



Integración de un robot de arquitectura paralela tipo delta a un sistema de producción virtualizado

Integration of a Delta Robot of Parallel Architecture Type with a Virtualized Production System

CARLOS FRANCISCO PINTO ZÁRATE

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Bogotá, Colombia
2023

Integración de un robot de arquitectura paralela tipo delta a un sistema de producción virtualizado

Carlos Francisco Pinto Zárate

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Automatización Industrial

Director:
Pedro Fabián Cárdenas Herrera Ing. Ms. Dr.

Codirector:
Victor Hugo Grisales Palacio Ing. Ph.D.

Línea de Investigación:
Automatización, control y mecatrónica

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Bogotá, Colombia
2023

Integración de un robot de arquitectura paralela tipo delta a un sistema de producción virtualizado.

CARLOS FRANCISCO PINTO ZÁRATE

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Universidad Nacional de Colombia

Resumen

El propósito de este trabajo final de maestría es diseñar, desarrollar, construir e integrar un prototipo de robot de arquitectura paralela tipo delta con un modelo de fábrica virtual de *pick and place* haciendo uso de un gemelo digital y funcionalidades ciberfísicas; el enfoque planteado contempla el desarrollo e implementación de una arquitectura de *hardware* y de *software* que comprenda los diferentes elementos mecatrónicos involucrados en un robot delta para una aplicación industrial, partiendo de trabajos desarrollados previamente por estudiantes de la Universidad Nacional de Colombia.

Para esto, se inicia con el desarrollo de un gemelo digital que permita comprobar movimientos, posibles colisiones y el espacio de trabajo del robot. Posteriormente, se procede a construir un prototipo de robot delta, se realizan rutinas de control y se implementan los modelos matemáticos de cinemática directa y cinemática inversa dentro del controlador físico del robot. Por último, haciendo uso de funcionalidades ciberfísicas, se integra el prototipo de robot delta construido, con un modelo de fábrica virtual de *pick and place*.

En este documento se presentan las bases matemáticas para poder desarrollar un robot delta de tres grados de libertad haciendo uso de tres actuadores rotacionales, las cuales son válidas para cualquier tamaño de robot, requiriendo la modificación de cuatro valores dimensionales; para su aplicación, demostración y entendimiento, se presenta paso a paso el desarrollo del robot, se realizan ejemplos prácticos de cinemática directa e inversa de manera numérica y gráfica. Para concluir, se describen los resultados obtenidos y las recomendaciones para realizar una aplicación de *pick and place*, integrando el prototipo de robot delta construido con un modelo de fábrica virtual haciendo uso de funcionalidades ciberfísicas.

Palabras clave: (Robot delta, robot paralelo, cinemática directa, cinemática inversa, sistemas ciberfísicos, virtualización).

Integration of a Delta Robot of Parallel Architecture Type with a Virtualized Production System.

CARLOS FRANCISCO PINTO ZÁRATE

Department of Electrical and Electronic Engineering
Universidad Nacional de Colombia

Abstract

This master's degree final project aims to design, develop, build and integrate a prototype of a robot of delta type parallel architecture with a virtual "pick and place" factory model by using a digital twin and cyber-physical functionalities. The proposed approach involves developing and implementing a hardware and software architecture that comprises the different mechatronic elements involved in a delta robot for industrial applications based on previous projects developed by students at the Universidad Nacional de Colombia.

The initial part is the development of a digital twin that allows to test feasible movements, possible collisions and the robot workspace. Next, it is the construction of a delta robot prototype, the execution of control routines as well as the implementation of forward and inverse mathematical models of Kinematics into the physical controller of the robot. At last, the integration of the delta robot prototype and the virtual "pick and place" factory model is achieved by applying cyber-physical functionalities.

This paper involves the mathematical concepts required to develop a 3 degree of Freedom Delta Robot using three rotary actuators which are valid for any size of robot by the modification of 4 dimensional values. To fully explain, demonstrate and prove their application, the robot development is explained step by step with practical examples of forward and inverse kinematics along with numeric and graphic representations.

To conclude, the achieved results and the recommendations to carry out a pick and place application integrating the built delta robot prototype with a virtual factory model by using cyber-physical functionalities are fully described.

Keywords: (Delta robot, parallel robot, forward kinematics, reverse kinematics, cyberphysical systems, virtualization)

Contenido

Resumen	IV
Abstract	v
Lista de figuras	x
Lista de tablas	xiv
1. Introducción	1
1.1. Marco teórico	1
1.1.1. Evolución industrial nacional e internacional	1
1.1.2. Robótica industrial	3
1.1.3. Robot paralelo o de cinemática paralela	4
1.1.4. Antecedentes históricos	5
1.1.5. Tipos de robots paralelos y sus aplicaciones	9
1.1.6. Mejoras de robots de arquitectura paralela	13
1.1.7. Desarrollos a nivel académico de robots tipo Delta	15
1.1.8. Procesos de automatización	18
1.1.9. Industria 4.0	19
1.1.10. Sistemas ciberfísicos / Cyber-Physical Systems (CPS)	21
1.2. Justificación	23
1.3. Pregunta de investigación	24
1.4. Aplicación industrial	25
1.5. Alcances y delimitaciones	25
2. Descripción del manipulador	27
2.1. Descripción del robot delta	27
2.2. Análisis geométrico del robot	37
2.3. Análisis cinemático	40
2.3.1. Solución cinemática directa	42
2.3.2. Descripción gráfica	54
2.4. Cinemática inversa	56

2.5. Dinámica	61
2.6. Singularidad	64
2.6.1. Singularidad del Jacobiano inverso	66
2.6.2. Singularidad del Jacobiano directo	66
2.6.3. Singularidad combinada	66
2.7. Destreza	67
2.8. Espacio de trabajo	67
3. Diseño, implementación y validación del robot delta	68
3.1. Introducción	68
3.1.1. Desarrollos previos	68
3.1.2. Modelo de diseño concurrente en V	70
3.1.3. Herramientas computacionales	72
3.1.4. Requerimientos	73
3.2. Diseño de <i>hardware</i>	75
3.2.1. Arquitectura de <i>hardware</i>	75
3.2.2. Diseño del sistema mecánico	77
3.2.3. Diseño del sistema eléctrico y electrónico	85
3.3. Diseño de <i>software</i> y control	90
3.3.1. Arquitectura de <i>software</i> y control	90
3.3.2. Programa de control y monitoreo	92
3.3.3. Comunicaciones	99
3.3.4. Integración con <i>software</i> para sistemas ciberfísicos	100
3.4. Implementación y validación	101
3.4.1. Sistema mecánico	101
3.4.2. Sistema eléctrico y electrónico	102
3.4.3. <i>Software</i> y control	104
3.4.4. Validación de la cinemática directa	110
3.4.5. Validación de la cinemática inversa	123
3.4.6. Validación del espacio de trabajo	128
3.4.7. Repositorio	130
4. Aplicación de sistemas ciberfísicos	131
4.1. Introducción	131
4.2. Fábrica digital	132
4.2.1. Celda robotizada	132
4.2.2. Objetos a manipular por la celda de <i>pick and place</i> robotizada	136
4.3. Comunicación entre el robot delta fabricado y el sistema de producción virtualizado	137
4.3.1. Información desde el robot real hacia MCD	139

4.3.2. Información desde MCD hacia el robot real	140
4.4. Resultados	142
4.5. Recomendaciones	146
5. Conclusiones	148
5.1. Conclusiones	148
5.2. Trabajos futuros	149
Bibliografía	150
A. Anexo: Modelamiento CAD de los elementos mecánicos	1
B. Anexo: Implementación sistema mecánico	16
B.0.1. Piezas mecánicas	17
B.0.2. Ensamble	24
B.0.3. Alineación y nivelación	28
C. Anexo: Aplicación de sistemas ciberfísicos - Resultados	31

Listado de figuras

1-1. Comparación PIB per cápita. [29]	2
1-2. Robot de arquitectura serial marca KUKA. [30]	4
1-3. Sistema de entretenimiento basado en robot paralelo 1931. [4]	6
1-4. Primera aplicación industrial de los Robots Paralelos patentada en 1942. [4]	6
1-5. El primer hexápodo octaedrónico o la plataforma Gough original al nacer en 1954 (Proc. IMechE, 1965-66) y poco antes de retirarse en 2000 (cortesía de Mike Beeson, Dunlop Tires). [4]	7
1-6. Esquema de la Plataforma Stewart. [5]	8
1-7. Plataforma Stewart usada por Lufthansa como simulador de vuelo. [5]	8
1-8. Esquemático del robot tipo Delta. [5]	10
1-9. Esquemático del robot Par4 y plato articulado. [5]	11
1-10. Robot Quattro de la compañía Adept. [5]	11
1-11. Centro de mecanizado Variax. [5]	12
1-12. Hexápodo Okuma y Hexaglide. [5]	13
1-13. Robot manipulador paralelo híbrido. [7]	14
1-14. Robot Delta construido por la Universidad de Maryland. [19]	16
1-15. Robot Delta NUWAR construido por UWA. [19]	17
1-16. Prototipo semi-industrial de robot delta. [31]	18
1-17. Fases de implementación tradicional de un proceso de ingeniería. [Autor]	19
1-18. Historia de las revoluciones industriales. [28]	20
1-19. Industria 4.0. [28]	21
1-20. Proceso industrial usando sistemas ciberfísicos. [Autor]	23
2-1. Bases del robot delta y cadenas cinemáticas. [Autor]	28
2-2. Vista en el plano XY de la distribución de las tres cadenas cinemáticas a 120°. [Autor]	29
2-3. Distribución de las tres cadenas cinemáticas a 120°. [Autor]	30
2-4. Descripción de una cadena cinemática del robot. [Autor]	31
2-5. Elementos básicos del robot delta. [Autor]	32
2-6. Cadena cinemática del robot delta. [Autor]	33
2-7. Descripción de los ángulos presentes en la cadena cinemática #1 [Autor]	35

2-8. Ángulo ϕ de la cadena cinemática #1. [Autor]	36
2-9. Ángulo ϕ de la cadena cinemática #1. [Autor]	37
2-10. Representación simplificada mediante diagrama de alambres. [Autor]	41
2-11. Representación simplificada mediante diagrama de alambres. [Autor]	42
2-12. Posiciones de los hombros. [Autor]	43
2-13. Posición x, y, z del codo 1 visto desde el plano XZ del hombro 1. [Autor]	46
2-14. Intersección esferas (Posición del efecto final). [Autor]	55
2-15. Posición de las muñecas con respecto al marco de referencia del TCP. [Autor]	56
2-16. Cinemática inversa caso 1: $0 \leq P_{m_i} \leq R_f$. [Autor]	57
2-17. Cinemática inversa caso 2: $P_{m_{xi}} < 0$. [Autor]	58
2-18. Cinemática inversa caso 3: $P_{m_{xi}} > R_f$. [Autor]	60
3-1. Dimensiones principales del robot delta. [Autor]	69
3-2. Posiciones de los hombros (posiciones fijas o constantes). [Autor]	70
3-3. Modelo de diseño en V para metodología concurrente. [34].	71
3-4. Modelo de diseño recurrente en V aplicado en desarrollo de robot delta. [Autor].	72
3-5. Arquitectura de <i>hardware</i> . [Autor]	77
3-6. Movimiento de prueba número 1 ejecutado en 1 segundo. [Autor]	78
3-7. Movimiento de prueba número 2 ejecutado en 0.5 segundos. [Autor]	78
3-8. Movimiento de prueba número 3 ejecutado en 0.4 segundos. [Autor]	78
3-9. Movimiento de prueba número 4 ejecutado en 0.25 segundos. [Autor]	79
3-10. Movimiento de prueba número 5 ejecutado en 0.1 segundos. [Autor]	79
3-11. Ficha técnica motor paso a paso híbrido 60J1887EC-1000-SC. [Autor]	82
3-12. Curva de par del motor paso a paso híbrido 60J1887EC-1000-SC. [Autor]	83
3-13. Ensamble general robot delta. [Autor]	84
3-14. Gabinete eléctrico. [Autor]	88
3-15. Gabinete eléctrico. [Autor]	89
3-16. Arquitectura de <i>software</i> . [Autor]	91
3-17. Arquitectura de control. [Autor]	92
3-18. Lógica de control y monitoreo. [Autor]	93
3-19. Lógica de control y monitoreo. [Autor]	94
3-20. Lógica de control y monitoreo. [Autor]	95
3-21. Ejemplo trayectoria lineal: Movimiento en X. [Autor]	98
3-22. Ejemplo trayectoria lineal: Movimiento en Y. [Autor]	98
3-23. Ejemplo trayectoria lineal: Movimiento en Z. [Autor]	99
3-24. Ensamble final robot delta. [Autor]	101
3-25. Gabinete eléctrico finalizado. [Autor]	104
3-26. Interfaz gráfica de pruebas elaborada en Matlab ®. [Autor]	105
3-27. Función para calcular cinemática directa. [Autor]	105
3-28. Función para calcular cinemática inversa. [Autor]	106

3-29. Función para determinar el espacio de trabajo. [Autor]	106
3-30. Generación de trayectoria lineal. [Autor]	107
3-31. Herramienta para el cálculo de los actuadores. [Autor]	107
3-32. Herramienta para el cálculo de los actuadores. [Autor]	108
3-33. Módulo de comunicaciones vía TCP. [Autor]	108
3-34. Interfaz de usuario. [Autor]	110
3-35. Posiciones de los codos con la configuración inicial ($\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = 0^\circ$). [Autor]	111
3-36. Posiciones de las muñecas con la configuración inicial ($\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = 0^\circ$). [Autor]	112
3-37. Posición del TCP_j con la configuración inicial ($\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = 0^\circ$). [Autor] .	113
3-38. Ubicación del centro de las esferas con la configuración inicial ($\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = 0^\circ$). [Autor]	114
3-39. Intersección de las 3 esferas con la configuración inicial ($\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = 0^\circ$). [Autor]	115
3-40. Posición de los codos con $\theta_1 = 0^\circ$, $\theta_2 = -30^\circ$, $\theta_3 = 30^\circ$. [Autor]	117
3-41. Centros de las esferas con $\theta_1 = 0^\circ$, $\theta_2 = -30^\circ$, $\theta_3 = 30^\circ$. [Autor]	119
3-42. Intersección de las esferas con $\theta_1 = 0^\circ$, $\theta_2 = -30^\circ$, $\theta_3 = 30^\circ$. [Autor]	122
3-43. Posición de las muñecas con respecto al marco de referencia del TCP. [Autor]	123
3-44. Cinemática inversa caso 1: $0 \leq Pm_i \leq Rf$. [Autor]	125
3-45. Cinemática inversa caso 2: $Pm_{xi} < 0$. [Autor]	126
3-46. Cinemática inversa caso 3: $Pm_{xi} > Rf$. [Autor]	128
3-47. Alcance robot usando cinemática directa. [Autor]	129
3-48. Alcance robot usando cinemática inversa. [Autor]	130
4-1. Descripción de la celda de <i>pick and place</i> robotizada de la fábrica digital. [Autor]	133
4-2. Vista lateral derecha de la celda de <i>pick and place</i> robotizada. [Autor]	134
4-3. Vista lateral derecha de la celda de <i>pick and place</i> robotizada. [Autor]	135
4-4. Vista superior de la celda de <i>pick and place</i> robotizada. [Autor]	136
4-5. Objetos a manipular por la celda de <i>pick and place</i> robotizada. [Autor]	137
4-6. Enlace de señales entre MCD y el robot real. [Autor]	138
4-7. Señales desde el robot real hacia MCD. [Autor]	140
4-8. Señales desde MCD hacia el robot real. [Autor]	142
4-9. Costo hora de trabajo robot vs. humano [32].	144
4-10. Gasto computacional en aplicación de sistemas ciberfísicos. [Autor]	145
4-11. Gasto computacional en aplicación de sistemas ciberfísicos. [Autor]	146
A-1. Bastidor. [Autor]	2
A-2. Base fija. [Autor]	3
A-3. Motorreductor. [Autor]	4
A-4. Eslabón activo o brazo. [Autor]	5
A-5. Eslabón pasivo o antebrazo. [Autor]	6

A-6. Base móvil. [Autor]	7
A-7. Base móvil. [Autor]	8
A-8. Ensamble principal robot delta. [Autor]	9
A-9. Base sensores inductivos. [Autor]	10
A-10 Ensamble sistema fijo.[Autor]	11
A-11 Ensamble general robot delta. [Autor]	12
A-12 Ensamble general robot delta. [Autor]	13
A-13 Ensamble general robot delta. [Autor]	14
A-14 Distribución final de los ejes. [Autor]	15
B-1. Perfil de aluminio extruido. [Autor]	17
B-2. Base fija. [Autor]	17
B-3. Bases motorreductores. [Autor]	18
B-4. Motorreductor. [Autor]	19
B-5. Motorreductor. [Autor]	19
B-6. Motorreductor. [Autor]	20
B-7. Bases sensores inductivos. [Autor]	20
B-8. Eslabones activos. [Autor]	21
B-9. Eslabones activos. [Autor]	21
B-10 Medición de la masa de eslabón activo. [Autor]	22
B-11 Medición de la masa de eslabón pasivo. [Autor]	22
B-12 Medición de la masa de la base móvil. [Autor]	23
B-13 Ensamble de la base fija con bases de los sensores inductivos. [Autor]	24
B-14 Ensamble de los eslabones activos. [Autor]	25
B-15 Ensamble general - vista superior. [Autor]	26
B-16 Ensamble general - vista inferior. [Autor]	27
B-17 Nivelación de la mesa de trabajo. [Autor]	28
B-18 Destalle de la nivelación de la mesa de trabajo. [Autor]	29
B-19 Alineación de la base fija, bastidor y posición de los hombros. [Autor]	30
C-1. Posición de reposo del sistema de <i>pick and place</i> . [Autor]	32
C-2. Sujeción carro de juguete. [Autor]	33
C-3. Traslado carro de juguete. [Autor]	34
C-4. Posición de liberación carro de juguete. [Autor]	35
C-5. Sujeción vaso plástico. [Autor]	36
C-6. Sujeción dado. [Autor]	37
C-7. Posición de liberación de dado. [Autor]	38
C-8. Línea de producción en funcionamiento. [Autor]	39
C-9. Productos organizados. [Autor]	40

Listado de tablas

2-1. Posiciones notables del robot delta.	32
2-2. Distancias y dimensiones presentes en el robot delta.	33
2-3. Ángulos generados por los elementos del robot delta.	34
2-4. Resumen de fórmulas para el desarrollo de la cinemática inversa	61
3-1. Valores constantes del robot desarrollado.	69
3-2. Características del robot delta ABB IRB 360-1/800	77
3-3. Características del motor paso a paso híbrido 60J1887EC-1000-SC	81
3-4. Características del reductor planetario PLF060-L1-5-60-8*31	83
3-5. Características de la fuente de voltaje DC principal.	85
3-6. Características de la fuente de voltaje DC secundaria.	85
3-7. Características <i>drive</i> 2HSS57 para motor paso a paso híbrido.	86
3-8. Características del controlador de movimiento.	86
3-9. Listado de entradas (sensores).	87
3-10. Listado de salidas (actuadores).	87
3-11. Ejemplo trayectoria lineal: Datos para realizar movimiento.	96
3-12. Resultados del ejemplo de la generación de una trayectoria lineal	97
3-13. Resultados obtenidos por el conjunto motorreductor seleccionado	102
4-1. Alturas de los objetos a manipular por la celda de <i>pick and place</i> robotizada	137
4-2. Señales desde el robot real hacia MCD	139
4-3. Señales desde MCD hacia el robot real	141

1

Introducción

En este capítulo se presentan la historia y evolución de los robots paralelos, antecedentes académicos de los robots delta, introducción a los sistemas ciberfísicos, justificación y propósito del proyecto, pregunta de investigación, alcance y delimitaciones del proyecto.

1.1. Marco teórico

1.1.1. Evolución industrial nacional e internacional

Debido a la brecha tecnológica y de desarrollo presente en países emergentes como Colombia frente a países industrializados, se evidencian diferentes tiempos de respuesta a la solución de problemas y necesidades, obteniendo diferentes niveles de eficiencia en el diseño y ejecución de proyectos de ingeniería. Un ejemplo de estas diferencias en la productividad de los países se puede ver reflejada en la figura 1-1, en donde se muestra el PIB per cápita de Colombia vs. países altamente industrializados.

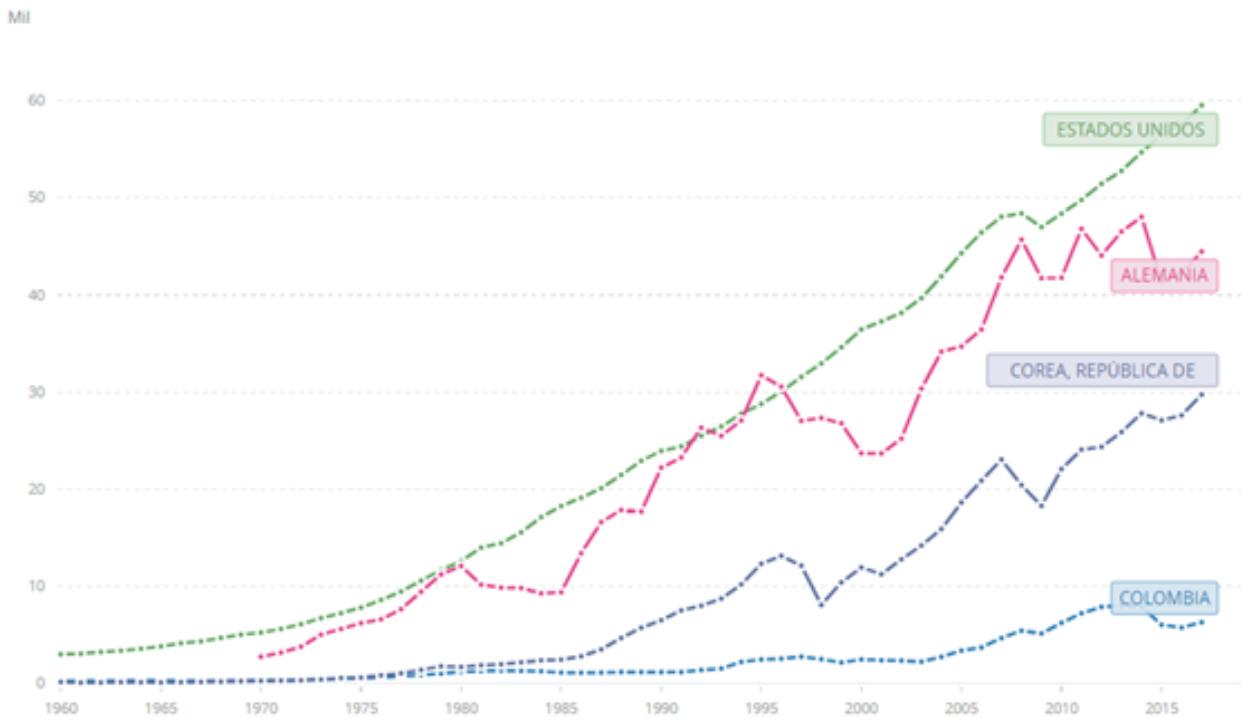


Figura 1-1: Comparación PIB per cápita. [29]

Analizando los datos mostrados, se puede apreciar el poco desarrollo que ha tenido Colombia en los últimos 50 años frente a países recientemente industrializados como Corea del Sur, el cual hasta hace algunos años tenía cifras de producción similares a las de Colombia, pero gracias a la tecnificación y desarrollo industrial, ha logrado mejorar significativamente sus cifras de generación de capital e incrementar su productividad. Por otra parte, en la actualidad, toda empresa para continuar siendo rentable tiene grandes desafíos como, por ejemplo, mantener o en lo posible aumentar su producción, reducir costos de operación, ser innovadora, competitiva, eficiente, ofrecer altos estándares de calidad, entre otros. Para alcanzar dichos objetivos, los procesos de gestión, diseño, desarrollo, producción y calidad deben mejorar conforme a la evolución del mercado y de la competencia. Para esto, es pertinente conocer y en cierta medida adoptar nuevas herramientas tecnológicas que ayuden a: mejorar los procesos de identificación de problemas, aumentar la eficiencia con base en los recursos disponibles, tomar decisiones apropiadas, entender mejor el mercado y los requerimientos de los clientes, etc.

Siendo la innovación uno de retos principales de la industria, según la NIST (National Institute of Standards and Technology), la innovación puede incluir el uso de nuevos modelos de negocios, el desarrollo de nuevos procesos y servicios y la mejora de productos existentes. Estas tecnologías y su uso apropiado son las que permiten que las empresas se consoliden en el mercado. Debido a esto, los organismos que no adopten tecnologías del siglo XXI van

a verse rezagadas significativamente, al punto de tener la posibilidad de desaparecer en el mercado.

1.1.2. Robótica industrial

La robótica industrial es una tecnología que lleva muchos años disponible en el mercado y que ha venido evolucionando constantemente. En la actualidad el uso de la robótica es limitado debido a factores como la complejidad de su desarrollo, poco personal capacitado para su uso y adaptación, alto costo, entre otros. La robótica ofrece como característica principal la posibilidad de ejecución de tareas repetitivas y preprogramadas a alta velocidad. Se pueden ejecutar labores como: pintura, soldadura, mecanizado, paletizado, corte laser, manufactura aditiva, medicina robotizada y las tareas de recoger y colocar o como comúnmente se le conocen con su nombre en inglés *pick and place* (P&P) , etc.

Dentro de las grandes familias de robots industriales se pueden resaltar dos arquitecturas: arquitectura serial y arquitectura paralela. A grosso modo, los robots de arquitectura serial emulan los movimientos humanos, en donde se usan barras rígidas unidas entre sí por medio de articulaciones, en donde el extremo final del robot se une a la base del robot a través de un único camino, permitiendo mover libremente su extremo final en el espacio. Ofrecen gran rigidez estructural, alta capacidad de carga y velocidades medias de operación. En la figura 1-2 se presenta un ejemplo de un robot serial.



Figura 1-2: Robot de arquitectura serial marca KUKA. [30]

Por otra parte, los robots de arquitectura paralela son robots en los cuales el extremo final está unido a la base por más de una cadena cinemática independiente.

1.1.3. Robot paralelo o de cinemática paralela

Un robot de cinemática paralela, conocido también como robot de cadena cerrada, es un sistema compuesto básicamente de una plataforma móvil sujetada a una base fija mediante una serie de cadenas cinemáticas independientes llamados brazos, los cuales son controlados por actuadores [1].

De manera general, la ventaja principal de este tipo de robots es la capacidad de distribución de cargas en cada una de las cadenas cinemáticas, permitiendo manejar cargas superiores a las manipuladas por robots de cadena abierta o serial. Una de las analogías más comunes para la explicación de esto, es la del cuerpo humano. Por ejemplo, una cadena cinemática abierta o robot serial se puede asemejar a un brazo humano, el cual tiene la capacidad de realizar diversas tareas, no obstante, cuando se requieren actividades o tareas que involucren

mayor fuerza o precisión, es necesario emplear ambos brazos, es ahí cuando se comienza a implementar el concepto de robot paralelo, en donde se tiene un base fija (torso) y una base de movimiento equiparable al elemento sujetado con las manos [5].

Las características y ventajas de los robots paralelos frente a los robots de arquitectura serial son la admisión de mayores aceleraciones durante el movimiento y en consecuencia mayores velocidades, esto gracias a que, la relación masa del robot vs la carga a soportar es menor. Además, tiene un alto grado de rigidez y precisión dada su estructura de brazos paralelos. Por otro lado, los motores de los actuadores son instalados en la plataforma fija, lo cual se considera una ventaja, ya que, en la arquitectura serial, los motores están instalados en las articulaciones de los diversos eslabones que lo componen, aumentando de esta manera las masas móviles y fuerzas iniciales generadas por los desplazamientos de los motores, acrecentando así el riesgo de avería. Sin embargo, el mayor inconveniente del manipulador paralelo es su reducido espacio de trabajo en comparación a los robots de cadena cinemática abierta [3].

1.1.4. Antecedentes históricos

Según el estudio realizado por Ilian Bonev, los primeros inicios a trabajos teóricos de mecanismos paralelos, particularmente con los hexápodos, comienza con los geómetras franceses e ingleses y su obsesión por los poliedros. Gracias a Manfred Husty, quien fue el primero en encontrar un método analítico capaz de calcular las 40 soluciones al problema de cinemática directa de un hexápodo, y al Dr. Jean-Pierre Merlet, autor del primer libro sobre robots paralelos, personajes como James E. Gwinnett y Willard LV Pollard Jr lograron la creación e implementación de los primeros artefactos utilizando el concepto de robots paralelos, siendo James E. Gwinnett en 1928 uno de los pioneros en el tema con la construcción de una plataforma o base de movimiento para la industria del entretenimiento. En la figura **1-3** se observa el primer sistema de entretenimiento basado en la arquitectura paralela [4].

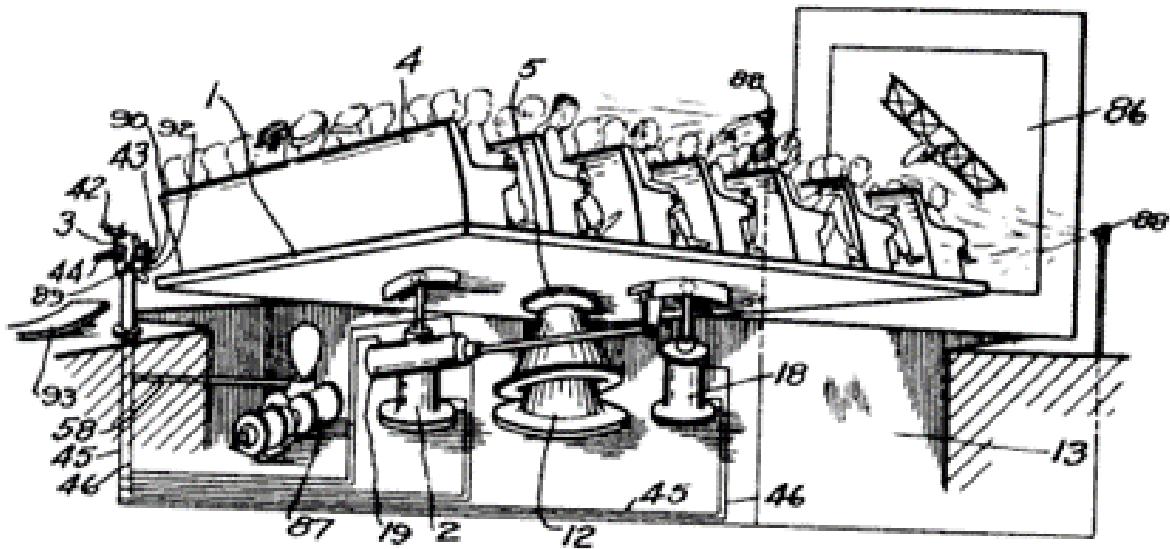


Figura 1-3: Sistema de entretenimiento basado en robot paralelo 1931. [4]

Por su parte, Willard LV Pollard realizó la invención de un nuevo robot con esta arquitectura, el cual fue diseñado principalmente para pintar de manera automática los automóviles con pintura en aerosol, sin embargo, nunca se concluyó su construcción. Ya en 1942 se otorgaría la patente a Willard LG Pollard Jr. Posteriormente, se patentaría como un dispositivo de control de posición de herramientas. En la figura 1-4 se muestra el primer robot con arquitectura paralela industrial [4].

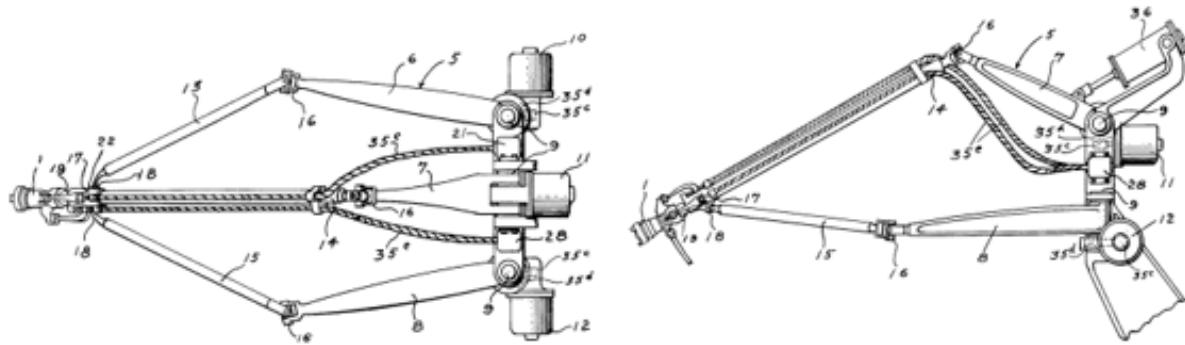


Figura 1-4: Primera aplicación industrial de los Robots Paralelos patentada en 1942. [4]

En los años 50 Eric Gough, ingeniero automotriz de Dunlop Rubber Co., Birmingham, Inglaterra, construiría el primer hexápedo octaedrónico. Un robot de arquitectura paralela con 6 GdL, impulsado por actuadores lineales en cada una de sus cadenas cinemáticas y denominado por Gough, la máquina universal de pruebas de neumáticos o plataforma universal,

su función fue dar respuestas a las diversas problemáticas de las cargas de aterrizaje aerodinámico mediante la aplicación combinada de estas en los neumáticos. La plataforma universal entró en funcionamiento en el año de 1954 hasta 1980, año en el cual, la empresa Dunlop cerraría sus puertas. Actualmente, este robot se encuentra en el Museo de Ciencias de Londres. En la figura 1-5 se aprecia la plataforma Gough original al nacer en 1954 y poco antes de su retiro [4].



Figura 1-5: El primer hexápodo octaedrónico o la plataforma Gough original al nacer en 1954 (Proc. IMechE, 1965-66) y poco antes de retirarse en 2000 (cortesía de Mike Beeson, Dunlop Tires). [4]

No obstante, según Eric Gough, la creación de esta plataforma se basó en los sistemas ya realizados de seis conectores (hexápodos) y que quedaron en el olvido por el sector académico e industrial durante varias décadas. La popularidad de estos sistemas se dio, por la simplicidad de poder realizar ajustes a pequeñas variaciones en estos. Los hexápodos de este tipo se conocen como sistemas MAST, que significa Mesa de Simulación de Varios Ejes o Multi-Axis Simulation Table por sus siglas en inglés y que en la actualidad son fabricados por varias empresas [4].

Ya para el año de 1965, Stewart realiza la primera publicación científica referida a un robot de arquitectura paralela, en esta, se describe una plataforma de movimiento de 6 GdL para la simulación de vuelos, en la figura 1-6 y 1-7 se muestra el esquema de la Plataforma Stewart y un robot que implementa este concepto. Debido a su gran similitud con la plataforma

creada por el Dr. Gough, en la actualidad la configuración tipo hexápodo con actuadores lineales se conoce como plataforma Gough-Stewart [5].

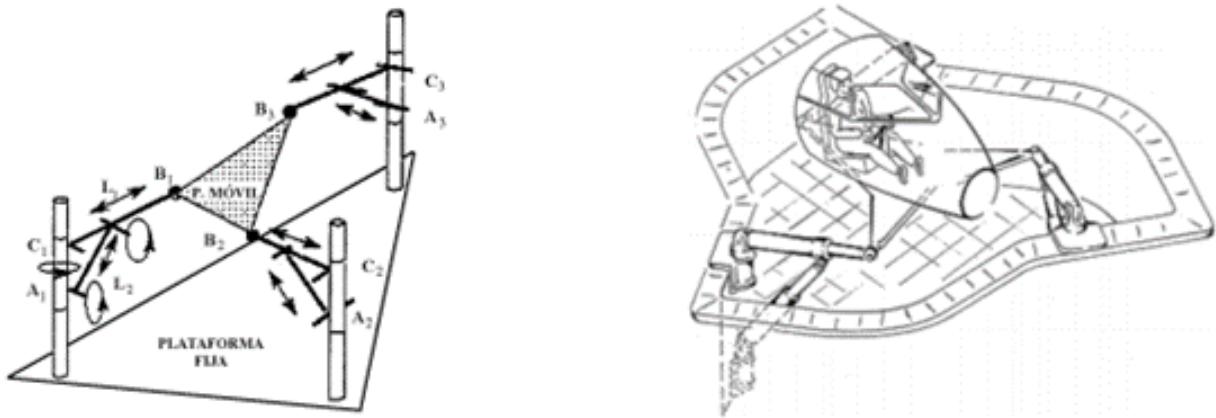


Figura 1-6: Esquema de la Plataforma Stewart. [5]



Figura 1-7: Plataforma Stewart usada por Lufthansa como simulador de vuelo. [5]

Los robots de arquitectura paralela antes mencionados representan las aplicaciones que dieron paso a grandes desarrollos industriales y que en la actualidad siguen teniendo gran valor

para el estudio y mejoras en la aplicación de estos.

1.1.5. Tipos de robots paralelos y sus aplicaciones

Tomando como punto de partida las aplicaciones iniciales, se desarrollaron una serie de robots con cinemática paralela y se agruparon por campos de aplicación basándose en las necesidades emergentes del entorno. Es por esto, que en el presente apartado se realizará un breve recorrido por los diversos desarrollos y sus principales aplicaciones.

Robot paralelo tipo delta

Gracias al avance tecnológico, en los años 90, Reymond Clavel inspirado por los diversos artefactos construidos por Willard L. Pollard, Stewart, Eric Gough, implementó el concepto de Stewart para realizar una serie de modificaciones; esto con el fin, de mejorar la relación peso-carga del robot y lograr la manipulación de objetos de bajo peso a mayores velocidades, además, optimizar los costos aprovechando completamente las ventajas de este tipo de configuraciones [5]. Es ahí cuando se construye el primer robot comercial denominado robot Delta, el cual es, una clase de robot paralelo conformado por una plataforma móvil unida a una base fija por medio de tres cadenas cinemáticas basadas en el uso de paralelogramos. Este tipo de robots ofrecen grandes velocidades, altas aceleraciones y baja capacidad de carga. Es ampliamente usado en tareas como *pick and place*, impresión 3D, corte laser, ensamblaje, embalaje, empacado y control de calidad, entre otros. La figura 1-8 muestra el esquemático del robot tipo delta.

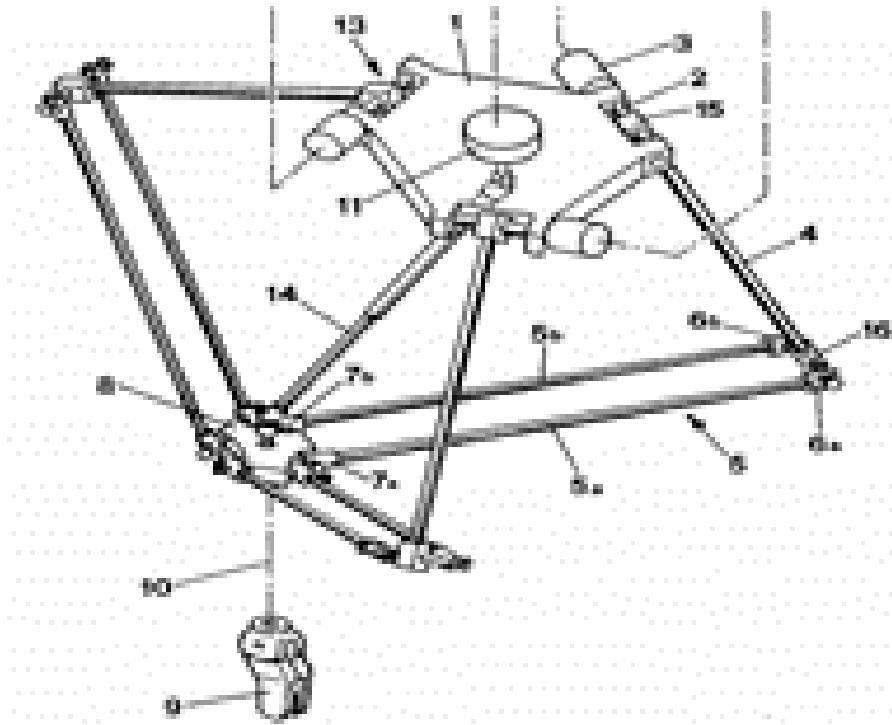


Figura 1-8: Esquemático del robot tipo Delta. [5]

Robot paralelo Par4

Una de las grandes dificultades del robot tipo delta, es la implementación de una pierna central para la generación del movimiento de rotación. Dada su construcción, debe soportar grandes momentos de torsión, además, al ser de tipo cardan y tener que soportar grandes velocidades, su vida útil se reduce considerablemente, por lo que es necesario reemplazarla de manera frecuente. Basados en esta necesidad, Pierrot y Col presentan un tipo de robot SCADA que no requiere la implementación de una pierna central, si no de una plataforma articulada para introducir este grado de rotación partiendo del movimiento de las 4 cadenas cinemáticas ubicadas de manera externa. A diferencia de los diseños tradicionales, los cuales se basan en una plataforma móvil rígida unida a las piernas, este nuevo concepto implementó la unión de estas en los extremos de la plataforma y a un elemento terminal denominado plato, por medio de juntas cinemáticas. Este tipo de robot se conoció inicialmente como Par4 y fue comercializado por Adept, quien en el año 2007 obtuvo la patente del mismo. Actualmente, es conocido bajo el nombre de Quattro y es quizás uno de los robots de arquitectura paralela más rápidos del mercado. La figura 1-9 y 1-10 muestran el esquemático del robot Par4 y el robot Quattro comercializado por Adept [5].

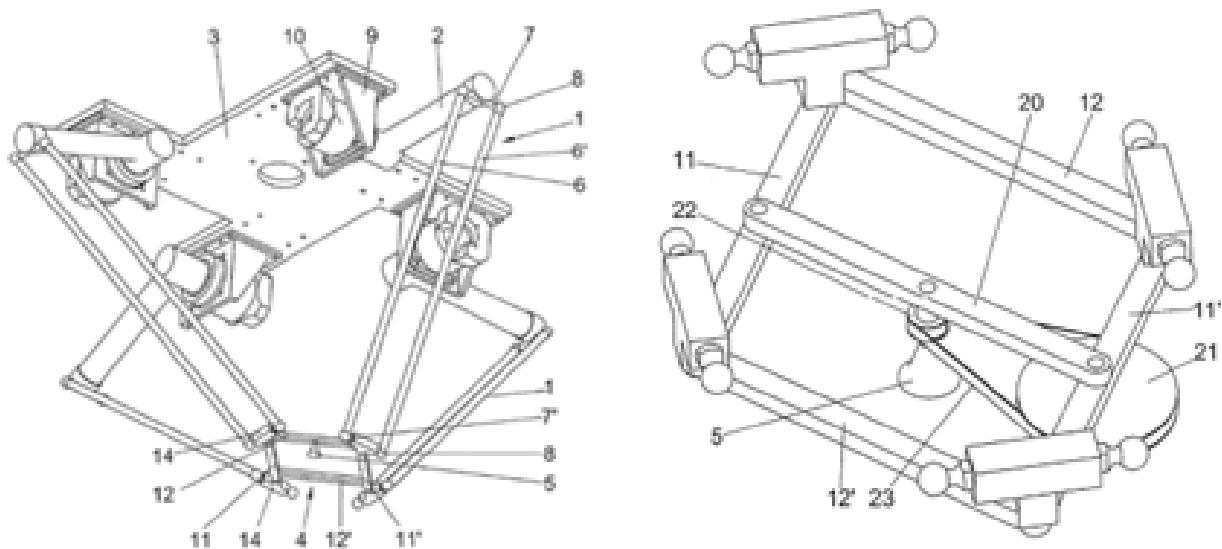


Figura 1-9: Esquemático del robot Par4 y plato articulado. [5]



Figura 1-10: Robot Quattro de la compañía Adept. [5]

Gracias a sus múltiples aplicaciones basadas en los procesos de *pick and place*, la configuración de robot tipo delta y sus variantes ha sido (en la línea de robots de arquitectura paralela), el de mayor implementación en aplicaciones industriales.

