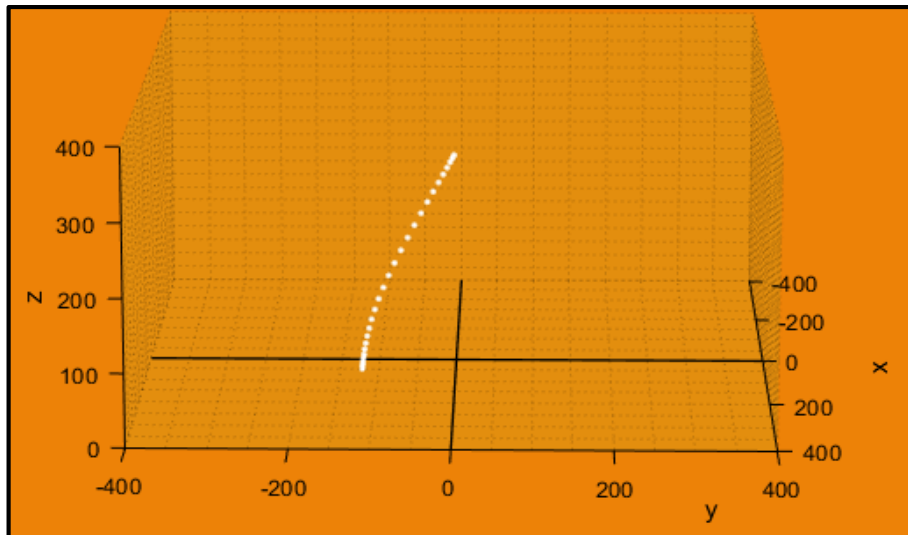


Figura 308. Creación de la trayectoria simultanea por cubica (vista frontal)

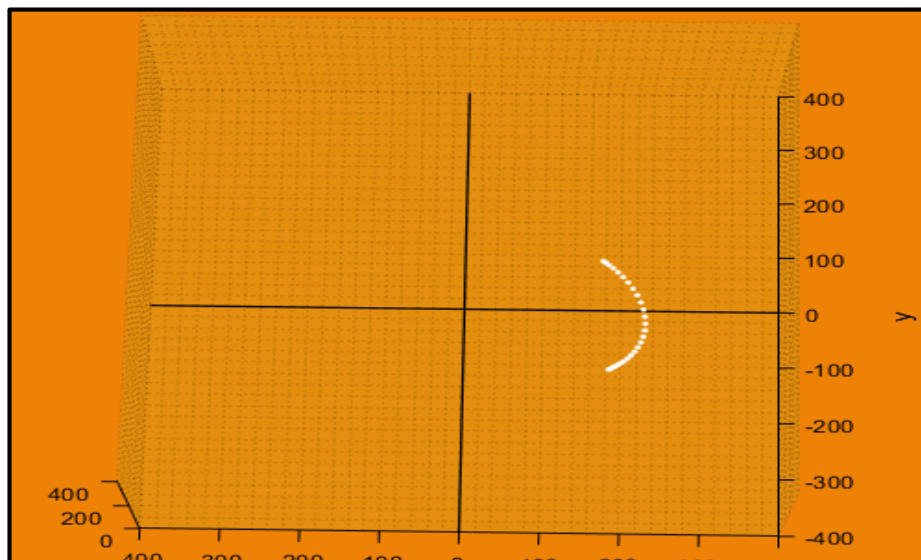


Figura 309. Creación de la trayectoria simultanea por cubica (vista superior)

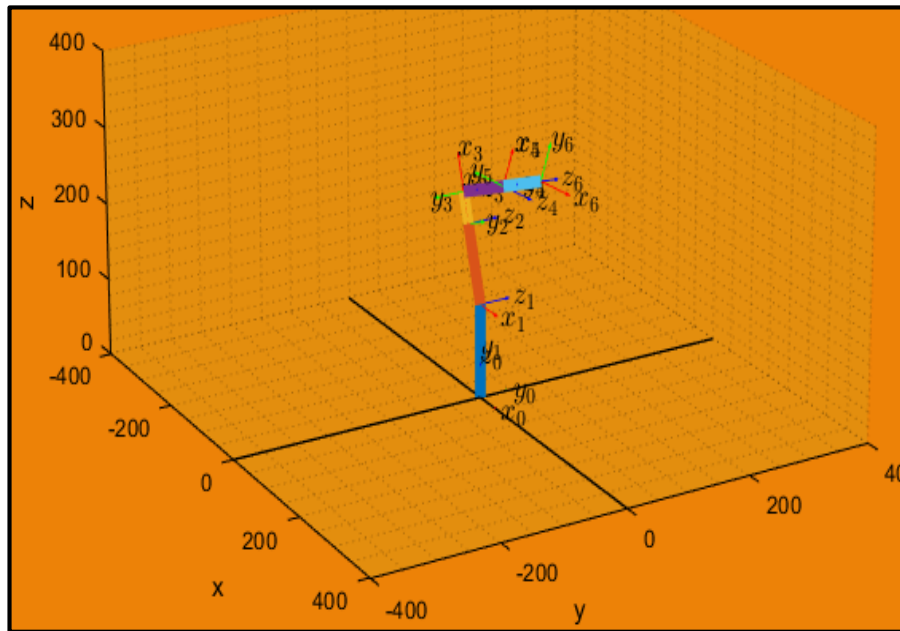


Figura 310. Visualización de la posición inicial del manipulador (vista lateral)

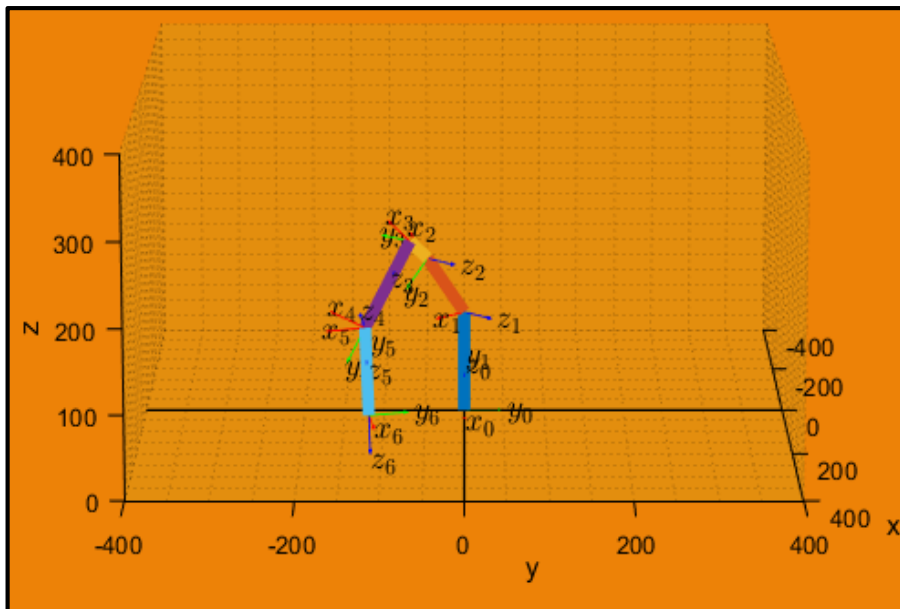
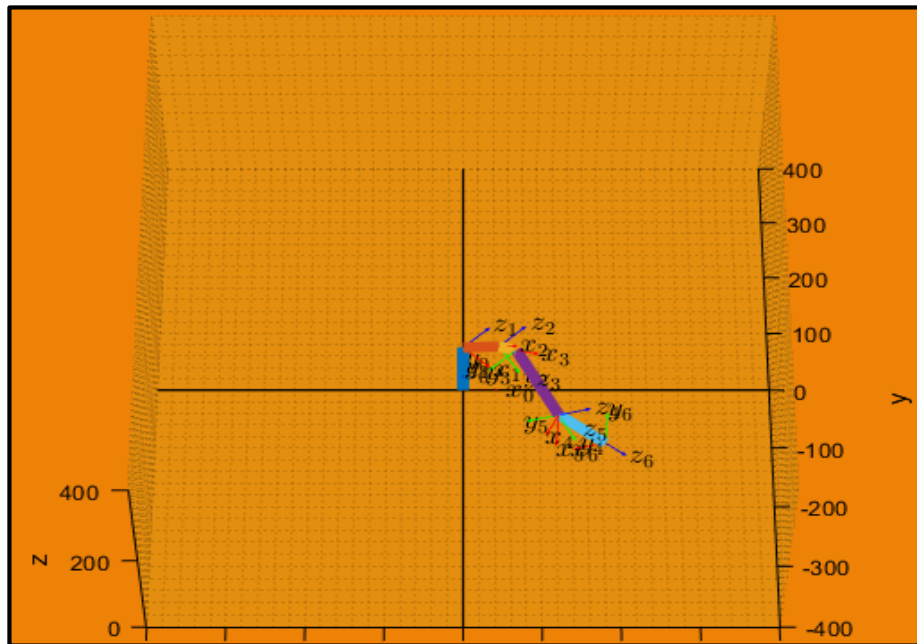
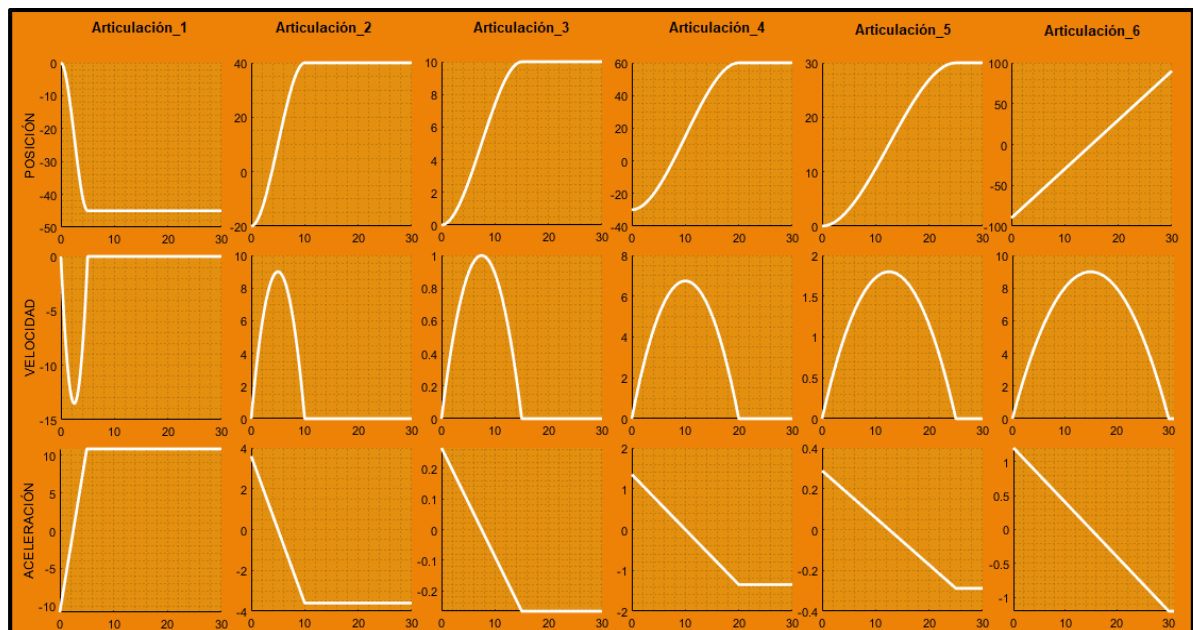


Figura 311. Visualización de la posición final del manipulador (vista frontal)



**Figura 312.** Visualización de la posición final del manipulador (vista superior)



**Figura 313.** Análisis de trayectoria (Trayectoria Simultanea)

## Trayectoria Coordinada

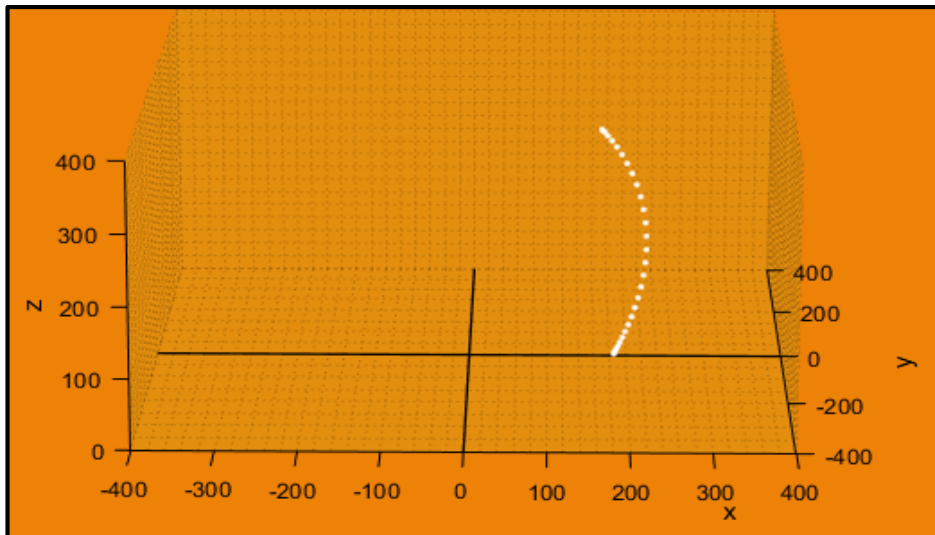


Figura 314. Creación de la trayectoria coordinada por cubica (vista lateral)

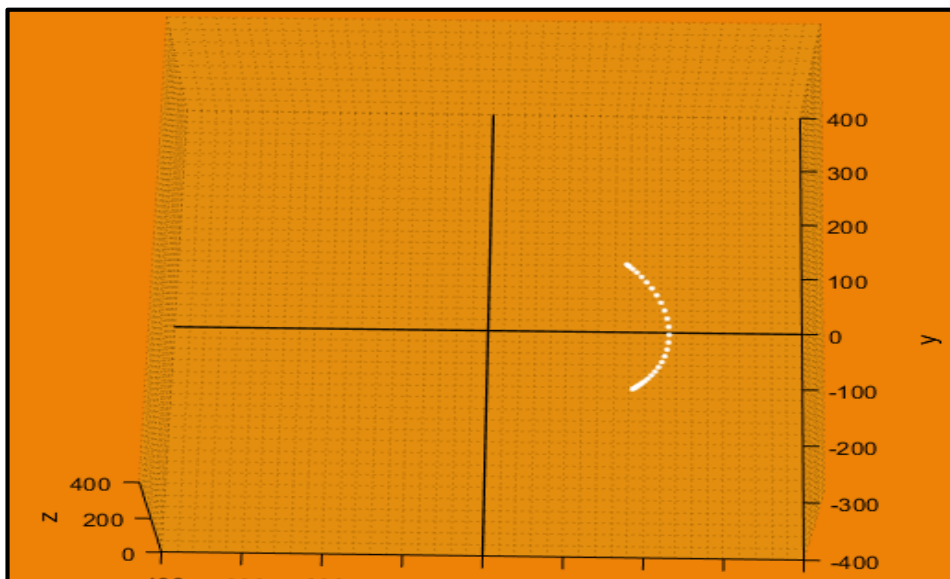


Figura 315. Creación de la trayectoria coordinada por cubica (vista superior)

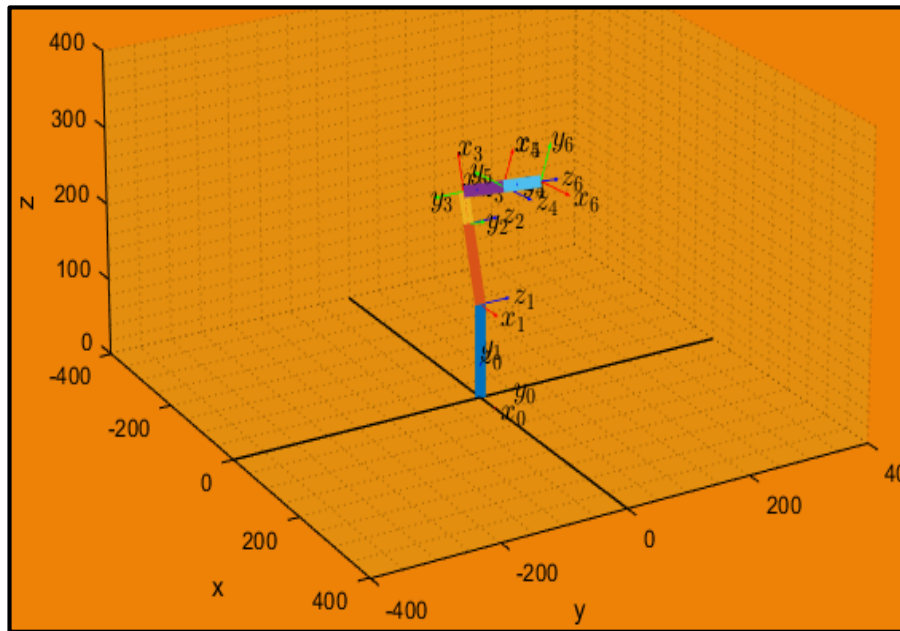


Figura 316. Visualización de la posición inicial del manipulador (vista lateral)

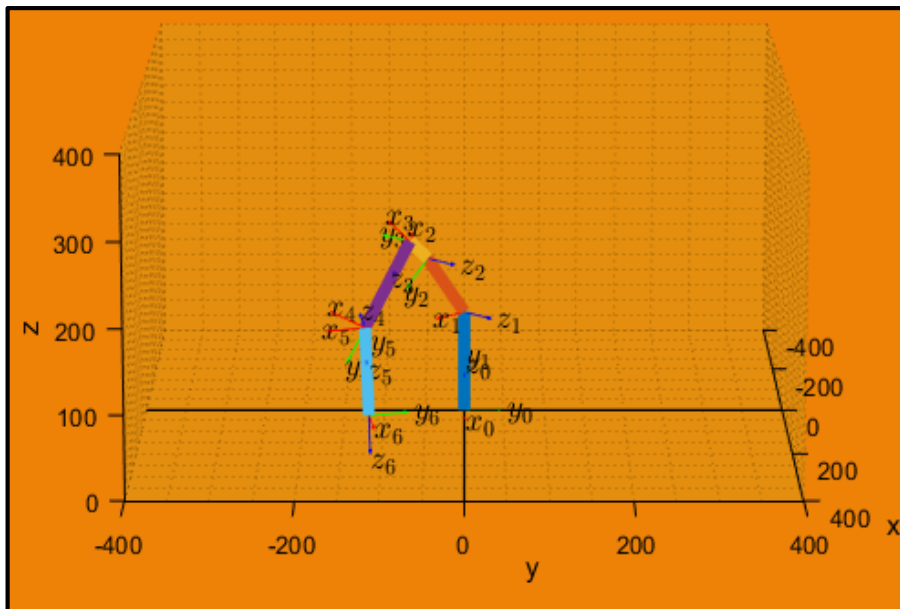
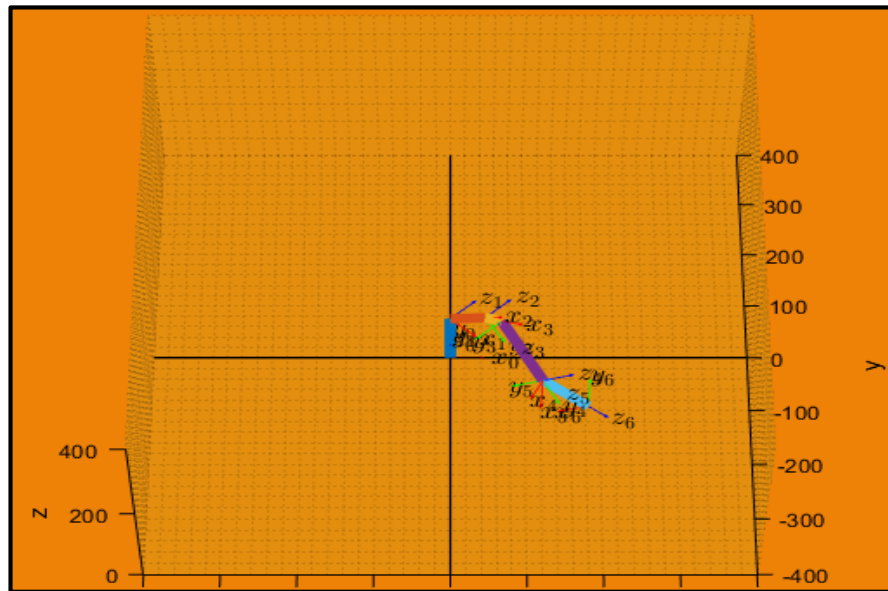
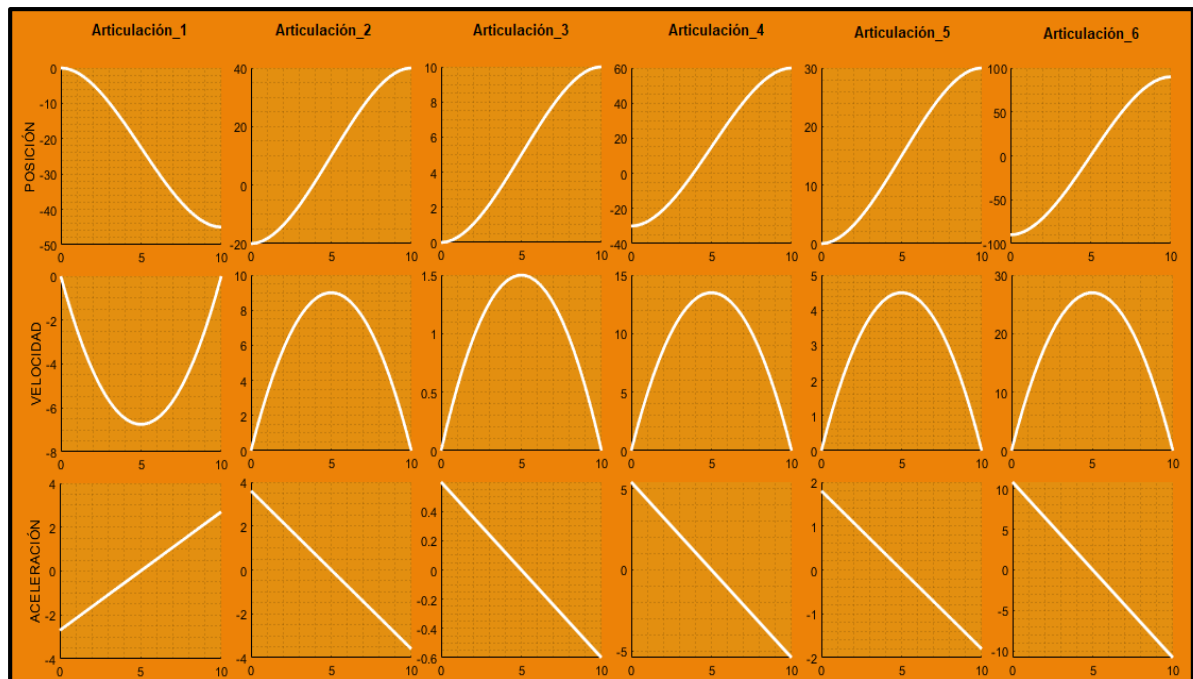


Figura 317. Visualización de la posición final del manipulador (vista frontal)



**Figura 318.** Visualización de la posición final del manipulador (vista superior)



**Figura 319.** Análisis de trayectoria (Trayectoria Coordinada)

## Trayectoria Continua

Condiciones iniciales y finales:

$$MTH_I = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 220 \\ 0 & -1 & 0 & 60 \\ 1 & 0 & 0 & 180 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$MTH_F = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 220 \\ 0 & -1 & 0 & -60 \\ 1 & 0 & 0 & 280 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

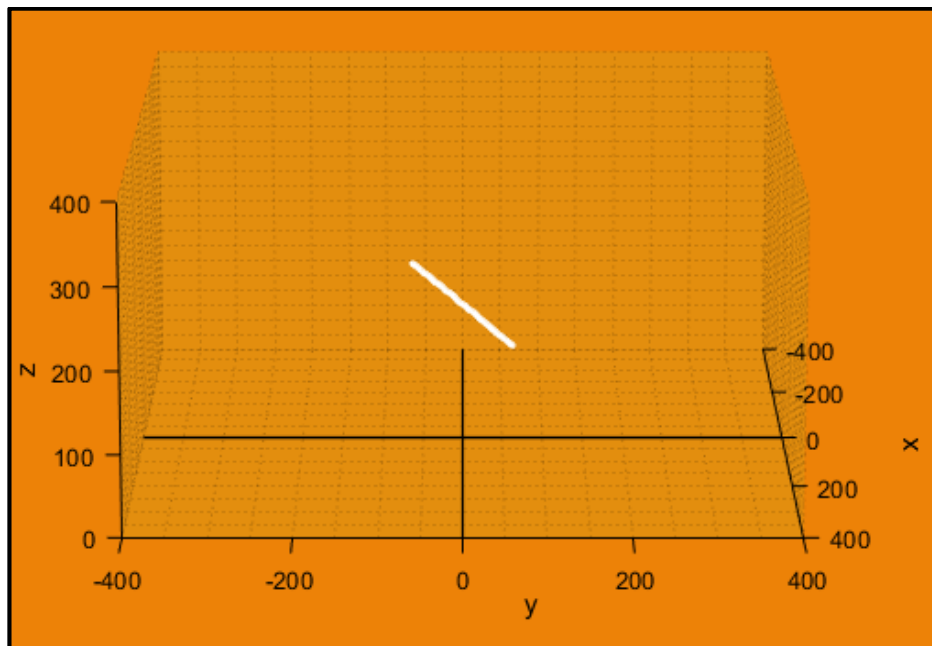


Figura 320. Creación de la trayectoria continua por cubica (vista frontal)

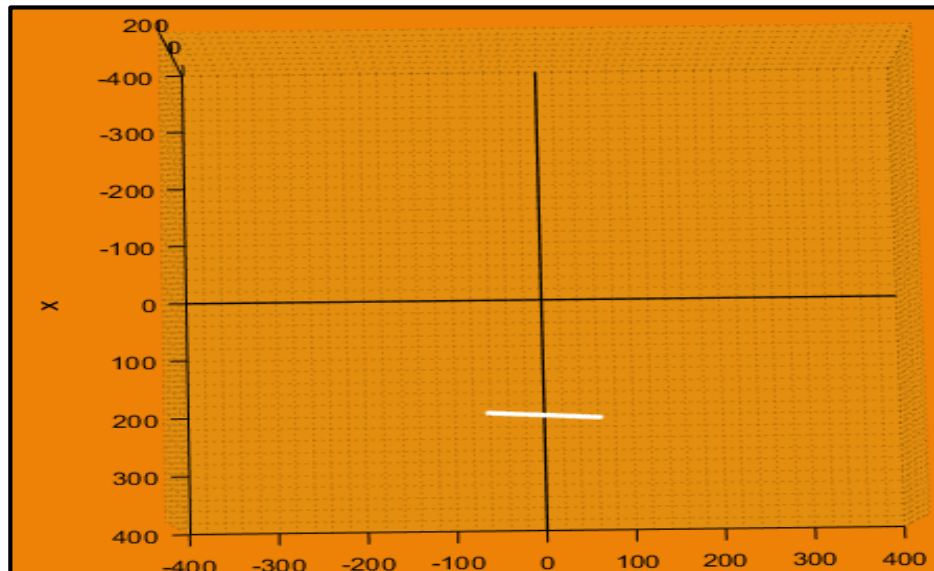


Figura 321. Creación de la trayectoria continua por cubica (vista superior)

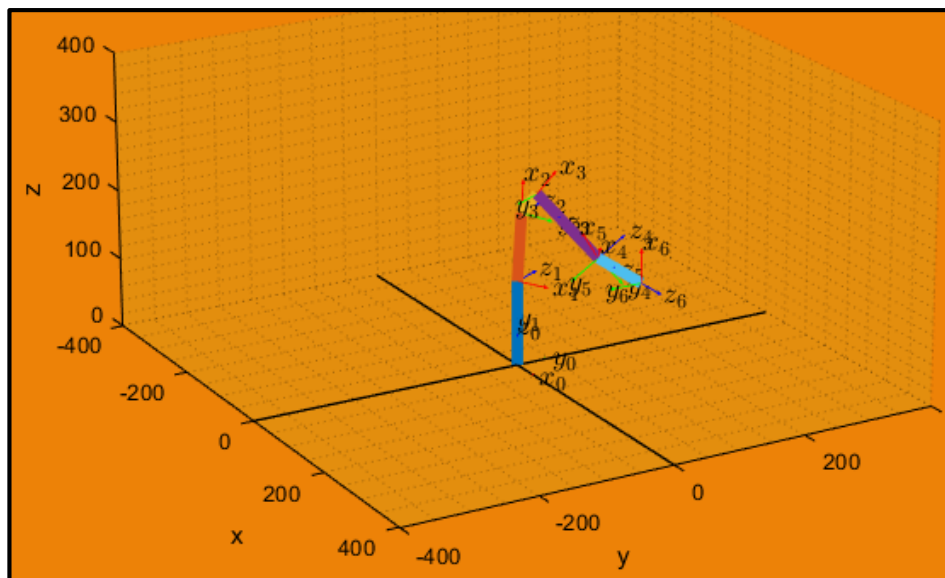


Figura 322. Visualización de la posición inicial del manipulador (vista lateral)