Usos de robots paralelos en centros de mecanizado

Comúnmente conocido como Mecanismo Cinemático Paralelo (MCP) o Parallel Kinematic Mechanism, por sus siglas en inglés, es un tipo de robot con arquitectura paralela con implementación en diversas aplicaciones en el área de desarrollo de centros de mecanizado y se basa en el método de la plataforma de Stewart para realizar operaciones en 5 ejes. Fue lanzado en el año de 1994 en Chicago, USA, en el evento International Manufacturing Technology Show (IMTS) y desde ese mismo año el desarrollo y patente de centros de mecanizado con MCP aumento de manera considerable [5]. En consecuencia, el artefacto presentado en IMTS dio paso al desarrollo y comercialización de diversos centros de mecanizado tales como:

- Centro de mecanizado Giddings and Lewis' Variax Hexacenter; basado en sistemas de tipo hexápedo, con unión cruzada de los brazos a la plataforma móvil [6]. La figura 1-11 presenta la imagen del robot Varix:

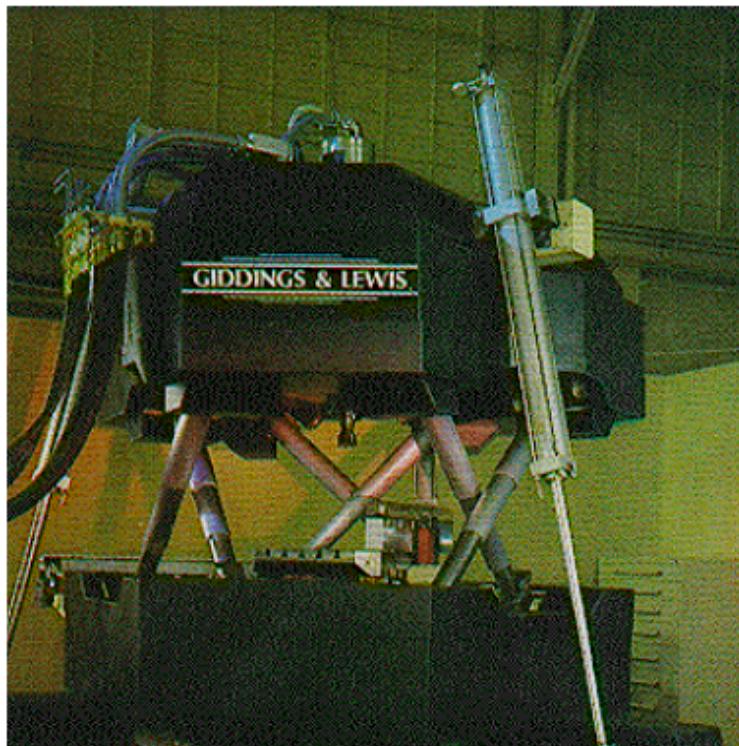


Figura 1-11: Centro de mecanizado Variax. [5]

- Centro de mecanizado hexápedo Okuma PM600; conexión de los brazos en configuración hexagonal sin cruzar y Centro de mecanizado Hexaglide [5]. La figura 1-12

presenta la imagen del hexápodo Okuma PM600 en la parte izquierda y el Hexaglide en la parte derecha respectivamente:



Figura 1-12: Hexápodo Okuma y Hexaglide. [5]

Los robots antes mencionados se catalogan como robot paralelos complejos o fully parallel robot.

1.1.6. Mejoras de robots de arquitectura paralela

Robot híbrido paralelo/serie

A pesar de las múltiples ventajas de trabajar con arquitecturas paralelas, su mayor inconveniente es el limitado espacio de trabajo con el que se cuenta. Por esta razón, se realizó el desarrollo y diseño de robots híbridos, los cuales, son la combinación de robots de cinemática paralela y serial [7]. En la figura 1-13 se presenta la imagen de un robot híbrido.

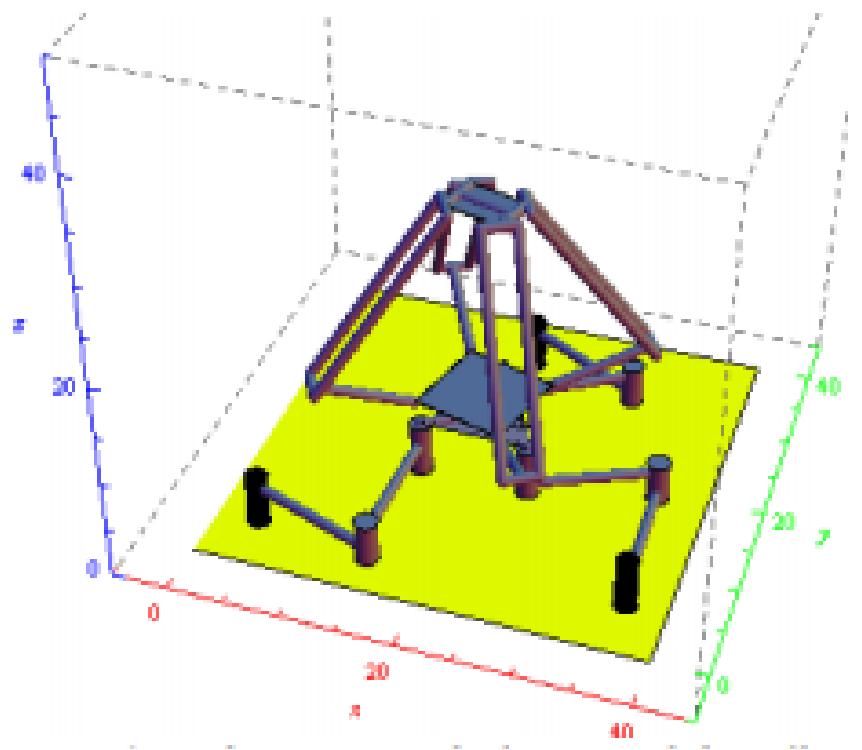


Figura 1-13: Robot manipulador paralelo híbrido. [7]

La principal ventaja que tiene este tipo de arquitectura es que toma lo mejor de cada uno; mayor velocidad, manipulación de piezas de mayor dureza y mayor espacio de trabajo, entre otros aspectos. Sin embargo, el estudio de este tipo de arquitecturas no ha tenido grandes avances [7].

A continuación se presentan algunos ejemplos de estudios de posibles aplicaciones:

- Estudio y análisis de un sistema de muñeca y un micro-manipulador con un robot tipo serie/paralelo de 6 GdL propuesto por Waldron, K.J., M. Raghavan, and B. Roth [8][9].
- Estudio realizado por Shahinpoor, M. [8][10] sobre la cinemática de un robot manipulador híbrido en configuración paralelo/paralelo con 3 GdL.
- Estudio realizado por Huang, M.Z., S.-H. Ling and Y. Sheng [8][11] sobre la cinemática de manipuladores híbridos en configuración serie/paralelo.
- Análisis de la exactitud de un manipulador serie/paralelo de micro-movimientos realizado por Shusheng, B [8][12]. Compuesto de dos plataformas paralelas de 3GDL, de tipo 3RPS en la parte superior y 3RRR en la parte inferior.

- Estudio sobre el análisis cinemático de un manipulador híbrido en configuración serie/paralelo de 6 GdL, compuesto de dos mecanismos paralelos conectados en serie cada uno de 3GdL. Hecho por Tanev, T.K [8][13].
- Modelado dinámico inverso de un manipulador serie/paralelo, realizado por Ouarda and Wisama [8][14].
- Diseño y control de un robot bípedos utilizando mecanismos más sólidos como los paralelos. Proyecto hecho por Sellaouti, R. and F.B. Ouezdou [8][15].
- Ping-Lang and Chi-Chung [8][16], desarrollaron un manipulador paralelo híbrido cartesiano para cirugía de rodilla.
- Ramadan [8][17], realizo el estudio de un micro nano manipulador híbrido de mano de dos dedos.

1.1.7. Desarrollos a nivel académico de robots tipo Delta

El desarrollo y estudio de robot de arquitectura paralela tipo Delta ha sido ampliamente apetecido por el sector académico desde ya hace algunas décadas, sin embargo, muchos de los prototipos propuestos solo han sido variantes muy similares al modelo original. En muchos de estos desarrollos se ha buscado implementar otro tipo de mecanismos equivalentes a los paralelogramos, así como el sustituir los actuadores rotativos por lineales. Universidades como Maryland y Génova lograron la construcción de este tipo de robots modificados[18]. En la figura 1-14 se muestra el prototipo de robot Delta construido por la Universidad de Maryland.

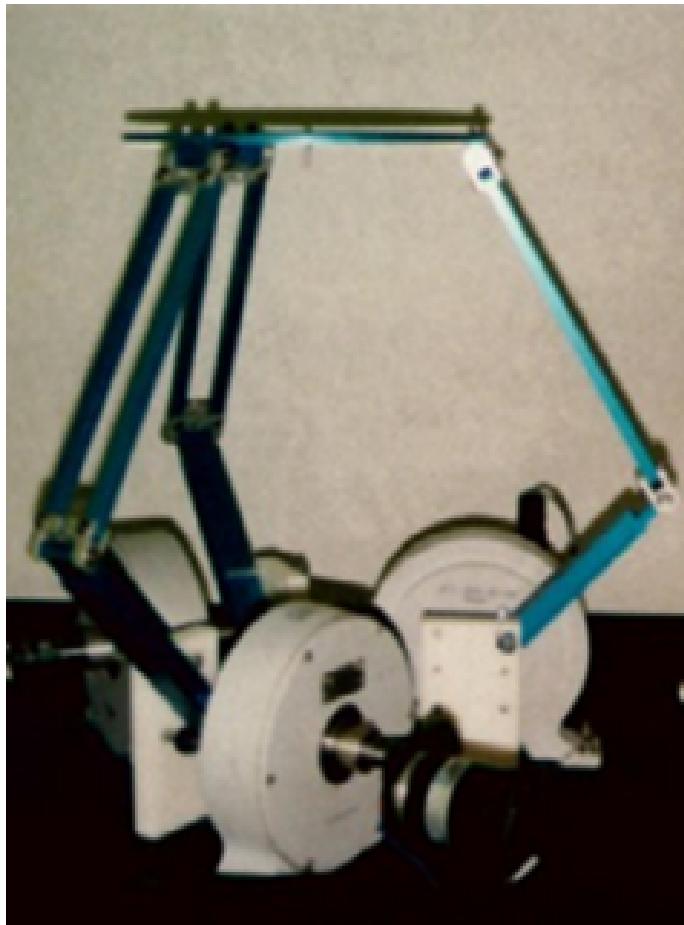


Figura 1-14: Robot Delta construido por la Universidad de Maryland. [19]

Posteriormente, diversas instituciones introdujeron mejoras para la optimización de estos mecanismos, dentro de las cuales se destaca:

- La Universidad de Australia Occidental (UWA) con el robot NUWAR, el cual se caracteriza por tener aceleraciones de hasta $500m/s^2$, mejoras en la rigidez y espacio de trabajo. Esta última se da gracias a la configuración presente en los actuadores [19].

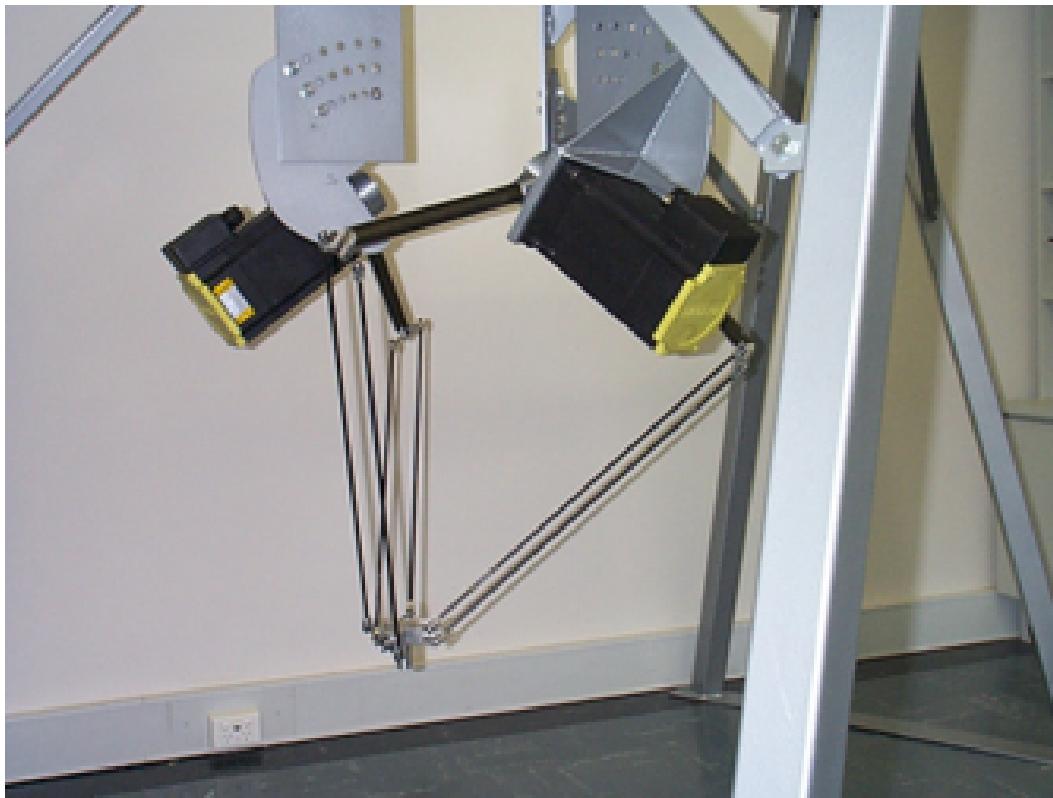


Figura 1-15: Robot Delta NUWAR construido por UWA. [19]

- Y Universidades como Stuttgart y Michigan implementaron versiones con actuadores lineales.

Para Latinoamérica, el desarrollo de este tipo de mecanismo no ha tenido gran avance, sin embargo, entidades como:

- La Universidad Autónoma de México, logró el diseño mecánico de un robot paralelo tipo Delta de tres grados de libertad. En este desarrollo se introdujo un sistema de contrapeso ubicado en las cadenas cinemáticas del mecanismo con la finalidad de lograr una estabilidad en el sistema una vez este se encuentre en estado de reposo. En otras palabras, busca evitar que las cadenas cinemáticas queden completamente extendidas por efectos de la gravedad, además lograr disminuir el par requerido en los motores [25].
- La Universidad Santo Tomás de Bogotá, Colombia, realizó aproximaciones en el diseño y fabricación de un prototipo de robot tipo Delta semi-industrial hasta el año 2018. El grupo de investigación GEAMEC trabajó en la realización del análisis cinemático

y dinámico mediante prototipos virtuales, utilizando el *software* Siemens NX ®. Posterior a ello, se dimensionó el robot teniendo en cuenta parámetros como destreza y volumen útil. Para el año 2014, se realizó un modelo conceptual bajo los criterios de DFMA (Diseño para la Fabricación y el Montaje) [31], este modelo se puede observar en la figura 1-16:

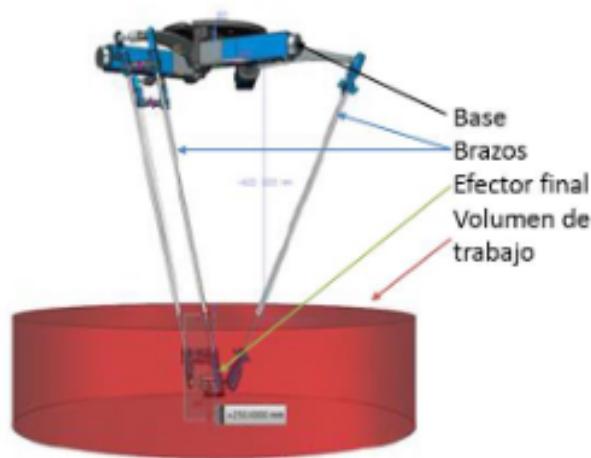


Figura 1-16: Prototipo semi-industrial de robot delta. [31]

1.1.8. Procesos de automatización

Tradicionalmente, la industria ha usado herramientas y modelos secuenciales para el desarrollo de proyectos de ingeniería de automatización. A continuación, se muestran las etapas típicas de ejecución de un proceso de desarrollo industrial:

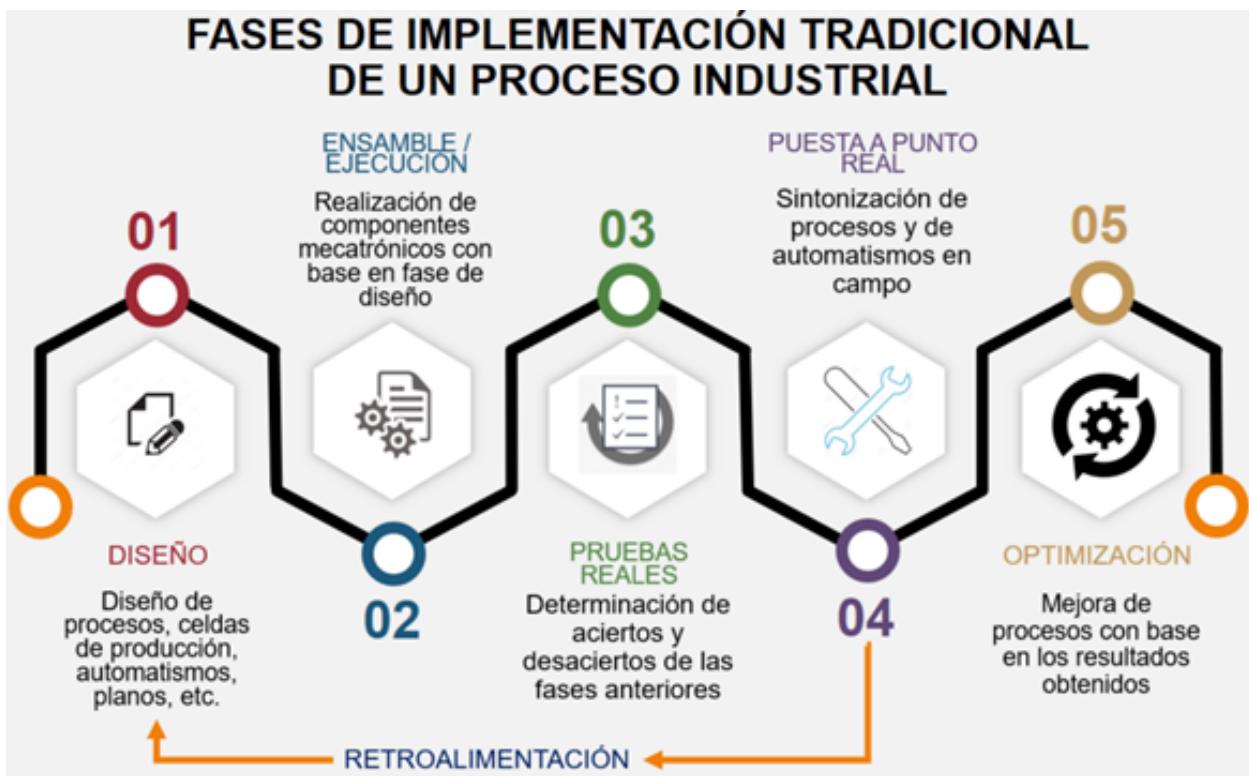


Figura 1-17: Fases de implementación tradicional de un proceso de ingeniería. [Autor]

Con la metodología tradicional de desarrollo, para llegar a ejecutar las fases de pruebas y puesta a punto es necesario que toda la infraestructura mecatrónica se encuentre totalmente finalizada. Esto ocasiona que la fase de puesta a punto sea ejecutada solamente al finalizar todas las etapas anteriores, aumentando los tiempos de entrega del proyecto. Debido a esto, no es posible detectar o determinar con antelación fallas en el diseño que involucren modificaciones, reprocesos o rediseño de componentes tanto físicos como de programación, retrasando considerablemente la finalización del proyecto, causando pérdidas económicas y disminuyendo la productividad general del proyecto.

1.1.9. Industria 4.0

Con el fin de comprender la historia de la evolución de la industria, en la figura 1-18 se muestra un resumen de las grandes revoluciones industriales:

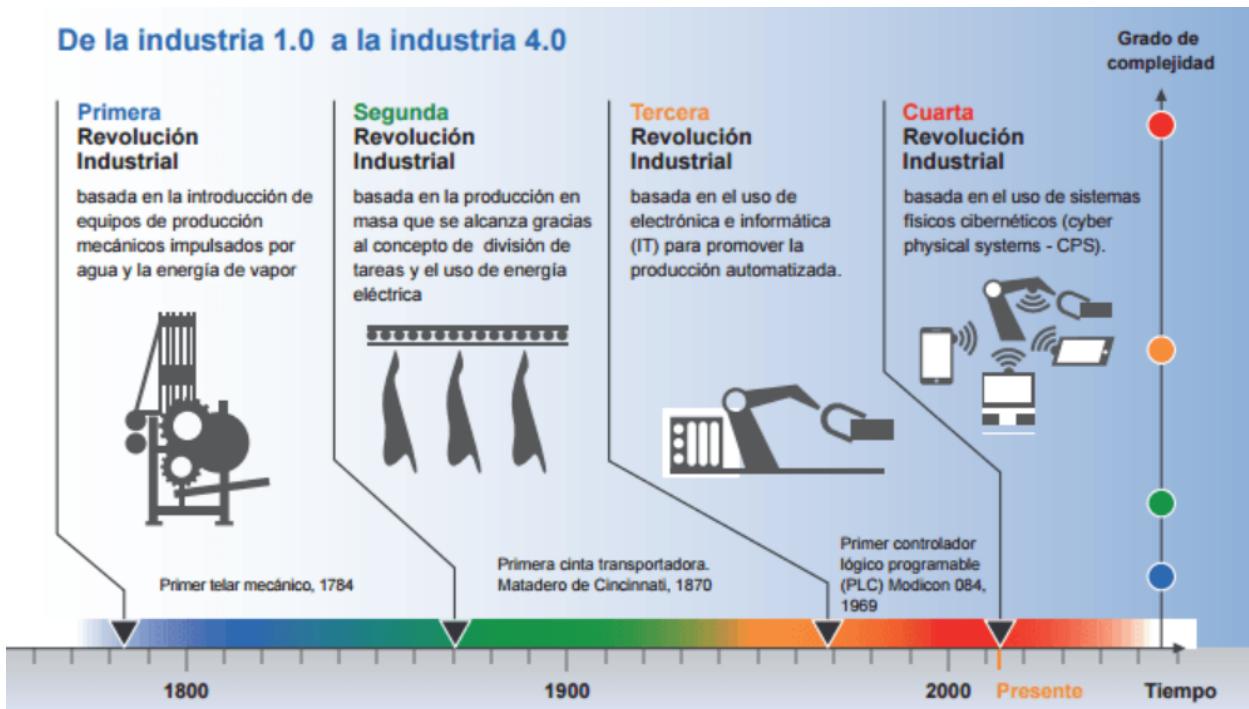


Figura 1-18: Historia de las revoluciones industriales. [28]

En la más reciente revolución industrial, denominada “Industria 4.0” o cuarta revolución industrial, uno de los puntos clave que se exploran son las denominadas fábricas inteligentes, con lo que se busca, por medio del uso de herramientas computacionales, aumentar la adaptabilidad y eficiencia de los procesos de producción industrial.

Adicionalmente, para identificar más concretamente los entes involucrados en la Industria 4.0, se presenta la figura número **1-19**:



Figura 1-19: Industria 4.0. [28]

En este caso, se pueden resaltar componentes importantes que vienen siendo implementados y desarrollados desde la tercera revolución industrial, como robótica y simulación, pero ahora llevados a un escalón superior en la Industria 4.0 con la denominada robótica avanzada y con un término más reciente: sistemas ciberfísicos, los cuales ofrecen la capacidad de interactuar elementos virtuales con elementos físicos. Cabe recalcar que en las últimas décadas estas nuevas tecnologías han ido evolucionando continuamente y su adopción ha sido paulatina, en donde los países más industrializados han acogido más rápido las ventajas que estas ofrecen. Países emergentes como Colombia han tenido un proceso de adaptación e implementación de tecnologías de punta bastante lento, aumentando la brecha de producción frente a países más industrializados.

1.1.10. Sistemas ciberfísicos / Cyber-Physical Systems (CPS)

Un sistema ciberfísico o CPS por sus siglas en inglés de *Cyber-Physical Systems*, es todo aquel dispositivo que integra capacidades de computación, almacenamiento y comunicación con el fin de monitorear y/o controlar objetos del mundo físico. Los sistemas ciberfísicos están, normalmente, conectados entre sí y a su vez conectados con el mundo virtual de las

redes digitales globales, en donde interactúan redes, computación cibernética y procesos físicos [33]. Un sistema ciberfísico puede estar formado por sensores, por dispositivos IoT o por máquinas como robots los cuales van interconectados a elementos de *software* permitiendo un incremento en la capacidad de procesamiento, mejora de la conectividad e interoperatividad, sistemas de almacenamiento de información, aplicaciones de inteligencia artificial, entre otros.

Con el fin de mejorar y modernizar los modelos de ejecución de proyectos de automatización, empresas de automatización y de desarrollo de herramientas de ingeniería como Siemens AG y SMC Corporation, han visto la necesidad de explorar y ofrecer nuevas herramientas virtuales y computaciones con el fin de ofrecer a los ingenieros de diseño y desarrollo la capacidad de optimizar procesos industriales integrando herramientas virtuales, físicas, de simulación, predicción, redes de sensores para monitoreo y aprendizaje de máquina, inteligencia artificial, entre otros. Para llevar a cabo esto se desarrollaron herramientas computacionales que interactúan con elementos físicos, permitiendo optimizar los desarrollos mecatrónicos y en general los procesos de ejecución de proyectos. Dentro de estas tecnologías están los denominados sistemas ciberfísicos.

Suplementario a las herramientas netamente virtuales ampliamente utilizadas en la industria desde hace años, en donde la interacción con elementos reales es limitada y se basa en motores matemáticos de simulación, actualmente existen los sistemas ciberfísicos. En los sistemas ciberfísicos los procesos virtualizados intercambian información con elementos reales por medio de sistemas de comunicaciones; ofrecen la capacidad de adquirir datos y simular los comportamientos físicos reales, como por ejemplo, la gravedad y la inercia. Adicionalmente, permiten trabajar directamente con el ambiente real de operación.

Con esto, es posible comprobar programas de automatismos con modelos 3D antes de ser llevados a producción, ofreciendo, por medio de procesos ejecutados en paralelo, la capacidad de detección temprana de errores y permitiendo optimizar las tareas antes de la ejecución real de un proyecto. Además, da la posibilidad de realizar pruebas de prototipos sin incurrir en grandes gastos económicos, de tiempo y de esfuerzo, con el fin de comprobar la eficiencia y viabilidad de nuevos desarrollos.

A continuación, se presenta un modelo de desarrollo de proyecto industrial mediante el uso de sistemas ciberfísicos:

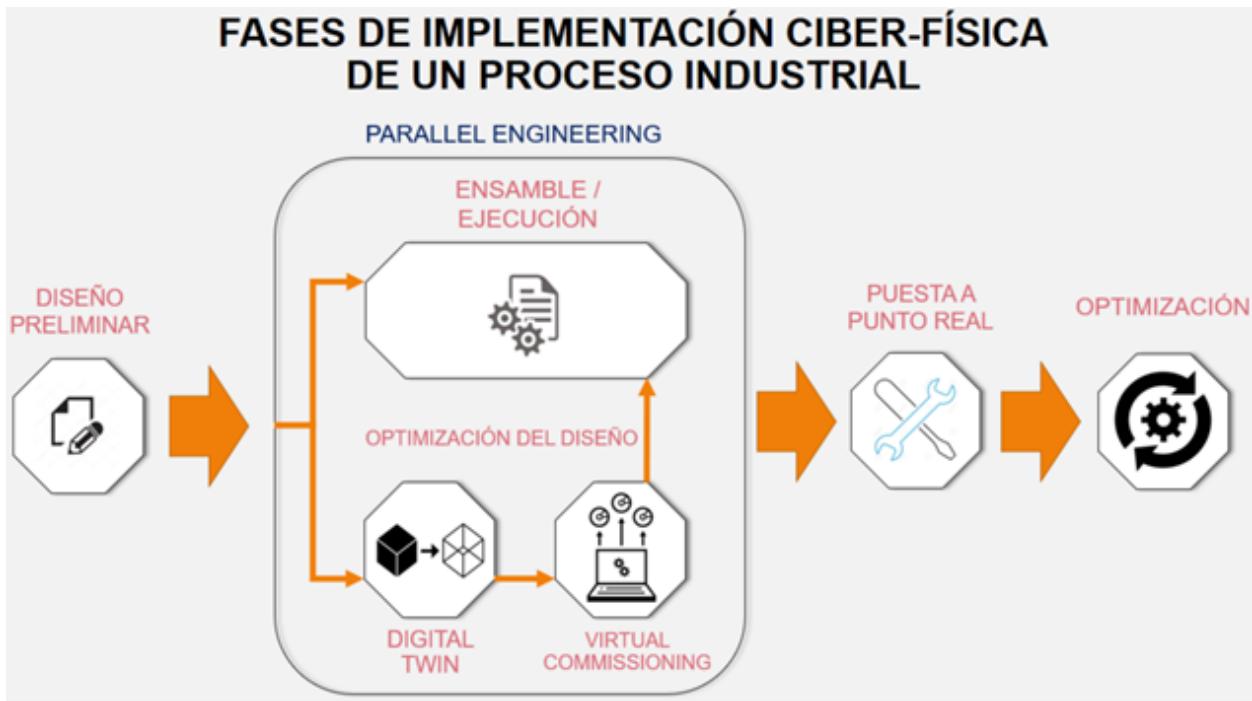


Figura 1-20: Proceso industrial usando sistemas ciberfísicos. [Autor]

Empresas innovadoras y con tecnología de punta como Boeing Company, en el ámbito de la aviación; Tesla Motors Inc., en el área automotriz y la NASA (National Aeronautics and Space Administration), en el mundo aero-espacial, recurren a los sistemas ciberfísicos con el fin de mejorar sus diseños, predecir el comportamiento de sus productos, mejorar sus procesos de producción, minimizar fallas de producción y disminuir tiempos de desarrollo.

Debido a que en general las compañías colombianas se centran especialmente en satisfacer las necesidades básicas del mercado local, el uso de herramientas tecnológicas como sistemas ciberfísicos, IoT (siglas en inglés de *Internet of Things*) (Internet de las Cosas), CC (computación en la nube) y redes de sensores son bastante limitados; debido algunas veces por desconocimiento de la existencia de dichas tecnologías, pocas habilidades para su desarrollo e implementación, falta de investigación en esos ámbitos y por la inversión monetaria o de tiempo que implica.

1.2. Justificación

La industria colombiana tiene la oportunidad de incentivar desarrollos industriales propios con el fin de adoptar tecnologías existentes y poder alcanzar el umbral en donde se empiece a generar nuevos conocimientos. Debido a estos retos y adicionalmente al constante desarrollo

de la tecnología, todos los países, especialmente los países emergentes como Colombia, deben avanzar lo más rápidamente posible e integrarse a la nueva era de la industria denominada “Industria 4.0”.

Teniendo en cuenta los niveles de eficiencia requerida en la industria moderna y en el caso particular, el deseo de impulsar la economía colombiana, se evidencia la necesidad de optimizar la ejecución de proyectos de ingeniería y mejorar los niveles de producción por medio de procesos automatizados y tareas robotizadas. Para llevar a cabo esta tarea, se propone incentivar la enseñanza de tecnologías propias de la Industria 4.0, con el objetivo de que el alumno aprenda a resolver problemas y necesidades de ingeniería de manera eficiente por medio de herramientas del siglo XXI; las cuales le brinden la posibilidad de enfrentarse de manera práctica y objetiva a tareas reales de automatización industrial.

Analizando las tecnologías disponibles, en el presente trabajo se pretende abordar dos temas importantes incluidos dentro de la Industria 4.0: Robótica Industrial y Sistemas Ciberfísicos.

Basado en esto, y en el caso específico del área de enseñanza de robótica industrial de la Universidad Nacional de Colombia, se evidencia que la sede Bogotá tan solo cuenta con robots industriales de tipo serial, pero carece de robots funcionales de arquitectura paralela tipo delta que permitan su enseñanza o investigación. Se resalta, que en años anteriores en la universidad se han venido realizando trabajos de desarrollo de este tipo de robots, pero enfocados más a temas de análisis matemáticos y simulaciones, en donde en muchas ocasiones no se logran obtener prototipos funcionales o simplemente los trabajos desarrollados son netamente teóricos.

Adicionalmente, el programa de mecatrónica no dispone de herramientas que involucren procesos industriales a nivel de fábrica; por lo tanto, todas las labores de enseñanza se limitan a la resolución de problemas o necesidades de tareas específicas y limitadas, impidiendo que los estudiantes tengan la oportunidad de ver la globalidad de los posibles problemas o necesidades de una planta de producción. En consecuencia, se evidencia que la universidad puede recurrir al uso de las ventajas que ofrecen los sistemas ciberfísicos en donde el estudiante pueda emular un proceso industrial, integrando elementos virtuales con algunos de los elementos físicos disponibles en los laboratorios.

1.3. Pregunta de investigación

Debido a las falencias o necesidades encontradas, una posible solución viable y económica es la de crear una fábrica virtual que permita recrear ambientes industriales completos integrados a elementos reales. En este caso, para mejorar las labores de enseñanza en el área

de robótica de la universidad, se propone desarrollar un robot de arquitectura paralela tipo Delta e integrarlo a la fábrica virtual propuesta, con el fin de que los alumnos puedan hacer uso de los sistemas ciberfísicos y a su vez aprender sobre plataformas robóticas paralelas.

Partiendo de los problemas y necesidades evidenciados anteriormente, se plantea el siguiente interrogante:

¿Es posible integrar una plataforma robotizada de arquitectura paralela tipo Delta con un modelo de fábrica virtual?

1.4. Aplicación industrial

En el presente trabajo se propone diseñar y fabricar un robot de arquitectura paralela tipo delta totalmente funcional y mediante el uso de sistemas ciberfísicos, realizar una interacción entre el robot real y un proceso de *pick and place* virtual haciendo uso de las herramientas del programa Siemens NX Mechatronics Concept Designer ®.

Dentro del ejercicio virtual, se propone la detección y organización mediante el uso del robot delta de artículos basados en su forma, los cuales viajan de una zona de producción a otra por medio de bandas transportadoras. El objetivo del ejercicio propuesto, es hacer que el gemelo digital se comunique con el controlador de movimiento del robot real y que todos los movimientos ejecutados por el robot real sean visualizados en el modelo digital con el fin de certificar velocidades del sistema de selección de objetos, posibles colisiones, etc. La generación de trayectorias y cálculo de cinemáticas directa e inversa serán calculadas por el controlador de movimiento real.

1.5. Alcances y delimitaciones

Se propone el diseño y la fabricación de un prototipo funcional con las operaciones básicas de un robot delta de tres grados de libertad, intentando usar al máximo los recursos disponibles en el laboratorio de automatización de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, y los avances de los trabajos previos realizados por otros estudiantes.

Dentro del alcance no se contempla la fabricación de bandas transportadoras, la ejecución real del proceso de *pick and place*, la adición de *grippers* al robot, ni la implementación de más grados de libertad. Los elementos adicionales a las funciones básicas del robot serán netamente virtuales, haciendo uso de las herramientas de integración que ofrecen los sis-

temas ciberfísicos. No se evaluarán otras opciones de integración de gemelos digitales con dispositivos físicos, aparte de la solución ofrecida por el programa Siemens NX Mechatronics Concept Designer ®, debido a que la Universidad Nacional de Colombia cuenta con licencias para su uso; por lo tanto, se deben contemplar algunas posibles limitaciones con que cuente el programa como los protocolos de comunicación disponibles, entre otros.

Debido a que los recursos económicos disponibles son limitados, se requiere hacer uso de elementos industriales de costo asequible, pero que cumplan con las expectativas planteadas en el proyecto y que permitan tener un prototipo funcional e industrial de código abierto. Esto, con el fin de que otros estudiantes puedan continuar con su desarrollo y que ofrezca una herramienta práctica de enseñanza para las clases de robótica industrial de la universidad.

2

Descripción del manipulador

En este capítulo se hace una introducción a los robots delta, se describen sus elementos principales, incluyendo dimensiones y ángulos entre los diferentes elementos del robot. Se presenta el análisis geométrico del robot, así como una solución de la cinemática directa e inversa. Se muestra el análisis dinámico, singularidades, destreza y espacio de trabajo.

2.1. Descripción del robot delta

Un robot delta de tres grados de libertad está compuesto por tres cadenas cinemáticas o brazos independientes sujetos en paralelo a 120° (ángulo ψ) (ver figuras 2-2 y 2-3) a una base fija localizada en la parte superior y a una plataforma móvil localizada en la parte inferior, en la cual se encuentra el efecto final, tal y como se puede apreciar en la figura 2-1:

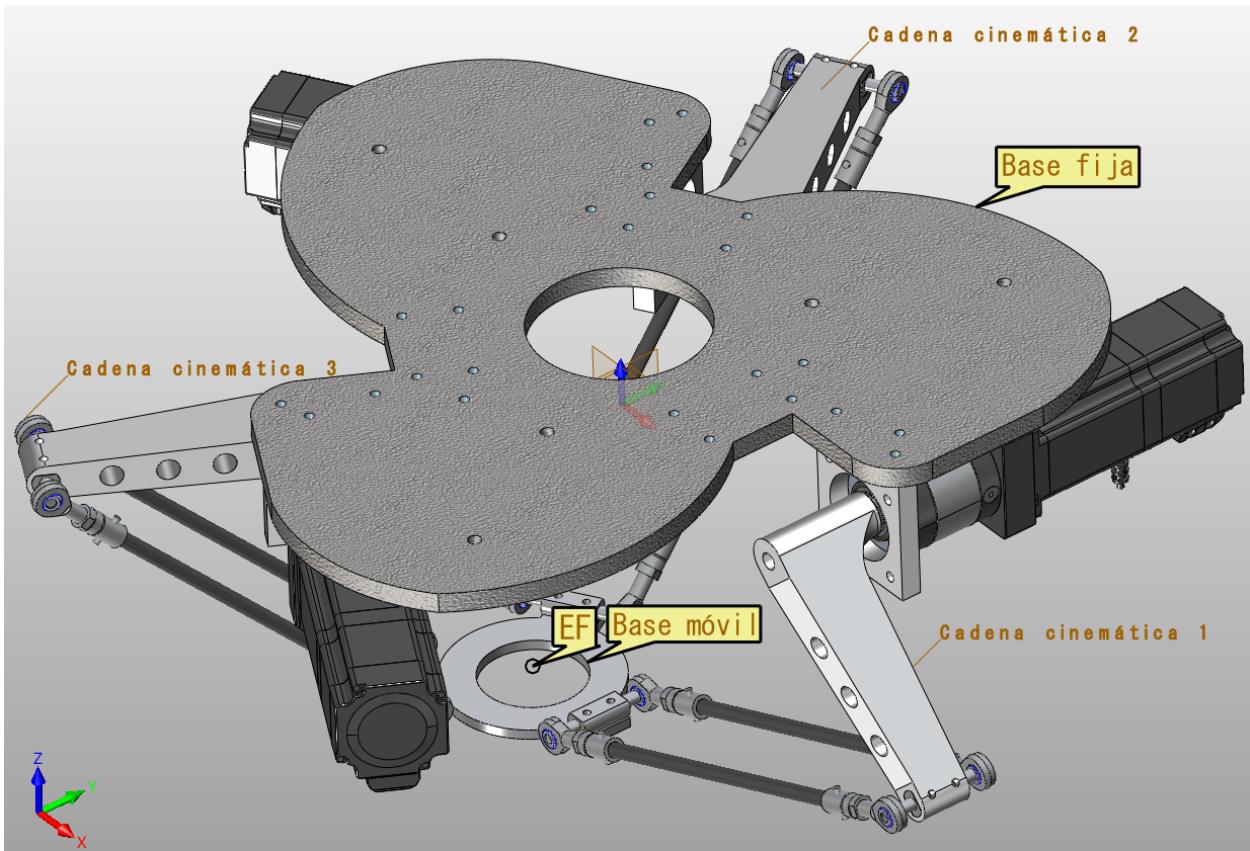


Figura 2-1: Bases del robot delta y cadenas cinemáticas. [Autor]

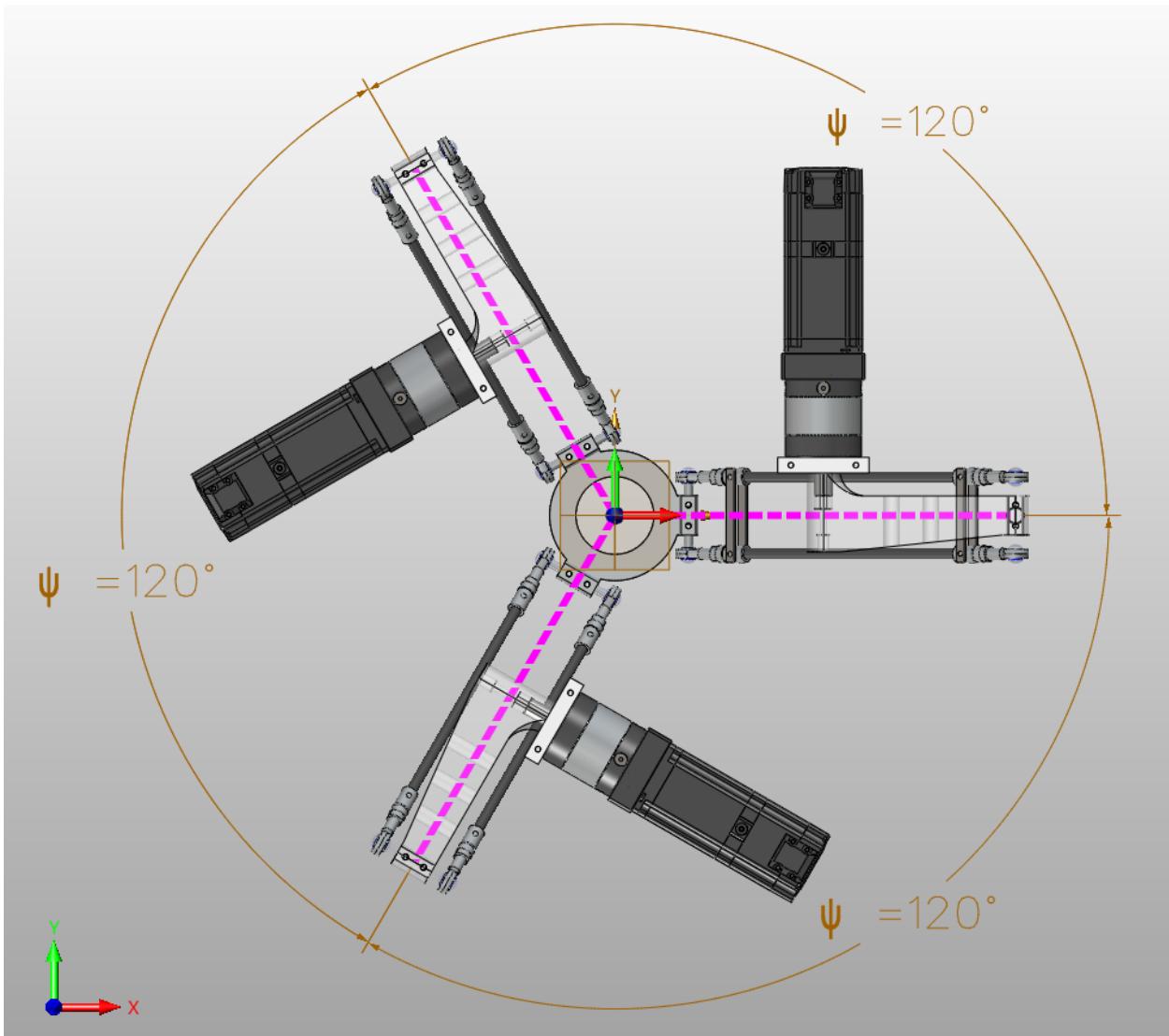


Figura 2-2: Vista en el plano XY de la distribución de las tres cadenas cinemáticas a 120° . [Autor]