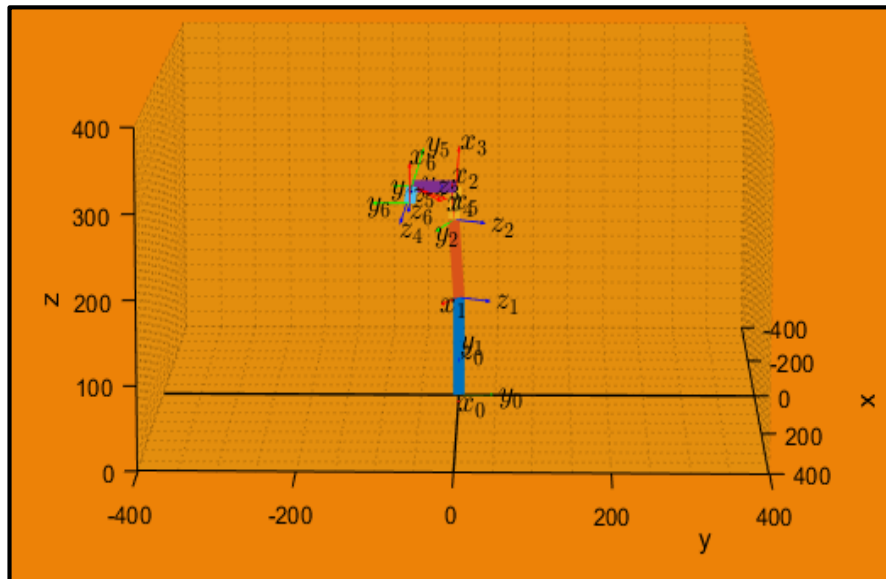


Figura 323. Visualización de la posición final del manipulador (vista frontal)

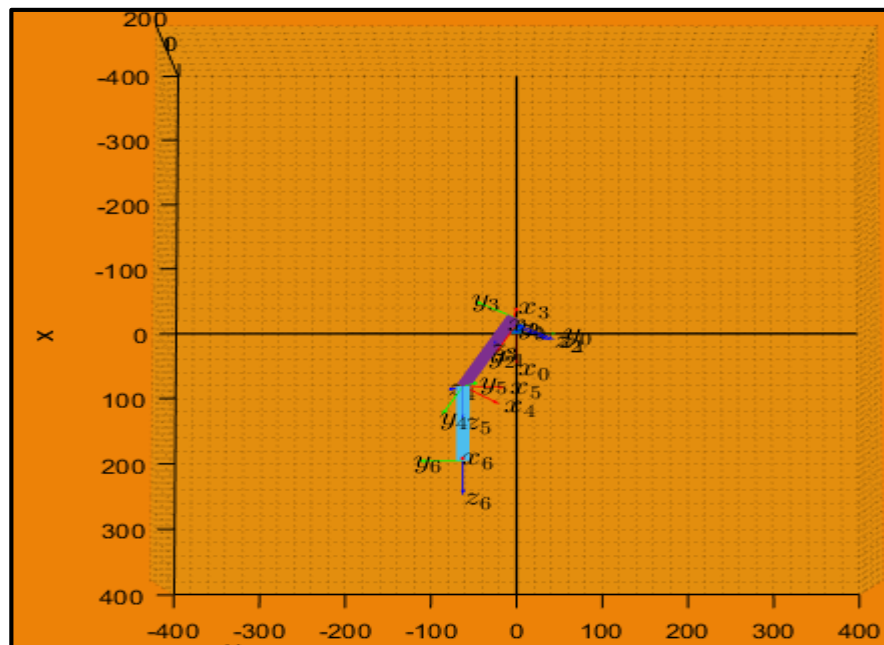
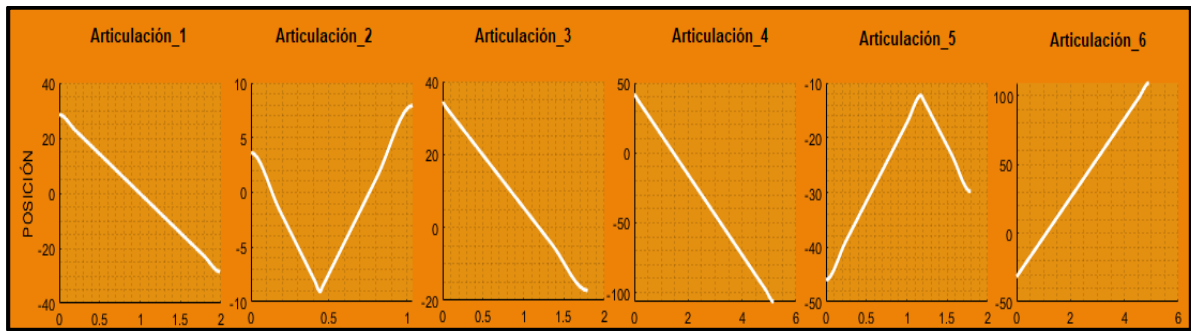


Figura 324. Visualización de la posición final del manipulador (vista superior)



**Figura 325. Análisis de trayectoria (Trayectoria Continua)**

## 8.6 Control Dinámico (Mono-articular)

La pregunta que se produce es como ejercer control mono articular, aun manipulador, donde cabe de recalcar que para este tipo de control cada articulación debe de tener una componente reductora, porque entre más alta sea la velocidad más alta será la inercia y hace que se caiga el control mono articular. Es importante resaltar las características mecánicas del manipulador, las cuales son el peso, las dimensiones, tipo de actuadores, entre otras, ya que estas influirán directamente con el tipo de control a utilizar.

En nuestro caso de los servomotores a DC, su dinámica es lineal y fácil de comprender, y el efecto de la reductora es suficientemente grande para desacoplar el sistema reduciendo la inercia de acoplamiento entre articulaciones. No obstante que no sea realista del todo, pero si aceptable (considerando la perdida de prestaciones), abordaremos la estrategia de control más simple con un control independiente de cada articulación. En este tipo de controlador cada eje del manipulador es controlado por un sistema SISO. Todos los demás efectos provocados por acoplamientos entre articulaciones son considerados como perturbaciones.

Ahora, los procesos más usados en los sistemas de control han sido descritos por funciones de transferencia que fueron obtenidas aplicando los principios fundamentales de física para una buena descripción del proceso, en la práctica (como en este caso), muchos de los procesos que son controlados son muy difíciles de describir por la aplicación de estos principios. Ya que Por medio de pruebas experimentales se puede identificar la naturaleza de la dinámica de los procesos y obtener un modelo del proceso para usarse en el diseño de sistemas de control.

En este caso para la identificación de los servos(actuadores) se pretende obtener un modelo matemático, el cual me represente el conocimiento del sistema a través de relaciones entrada y salida Correspondiente con la clásica representación caja negra.

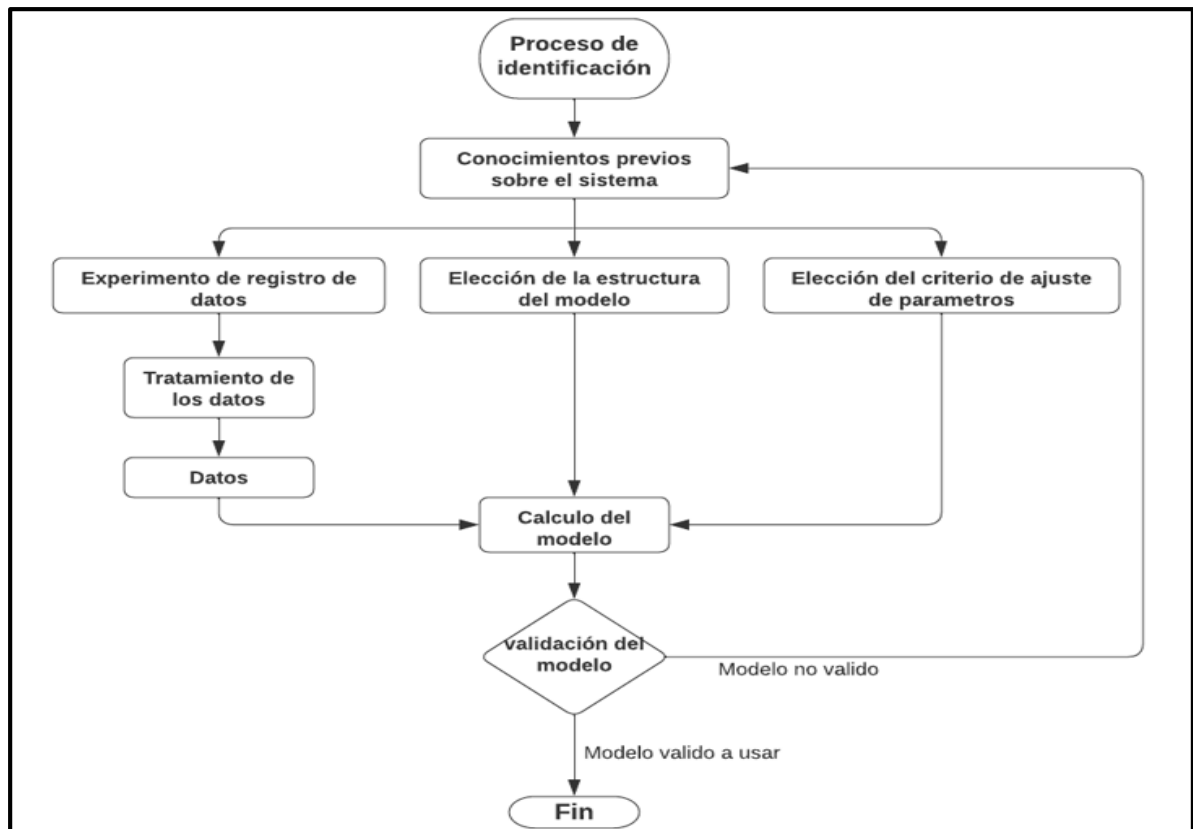
#### 8.6.1 Proceso de Identificación

A continuación, se muestra los pasos necesarios para el proceso de Identificación

- **Obtención de datos de entrada – salida:** Para ello se debe excitar el sistema mediante la aplicación de una señal de entrada y registrar la evolución de sus entradas y salidas durante un intervalo de tiempo.
- **Tratamiento previo de los datos registrados:** Los datos registrados están generalmente acompañados de ruidos indeseados u otro tipo de imperfecciones que puede ser necesario corregir antes de iniciar la identificación del modelo. Se trata, por tanto, de ‘preparar’ los datos para facilitar y mejorar el proceso de identificación.
- **Elección de la estructura del modelo:** Si el modelo que se desea obtener es un modelo paramétrico, el primer paso es determinar la estructura deseada para dicho modelo. Este punto se facilita en gran medida si se tiene un cierto conocimiento sobre las leyes físicas que rigen el proceso.
- **Obtención de los parámetros del modelo:** Se procede a la estimación de los parámetros de la estructura que mejor ajustan la respuesta del modelo a los datos de entrada-salida obtenidos experimentalmente.
- **Validación del modelo:** El último paso consiste en determinar si el modelo obtenido satisface el grado de exactitud requerido para la aplicación en cuestión. Si se llega a la conclusión de que el modelo no es válido, se deben revisar los siguientes aspectos como posibles causas:

- El conjunto de datos de entrada-salida no proporciona suficiente información sobre la dinámica del sistema (se necesita de más muestras).
- La estructura escogida no es capaz de proporcionar una buena descripción del modelo.
- El criterio de ajuste de parámetros seleccionado no es el más adecuado.

Dependiendo de la causa estimada, deberá repetirse el proceso de identificación desde el punto correspondiente. Por tanto, el proceso de identificación es un proceso iterativo, cuyos pasos pueden observarse en el siguiente diagrama de flujo de la Figura 326.



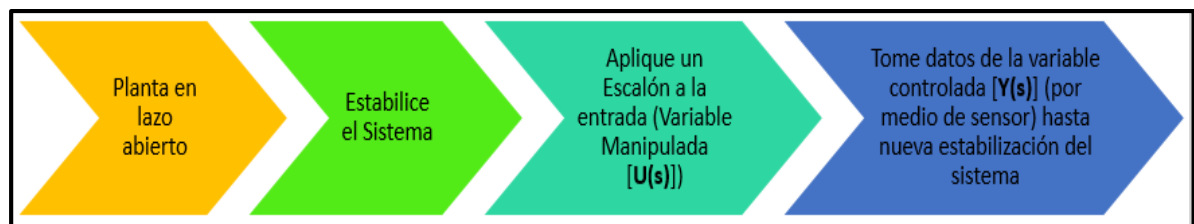
**Figura 326. Proceso de identificación**

### 8.6.2 Identificación mediante una entrada escalón

#### Curva de Reacción

Consiste en aplicar sobre un sistema en equilibrio, una entrada en forma de escalón y observar la respuesta del mismo. Posteriormente se analiza esta respuesta, obteniendo un polinomio denominado “función de transferencia” que pretende ser un fiel reflejo del comportamiento del proceso. Básicamente todos los procesos existentes en la naturaleza pueden clasificarse en sistemas de primer orden y sistemas de segundo orden y de orden superior.

Un cambio de escalón en la entrada de un proceso produce una respuesta, la cual es llamada curva de reacción del proceso. Para muchos procesos en la industria, la curva de reacción de proceso tiene una forma de S. Es importante que no haya perturbaciones que entren en el sistema de otro modo la transmisión de datos será dañada por esas perturbaciones sin control y sería inapropiado para usarlo en la obtención de un modelo para el proceso.



**Figura 327. Representación gráfica de la Identificación mediante la Respuesta Entrada Escalón**

### 8.6.3 Análisis de respuesta transitoria

En el análisis y diseño de sistemas de control, debemos tener una base de comparación del desempeño de diversos sistemas de control. Esta base se configura especificando las señales de entrada de prueba particulares y comparando las respuestas de varios sistemas a estas señales de entrada. Muchos criterios de diseño se basan en tales señales o en la respuesta del sistema a los cambios en las condiciones iniciales.

El uso de señales de prueba se justifica porque existe una correlación entre las características de respuesta de un sistema para una señal de entrada de prueba común y la capacidad del sistema de manejar las señales de entrada reales.

**Señales de prueba típicas:** Las señales de prueba que se usan regularmente son funciones escalón, rampa, parábola, impulso, senoidales, etc. Con estas señales de prueba, es posible realizar con facilidad análisis matemáticos y experimentales de sistemas de control, dado que las señales son funciones del tiempo muy simples.

**Respuesta transitoria y respuesta en estado estable:** La respuesta en el tiempo de un sistema de control consta de dos partes: la respuesta transitoria y la respuesta en estado estable. Por respuesta transitoria nos referimos a la que va del estado inicial al estado final. Por respuesta en estado estable, nos referimos a la manera en la cual se comporta la salida del sistema conforme tiempo ( $t$ ) tiende a infinito.

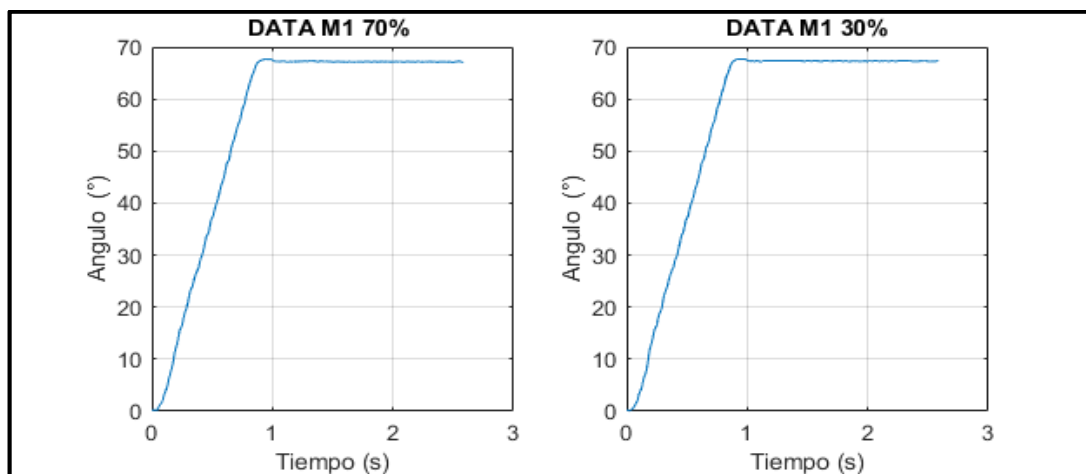
Terminado la explicación del cómo se procederá con la toma de datos de los servomotores para su respectiva identificación, Se procede entonces a aplicar un escalón sobre cada uno de los servos y se obtienen las curvas representativas de cada uno. Donde se reflejará un fragmento de las datas promedios para demostrar que la dinámica del modelo es completamente validada, usando el 70% para identificación del sistema y el 30% para validación. Principalmente usamos un script en Matlab para graficar la dinámica del sistema en los dos instantes mencionados (70%, 30%), este mismo proceso se repetirá para el total de servos como se muestra a continuación.

#### 8.6.4 Toma de datos del manipulador

##### Motor 1

| DATA PROMEDIO |            | DATA PROMEDIO 70% |            | DATA PROMEDIO 30% |            | ESCALON   |
|---------------|------------|-------------------|------------|-------------------|------------|-----------|
| Tiempo (s)    | Angulo (°) | Tiempo (s)        | Angulo (°) | Tiempo (s)        | Angulo (°) | 512 - 720 |
| 0,00          | 0,23       | 0,00              | 0,21       | 0,00              | 0,23       | 720,00    |
| 0,01          | 0,23       | 0,01              | 0,21       | 0,01              | 0,23       | 720,00    |
| 0,03          | 0,19       | 0,03              | 0,11       | 0,02              | 0,23       | 720,00    |
| 0,04          | 0,26       | 0,04              | 0,32       | 0,04              | 0,23       | 720,00    |
| 0,05          | 0,29       | 0,05              | 0,43       | 0,05              | 0,23       | 720,00    |
| 0,06          | 1,03       | 0,07              | 1,07       | 0,06              | 1,01       | 720,00    |
| 0,08          | 1,64       | 0,08              | 1,72       | 0,08              | 1,61       | 720,00    |
| 0,09          | 1,97       | 0,09              | 1,93       | 0,09              | 1,98       | 720,00    |
| 0,10          | 3,16       | 0,10              | 3,22       | 0,10              | 3,13       | 720,00    |
| 0,12          | 4,19       | 0,12              | 4,19       | 0,12              | 4,19       | 720,00    |
| 0,13          | 4,96       | 0,13              | 5,05       | 0,13              | 4,93       | 720,00    |
| 0,14          | 6,25       | 0,14              | 6,23       | 0,14              | 6,26       | 720,00    |
| 0,16          | 7,38       | 0,16              | 7,41       | 0,15              | 7,37       | 720,00    |
| 0,17          | 8,64       | 0,17              | 8,59       | 0,17              | 8,66       | 720,00    |
| 0,18          | 9,93       | 0,18              | 10,10      | 0,18              | 9,85       | 720,00    |
| 0,19          | 11,54      | 0,19              | 11,82      | 0,19              | 11,42      | 720,00    |
| 0,21          | 13,05      | 0,21              | 13,32      | 0,21              | 12,94      | 720,00    |
| 0,22          | 14,24      | 0,22              | 14,39      | 0,22              | 14,18      | 720,00    |
| 0,23          | 15,53      | 0,23              | 15,68      | 0,23              | 15,47      | 720,00    |
| 0,25          | 16,47      | 0,25              | 16,54      | 0,25              | 16,44      | 720,00    |
| 0,26          | 17,66      | 0,26              | 17,72      | 0,26              | 17,63      | 720,00    |

Figura 328.Datas promedio del motor 1

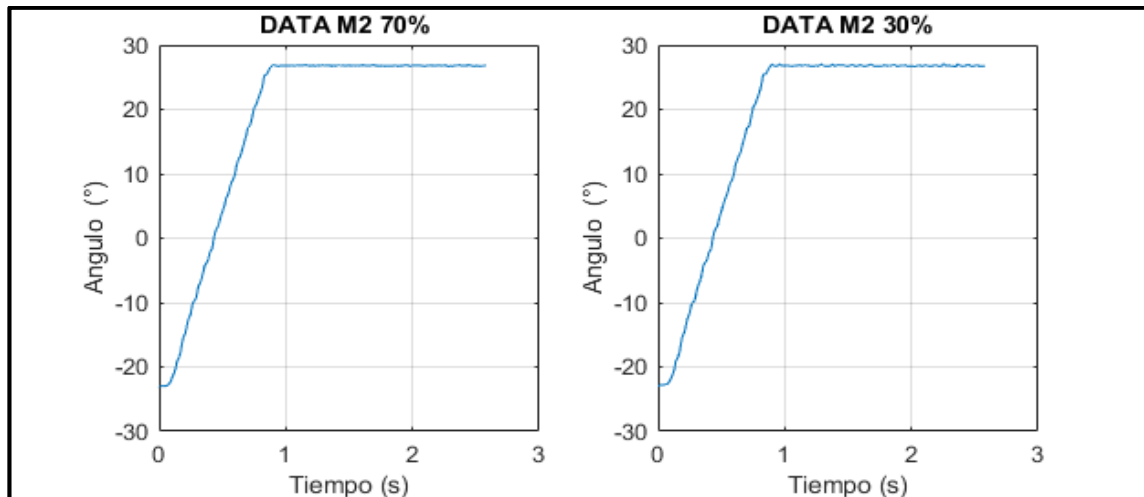


Grafica 87.Salida del comportamiento del motor 1 ante el escalón de entrada

## Motor 2

| DATA PROMEDIO |            | DATA PROMEDIO 70% |            | DATA PROMEDIO 30% |            | ESCALON   |
|---------------|------------|-------------------|------------|-------------------|------------|-----------|
| Tiempo (s)    | Angulo (°) | Tiempo (s)        | Angulo (°) | Tiempo (s)        | Angulo (°) | 512 - 720 |
| 0,00          | -22,82     | 0,00              | -22,79     | 0,00              | -22,88     | 590,00    |
| 0,01          | -22,72     | 0,01              | -22,74     | 0,01              | -22,67     | 590,00    |
| 0,02          | -22,69     | 0,02              | -22,74     | 0,02              | -22,56     | 590,00    |
| 0,04          | -22,62     | 0,04              | -22,65     | 0,03              | -22,56     | 590,00    |
| 0,05          | -22,75     | 0,05              | -22,79     | 0,05              | -22,67     | 590,00    |
| 0,06          | -22,62     | 0,06              | -22,65     | 0,06              | -22,56     | 590,00    |
| 0,08          | -22,49     | 0,08              | -22,51     | 0,07              | -22,45     | 590,00    |
| 0,09          | -22,20     | 0,09              | -22,24     | 0,09              | -22,13     | 590,00    |
| 0,10          | -21,85     | 0,10              | -21,87     | 0,10              | -21,81     | 590,00    |
| 0,11          | -20,79     | 0,11              | -20,76     | 0,11              | -20,84     | 590,00    |
| 0,13          | -20,24     | 0,13              | -20,21     | 0,13              | -20,30     | 590,00    |
| 0,14          | -19,24     | 0,14              | -19,24     | 0,14              | -19,23     | 590,00    |
| 0,15          | -18,37     | 0,15              | -18,37     | 0,15              | -18,37     | 590,00    |
| 0,17          | -17,72     | 0,17              | -17,72     | 0,16              | -17,72     | 590,00    |
| 0,18          | -16,63     | 0,18              | -16,62     | 0,18              | -16,65     | 590,00    |
| 0,19          | -15,60     | 0,19              | -15,61     | 0,19              | -15,58     | 590,00    |
| 0,21          | -14,60     | 0,21              | -14,59     | 0,20              | -14,61     | 590,00    |
| 0,22          | -13,60     | 0,22              | -13,63     | 0,22              | -13,54     | 590,00    |
| 0,23          | -12,83     | 0,23              | -12,84     | 0,23              | -12,78     | 590,00    |
| 0,25          | -11,86     | 0,25              | -11,92     | 0,24              | -11,71     | 590,00    |
| 0,26          | -10,67     | 0,26              | -10,68     | 0,25              | -10,63     | 590,00    |

Figura 329.Datas promedio del motor 2

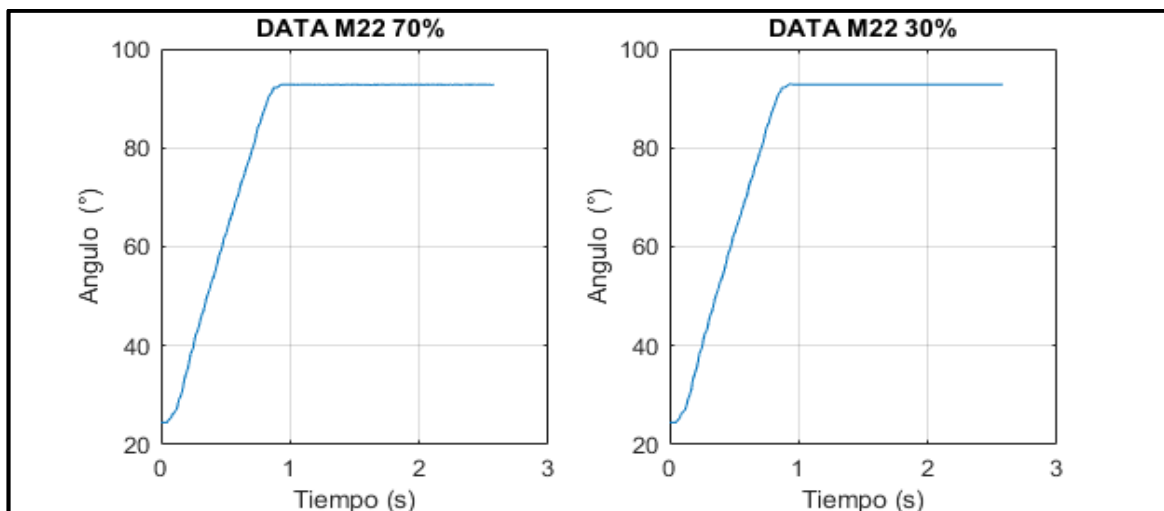


Grafica 88.Salida del comportamiento del motor 2 ante el escalón de entrada

## Motor 2-2

| DATA PROMEDIO |            | DATA PROMEDIO 70% |            | DATA PROMEDIO 30% |            | ESCALON |
|---------------|------------|-------------------|------------|-------------------|------------|---------|
| Tiempo (s)    | Angulo (°) | Tiempo (s)        | Angulo (°) | Tiempo (s)        | Angulo (°) | 590-800 |
| 0,00          | 24,49      | 0,00              | 24,49      | 0,00              | 24,49      | 800,00  |
| 0,01          | 24,49      | 0,01              | 24,49      | 0,01              | 24,49      | 800,00  |
| 0,03          | 24,49      | 0,03              | 24,49      | 0,03              | 24,49      | 800,00  |
| 0,04          | 24,49      | 0,04              | 24,49      | 0,04              | 24,49      | 800,00  |
| 0,05          | 24,49      | 0,05              | 24,49      | 0,05              | 24,49      | 800,00  |
| 0,06          | 24,94      | 0,06              | 24,81      | 0,06              | 25,00      | 800,00  |
| 0,08          | 25,46      | 0,08              | 25,46      | 0,08              | 25,46      | 800,00  |
| 0,09          | 26,20      | 0,09              | 26,32      | 0,09              | 26,15      | 800,00  |
| 0,10          | 26,43      | 0,10              | 26,43      | 0,10              | 26,43      | 800,00  |
| 0,12          | 27,04      | 0,12              | 27,07      | 0,12              | 27,02      | 800,00  |
| 0,13          | 27,88      | 0,13              | 27,71      | 0,13              | 27,95      | 800,00  |
| 0,14          | 29,10      | 0,14              | 29,00      | 0,14              | 29,14      | 800,00  |
| 0,16          | 30,26      | 0,16              | 30,29      | 0,16              | 30,25      | 800,00  |
| 0,17          | 31,32      | 0,17              | 31,26      | 0,17              | 31,35      | 800,00  |
| 0,18          | 33,06      | 0,18              | 33,09      | 0,18              | 33,06      | 800,00  |
| 0,19          | 33,90      | 0,19              | 33,84      | 0,19              | 33,93      | 800,00  |
| 0,21          | 35,48      | 0,21              | 35,45      | 0,21              | 35,50      | 800,00  |
| 0,22          | 36,80      | 0,22              | 36,63      | 0,22              | 36,88      | 800,00  |
| 0,23          | 38,35      | 0,23              | 38,35      | 0,23              | 38,35      | 800,00  |
| 0,25          | 39,51      | 0,25              | 39,53      | 0,25              | 39,50      | 800,00  |
| 0,26          | 41,06      | 0,26              | 40,93      | 0,26              | 41,11      | 800,00  |