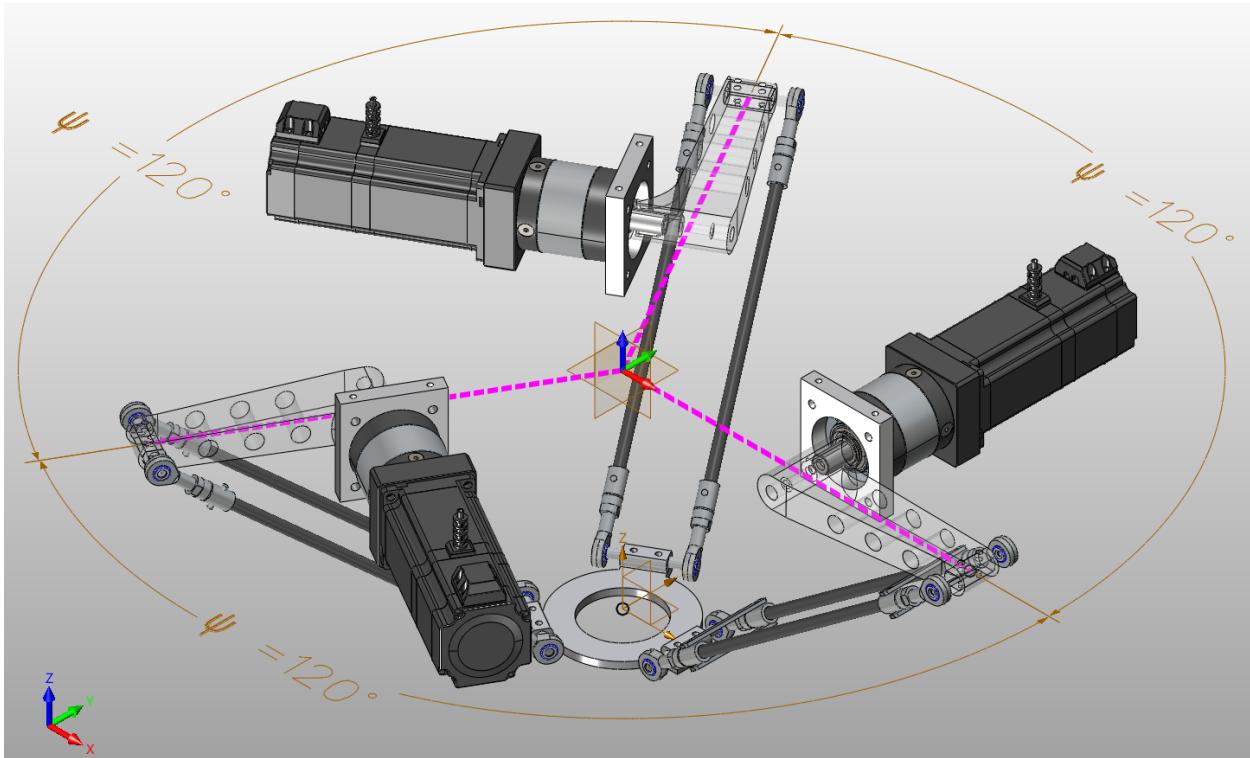


Figura 2-3: Distribución de las tres cadenas cinemáticas a 120° . [Autor]

Así como sucede en los brazos humanos, la unión de cada una de las cadenas cinemáticas del robot delta está dada por tres articulaciones principales: hombro, codo y muñeca. En las figuras **2-4** y **2-5**, se puede apreciar el caso del robot delta, en donde su brazo y antebrazo se denominan eslabón activo y eslabón pasivo respectivamente. Adicionalmente se puede observar los motorreductores que le dan movimiento a los eslabones activos (brazos):

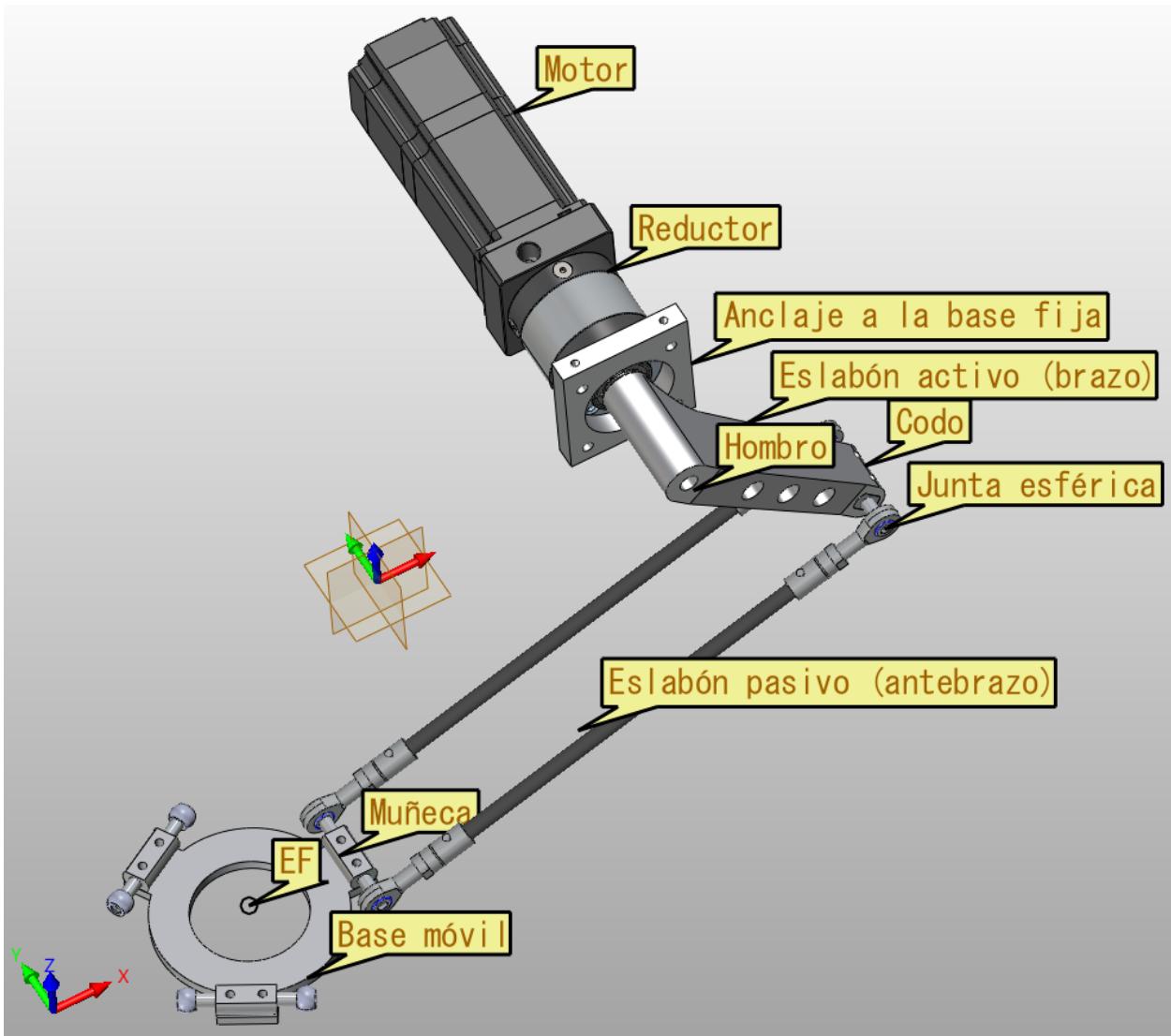


Figura 2-4: Descripción de una cadena cinemática del robot. [Autor]

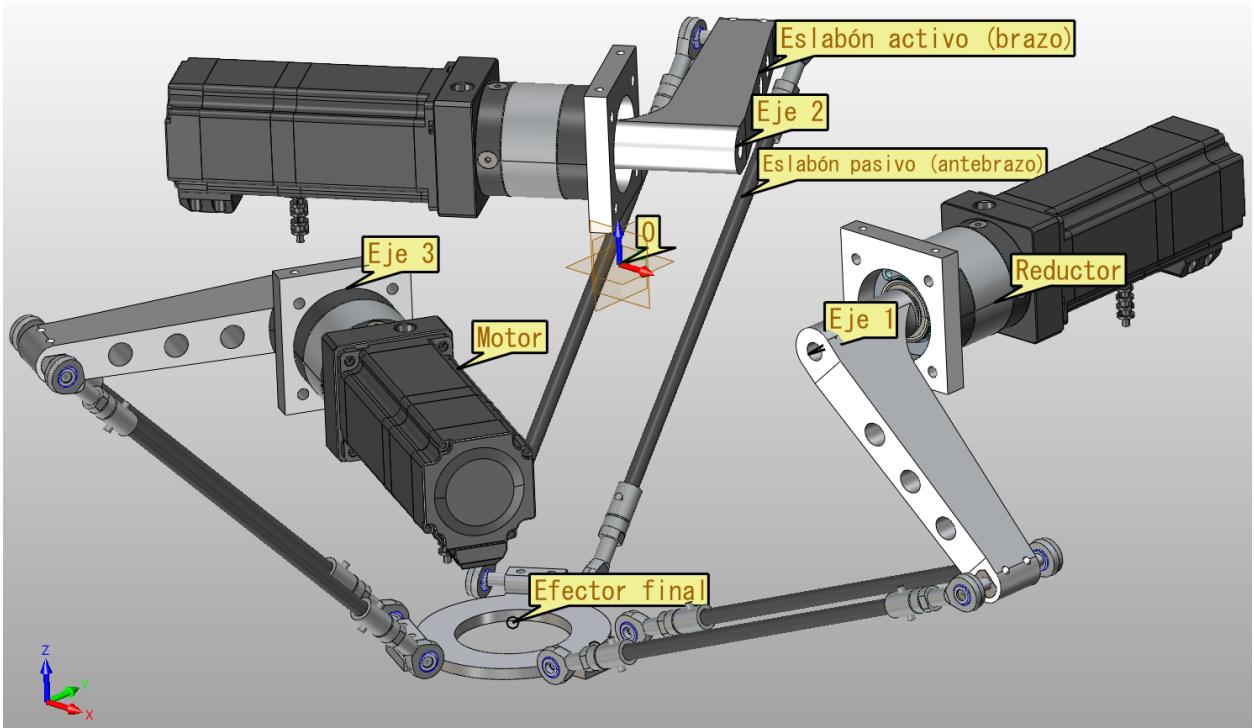


Figura 2-5: Elementos básicos del robot delta. [Autor]

Para el robot delta de tres grados de libertad, el efecto final tan solo realiza movimientos de translación X, Y, Z en un espacio de trabajo definido por las características y limitaciones del robot [25].

Para el caso específico del presente trabajo, la denominación de las posiciones de las articulaciones y la posición del efecto final se describen en la tabla 2-1:

Nomenclatura	Descripción	Valor
Ph_{ji}	Posición del hombro. $j = x, y, z, i = 1, 2, 3$	Fijo
Pc_{ji}	Posición del codo. $j = x, y, z, i = 1, 2, 3$	Variable
Pm_{ji}	Posición de la muñeca. $j = x, y, z, i = 1, 2, 3$	Variable
TCP_j	Tool Center Point (Punto central de la herramienta o efecto final). $j = x, y, z$	Variable

Tabla 2-1: Posiciones notables del robot delta.

La nomenclatura de las distancias más importantes presentes en el robot delta y las dimensiones de los eslabones se describen en la tabla 2-2:

Nomenclatura	Descripción	Valor
R_f	Distancia desde el origen hasta los hombros (radio base fija)	Fijo
La	Longitud de los eslabones activos	Fijo
L_p	Longitud de los eslabones pasivos	Fijo
R_m	Distancia desde las muñecas al TCP (radio base móvil)	Fijo
L_{hm_i}	Distancia entre el hombro y la muñeca. $i = 1, 2, 3$	Variable

Tabla 2-2: Distancias y dimensiones presentes en el robot delta.

En la figura 2-6 se pueden observar las distancias y dimensiones principales descritas en la tabla 2-2:

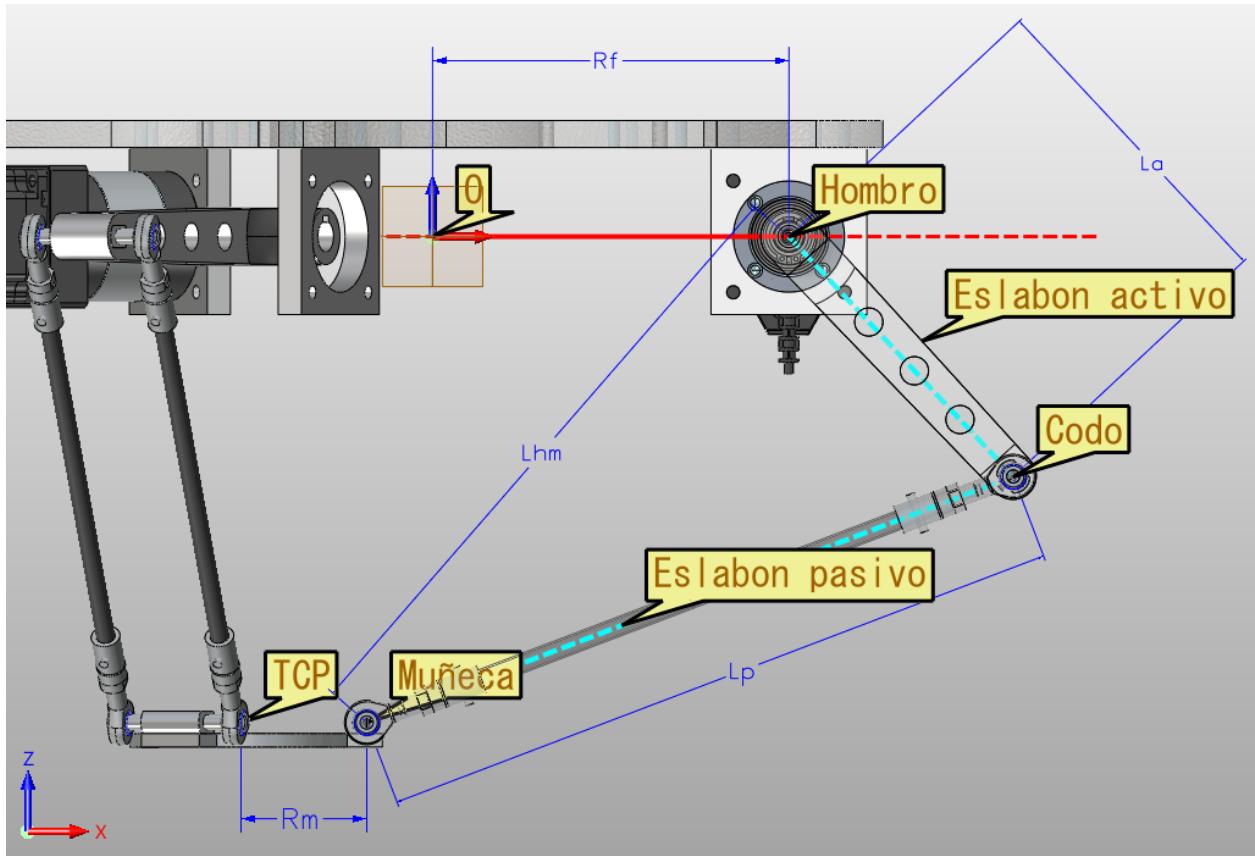


Figura 2-6: Cadena cinemática del robot delta. [Autor]

Los hombros o juntas giratorias superiores se controlan por medio de actuadores fijos (motorreductores) anclados a la base superior. Sus variables de control se denominan Θ_i $i = 1, 2, 3$. Al rotar los actuadores, las cadenas cinemáticas generan varios ángulos entre sus diversos

elementos. En la tabla **2-3** y en las figuras **2-7**, **2-8** y **2-9** se presentan los ángulos fundamentales generados por los diferentes elementos del robot para los análisis cinemáticos:

Nomenclatura	Descripción	Valor
θ_i	Ángulo entre el eje X del codo y el eslabón activo (ángulo del actuador). $i = 1, 2, 3$	Variable
β_i	Ángulo entre el eslabón activo y el vector generado desde el hombro hasta la muñeca visto desde el plano XZ del codo. $i = 1, 2, 3$	Variable
γ_i	Ángulo entre el vector generado desde el hombro hasta la muñeca y el vector generado desde el hombro hasta el origen del robot visto desde el plano xz del codo. $i = 1, 2, 3$	Variable
ϕ_i	Ángulo generado entre el eje Z del codo y el eslabón pasivo, visto desde el plano YZ del codo. $i = 1, 2, 3$	Variable

Tabla 2-3: Ángulos generados por los elementos del robot delta.

En la figura **2-7** se pueden observar los diferentes ángulos generados por el brazo activo de la cadena cinemática #1 visto desde el plano XZ . Se resalta que el punto de anclaje del brazo activo de la cadena cinemática #1 se encuentra sobre el eje x del robot.

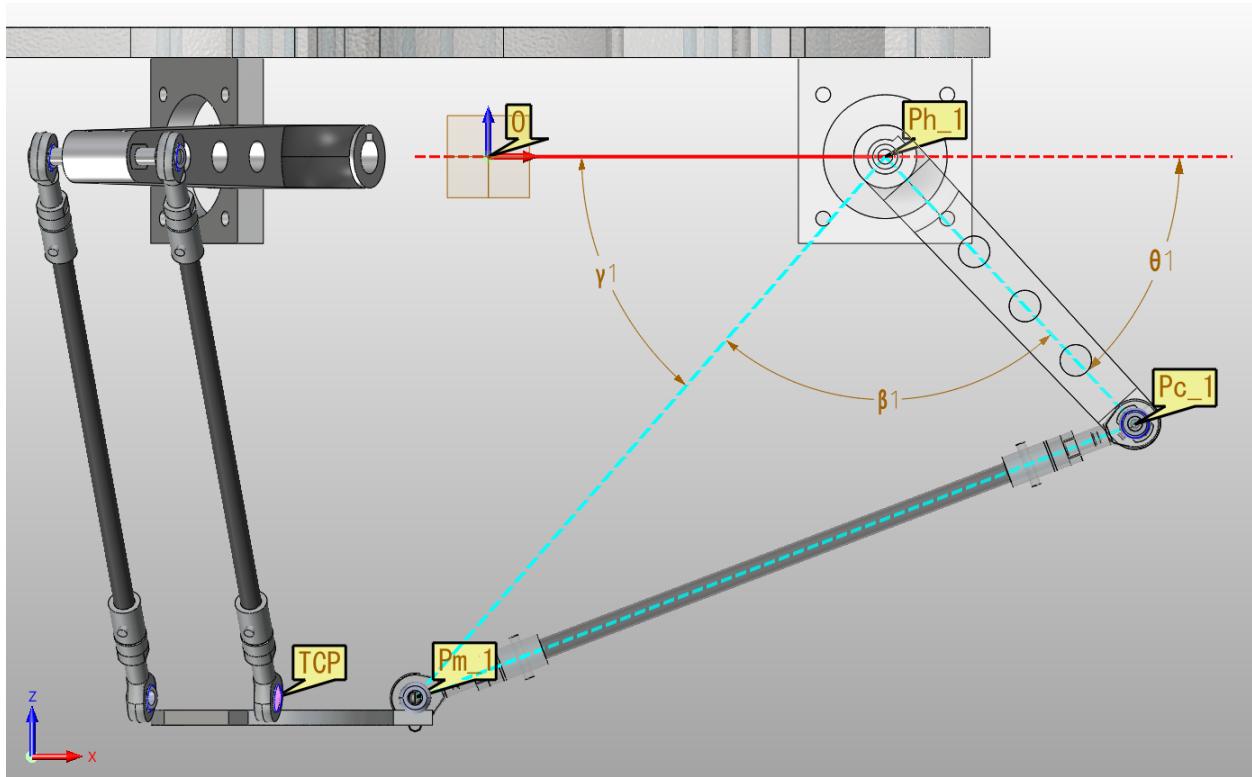


Figura 2-7: Descripción de los ángulos presentes en la cadena cinemática #1 [Autor]

Para mayor detalle y poder comprender correctamente el ángulo ϕ_1 , se muestra la figura 2-8, en donde se visualiza la cadena cinemática #1 vista desde el plano YZ y la figura 2-9 en donde se muestra una vista 3d de dicho ángulo, el cual es ocasionado por un desplazamiento de la base móvil, generando un ángulo alrededor del eje x .

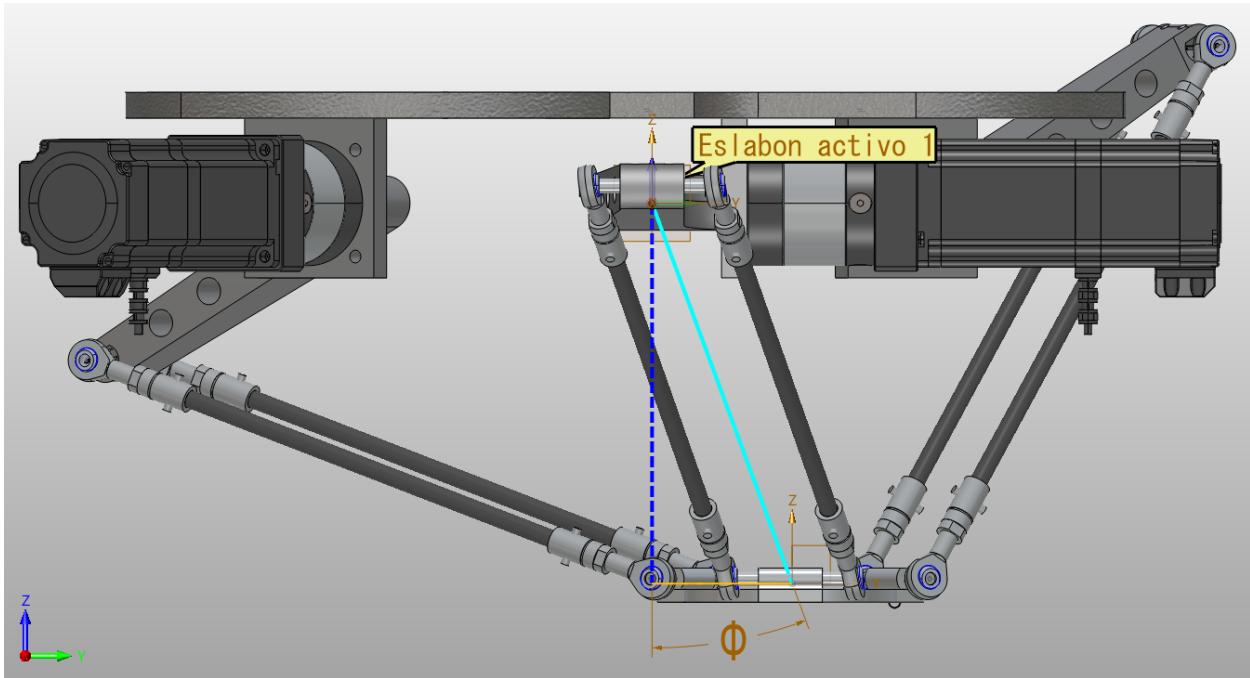


Figura 2-8: Ángulo ϕ de la cadena cinemática #1. [Autor]

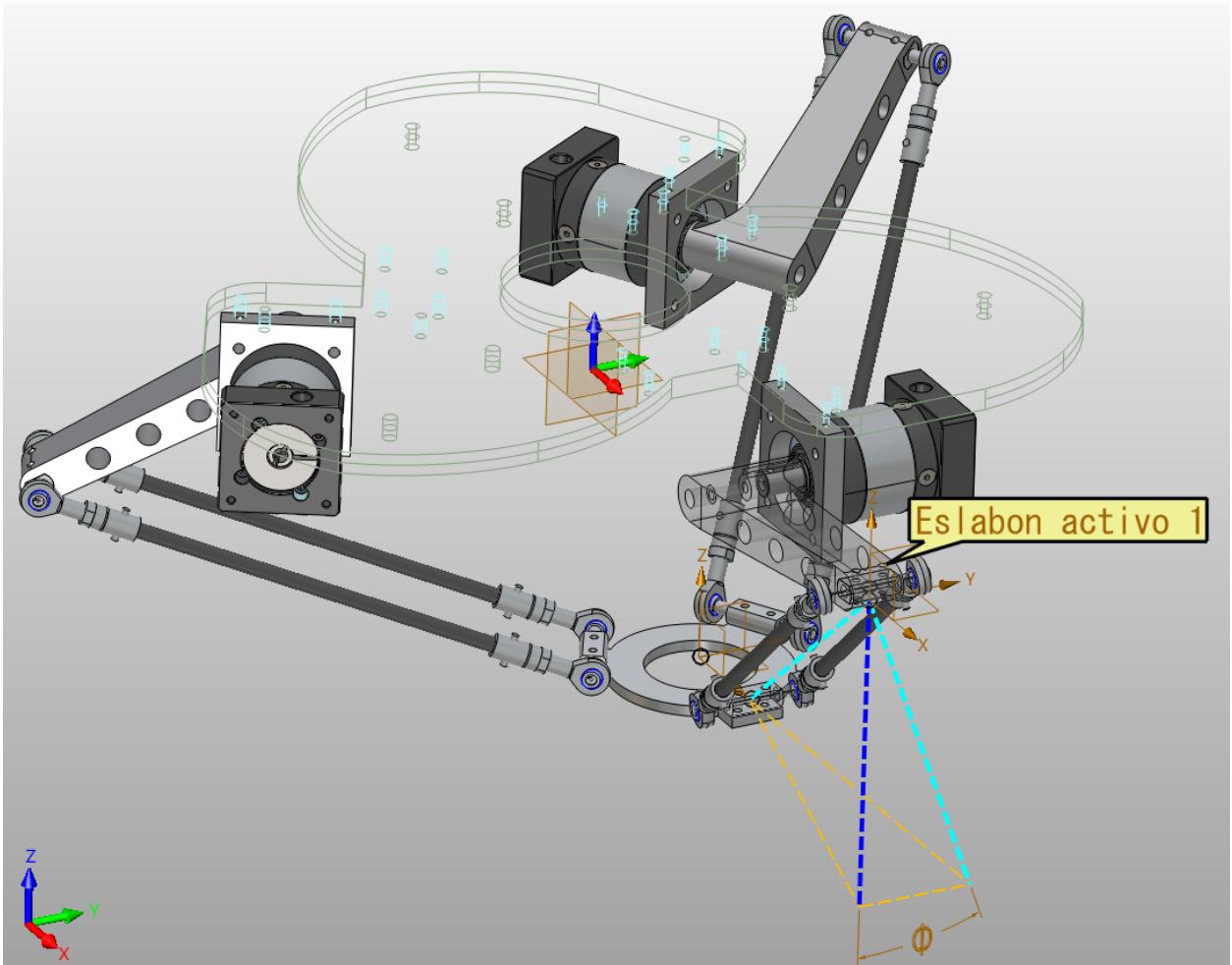


Figura 2-9: Ángulo ϕ de la cadena cinemática #1. [Autor]

2.2. Análisis geométrico del robot

Matrices de rotación: En robótica es posible hacer uso de matrices de rotación para representar rotaciones en el espacio. Existen 3 matrices de rotación para ejecutar rotaciones sobre los ejes XYZ . Las rotaciones se pueden representar con matrices 3×3 , pero con el fin de poder adicionalmente efectuar transformaciones de translación, en este caso utilizamos matrices 4×4 :

$$R(x, \lambda) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\lambda) & -\sin(\lambda) & 0 \\ 0 & \sin(\lambda) & \cos(\lambda) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

$$R(y, \delta) = \begin{bmatrix} \cos(\delta) & 0 & \sin(\delta) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\delta) & 0 & \cos(\delta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

$$R(z, \sigma) = \begin{bmatrix} \cos(\sigma) & -\sin(\sigma) & 0 & 0 \\ \sin(\sigma) & \cos(\sigma) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

Matriz de traslación: Representación de una traslación en coordenadas homogéneas:

$${}^{p1}T_{p2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & P_x \\ 0 & 1 & 0 & P_y \\ 0 & 0 & 1 & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

Por lo tanto, el vector de posición 2 con respecto al punto 1 es igual a:

$${}^{p1}P_{p2} = [P_x \ P_y \ P_z]^T \quad (2-5)$$

Matriz de transformación homogénea: Por medio de una matriz de transformación homogénea (matriz 4x4) es posible representar la posición y orientación de un sistema girado y trasladado con respecto a un sistema fijo. Se compone de 4 términos: Rotación (R_{3x3}), traslación (P_{3x1}), perspectiva (f_{1x3}) y escala (w_{1x1}):

$${}^{p1}MTH_{p2} = \begin{bmatrix} \text{Rotación} & \text{Traslación} \\ \text{Perspectiva} & \text{Escala} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{3x3} & P_{3x1} \\ f_{1x3} & w_{1x1} \end{bmatrix} \quad (2-6)$$

Para robótica se considera una perspectiva nula y una escala unitaria:

$$f_{1x3} = [0 \ 0 \ 0] \quad (2-7)$$

$$w_{1x1} = [1] \quad (2-8)$$

Rotación y traslación: Es el resultado de rotar con respecto a un eje fijo y posteriormente realizar un movimiento translacional. Para ejecutar la operación se procede a multiplicar la matriz de rotación (teniendo en cuenta sobre cuál eje se desea girar con su respectivo ángulo) y posteriormente realizar una traslación con respecto al nuevo marco de referencia. Su resultado es una matriz de transformación homogénea (matriz 4x4). Dependiendo de sobre cuál eje se efectúe la rotación se tiene:

Rotación sobre el eje X:

$${}^{p1}MTH_{p2} = R(x, \lambda) * {}^{p1}T_{p2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\lambda) & -\sin(\lambda) & 0 \\ 0 & \sin(\lambda) & \cos(\lambda) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & P_x \\ 0 & 1 & 0 & P_y \\ 0 & 0 & 1 & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-9)$$

$${}^{p1}MTH_{p2} = R(x, \lambda) * {}^{p1}T_{p2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & P_x \\ 0 & \cos(\lambda) & -\sin(\lambda) & P_y * \cos(\lambda) - P_z * \sin(\lambda) \\ 0 & \sin(\lambda) & \cos(\lambda) & P_z * \cos(\lambda) + P_y * \sin(\lambda) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-10)$$

Rotación sobre el eje Y:

$${}^{p1}MTH_{p2} = R(y, \delta) * {}^{p1}T_{p2} = \begin{bmatrix} \cos(\delta) & 0 & \sin(\delta) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\delta) & 0 & \cos(\delta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & P_x \\ 0 & 1 & 0 & P_y \\ 0 & 0 & 1 & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-11)$$

$${}^{p1}MTH_{p2} = R(y, \delta) * {}^{p1}T_{p2} = \begin{bmatrix} \cos(\delta) & 0 & \sin(\delta) & P_x * \cos(\delta) + P_z * \sin(\delta) \\ 0 & 1 & 0 & P_y \\ -\sin(\delta) & 0 & \cos(\delta) & P_z * \cos(\delta) - P_x * \sin(\delta) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-12)$$

Rotación sobre el eje Z:

$${}^{p1}MTH_{p2} = R(z, \sigma) * {}^{p1}T_{p2} = \begin{bmatrix} \cos(\sigma) & -\sin(\sigma) & 0 & 0 \\ \sin(\sigma) & \cos(\sigma) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & P_x \\ 0 & 1 & 0 & P_y \\ 0 & 0 & 1 & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-13)$$

$${}^{p1}MTH_{p2} = R(z, \sigma) * {}^{p1}T_{p2} = \begin{bmatrix} \cos(\sigma) & -\sin(\sigma) & 0 & P_x * \cos(\sigma) - P_y * \sin(\sigma) \\ \sin(\sigma) & \cos(\sigma) & 0 & P_x * \sin(\sigma) - P_y * \cos(\sigma) \\ 0 & 0 & 1 & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-14)$$

2.3. Análisis cinemático

De manera general, la cinemática estudia el movimiento y trayectoria de objetos o cuerpos sin tener en cuenta las fuerzas de origen. Esta se centra en el análisis de la posición, velocidad y aceleración de los mismos en función del tiempo. En los robots de arquitectura paralela, la cinemática se estudia con respecto a un sistema de referencia y permite la descripción analítica del movimiento en el espacio en función del tiempo y establece una relación matemática de la localización del extremo del robot con sus valores articulares [26].

Este tipo de cinemática se puede realizar de dos maneras: por métodos directos o inversos. La cinemática directa permite encontrar el valor de las coordenadas del TCP_j , es decir, la posición del efecto final con respecto al origen del robot, partiendo de ángulos definidos de los actuadores θ_i .

Para simplificar el análisis cinemático del robot, se utiliza la representación simplificada de alambres, tal y como se ilustra en las figuras **2-10** y **2-11**, en donde se pueden apreciar los elementos y posiciones básicas del robot delta:

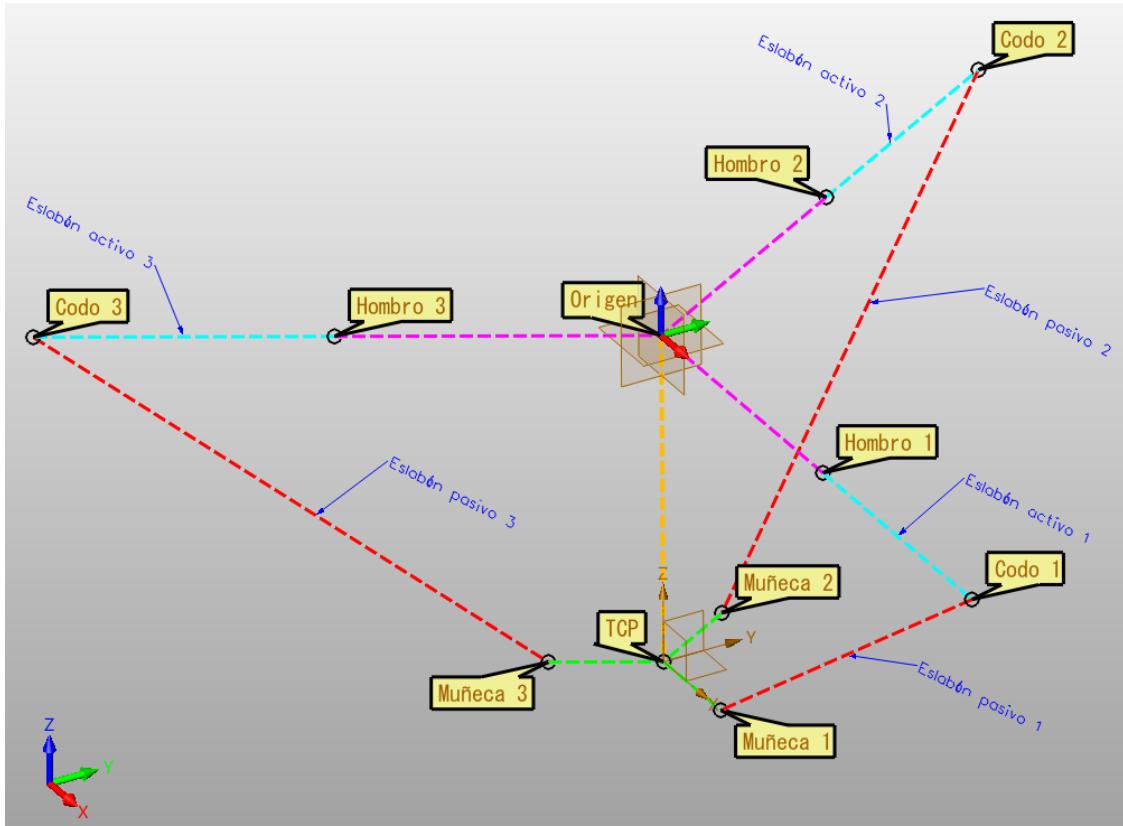


Figura 2-10: Representación simplificada mediante diagrama de alambres. [Autor]

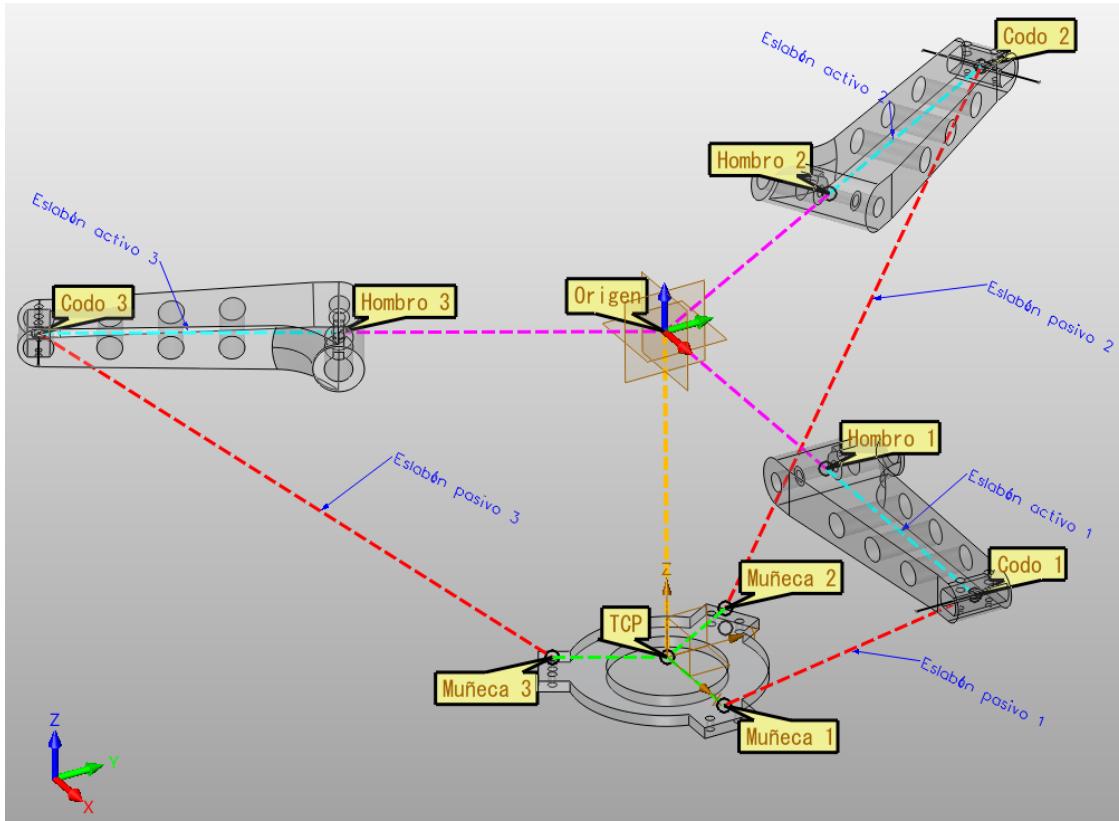


Figura 2-11: Representación simplificada mediante diagrama de alambres. [Autor]

2.3.1. Solución cinemática directa

Existen diversos métodos para realizar la cinemática directa, sin embargo, el método implementado en este documento es el “método de intersección de tres esferas”, el cual se explica a continuación:

Inicialmente, se procede a calcular las posiciones x, y, z de los tres hombros, las cuales son posiciones constantes del robot tal y como se puede observar en la figura 2-12:

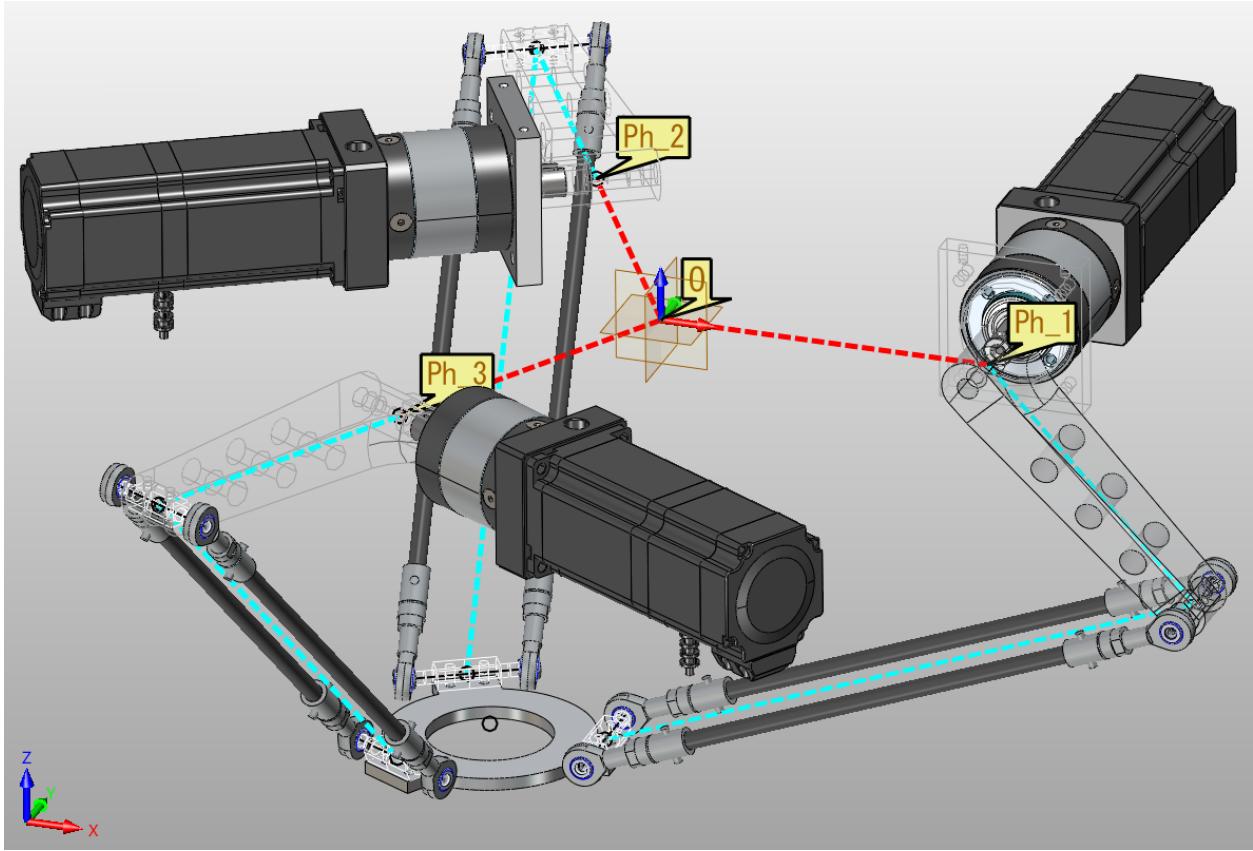


Figura 2-12: Posiciones de los hombros. [Autor]

Luego, partiendo de valores conocidos de los ángulos θ_i de los actuadores, los cuales modifican el ángulo de los eslabones activos, se procede a calcular las posiciones de los tres codos.

Posteriormente, desde las posiciones de los codos, se proyectan tres vectores de magnitud igual al radio de la base móvil Rm que apunten hacia el origen del robot. Partiendo de esos 3 vectores, tomamos las componentes paralelas al plano XY del robot. A continuación usamos los extremos de dichos vectores resultantes como centros de tres esferas de radio Lp .

Al momento de generar 3 esferas, y mientras el efecto final se encuentre dentro del espacio de trabajo, se generan 2 puntos en donde se intersecan las 3 esferas. Para el caso práctico del robot delta, se hace uso del punto de intersección inferior de las tres esferas, siendo este punto el TCP_j (posición x, y, z del efecto final).