Figura 330.Datas promedio del motor 2-2

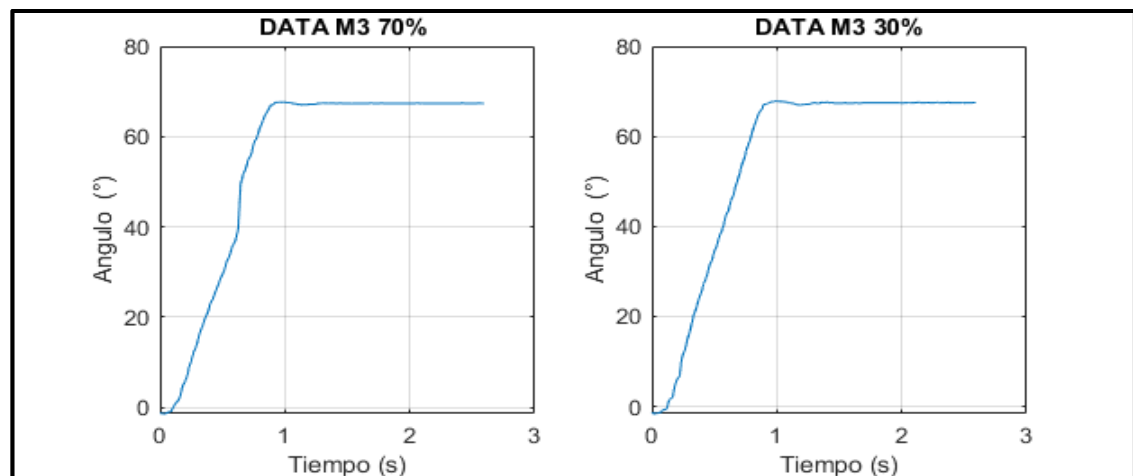


Grafica 89.Salida del comportamiento del motor 2-2 ante el escalón de entrada

### Motor 3

| DATA PROMEDIO |            | DATA PROMEDIO 70% |            | DATA PROMEDIO 30% |            | ESCALON   |
|---------------|------------|-------------------|------------|-------------------|------------|-----------|
| Tiempo (s)    | Angulo (°) | Tiempo (s)        | Angulo (°) | Tiempo (s)        | Angulo (°) | 512 - 720 |
| 0,00          | -0,55      | 0,00              | 0,11       | 0,00              | -0,83      | 720,00    |
| 0,01          | -0,42      | 0,01              | -1,72      | 0,01              | 0,14       | 720,00    |
| 0,02          | -0,19      | 0,02              | 0,54       | 0,02              | -0,51      | 720,00    |
| 0,04          | -0,03      | 0,04              | 0,86       | 0,04              | -0,41      | 720,00    |
| 0,05          | 1,00       | 0,05              | 1,29       | 0,05              | 0,87       | 720,00    |
| 0,06          | 1,64       | 0,06              | 1,83       | 0,06              | 1,57       | 720,00    |
| 0,07          | 2,32       | 0,07              | 2,26       | 0,08              | 2,35       | 720,00    |
| 0,09          | 1,56       | 0,09              | 0,75       | 0,09              | 1,91       | 720,00    |
| 0,11          | 4,03       | 0,10              | 4,19       | 0,11              | 3,96       | 720,00    |
| 0,12          | 5,67       | 0,11              | 5,59       | 0,12              | 5,71       | 720,00    |
| 0,13          | 6,41       | 0,13              | 7,20       | 0,13              | 6,08       | 720,00    |
| 0,15          | 7,93       | 0,15              | 8,16       | 0,15              | 7,83       | 720,00    |
| 0,16          | 9,06       | 0,16              | 9,13       | 0,16              | 9,02       | 720,00    |
| 0,17          | 9,44       | 0,17              | 9,99       | 0,17              | 9,21       | 720,00    |
| 0,19          | 11,02      | 0,19              | 11,17      | 0,19              | 10,96      | 720,00    |
| 0,20          | 12,02      | 0,20              | 10,63      | 0,20              | 12,61      | 720,00    |
| 0,21          | 12,34      | 0,21              | 11,17      | 0,21              | 12,84      | 720,00    |
| 0,23          | 14,42      | 0,23              | 15,04      | 0,23              | 14,16      | 720,00    |
| 0,24          | 15,31      | 0,24              | 16,22      | 0,24              | 14,92      | 720,00    |
| 0,25          | 17,08      | 0,25              | 17,29      | 0,25              | 16,99      | 720,00    |
| 0,27          | 18,05      | 0,28              | 17,94      | 0,27              | 18,09      | 720,00    |

Figura 331. Datos promedio del motor 3

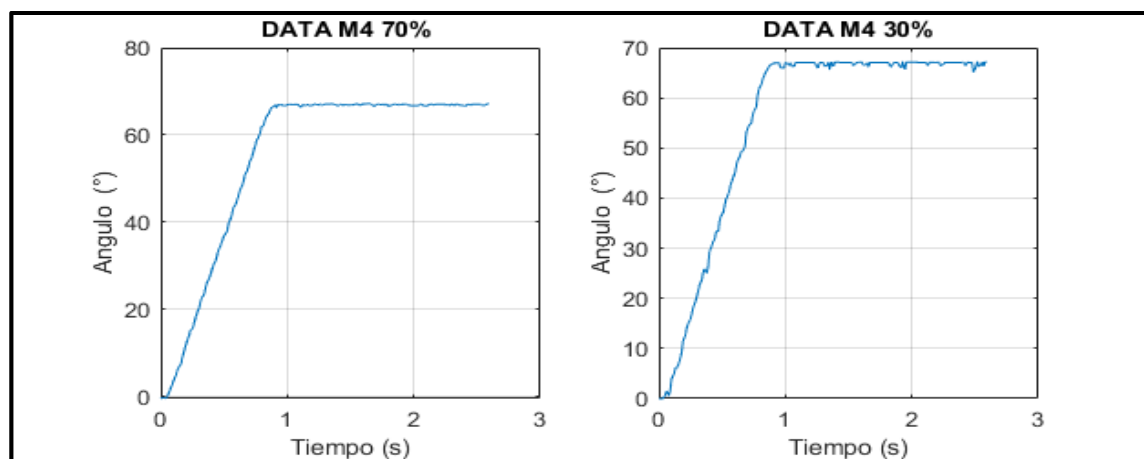


Grafica 90. Salida del comportamiento del motor 3 ante el escalón de entrada

## Motor 4

| DATA PROMEDIO |            | DATA PROMEDIO 70% |            | DATA PROMEDIO 30% |            | ESCALON   |
|---------------|------------|-------------------|------------|-------------------|------------|-----------|
| Tiempo (s)    | Angulo (°) | Tiempo (s)        | Angulo (°) | Tiempo (s)        | Angulo (°) | 512 - 720 |
| 0,00          | -0,55      | 0,00              | 0,11       | 0,00              | -0,83      | 720,00    |
| 0,01          | -0,42      | 0,01              | -1,72      | 0,01              | 0,14       | 720,00    |
| 0,02          | -0,19      | 0,02              | 0,54       | 0,02              | -0,51      | 720,00    |
| 0,04          | -0,03      | 0,04              | 0,86       | 0,04              | -0,41      | 720,00    |
| 0,05          | 1,00       | 0,05              | 1,29       | 0,05              | 0,87       | 720,00    |
| 0,06          | 1,64       | 0,06              | 1,83       | 0,06              | 1,57       | 720,00    |
| 0,07          | 2,32       | 0,07              | 2,26       | 0,08              | 2,35       | 720,00    |
| 0,09          | 1,56       | 0,09              | 0,75       | 0,09              | 1,91       | 720,00    |
| 0,11          | 4,03       | 0,10              | 4,19       | 0,11              | 3,96       | 720,00    |
| 0,12          | 5,67       | 0,11              | 5,59       | 0,12              | 5,71       | 720,00    |
| 0,13          | 6,41       | 0,13              | 7,20       | 0,13              | 6,08       | 720,00    |
| 0,15          | 7,93       | 0,15              | 8,16       | 0,15              | 7,83       | 720,00    |
| 0,16          | 9,06       | 0,16              | 9,13       | 0,16              | 9,02       | 720,00    |
| 0,17          | 9,44       | 0,17              | 9,99       | 0,17              | 9,21       | 720,00    |
| 0,19          | 11,02      | 0,19              | 11,17      | 0,19              | 10,96      | 720,00    |
| 0,20          | 12,02      | 0,20              | 10,63      | 0,20              | 12,61      | 720,00    |
| 0,21          | 12,34      | 0,21              | 11,17      | 0,21              | 12,84      | 720,00    |
| 0,23          | 14,42      | 0,23              | 15,04      | 0,23              | 14,16      | 720,00    |
| 0,24          | 15,31      | 0,24              | 16,22      | 0,24              | 14,92      | 720,00    |
| 0,25          | 17,08      | 0,25              | 17,29      | 0,25              | 16,99      | 720,00    |
| 0,27          | 18,05      | 0,28              | 17,94      | 0,27              | 18,09      | 720,00    |

Figura 332.Datas promedio del motor 4

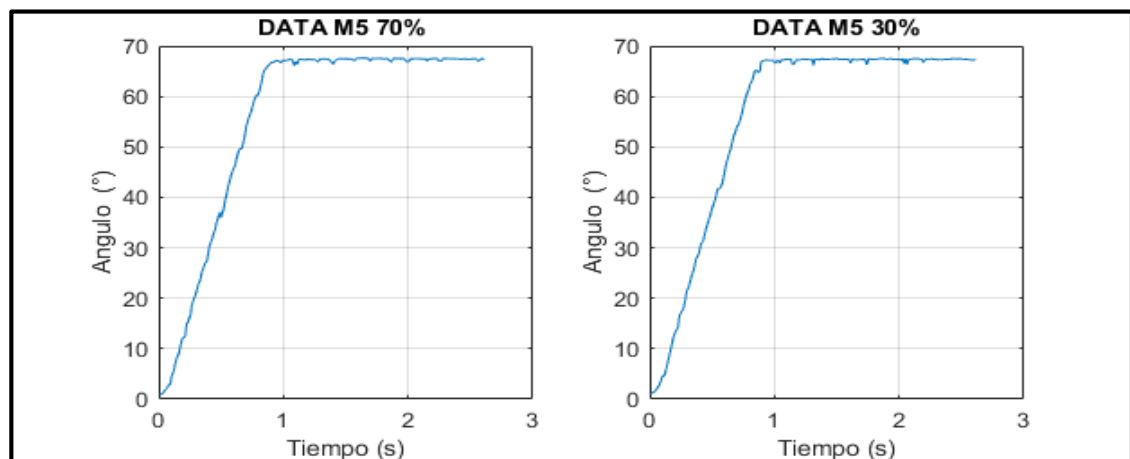


Grafica 91.Salida del comportamiento del motor 4 ante el escalón de entrada

## Motor 5

| DATA PROMEDIO |            | DATA PROMEDIO 70% |            | DATA PROMEDIO 30% |            | ESCALON   |
|---------------|------------|-------------------|------------|-------------------|------------|-----------|
| Tiempo (s)    | Angulo (°) | Tiempo (s)        | Angulo (°) | Tiempo (s)        | Angulo (°) | 512 - 720 |
| 0,00          | 0,97       | 0,00              | 1,07       | 0,00              | 0,92       | 720,00    |
| 0,01          | 1,03       | 0,01              | 1,18       | 0,01              | 0,97       | 720,00    |
| 0,03          | 1,16       | 0,03              | 1,40       | 0,03              | 1,06       | 720,00    |
| 0,04          | 1,39       | 0,04              | 1,50       | 0,04              | 1,34       | 720,00    |
| 0,05          | 1,77       | 0,05              | 1,83       | 0,05              | 1,75       | 720,00    |
| 0,07          | 2,26       | 0,07              | 2,36       | 0,07              | 2,21       | 720,00    |
| 0,08          | 2,96       | 0,08              | 3,01       | 0,08              | 2,95       | 720,00    |
| 0,09          | 3,09       | 0,09              | 3,65       | 0,09              | 2,85       | 720,00    |
| 0,10          | 4,61       | 0,10              | 4,51       | 0,10              | 4,65       | 720,00    |
| 0,12          | 5,51       | 0,12              | 4,73       | 0,12              | 5,85       | 720,00    |
| 0,13          | 6,74       | 0,13              | 5,91       | 0,13              | 7,09       | 720,00    |
| 0,14          | 7,67       | 0,14              | 6,77       | 0,14              | 8,06       | 720,00    |
| 0,16          | 9,09       | 0,16              | 9,02       | 0,16              | 9,12       | 720,00    |
| 0,17          | 10,22      | 0,17              | 9,99       | 0,17              | 10,31      | 720,00    |
| 0,18          | 11,47      | 0,18              | 11,28      | 0,18              | 11,56      | 720,00    |
| 0,20          | 12,34      | 0,19              | 12,57      | 0,20              | 12,25      | 720,00    |
| 0,21          | 12,70      | 0,21              | 13,54      | 0,21              | 12,34      | 720,00    |
| 0,22          | 14,65      | 0,23              | 14,18      | 0,22              | 14,85      | 720,00    |
| 0,24          | 15,66      | 0,24              | 16,44      | 0,24              | 15,33      | 720,00    |
| 0,26          | 16,98      | 0,26              | 17,51      | 0,26              | 16,76      | 720,00    |
| 0,27          | 18,30      | 0,27              | 17,62      | 0,27              | 18,60      | 720,00    |

Figura 333.Datas promedio del motor 5

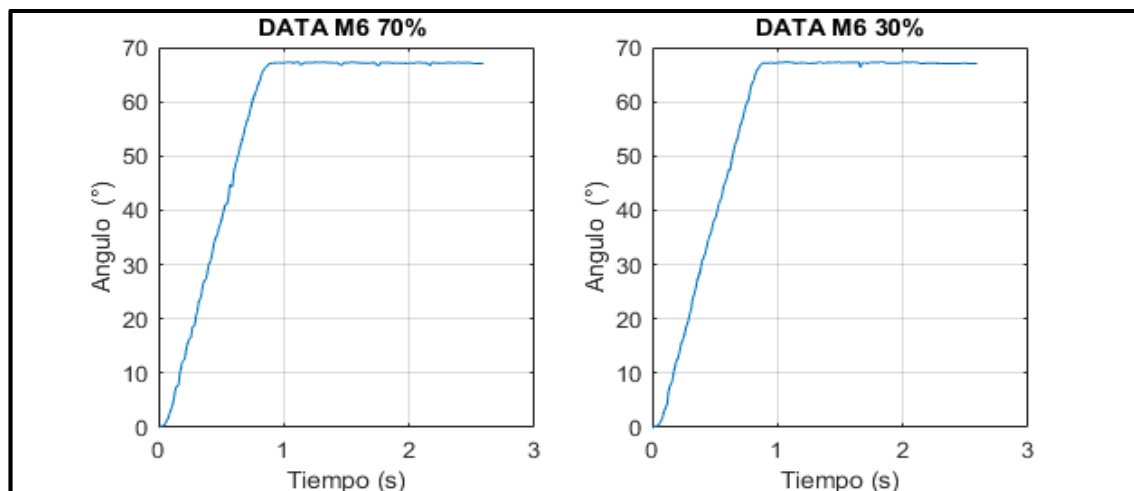


Grafica 92.Salida del comportamiento del motor 5 ante el escalón de entrada

## Motor 6

| DATA PROMEDIO |            | DATA PROMEDIO 70% |            | DATA PROMEDIO 30% |            | ESCALON   |
|---------------|------------|-------------------|------------|-------------------|------------|-----------|
| Tiempo (s)    | Angulo (°) | Tiempo (s)        | Angulo (°) | Tiempo (s)        | Angulo (°) | 512 - 720 |
| 0,00          | 0,00       | 0,00              | 0,00       | 0,00              | 0,00       | 720,00    |
| 0,01          | 0,06       | 0,01              | 0,00       | 0,01              | 0,09       | 720,00    |
| 0,03          | 0,32       | 0,03              | 0,32       | 0,03              | 0,32       | 720,00    |
| 0,04          | 0,29       | 0,04              | 0,21       | 0,04              | 0,32       | 720,00    |
| 0,05          | 0,42       | 0,05              | 0,32       | 0,05              | 0,46       | 720,00    |
| 0,06          | 1,03       | 0,06              | 0,97       | 0,06              | 1,06       | 720,00    |
| 0,08          | 1,74       | 0,08              | 1,61       | 0,08              | 1,80       | 720,00    |
| 0,09          | 2,67       | 0,09              | 2,58       | 0,09              | 2,72       | 720,00    |
| 0,10          | 3,22       | 0,10              | 3,22       | 0,10              | 3,22       | 720,00    |
| 0,12          | 4,67       | 0,12              | 4,30       | 0,12              | 4,83       | 720,00    |
| 0,13          | 6,45       | 0,13              | 6,55       | 0,13              | 6,40       | 720,00    |
| 0,14          | 7,44       | 0,14              | 7,52       | 0,14              | 7,41       | 720,00    |
| 0,16          | 7,99       | 0,16              | 8,49       | 0,16              | 7,78       | 720,00    |
| 0,17          | 9,86       | 0,17              | 9,88       | 0,17              | 9,85       | 720,00    |
| 0,18          | 10,96      | 0,18              | 10,96      | 0,18              | 10,96      | 720,00    |
| 0,19          | 12,08      | 0,19              | 12,03      | 0,19              | 12,11      | 720,00    |
| 0,21          | 12,70      | 0,21              | 13,00      | 0,21              | 12,57      | 720,00    |
| 0,22          | 14,15      | 0,22              | 14,07      | 0,22              | 14,18      | 720,00    |
| 0,23          | 15,34      | 0,23              | 15,36      | 0,23              | 15,33      | 720,00    |
| 0,25          | 16,50      | 0,25              | 16,44      | 0,25              | 16,53      | 720,00    |
| 0,26          | 16,73      | 0,26              | 17,29      | 0,26              | 16,48      | 720,00    |

Figura 334.Datas promedio del motor 6



Grafica 93.Salida del comportamiento del motor 6 ante el escalón de entrada

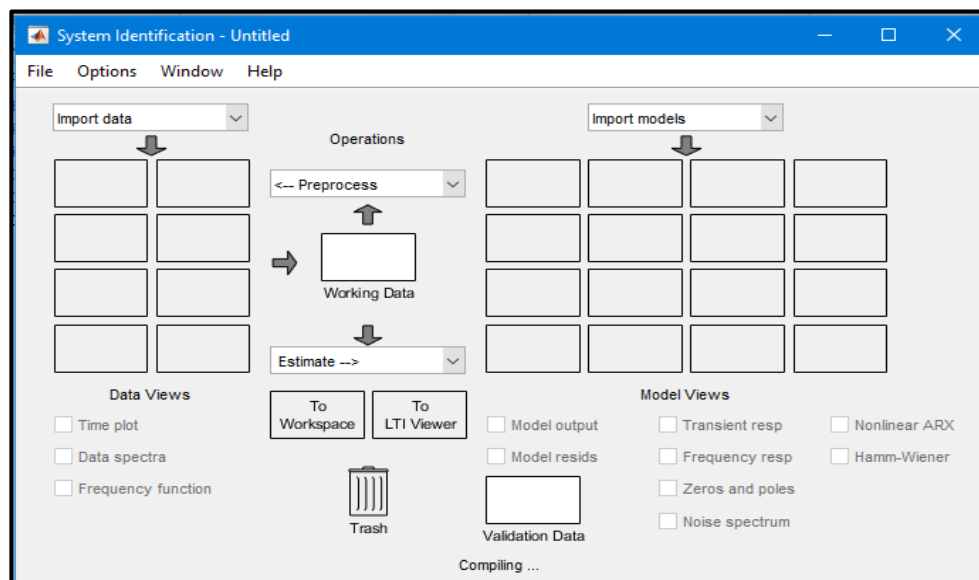
Luego de obtener los valores de salida del comportamiento de cada servo ante un escalón, se procede a utilizar la Toolbox de Matlab (systemIdentification), para así poder obtener las funciones de transferencia que me representa el modelo de cada actuador, el proceso de identificación por el método de identificación paramétrica sería de manera más tediosa y extensa a la hora de identificar uno por uno.

A continuación, se realizará la explicación de la utilización de dicha Toolbox, procediendo con la identificación del servo 1 del manipulador 1, esto mismos pasos se realizarán para cada servo tanto del manipulador uno como el dos.

### 8.6.5 Identificación del Manipulador

#### Motor 1

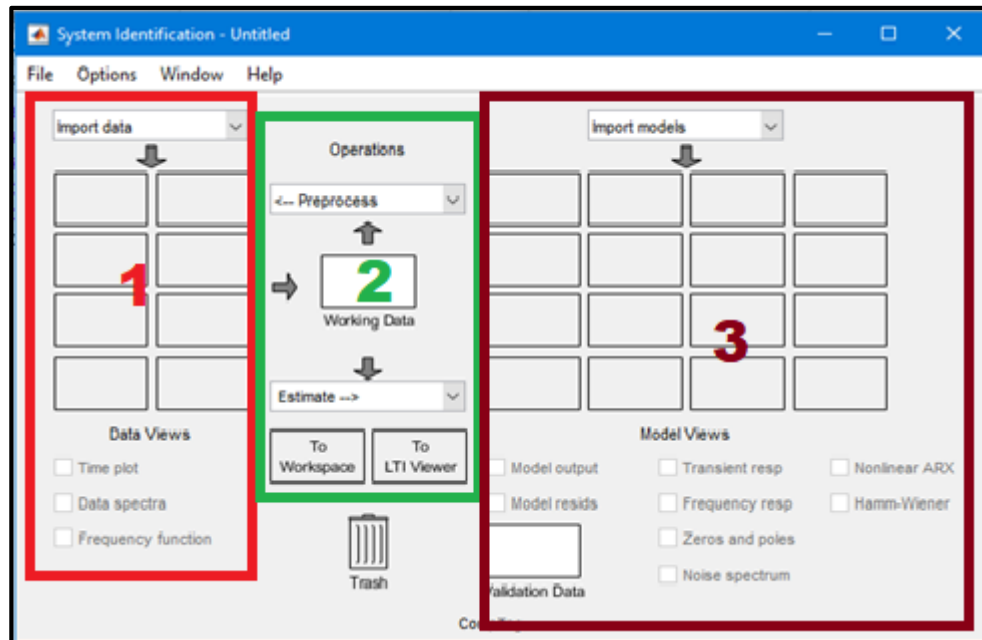
Como primer paso se escribe en el command window “systemIdentification” y se le abrirá la siguiente ventana como se muestra en la Figura 335.



**Figura 335. Interfaz System Identificación**

El cual consta de tres partes principales como se muestra en la Figura 336, las cuales son:

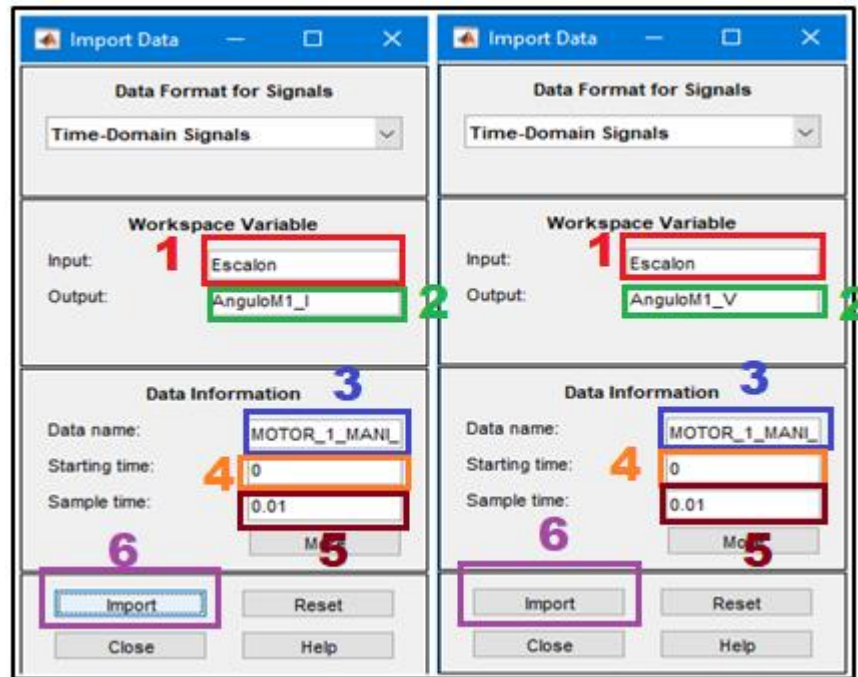
1. Importar los datos
2. Operaciones
3. Visualización de modelos



**Figura 336. Partes de la interfaz System Identificación**

## Importar Datos

En esta opción se importarán los datos ya recopilados anteriormente de cada servo, lo cual se ingresará de la siguiente manera como se muestra en la Figura 337.

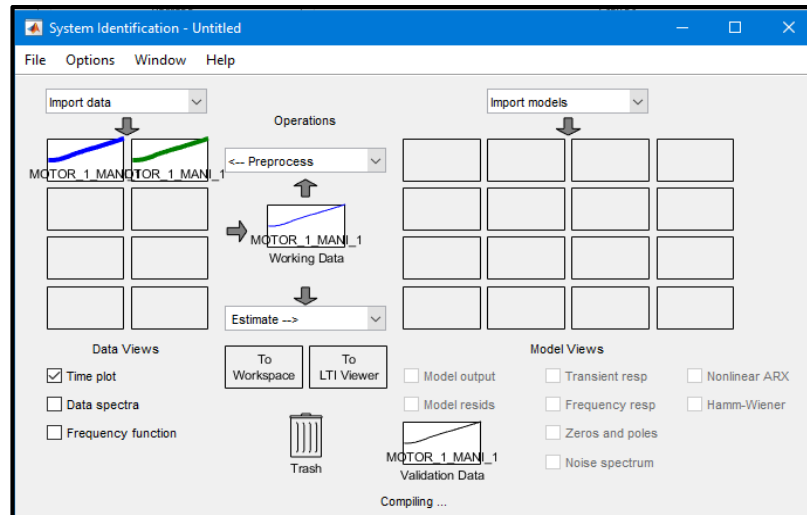


**Figura 337.** Importación de datos de identificación y validación del sistema

Donde:

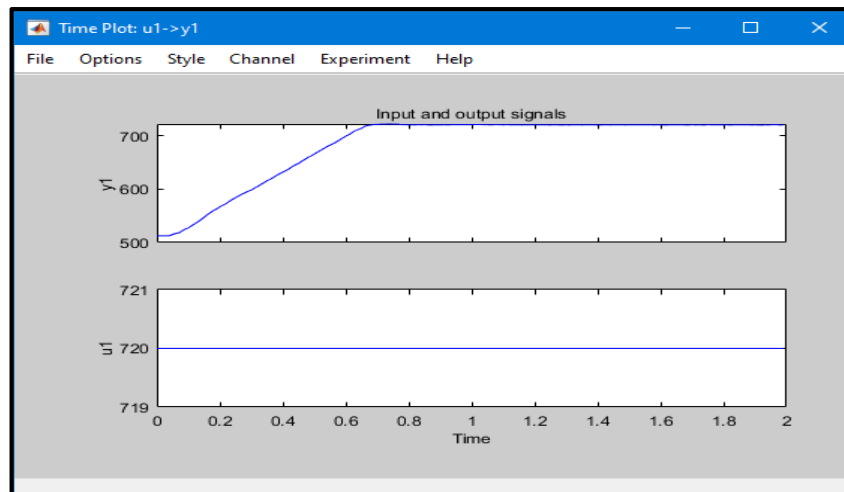
1. Se ingresa la data del escalón (720) debe de la misma dimensión que la salida.
2. Se ingresa la data de salida del servo recopilada anteriormente.
3. Se le asigna un nombre a variable de identificación.
4. Se pone la hora de inicio (en este caso es cero).
5. Se asigna el tiempo de muestreo que debe de ser el mismo tiempo en cual se tomaron las datas.
6. Se importa a la interfaz general System Identificación.

Realizado este paso nos quedaría de la siguiente manera en la ventana principal donde se observa en la Figura 338, la data de identificación y la de validación.



**Figura 338.** Importación de las datas en la interfaz System Identificación Toolbox

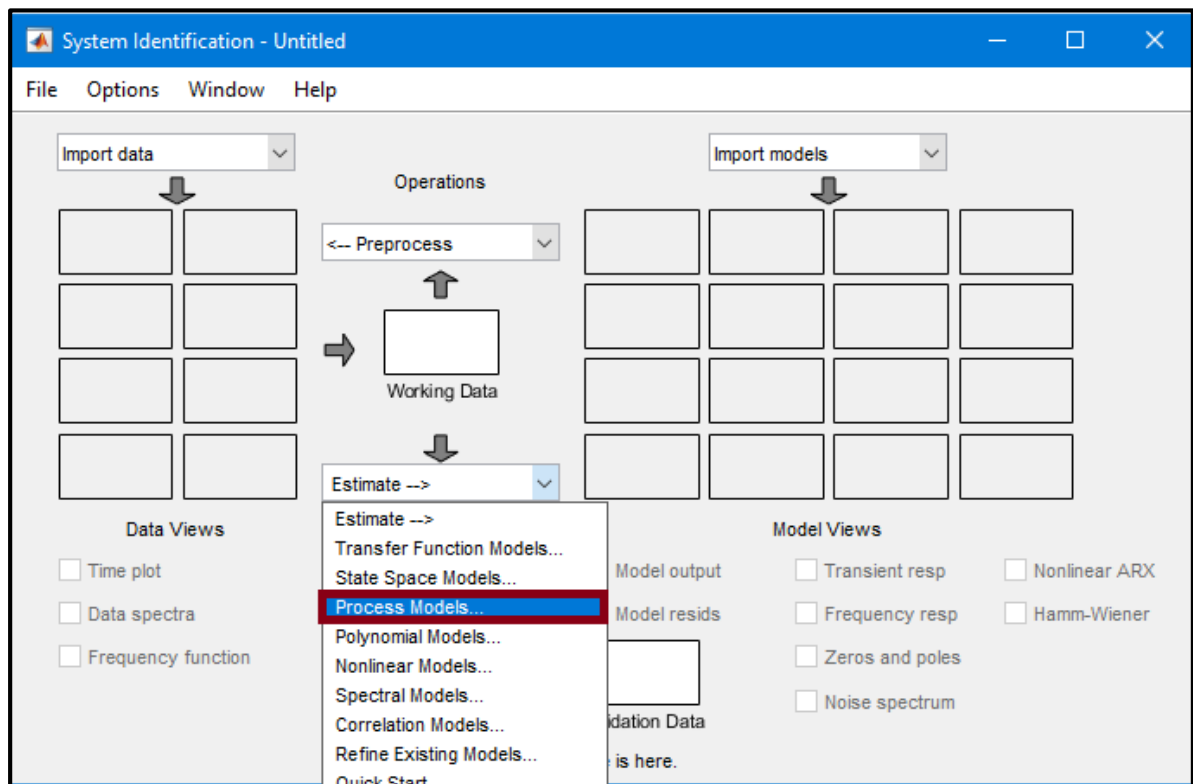
En la “opción time plot” se puede visualizar tanto la data de identificación como la de validación junto al escalón como se muestra en la siguiente Figura 339.



**Figura 339.** Visualización de las datas importadas

## Operaciones

En esta opción seleccionamos los parámetros de la estructura de la función de transferencia como se observa a continuación Figura 340.



**Figura 340.**Opción modelos de procesos

| Par | Known                               | Value | Initial Guess | Bounds     |
|-----|-------------------------------------|-------|---------------|------------|
| K   | <input checked="" type="checkbox"/> | 5     | Auto          | [-Inf Inf] |
| Tp1 | <input type="checkbox"/>            |       | Auto          | [0 Inf]    |
| Tp2 | <input type="checkbox"/>            |       | Auto          | [0 Inf]    |
| Tp3 | <input type="checkbox"/>            | 0     | 0             | [0 Inf]    |
| Tz  | <input type="checkbox"/>            | 0     | 0             | [-Inf Inf] |
| Td  | <input type="checkbox"/>            | 0     | 0             | [0 0.3]    |

Initial Guess  
☒ Auto-selected  
☐ From existing model:   
☐ User-defined: Value-->Initial Guess

Disturbance Model:  None  
 Focus:  Simulation  
 Initial condition:  Auto  
 Covariance:  Estimate

☐ Display progress  
 Name:  P2

**Figura 341. Parámetros de estimación función de transferencia**

Donde:

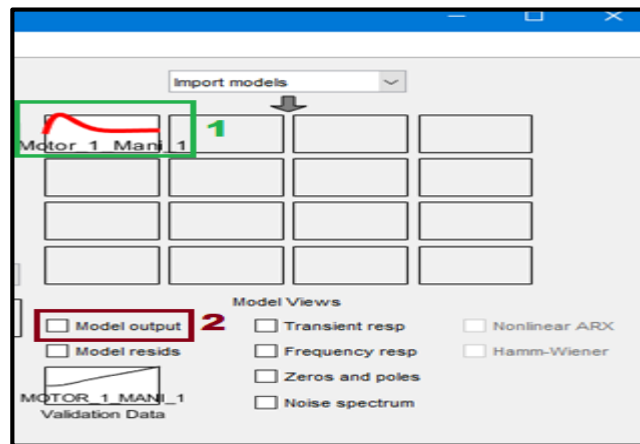
1. Se visualiza la estructura de la función de transferencia.
2. Asignación de números de polos que quiere que tenga la función.
3. Asignación de ceros, tiempo muerto o un integrador que quiere que tenga la función.
4. Luego se estima la función de transferencia.
5. Se visualiza el valor de las constantes representadas en la función de transferencia.

## Visualización de Modelos

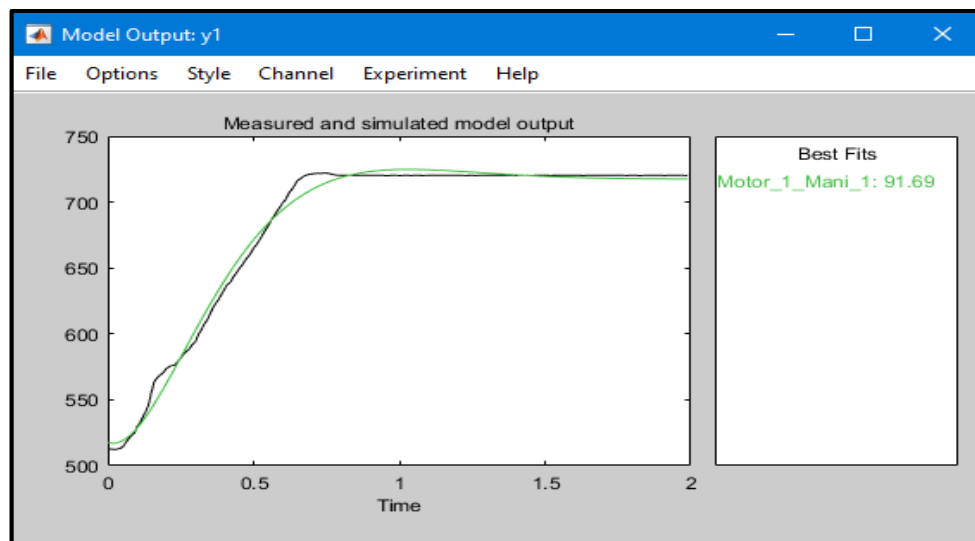
Una vez realizados los pasos anteriores solo queda visualizar y analizar el modelo con respecto a la data como se mira en la Figura 342.

Donde:

3. Se observa el modelo hallado una vez seleccionado los parámetros de estimación.
4. En la opción salida del modelo se observa como se ve reflejado el modelo con respecto a la data de identificación el cual nos arrojará un porcentaje de estimación.

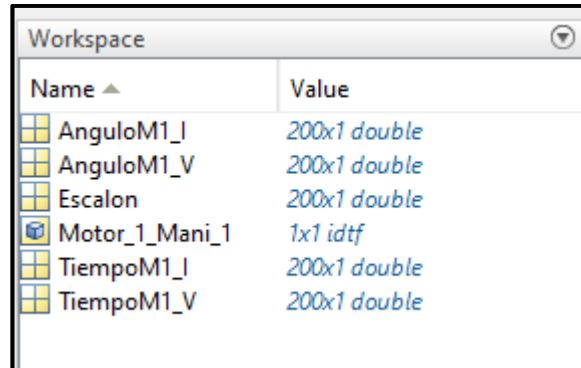


**Figura 342. Visualización del Modelo**



**Grafica 94. Comparación del modelo hallado con la data real del servo 1 (91.69% de estimación)**

Verificado el modelo de la función de transferencia se procede a exportarlo al Worksspace de matlab como se muestra en la Figura 343.



| Name           | Value        |
|----------------|--------------|
| AnguloM1_I     | 200x1 double |
| AnguloM1_V     | 200x1 double |
| Escalon        | 200x1 double |
| Motor_1_Mani_1 | 1x1 idtf     |
| TiempoM1_I     | 200x1 double |
| TiempoM1_V     | 200x1 double |

Figura 343.Exportación de la función de transferencia obtenida

Al finalizar los pasos anteriores no da como finalidad el resultado de la función de transferencia como se muestra en la Figura 344.

```
Motor_1_Mani_1 =
Process model with transfer function:
      Kp
G(s) = -----
      (1+Tp1*s) (1+Tp2*s)

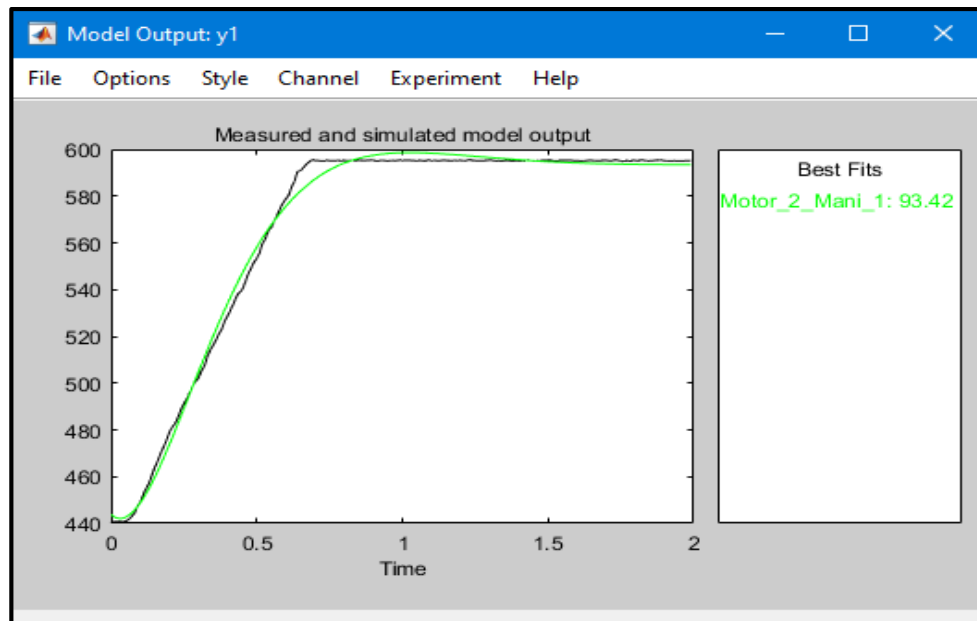
      Kp = 1.0028
      Tp1 = 0.18849
      Tp2 = 0.18791

Motor_1_Mani_1 =
      1
      -----
      0.03541 s^2 + 0.3764 s + 1
```

Figura 344.función de transferencia obtenida servo 1

Se procede a mostrar los resultados de las diferentes identificaciones de los servos, aplicando el método anteriormente explicado.

## Motor 2



Grafica 95.Comparacion del modelo hallado con la data real del motor 2(93.42% de estimación)

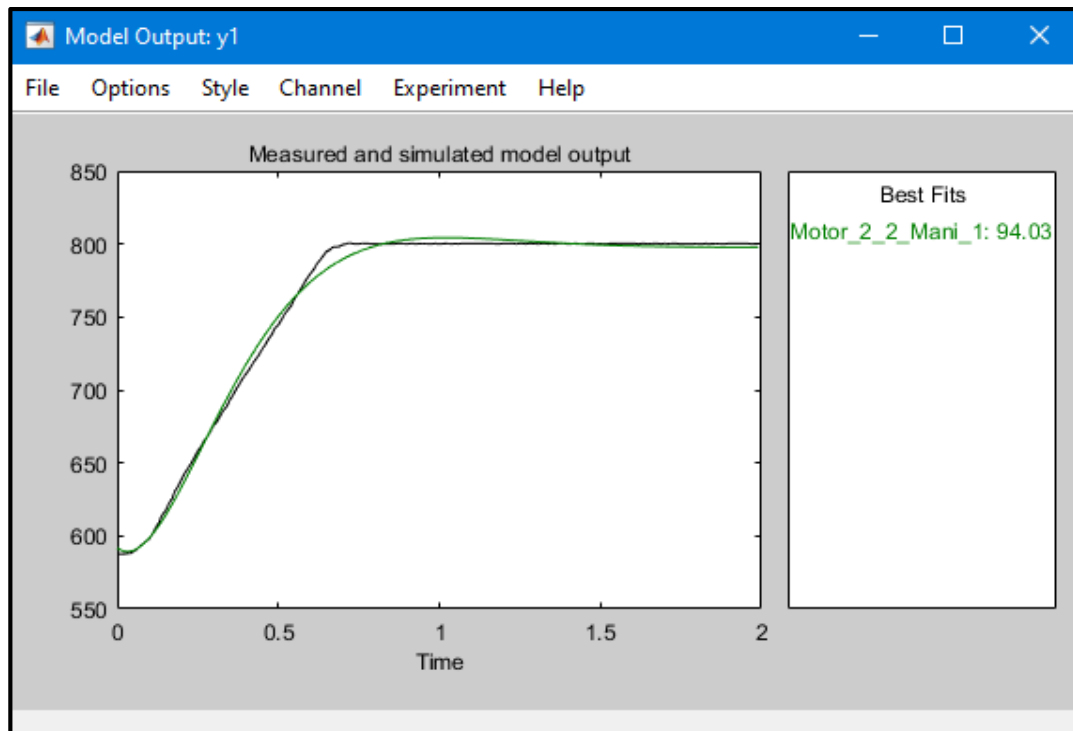
```
Motor_2_Mani_1 =
Process model with transfer function:
      Kp
G(s) = -----
      (1+Tp1*s) (1+Tp2*s)

      Kp = 1.0005
      Tp1 = 0.20986
      Tp2 = 0.21012

Motor_2_Mani_1 =
      1
      -----
      0.04409 s^2 + 0.4199 s + 1
```

Figura 345.función de transferencia obtenida motor 2

## Motor 2-2



Grafica 96.Comparacion del modelo hallado con la data real del motor 2-2 (94.03% de estimación)

```
Motor_2_2_Mani_1 =
Process model with transfer function:

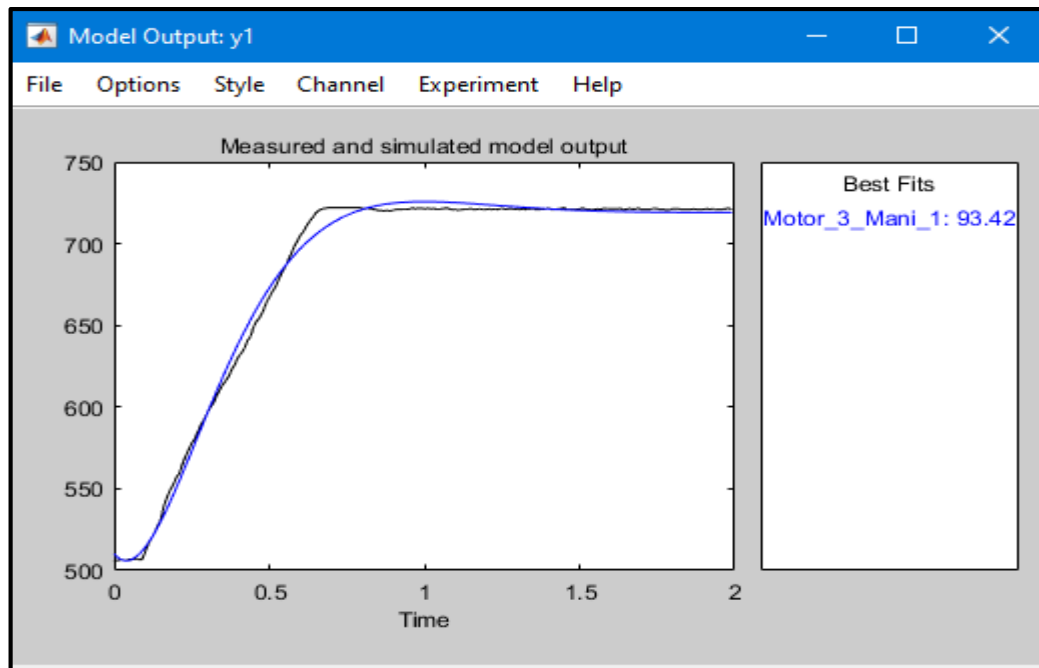
      Kp
G(s) = -----
      (1+Tp1*s) (1+Tp2*s)

      Kp = 0.99231
      Tp1 = 0.20483
      Tp2 = 0.20508

Motor_2_2_Mani_1 =
      1
      -----
      0.042 s^2 + 0.4099 s + 1
```

Figura 346.función de transferencia obtenida motor 2-2

### Motor 3



Grafica 97.Comparacion del modelo hallado con la data real del motor 3 (93.42% de estimación)

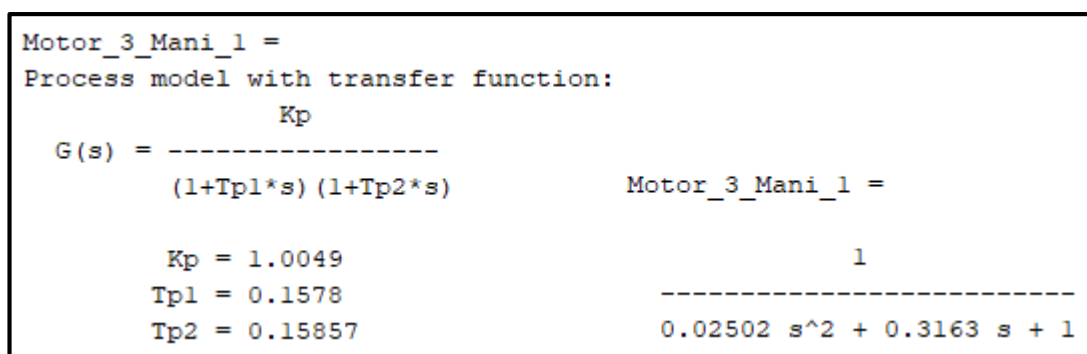
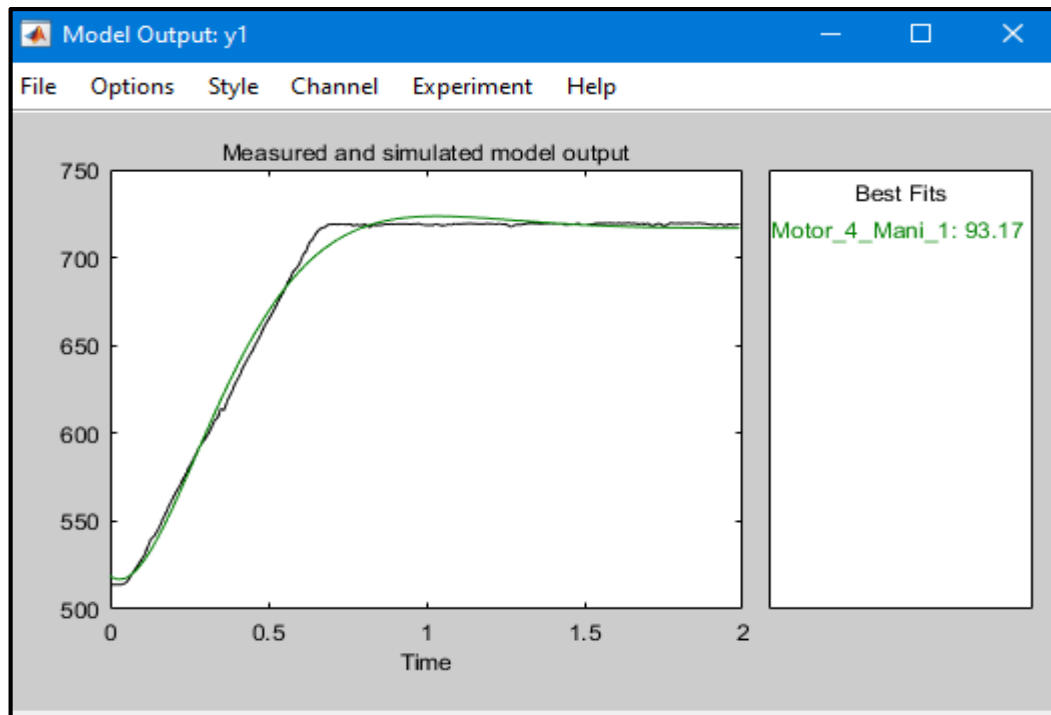


Figura 347.función de transferencia obtenida motor 3

## Motor 4



Grafica 98.Comparacion del modelo hallado con la data real del motor 4 (93.17% de estimación)

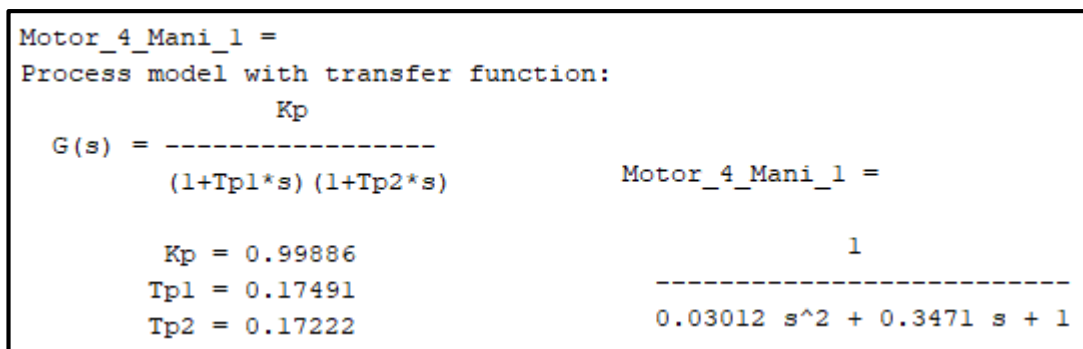
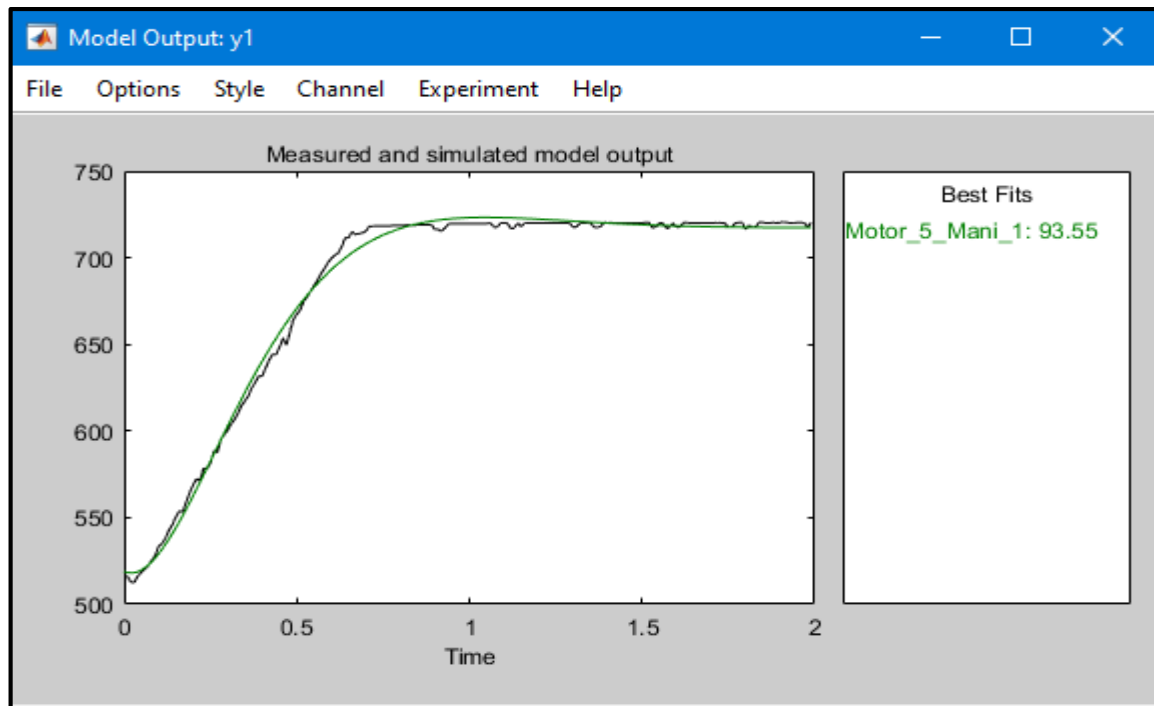


Figura 348.función de transferencia obtenida motor 4

## Motor 5



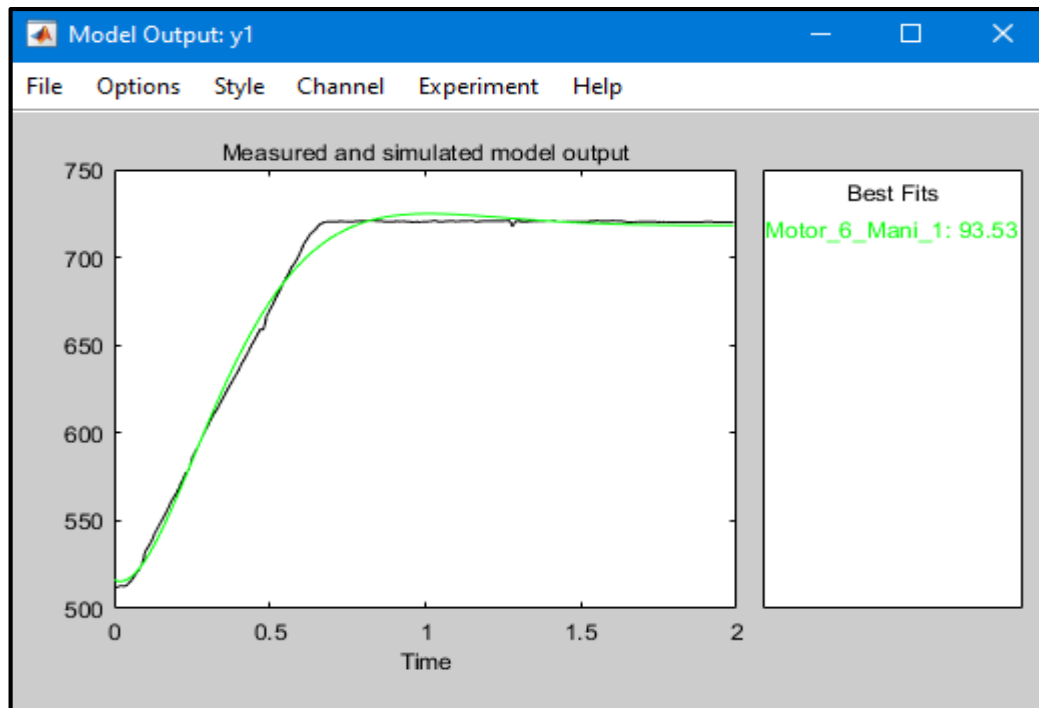
**Grafica 99.**Comparacion del modelo hallado con la data real del motor 5 (93.55% de estimación)

```
Motor_5_Mani_1 =
Process model with transfer function:
      Kp
G(s) = -----
      (1+Tp1*s) (1+Tp2*s)      Motor_5_Mani_1 =
                                   1
                                   -----
                                   0.0299 s^2 + 0.3461 s + 1

      Kp = 0.99944
      Tp1 = 0.17976
      Tp2 = 0.16634
```