- **Paso 1: Cálculo de las posiciones de los hombros con respecto al origen del robot (posiciones constantes del robot).**

Para obtener las posiciones x, y, z de los tres hombros vistos desde el origen ${}^0P_{h_i}$, se realizan rotaciones sobre el eje Z de 0° , 120° y 240° respectivamente (ángulos ψ_i). Luego,

se realiza una traslación sobre cada uno de los nuevos marcos de referencia, correspondientes a la longitud del radio fijo R_f hasta alcanzar las posiciones de los tres hombros.

Cabe resaltar que dichas posiciones son fijas o constantes, ya que se encuentran sobre el eje de los actuadores, los cuales van anclados a la base fija.

$${}^0MTH_{h_i} = R(z, \psi_i) * T(x, R_f) = \begin{bmatrix} \cos(\psi_i) & -\sin(\psi_i) & 0 & P_x * \cos(\psi_i) - P_y * \sin(\psi_i) \\ \sin(\psi_i) & \cos(\psi_i) & 0 & P_x * \sin(\psi_i) - P_y * \cos(\psi_i) \\ 0 & 0 & 1 & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-15)$$

Hombro 1 con respecto al origen del robot:

$${}^0MTH_{h_1} = R(z, 0^\circ) * T(x, R_f) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & R_f \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-16)$$

Por lo tanto:

$${}^0P_{h_1} = [R_f \ 0 \ 0]^T \quad (2-17)$$

Esto mismo procedimiento se aplica para el hombro 2 y 3, teniendo en cuenta las rotaciones de 120° y 240° respectivamente.

Hombro 2 con respecto al origen del robot:

$${}^0MTH_{h_2} = R(z, 120^\circ) * T(x, R_f) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} & -\frac{3^{1/2}}{2} & 0 & -\frac{R_f}{2} \\ \frac{3^{1/2}}{2} & -\frac{1}{2} & 0 & \frac{3^{1/2}R_f}{2} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-18)$$

Por lo tanto:

$${}^0P_{h_2} = [-\frac{R_f}{2} \ \frac{3^{1/2}R_f}{2} \ 0]^T \quad (2-19)$$

Hombro 3 con respecto al origen del robot:

$${}^0MTH_{h_3} = R(z, 240^\circ) * T(x, R_f) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} & \frac{3^{1/2}}{2} & 0 & -\frac{R_f}{2} \\ -\frac{3^{1/2}}{2} & -\frac{1}{2} & 0 & -\frac{3^{1/2}R_f}{2} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-20)$$

Por lo tanto:

$${}^0P_{h_3} = \left[\begin{array}{ccc} -\frac{R_f}{2} & -\frac{3^{1/2}R_f}{2} & 0 \end{array} \right]^T \quad (2-21)$$

- **Paso 2: Cálculo de las posiciones de los codos con su respectivo hombro.**

Una vez calculada la posición de las articulaciones superiores del robot (hombros), se podrá calcular la posición de los codos (articulaciones medias). En esta ocasión se toma como punto de referencia la posición del respectivo hombro, sobre el plano *XY* perpendicular al eje de su respectivo actuador. Desde este punto se realiza una rotación sobre el eje *Y* con un ángulo θ_i y se realiza una traslación de magnitud *La* tal y como se ilustra en la figura 2-13.

Se resalta que debido a que la rotación a efectuar es sobre el eje *Y*, y por la ley de la mano derecha, los ángulos θ_i positivos corresponde al movimiento en el sentido horario con el dedo pulgar apuntando hacia dentro de la gráfica.

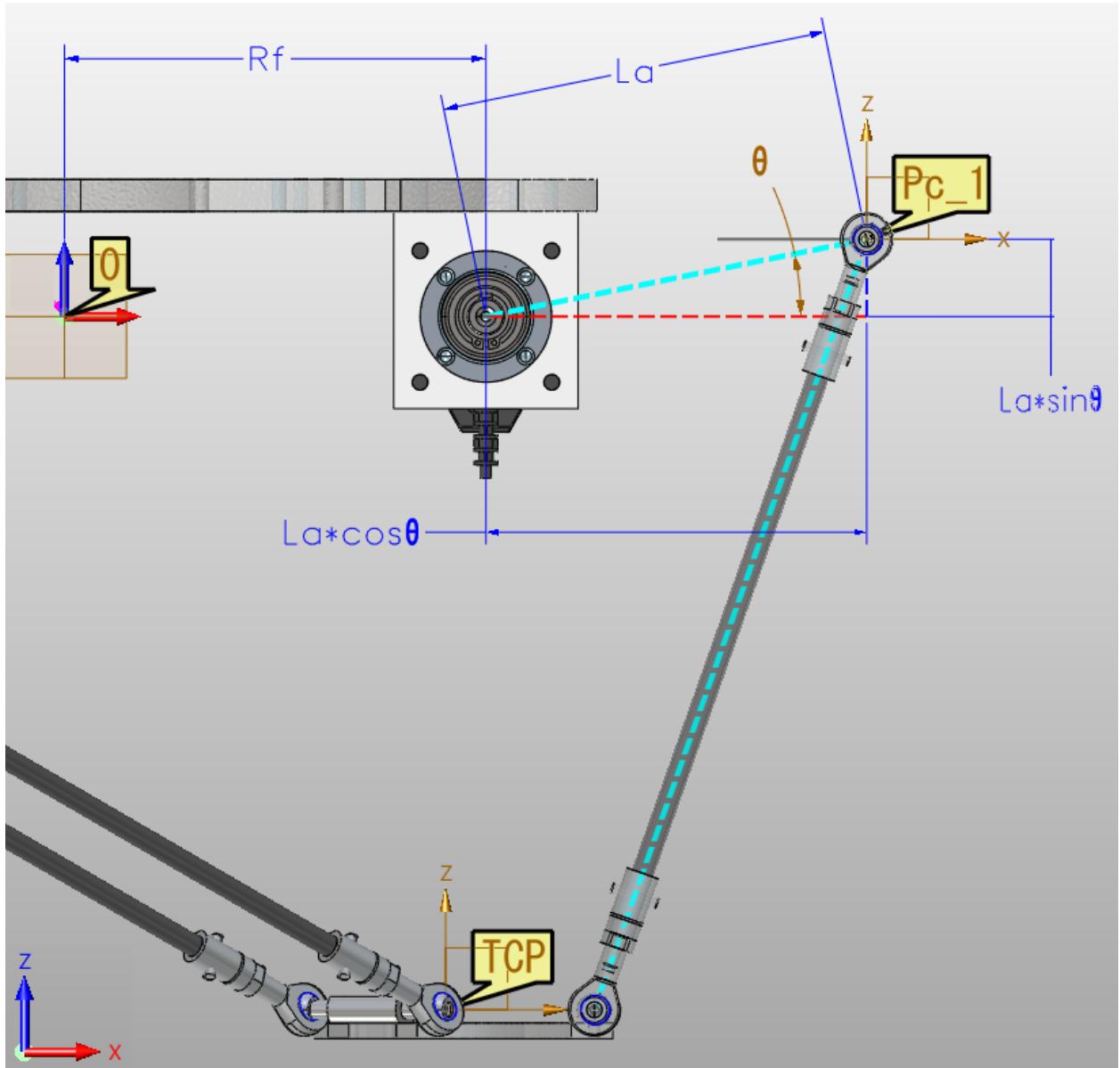


Figura 2-13: Posición x, y, z del codo 1 visto desde el plano XZ del hombro 1. [Autor]

Así como en el análisis de los hombros, se utilizan matrices de transformación para determinar la posición de los codos con respecto al marco de referencia de los hombros ${}^h_i P_{c_i}$ con $i = 1, 2, 3$, pero esta vez utilizando matrices de rotación sobre el eje Y .

$${}^h_i MTH_{c_i} = R(y, \theta_i) * T(x, La) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & 0 & \sin(\theta_i) & La * \cos(\theta_i) \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\theta_i) & 0 & \cos(\theta_i) & -La * \sin(\theta_i) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-22)$$

Por lo tanto:

$${}^{h_i}P_{c_i} = [La * \cos(\theta_i) \ 0 \ -La * \sin(\theta_i)]^T \quad (2-23)$$

Codo 1 con respecto al hombro 1:

$${}^{h_1}MTH_{c_1} = R(y, \theta_1) * T(x, La) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & 0 & \sin(\theta_1) & La * \cos(\theta_1) \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\theta_1) & 0 & \cos(\theta_1) & -La * \sin(\theta_1) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-24)$$

Por lo tanto:

$${}^{h_1}P_{c_1} = [La * \cos(\theta_1) \ 0 \ -La * \sin(\theta_1)]^T \quad (2-25)$$

Codo 2 con respecto al hombro 2:

$${}^{h_2}MTH_{c_2} = R(y, \theta_2) * T(x, La) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & 0 & \sin(\theta_2) & La * \cos(\theta_2) \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\theta_2) & 0 & \cos(\theta_2) & -La * \sin(\theta_2) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-26)$$

Por lo tanto:

$${}^{h_2}P_{c_2} = [La * \cos(\theta_2) \ 0 \ -La * \sin(\theta_2)]^T \quad (2-27)$$

Codo 3 con respecto al hombro 3:

$${}^{h_3}MTH_{c_3} = R(y, \theta_3) * T(x, La) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_3) & 0 & \sin(\theta_3) & La * \cos(\theta_3) \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\theta_3) & 0 & \cos(\theta_3) & -La * \sin(\theta_3) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-28)$$

Por lo tanto:

$${}^{h_3}P_{c_3} = [La * \cos(\theta_3) \ 0 \ -La * \sin(\theta_3)]^T \quad (2-29)$$

■ **Paso 3: Cálculo de las posiciones de los codos con respecto al origen del robot.**

Para calcular la posición de los codos con respecto al origen del robot, se debe multiplicar las matrices de transformación ${}^0P_{h_i}$ por ${}^{h_i}P_{c_i}$:

$${}^0MTH_{c_i} = {}^0MTH_{h_i} * {}^{h_i}MTH_{c_i} \quad (2-30)$$

Codo 1:

$${}^0MTH_{c_1} = {}^0MTH_{h_1} * {}^{h_1}MTH_{c_1} \quad (2-31)$$

$${}^0MTH_{c_1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & 0 & \sin(\theta_1) & Rf + La * \cos(\theta_1) \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\theta_1) & 0 & \cos(\theta_1) & -La * \sin(\theta_1) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-32)$$

Por lo tanto:

$${}^0P_{c_1} = [Rf + La * \cos(\theta_1) \ 0 \ -La * \sin(\theta_1)]^T \quad (2-33)$$

Codo 2:

$${}^0MTH_{c_2} = {}^0MTH_{h_2} * {}^{h_2}MTH_{c_2} \quad (2-34)$$

$${}^0MTH_{c_2} = \begin{bmatrix} -\cos(\theta_2) & -\frac{3^{1/2}}{2} & -\frac{\sin(\theta_2)}{2} & -\frac{Rf}{2} - \frac{La * \cos(\theta_2)}{2} \\ \frac{3^{1/2} * \cos(\theta_2)}{2} & -\frac{1}{2} & \frac{3^{1/2} * \sin(\theta_2)}{2} & \frac{3^{1/2} * Rf}{2} + \frac{3^{1/2} * La * \cos(\theta_2)}{2} \\ -\sin(\theta_2) & 0 & \cos(\theta_2) & -La * \sin(\theta_2) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-35)$$

Por lo tanto:

$${}^0P_{c_2} = \left[-\frac{Rf}{2} - \frac{La * \cos(\theta_2)}{2} \ \frac{3^{1/2} * Rf}{2} + \frac{3^{1/2} * La * \cos(\theta_2)}{2} \ -La * \sin(\theta_2) \right]^T \quad (2-36)$$

Codo 3:

$${}^0MTH_{c_3} = {}^0MTH_{h_3} * {}^{h_3}MTH_{c_3} \quad (2-37)$$

$${}^0MTH_{c_3} = \begin{bmatrix} -\cos(\theta_3) & \frac{3^{1/2}}{2} & -\sin(\theta_3) & -\frac{Rf}{2} - \frac{La*\cos(\theta_3)}{2} \\ -\frac{3^{1/2}*\cos(\theta_3)}{2} & -\frac{1}{2} & -\frac{3^{1/2}*\sin(\theta_3)}{2} & -\frac{3^{1/2}*Rf}{2} - \frac{3^{1/2}*La*\cos(\theta_3)}{2} \\ -\sin(\theta_3) & 0 & \cos(\theta_3) & -La * \sin(\theta_3) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-38)$$

Por lo tanto:

$${}^0P_{c_3} = \left[-\frac{Rf}{2} - \frac{La*\cos(\theta_3)}{2} \quad -\frac{3^{1/2}*Rf}{2} - \frac{3^{1/2}*La*\cos(\theta_3)}{2} \quad -La * \sin(\theta_3) \right]^T \quad (2-39)$$

■ **Paso 4: Cálculo de la posición central de las esferas.**

Partiendo de las posiciones de los codos se proyecta un vector de magnitud Rm paralelo a la base fija y por ende también paralelo al efecto final, apuntando hacia el origen del robot. El extremo de este vector, será el centro de la esfera correspondiente (PC_{esfi}) a este brazo. Dicha esfera tendrá un radio igual a la longitud del eslabón pasivo Lp . Esto se observa en la descripción gráfica de este apartado. Matemáticamente, esto se puede realizar de la siguiente manera:

$$PC_{esfi} = {}^0P_{c_i} - \left(\begin{bmatrix} \cos(\psi_i) & -\sin(\psi_i) & 0 \\ \sin(\psi_i) & \cos(\psi_i) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} Rm \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right) \quad (2-40)$$

Centro de la esfera 1:

$$PC_{esf_1} = {}^0P_{c_1} - \left(\begin{bmatrix} \cos(0) & -\sin(0) & 0 \\ \sin(0) & \cos(0) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} Rm \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right) \quad (2-41)$$

$$PC_{esf_1} = {}^0P_{c_1} - \begin{bmatrix} Rm \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} \quad (2-42)$$

Esto mismo se aplica para el hombro 2 y 3, teniendo en cuenta su desplazamiento en xyz y rotación de 120° respectivamente.

Centro de la esfera 2:

$$PC_{esf_2} =^0 P_{c_2} - \begin{bmatrix} Rm * \cos(120) \\ Rm * \sin(120) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} \quad (2-43)$$

Centro de la esfera 3:

$$PC_{esf_3} =^0 P_{c_3} - \begin{bmatrix} Rm * \cos(240) \\ Rm * \sin(240) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{bmatrix} \quad (2-44)$$

- **Paso 5: Proceso de intersección de las tres esferas.**

Para el caso puntual de este documento, el proceso para la generación de las tres esferas y la intersección entre ellas se toma del artículo “The Delta Parallel Robot: Kinematics Solutions” apéndice A [25]. Para generar las tres esferas se tiene que estas están dadas como, (C_i, r_i) con $i = 1, 2, 3$ donde C_i corresponde a los centros de las esferas (PC_{esf_i}) y (r_i) a los radios, por lo tanto, las ecuaciones de las tres esferas, están dadas por:

$$(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 = r_1^2 \quad (2-45)$$

$$(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 = r_2^2 \quad (2-46)$$

$$(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 = r_3^2 \quad (2-47)$$

Para el caso del robot delta, lo que se busca determinar son los 2 puntos en donde se intersecan las 3 esferas $P = [x \ y \ z]^T$ a partir de una serie de combinaciones entre las tres ecuaciones de las esferas.

El primer paso consiste en resolver las ecuaciones 2-45, 2-46 y 2-47 elevando al cuadrado todos los términos del lado izquierdo. Luego, se resta 2-47 de 2-45 y 2-47 de 2-46, obteniendo (observe que esto elimina los cuadrados de las incógnitas):

$$a_{11}x + a_{12}y + a_{13}z = b_1 \quad (2-48)$$

$$a_{21}x + a_{22}y + a_{23}z = b_2 \quad (2-49)$$

Donde,

$$\begin{aligned} a_{11} &= 2(x_3 - x_1) & a_{21} &= 2(x_3 - x_2) \\ a_{12} &= 2(y_3 - y_1) & a_{22} &= 2(y_3 - y_2) & b_1 &= r_1^2 - r_3^2 - x_1^2 - y_1^2 - z_1^2 + x_3^2 + y_3^2 + z_3^2 \\ a_{13} &= 2(z_3 - z_1) & a_{23} &= 2(z_3 - z_2) & b_2 &= r_2^2 - r_3^2 - x_2^2 - y_2^2 - z_2^2 + x_3^2 + y_3^2 + z_3^2 \end{aligned}$$

El objetivo de realizar estos pasos es lograr expandir y combinar las ecuaciones 2-45, 2-46 y 2-47, de tal manera que se pueda obtener $x = f(y)$ y $z = f(y)$ para ser sustituidas en las ecuaciones originales, generando una ecuación cuadrática en términos de y . Para conseguir esto, se despeja z de las ecuaciones 2-48 y 2-49 respectivamente:

$$z = \frac{b_1}{a_{13}} - \frac{a_{11}}{a_{13}}x - \frac{a_{12}}{a_{13}}y \quad (2-50)$$

$$z = \frac{b_2}{a_{23}} - \frac{a_{21}}{a_{23}}x - \frac{a_{22}}{a_{23}}y \quad (2-51)$$

Posteriormente, se resta la ecuación 2-50 de la 2-51 para eliminar z y obtener:

$$x = f(y) = a_4y + a_5 \quad (2-52)$$

Donde,

$$a_1 = \frac{a_{11}}{a_{13}} - \frac{a_{21}}{a_{23}} \quad a_2 = \frac{a_{12}}{a_{13}} - \frac{a_{22}}{a_{23}} \quad a_3 = \frac{b_2}{a_{23}} - \frac{b_1}{a_{13}} \quad a_4 = -\frac{a_2}{a_1} \quad a_5 = -\frac{a_3}{a_1}$$

Ahora, para determinar $z = f(y)$ y eliminar x , se sustituye 2-52 en 2-51:

$$z = f(y) = a_6y + a_7 \quad (2-53)$$

Donde,

$$a_6 = \frac{-a_{21}a_4 - a_{22}}{a_{23}} \quad a_7 = \frac{b_2 - a_{21}a_5}{a_{23}}$$

Para determinar la ecuación cuadrática en términos de y se sustituye 2-52 y 2-53 en las ecuaciones 2-45, 2-46 y 2-47:

$$ay^2 + by + c = 0 \quad (2-54)$$

Donde,

$$\begin{aligned} a &= a_4^2 + 1 + a_6^2 \\ b &= 2a_4(a_5 - x_1) - 2y_1 + 2a_6(a_7 - z_1) \\ c &= a_5(a_5 - 2x_1) + a_7(a_7 - 2z_1) + x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 - r_1^2 \end{aligned}$$

Aplicando la ecuación cuadrática se tienen dos posibles soluciones de y :

$$y_{\pm} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (2-55)$$

Para completar la solución de la intersección de las tres esferas, se realiza la sustitución de los valores de $y+$ y $y-$ de 2-69 en las ecuaciones 2-52 y 2-53:

$$x_{\pm} = a_4 y_{\pm} \pm +a_5 \quad (2-56)$$

$$z_{\pm} = a_6 y_{\pm} \pm +a_7 \quad (2-57)$$

Para el caso puntual de la aplicación del robot delta, la intersección de interés es la que corresponde a la solución con el valor de altura en z más negativo: $P = [-x \ -y \ -z]^T = TCP$

Solución imaginaria:

De presentarse una solución imaginaria significa que el valor del TCP es imposible de alcanzar por el robot, debido a que está fuera del espacio de trabajo.

Centro de las 3 esferas con la misma altura en z :

Haciendo uso de la solución planteada anteriormente, es posible encontrar una singularidad cuando las ecuaciones $a_{13} = 2(z_3 - z_1 = 0)$ o $a_{23} = 2(z_3 - z_2 = 0)$. Este caso se presenta cuando el centro de las 3 esferas presentan la misma altura en z . Para evitar esta singularidad es posible hacer uso del apéndice B del artículo “The Delta Parallel Robot: Kinematics Solutions” [25]:

$$(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_n)^2 = r_1^2 \quad (2-58)$$

$$(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_n)^2 = r_2^2 \quad (2-59)$$

$$(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_n)^2 = r_3^2 \quad (2-60)$$

Se resalta que la altura de las 3 esferas es la misma, por lo tanto, se tiene que $z_1 = z_2 = z_3 = z_n$. Ahora, el punto de intersección de las 3 esferas está dado por:

$$x^2 - 2x_1x + x_1^2 + y^2 - 2y_1y + y_1^2 + z^2 - 2z_nz + z_n^2 = r_1^2 \quad (2-61)$$

$$x^2 - 2x_2x + x_2^2 + y^2 - 2y_2y + y_2^2 + z^2 - 2z_nz + z_n^2 = r_2^2 \quad (2-62)$$

$$x^2 - 2x_3x + x_3^2 + y^2 - 2y_3y + y_3^2 + z^2 - 2z_nz + z_n^2 = r_3^2 \quad (2-63)$$

Sustrayendo 2-63 de 2-61 y 2-63 de 2-62 se obtiene:

$$2(x_3 - x_1)x + 2(y_3 - y_1)y + x_1^2 + y_1^2 - x_3^2 - y_3^2 = r_1^2 - r_3^2 \quad (2-64)$$

$$2(x_3 - x_2)x + 2(y_3 - y_2)y + x_2^2 + y_2^2 - x_3^2 - y_3^2 = r_2^2 - r_3^2 \quad (2-65)$$

Las ecuaciones 2-64 y 2-65 son dos ecuaciones lineales con la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} a & b \\ d & e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c \\ f \end{bmatrix} \quad (2-66)$$

Donde,

$$\begin{aligned} a &= 2(x_3 - x_1) \\ b &= 2(y_3 - y_1) \\ c &= r_1^2 - r_3^2 - x_1^2 - y_1^2 + x_3^2 + y_3^2 \\ d &= 2(x_3 - x_2) \\ e &= 2(y_3 - y_2) \\ f &= r_2^2 - r_3^2 - x_2^2 - y_2^2 + x_3^2 + y_3^2 \end{aligned}$$

La solución única para x, y es:

$$x = \frac{ce - bf}{ae - bd} \quad (2-67)$$

$$y = \frac{af - cd}{ae - bd} \quad (2-68)$$

Donde,

$$\begin{aligned} A &= 1 \\ B &= -2z_n \\ C &= z_n^2 - r_1^2 + (x - x_1)^2 + (y - 1)^2 \end{aligned}$$

Sabiendo la solución de x, y , aplicando la ecuación cuadrática, se tienen dos posibles soluciones de z :

$$z_{\pm} = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (2-69)$$

Para el caso puntual de la aplicación del robot delta, la intersección de interés es la que corresponde a la solución con el valor de altura en z más negativo.

2.3.2. Descripción gráfica

El punto de intersección inferior que se genera corresponderá a la ubicación x, y, z del efecto final.

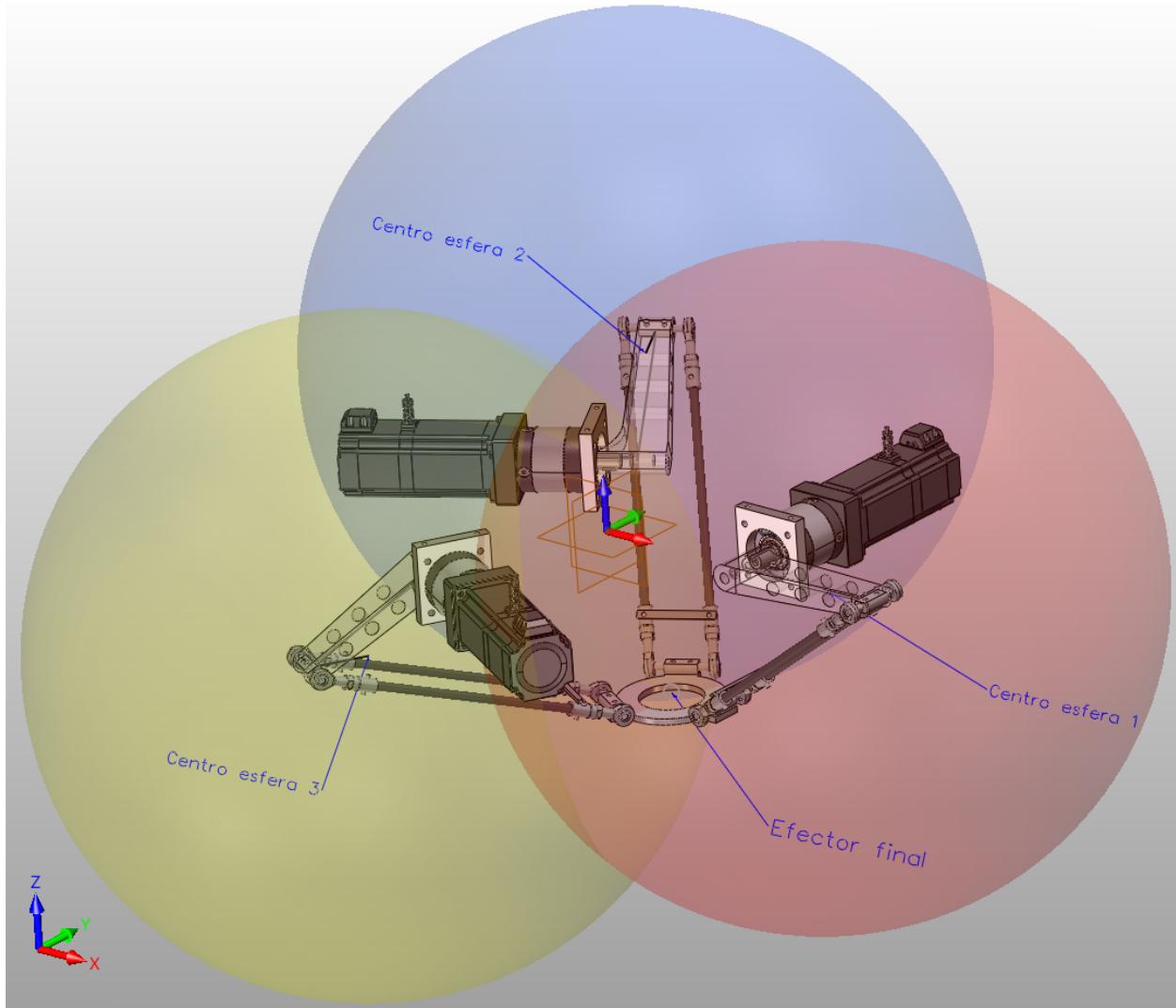


Figura 2-14: Intersección esferas (Posición del efector final). [Autor]

Finalmente, aunque normalmente no es de mucho interés, es posible calcular las posiciones de las muñecas a partir de la posición del efector final. Para esto, se parte de que la altura (posición sobre el eje Z) del efector final es la misma que la de las muñecas. Partiendo de la posición del efector final, se realizan rotaciones de 0° , 120° y 240° sobre el eje Z y adicionalmente se realizan desplazamientos sobre la componente X del marco de referencia móvil iguales al radio de la base móvil R_m . Con esto, es posible encontrar las posiciones de las 3 muñecas. Este proceso es igual al que se realiza para poder encontrar las posiciones de los 3 hombros partiendo del origen del robot, solo que en ese caso los desplazamientos sobre el marco de referencia móvil son iguales al radio de la base fija R_f .

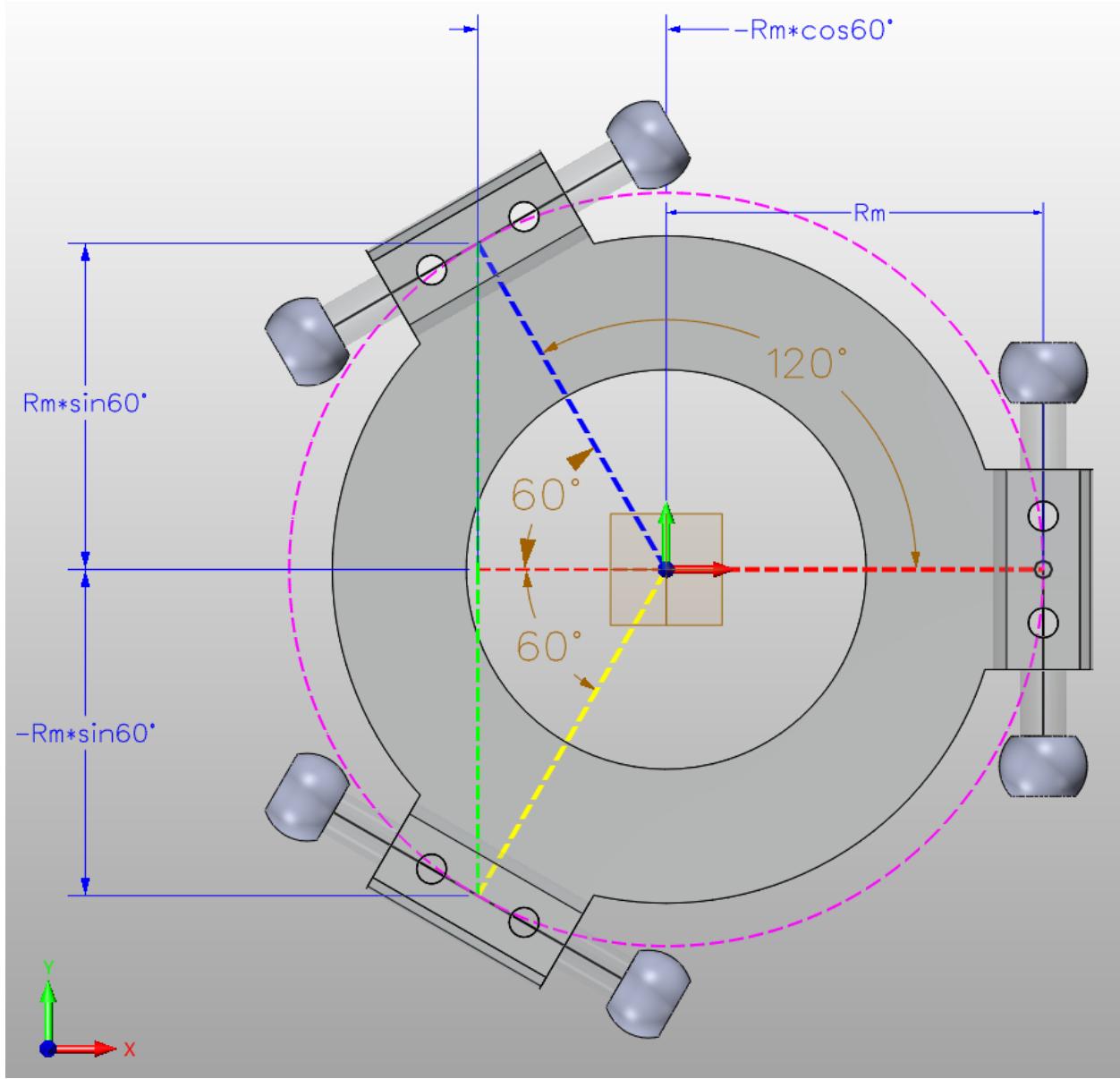


Figura 2-15: Posición de las muñecas con respecto al marco de referencia del TCP. [Autor]

2.4. Cinemática inversa

El objetivo de la cinemática inversa es obtener los valores requeridos de las posiciones angulares de los actuadores Θ_i para alcanzar una posición deseada del efecto final. Para el caso puntual de este documento se realiza la implementación de métodos geométricos y análisis pitagórico para obtener la solución de la cinemática inversa. Para desarrollar este método, se analiza la posición de las muñecas con su respectivo hombro, presentándose tres casos específicos presentados a continuación [27]:

$$\phi_i = \arcsin\left(\frac{Pm_{yi}}{Lp}\right) \quad (2-70)$$

- Caso 1: $0 \leq Pm_{xi} \leq Rf$

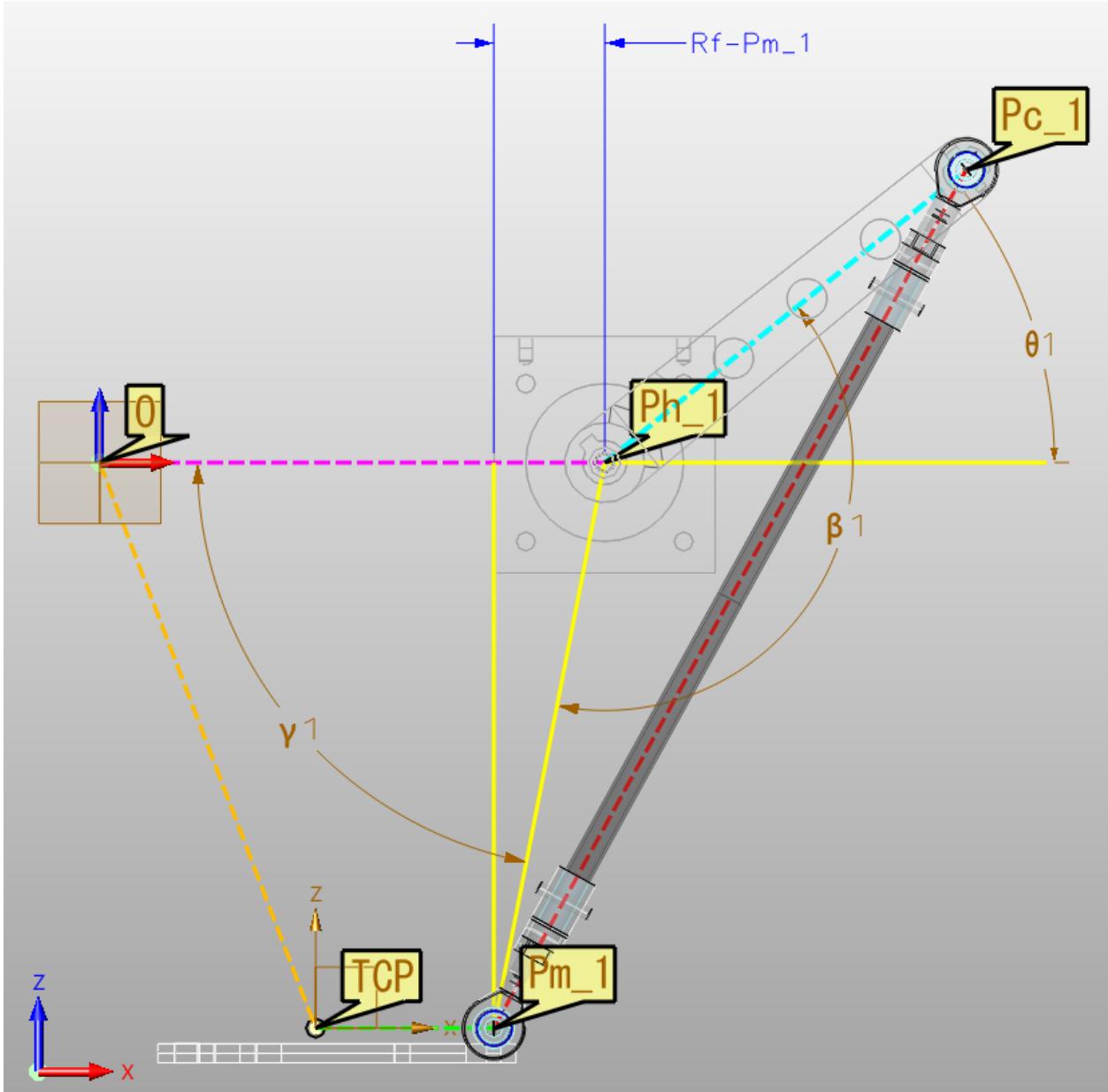


Figura 2-16: Cinemática inversa caso 1: $0 \leq Pm_i \leq Rf$. [Autor]

$$Lhm_i = \sqrt{(Rf - Pm_{xi})^2 + (Pm_{zi})^2} \quad (2-71)$$

$$\gamma_i = -1 * \arctan\left(\frac{Pm_{zi}}{Rf - Pm_{xi}}\right) \quad (2-72)$$

$$\beta_i = \arccos\left(\frac{(Lhm_i)^2 + La^2 - (Lp * \cos(\phi_i))^2}{2 * Lhm_i * La}\right) \quad (2-73)$$

$$\theta_i = \pi - (\gamma_i + \beta_i) \quad (2-74)$$

- Caso 2: $Pm_{xi} < 0$

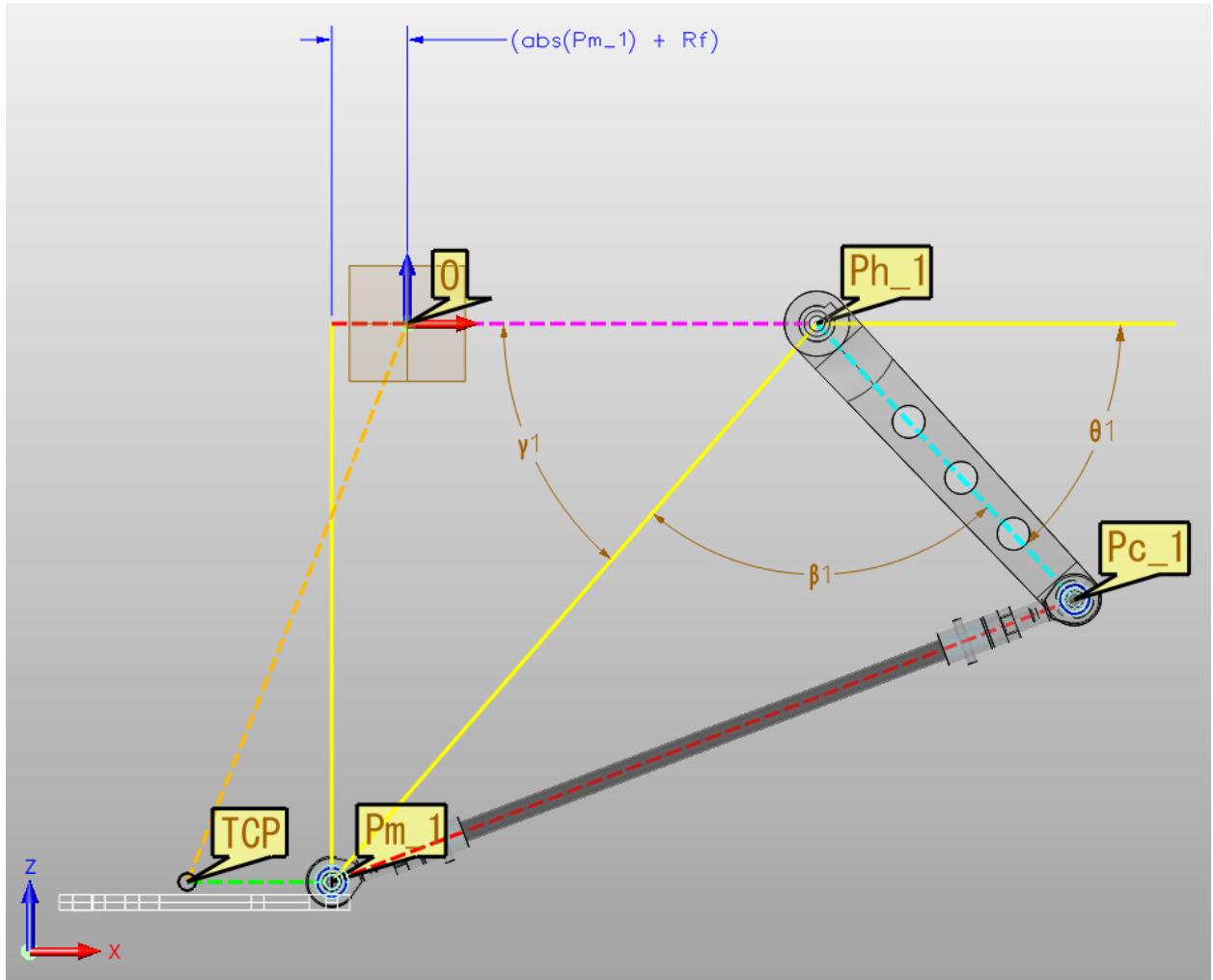


Figura 2-17: Cinemática inversa caso 2: $Pm_{xi} < 0$. [Autor]

$$Lhm_i = \sqrt{(|Pm_{xi}| + Rf)^2 + (Pm_{zi})^2} \quad (2-75)$$

$$\gamma_i = -1 * \arctan\left(\frac{Pm_{zi}}{|Pm_{xi}| + Rf}\right) \quad (2-76)$$

$$\beta_i = \arccos\left(\frac{(Lhm_i)^2 + La^2 - (Lp * \cos(\phi_i))^2}{2 * Lhm_i * La}\right) \quad (2-77)$$

$$\theta_i = \pi - (\gamma_i + \beta_i) \quad (2-78)$$

- **Caso 3:** $Pm_{xi} > Rf$

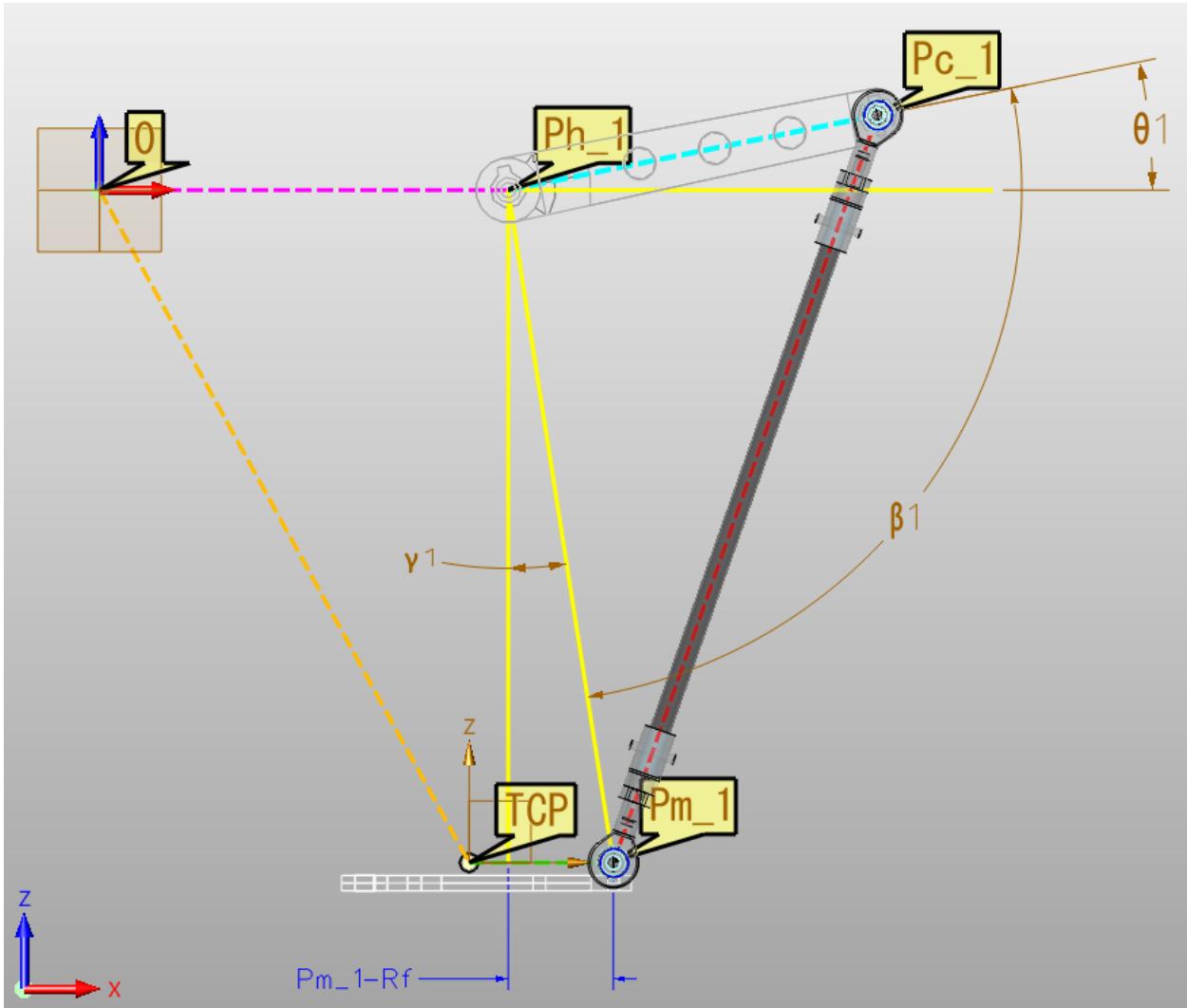


Figura 2-18: Cinemática inversa caso 3: $Pm_{xi} > Rf$. [Autor]

$$Lhm_i = \sqrt{(Pm_{xi} - Rf)^2 + (Pm_{zi})^2} \quad (2-79)$$

$$\gamma_i = -1 * \arctan \left(\frac{Pm_{xi} - Rf}{Pm_{zi}} \right) \quad (2-80)$$

$$\beta_i = \arccos \left(\frac{(Lhm_i)^2 + La^2 - (Lp * \cos(\phi_i))^2}{2 * Lhm_i * La} \right) \quad (2-81)$$

$$\theta_i = \frac{\pi}{2} - (\gamma_i + \beta_i) \quad (2-82)$$

Variable	Caso 1: $0 \leq Pm_{xi} \leq Rf$	Caso 2: $Pm_{xi} < 0$	Caso 3: $Pm_{xi} > Rf$
ϕ_i	$\arcsin\left(\frac{Pm_{yi}}{Lp}\right)$	$\arcsin\left(\frac{Pm_{yi}}{Lp}\right)$	$\arcsin\left(\frac{Pm_{yi}}{Lp}\right)$
Lhm_i	$\sqrt{(Rf - Pm_{xi})^2 + (Pm_{zi})^2}$	$\sqrt{(Pm_{xi} + Rf)^2 + (Pm_{zi})^2}$	$\sqrt{(Pm_{xi} - Rf)^2 + (Pm_{zi})^2}$
γ_i	$-1 * \arctan\left(\frac{Pm_{zi}}{Rf - Pm_{xi}}\right)$	$-1 * \arctan\left(\frac{Pm_{zi}}{ Pm_{xi} + Rf}\right)$	$-1 * \arctan\left(\frac{Pm_{xi} - Rf}{Pm_{zi}}\right)$
β_i	$\arccos\left(\frac{(Lhm_i)^2 + La^2 - (Lp * \cos(\phi_i))^2}{2 * Lhm_i * La}\right)$	$\arccos\left(\frac{(Lhm_i)^2 + La^2 - (Lp * \cos(\phi_i))^2}{2 * Lhm_i * La}\right)$	$\arccos\left(\frac{(Lhm_i)^2 + La^2 - (Lp * \cos(\phi_i))^2}{2 * Lhm_i * La}\right)$
θ_i	$\pi - (\gamma_i + \beta_i)$	$\pi - (\gamma_i + \beta_i)$	$\frac{\pi}{2} - (\gamma_i + \beta_i)$

Tabla 2-4: Resumen de fórmulas para el desarrollo de la cinemática inversa

2.5. Dinámica

La dinámica en robots paralelos permite comprender el comportamiento del dispositivo a medida que se mueve dentro de su espacio de trabajo, por lo tanto, el objetivo de realizar un estudio dinámico es determinar las fuerzas que actúan sobre los diferentes elementos y determinar los pares de torsión vistos sobre los actuadores. Para realizar este estudio, es común encontrar tres tipos de formulación o métodos de estudio:

- Formulación Newton-Euler, basado en las leyes de Newton.
- Principle virtual work, que es una derivación del método de Euler y Lagrange.
- Formulación Lagrangiana, basada en el cálculo de variaciones. Establece que un sistema dinámico puede expresarse en términos de su energía cinética y energía potencial.

Para el presente trabajo se realiza el análisis dinámico del sistema usando el método de la formulación Lagrangiana, tomado de la tesis *Torque Analysis of a Three Translational Degrees of Freedom Parallel Manipulator* [27]. Esta descripción se encuentra en la sección 4 correspondiente a dinámica y en la sección B y C correspondiente a la evaluación de derivadas parciales de restricciones y funciones de Lagrange para dinámicas basadas en Lagrange.

En primera instancia, se tiene que la ecuación general de este tipo de formulación es:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k}\right) - \frac{\partial L}{\partial q_k} = Q_k + \sum_{i=1}^k \lambda_i \frac{\partial g_i}{\partial q_k} \quad (2-83)$$

Donde L es la función de Lagrange, q es la k^{th} coordenada generalizada, Q es una fuerza externa generalizada, λ_i es el multiplicador de Lagrange y g_i es la ecuación de restricción.

Para determinar el par generado por un robot delta, se requiere introducir la ecuación de movimiento de Lagrange y establecer los parámetros necesarios para el análisis de la misma mediante la definición de las coordenadas generales. Es necesario recordar que para el caso del robot delta se manejan 3 grados de libertad y 12 sobre restricciones. Este tipo de formulación requiere 3 coordenadas generalizadas de acuerdo a los 3 grados de libertad, sin embargo, debido a la restricción excesiva del robot, la posición del efector final debe expresarse mediante seis coordenadas generalizadas $TCP_x, TCP_y, TCP_z, q_1, q_2, q_3$ para calcular la dinámica del manipulador [27]. Estas coordenadas corresponden a la posición del efector final y al ángulo de los actuadores respectivamente.

La función de Lagrange L , se determina a partir del estudio de la energía cinética (T) y potencial (V) del sistema, en donde, $L = T - V$. La respectiva solución de T y V , se encuentra en la sección 4 de la tesis *Torque Analysis of a Three Translational Degrees of Freedom Parallel Manipulator* [27].

La ecuación de lazo requerida para determinar el par generado en los actuadores se presenta a continuación:

$$g_i = (Pm_{xi} - B_{xi})^2 + (Pm_{yi} - B_{yi})^2 + (Pm_{zi} - B_{zi})^2 - l_p^2 = 0 \quad (2-84)$$

Donde,

$$Pm_{xi} = TCP_x + Rm \cos \psi_{irad}$$

$$B_{xi} = (Rf + L_a \cos q_i) \cos \psi_{irad}$$

$$Pm_{yi} = TCP_y + Rm \sin \psi_{irad}$$

$$B_{yi} = (Rf + L_a \cos q_i) \sin \psi_{irad}$$

$$Pm_{zi} = TCP_z$$

$$B_{zi} = L_a \sin q_i$$

Y, en donde $q_i = \Theta_i$ y $\psi_{irad} = \psi_i$ pero convertido de grados a radianes.

Para encontrar el valor de los multiplicadores de Lagrange λ , se establecen 3 ecuaciones $\lambda = 1, 2, 3$ implementando las derivadas de la función de restricción, que se incluyen en el apéndice B [27]. Asimismo, se utiliza la ecuación 2-83, en donde para este caso puntual, el término Q_k es igual a cero, ya que no hay fuerzas externas que se apliquen al efector final.

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k}\right) - \frac{\partial L}{\partial q_k} = \sum_{i=1}^k \lambda_i \frac{\partial g_i}{\partial q_k} \quad (2-85)$$

$$\begin{pmatrix} \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial T\dot{C}P_x}\right) - \frac{\partial L}{\partial TCP_x} \\ \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial T\dot{C}P_y}\right) - \frac{\partial L}{\partial TCP_y} \\ \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial T\dot{C}P_z}\right) - \frac{\partial L}{\partial TCP_z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial TCP_x} & \frac{\partial g_2}{\partial TCP_x} & \frac{\partial g_3}{\partial TCP_x} \\ \frac{\partial g_1}{\partial TCP_y} & \frac{\partial g_2}{\partial TCP_y} & \frac{\partial g_3}{\partial TCP_y} \\ \frac{\partial g_1}{\partial TCP_z} & \frac{\partial g_2}{\partial TCP_z} & \frac{\partial g_3}{\partial TCP_z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{pmatrix} \quad (2-86)$$

En donde se obtiene, mediante la solución de las derivadas parciales que:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial T\dot{C}P_j}\right) = T\ddot{C}P_j(3m_{L_p} + m_{TCP})$$

$$\frac{\partial L}{\partial TCP_x} = \frac{\partial L}{\partial TCP_y} = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial TCP_z} = g(3m_{L_p} + m_{TCP})$$

$$\frac{\partial g_i}{\partial TCP_x} = 2TCP_x - 2\cos\psi_{irad}(Rf + L_a \cos q_i) + 2Rm \cos\psi_{irad}$$

$$\frac{\partial g_i}{\partial TCP_y} = 2TCP_y - 2\sin\psi_{irad}(Rf + L_a \cos q_i) + 2Rm \sin\psi_{irad}$$

$$\frac{\partial g_i}{\partial TCP_z} = 2TCP_z - 2L_a \sin q_i$$

NOTA: Como se mencionó anteriormente, esta solución se encuentra en la tesis *Torque Analysis of a Three Translational Degrees of Freedom Parallel Manipulator* sección B y C [27].

Para obtener λ se emplea la siguiente ecuación:

$$\lambda_{i3x1} = \frac{A_{3x3}}{C_{3x3}} = A \left(\frac{1}{C_{3x3}} \right) = A \cdot C_{3x3}^{-1} \quad (2-87)$$

Sabiendo que C_{3x3}^{-1} es la matriz inversa de C.

Una vez calculados los multiplicadores de Lagrange, el par generado en cada uno de los actuadores se pueden determinar usando nuevamente la ecuación 2-83, donde Q_k representa el par impuesto por los motores, es decir, $Q_k = \tau_i$.

$$Q_k = \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k}\right) - \frac{\partial L}{\partial q_k} - \sum_{i=1}^k \lambda_i \frac{\partial g_i}{\partial q_k} \quad (2-88)$$

$$\tau_1 = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_1} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_1} - (\lambda_1 \frac{\partial g_1}{\partial q_1} + \lambda_2 \frac{\partial g_2}{\partial q_1} + \lambda_3 \frac{\partial g_3}{\partial q_1}) \quad (2-89)$$

$$\tau_2 = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_2} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_2} - (\lambda_1 \frac{\partial g_1}{\partial q_2} + \lambda_2 \frac{\partial g_2}{\partial q_2} + \lambda_3 \frac{\partial g_3}{\partial q_2}) \quad (2-90)$$

$$\tau_3 = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_3} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_3} - (\lambda_1 \frac{\partial g_1}{\partial q_3} + \lambda_2 \frac{\partial g_2}{\partial q_3} + \lambda_3 \frac{\partial g_3}{\partial q_3}) \quad (2-91)$$

Siendo:

$$\frac{\partial g_i}{\partial q_i} = 2 * L_a (Rm \sin q_i - Rf \sin q_i - TCP_z \cos q_i + TCP_x \cos \psi_{irad} \sin q_i + TCP_x \sin \psi_{irad} \sin q_i)$$

$$\frac{\partial g_1}{\partial q_2} = \frac{\partial g_1}{\partial q_3} = \frac{\partial g_2}{\partial q_1} = \frac{\partial g_2}{\partial q_3} = \frac{\partial g_3}{\partial q_1} = \frac{\partial g_3}{\partial q_2} = 0$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) = \frac{\ddot{q}_i * L_a (3mL_p + 4mL_a)}{3}$$

$$\frac{\partial L}{\partial q_i} = \frac{g * L_a \cos q_i (2mL_p + mL_a)}{2}$$

2.6. Singularidad

Se habla de una configuración singular, cuando hay un desequilibrio de fuerzas entre las articulaciones y la plataforma móvil [20] impidiendo de esta manera que el efecto final logre tener una posición adecuada, esto genera en el robot paralelo movimientos forzados en alguna juntura y poca rigidez, y por ende desestabilización en él [21]. Además, de acuerdo al tipo de configuración, la plataforma móvil gana o pierde uno o más GdL.

Matemáticamente, la singularidad de un robot paralelo se expresa mediante el análisis de dos matrices jacobianas obtenidas de la relación presente entre el vector de entrada (Θ) y salida (x) que posee la cadena cinemática cerrada [21]:

$$F(\Theta, x) = 0 \quad (2-92)$$

Derivando de manera parcial con respecto al tiempo la función 3-7 se tiene:

$$\frac{\partial F}{\partial \Theta} \dot{\Theta} + \frac{\partial F}{\partial x} \dot{x} = J_{\Theta} \dot{\Theta} + J_x \dot{x} = 0 \quad (2-93)$$

La ecuación 3-8 expresa la relación presente entre la velocidad de entrada y salida del dispositivo. Con esto, se tienen que la matriz jacobiana que comprende dicha velocidad es:

$$J = (J_{\Theta})^{-1} * J_x \quad (2-94)$$

En donde el Jacobiano directo se define como:

$$J_x = \begin{pmatrix} j_{x1x} & j_{x1y} & j_{x1z} \\ j_{x2x} & j_{x2y} & j_{x2z} \\ j_{x3x} & j_{x3y} & j_{x3z} \end{pmatrix} \quad (2-95)$$

Donde,

$$j_{xix} = \sin \phi_i \cos (q_i + \alpha_i) \cos \psi_i - \cos \phi_i \sin \psi_i$$

$$j_{xiy} = \sin \phi_i \cos (q_i + \alpha_i) \cos \psi_i + \cos \phi_i \cos \psi_i$$

$$j_{xiz} = \sin \phi_i \sin (q_i + \alpha_i)$$

Para determinar el ángulo α_i , este documento se basa en la sección 3 - 3.3 de cinemática de la tesis "Torque Analysis of a Three Translational Degrees of Freedom Parallel Manipulator" [27], en donde, aplicando el proceso de transformación del hombro a la muñeca se tiene:

$$\alpha_i = \arccos \left(\frac{Pm_{xi}^2 + Pm_{yi}^2 + Pm_{zi}^2 - La^2 - Lp^2}{2LaLp \cos \phi_i} \right) \quad (2-96)$$

Por otra parte, el Jacobiano inverso se define como:

$$J_{\theta} = \begin{pmatrix} j_{\theta 1} & 0 & 0 \\ 0 & j_{\theta 2} & 0 \\ 0 & 0 & j_{\theta 3} \end{pmatrix} \quad (2-97)$$

Donde,

$$j_{\theta i} = La \sin \phi_i \sin \alpha_i$$

Para que un manipulador paralelo presente singularidad, el determinante en una o ambas matrices debe cero, extiendo de esta manera 3 casos [20]:

2.6.1. Singularidad del Jacobiano inverso

Este tipo de singularidad se presenta cuando el determinante de la matriz J_Θ debe ser igual a 0, lo cual da si cualquiera de los elementos de la diagonal de la matriz es 0.

$$\det(J_\Theta) = 0 \quad (2-98)$$

Mecánicamente, significa que en alguna cadena cinemática del mecanismo los eslabones L1 y L2 están contraídos o extendidos en su totalidad llevando al límite su espacio de trabajo [21][22], esto genera que el efecto final no alcance la ejecución de determinados puntos. Además, este tipo de configuración singular puede llevar a la perdida de uno o más grados de libertad [22].

2.6.2. Singularidad del Jacobiano directo

En segundo tipo de singularidad se da cuando, el determinante de la matriz J_x es cero o no presenta inversa.

$$\det(J_x) = 0 \quad (2-99)$$

Mecánicamente, esta singularidad se presenta cuando el efecto final genera movimientos en algunas direcciones, estando los actuadores bloqueados en su totalidad. En otras palabras, la velocidad de la plataforma móvil es distinta de cero, aun cuando las velocidades de los actuadores son 0 [23].

2.6.3. Singularidad combinada

Esta singularidad básicamente se presenta cuando hay seguridad inversa y directa de manera simultánea o ambas matrices son singulares, es decir, su determinante es cero. En este tipo de configuración, el efecto final puede experimentar algunos movimientos mientras los actuadores están bloqueados o de forma contraria [23].

$$\det(J_x) = \det(J_\Theta) = 0 \quad (2-100)$$

2.7. Destreza

La destreza de un robot de arquitectura paralela básicamente es la capacidad de precisión que tiene el efecto final o plataforma móvil del mecanismo para posicionarse en un punto dentro de su espacio de trabajo [21]. Matemáticamente, se utiliza la matriz jacobiana para calcular el número de condición k y hallar su valor inverso. Esto se conoce como destreza local (CI) y busca determinar el grado de destreza presente en el robot [20].

$$CI = \frac{1}{k(J)} \quad 0 \leq CI \leq 1 \quad (2-101)$$

$$k(J) = \|J\| \|J^{-1}\| \quad (2-102)$$

Siendo 0 una configuración singular y 1 el punto máximo de destreza. Además, recordando que $\|J\|$ y $\|J^{-1}\|$ corresponden a la norma de la matriz y la matriz inversa respectivamente.

La destreza general del mecanismo o índice global de destreza (CGI) se halla realizando la suma total de CI sobre todo su espacio de trabajo [20][21].

$$CGI = \frac{\sum_{i=1}^W CI}{W} \quad (2-103)$$

2.8. Espacio de trabajo

El espacio de trabajo o campo de acción de un robot paralelo tipo delta es la región en el plano cartesiano tridimensional alcanzable por el efecto final. A esto se le conoce también como volumen espacial, descrito como el volumen total generado por el efecto final al realizar todos sus posibles movimientos [23][24]. Para su cálculo se puede hacer uso de métodos geométricos y métodos de discretización, siendo este último el más común. Consiste en dividir un espacio de trabajo preestablecido dado por las dimensiones del robot y hallar la cinemática inversa de una serie de puntos, sin tener en cuenta las restricciones físicas propias de los mecanismos del robot, siendo este el mayor espacio de trabajo posible [20].

3

Diseño, implementación y validación del robot delta

En este capítulo se presentan los avances previos realizados en la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, que sirven como base para el desarrollo del presente trabajo. Posteriormente, se describe el modelo de diseño, las herramientas computacionales y una serie de requerimientos mínimos para su ejecución. Así mismo, se establece el diseño de *hardware*, *software* y control, incluyendo sus arquitecturas y la ingeniería de detalle. Por último, se presenta el proceso de implementación, los resultados obtenidos y la validación del robot delta. Finalmente, se plasman algunos ejemplos del cálculo de la cinemática directa e inversa con las características del robot diseñado y se presenta el espacio de trabajo aproximado alcanzado por el robot.

3.1. Introducción

3.1.1. Desarrollos previos

El presente trabajo parte de los diseños y desarrollos de proyectos realizados previamente en la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, los cuales presentaban principalmente avances en la fabricación mecánica del robot, tales como bastidor, base fija, base móvil, eslabones pasivos y activos; así pues, para continuar con el desarrollo de un prototipo funcional, se opta por hacer uso de los elementos fabricados anteriormente, realizando algunas mejoras o modificaciones.

Los elementos desarrollados previamente presentan las características descritas en la tabla 3-1:

Nomenclatura	Descripción	Valor
R_f	Radio de la base fija (distancia desde el origen hasta los hombros)	160 mm
R_m	Radio de la base móvil (distancia desde el <i>TCP</i> hasta las muñecas)	56.45 mm
L_a	Longitud eslabón activo	147.5 mm
L_p	Longitud eslabón pasivo	310.6 mm
Ph_{j1}	Posición del hombro 1	(160, 0, 0) mm
Ph_{j2}	Posición del hombro 2	(-80, 138.56, 0) mm
Ph_{j3}	Posición del hombro 3	(-80, -138.56, 0) mm

Tabla 3-1: Valores constantes del robot desarrollado.

En la figura 3-1 se pueden observar las características del robot delta desarrollado previamente:

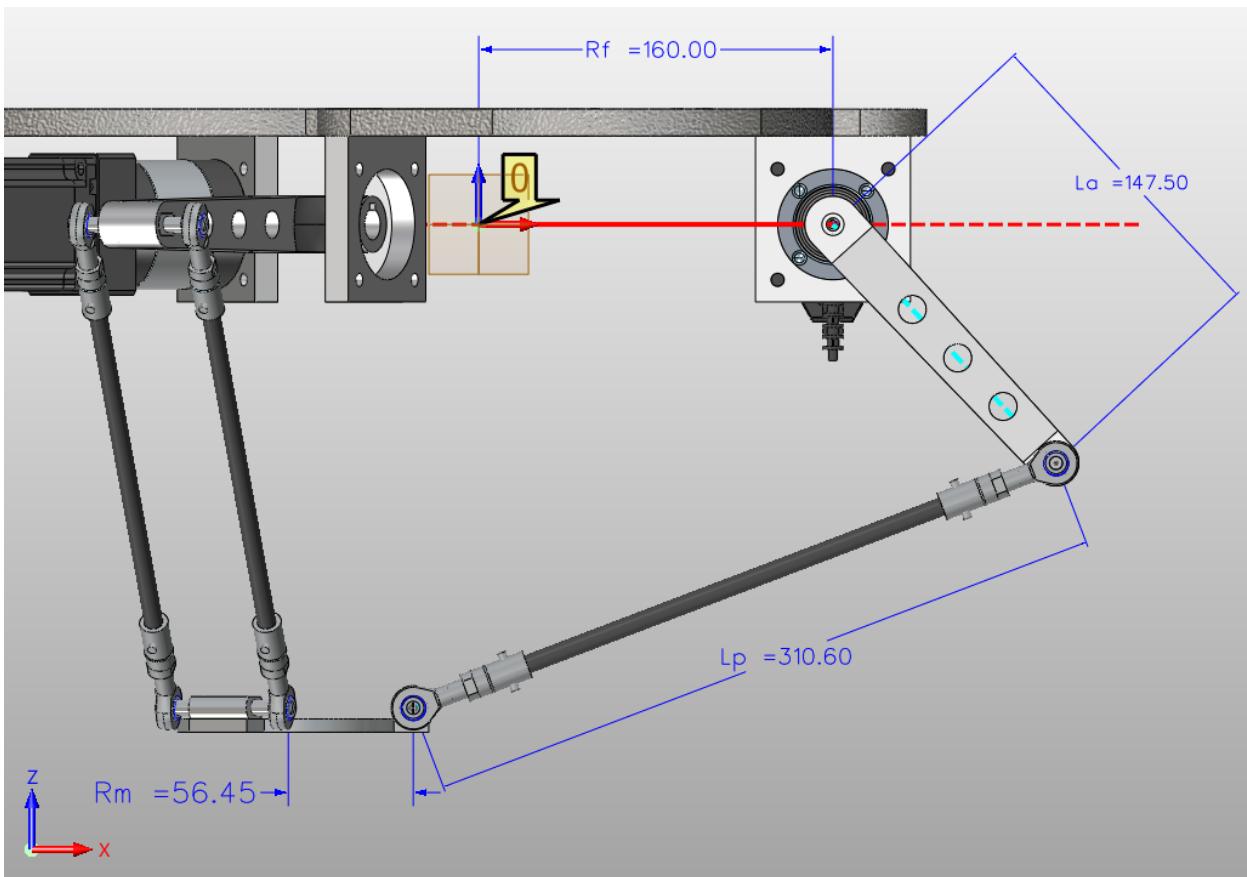


Figura 3-1: Dimensiones principales del robot delta. [Autor]

En la figura 3-2 se pueden observar las posiciones de los tres hombros. Cabe resaltar que

dichas posiciones no cambian en ningún momento, debido a que los hombros están anclados a los actuadores y estos a su vez están anclados a la base fija del robot:

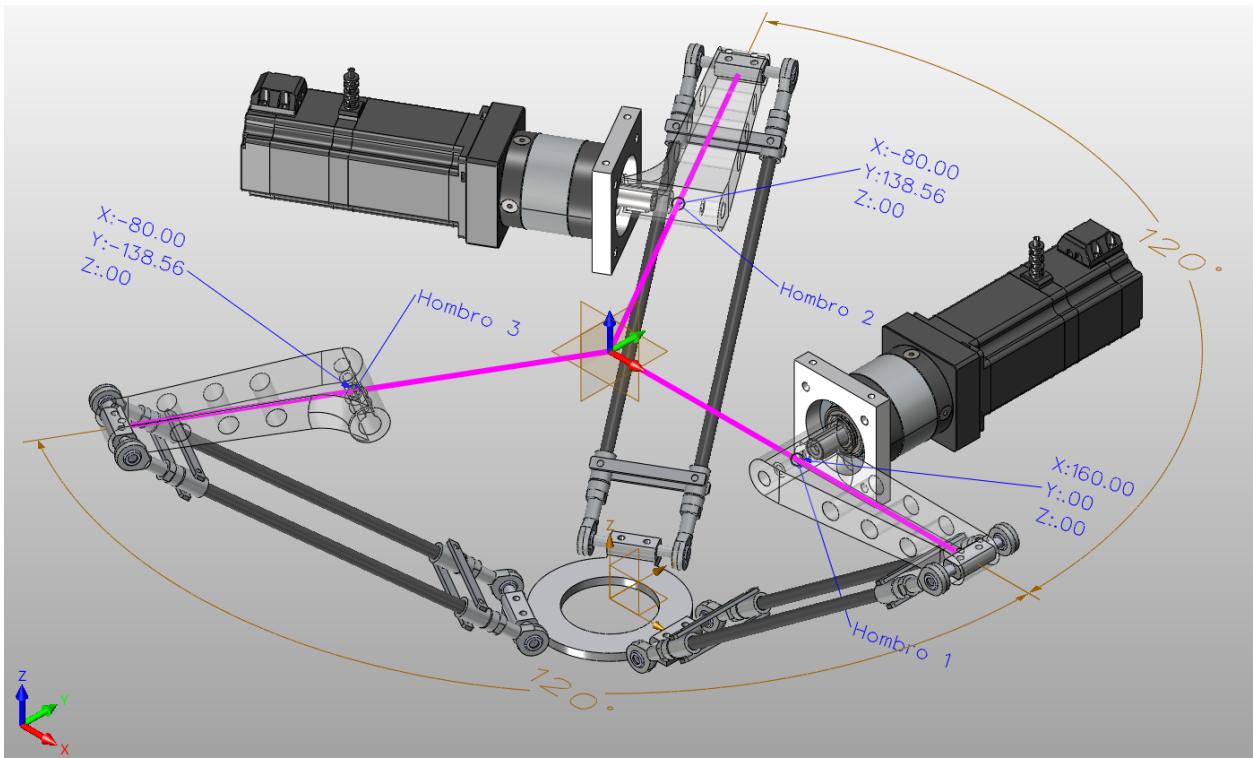


Figura 3-2: Posiciones de los hombros (posiciones fijas o constantes). [Autor]

3.1.2. Modelo de diseño concurrente en V

Para el desarrollo del presente trabajo, se recurre al uso del modelo de diseño concurrente en V. Esta metodología de diseño es una variación del modelo en cascada en el cual se relacionan las actividades de prueba y validación con el análisis y el diseño, tal y como se aprecia en la figura 3-3:

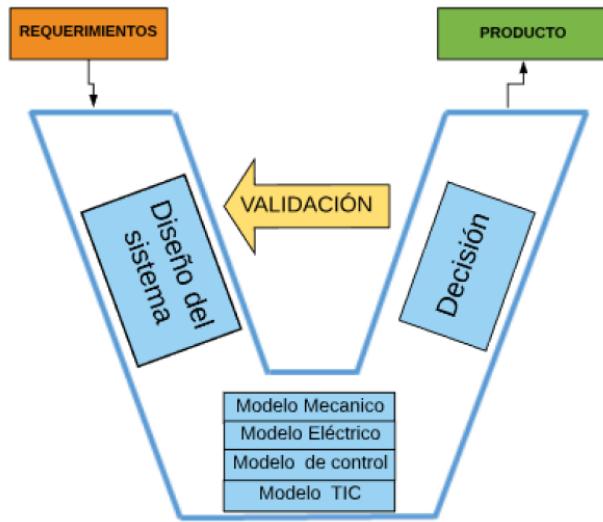


Figura 3-3: Modelo de diseño en V para metodología concurrente. [34].

El diseño concurrente en V tiene como entrada los requerimientos del proyecto a desarrollar para posteriormente diseñar y desarrollar cada uno de los subsistemas involucrados, teniendo en cuenta la integración final de todos, permitiendo generar un producto de manera más eficiente. El modelo en V es un análisis cíclico entre las decisiones y aplicaciones en cada subsistema con su desempeño e integración en el proyecto principal. El diseño del sistema busca solucionar o dar alternativas a todos los subsistemas y los requerimientos propuestos en donde se analiza y se plantean posibles soluciones. Adicionalmente, se compara si cada una de las opciones cumplen con los requerimientos o no interfieren con el cumplimiento de los mismos. [34].

Los pasos a seguir para el desarrollo de un proyecto haciendo uso del diseño concurrente en V son los siguientes:

1. Diseño del sistema: Se presentan posibles propuestas de desarrollo con el objetivo de cumplir con los requerimientos propuestos.
2. Análisis y decisión: Se revisan las diferentes opciones y se toma la decisión de cuál de las alternativas es la más conveniente para alcanzar con los objetivos propuestos.
3. Verificación y resultados: Se comprueba si la alternativa seleccionada cumple con los resultados esperados y se verifica que no interfiera con algún otro requerimiento.

Específicamente para el desarrollo del robot delta del presente trabajo y su integración con un sistema virtualizado, se propone el modelo de diseño concurrente en V que se aprecia en la figura 3-4:

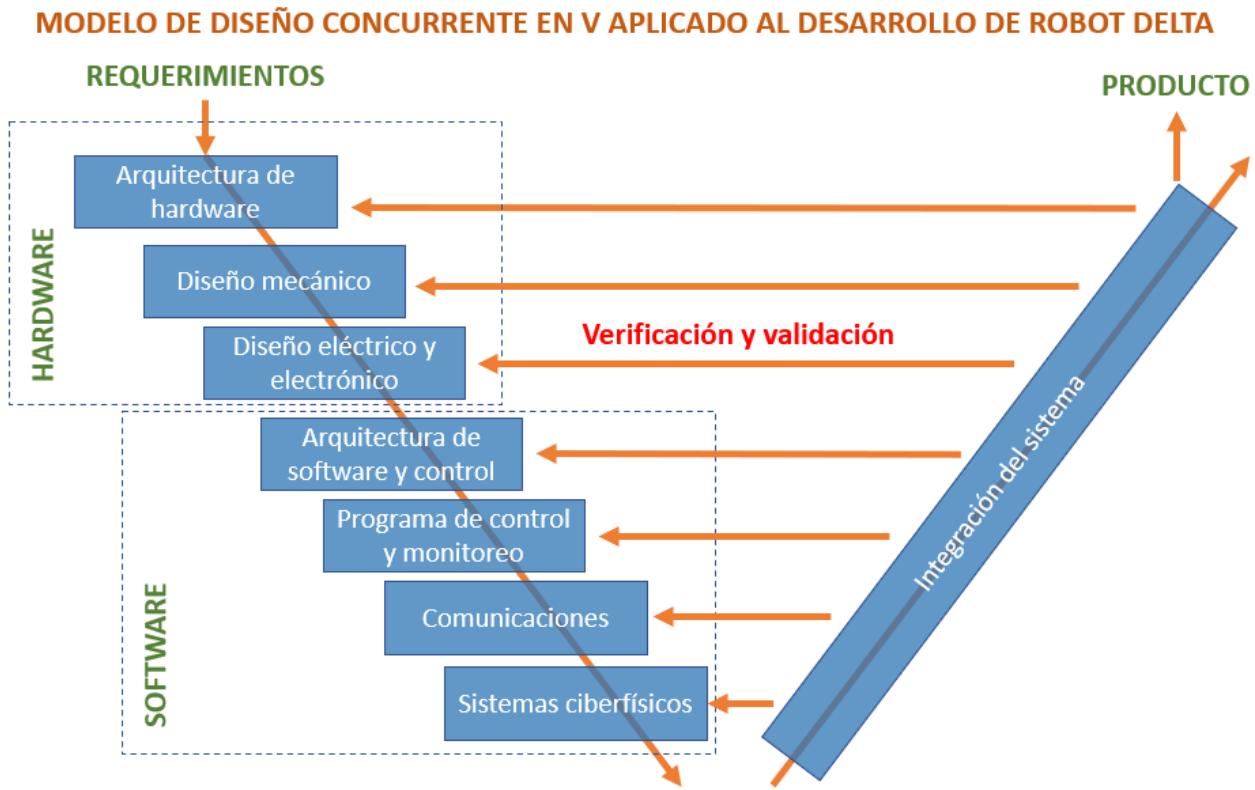


Figura 3-4: Modelo de diseño recurrente en V aplicado en desarrollo de robot delta. [Autor].

3.1.3. Herramientas computacionales

Para poder realizar pruebas de los cálculos matemáticos, disponer de herramientas gráficas que permitan un mejor entendimiento del robot y poder realizar un programa de control y monitoreo, se hace uso de los siguientes programas de computador:

- MathWorks Matlab ®: Usado para realizar comprobaciones de la matemática del robot, como por ejemplo, para calcular la cinemática directa e inversa, el par requerido de los actuadores y la obtención del espacio de trabajo del robot. Adicionalmente, permite desarrollar un modelo 3D básico del robot, con el fin de comprobar visualmente sus movimientos y posiciones. En las etapas avanzadas del trabajo, se elaborará una conexión entre el modelo 3D realizado en Matlab ® y el controlador de movimiento del robot físico, con el fin de verificar los cálculos realizados por el controlador de movimiento y compararlos con los resultados obtenidos previamente en Matlab ®.
- Programas CAD: Permite realizar un modelo 3D detallado para la fabricación de las piezas del robot, así como para certificar las posibles colisiones de los elementos móviles previo a la manufactura. Adicionalmente, posibilita la realización de un gemelo digital con el fin de ser controlado posteriormente mediante el uso de sistemas ciberfísicos.

- Microsoft Visual Studio ®: Haciendo uso de la plataforma .NET Core 5.0 y bajo lenguaje C#, permite desarrollar los algoritmos del controlador de movimiento, los cuales incluyen el procesamiento de la cinemática directa e inversa, control de velocidades y aceleraciones, generación de trayectorias, control de los actuadores, detección de sensores finales de carrera, entre otros. Igualmente, ofrece la capacidad de desarrollar una interfaz de usuario, con el cual se dan las instrucciones de comando al robot y permite el monitoreo del mismo.
- Siemens NX Mechatronics Concept Designer ®(MCD): Permite realizar aplicaciones de sistemas ciberfísicos, en donde por medio de comunicaciones digitales se puede, por ejemplo, enlazar un controlador de movimiento real con un gemelo digital, o recrear un escenario completamente virtualizado como el de una fábrica digital.

3.1.4. Requerimientos

Con el fin de delimitar las funciones, objetivos y características del robot a desarrollar, se realiza una lista de requerimientos para ser tenidos en cuenta en las etapas de diseño, implementación, verificación y validación:

Generalidades

- Para el presente trabajo, el objetivo no es hacer un robot de alto desempeño, ni optimizar el espacio de trabajo, sino construir un prototipo de robot delta funcional, el cual pueda ejecutar correctamente trayectorias lineales en el espacio e integrarlo con un modelo virtualizado haciendo uso de sistemas ciberfísicos. Para esto, se requiere realizar un ciclo completo de ingeniería, partiendo de unas necesidades básicas hasta alcanzar la validación de las funcionalidades esenciales del robot, para lo cual se requiere la integración de los diferentes dominios involucrados, tales como, el sistema mecánico, el sistema eléctrico, el sistema electrónico, el sistema de control y el componente de *software*.
- El prototipo de robot delta debe ser construido partiendo de los desarrollos previos realizados en la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, por lo tanto, en lo posible se debe hacer uso de las piezas construidas o adquiridas anteriormente.
- Se requiere que el desarrollo contenga una interfaz de usuario amigable y sencilla que ofrezca las funciones básicas de control y monitoreo de un robot delta industrial.
- Los elementos a adquirir debe ser de carácter industrial, pero en lo posible de bajo costo.

- El programa de control debe permitir la comunicación con el programa Siemens NX Mechatronics Concept Designer ®(MCD) de manera ágil y estable, con el fin de poder interactuar con un gemelo digital y hacer una aplicación básica de sistemas ciberfísicos.

Elementos de seguridad

- Se requiere de una parada de emergencia física con el fin de poder detener el dispositivo ante cualquier anomalía, riesgo de colisión o cualquier situación que involucre la seguridad de los usuarios.
- El dispositivo debe ofrecer una señalización visual de manera que el usuario pueda conocer su estado actual (en funcionamiento, en falla, etc.).
- El robot debe disponer de frenos mecánicos con el objetivo de evitar que los brazos del robot caigan por el efecto de la gravedad al perder el suministro de energía eléctrica.
- La máquina debe contar con finales de carrera físicos, de tal manera que si alguno de los eslabones activos alcanza una posición por fuera de los límites apropiados, el robot se detendrá de manera automática protegiendo la integridad del mismo.

Sistema mecánico

- El prototipo a fabricar debe constar de 3 ejes que permita realizar los movimientos propios de un robot delta de 3 grados de libertad.
- Los elementos mecánicos a fabricar deben ser como máximo de mediana complejidad de fabricación. Además, deben ser realizados con materiales fáciles de conseguir, livianos y de fácil ensamblaje.
- Los actuadores del robot deben ofrecer las velocidades y pares apropiados a la masa del robot y a las características promedio de un robot delta industrial.

Sistema eléctrico

- La alimentación eléctrica debe ser a 110Vac / 60Hz con el fin de poder hacer uso del robot delta en cualquier locación de la universidad.
- El sistema eléctrico debe ser robusto y debe ofrecer protecciones eléctricas para todos los dispositivos del robot.
- El dispositivo debe contar con sensores de *home* que permitan la búsqueda automática de la posición inicial del robot ($\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = 0^\circ$).

Sistema de control

- La solución debe permitir el control de posición de los 3 ejes de manera fácil, ágil y precisa.
- El controlador de movimiento debe interpolar como mínimo tres ejes mediante comandos de alto nivel con el fin de ejecutar trayectorias controladas. Se recomienda la posibilidad de que el controlador de movimiento permita controlar un cuarto eje, con el fin de que a futuro se pueda colocar un eje adicional rotacional sobre el efecto final, ofreciendo un cuarto grado de libertad.
- El programa de control debe permitir la generación de trayectorias lineales en el espacio, realizando movimientos suaves y progresivos mediante aceleraciones y desaceleraciones controladas. Para esto, el programa debe realizar en segundo plano los cálculos de cinemática directa e inversa pertinentes.
- El programa de control y monitoreo debe permitir comunicarse con un *software* capaz de realizar una aplicación de sistemas ciberfísicos, en donde se involucre el robot a desarrollar con un gemelo digital.

3.2. Diseño de *hardware*

3.2.1. Arquitectura de *hardware*

En la figura 3-5 se pueden apreciar los principales elementos de *hardware* necesarios para el correcto funcionamiento del robot, en donde se resaltan:

Dispositivos externos

- Parada de emergencia: Permite al usuario detener manualmente el robot ante una falla o un riesgo de seguridad.
- Señalización: Elementos lumínicos para indicar al usuario el estado actual del robot como estado de alarma, en funcionamiento y listo para operar.
- Computador operando bajo sistema operativo Windows®: Dispositivo central de procesamiento del robot. Este dispositivo ejecuta los algoritmos de control, permitiendo el cálculo de la cinemática directa e inversa, realiza la generación de trayectorias, y ofrece una interfaz de monitoreo y control del robot.
- Alimentación 110 Vac monofásica (alimentación eléctrica del robot): Se elige esta tensión de suministro para permitir la conexión del robot en redes eléctricas estándar de hogar o de oficina, con el fin de poder hacer uso del robot en cualquier laboratorio de la universidad.

Gabinete eléctrico

- Controlador de movimiento y módulo I/O: Es el elemento principal de coordinación de los motores. Permite correr rutinas de interpolación de ejes mediante comandos de alto nivel. Debe poseer módulos de entradas y salidas digitales para interactuar con los diferentes componentes eléctricos del robot. Este dispositivo se comunica de manera bidireccional con el computador mediante una red Ethernet TCP/IP o UDP/IP permitiendo de establecer una comunicación de alta velocidad entre los dispositivos.
- Controladores de los motores: Son los encargados de enviar y gestionar la potencia de los motores, adicionalmente, detectan la posición y velocidad de los motores en tiempo real mediante las señales provenientes de los *encoders* de los motores. Estos elementos reciben señales de pulsos y dirección provenientes del controlador de movimiento mediante señales moduladas por ancho de pulso (PWM por las siglas en inglés de *Pulse Width Modulation*).
- Protecciones eléctricas: Elementos fundamentales para preservar la vida útil de los equipos evitando daños por posibles sobrecargas o corto circuitos.
- Fuentes DC: Convierte la energía proveniente de la red eléctrica a una tensión de 24Vdc para la alimentación del controlador de movimiento y los diferentes sensores y mandos. Adicionalmente, se instala una fuente DC con una tensión de 48Vdc de mayor potencia para la alimentación de los controladores de los motores.

Robot

- Motor: Es el sistema de actuación principal. Deben permitir un movimiento fluido, y con características de par, velocidad y potencia acordes al prototipo a desarrollar. A su vez, deben tener la capacidad de ofrecer el posicionamiento preciso y ágil propio de un robot.
- Reductores de velocidad mecánicos: Permiten disminuir la velocidad y aumentar el par con el fin de garantizar los movimientos de manera correcta acorde a los requerimientos del robot. El tipo de reductor elegido es de tipo planetario, ya que presentan una elevada eficiencia y un reducido juego mecánico.
- Estructura y mecanismos del robot: Incluye todas las piezas del robot como base fija, base móvil, eslabones activos, eslabones pasivos, articulaciones, etc.
- Sensores finales de carrera / *home*: Impiden que el robot alcance posiciones fuera del rango de operación normal con el fin de evitar colisiones entre las partes del robot y adicionalmente ofrecen la capacidad de referenciar los ejes automáticamente.