**Figura 349.**función de transferencia obtenida motor 5

## Motor 6



Grafica 100.Comparacion del modelo hallado con la data real del motor 6 (93.53% de estimación)

```
Motor_6_Mani_1 =
Process model with transfer function:
      Kp
G(s) = -----
      (1+Tp1*s) (1+Tp2*s)      Motor_6_Mani_1 =
                                   1
                                   -----
                                   0.0288 s^2 + 0.3398 s + 1

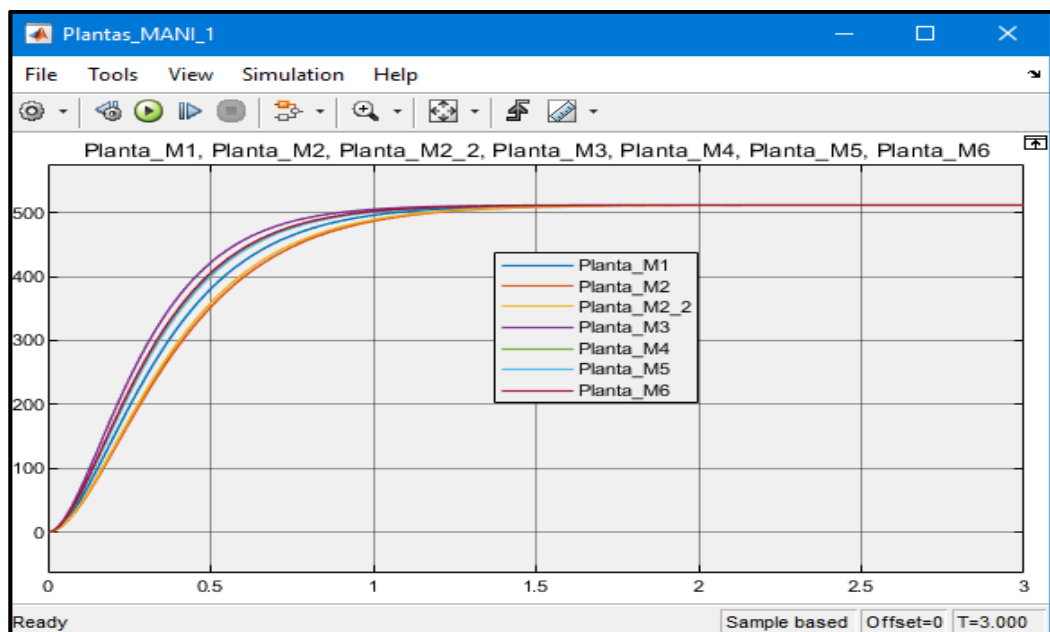
Kp = 1.0006
Tp1 = 0.17043
Tp2 = 0.16937
```

Figura 350.función de transferencia obtenida motor 6

## 8.6.6 Sintonización del manipulador

### 1. Método: Sintonización de controlador por el método de tune Matlab

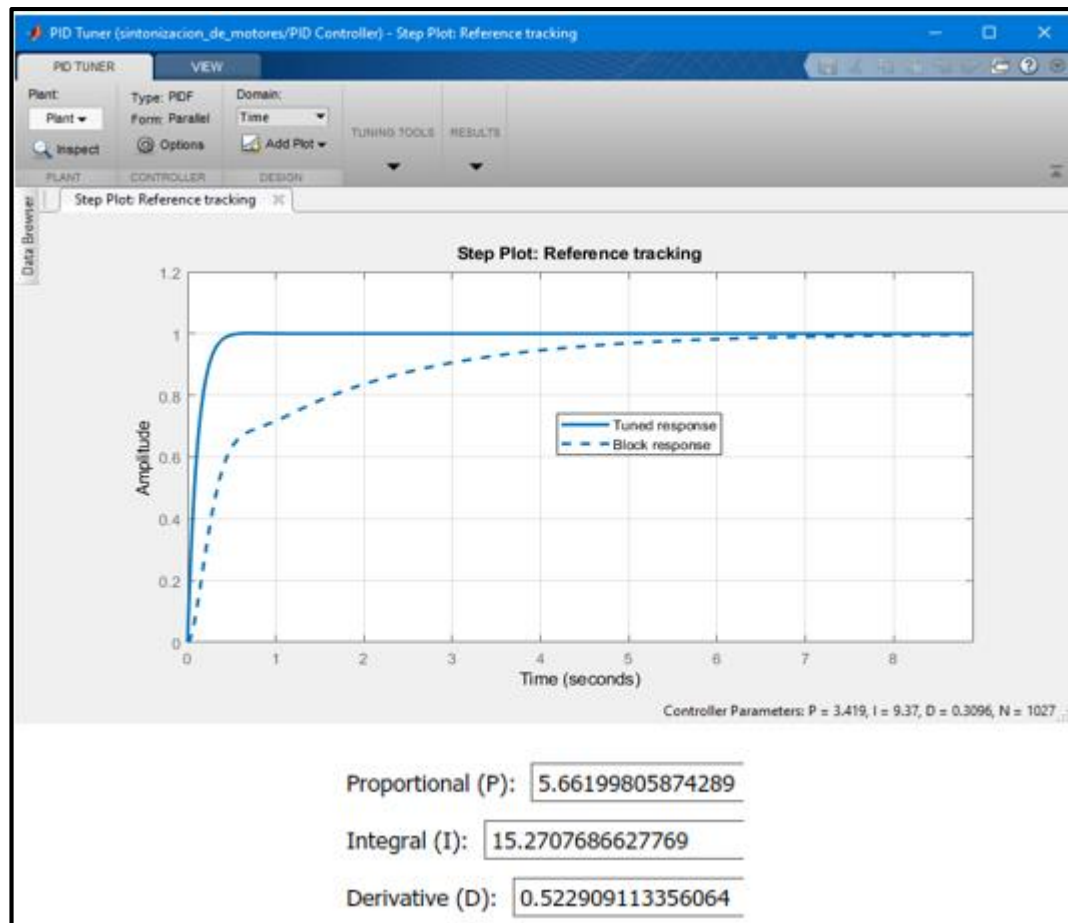
Para el método de PID Tune de Matlab se usa las funciones de transferencia calculadas con anterioridad, se crea en Simulink donde los bloques definen cada una de las plantas halladas, luego se observa la salida de cada uno de los motores ante un escalón de 512 ( $0^\circ$ ) como se observa en la Grafica 101, para luego aplicar el tune y mejorar la salida.



**Grafica 101. Salida de las plantas del manipulador 1**

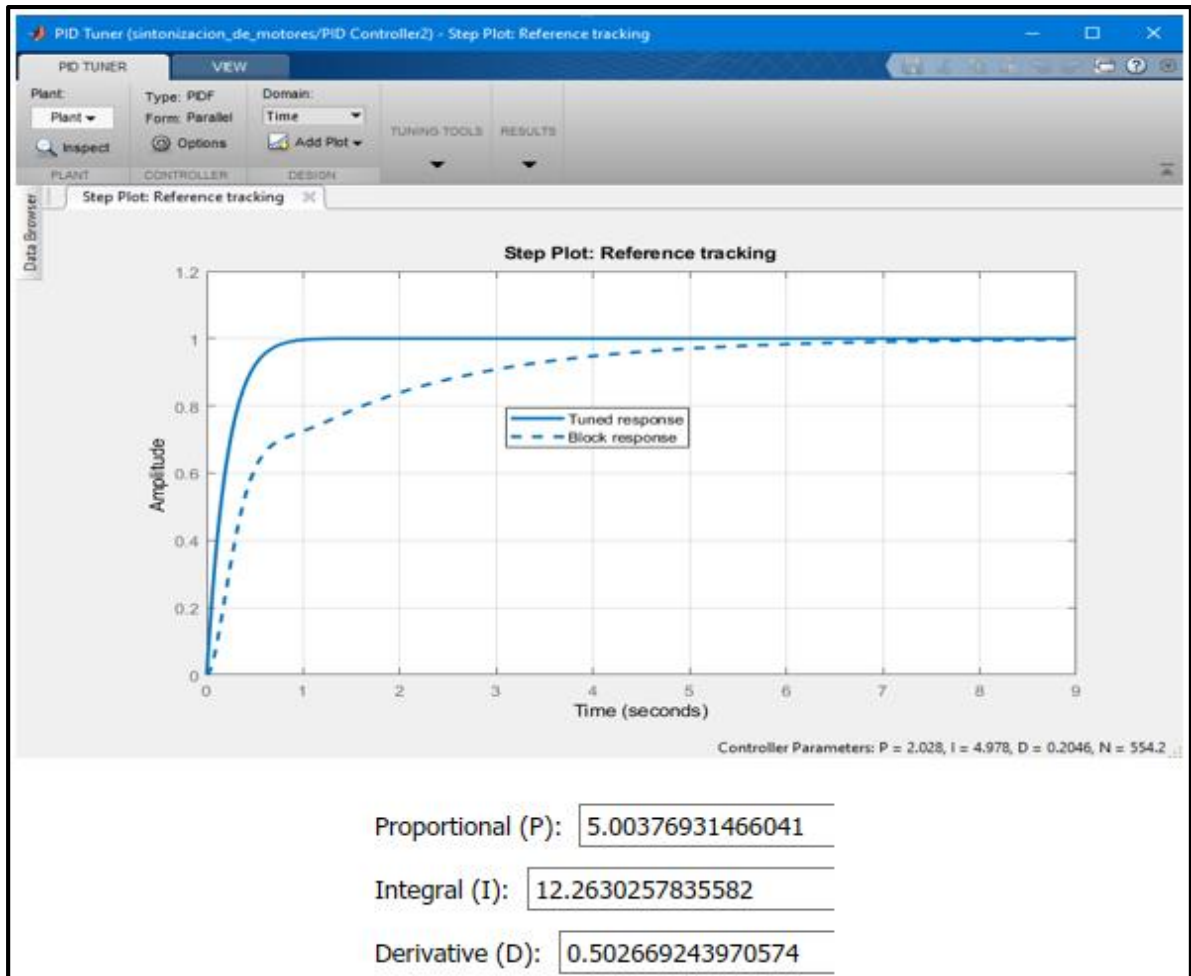
Luego de aplicar el tune se obtiene que el software arroja unas contantes de sintonización para cada uno de los motores como se muestra a continuación.

## Motor 1



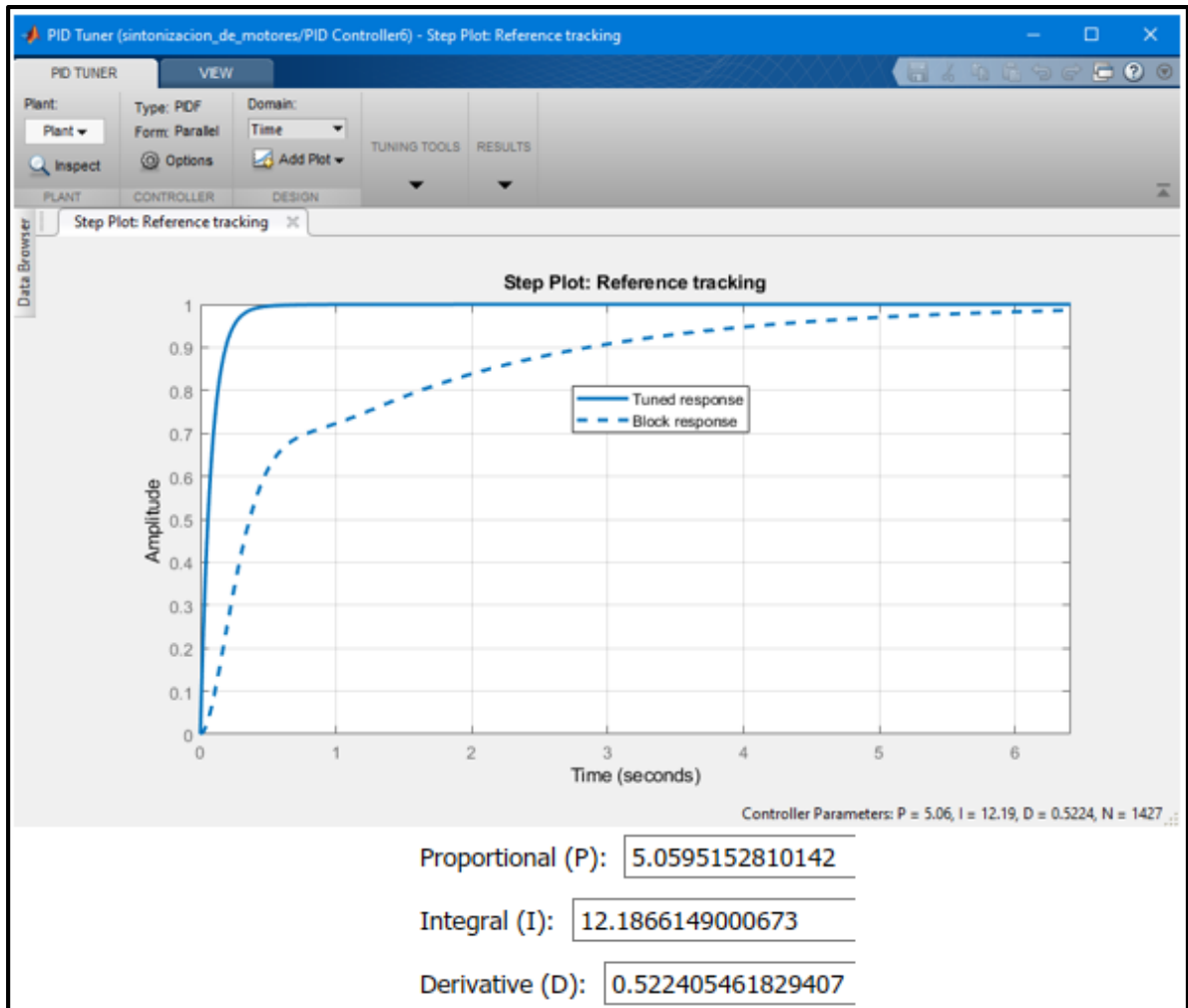
Grafica 102. Salida del controlador Tune más las constantes del controlador del motor 1

## Motor 2



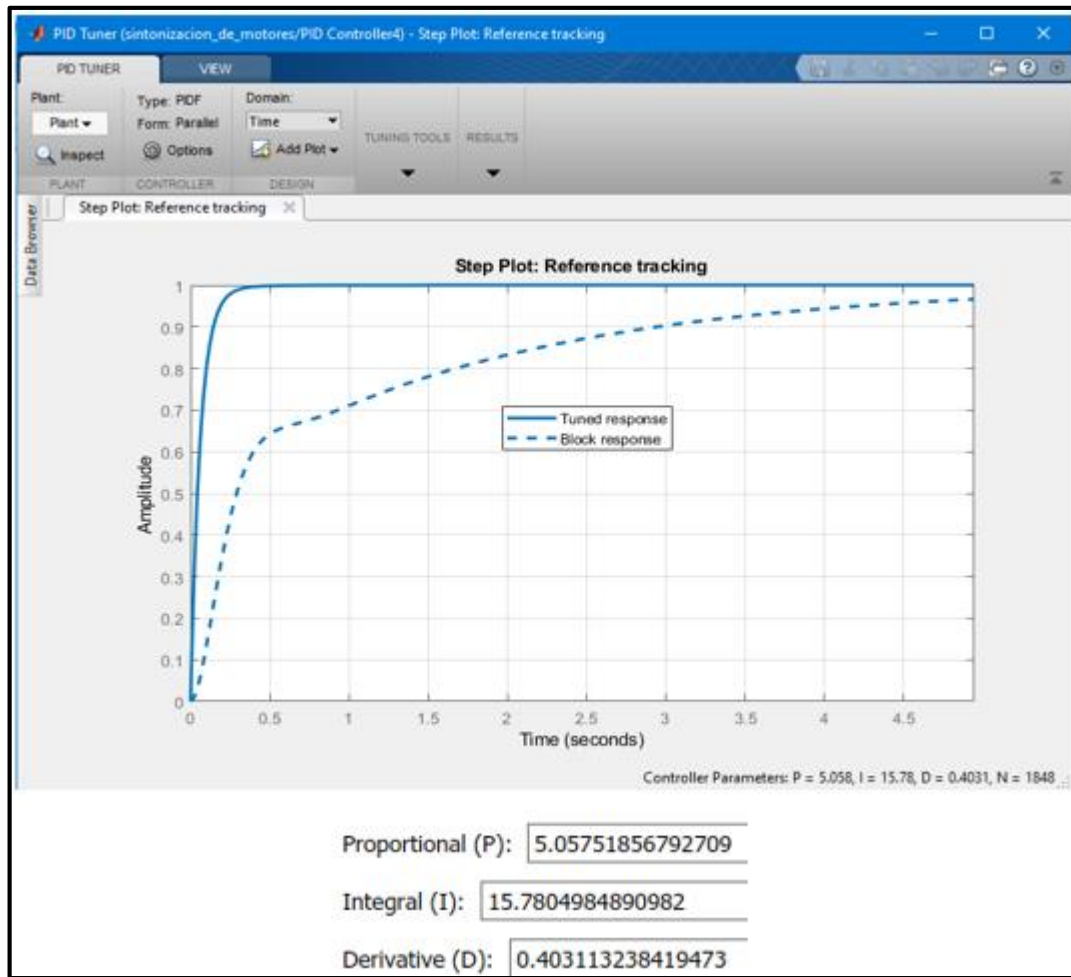
**Grafica 103.** Salida del controlador Tune más las constantes del controlador del motor 2

## Motor 2-2



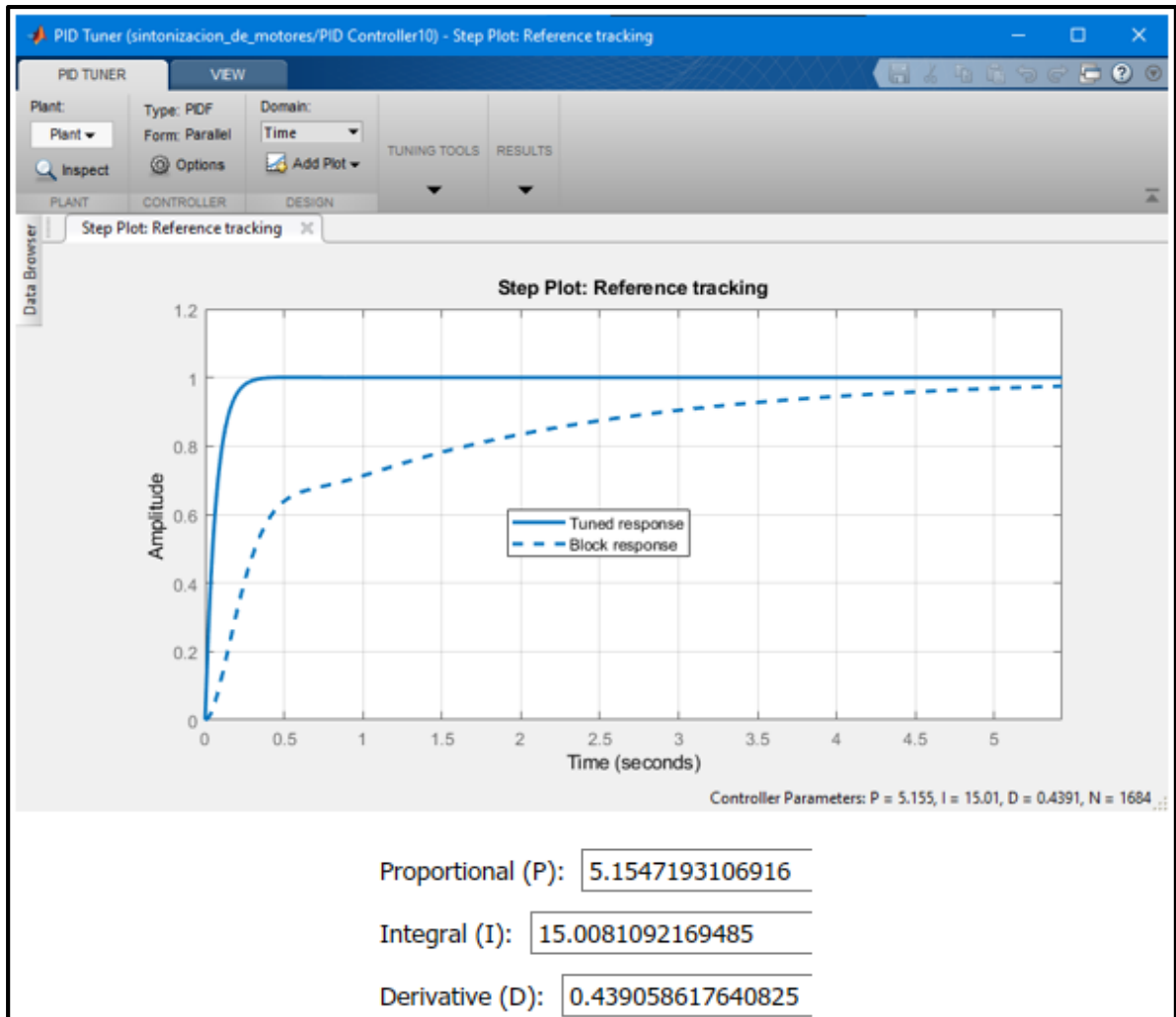
**Grafica 104.** Salida del controlador Tune más las constantes del controlador del motor 2-2

### Motor 3



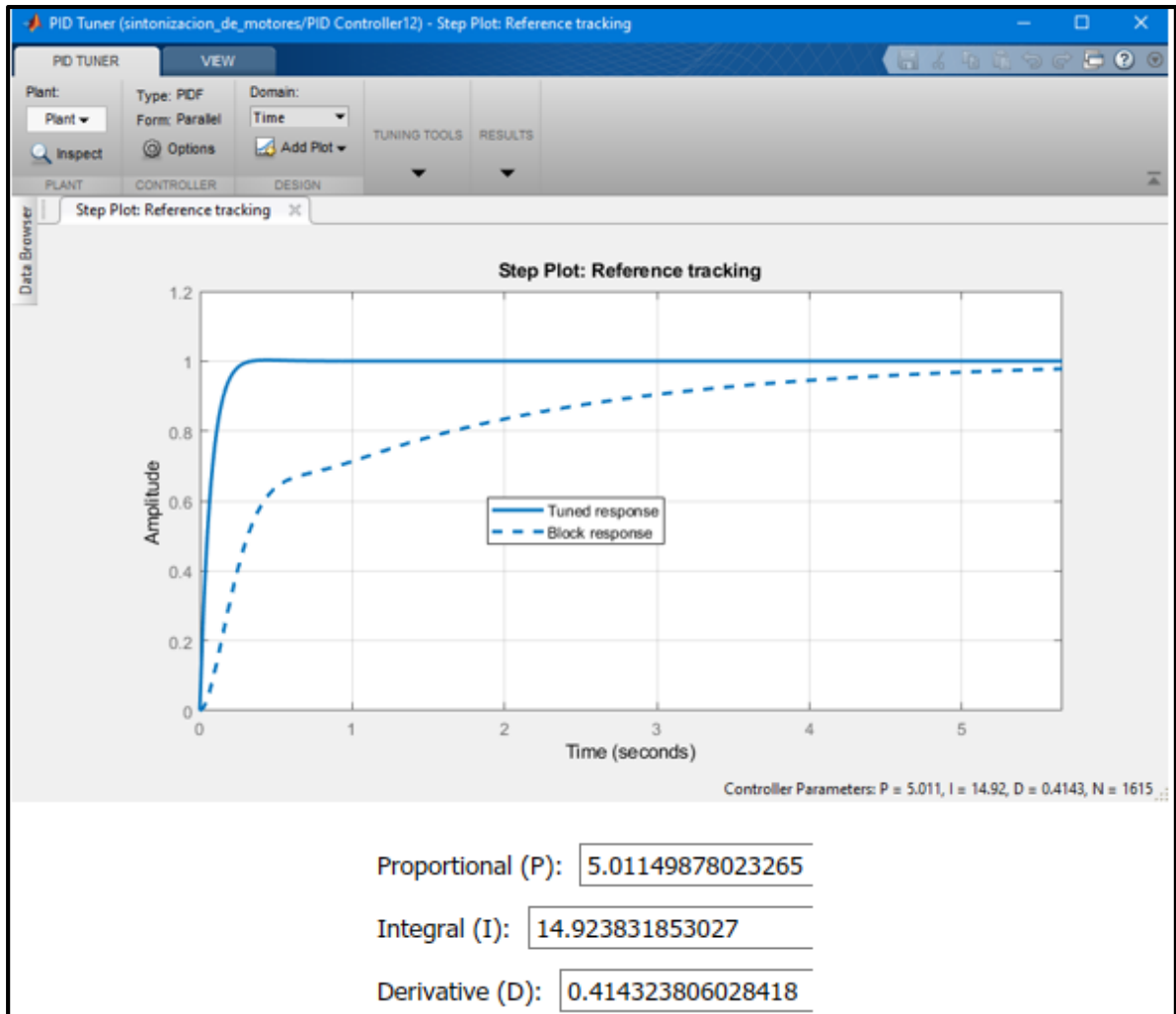
Grafica 105. Salida del controlador Tune más las constantes del controlador del motor 3

## Motor 4



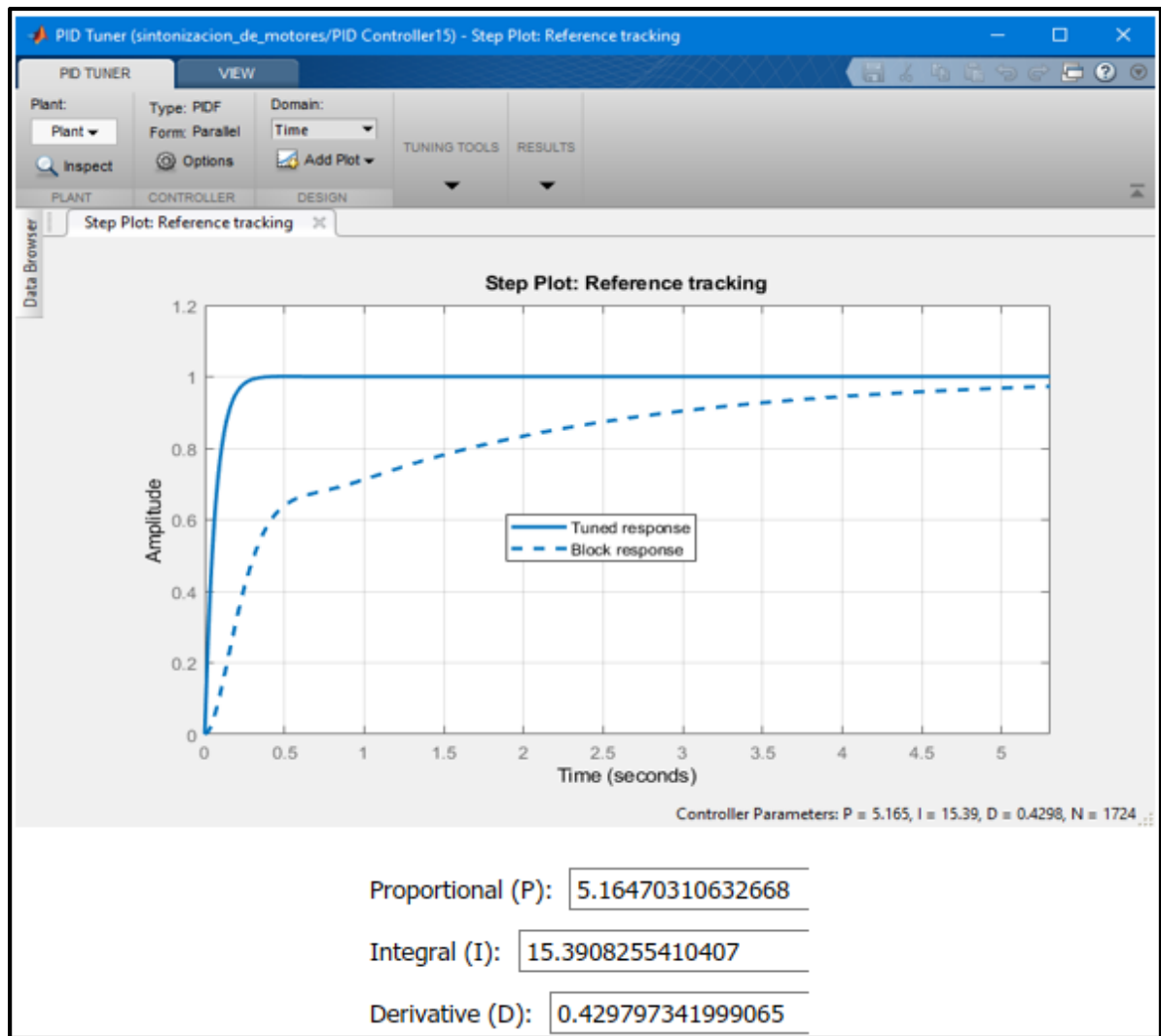
**Grafica 106.**Salida del controlador Tune más las constantes del controlador del motor 4

## Motor 5



**Grafica 107.** Salida del controlador Tune más las constantes del controlador del motor 5

## Motor 6



**Grafica 108.** Salida del controlador Tune más las constantes del controlador del motor 6

## 2. Método: Sintonización de controlador por el método síntesis de controlador

Para el cálculo del controlador de las plantas se utilizará este método que permite arrojar valores de acuerdo con el comportamiento que se requiera del sistema.