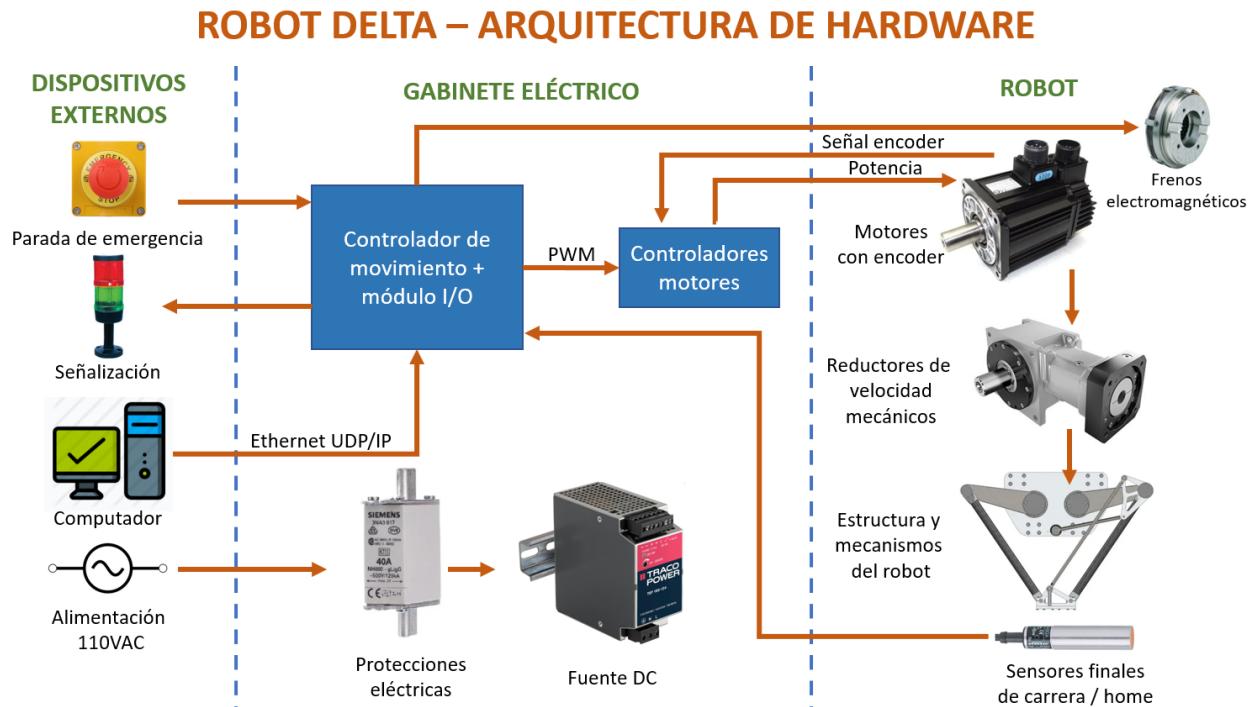


Figura 3-5: Arquitectura de hardware. [Autor]

3.2.2. Diseño del sistema mecánico

Dimensionamiento de los actuadores

Con el objeto de conocer el desempeño de un robot industrial comercial, se procede a obtener las características básicas de un robot delta marca ABB referencia IRB 360-1/800, el cual posee las siguientes características:

Descripción	Valor
Capacidad de carga [Kg]	1
Espacio de trabajo [mm]	Cilindro: Altura 200 / radio 400
Velocidad máxima de los ejes x, y, z [$\frac{m}{s}$]	10
Velocidad máxima de los actuadores [$^{\circ}/s$]	2880

Tabla 3-2: Características del robot delta ABB IRB 360-1/800

Conociendo los datos de un robot delta comercial, los cuales serían valores próximos desde el punto de vista de diseño, se procede a analizar los elementos con que se cuenta inicialmente para desarrollar el presente trabajo. En este caso, se parte de las piezas fabricadas en trabajos previos de la universidad, en donde tan solo se cuenta con el bastidor, los brazos activos y los brazos pasivos; por lo tanto, la labor principal es la correcta selección de los

actuadores para el prototipo a desarrollar. Para esto, se hace uso de la formulación Lagrangiana descrita previamente en la sección 2.5 y del programa para el cálculo de los actuadores descrito en la sección 3.4.3, en donde se procede a realizar pruebas de movimientos lineales partiendo desde un punto inicial $P_1 = [-175, -175, -250]$, viajando hasta un punto final $P_2 = [175, 175, -250]$ y regresando de nuevo al punto inicial P_1 . Como variable, es posible modificar el tiempo total del recorrido, obteniendo los resultados de las figuras 3-6, 3-7, 3-8, 3-9 y 3-10:

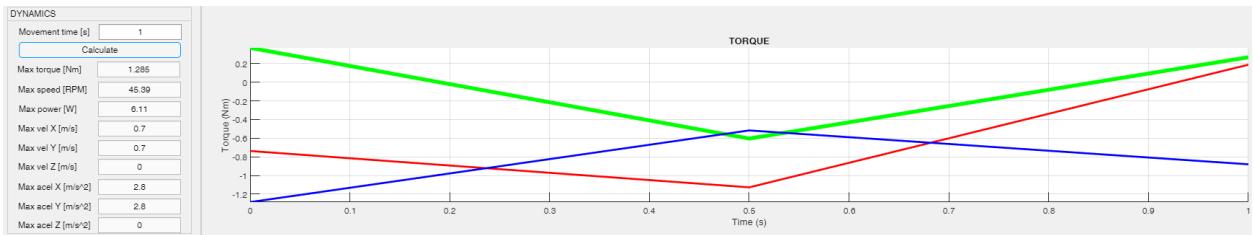


Figura 3-6: Movimiento de prueba número 1 ejecutado en 1 segundo. [Autor]

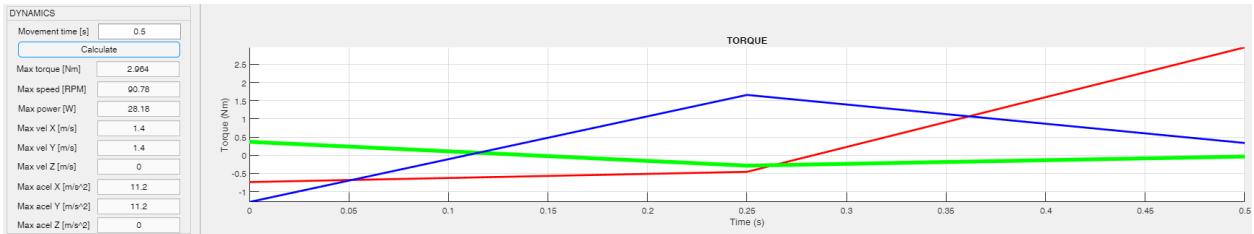


Figura 3-7: Movimiento de prueba número 2 ejecutado en 0.5 segundos. [Autor]

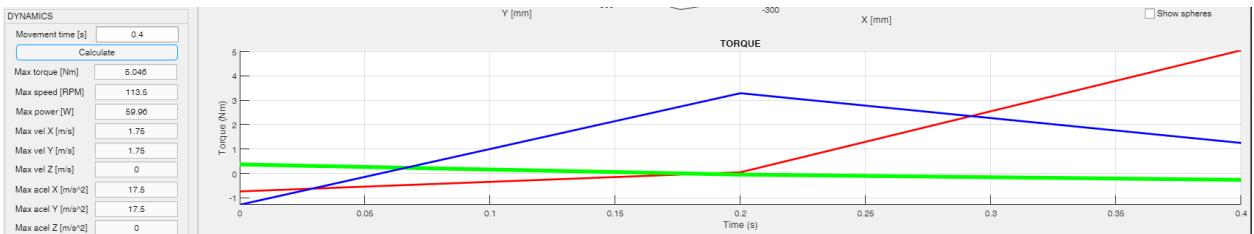


Figura 3-8: Movimiento de prueba número 3 ejecutado en 0.4 segundos. [Autor]

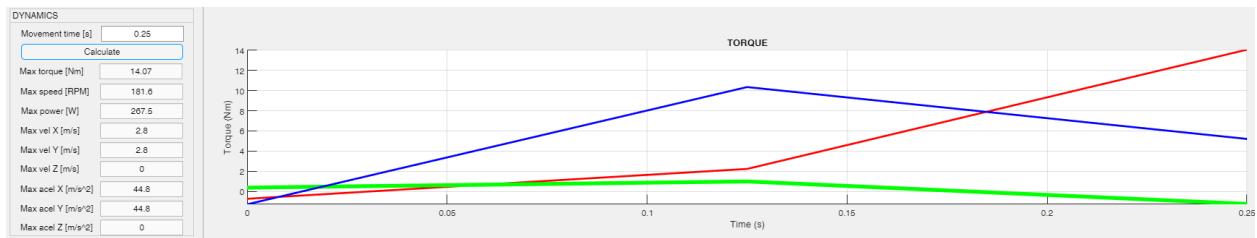


Figura 3-9: Movimiento de prueba número 4 ejecutado en 0.25 segundos. [Autor]

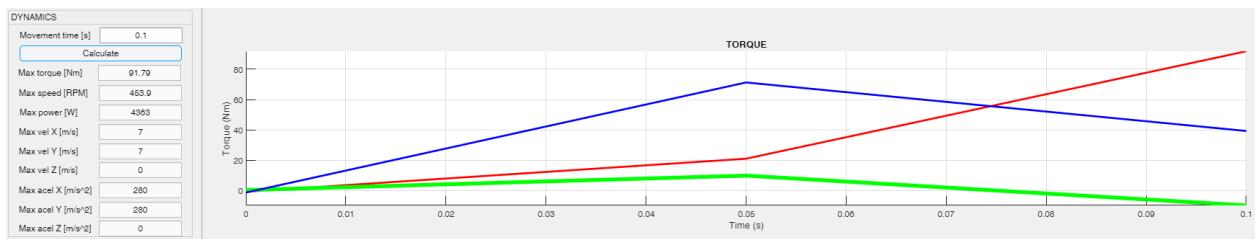


Figura 3-10: Movimiento de prueba número 5 ejecutado en 0.1 segundos. [Autor]

Observando los resultados obtenidos en la primera prueba que tarda 1 segundo, se alcanza un par máximo en uno de los actuadores de 1.285 Nm con una velocidad máxima de 45.39 RPM ($272.3^{\circ}/s$) y en el caso extremo para la quinta prueba que tarda 0.1 segundos, se alcanza un par máximo en uno de los actuadores de 91.79 Nm con una velocidad máxima de 453.9 RPM ($2723.4^{\circ}/s$).

Con el propósito de obtener una respuesta media, unos valores de par y aceleración moderados y por ende una rigidez estructural que no requiere de una estructura de altas prestaciones, se opta por construir un prototipo que brinde características como las requeridas en el tercer ejercicio el cual tarda 0.4 segundos, en donde se alcanza un par máximo en uno de los actuadores de 5.046 Nm con una velocidad máxima de 113.5 RPM ($681^{\circ}/s$).

Selección de los motores:

Partiendo de los requerimientos mencionados anteriormente, se procede a hacer la selección de los motores. Las opciones disponibles de motores para realizar control de posición son:

- Motor paso a paso:
 - Operan en lazo abierto, lo cual da la posibilidad de perder pasos y por ende la posición.
 - Presentan un alto consumo de energía y gran disipación de calor debido a que sus bobinas están excitadas permanentemente consumiendo su corriente nominal.

- Al operar en lazo abierto, el controlador de movimiento no es capaz de detectar si el motor ha perdido la posición.
 - Requiere ser sobredimensionado con el fin de evitar la perdida de la posición.
 - Es la opción más económica.
 - Presentan alto par a bajas revoluciones, pero al aumentar la velocidad el par entregado decrece rápidamente, por lo tanto, se recomienda usarlo con velocidades muy lentas (≤ 100 RPM).
- Motor paso a paso híbrido:
- Operan en lazo cerrado mediante retroalimentación por *encoder*.
 - Presenta un consumo de energía bajo debido a que tan solo requiere energía para hacer correcciones de posición. A su vez, la disipación de calor es baja.
 - Al operar en lazo cerrado, el controlador de movimiento es capaz de detectar si el error de posición supera un umbral predeterminado. Si el error es demasiado grande, el controlador genera una falla de posicionamiento.
 - Comercialmente tienen un precio medio.
 - Presentan alto par a bajas revoluciones, pero al aumentar la velocidad el par entregado decrece de manera moderada, por lo tanto, se recomienda usarlo con velocidades medias (≤ 1000 RPM aproximadamente).
- Servomotor:
- Operan en lazo cerrado mediante retroalimentación por *encoder*.
 - Presenta un consumo de energía bajo debido a que tan solo requiere energía para hacer correcciones de posición. A su vez, la disipación de calor es baja.
 - Al operar en lazo cerrado, el controlador de movimiento es capaz de detectar si el error de posición supera un umbral predeterminado. Si el error es demasiado grande, el controlador genera una falla de posicionamiento.
 - Presentan par constante desde las cero revoluciones hasta su velocidad nominal, por lo tanto, se recomienda su uso a velocidades nominales con el fin de hacer uso de uso punto de entrega máxima de potencia. A nivel comercial, las velocidades nominales más comunes van desde los 2500 hasta los 5000 RPM.
 - Comercialmente tienen un precio elevado.

Debido a las características básicas e inefficientes que ofrecen los motores paso a paso, se descarta su uso para el presente proyecto.

Analizando las características propias de un robot delta, en donde se requieren grandes aceleraciones y desaceleraciones (por ende gran par de torsión) y bajas velocidades de los actuadores, la opción más conveniente para su desarrollo es con motores paso a paso híbridos, los cuales tienen un costo moderado, operan en lazo cerrado y entregan un gran par de torsión hasta rangos medios de velocidad.

Dentro de los elementos de seguridad planteados anteriormente, se requiere que los actuadores del robot dispongan de frenos electromagnéticos de disco, en donde al des-energizar su bobina, ya sea por un comando ejecutado por el controlador o por una falla en el suministro eléctrico, estos bloquen o frenen los eslabones activos con el propósito de evitar que los brazos del robot queden libres y caigan por la acción de la gravedad.

Haciendo una búsqueda en el mercado, los motores más pequeños comúnmente disponibles en el mercado con frenos electromagnéticos de disco son motores de tamaño NEMA 23, por lo tanto, la selección de los actuadores parte de ese tipo de motores.

Basado en las velocidades y pares requeridos, se procede a buscar un motor que cuente con freno electromagnético de disco, encontrando el motor de referencia 60J1887EC-1000-SC el cual cuenta con las características mostradas en la tabla **3-3** y en la figura **3-11**:

Descripción	Valor
Tamaño	NEMA 24
Diámetro eje [mm]	8
Par de retención [Nm]	3
Giro por paso [°]	1.8
Fases	2
Resolución del encoder [ppr]	1000
Corriente nominal [A]	5
Precisión de posicionamiento [°]	1.8° +/- 0.09°
Masa [Kg]	1.45
Freno electromagnético	Si (De disco normalmente accionado de 24Vdc)

Tabla 3-3: Características del motor paso a paso híbrido 60J1887EC-1000-SC

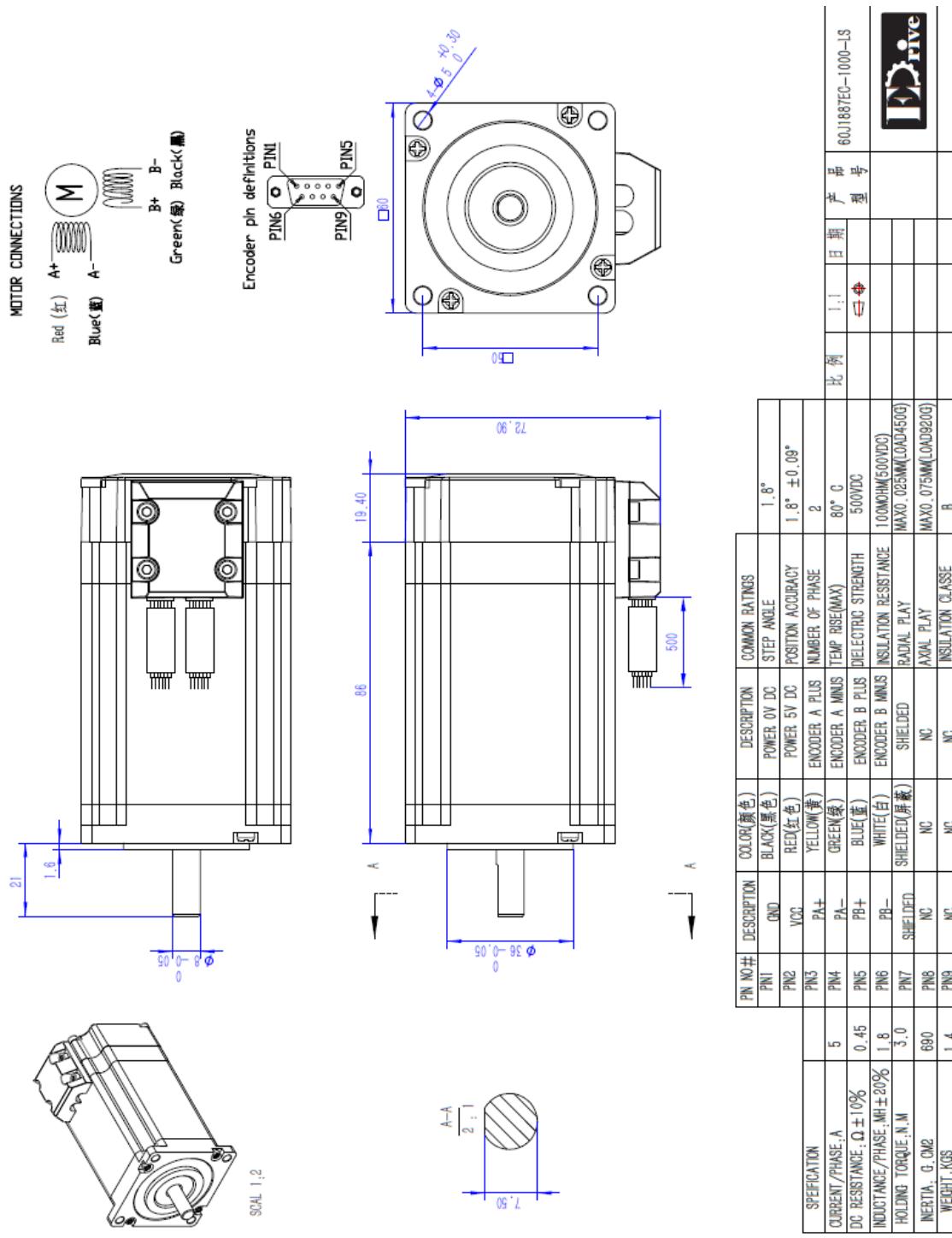


Figura 3-11: Ficha técnica motor paso a paso híbrido 60J1887EC-1000-SC. [Autor]

En la figura 3-12 se presenta la curva de par del motor 60J1887EC-1000-SC con su *driver* alimentado a 36Vdc.

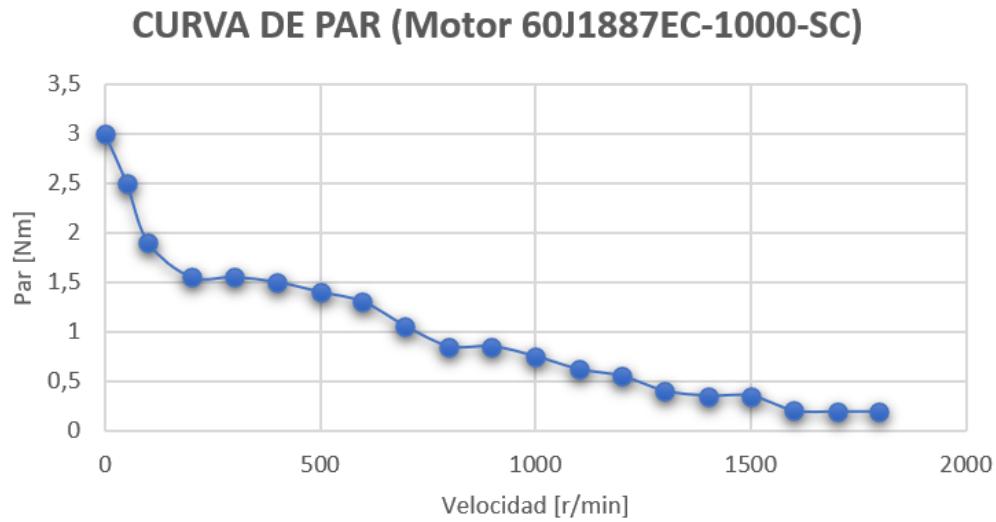


Figura 3-12: Curva de par del motor paso a paso híbrido 60J1887EC-1000-SC. [Autor]

Reductores de velocidad mecánicos

Para obtener el par requerido de 5.046 Nm y la velocidad de 113.5 RPM planteados previamente y con base en las características del motor paso a paso híbrido seleccionado, se procede a hacer la selección del reductor de velocidad mecánico, el cual cuenta con las características mostradas en la tabla 3-4:

Descripción	Valor
Tipo	Planetario
Tamaño	NEMA 24
Backlash [arcmin]	≤ 7
Potencia nominal [W]	400
Diámetro eje entrada [mm]	8
Diámetro eje salida [mm]	38
Par de salida [Nm]	16
Relación de reducción	5:1

Tabla 3-4: Características del reductor planetario PLF060-L1-5-60-8*31

Modelado CAD de los elementos mecánicos

En la figura 3-13 se puede observar el ensamblaje general del robot, incluyendo el gabinete eléctrico, el pedestal, canaletas ranuradas que sirven como guía para los cables eléctricos, la base fija, las tres cadenas cinemáticas completamente armadas, la base móvil, entre otros.

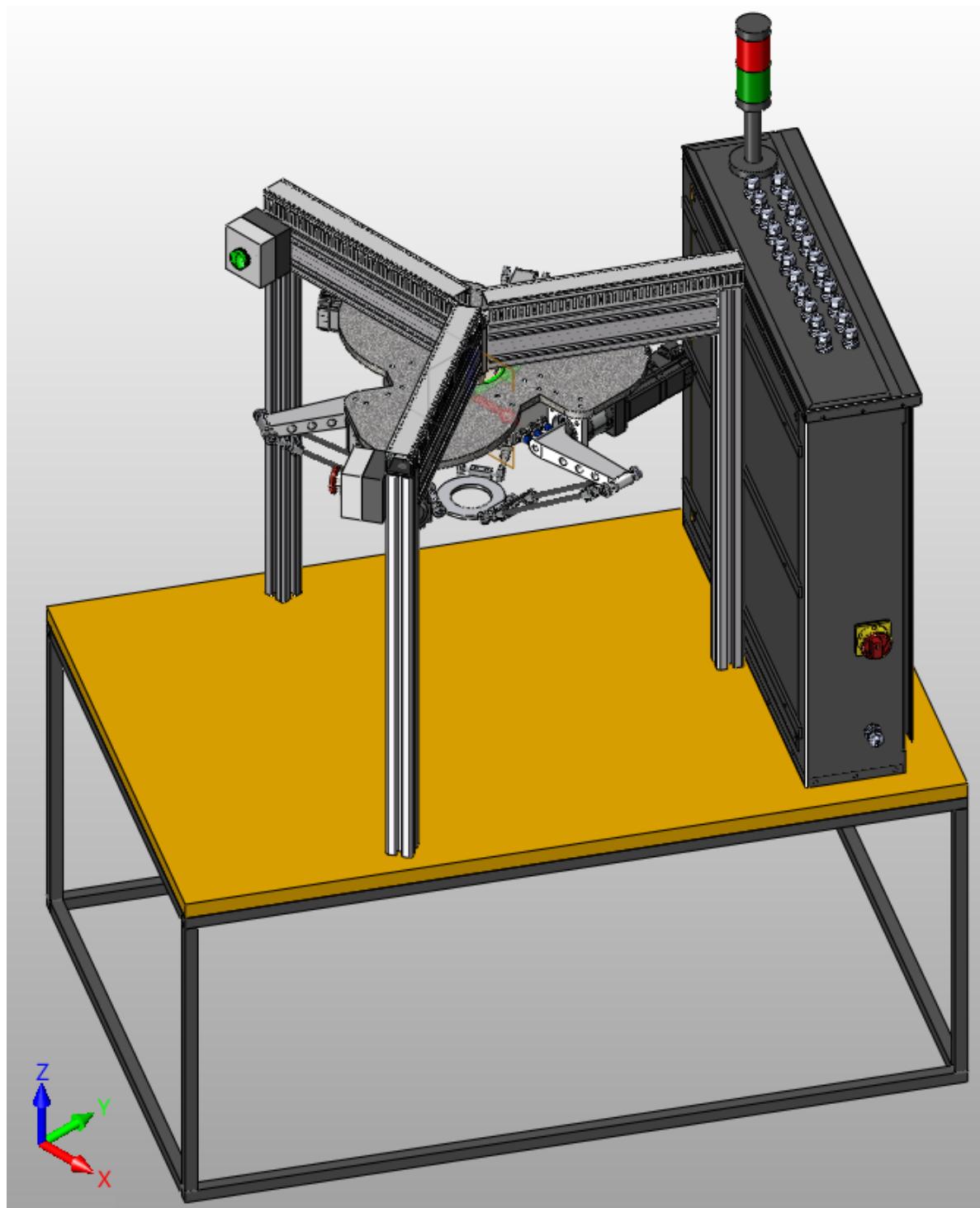


Figura 3-13: Ensamble general robot delta. [Autor]

Para mayor detalle del modelamiento CAD de los elementos mecánicos, referirse al anexo A.

3.2.3. Diseño del sistema eléctrico y electrónico

Fuente de voltaje DC principal

Con el fin de suministrar la energía a los tres *drives* de los motores paso a paso híbridos, se seleccionó una fuente de voltaje con las características descritas en la tabla 3-5:

Tipo de fuente	Regulada
Marca	Bel Power Solutions
Referencia	ABE1000-1T48
Anclaje	Por tornillos
Voltaje de entrada [Vac]	85-264
Voltaje de salida [Vdc]	48
Corriente nominal [A]	20.83
Potencia nominal [W]	1000

Tabla 3-5: Características de la fuente de voltaje DC principal.

Fuente de voltaje DC de control

Para alimentar el controlador de movimiento y los elementos secundarios, se seleccionó una fuente de voltaje con las características descritas en la tabla 3-6:

Tipo de fuente	Comutada
Marca	Mean Well
Referencia	MDR-60-24
Anclaje	Riel DIN
Voltaje de entrada [Vac]	85-264
Voltaje de salida [Vdc]	24
Corriente nominal [A]	2.5
Potencia nominal [W]	60W

Tabla 3-6: Características de la fuente de voltaje DC secundaria.

Drives de los motores paso a paso híbridos

En la tabla 3-7 se describen las características principales de los motores paso a paso híbridos seleccionados:

Tipo de <i>drive</i>	Para motor paso a paso híbrido (con entrada para <i>encoder</i> incremental)
Voltaje de entrada [Vdc]	24 a 50
Corriente de salida continua [A]	4.5
Máxima entrada de pulsos [Kps]	200

Tabla 3-7: Características *drive* 2HSS57 para motor paso a paso híbrido.

Controlador de movimiento

Con el fin de poder realizar movimientos coordinados de los motores paso a paso híbridos, se selecciona un controlador de movimiento capaz de interpolar como mínimo 4 ejes (el cuarto eje es para permitir a futuro añadir un eje rotacional en la base móvil con el fin de agregar un grado de libertad al robot permitiendo operaciones más complejas) y que a su vez, disponga de instrucciones de alto nivel que puedan ser enviadas desde un computador. En la tabla 3-8 se presentan las principales características del controlador de movimiento seleccionado:

Marca	Vital Systems Inc.
Referencia	HiCON Integra 7866
Cantidad de ejes	6 (interpolarados / hasta 2Mhz)
Conexión con <i>drives</i>	Digital (pulso y dirección)
Voltaje de entrada [Vdc]	24
Entradas digitales	16 (8 NPN y 8 PNP / optoacopladas)
Salidas digitales	8 (4 NPN y 4 PNP)
Conectividad	Ethernet TCP/IP
Librerías de control	<i>GCode</i> / C / C++ / C#

Tabla 3-8: Características del controlador de movimiento.

Elementos de entrada (sensores)

En la tabla 3-9 se listan las entradas de los diferentes sensores del prototipo del robot delta:

#	Descripción	Tipo de sensor	Lógica
1	Parada de emergencia	Pulsador tipo hongo con enclavamiento	Normalmente cerrado
2	Referencia Θ_1	Inductivo	Normalmente abierto
3	Final de carrera Θ_1+	Inductivo	Normalmente cerrado
4	Final de carrera Θ_1-	Inductivo	Normalmente cerrado
5	Referencia Θ_2	Inductivo	Normalmente abierto
6	Final de carrera Θ_2+	Inductivo	Normalmente cerrado
7	Final de carrera Θ_2-	Inductivo	Normalmente cerrado
8	Referencia Θ_3	Inductivo	Normalmente abierto
9	Final de carrera Θ_3+	Inductivo	Normalmente cerrado
10	Final de carrera Θ_3-	Inductivo	Normalmente cerrado

Tabla 3-9: Listado de entradas (sensores).

Elementos de salida (actuadores)

En la tabla **3-10** se listan las salidas para controlar los actuadores y para controlar los diferentes elementos lumínicos presentes en el prototipo del robot delta:

#	Descripción	Tipo de actuador
1	Motor Θ_1	Motor paso a paso híbrido
2	Motor Θ_2	Motor paso a paso híbrido
3	Motor Θ_3	Motor paso a paso híbrido
4	Indicador máquina energizada	Piloto color verde
5	Indicador máquina lista / en funcionamiento	Baliza color verde
6	Indicador máquina en falla	Baliza color rojo

Tabla 3-10: Listado de salidas (actuadores).

Modelado CAD del gabinete eléctrico

En las figuras **3-14** y **3-15** se presenta el ensamblaje de los elementos eléctricos y electrónicos principales, incluyendo las protecciones eléctricas mediante fusibles ultrarrápidos, fuente de voltaje de 24Vdc para los elementos de control, fuente de 48Vdc para la alimentación de los controladores de los motores, 4 controladores para los motores (el proyecto contempla el uso de tan solo 3 controladores de motores y sus correspondientes motores, pero el espacio del tablero se conceptuó para que a futuro se pueda adicionar un cuarto motor), el controlador

de movimiento y los 3 controladores de los 3 frenos electromagnéticos. A su vez, en la parte superior del gabinete se aprecia la baliza o indicador lumínico para indicar al usuario el estado actual del robot y los prensa cables por donde pasan los conductores de manera individual desde y hacia los elementos principales del robot.

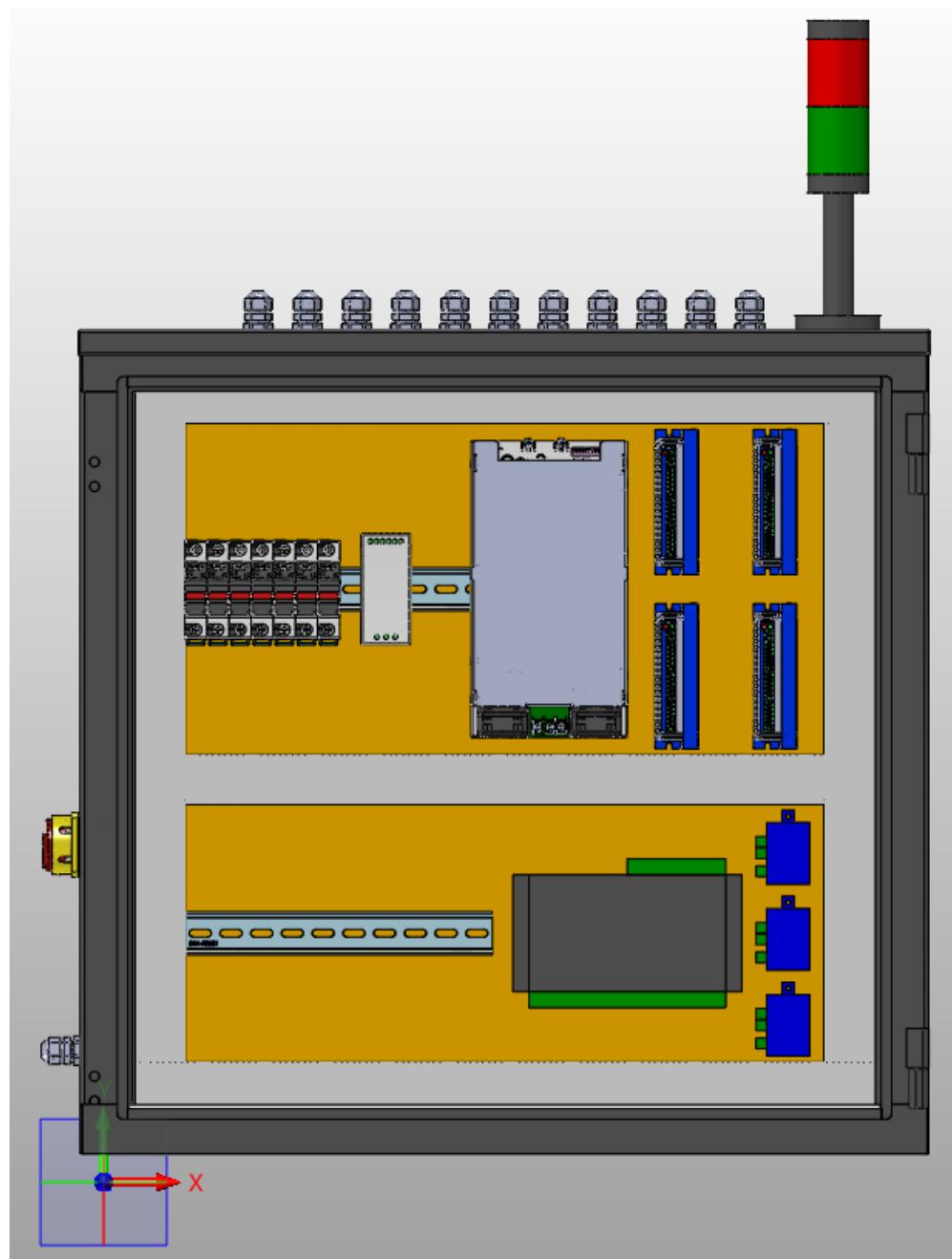


Figura 3-14: Gabinete eléctrico. [Autor]

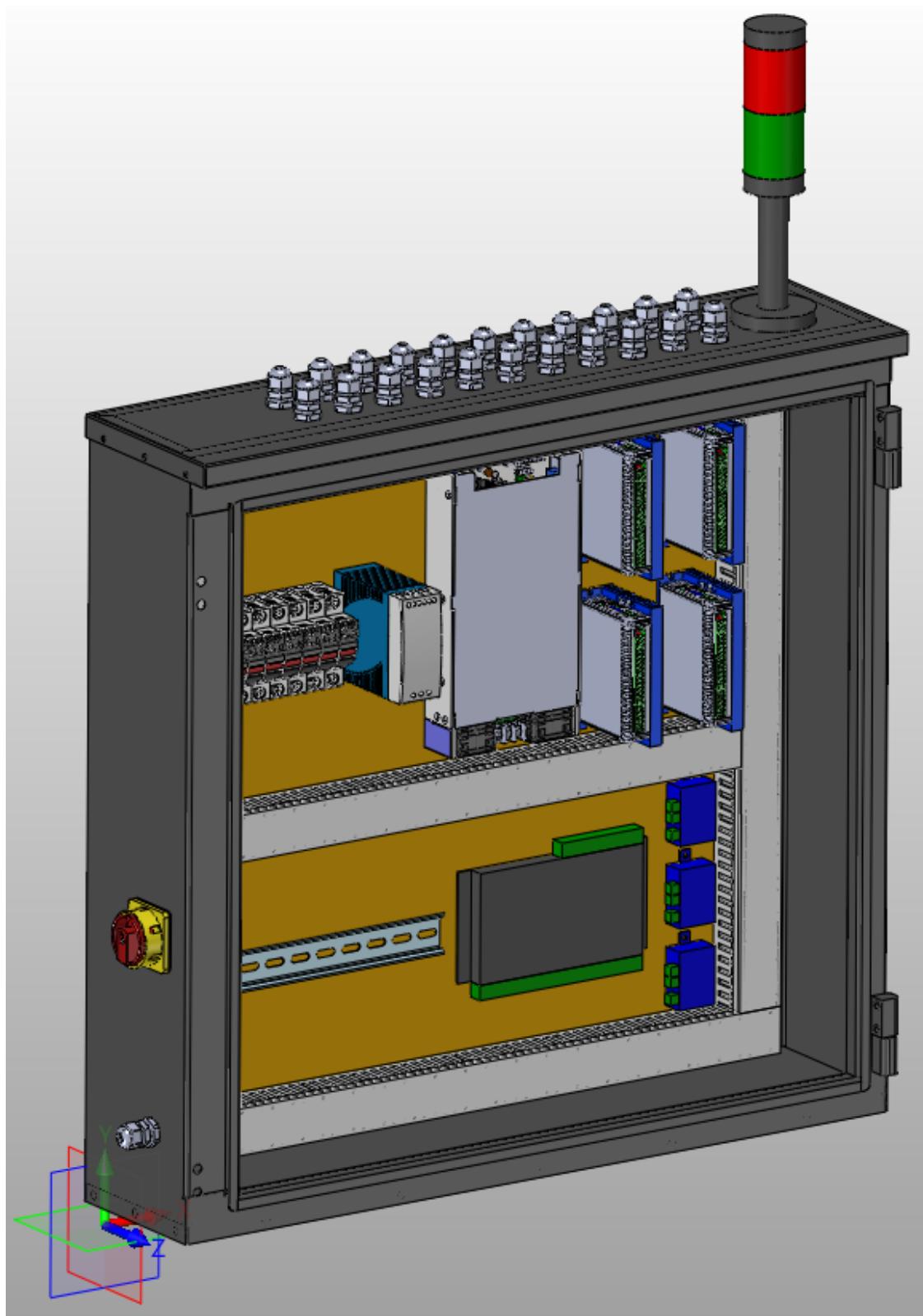


Figura 3-15: Gabinete eléctrico. [Autor]

3.3. Diseño de *software* y control

3.3.1. Arquitectura de *software* y control

Arquitectura de *software*

En la figura 3-16 se pueden apreciar los principales elementos de *software* necesarios para el correcto funcionamiento del robot, en donde se resaltan:

- Módulo de comunicaciones con controlador de movimiento: Librería de alto nivel para la gestión de comandos de los motores, interpolación de ejes y control de los dispositivos de entrada y de salida, tales como finales de carrera, parada de emergencia e indicadores luminosos.
- HMI / GUI: Interfaz gráfica para interactuar con el usuario. Debe permitir la activación de movimientos, conocer el estado del robot, incluyendo posiciones de los actuadores, posición del efecto final, velocidades, entre otros.
- Cálculo cinemática directa e inversa y matriz jacobiana: Permite realizar los cálculos de la cinemática directa e inversa y matriz jacobiana de manera ágil y automática, basado en los parámetros básicos del robot (longitudes de los eslabones activos y pasivos y radios de la base fija y de la base móvil), de tal manera que el mismo programa sea capaz de adaptarse a cualquier tamaño de robot.
- Módulo de comunicaciones con el gemelo digital: Permite la comunicación bidireccional entre el programa principal del robot ejecutado en el computador con el módulo de sistemas ciberfísicos de *Mechatronics Concept Designer* ® con el fin de que el controlador de movimiento real pueda interactuar con el gemelo digital.

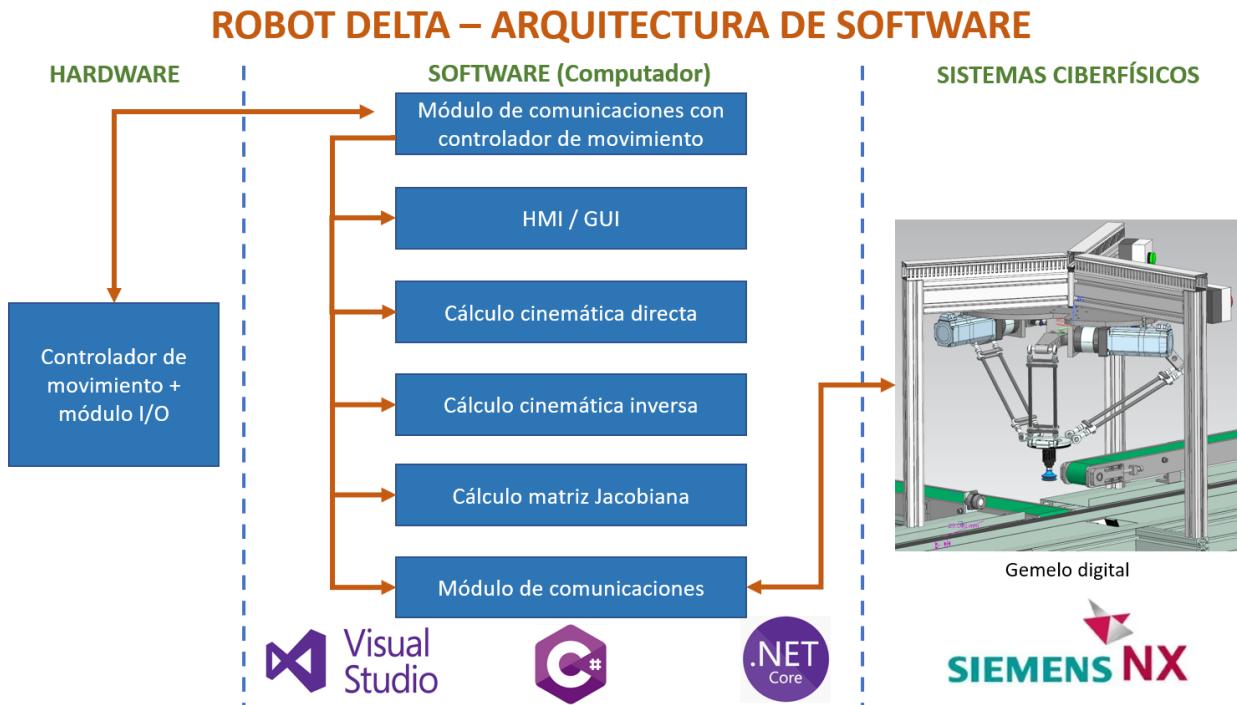


Figura 3-16: Arquitectura de *software*. [Autor]

Arquitectura de control

En la figura 3-17 se pueden observar los lazos de control que permiten mover el robot de manera coordinada basado en las trayectorias generadas por el algoritmo de posicionamiento:

ROBOT DELTA – ARQUITECTURA DE CONTROL

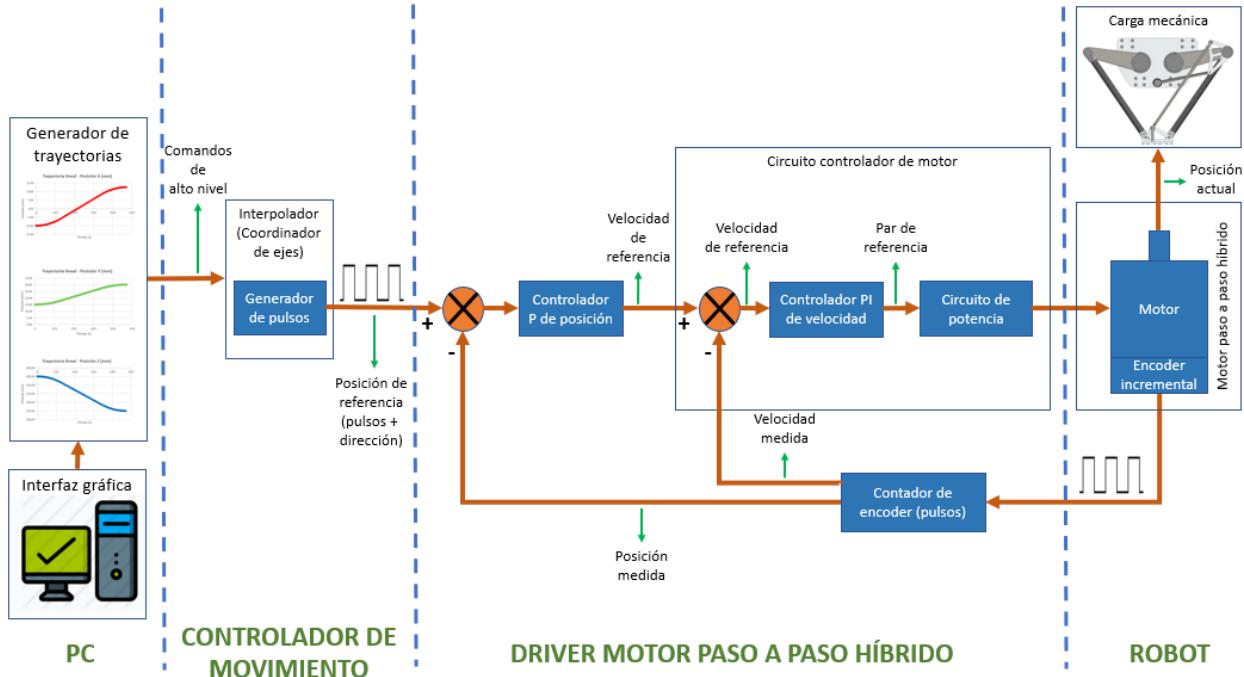


Figura 3-17: Arquitectura de control. [Autor]

3.3.2. Programa de control y monitoreo

Lógica de control y monitoreo

En las figuras 3-18, 3-19 y 3-20 se describe la lógica de control y monitoreo planteada para poder realizar las funcionalidades básicas del robot.

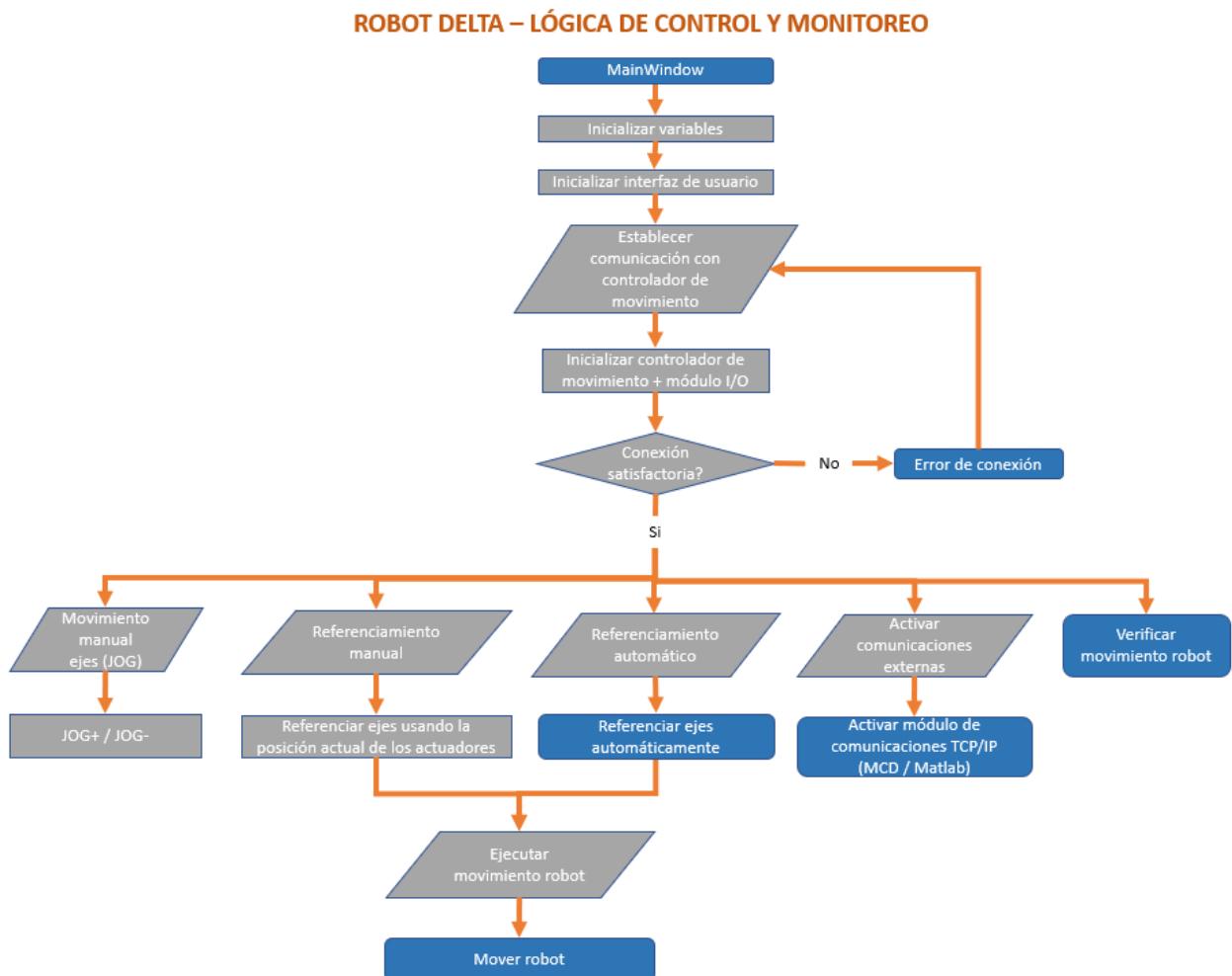


Figura 3-18: Lógica de control y monitoreo. [Autor]

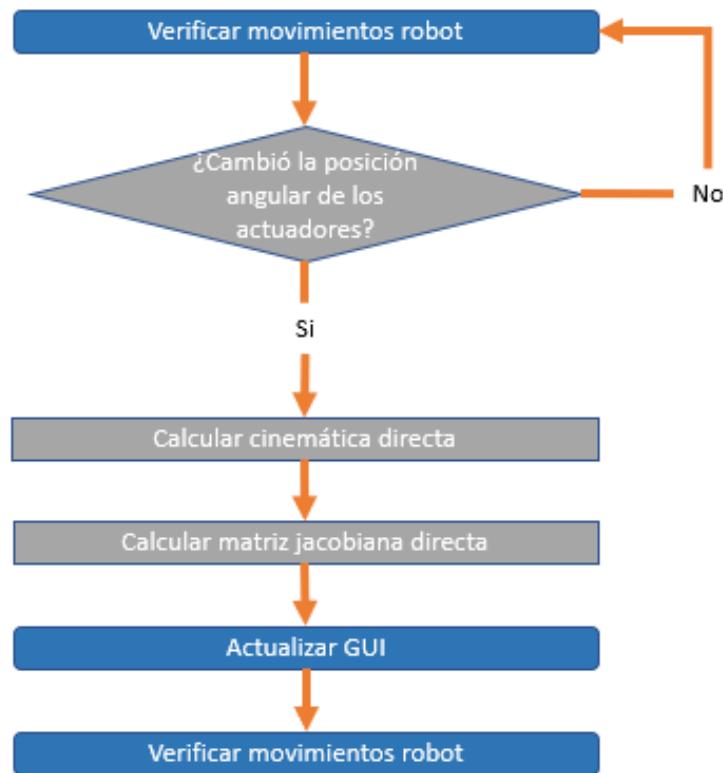


Figura 3-19: Lógica de control y monitoreo. [Autor]

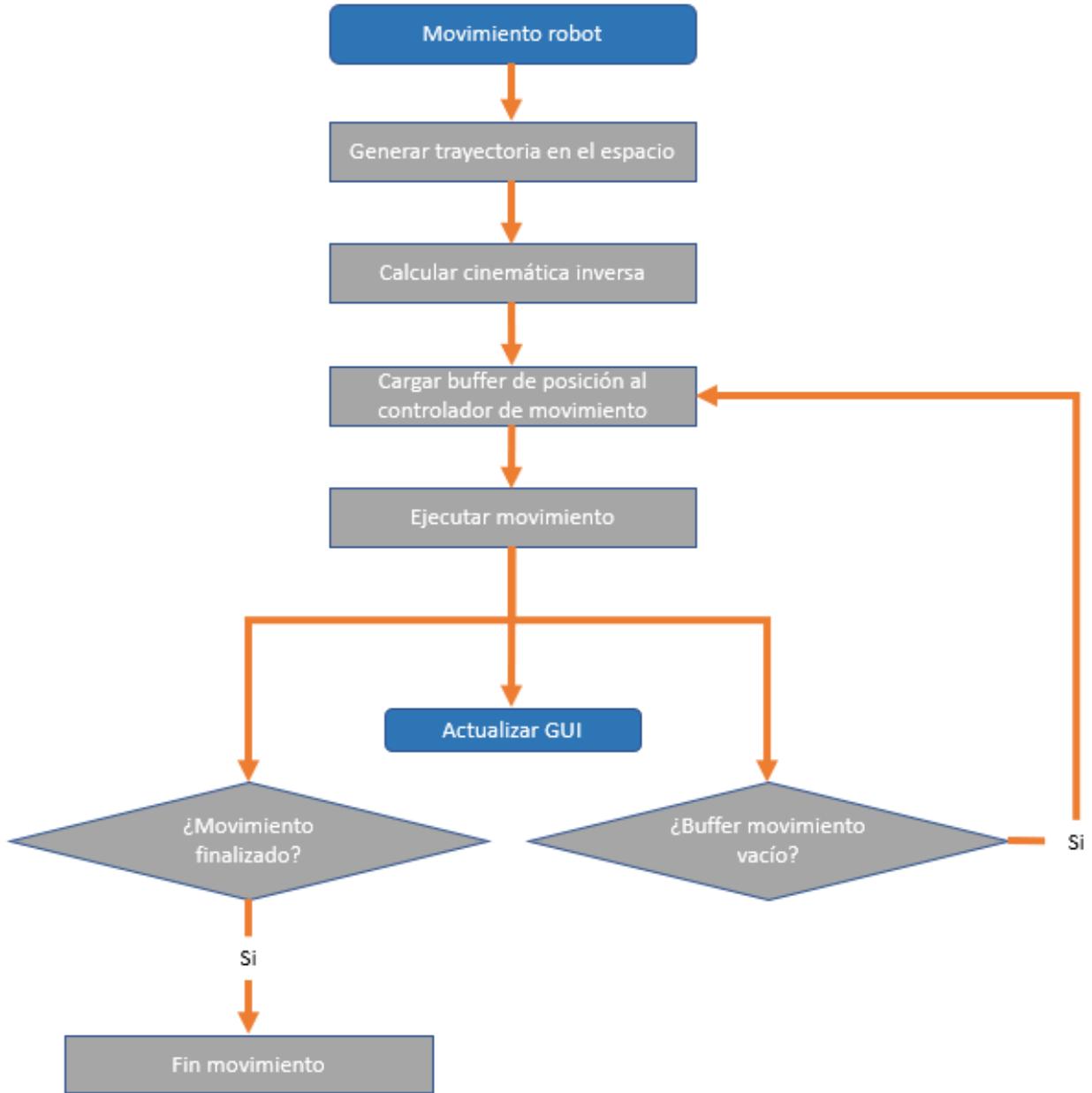


Figura 3-20: Lógica de control y monitoreo. [Autor]

Programa de validación y pruebas

Con el fin de probar y verificar los algoritmos de cinemática directa, cinemática inversa, matriz jacobiana, generación de trayectorias, verificación del espacio de trabajo teórico (sin tener en cuenta las restricciones mecánicas) y el cálculo de par de los actuadores, se propone realizar un desarrollo preliminar en Matlab ® dado que ofrece gran cantidad de herramientas apropiadas para el desarrollo inicial del robot. El desarrollo del programa de validación y

pruebas está descrito en la sección 3.4.3.

Generación de trayectorias

A comparación de una máquina cartesiana de 3 grados de libertad (XYZ) en donde cada actuador afecta tan solo un grado de libertad, en una máquina de arquitectura paralela, como el caso del robot delta de 3 grados de libertad, es más complejo que el efecto final pueda realizar trayectorias lineales en el espacio, ya que todos los actuadores inciden sobre los 3 grados de libertad del robot, requiriendo una gran coordinación de los 3 motores. Para comprender mejor lo mencionado anteriormente, por ejemplo, si en una máquina cartesiana se desea ejecutar un movimiento lineal del efecto final sobre el eje X, tan solo se tiene que mover un actuador, dando el resultado esperado sin que realice movimientos en otras direcciones. En el caso del robot delta, si tan solo se mueve un actuador, el efecto final describe un movimiento de tipo arco realizando simultáneamente desplazamientos sobre los ejes X, Y y Z, por lo tanto, si se desea realizar un movimiento lineal en el espacio, es necesario coordinar los 3 actuadores para obtener el movimiento esperado.

Para comprender mejor el proceso de generación de trayectorias, se presenta el ejemplo planteado en la tabla 3-11, en donde el efecto final parte de una posición $P_1 = [-10, -15, -205]$, y debe viajar describiendo una línea recta en el espacio, hasta una posición final $P_2 = [12,5, 30, 225]$, partiendo de una velocidad lineal igual a 0 mm/s , realizando el movimiento con una aceleración de 75000 mm/s^2 :

Aceleracion lineal [mm/s ²]	75000,00	Distancia del movimiento [mm] (Magnitud vector)	33,63
Velocidad lineal inicial [mm/s]	0,00		
Velocidad lineal objetivo [mm/s]	1000,00	Alpha [deg]	48,01
		Beta [deg]	63,51
Posicion X Inicial [mm]	-10,00	Gamma [deg]	126,49
Posicion X Final [mm]	12,50		
Posicion Y Inicial [mm]	15,00	Tiempo aceleración [s]	0,0133
Posicion Y Final [mm]	30,00		
Posicion Z Inicial [mm]	-205,00	Velocidad máxima X [mm/s]	669,0
Posicion Z Final [mm]	-225,00	Velocidad máxima Y [mm/s]	446,0
		Velocidad máxima Z [mm/s]	-594,6
		Aceleración X [mm/s ²]	50172,4
		Aceleración Y [mm/s ²]	33448,2
		Aceleración Z [mm/s ²]	-44597,6

Tabla 3-11: Ejemplo trayectoria lineal: Datos para realizar movimiento.

Como resultado se genera una tabla con las posiciones, velocidades y aceleraciones del efecto

final vistos sobre los ejes X, Y, y Z del robot con una resolución de 1ms tal y como se aprecia en la tabla 3-12. Posteriormente, se toman las posiciones X, Y y Z del efecto final en cada instante y se procede a realizar el cálculo de la cinemática inversa con el fin de obtener las posiciones de los actuadores para alcanzar las posiciones deseadas. Finalmente, el resultado de la cinemática inversa es enviado por medio de un buffer al controlador de movimiento para poder ejecutar un movimiento lineal continuo. Se resalta que en la tabla 3-12, los datos en color naranja corresponden a la etapa de aceleración, los datos en color verde a los instantes en que se obtienen velocidades constantes y los datos en color azul corresponden a la etapa de desaceleración:

Tiempo [s]	EJE X			EJE Y			EJE Z			CALCULO DE CINEMATICA INVERSA		
	X [mm] (Posición)	Vx [mm/s] (Velocidad)	Ax [mm/s^2] (Aceleración)	Y [mm] (Posición)	Vy [mm/s] (Velocidad)	Ay [mm/s^2] (Aceleración)	Z [mm] (Posición)	Vz [mm/s] (Velocidad)	Az [mm/s^2] (Aceleración)	Q1 [°]	Q2 [°]	Q3 [°]
0	-10,00	0,00	0,00	15,00	0,00	0,00	-205,00	0,00	0,00	12,5426	-0,1138	11,6794
0,001	-9,97	50,17	50172,35	15,02	33,45	33448,24	-205,02	-44,60	-44597,65	12,5318	-0,1147	11,6910
0,002	-9,90	100,34	50172,35	15,07	66,90	33448,24	-205,09	-89,20	-44597,65	12,5201	-0,0924	11,7478
0,003	-9,77	150,52	50172,35	15,15	100,34	33448,24	-205,20	-133,79	-44597,65	12,4973	-0,0517	11,8389
0,004	-9,60	200,69	50172,35	15,27	133,79	33448,24	-205,36	-178,39	-44597,65	12,4729	0,0017	11,9690
0,005	-9,37	250,86	50172,35	15,42	167,24	33448,24	-205,56	-222,99	-44597,65	12,4347	0,0725	12,1348
0,006	-9,10	301,03	50172,35	15,60	200,69	33448,24	-205,80	-267,59	-44597,65	12,3919	0,1562	12,3321
0,007	-8,77	351,21	50172,35	15,82	234,14	33448,24	-206,09	-312,18	-44597,65	12,3391	0,2573	12,5717
0,008	-8,39	401,38	50172,35	16,07	267,59	33448,24	-206,43	-356,78	-44597,65	12,2806	0,3774	12,8473
0,009	-7,97	451,55	50172,35	16,35	301,03	33448,24	-206,81	-401,38	-44597,65	12,2181	0,5105	13,1536
0,01	-7,49	501,72	50172,35	16,67	334,48	33448,24	-207,23	-445,98	-44597,65	12,1433	0,6573	13,4982
0,011	-6,96	551,90	50172,35	17,02	367,93	33448,24	-207,70	-490,57	-44597,65	12,0638	0,8233	13,8777
0,012	-6,39	602,07	50172,35	17,41	401,38	33448,24	-208,21	-535,17	-44597,65	11,9815	0,9987	14,2908
0,013	-5,76	652,24	50172,35	17,83	434,83	33448,24	-208,77	-579,77	-44597,65	11,8908	1,1957	14,7397
0,014	-5,10	668,96	16724,12	18,27	445,98	11149,41	-209,36	-594,64	-14865,88	11,7988	1,4036	15,2087
0,015	-4,43	668,96	0,00	18,71	445,98	0,00	-209,95	-594,64	0,00	11,7045	1,6141	15,6773
0,016	-3,76	668,96	0,00	19,16	445,98	0,00	-210,54	-594,64	0,00	11,6124	1,8213	16,1474
0,017	-3,09	668,96	0,00	19,60	445,98	0,00	-211,14	-594,64	0,00	11,5252	2,0363	16,6141
0,018	-2,42	668,96	0,00	20,05	445,98	0,00	-211,73	-594,64	0,00	11,4372	2,2443	17,0796
0,019	-1,76	668,96	0,00	20,50	445,98	0,00	-212,33	-594,64	0,00	11,3586	2,4542	17,5437
0,02	-1,09	668,96	0,00	20,94	445,98	0,00	-212,92	-594,64	0,00	11,2742	2,6665	18,0010
0,021	-0,42	668,96	0,00	21,39	445,98	0,00	-213,52	-594,64	0,00	11,1953	2,8794	18,4626
0,022	0,25	668,96	0,00	21,83	445,98	0,00	-214,11	-594,64	0,00	11,1149	3,0924	18,9157
0,023	0,92	668,96	0,00	22,28	445,98	0,00	-214,71	-594,64	0,00	11,0400	3,3060	19,3730
0,024	1,59	668,96	0,00	22,73	445,98	0,00	-215,30	-594,64	0,00	11,1528	3,7343	19,9831
0,025	2,26	668,96	0,00	23,17	445,98	0,00	-215,90	-594,64	0,00	10,8925	3,7340	20,2753
0,026	2,93	668,96	0,00	23,62	445,98	0,00	-216,49	-594,64	0,00	10,8203	3,9450	20,7240
0,027	3,60	668,96	0,00	24,06	445,98	0,00	-217,09	-594,64	0,00	10,7528	4,1635	21,1696
0,028	4,27	668,96	0,00	24,51	445,98	0,00	-217,68	-594,64	0,00	10,6845	4,3753	21,6145
0,029	4,93	668,96	0,00	24,96	445,98	0,00	-218,28	-594,64	0,00	10,6253	4,5881	22,0580
0,03	5,60	668,96	0,00	25,40	445,98	0,00	-218,87	-594,64	0,00	10,5303	4,8046	22,4956
0,031	6,27	668,96	0,00	25,85	445,98	0,00	-219,46	-594,64	0,00	10,4977	5,0176	22,9349
0,032	6,94	668,96	0,00	26,29	445,98	0,00	-220,06	-594,64	0,00	10,4397	5,2377	23,3713
0,033	7,61	668,96	0,00	26,74	445,98	0,00	-220,65	-594,64	0,00	10,3808	5,4514	23,8071
0,034	8,27	652,24	-16724,12	27,18	434,83	-11149,41	-221,24	-579,77	14865,88	10,3273	5,6664	24,2358
0,035	8,90	602,07	-50172,35	27,60	401,38	-33448,24	-221,80	-535,17	44597,65	10,2770	5,8709	24,6426
0,036	9,48	551,90	-50172,35	27,98	367,93	-33448,24	-222,31	-490,57	44597,65	10,2299	6,0596	25,0121
0,037	10,00	501,72	-50172,35	28,33	334,48	-33448,24	-222,78	-445,98	44597,65	10,1935	6,2305	25,3487
0,038	10,48	451,55	-50172,35	28,65	301,03	-33448,24	-223,20	-401,38	44597,65	10,1562	6,3846	25,6542
0,039	10,91	401,38	-50172,35	28,94	267,59	-33448,24	-223,58	-356,78	44597,65	10,1250	6,5231	25,9292
0,04	11,28	351,21	-50172,35	29,19	234,14	-33448,24	-223,92	-312,18	44597,65	10,1030	6,6468	26,1686
0,041	11,61	301,03	-50172,35	29,41	200,69	-33448,24	-224,21	-267,59	44597,65	10,0794	6,7535	26,3775
0,042	11,88	250,86	-50172,35	29,59	167,24	-33448,24	-224,45	-222,99	44597,65	10,0613	6,8418	26,5488
0,043	12,11	200,59	-50172,35	29,74	133,79	-33448,24	-224,65	-178,39	44597,65	10,0445	6,9166	26,6923
0,044	12,28	150,52	-50172,35	29,86	100,34	-33448,24	-224,81	-133,79	44597,65	10,0366	6,9733	26,8043
0,045	12,41	100,34	-50172,35	29,94	66,90	-33448,24	-224,92	-89,20	44597,65	10,0489	7,0401	26,8993
0,046	12,49	50,17	-50172,35	29,99	33,45	-33448,24	-224,99	-44,60	44597,65	10,0204	7,0429	26,9320
0,047	12,50	14,42	-35749,40	30,00	0,00	-33448,24	-225,00	0,00	44597,65	10,0203	7,0455	26,9397

Tabla 3-12: Resultados del ejemplo de la generación de una trayectoria lineal

En las figuras **3-21**, **3-22** y **3-23** se puede observar el movimiento del efecto final sobre los ejes X, Y y Z de manera independiente, tomado de los resultados del ejemplo planteado en la tabla **3-12**, en donde se muestra el proceso progresivo de aceleración y desaceleración:

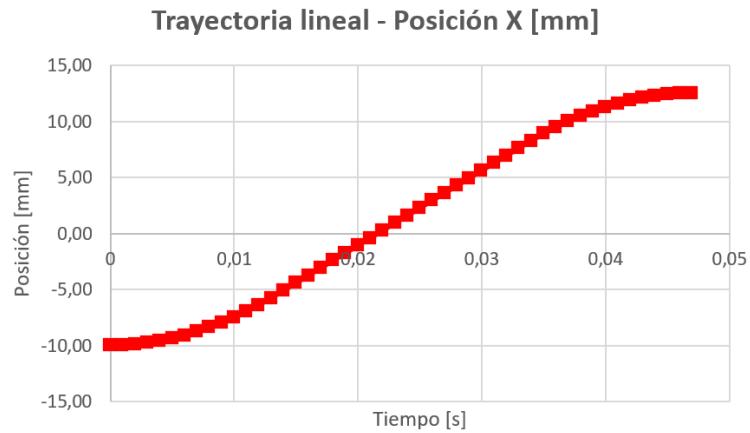


Figura 3-21: Ejemplo trayectoria lineal: Movimiento en X. [Autor]

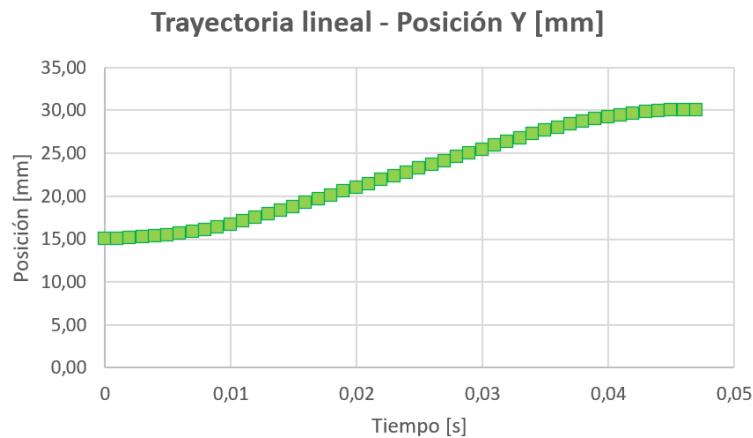


Figura 3-22: Ejemplo trayectoria lineal: Movimiento en Y. [Autor]

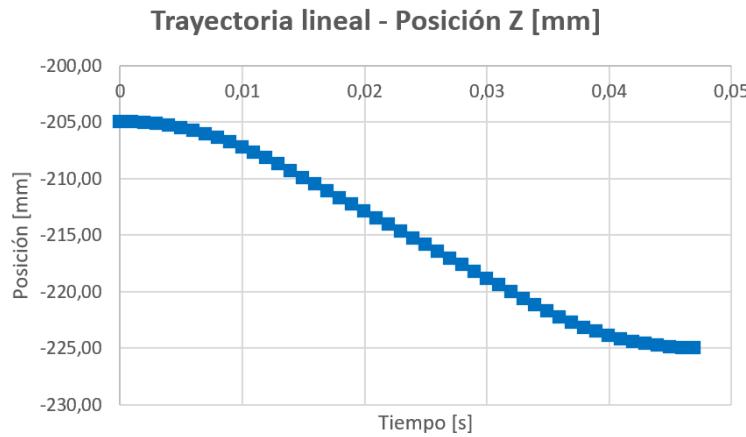


Figura 3-23: Ejemplo trayectoria lineal: Movimiento en Z. [Autor]

3.3.3. Comunicaciones

Con el fin de poder establecer una comunicación entre el programa de pruebas preliminares de Matlab®, el programa de control del robot de Microsoft Visual Studio® y el módulo de sistemas ciberfísicos de Siemens Mechatronics Concept Designer®, se debe elegir un estándar de comunicación adecuado, que brinde las siguientes características:

1. Compatibilidad con todos los programas a utilizar.
2. Alta velocidad de comunicación (con el fin de tener una emulación fluida del proceso).
3. Estabilidad en la comunicación.
4. Facilidad de uso.
5. En lo posible que sea de uso libre.

Partiendo de que el estándar a usar debe ser compatible con todos los programas a utilizar, se tienen las siguientes opciones:

1. OPC (*OLE for Process Control*): Usada a nivel industrial en el campo de control y supervisión, en donde a través de una arquitectura cliente / servidor permite compartir los datos disponibles en el servidor con los dispositivos de la red. Es una solución abierta y flexible que permite eliminar el problema de los *drivers* propietarios. Como se menciona anteriormente, requiere de un servidor central que permita crear una base de datos unificada de todos los datos de la red y en donde de manera periódica se actualicen sus valores.

2. *Sockets TCP / UDP* : Permite establecer una conexión punto a punto sin la necesidad de un servidor centralizado. A pesar de esto, se comporta de igual manera como una arquitectura cliente / servidor, en donde la comunicación debe ser iniciada por el programa cliente y el servidor espera a que se establezca la comunicación. Un *socket* es un proceso o hilo ejecutado en paralelo que permite la transferencia de datos mediante diferentes capas de red. En el caso de TCP, la comunicación es orientada a la conexión, es decir, que se requiere establecer previamente un canal de comunicación entre el cliente y el servidor para poder iniciar el intercambio de datos y toda la información transmitida debe ser acusada, es decir que existe una comprobación de que los datos fueron recibidos satisfactoriamente. En el caso de UDP, la comunicación es no orientada a la conexión, por lo tanto, no hay acuse de recepción de datos, es decir, que no es posible garantizar que los datos hayan llegado correctamente a su destino, aunque, por otra parte, permite aumentar la velocidad de transmisión de datos.

3.3.4. Integración con *software* para sistemas ciberfísicos

Usando las herramientas ofrecidas por los sistemas ciberfísicos, es posible integrar e interactuar dispositivos mecatrónicos reales (incluyendo sus dispositivos mecánicos, de control, movimiento y comunicación) con herramientas virtuales, en donde sin necesidad de fabricar la totalidad de los elementos de una máquina o proceso, es posible recrear sistemas mucho más complejos, partiendo de tan solo algunos de elementos físicos que componen la totalidad del proceso, con el fin de validar tareas antes de su manufactura, aumentando así las probabilidades de cumplir los objetivos y expectativas propuestos disminuyendo las probabilidades de construir dispositivos con fallas de diseño.

Con el fin de hacer una aplicación de sistemas ciberfísicos para el presente trabajo, se propone:

1. Realizar un modelo 3D del robot con las medidas y características exactas del robot fabricado (gemelo digital).
2. Fabricar un prototipo de robot delta funcional.
3. Desarrollar un programa para controlar adecuadamente el robot, el cual permita la generación de trayectorias, cálculo de las cinemáticas directa e inversa y demás funciones básicas descritas en el presente trabajo.
4. Crear un modelo 3D de una fábrica virtual, el cual incluya el modelo del robot delta fabricado. Este modelo debe operar bajo un programa CAD avanzado que permita la comunicación e interacción con dispositivos externos en tiempo real.
5. Programar un sistema de comunicación bidireccional y de alta velocidad entre el controlador de movimiento del robot real y el programa de CAD avanzado.

6. Desarrollar, ejecutar y validar la interacción del modelo virtual con el dispositivo real mediante una aplicación de *pick and place*.

3.4. Implementación y validación

3.4.1. Sistema mecánico

En la figura 3-24 se puede apreciar el ensamblaje final del robot delta:

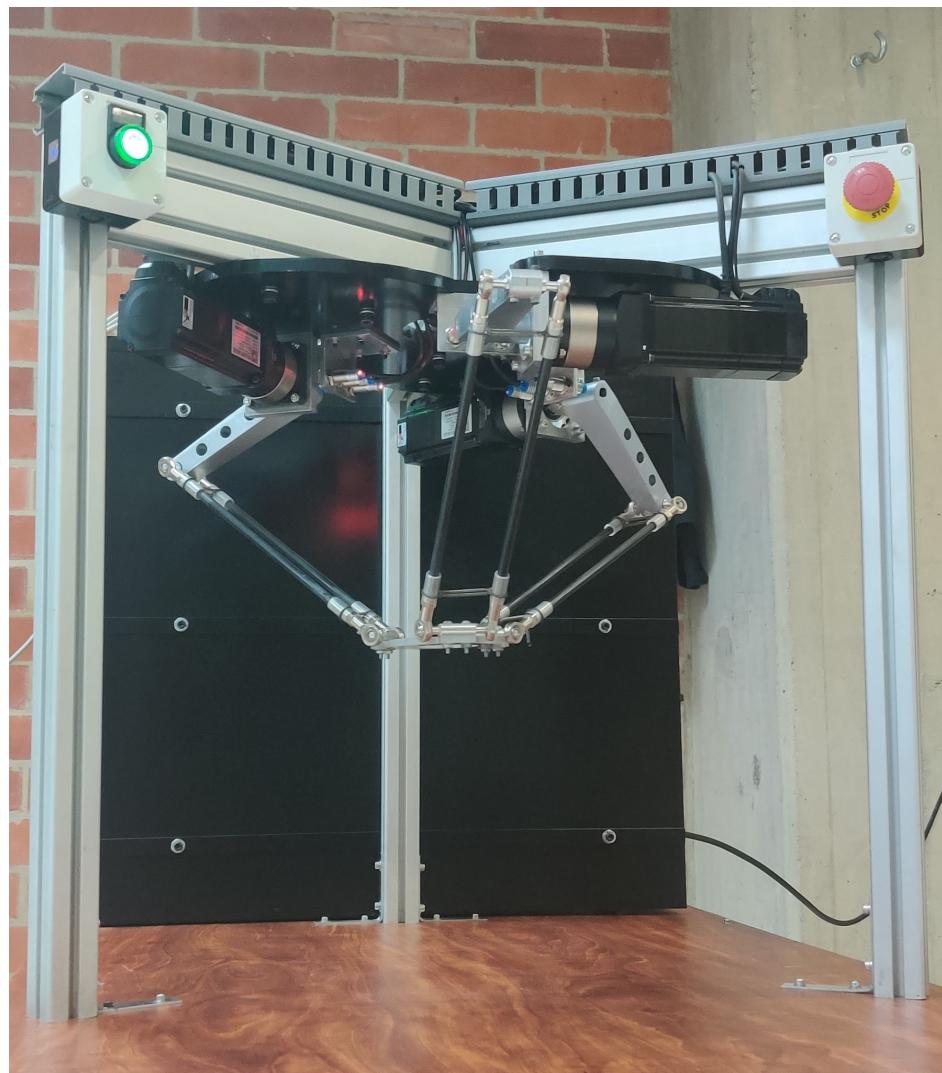


Figura 3-24: Ensamblaje final robot delta. [Autor]

En el anexo B es posible encontrar más detalles de la implementación del sistema mecánico, así como información detallada de las piezas mecánicas del robot, su ensamblaje, su alineación

y proceso de nivelación.

Con base en los criterios de diseño planteados, el conjunto motorreductor seleccionado cumple con las características de par y velocidad requeridas, ofreciendo características propias de un robot delta industrial como freno de disco electromagnético normalmente frenado, retroalimentación de la posición y velocidad en tiempo real mediante *encoder* óptico, alto par de arranque, reductor de bajo juego mecánico (*backlash*), entre otros.

Descripción	Valor
Velocidad del motor [RPM] @113.5 RPM en el eslabón activo	567.5
Par del motor [Nm] @motor a 567.5 RPM	1.25
Par del eslabón activo [Nm] @motor a 567.5 RPM	6.25
Resolución del encoder con técnica de cuadratura [ppr]	4000
Resolución del encoder con técnica de cuadratura [deg]	0.09
Resolución sobre el eslabón activo [deg]	0.018

Tabla 3-13: Resultados obtenidos por el conjunto motorreductor seleccionado

Se evidenció que con la correcta selección de los motorreductores, es posible tener grandes velocidades y aceleraciones. En el caso puntual del prototipo construido, tanto la velocidad final como la aceleración debieron ser restringidos por la poca rigidez del prototipo desarrollado. Aun así, el robot delta alcanzó una velocidad de selección y organización de elementos dentro de la línea de producción virtualizada de entre 40 y 80 elementos por minuto. Cabe mencionar, que con la rigidez y robustez del modelo construido se experimentó que al subir la velocidad de selección de elementos a 60 por minuto su vida útil se ve comprometida, ya que se requirió aumentar la velocidad del robot hasta los 8 m/s con aceleraciones de 6 m/s^2 .

3.4.2. Sistema eléctrico y electrónico

La implementación del sistema eléctrico y electrónico del presente trabajo tiene las siguientes características:

- Cofre eléctrico elaborado en lámina *cold rolled* calibre 18, pintado con pintura electrostática color negro, con bandeja doble fondo fabricado a medida.
- Alimentación eléctrica a 110Vac (fase + neutro + polo a tierra).
- Protecciones eléctricas.
- Fuente de 48Vdc para alimentación de los controladores de los motores.

- Fuente de 24Vdc para alimentación del controlador de movimiento y de los demás sistemas electrónicos.
- Controladores para motores paso a paso híbridos (de lazo cerrado).
- Motores paso a paso NEMA 24 con retroalimentación por medio de encoders incrementales con frenos de disco electromagnéticos.
- Controladores para los frenos electromagnéticos.
- Controlador de movimiento de 6 ejes con comunicación TCP/IP y disponibilidad de librería .NET para la generación de rutinas personalizadas.
- Sensores de proximidad inductivos para la detección de finales de carrera y posiciones de inicio de cada uno de los 3 brazos activos.
- Parada de emergencia física mediante interruptor tipo hongo con retención.
- Baliza para la indicación del estado del robot.

En la figura **3-25** se puede observar el ensamblaje final del gabinete eléctrico:

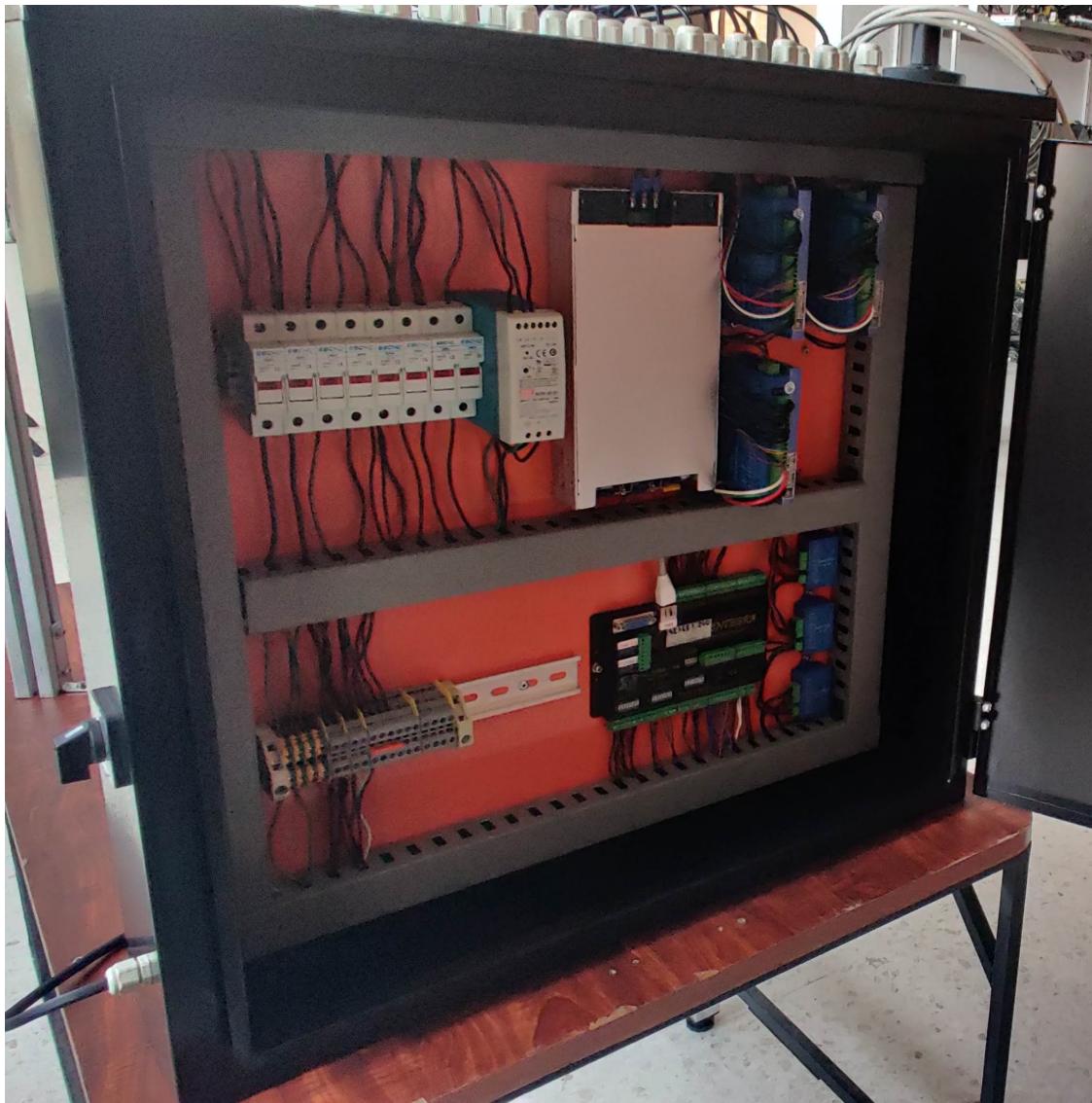


Figura 3-25: Gabinete eléctrico finalizado. [Autor]

3.4.3. *Software y control*

Programa de validación y pruebas

Haciendo uso de Matlab ®, se desarrolla un algoritmo y una interfaz gráfica con el fin de realizar pruebas de cinemática directa, cinemática directa, dinámica, generación de trayectorias y pruebas de comunicación mediante sockets TCP. En la figura 3-26 se puede observar la interfaz gráfica del programa desarrollado:

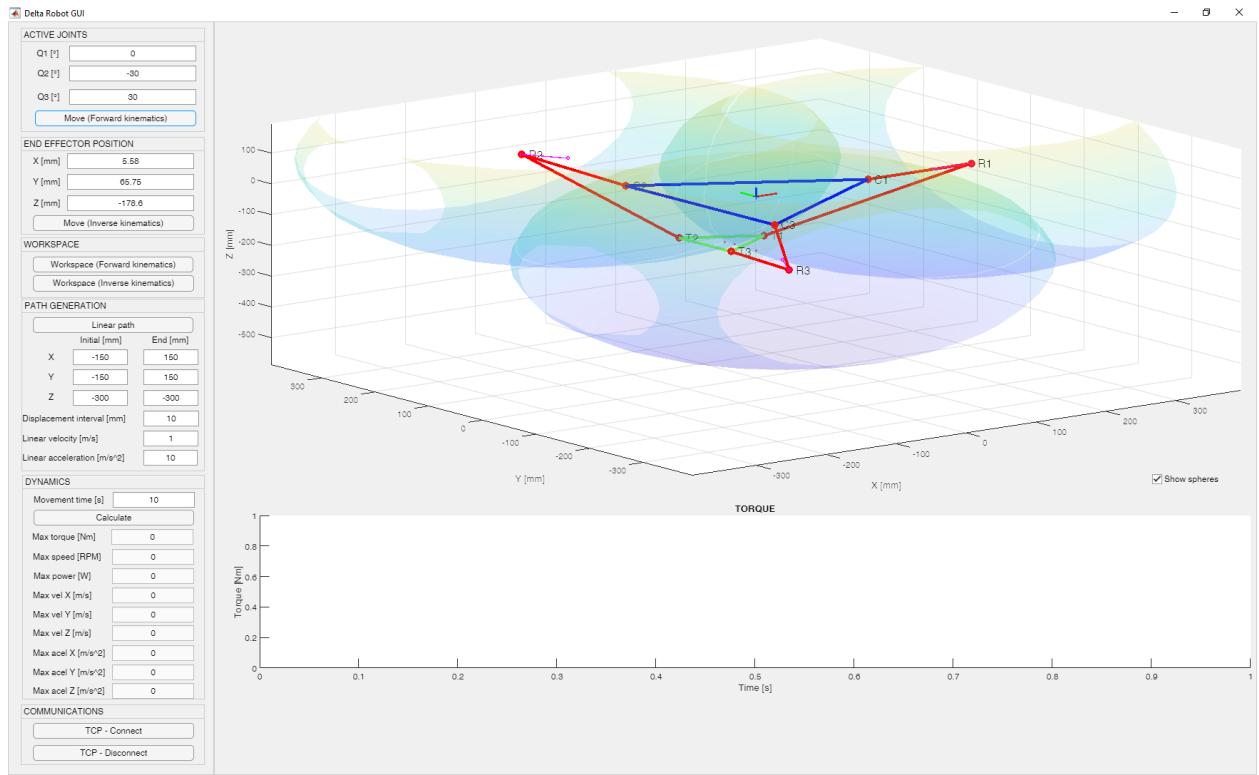


Figura 3-26: Interfaz gráfica de pruebas elaborada en Matlab ®. [Autor]

En la función que se puede apreciar en la figura 3-27 es posible introducir posiciones angulares de las articulaciones activas y con el botón "Move (Forward kinematics)" el programa genera el cálculo de la cinemática directa y muestra en resultado en la sección "END EFECTOR POSITION":

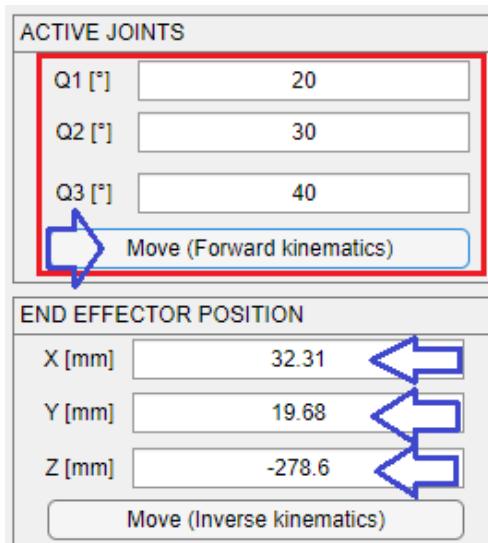


Figura 3-27: Función para calcular cinemática directa. [Autor]

En la función que se puede apreciar en la figura 3-28 es posible introducir una posición del efecto final y con el botón "Move (Inverse kinematics)" el programa genera el cálculo de la cinemática inversa y muestra en resultado en la sección "ACTIVE JOINTS":

ACTIVE JOINTS	
Q1 [°]	15.4792
Q2 [°]	30.5122
Q3 [°]	23.4398
Move (Forward kinematics)	

END EFFECTOR POSITION	
X [mm]	22.5
Y [mm]	-12.5
Z [mm]	-255
Move (Inverse kinematics)	

Figura 3-28: Función para calcular cinemática inversa. [Autor]

Mediante los botones "Workspace (Forward kinematics)" y "Workspace (Inverse kinematics)" visualizados en la figura 3-29 es posible determinar el espacio de trabajo aproximado sin restricciones del robot:

WORKSPACE	
Workspace (Forward kinematics)	
Workspace (Inverse kinematics)	

Figura 3-29: Función para determinar el espacio de trabajo. [Autor]

Debido al alcance del proyecto, se procede a hacer una determinación aproximada del espacio de trabajo sin restricciones mediante el uso de estas dos funciones, tal y como se aprecia en la sección 3.4.6, en donde se resalta que existen métodos más apropiados para establecerlo, pero que no están propuestos dentro del presente trabajo. Cabe señalar, que los ejercicios propuestos para encontrar el espacio de trabajo no tienen en cuenta las restricciones mecánicas propias del robot.