### Motor 1

$$C(s) = \frac{1}{0.03541s^2 + 0.3764s + 1}$$

$$C(s) = \frac{0.03541s^2 + 0.3764s + 1}{1} * \frac{1}{s}$$

$$C(s) = \frac{0.03541s^2 + 0.3764s + 1}{s}$$

$$C(s) = \frac{0.03541s^2}{s} + \frac{0.3764s}{s} + \frac{1}{s}$$

$$Kp = \frac{0.3764}{1}$$

$$Ki = \frac{1}{1}$$

$$Kd = \frac{0.03541}{1}$$

### Motor 2

$$C(s) = \frac{1}{0.04409s^2 + 0.4199s + 1}$$

$$C(s) = \frac{0.04409s^2 + 0.4199s + 1}{1} * \frac{1}{s}$$

$$C(s) = \frac{0.04409s^2 + 0.4199s + 1}{s}$$

$$C(s) = \frac{0.04409s^2}{s} + \frac{0.4199s}{s} + \frac{1}{s}$$

$$Kp = \frac{0.4199}{1}$$

$$Ki = \frac{1}{1}$$

$$Kd = \frac{0.04409}{1}$$

Motor 2-2

$$C(s) = \frac{1}{0.042s^2 + 0.4099s + 1}$$

$$C(s) = \frac{0.042s^2 + 0.4099s + 1}{1} * \frac{1}{s}$$

$$C(s) = \frac{0.042s^2 + 0.4099s + 1}{s}$$

$$C(s) = \frac{0.042s^2}{s} + \frac{0.4099s}{s} + \frac{1}{s}$$

$$Kp = \frac{0.4099}{1}$$

$$Ki = \frac{1}{1}$$

$$Kd = \frac{0.042}{1}$$

Motor 3

$$C(s) = \frac{1}{0.02502s^2 + 0.3163s + 1}$$

$$C(s) = \frac{0.02502s^2 + 0.3163s + 1}{1} * \frac{1}{s}$$

$$C(s) = \frac{0.02502s^2 + 0.3163s + 1}{s}$$

$$C(s) = \frac{0.02502s^2}{s} + \frac{0.3163s}{s} + \frac{1}{s}$$

$$Kp = \frac{0.3163}{1}$$

$$Ki = \frac{1}{1}$$

$$Kd = \frac{0.02502}{1}$$

Motor 4

$$C(s) = \frac{1}{0.03012s^2 + 0.3471s + 1}$$

$$C(s) = \frac{0.03012s^2 + 0.3471s + 1}{1} * \frac{1}{s}$$

$$C(s) = \frac{0.03012s^2 + 0.3471s + 1}{s}$$

$$C(s) = \frac{0.03012s^2}{s} + \frac{0.3471s}{s} + \frac{1}{s}$$

$$Kp = \frac{0.3471}{1}$$

$$Ki = \frac{1}{1}$$

$$Kd = \frac{0.03012}{1}$$

Motor 5

$$C(s) = \frac{1}{0.0299s^2 + 0.3461s + 1}$$



$$C(s) = \frac{0.0299s^2 + 0.3461s + 1}{1} * \frac{1}{s}$$

$$C(s) = \frac{0.0299s^2 + 0.3461s + 1}{s}$$

$$C(s) = \frac{0.0299s^2}{s} + \frac{0.3461s}{s} + \frac{1}{s}$$

$$Kp = \frac{0.3461}{1}$$

$$Ki = \frac{1}{1}$$

$$Kd = \frac{0.0299}{1}$$

Motor 6

$$C(s) = \frac{1}{0.0288s^2 + 0.3398s + 1}$$

$$C(s) = \frac{0.0288s^2 + 0.3398s + 1}{1} * \frac{1}{s}$$

$$C(s) = \frac{0.0288s^2 + 0.3398s + 1}{s}$$

$$C(s) = \frac{0.0288s^2}{s} + \frac{0.3398s}{s} + \frac{1}{s}$$

$$Kp = \frac{0.3398}{1}$$

$$Ki = \frac{1}{1}$$

$$Kd = \frac{0.0288}{1}$$

3. Método: Sintonización del controlador por el método Z&N para sistemas mayor a primer orden(Figura 358).

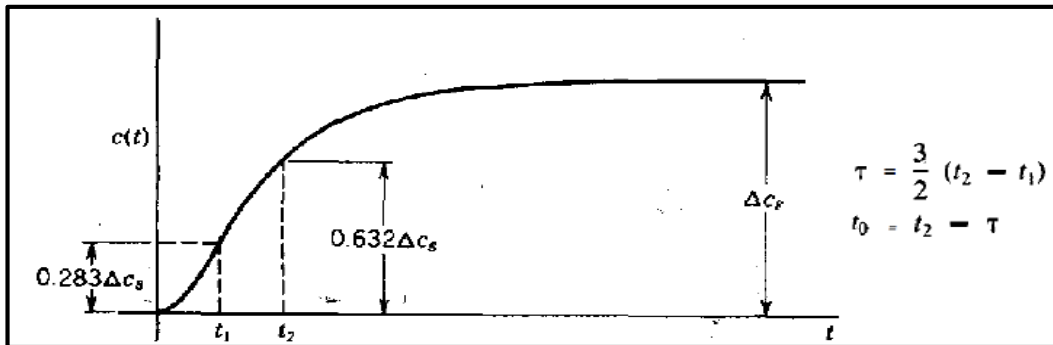


Figura 351. Z&N para sistemas mayor a primer orden.<sup>76</sup>

| Tipo de controlador              |     | Ganancia proporcional<br>$K_c$                       | Tiempo de integración<br>$\tau_i$ | Tiempo de derivación<br>$\tau_D$ |
|----------------------------------|-----|------------------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| Proporcional                     | P   | $\frac{1}{K} \left( \frac{t_0}{\tau} \right)^{-1}$   | —                                 | —                                |
| Proporcional-integral            | PI  | $\frac{0.9}{K} \left( \frac{t_0}{\tau} \right)^{-1}$ | $3.33 t_0$                        | —                                |
| Proporcional-integral-derivativo | PID | $\frac{1.2}{K} \left( \frac{t_0}{\tau} \right)^{-1}$ | $2.0 t_0$                         | $\frac{1}{2} t_0$                |

Figura 352. Fórmulas para el ajuste para respuesta de razón de asentamiento<sup>77</sup>

A continuación, se realizará la sintonización del controlador para el motor 1, en el cual se mostrará el desarrollo completo del cálculo de los parámetros para dicho controlador.

<sup>76</sup> Carlos Smith, Armando Corripio, libro "CONTROL AUTOMATICO DE PROCESOS TEORIA Y PRACTICA", primera edición 1991.

<sup>77</sup> Carlos Smith, Armando Corripio.

## Motor 1

Como primer paso se procede a realizar el diagrama de bloques (Figura 353) donde:

5. Step, con un setpoint de 512 (0°).
6. La función de transferencia que me representa la dinámica del motor 1.
7. Scope, medio por el cual se visualiza la salida de la función.
8. Simout, donde se recopila los datos de la dinámica con un muestreo de 0.01 y me los arroja en el workspace de matlab.

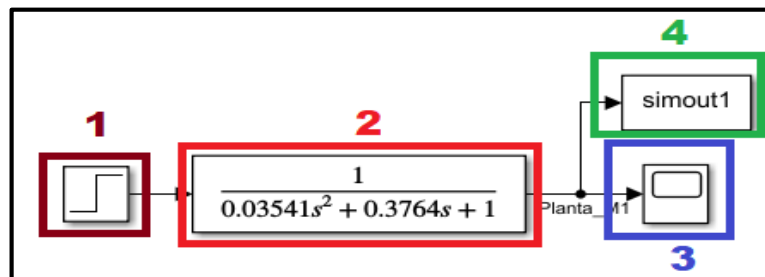


Figura 353. Diagramas de bloques para la sintonización del motor 1

Se identifican los puntos T1, T2, en este caso por criterio propio se va a calcular un tiempo muerto denominado  $T_m$ .

$$T1 = (512 * 0.283) = 144.896$$

$$T2 = (512 * 0.632) = 323.584$$

$$Tm = (512 * 0.03) = 15.36$$

Luego se busca los valores en la data recopilada en el simout 1

| Time   | Data:1   |
|--------|----------|
| 0.1978 | 144.8620 |
| 0.1978 | 144.8720 |
| 0.1978 | 144.8820 |
| 0.1978 | 144.8920 |
| 0.1978 | 144.9020 |
| 0.1978 | 144.9120 |

**Figura 354.Ubicación T1 en la data**

| Time   | Data:1   |
|--------|----------|
| 0.4038 | 323.5648 |
| 0.4038 | 323.5716 |
| 0.4038 | 323.5784 |
| 0.4038 | 323.5853 |
| 0.4038 | 323.5921 |
| 0.4038 | 323.5989 |

**Figura 355.Ubicación T2 en la data**

| Time   | Data:1  |
|--------|---------|
| 0.0503 | 15.3474 |
| 0.0503 | 15.3530 |
| 0.0503 | 15.3586 |
| 0.0504 | 15.3641 |
| 0.0504 | 15.3697 |
| 0.0504 | 15.3753 |

**Figura 356.Ubicación Tm en la data**

Una vez obtenidos los valores de las constantes, se procede a calcular el  $\tau$  y tiempo muerto del sistema.

$$\tau = \frac{3}{2}(T2 - T1) = 0.309$$

$$T_o = T2 - \tau + Tm = 0.144$$

Luego se calcula el valor de las constantes del controlador  $K_c$ ,  $T_i$ ,  $T_d$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  según la tabla de Z&N como se observa.

$$K_c = \frac{1.2}{k} \left( \frac{T_o}{\tau} \right)^{-1} = 2.1458$$

$$T_i = 2 * T_o = 0.288$$

$$T_d = \frac{1}{2} * T_o = 0.072$$

$$K_i = \frac{K_c}{T_i} = 7.4506$$

$$K_d = K_c * T_d = 0.1545$$

Se procede a mostrar los resultados de las diferentes sintonizaciones de los motores, aplicando el método 3 anteriormente explicado.

#### Motor 2

$$Kc = 2.65$$

$$Ki = 8.5044$$

$$Kd = 0.2064$$

#### Motor 2\_2

$$Kc = 2.6365$$

$$Ki = 8.6047$$

$$Kd = 0.2019$$

#### Motor 3

$$Kc = 2.4055$$

$$Ki = 9.2804$$

$$Kd = 0.1558$$

#### Motor 4

$$Kc = 2.4890$$

$$Ki = 9.0574$$

$$Kd = 0.1709$$

#### Motor 5

$$Kc = 2.4650$$

$$Ki = 8.9117$$

$$Kd = 0.1704$$

#### Motor 6

$$Kc = 2.4726$$

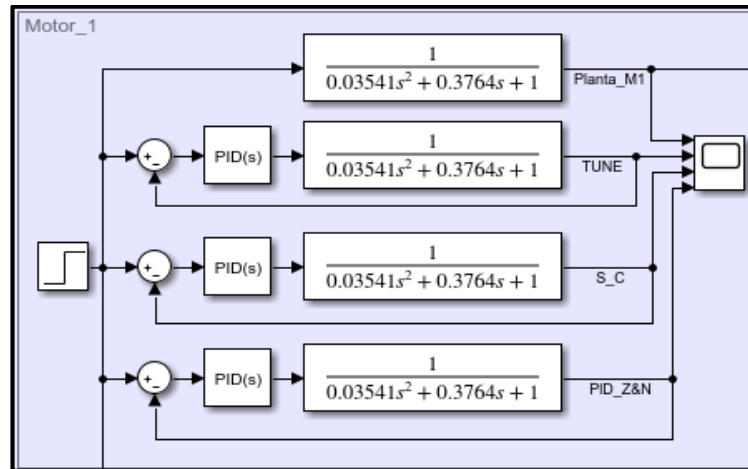
$$Ki = 9.1307$$

$$Kd = 0.1673$$

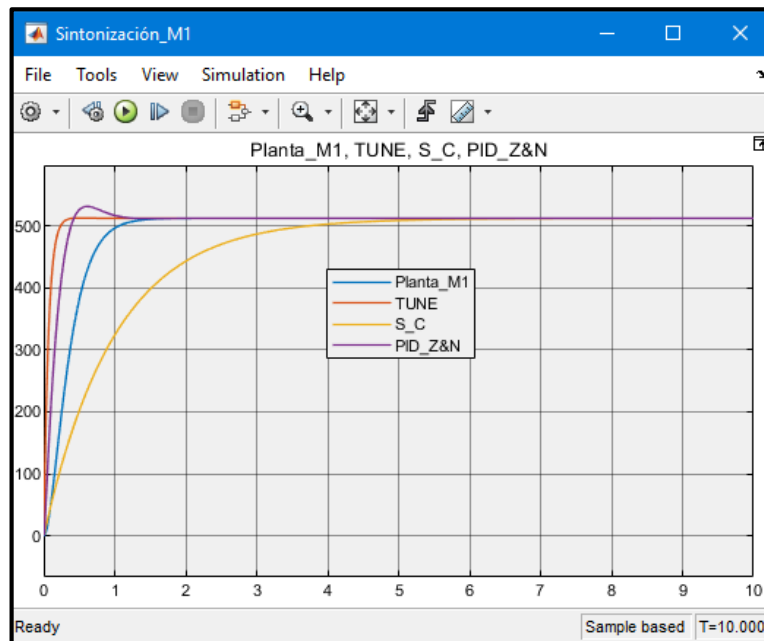
Una vez terminado los métodos de sintonización para los motores del manipulador, se procede a realizar la respectiva comparativa de los métodos hallados para evaluar cuál es la mejor opción de control para cada motor.

### 8.6.6.1 Aplicación de los métodos de sintonización manipulador

#### Motor 1



**Figura 357.** Digrama de bloques métodos de sintonización motor 1



**Grafica 109.** Salida de los métodos de sintonización motor 1

## Motor 2

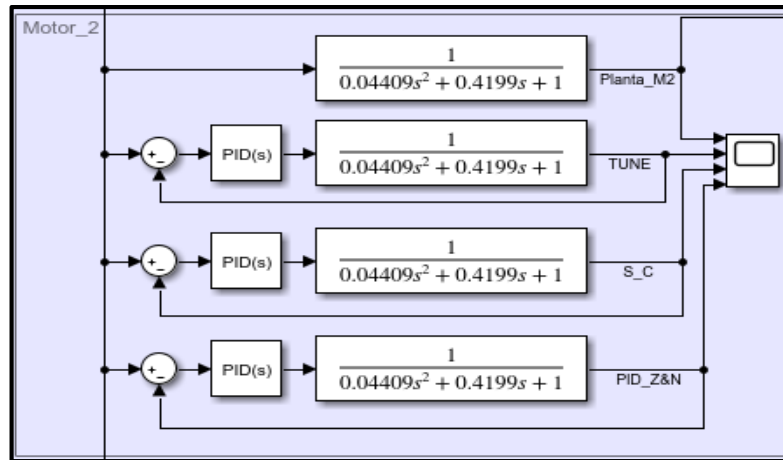
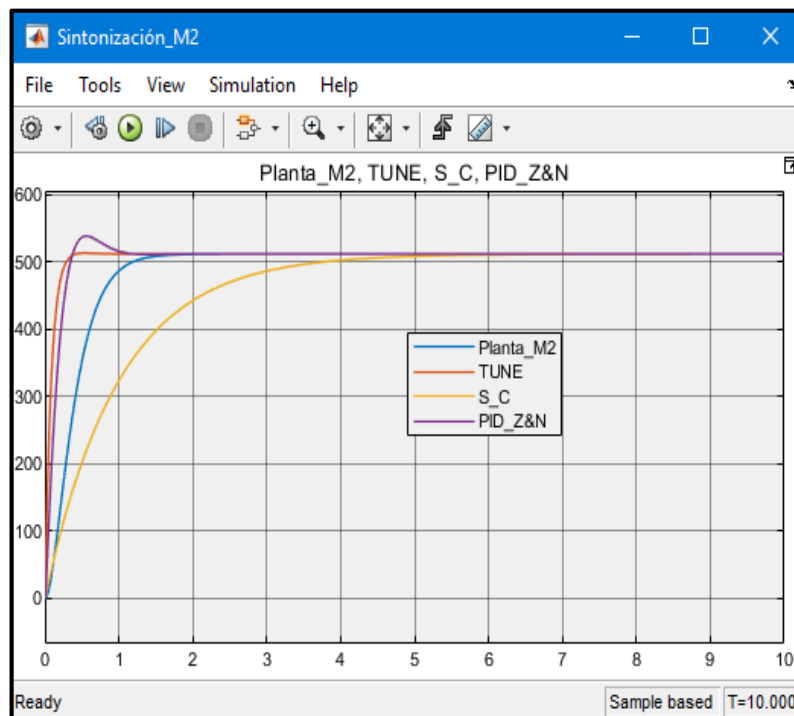


Figura 358. Digrama de bloques métodos de sintonización motor 2



Grafica 110. Salida de los métodos de sintonización motor 2

## Motor 2-2

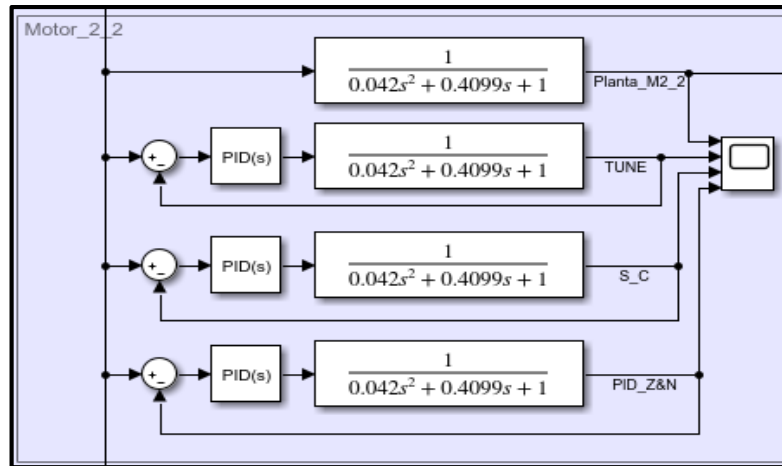
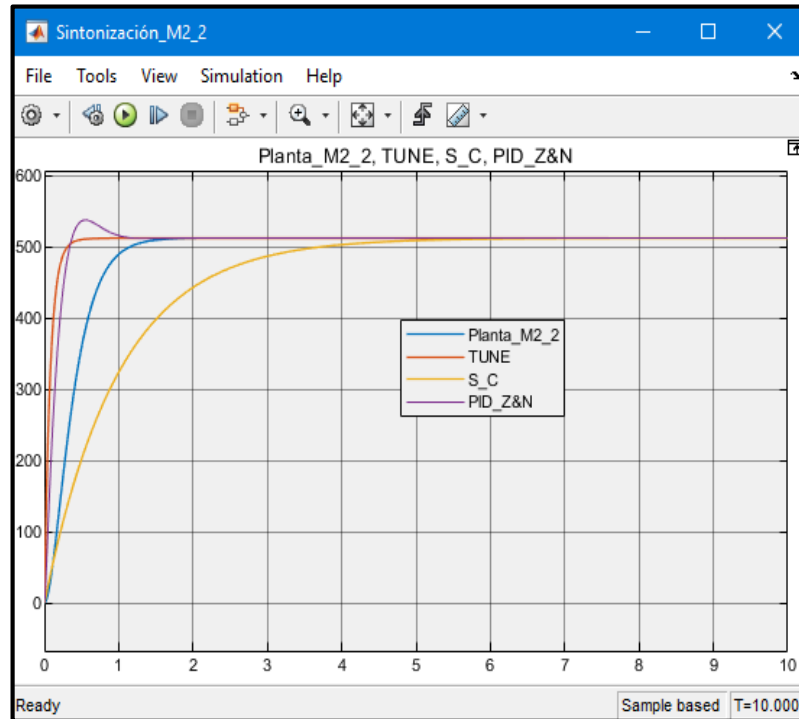
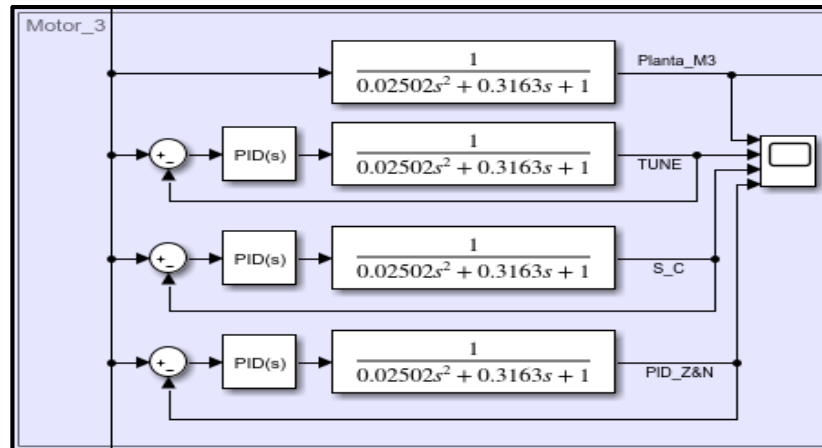


Figura 359. Digrama de bloques métodos de sintonización motor 2-2

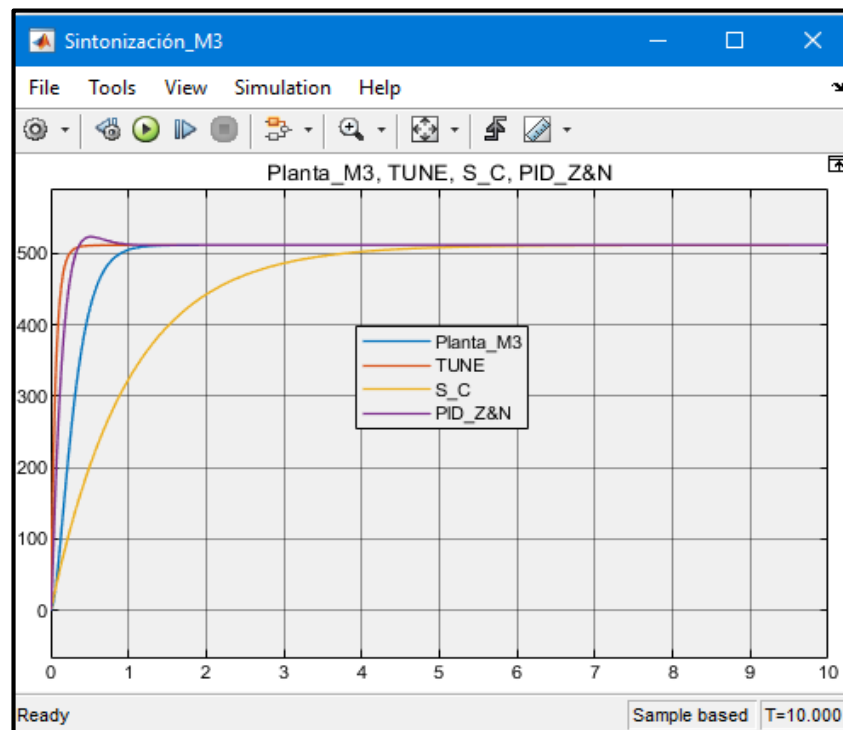


Grafica 111. Salida de los métodos de sintonización motor 2-2

### Motor 3



**Figura 360.** Digrama de bloques métodos de sintonización motor 3



**Grafica 112.** Salida de los métodos de sintonización motor 3

## Motor 4

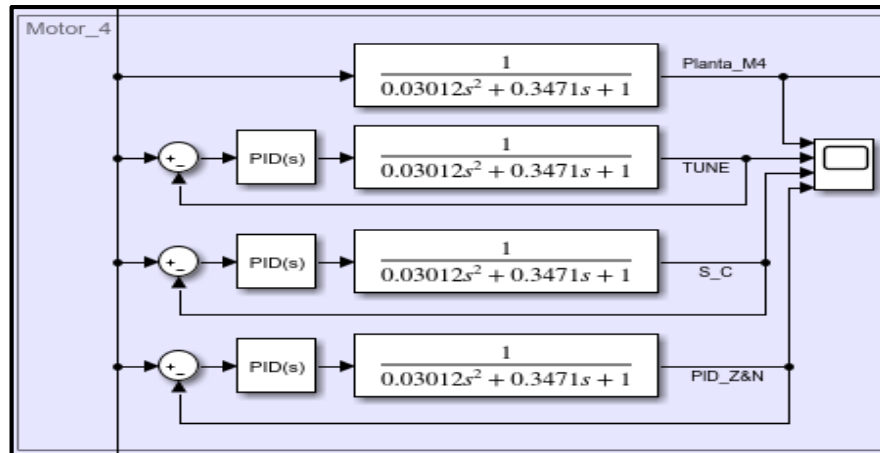
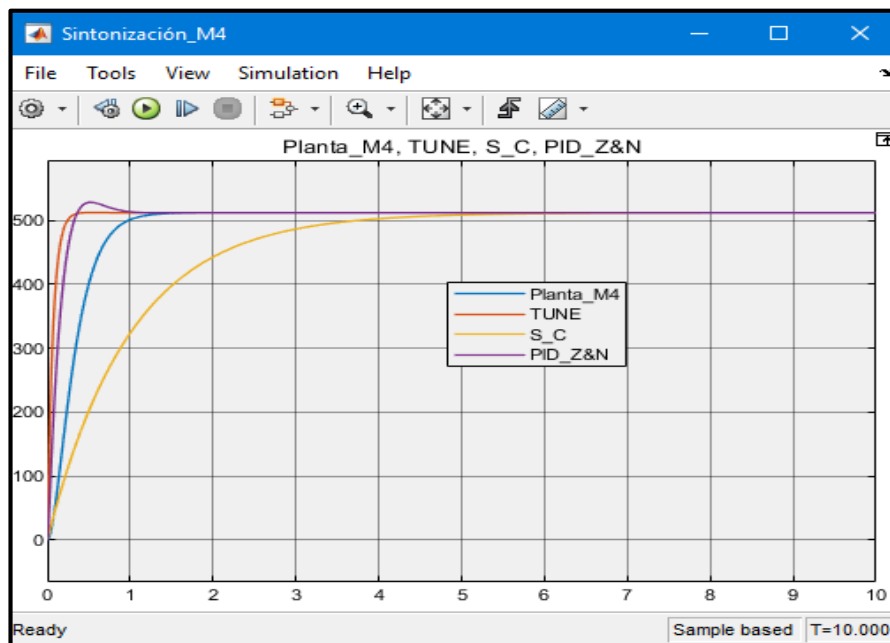


Figura 361. Digrama de bloques métodos de sintonización motor 4



Grafica 113. Salida de los métodos de sintonización motor 4

## Motor 5

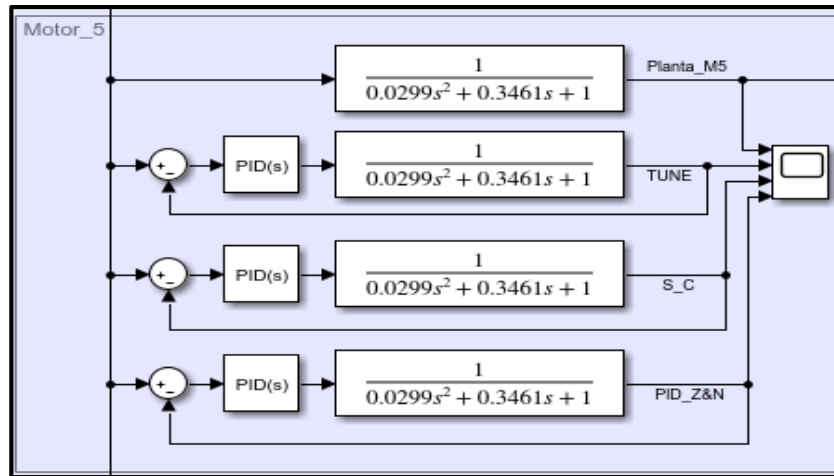
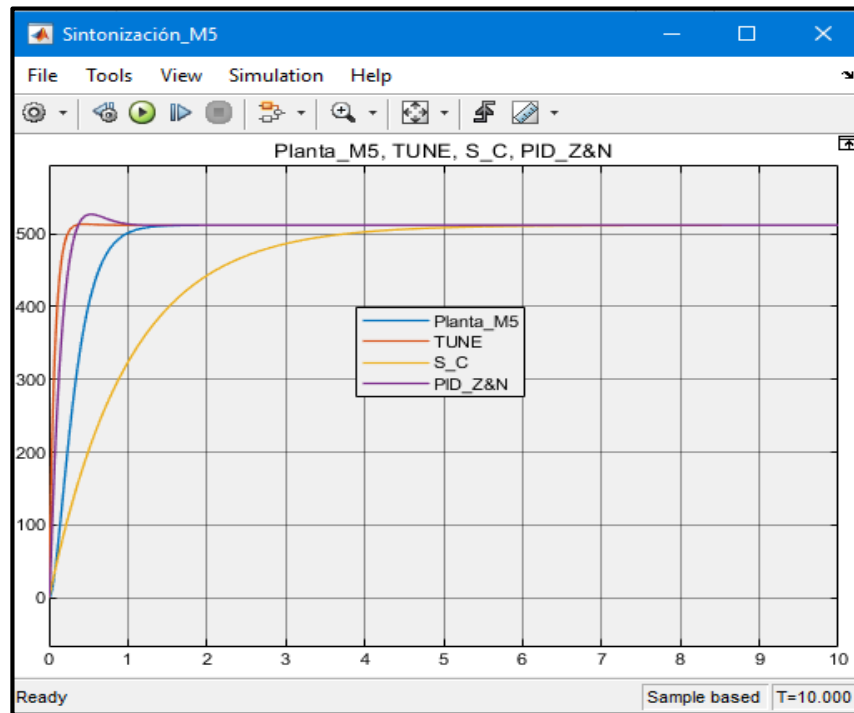


Figura 362. Digrama de bloques métodos de sintonización motor 5



Grafica 114. Salida de los métodos de sintonización motor 5

## Motor 6

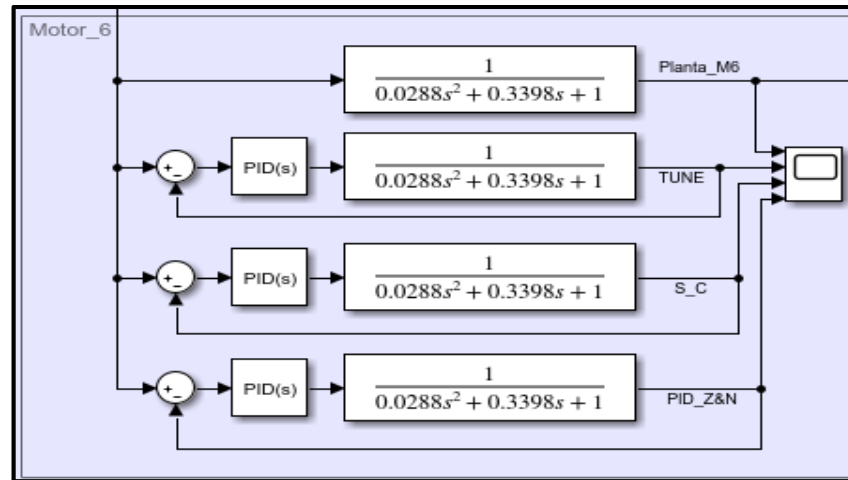
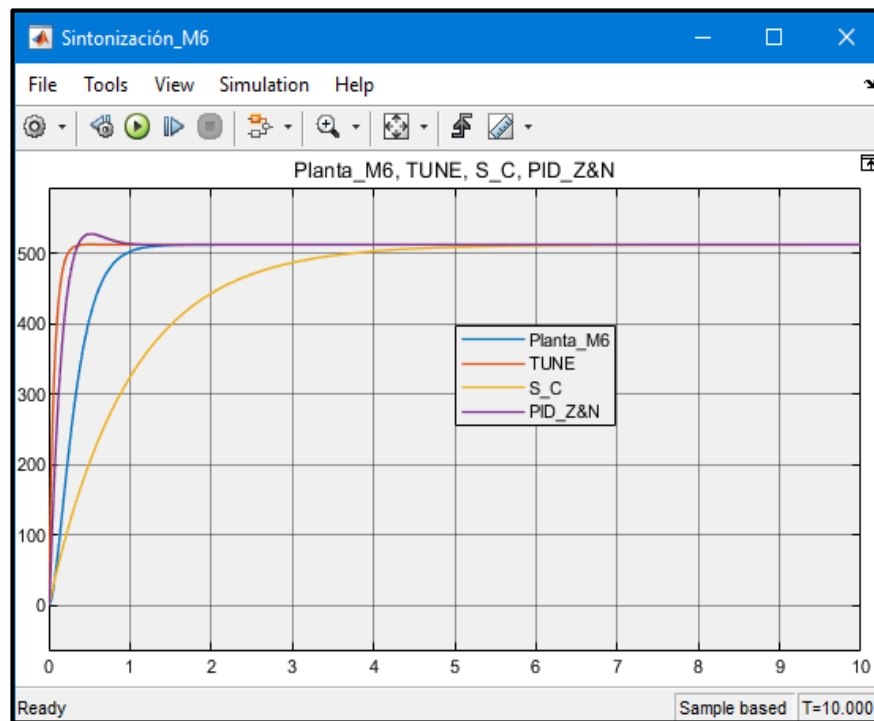


Figura 363. Digrama de bloques métodos de sintonización motor 6



Grafica 115. Salida de los métodos de sintonización motor 6

### 8.6.7 Validación del control dinámico (mono-articular) con el método seleccionado (tune de matlab)

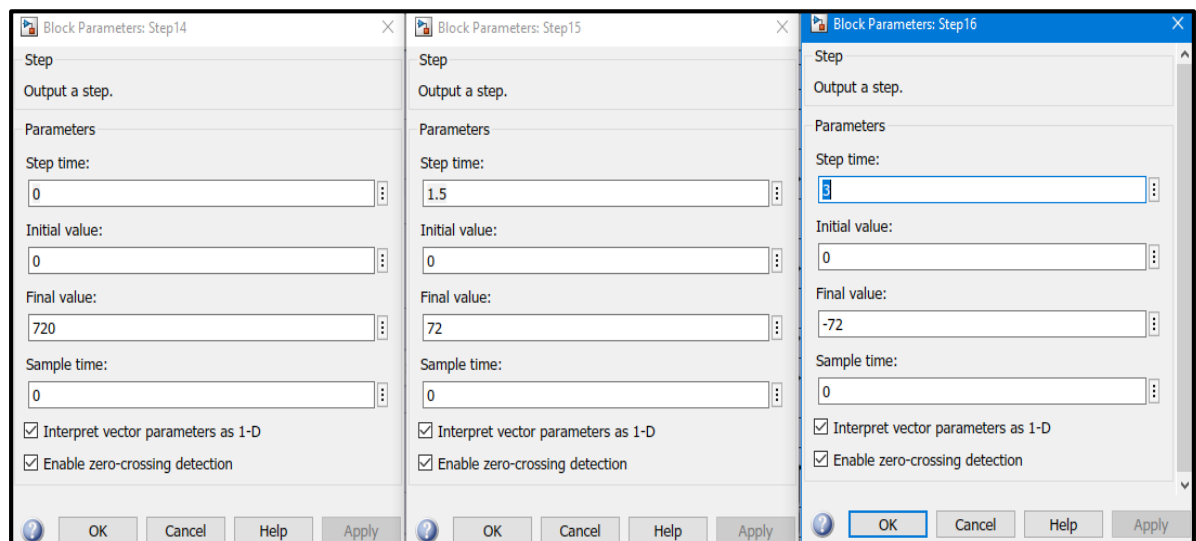
Para realizar la validación del método se usarán 2 pruebas Donde:

- la primera, aplicando perturbaciones al controlador seleccionado para observar la respuesta del sistema mediante simulink.
- la segunda se realizó directamente en los manipuladores, realizando una oposición leve(objeto) al movimiento y observando el cumplimiento del Angulo previsto, haciendo uso del mismo experimento con la data con la cual se muestreo.

#### 8.6.7.1 Validación del control dinámico del manipulador

**Método 1:** Validación del sistema aplicando perturbación, usando Simulink Matlab

Donde se aplica un setpoint de 720 y una perturbación del 10% positivo y negativo(Figura 364).



**Figura 364. Setpoints de validación del manipulador 1**

Para ello se organiza de este modo como se observa en la Figura 365, para hacer la realización de la validación de manera simultánea donde se analizará el comportamiento del controlador de cada una de la planta.

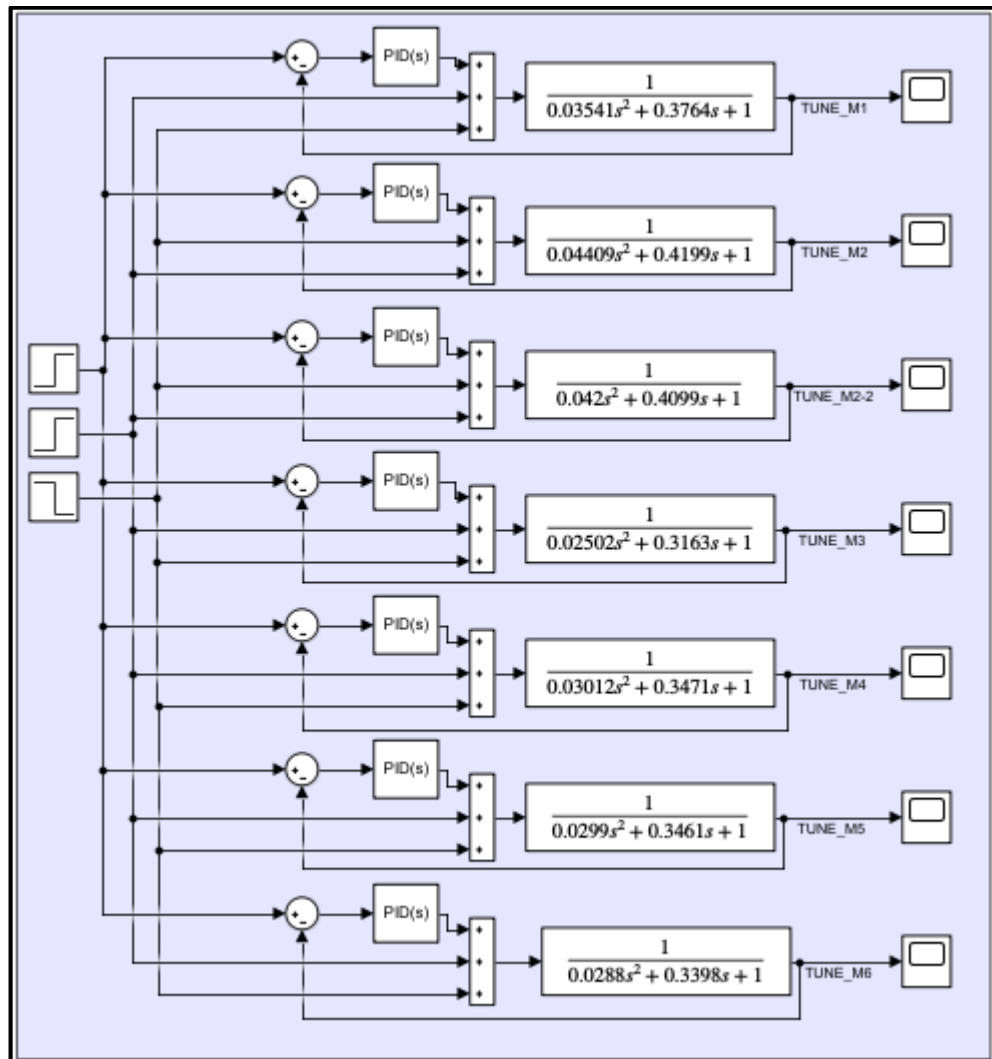
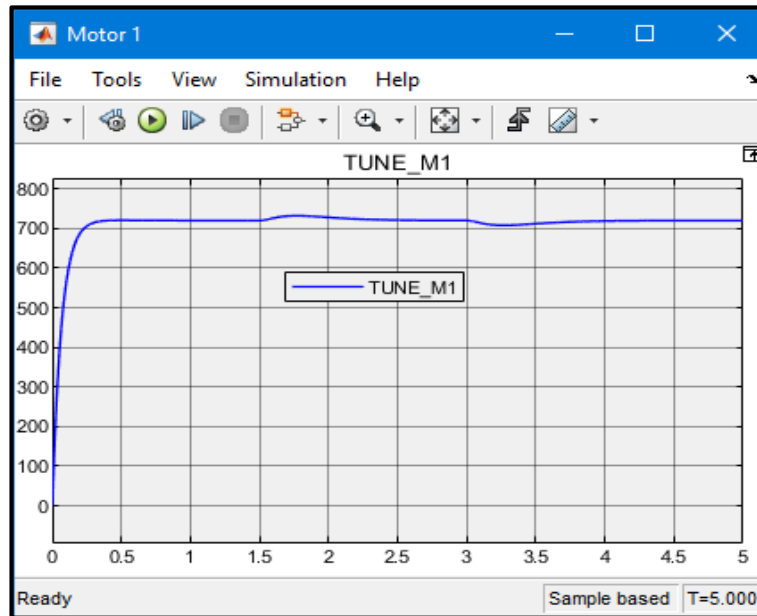


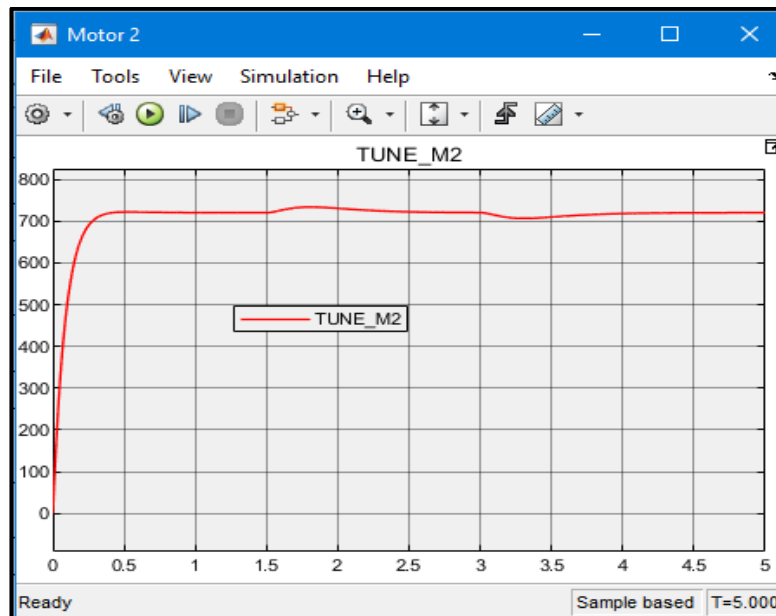
Figura 365. Diagrama de bloques de las plantas que componen el manipulador

## Motor 1



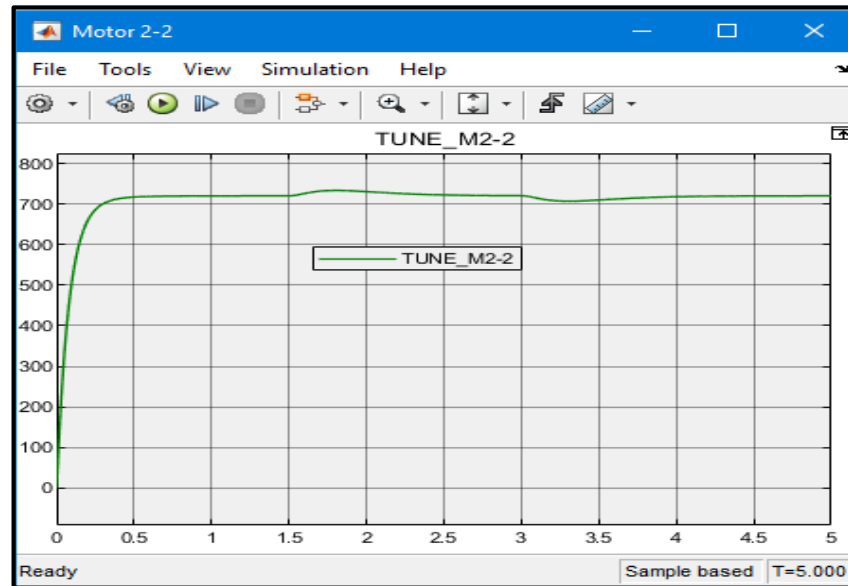
**Grafica 116. Salida de control del motor 1 ante perturbaciones**

## Motor 2



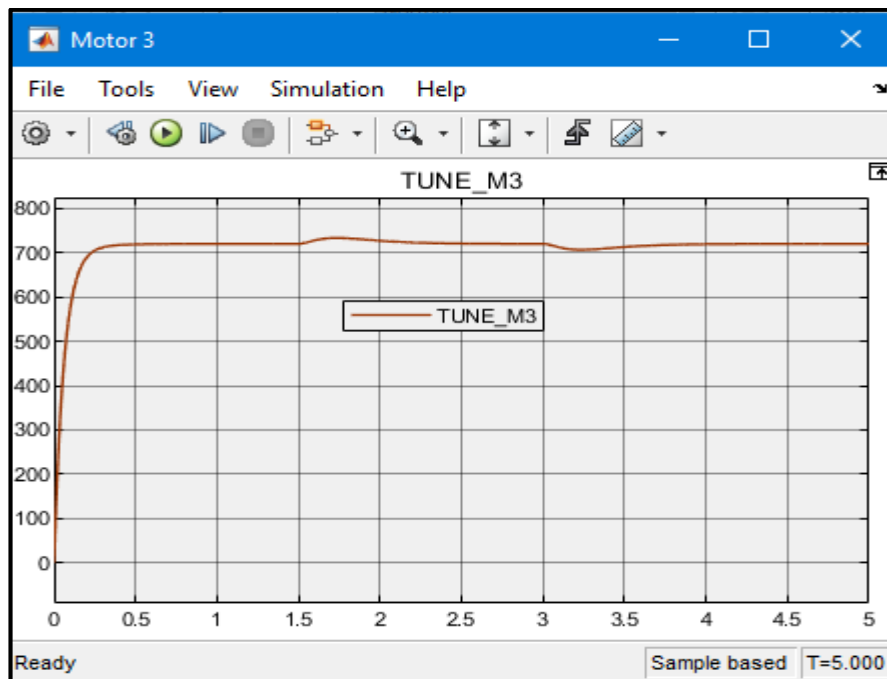
**Grafica 117. Salida de control del motor 2 ante perturbaciones**

## Motor 2-2



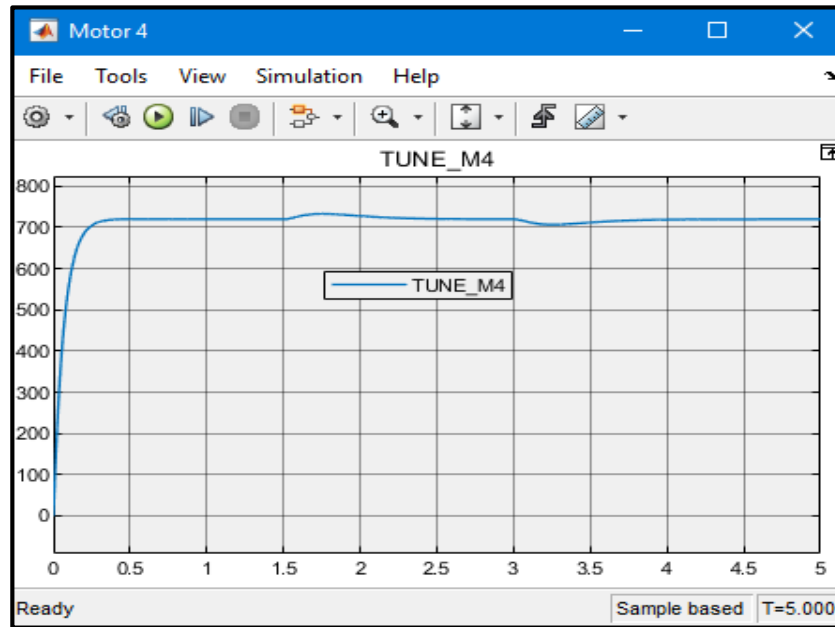
**Grafica 118.**Salida de control del motor 2-2 ante perturbaciones

## Motor 3



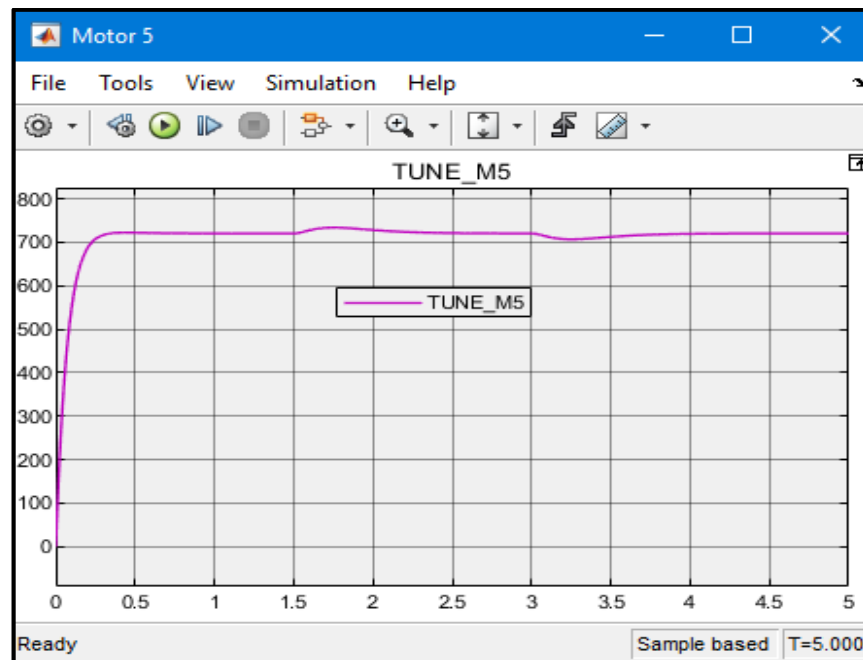
**Grafica 119.**Salida de control del motor 3 ante perturbaciones

## Motor 4



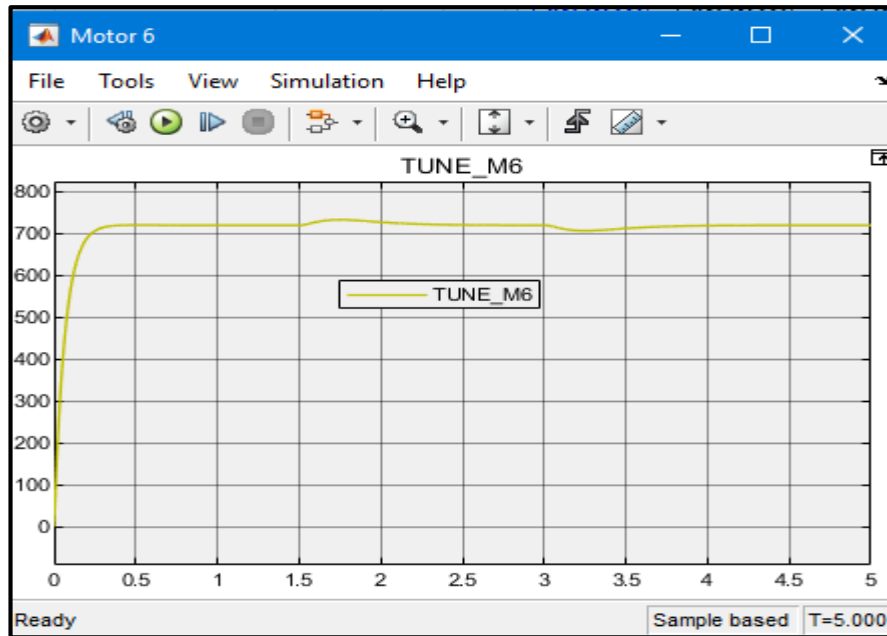
**Grafica 120.** Salida de control del motor 4 ante perturbaciones

## Motor 5



**Grafica 121.** Salida de control del motor 5 ante perturbaciones

## Motor 6



**Grafica 122.** Salida de control del motor 6 ante perturbaciones

Luego de analizar cada una de las gráficas anteriores se observa la buena respuesta del controlador hallado, donde se llegó a notar buen comportamiento en el sistema de control de cada uno de nuestros motores donde el OverShoot en cada uno de ellos es de menos de 4.4% ante la entrada de perturbación en el sistema.

## Método 2: Validación del sistema real en el motor ante perturbaciones

Para esta validación se hicieron los cambios internos de las constantes de cada motor, ya que para poder realizar el control se debían cambiar las constantes de cada uno de estos donde por defecto de fábrica vienen como se muestra en la Figura 366. Donde muestra un controlador tipo PD donde se cambiara por un PDI, resultados obtenidos unas vez sintonizados.

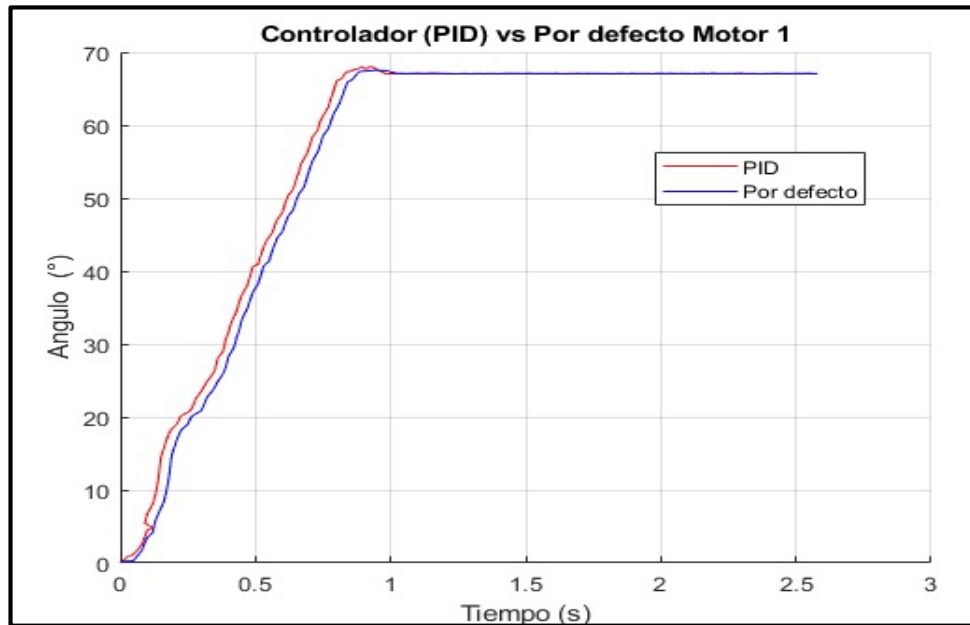
Position\_Kp: 3840  
 Position\_Kd: 2048  
 Position\_Ki: 0

**Figura 366. Constantes por defecto de fabrica de los motores**

| Nombre    | Constantes de control                                                 |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------|
| Motor 1   | Kp= 5.66199805874289<br>Ki= 15.2707686627769<br>Kd= 0.522909113356064 |
| Motor 2   | Kp= 5.00376931466041<br>Ki= 12.2630257835582<br>Kd= 0.502669243970574 |
| Motor 2-2 | Kp= 5.0595152810142<br>Ki= 12.1866149000673<br>Kd= 0.522405461829407  |
| Motor 3   | Kp= 5.05751856792709<br>Ki= 15.7804984890982<br>Kd= 0.403113238419473 |
| Motor 4   | Kp= 5.1547193106916<br>Ki= 15.0081092169485<br>Kd= 0.439058617640825  |
| Motor 5   | Kp= 5.01149878023265<br>Ki= 14.923831853027<br>Kd= 0.414323806028418  |
| Motor 6   | Kp= 5.16470310632668<br>Ki= 15.3908255410407<br>Kd= 0.429797341999065 |

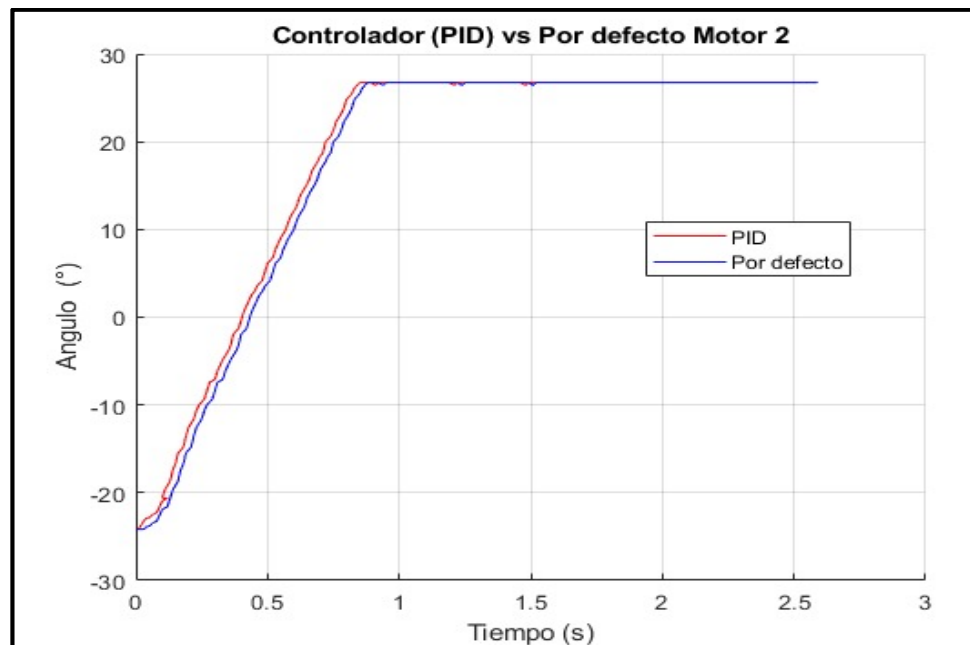
**Tabla 13. Cambio de constantes de los motores del manipulador**

## Motor 1



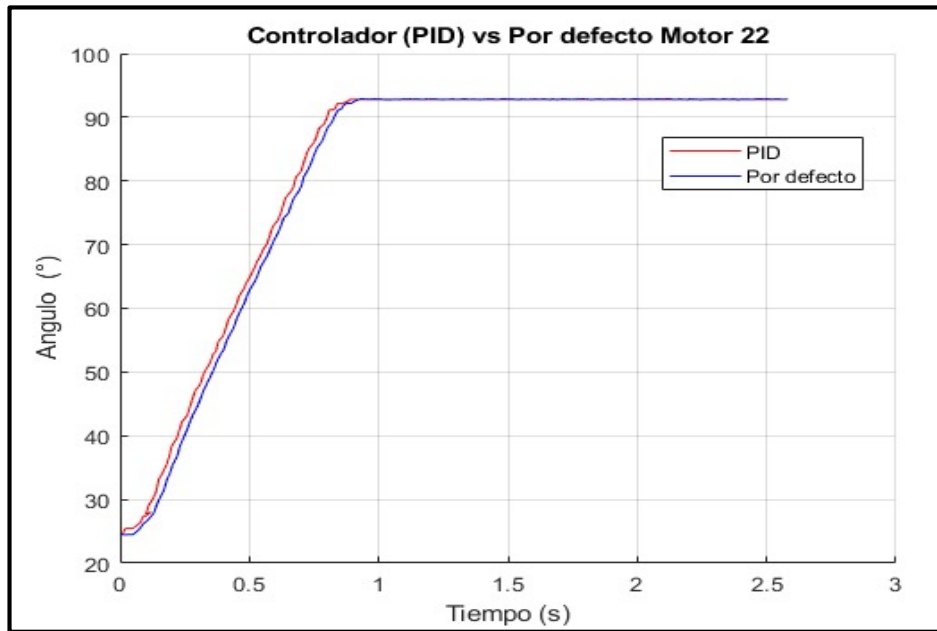
Grafica 123. Salida de control real del motor 1 ante perturbaciones (PID vs por defecto)

## Motor 2



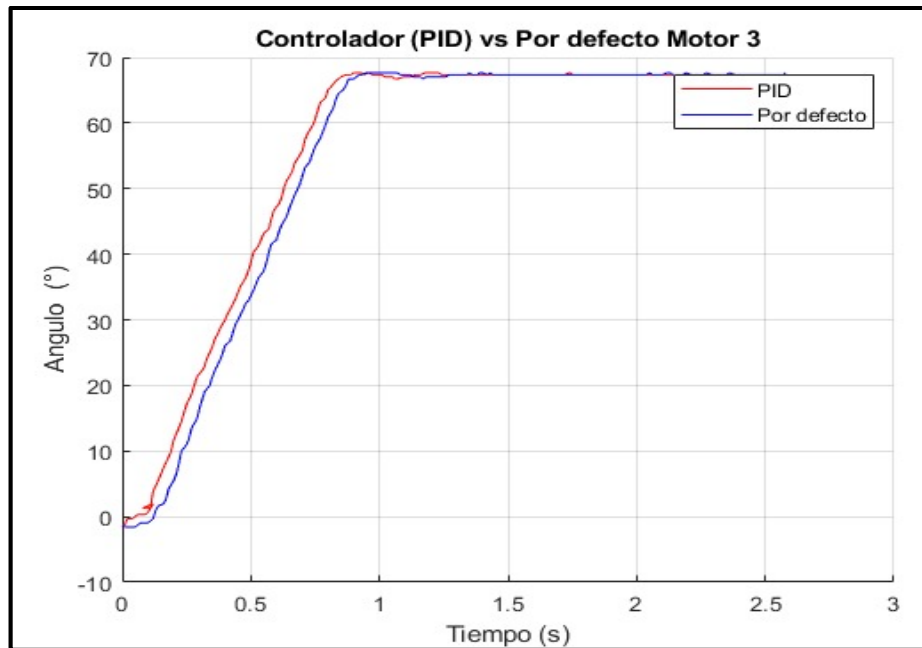
Grafica 124. Salida de control real del motor 2 ante perturbaciones (PID vs por defecto)

## Motor 2-2



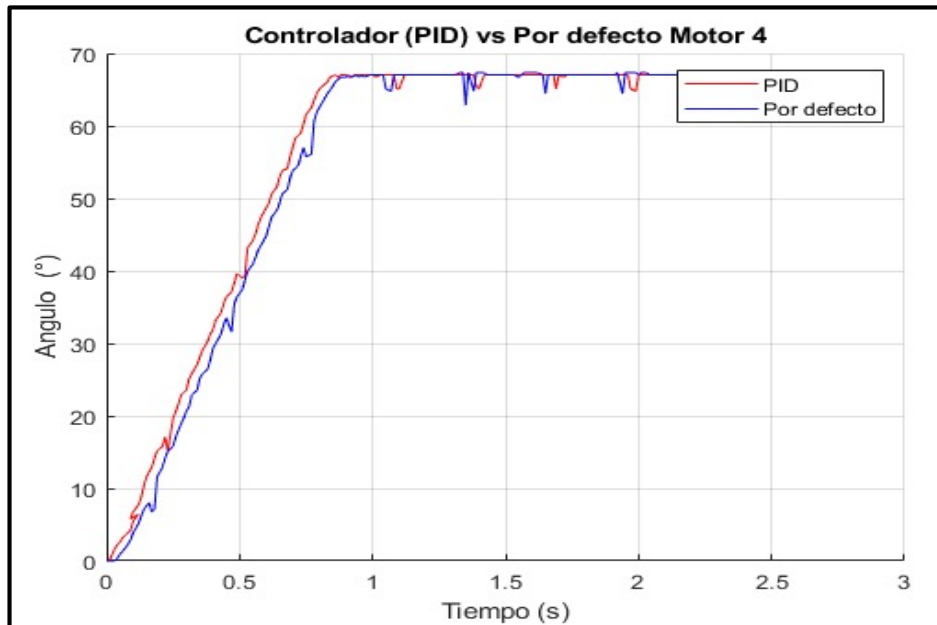
Grafica 125. Salida de control real del motor 2-2 ante perturbaciones (PID vs por defecto)

## Motor 3



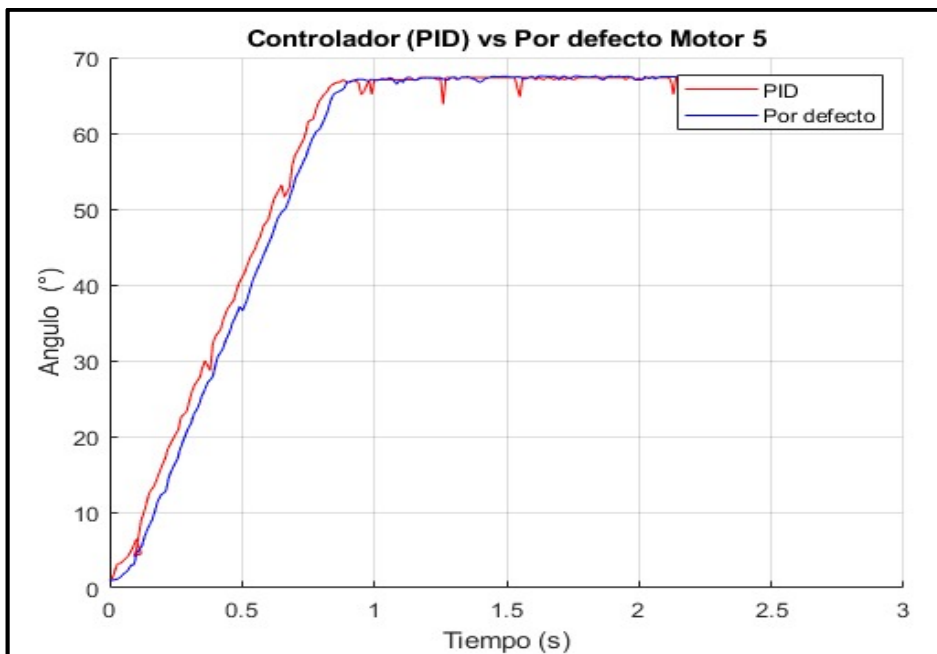
Grafica 126. Salida de control real del motor 3 ante perturbaciones (PID vs por defecto)

## Motor 4



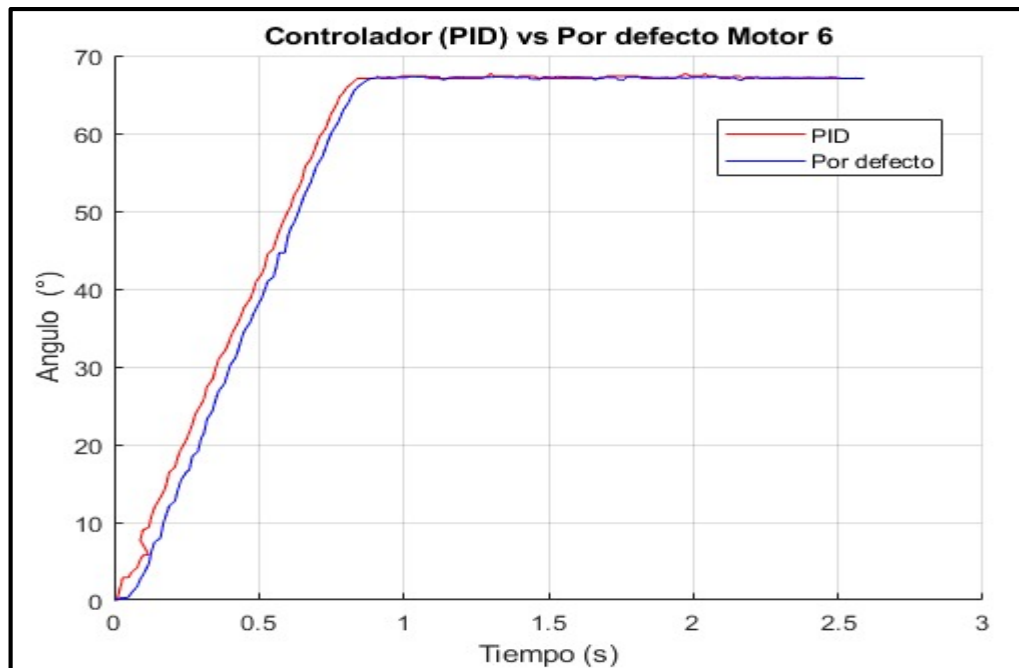
Grafica 127. Salida de control real del motor 4 ante perturbaciones (PID vs por defecto)

## Motor 5



Grafica 128. Salida de control real del motor 5 ante perturbaciones (PID vs por defecto)

## Motor 6



**Grafica 129.** Salida de control real del motor 6 ante perturbaciones (PID vs por defecto)

Luego de analizar cada una de las gráficas reales de los motores, se observa la buena respuesta del controlador (PID) hallado, llegándose a notar la diferencia en la comparativa del antes y después de las constantes cambiadas de control en cada uno, donde se obtuvo un buen comportamiento en el sistema de control de cada uno de nuestros motores donde el OverShoot en cada uno de ellos es de menos de 2%, al igual en la etapa de respuesta transitoria siéndola más rápida.

## 9 CONCLUSIONES

- Para la selección de las morfologías se obtuvo que la morfología cartesiana y scara pese que poseen mayor simpleza de cálculo, están mejor preparadas para sistemas con cambios de posición (como las CNC), pero no funcionan para cuando se trata de los cambios de orientación.
- La elección de la morfología articular, fue debido a que se puede obtener gran versatilidad en el espacio cartesiano dándole un mejor movimiento y un excelente manejo del espacio ya que era primordial debido a su área de trabajo, en tanto a la orientación y la posición del efector final, al igual se pudo comprobar por medio de la cinemática inversa, que para algunas localizaciones existen posibles soluciones, eso debido a la alta libertad de grados que posee el manipulador.
- Otro factor de importancia en la selección de la morfología y diseño, es ahora de sus respectivos cálculos (cinemática directa e inversa), es el caso donde se pueden presentar sobre dimensiones (diseño de las distancias morfológicas) en ellos y puedan que los manipuladores experimenten lo de exceder la distancia entre ellos y terminen colisionando entre ellos mismo o soltando la pieza, lo cual puede ser crucial en aplicaciones de un mayor nivel.
- Para la ejecución de las trayectorias colaborativas fue de gran importancia la relación matricial que existe tanto en los manipuladores como en la pieza a transportar, debido a que a su sistema de coordenadas permite relacionar los diferentes elementos mencionados bajo un mismo sistema de coordenadas y referencia, lo cual nos permite integrar en sí mismo sistemas dentro de otro sistema completamente independientes con el fin de elaborar tareas colaborativas.
- Para el desarrollo de la robótica colaborativa se requirió de gran ajuste y precisión en los actuadores, debido que se deben sincronizar ambos manipuladores tanto el maestro como el esclavo, para que sigan la trayectoria colaborativa mientras sujetan y transportan la pieza, donde una mala precisión de la localización (instalación) de ambos manipuladores puede ocasionar bien problemas de que uno fuerce al otro o ir en un sentido contrario que no es el que intenta realizar, produciendo errores en la trayectoria colaborativa y mecánicamente desgastes en los actuadores.

- Para la ejecución de la simultaneidad de los manipuladores, fue de gran importancia conocer la velocidad de transmisión de datos que me reciben los actuadores, donde el envío de la información juega un factor muy importante al momento de garantizar la ejecución del control cinemático y dinámico, siendo de las trayectorias colaborativas en un tiempo real, porque al ocurrir un desfase temporal en el envío de datos a los actuadores puede ocasionar daños como una mala ejecución en la terminación de la trayectoria y así mismo desgaste en los actuadores involucrados.
- El desarrollo de la interfaz gráfica, se diseñó como la herramienta con la que el usuario final y no el desarrollador se va a entender y enfrentar en el momento de la realización de los diferentes modos de pruebas en el banco de robótica colaborativa, por eso fue de gran importancia que una persona que no intervino en su creación pueda entender su funcionamiento. Debido a esto la aplicación se desarrolló de la manera más intuitiva posible, donde se separó por modos y preguntando datos que son relevantes en la tarea a realizar en el manejo de la aplicación.
- Dentro de la arquitectura del código (**Figura 86**) que permite la ejecución de los innumerables cálculos matemáticos recurrentes tales como las cinemáticas directas e inversas, así como la generación y planificación de trayectorias y la robótica colaborativa, se encuentra una parte muy importante en el desarrollo de las trayectorias continuas que establecen los tiempos en los que el efector final debe cumplir cada uno de los sub-puntos en el plano cartesiano, de ello depende la simetría y el cumplimiento generalizado de la trayectoria. El responsable directo del cumplimiento de estos tiempos es el controlador interno de cada servo de ahí la importancia fundamental del controlador PID de cada servomotor propuesto en este caso de estudio.
- Como se puede observar en la **Grafica 37**, la estructura de control constituida en un control realimentado (diferentes métodos), cumple con el set point deseado, cumpliendo con los márgenes de respuesta transitoria y estable, claro está, que los controladores realimentados por los métodos (Tune y Síntesis directa), presenta el mismo comportamiento en la etapa transitoria de la trayectoria más sin embargo uno más rápido que el otro, caso contrario con el método Z&N que presenta un sobre impulso alrededor del 4% pero cumple con el objetivo de converge ante la trayectoria deseada.

- Luego de analizar las gráficas **Grafica 66-Grafica 67-Grafica 68-Grafica 69-Grafica 70-Grafica 71-Grafica 72**, En la cual muestra las dos salidas de mi sistema ante las mismas condiciones iniciales para cada caso, las dos presentan parcialmente el mismo tiempo de estabilización, pero la gran diferencia la marca el controlador PID hallado ya que me presenta sobre impulso inferior al 2 % y presenta un error inferior al 0.5% en estado estable después de haber ocurrido la estabilización de mi sistema. Claro está, que, al proporcionarle al controlador por defecto la constante  $k_i$  vemos como la componente integral influye en estado transitorio, ya que es bastante abrupta con esta componente, eso me lleva a concluir que la componente integral es poco útil para hacer estrategia de control mono-articular, ya que me afecta el comportamiento transitorio del lazo volviéndolo un control un poco brusco para el sistema.

## 10 RECOMENDACIONES

- En el proceso de desarrollo del código en lo que respecta a la formación de las cadenas de los ángulos para la ejecución de la trayectoria colaborativa es fundamental tener una metodología clara que permita obtener tiempos entre deltas rotacionales con fundamento teórico, esto teniendo en cuenta los parámetros del fabricante de dichos servos y evitando así una trayectoria colaborativa poco armoniosa.
- El caso de estudio comprende manipuladores de 6 GDL, lo que implica una selección de morfología adecuada que se ajuste no solo a la tarea a ejecutar, sino que sea coherente con los parámetros físicos de los servos utilizados. En este caso se recomienda hacer un re-diseño a la morfología que implique sustancialmente menos masa en cada uno de los eslabones y evitar holguras en los puntos de mayor presión y esfuerzo.

## 11 BIBLIOGRAFÍA

Kadir Alpaslan Demir, Gözde Döven, Bülent Sezen. "Industry 5.0 and Human-Robot Co-working". Innovation and Entrepreneurship (WOCTINE). 2019, 689 p.

Servicio Nacional de Aprendizaje. Sena. Disponible en: < <https://www.sena.edu.co/es-co/sena/Paginas/quienesSomos.aspx> >

Zakharyan Elizabet, "Desarrollo de aplicaciones Mediante robots colaborativos basadas en interfaces naturales hombre-máquina", 2017-18, p.19. Disponible en: <[https://m.riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/109336/X5012166Y\\_TFG\\_15363159340895530604594386092865.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://m.riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/109336/X5012166Y_TFG_15363159340895530604594386092865.pdf?sequence=1&isAllowed=y)>

Tuuli Turja et al., "Robot acceptance model for care (RAM-care): A principled approach to the intention to use care robots", Information & Management, 2019, 103220, Disponible en: <<https://doi.org/10.1016/j.im.2019.103220>>

Barrientos, Antonio. Fundamentos de robótica. Madrid-España, McGRAW-HILL/INTERAMERICANA DE ESPAÑA, 2007

Blog, "Características Morfológicas". Disponible en: <[http://www.wassig.fib.upc.es/~rob/protegut/treballs/Q2\\_03-04/general/carmorf.htm](http://www.wassig.fib.upc.es/~rob/protegut/treballs/Q2_03-04/general/carmorf.htm)>

Blog, "Robotica", 2017, Disponible en : <<https://itziassite.wordpress.com/grados-de-libertad/>>

Chedmail, P., and Ramstein, E. (1996) Robot mechanism synthesis and genetic algorithms. En Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol. 4, pp. 3466-3471.

Otoniel Igno-Rosario et al., "Interactive system for painting artworks by regions using a robot", Robotics and Autonomous Systems, 121 (2019), 103263<<https://doi.org/10.1016/j.robot.2019.103263>>.

Huseyin Celikag, Neil D. Sims, y Erdem Ozturk, "Cartesian stiffness optimization for serial arm robots", Procedia CIRP, 77. Hpc (2018), 566-69<<https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.222>>



Pablo Jesus Padilla,” Diseño e implementación de un prototipo de robótica colaborativa de ensamble de producto”,2013. Disponible en:<  
<http://blogdetareasdepablo.blogspot.com/2014/01/historia-de-los-robots-estructura.html>>

Mg. Samuel Oporto Díaz ,”Introducción a la Robótica y Inteligencia Artificial”,2010.Disponible en: <<https://es.slideshare.net/mgarofalo85/robotica-2865379>>

Dan-El Neil Vila Rosado, “El arte de diseñar robots manipuladores”, 2015.Disponible en: <[https://www.researchgate.net/publication/308556685\\_El\\_arte\\_de\\_disenar\\_robots\\_manipuladores](https://www.researchgate.net/publication/308556685_El_arte_de_disenar_robots_manipuladores)>

Fidel Pérez Menéndez, “Desarrollo de sistema de control para un manipulador de seis grados de libertad”, 2014,p.22.Disponible en: <<https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/29532/TFMFidelPerezMenendezProteg.pdf?sequence=3&isAllowed=y>>

Suárez, Ayala, and Suárez., “PROPUESTA DE UNA METODOLÓGICA FORMAL PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE CONTROL CINEMÁTICO Y DINÁMICO EN MANIPULADORES INDUSTRIALES SERIALES PROPOSAL.”

Ken Goldberg, “Robots and the return to collaborative intelligence”, Nature Machine Intelligence, 1.1 (2019), 2–4< <https://doi.org/10.1038/s42256-018-0008-x>>.

Ximena Vargas ,”Que es robótica colaborativa”,2013.Disponible en: <<http://computo-y-mas.blogspot.com/2013/01/que-es-robotica-colaborativa.html>>

Jacob Pascual Pape,” Los robots colaborativos una nueva era en la automatización industrial”,2014.Disponible en: <[www.pharmatech.es/descargar\\_documento/opinion\\_2.pdf](http://www.pharmatech.es/descargar_documento/opinion_2.pdf)>

Miime crunch,” Tipos de energía y su aplicación para el desarrollo de nuevas tecnologías como el robótico y la cibernética”, 2014.Disponible en:< <http://0january.blogspot.com.co/>>

Mathieu Belanger barette, “What Does collaborative robot mean”,2015.Disponible en: <<http://blog.robotiq.com/what-does-collaborative-robot-mean>>



SC-CER96940



*“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”*

Universidad de Pamplona  
Pamplona - Norte de Santander - Colombia  
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750



Fanuc, "Datasheet CR-35iA.pdf", 2015. Disponible en:  
<<http://www.fanuc.eu/~media/files/pdf/products/>>

Amazings y NCYT, 2015. Disponible en:  
<<http://noticiasdelaciencia.com/not/13212/universal-robots-lanza-el-nuevo-ur3-el-robot-colaborativo-de-sobremesa-mas-flexible-y-ligero-de-la-industria/>>

Cristian Rodriguez, Universidad libre, "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT CARTESIANO CON UN CONTROL DE POSICIÓN PUNTO A PUNTO", Disponible en:<  
<https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle> >

Robot cilíndrico y sus características, Disponible en:  
<<https://es.lambdageeks.com/cylindricalrobots/#:~:text=Ventajas%20del%20robot%20cil%C3%ADndrico,movimientos%20son%20paralelos%20entre%20s%C3%AD>>

Universidad de Málaga. Robot esférico. Disponible en:<  
<http://umapatent.uma.es/es/patent/robot-esferico724/>>

Diseño y Elementos de máquinas, Disponible en:  
<https://machinelements.wordpress.com/2017/03/12/robot-scaral/>

Estructura de un Robot Industrial, Disponible en: <  
<https://www.cecyl3.ipn.mx/estudiantes/plan%20continuidad/Archivo%20comprimido2/morfologia%20de%20un%20robot.pdf>>

IDA-LOUISE G. BORLAUG, KRISTIN Y. PETTERSEN, Jan Tommy Gravdahl, "Combined kinematic and dynamic control of vehicle-manipulator systems", Mechatronics, Volume 69, 2020, 1 p.<<https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2020.102380>>

ZHIHAO Xu, SHUAI Li, XUEFENG Zhou, WU Yan, TAOBO Cheng, DAN Huang, "Dynamic neural networks based kinematic control for redundant manipulators with model uncertainties", Neurocomputing, vol 329, 2019, Pages 255-266.  
<<https://doi.org/10.1016/j.neucom.2018.11.001>>.

SHUAI Li, SANFENG Chen, Bo Liu, YANGMING Li, YONGSHENG Liang, "Decentralized kinematic control of a class of collaborative redundant manipulators via recurrent neural networks", Neurocomputing, vol 91, 2012, 1-10 p.<  
<https://doi.org/10.1016/j.neucom.2012.01.034>>.



*"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"*

Universidad de Pamplona  
Pamplona - Norte de Santander - Colombia  
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750

osé Luis Ramírez Arias and Astrid Rubiano Fonseca,” Modelamiento Matemático de la cinemática directa e inversa de un robot Manipulador de tres grados de libertad”, Disponible en: < <https://revistas.ucc.edu.co/index.php/in/article/view/47/48>.>

Planificación de trayectorias, Disponible en: < <https://nbio.umh.es/files/2012/04/practica5.pdf>>

TG THURUTHEL, E. Falotico, F. Renda y C. Laschi, "Aprendizaje por refuerzo basado en modelos para el control dinámico de bucle cerrado de manipuladores robóticos blandos", en IEEE Transactions on Robotics, 2019, 1 p.

MEILING WANG, Minzhou Luo, Tao Li, Marco Ceccarelli, "A Unified Dynamic Control Method for a Redundant Dual Arm Robot", Journal of Bionic Engineering. 2015, Vol 12.< [https://doi.org/10.1016/S1672-6529\(14\)60128-1](https://doi.org/10.1016/S1672-6529(14)60128-1)>.

A. BALESTRINO, G. De Maria, L. Sciavicco, "Robust Control of Robotic Manipulators", IFAC Proceedings Volumes, vol 17, Issue 2, 1984, p 2435-2440.< [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)61347-8](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)61347-8)>.

PEREZ MENDEZ, Fidel. "Desarrollo de un sistema de control dinámico para un manipulador de seis grados de libertad". Universidad de Oviedo. España. 2014., 60 p.

Pablo Costas Franco, UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID, "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MANIPULADOR ROBÓTICO DE BAJO COSTE", Madrid, septiembre 2017, Disponible en: < [https://oa.upm.es/48175/1/TFG\\_PABLO\\_COSTAS\\_FRANCO.pdf](https://oa.upm.es/48175/1/TFG_PABLO_COSTAS_FRANCO.pdf)>

Trabajo Fin De Grado, "Control Dinámico Multiarticular Con Optimización Aplicado Al Robot TIAGo," 2019.

ESTREMERA, J. GARCIA, E. GONZALEZ DE SANTOS, P. "A Multi-Modal and Collaborative Human-Machine Interface for a Walking Robot". Journal of Intelligent and Robotic Systems. JOUR. 2002.

JUSSI Suomela, AARNE Halme, "Cognitive Human Machine Interface of Workpartner Robot", IFAC Proceedings Volumes, Volume 34, Issue 19, 51-56 p.< [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)33112-9](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)33112-9)>.

Prof. TRYGVE THOMESSEN, MSc TOMASZ KOSICKI, "Multimodal human-machine interface for remote operation of robot systems", IFAC Proceedings Volumes. vol 45, Issue 22, 2012, p 811-815.

< <https://doi.org/10.3182/20120905-3-HR-2030.00138>.>.

Baofu Fang et al., "Collaborative task assignment of interconnected, affective robots towards autonomous healthcare assistant", Future Generation Computer Systems, 92 (2019), 241–51 <<https://doi.org/10.1016/j.future.2018.09.069>>.

Alessio Levratti et al., "TIREBOT: A collaborative robot for the tire workshop", Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 57.December 2018 (2019), 129–37,<<https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.11.001>>.

Juan P. Vasconez, George A. Kantor, y Fernando A. Auat Cheein, "Human–robot interaction in agriculture: A survey and current challenges", Biosystems Engineering, 179 (2019), 35–48 <<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.12.005>>

Otto Görnemann," Seguridad de los Robots Colaborativos", 2017.Disponible en: <[https://www.osalan.euskadi.eus/contenidos/informacion/ponencias\\_jt170720\\_cursoverano/es\\_def/adjuntos/ponencia\\_jt170720\\_otto\\_goernemann.pdf](https://www.osalan.euskadi.eus/contenidos/informacion/ponencias_jt170720_cursoverano/es_def/adjuntos/ponencia_jt170720_otto_goernemann.pdf)>

Miguel Mariscal Saldaña," Normativa de Robots Colaborativos y su influencia en la Prevención de Riesgos Laborales", 2019.Disponible en: <<https://www.prevencionintegral.com/canal-orp/papers/orp-2019/normativa-robots-colaborativos-cobots-su-influencia-en-prevencion-riesgos-laborales>>