Mediante la sección "PATH GENERATION" mostrada en la figura 3-30 es posible generar una trayectoria lineal del efecto final del robot, partiendo de una posición inicial y una posición final dada por el usuario:

PATH GENERATION		
Linear path		
	Initial [mm]	End [mm]
X	-150	150
Y	-150	150
Z	-300	-300
Displacement interval [mm]		10
Linear velocity [m/s]		1
Linear acceleration [m/s ²]		10

Figura 3-30: Generación de trayectoria lineal. [Autor]

Haciendo uso de la sección "DYNAMICS" mostrada en las figuras **3-31** y **3-32**, basándose en un movimiento lineal dado del efecto final y en unas características de robot preestablecidas, es posible calcular el par, máxima velocidad del actuador, potencia del actuador y las velocidades y aceleraciones máximas del efecto final, con base en un tiempo total del movimiento, seleccionado por el usuario. El ejemplo del uso de esta herramienta para el dimensionamiento de los actuadores se puede evidenciar en la sección 3.2.2:

DYNAMICS	
Movement time [s]	0.5
Calculate	
Max torque [Nm]	2.964
Max speed [RPM]	90.78
Max power [W]	28.18
Max vel X [m/s]	1.4
Max vel Y [m/s]	1.4
Max vel Z [m/s]	0
Max acel X [m/s ²]	11.2
Max acel Y [m/s ²]	11.2
Max acel Z [m/s ²]	0

Figura 3-31: Herramienta para el cálculo de los actuadores. [Autor]

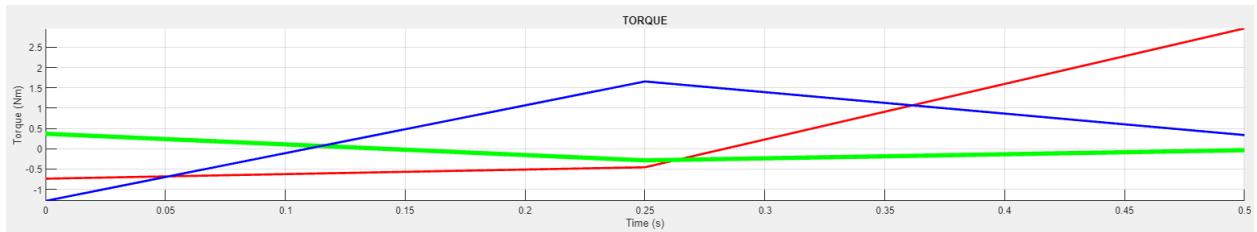


Figura 3-32: Herramienta para el cálculo de los actuadores. [Autor]

Finalmente, haciendo uso de la función "COMMUNICATIONS" visualizada en la figura 3-33 es posible establecer comunicación entre la interfaz gráfica desarrollada en Matlab® con el programa desarrollado en Microsoft Visual Studio®, con el fin de que en las etapas iniciales del desarrollo del trabajo, sea posible visualizar las posiciones del robot con los cálculos realizados en el programa final de control:

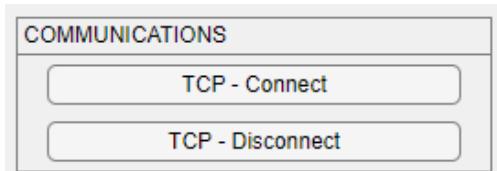


Figura 3-33: Módulo de comunicaciones vía TCP. [Autor]

Tal y como se menciona en la sección 3.3.3, se realizan pruebas de comunicación con un servidor OPC y mediante una comunicación punto a punto haciendo uso de *sockets* TCP / UDP. Con ambas opciones fue posible establecer comunicación, pero debido a que haciendo uso del estándar OPC es necesario tener un servidor central con más etapas de comunicación, el proceso de actualización de los datos es más lento que el obtenido haciendo uso de *sockets* TCP / UDP. La conclusión es que para el uso del programa desarrollado en Matlab® es posible realizar la comunicación con cualquiera de las dos opciones, pero para la aplicación de sistemas ciberfísicos, en donde se requiere una tasa de refresco bastante alta, el resultado con *sockets* TCP / UDP fue mucho mejor, por lo tanto, se opta por hacer uso de *sockets* TCP / UDP para todas las aplicaciones del proyecto.

Programa principal de control y monitoreo

Desarrollado en Microsoft Visual Studio .NET Core 5.0 en lenguaje C#. El programa tiene las siguientes características:

- Calculo en tiempo real de la cinemática directa e inversa.
- Generación de movimientos de las articulaciones activas θ_i (JOG J1, J2, J3).
- Generación de movimientos del efecto final a lo largo de un eje específico (X, Y, Z).

- Generación de trayectorias.
- Monitoreo de las posiciones del robot.
- Comunicación bidireccional opcional entre el controlador de movimiento y Matlab ® o NX Mechatronics Concept Designer ®(el programa puede controlar el robot sin necesidad estar enlazados a los programas externos).

Interfaz gráfica

La interfaz gráfica muestra las siguientes variables del robot:

- Estado actual del robot e indicación de errores.
- Posición angular de los actuadores θ_i .
- Posición del efecto final (TCP).
- Velocidad del efecto final.

La interfaz gráfica ofrece los siguientes controles:

- Establecer conexión TCP/IP entre el programa de control y el controlador de movimiento.
- Activación de los motores paso a paso y liberación de frenos electromagnéticos.
- Configuración manual de la posición cero de las articulaciones activas θ_i .
- Búsqueda automática de la posición inicial de los brazos activos.
- Movimiento manual de las articulaciones activas θ_i (JOG J1, J2 y J3).
- Movimiento manual del efecto final a lo largo de un eje específico (X, Y, Z).
- Movimiento del efecto final ingresando manualmente una posición deseada.
- Movimiento del efecto final mediante códigos G.
- Movimiento del efecto final mediante códigos RAPID.
- Establecer conexión TCP/IP con Matlab o NX Mechatronics Concept Designer.

En la figura 3-34 se puede observar la interfaz gráfica desarrollada en Microsoft Visual Studio con la cual se monitorea y controla el robot:

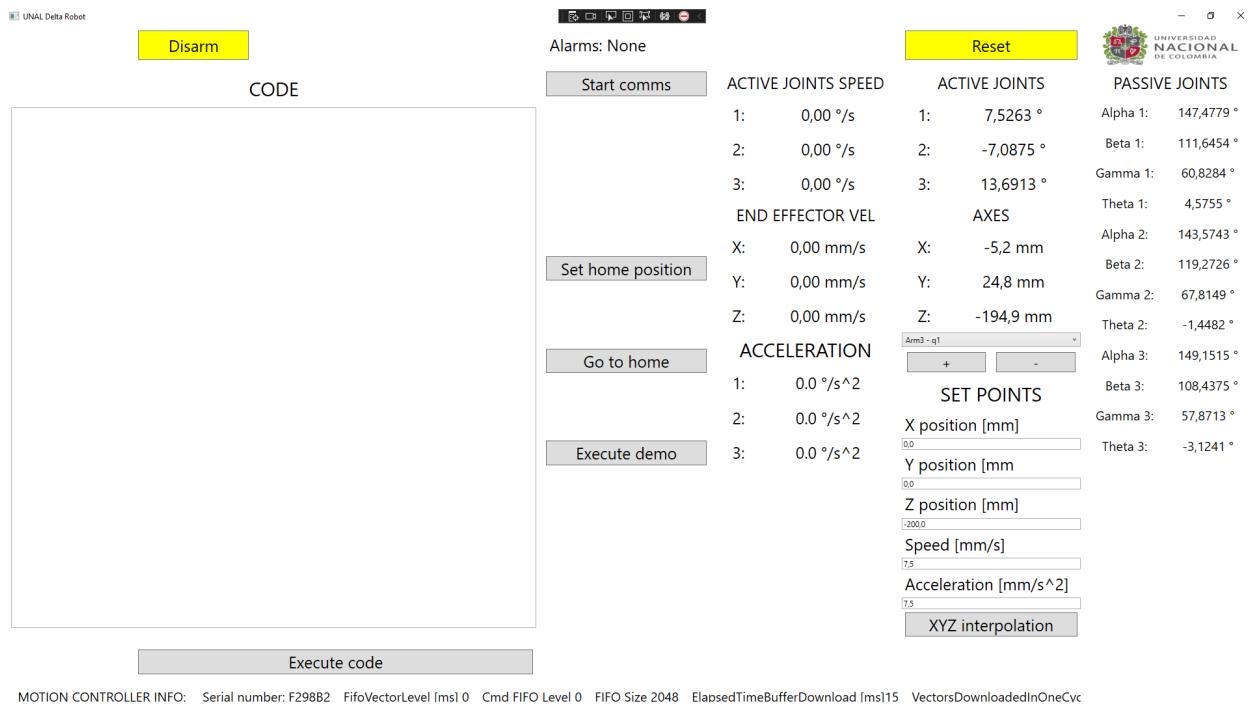


Figura 3-34: Interfaz de usuario. [Autor]

3.4.4. Validación de la cinemática directa

Haciendo uso de las ecuaciones de cinemática directa, es posible definir ángulos de los actuadores y encontrar la posición del efecto final para dichas posiciones angulares. Como se mencionó anteriormente para el caso del robot delta, es necesario calcular las posiciones de los codos para luego realizar el método de las 3 esferas y así finalmente determinar la posición del efecto final.

Configuración inicial ($\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = 0^\circ$)

Definiendo la configuración inicial (posición de *home*) del robot delta cuando $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = 0^\circ$, y haciendo uso de las ecuaciones de la cinemática directa, se presenta una singularidad debido a que los 3 codos presentan la misma altura en *z*, por lo tanto, es necesario hacer uso del segundo método para su correcto cálculo.

En la figura 3-35 se puede observar las posiciones *xyz* de los codos con la configuración inicial del robot:

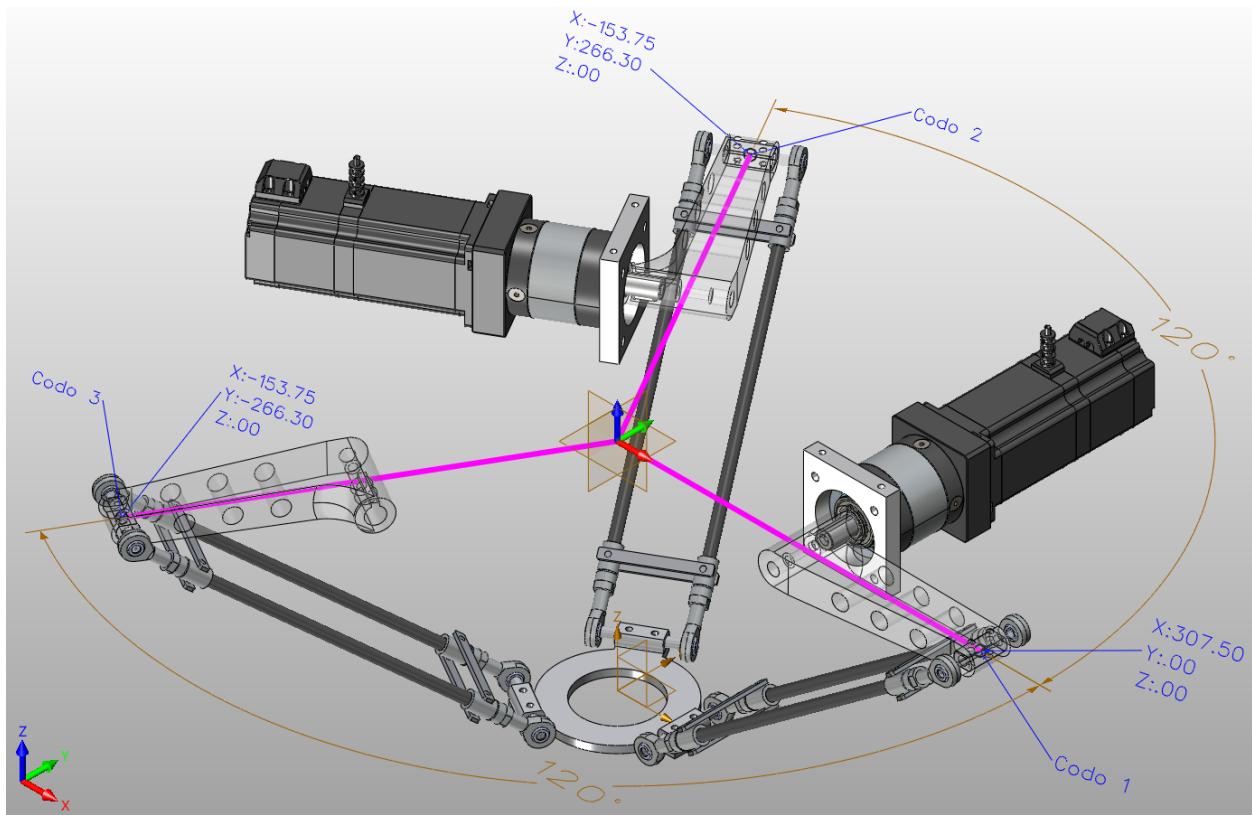


Figura 3-35: Posiciones de los codos con la configuración inicial ($\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = 0^\circ$). [Autor]

En la figura 3-36 se puede observar las posiciones xyz de las muñecas con la configuración inicial del robot:

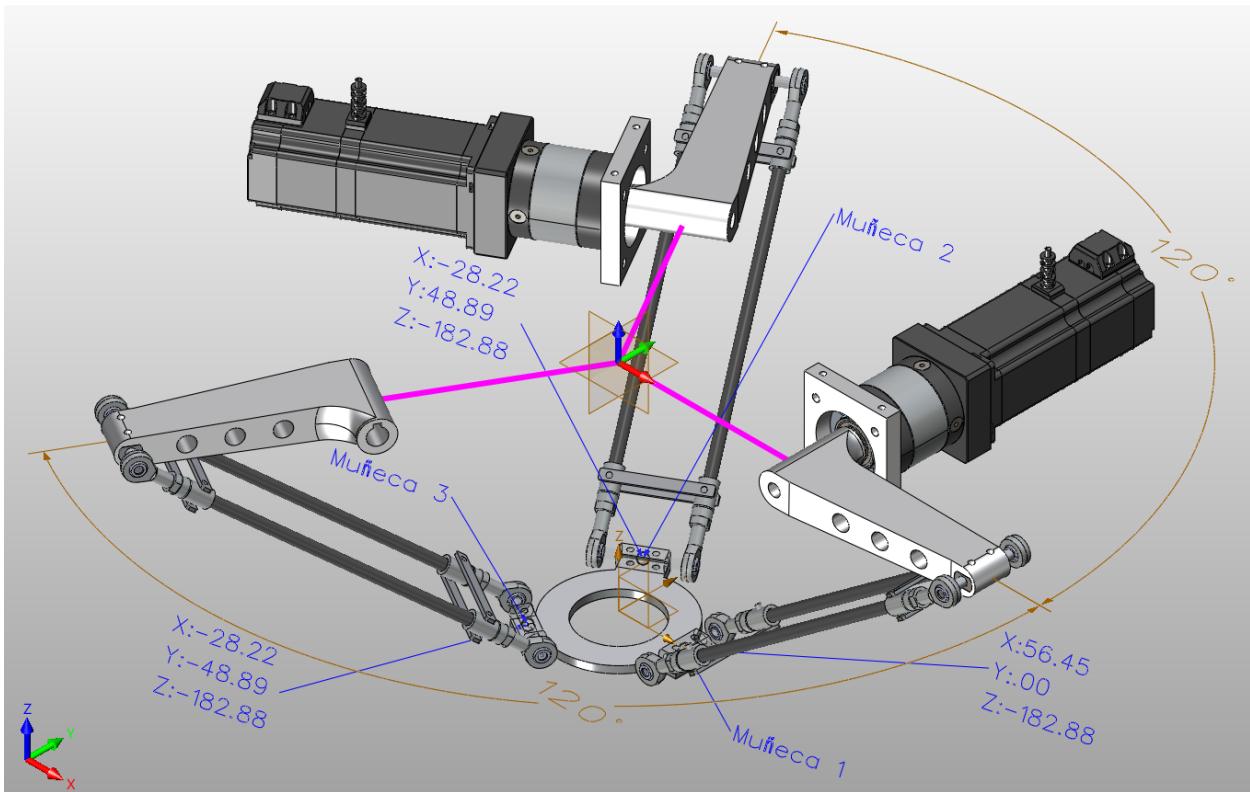


Figura 3-36: Posiciones de las muñecas con la configuración inicial ($\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = 0^\circ$). [Autor]

En la figura 3-37 se puede observar la posición xyz del efecto final con la configuración inicial del robot:

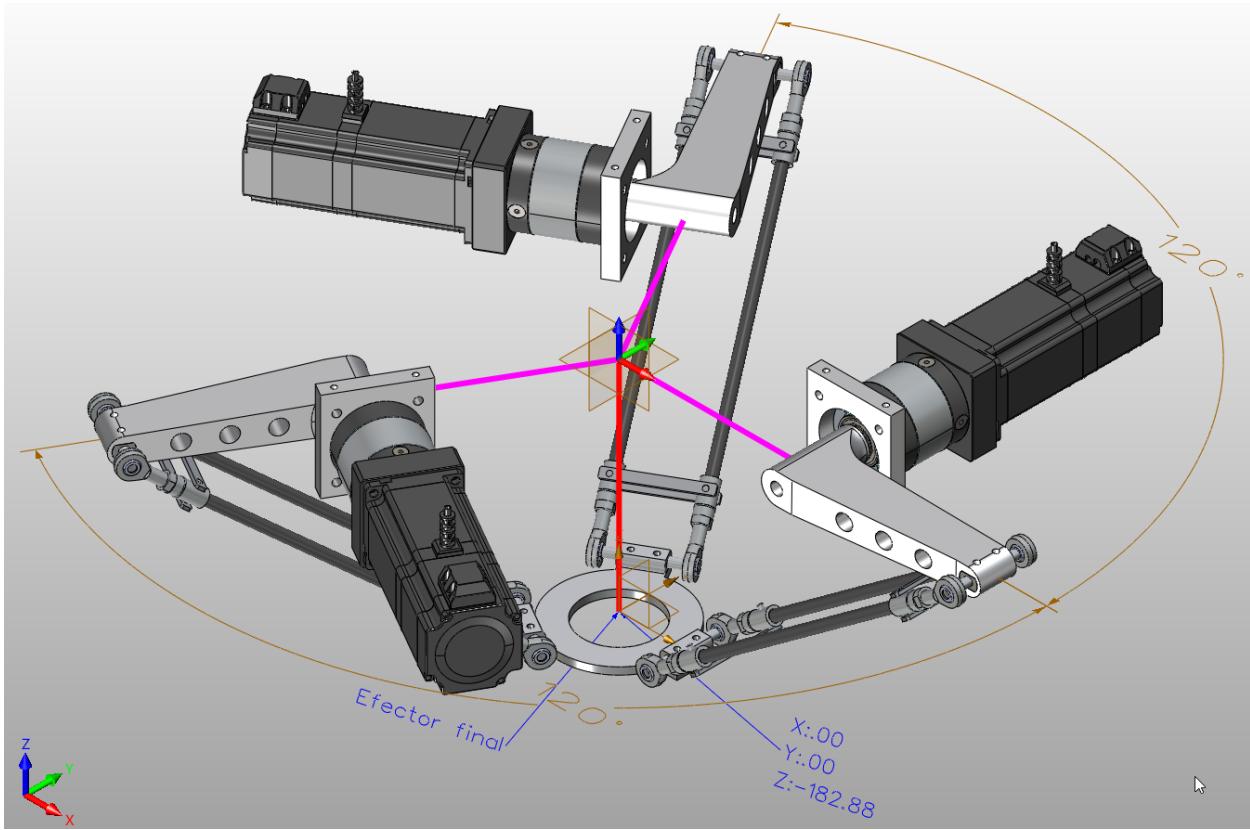


Figura 3-37: Posición del TCP_j con la configuración inicial ($\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = 0^\circ$). [Autor]

En la figura 3-38 se puede observar las posiciones xyz de los centros de las esferas con la configuración inicial del robot:

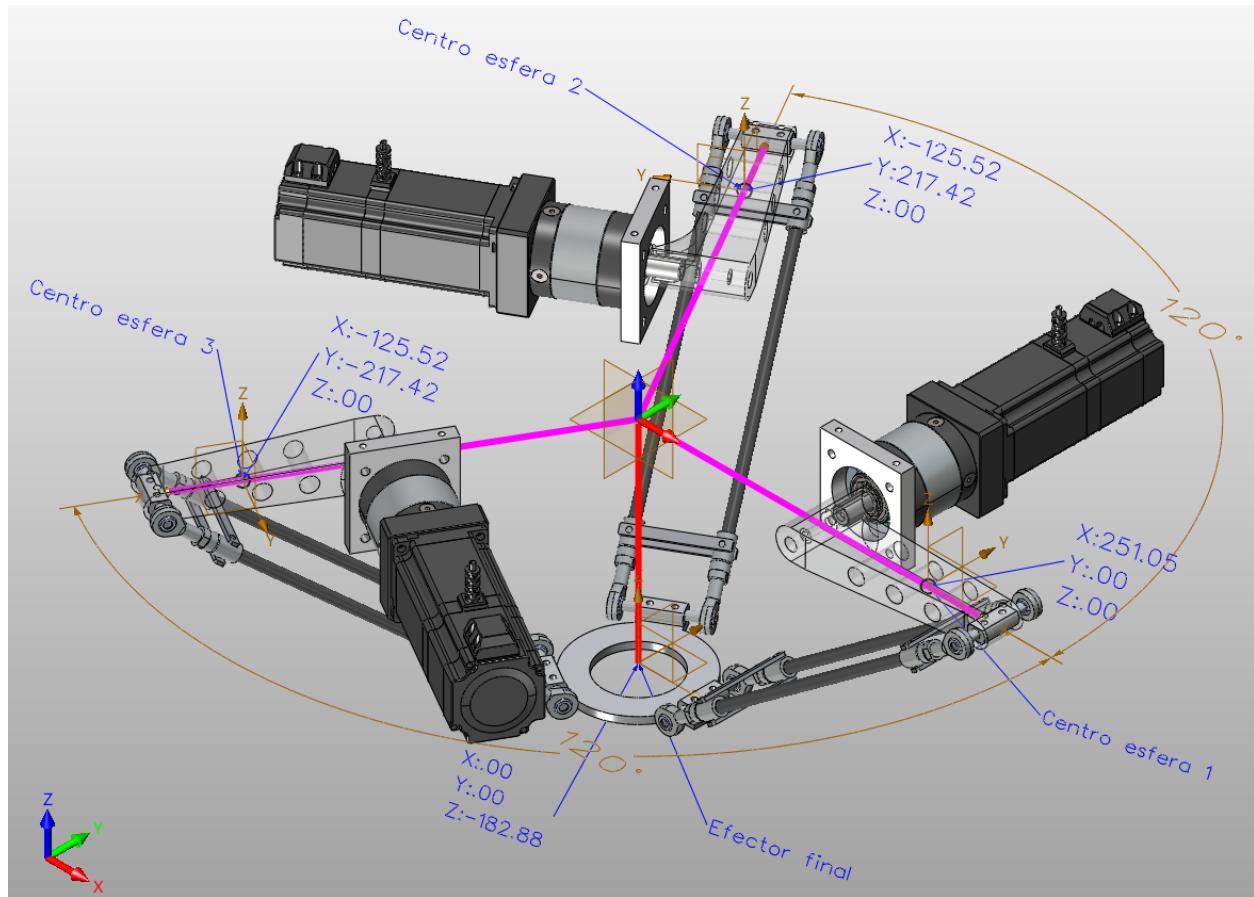


Figura 3-38: Ubicación del centro de las esferas con la configuración inicial ($\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = 0^\circ$). [Autor]

En la figura 3-39 se puede observar las tres esferas y sus dos puntos de intersección, en donde se resalta que la ubicación del efecto final es el punto inferior en donde se intersecan las tres esferas:

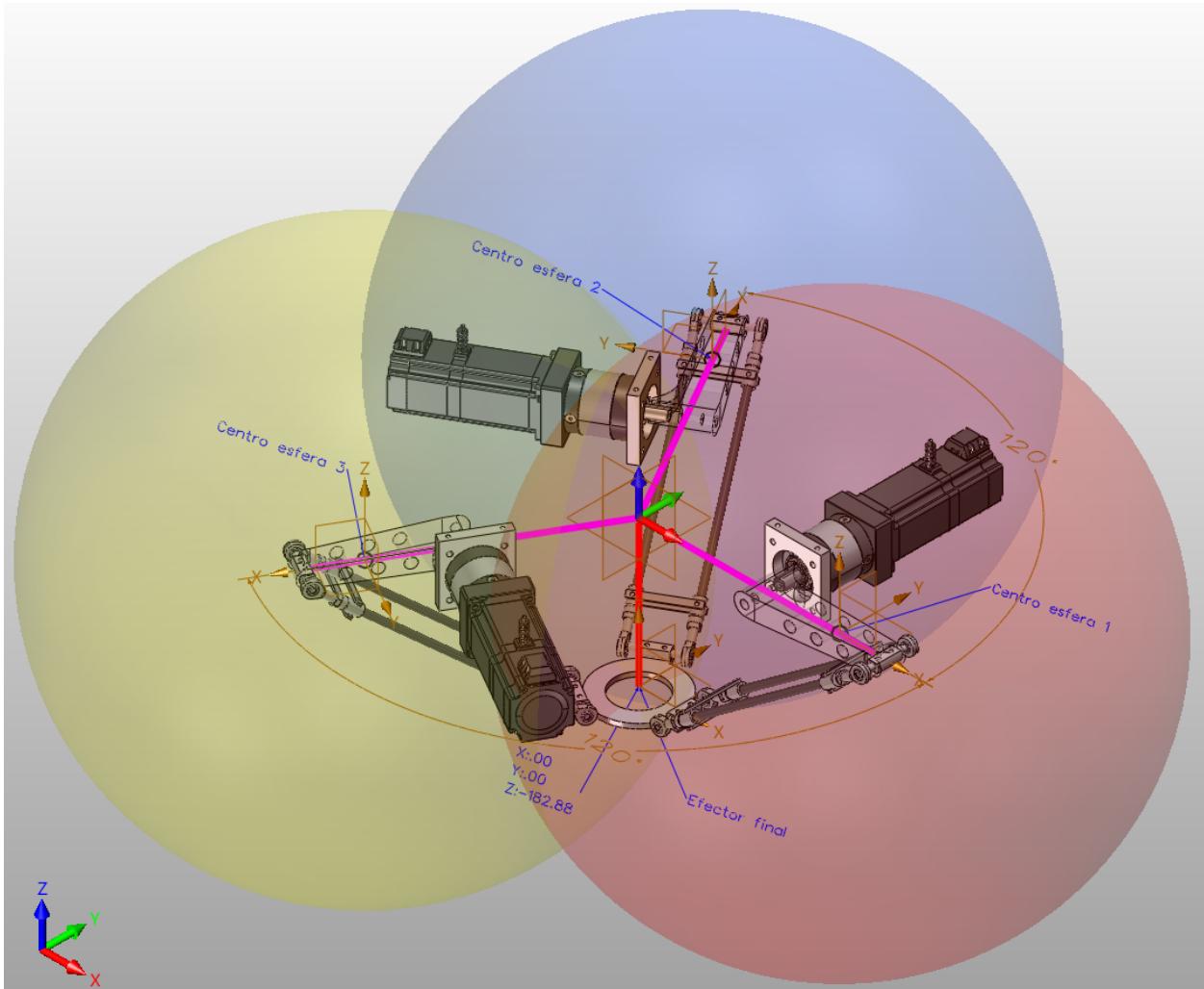


Figura 3-39: Intersección de las 3 esferas con la configuración inicial ($\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = 0^\circ$). [Autor]

Ejemplo de cinemática directa con $\theta_1 = 0^\circ, \theta_2 = -30^\circ, \theta_3 = 30^\circ$

Con el fin de poder entender mejor la cinemática directa y el método de intersección de las 3 esferas, se plantea el ejemplo cuando $\theta_1 = 0^\circ, \theta_2 = -30^\circ, \theta_3 = 30^\circ$. Debido a que la sección anterior se centra en hacer la demostración de como obtener las ecuaciones de la cinemática directa, para fines prácticos es posible ir directamente al paso 3 para obtener la posición de los codos con respecto al origen del robot y de ahí continuar con la solución de la cinemática directa:

- **Paso 3: Cálculo de las posiciones de los codos con respecto al origen del robot.**

Codo 1:

Haciendo uso de la ecuación 2-33:

$${}^0P_{c_1} = \begin{bmatrix} Rf + La * \cos(\theta_1) \\ 0 \\ -La * \sin(\theta_1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 160 + 147,5 * \cos 0 \\ 0 \\ -147,5 * \sin 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 307,5 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

Codo 2:

Haciendo uso de la ecuación 2-36:

$${}^0P_{c_2} = \begin{bmatrix} -\frac{Rf}{2} - \frac{La * \cos(\theta_2)}{2} \\ \frac{3^{1/2} * Rf}{2} + \frac{3^{1/2} * La * \cos(\theta_2)}{2} \\ -La * \sin(\theta_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{160}{2} - \frac{147,5 * \cos -30}{2} \\ \frac{3^{1/2} * 160}{2} + \frac{3^{1/2} * 147,5 * \cos -30}{2} \\ -147,5 * \sin -30 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -143,869 \\ 249,189 \\ 73,75 \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

Codo 3:

Haciendo uso de la ecuación 2-39:

$${}^0P_{c_3} = \begin{bmatrix} -\frac{Rf}{2} - \frac{La * \cos(\theta_3)}{2} \\ -\frac{3^{1/2} * Rf}{2} - \frac{3^{1/2} * La * \cos(\theta_3)}{2} \\ -La * \sin(\theta_3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{160}{2} - \frac{147,5 * \cos 30}{2} \\ -\frac{3^{1/2} * 160}{2} - \frac{3^{1/2} * 147,5 * \cos 30}{2} \\ -147,5 * \sin 30 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -143,869 \\ -249,189 \\ -73,75 \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

En la figura 3-40 se puede observar las posiciones *xyz* de los codos con el ejemplo propuesto ($\theta_1 = 0^\circ$, $\theta_2 = -30^\circ$, $\theta_3 = 30^\circ$):

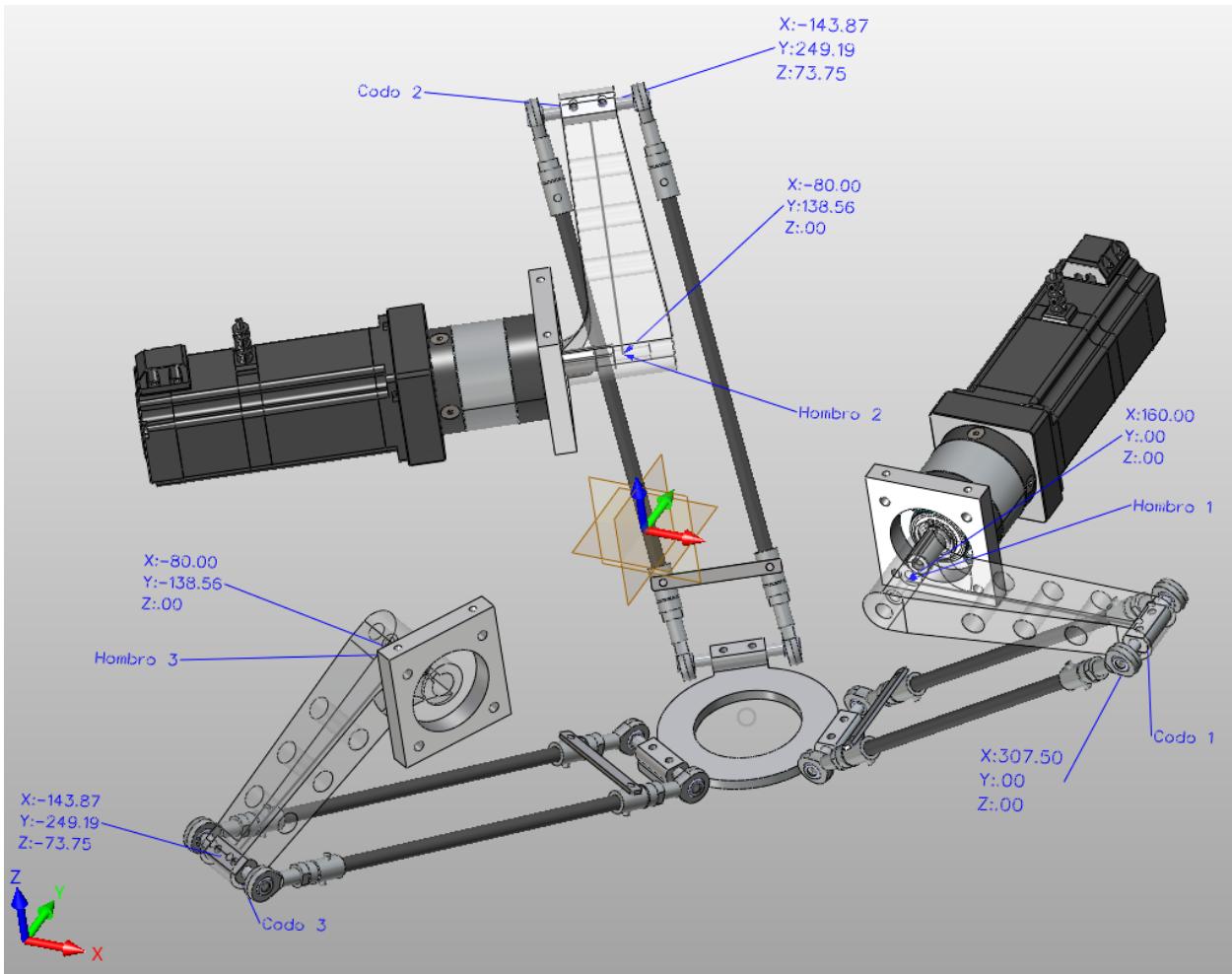


Figura 3-40: Posición de los codos con $\theta_1 = 0^\circ$, $\theta_2 = -30^\circ$, $\theta_3 = 30^\circ$. [Autor]

- **Paso 4: Cálculo de la posición central de las esferas.**

Centro de la esfera 1:

Haciendo uso de la ecuación 2-42:

$$PC_{esf1} = {}^0 P_{c1} - \begin{bmatrix} Rm \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 307,5 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 56,45 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 251,05 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} \quad (3-4)$$

Centro de la esfera 2:

Haciendo uso de la ecuación 2-43:

$$\begin{aligned}
 PC_{esf_2} &=^0 P_{c_2} - \begin{bmatrix} Rm * \cos(120) \\ Rm * \sin(120) \\ 0 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} -143,869 \\ 249,189 \\ 73,75 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 56,45 * \cos 120 \\ 56,45 * \sin 120 \\ 0 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} -115,644 \\ 200,301 \\ 73,75 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{3-5}$$

Centro de la esfera 3:

Haciendo uso de la ecuación 2-44:

$$\begin{aligned}
 PC_{esf_3} &=^0 P_{c_3} - \begin{bmatrix} Rm * \cos(240) \\ Rm * \sin(240) \\ 0 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} -143,869 \\ -249,189 \\ -73,75 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 56,45 * \cos 240 \\ 56,45 * \sin 240 \\ 0 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} -115,644 \\ -200,301 \\ -73,75 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{3-6}$$

En la figura 3-41 se puede observar las posiciones xyz de los centros de las tres esferas con el ejemplo propuesto ($\theta_1 = 0^\circ$, $\theta_2 = -30^\circ$, $\theta_3 = 30^\circ$):

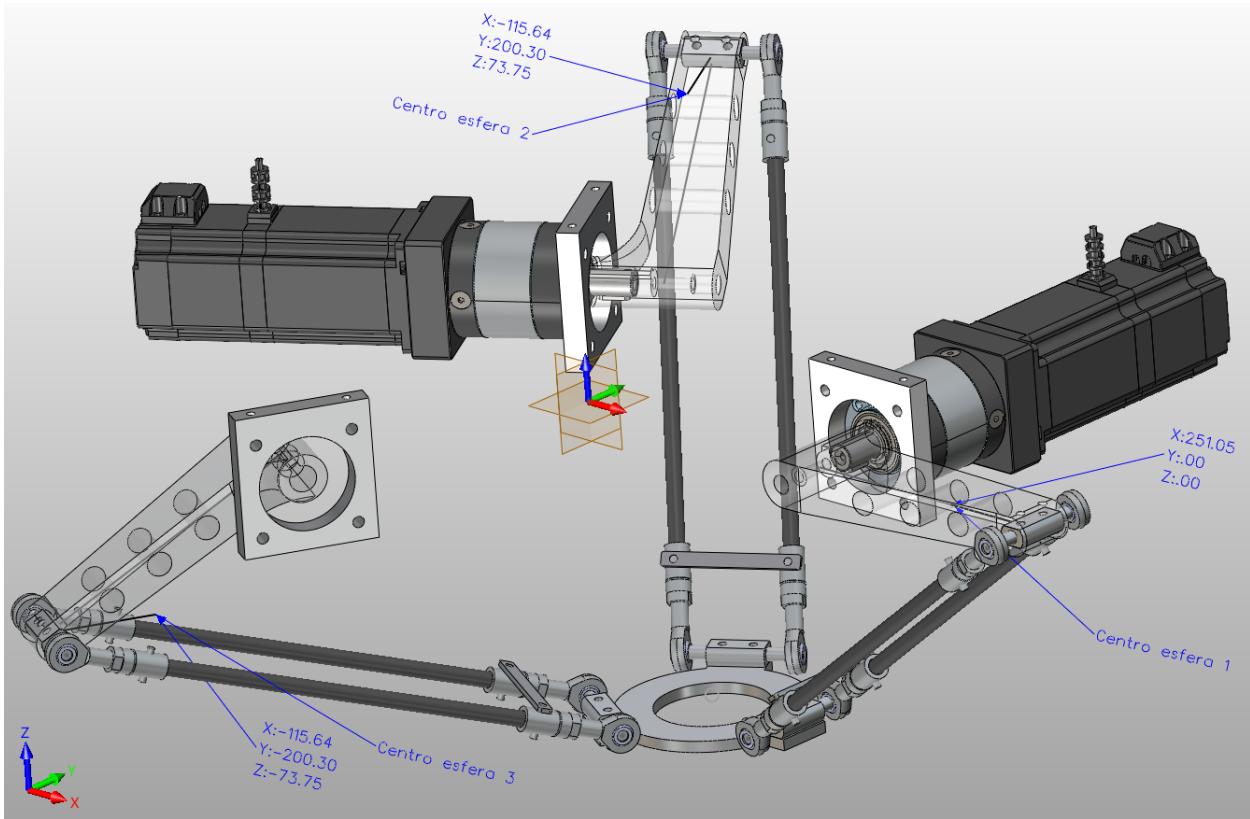


Figura 3-41: Centros de las esferas con $\theta_1 = 0^\circ$, $\theta_2 = -30^\circ$, $\theta_3 = 30^\circ$. [Autor]

■ **Paso 5: Cálculo de intersección de las tres esferas.**

Siendo $r1 = r2 = r3 = L_p = 310,6$

$$\begin{aligned}
 a_{11} &= 2(x_3 - x_1) = 2(-115,644 - 251,05) = -733,388 \\
 a_{12} &= 2(y_3 - y_1) = 2(-200,301 - 0) = -400,603 \\
 a_{13} &= 2(z_3 - z_1) = 2(-73,75 - 0) = -147,5 \\
 a_{21} &= 2(x_3 - x_2) = 2(-115,644 + 115,644) = 0 \\
 a_{22} &= 2(y_3 - y_2) = 2(-200,301 - 200,301) = -801,207 \\
 a_{23} &= 2(z_3 - z_2) = 2(-73,75 - 73,75) = -295
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
b_1 &= r_1^2 - r_3^2 - x_1^2 - y_1^2 - z_1^2 + x_3^2 + y_3^2 + z_3^2 \\
&= 310,6^2 - 310,6^2 - 251,05^2 - 0^2 - 0^2 + (-115,644)^2 + (-200,301)^2 + (-73,75)^2 \\
&= -4092,6 \\
b_2 &= r_2^2 - r_3^2 - x_2^2 - y_2^2 - z_2^2 + x_3^2 + y_3^2 + z_3^2 \\
&= 310,6^2 - 310,6^2 - (-115,6)^2 - 200,3^2 - 73,7^2 + (-115,6)^2 + (-200,3)^2 + (-73,7)^2 \\
&= 0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
a_1 &= \frac{a_{11}}{a_{13}} - \frac{a_{21}}{a_{23}} = \frac{-733,388}{-147,5} - \frac{0}{-295} = 4,972 \\
a_2 &= \frac{a_{12}}{a_{13}} - \frac{a_{22}}{a_{23}} = \frac{-400,603}{-147,5} - \frac{-801,207}{-295} = 0 \\
a_3 &= \frac{b_2}{a_{23}} - \frac{b_1}{a_{13}} = \frac{0}{-295} - \frac{-4092,6}{-147,5} = -27,746 \\
a_4 &= -\frac{a_2}{a_1} = -\frac{0}{4,972} = 0 \\
a_5 &= -\frac{a_3}{a_1} = -\frac{-27,746}{4,972} = 5,58 \\
a_6 &= \frac{-a_{21}a_4 - a_{22}}{a_{23}} = \frac{-0 * 0 - (-801,207)}{-295} = -2,716 \\
a_7 &= \frac{b_2 - a_{21}a_5}{a_{23}} = \frac{0 - 0 * 5,58}{-295} = 0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
a &= a_4^2 + 1 + a_6^2 = 0^2 + 1 + (-2,716)^2 = 8,376 \\
b &= 2a_4(a_5 - x_1) - 2y_1 + 2a_6(a_7 - z_1) \\
&= 2 * 0(5,58 - 251,05) - 2 * 0 + 2 * (-2,716)(0 - 0) \\
&= 0 \\
c &= a_5(a_5 - 2x_1) + a_7(a_7 - 2z_1) + x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 - r_1^2 \\
&= 5,58(5,58 - 2 * 251,05) + 0(0 - 2 * 0) + 251,05^2 + 0^2 + 0^2 - 310,6^2 \\
&= -36217
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 y_+ &= \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} = \frac{-0 + \sqrt{0^2 - 4 * 8,376 * -36217}}{2 * 8,376} = 65,754 \\
 y_- &= \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} = \frac{-0 + \sqrt{0^2 - 4 * 8,376 * -36217}}{2 * 8,376} = -65,754 \\
 x_+ &= a_4y_+ + a_5 = 0 * 65,754 + 5,58 = 5,58 \\
 x_- &= a_4y_- + a_5 = 0 * -65,754 + 5,58 = 5,58 \\
 z_+ &= a_6y_+ + a_7 = -2,716 * 65,754 + 0 = -178,587 \\
 z_- &= a_6y_- + a_7 = -2,716 * -65,754 + 0 = 178,587
 \end{aligned}$$

Para el caso puntual de la aplicación del robot delta, la intersección de interés es la que corresponde a la solución con el valor de altura en z negativo, por lo tanto, en este caso tenemos una solución única, la cual corresponde a z_+ y sus valores x_+ y y_+ correspondientes:

$$TCP_j = \begin{bmatrix} x_+ \\ y_+ \\ z_+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5,58 \\ 65,754 \\ -178,587 \end{bmatrix}$$

En la figura 3-42 se puede observar la intersección de las tres esferas con el ejemplo propuesto ($\theta_1 = 0^\circ$, $\theta_2 = -30^\circ$, $\theta_3 = 30^\circ$):

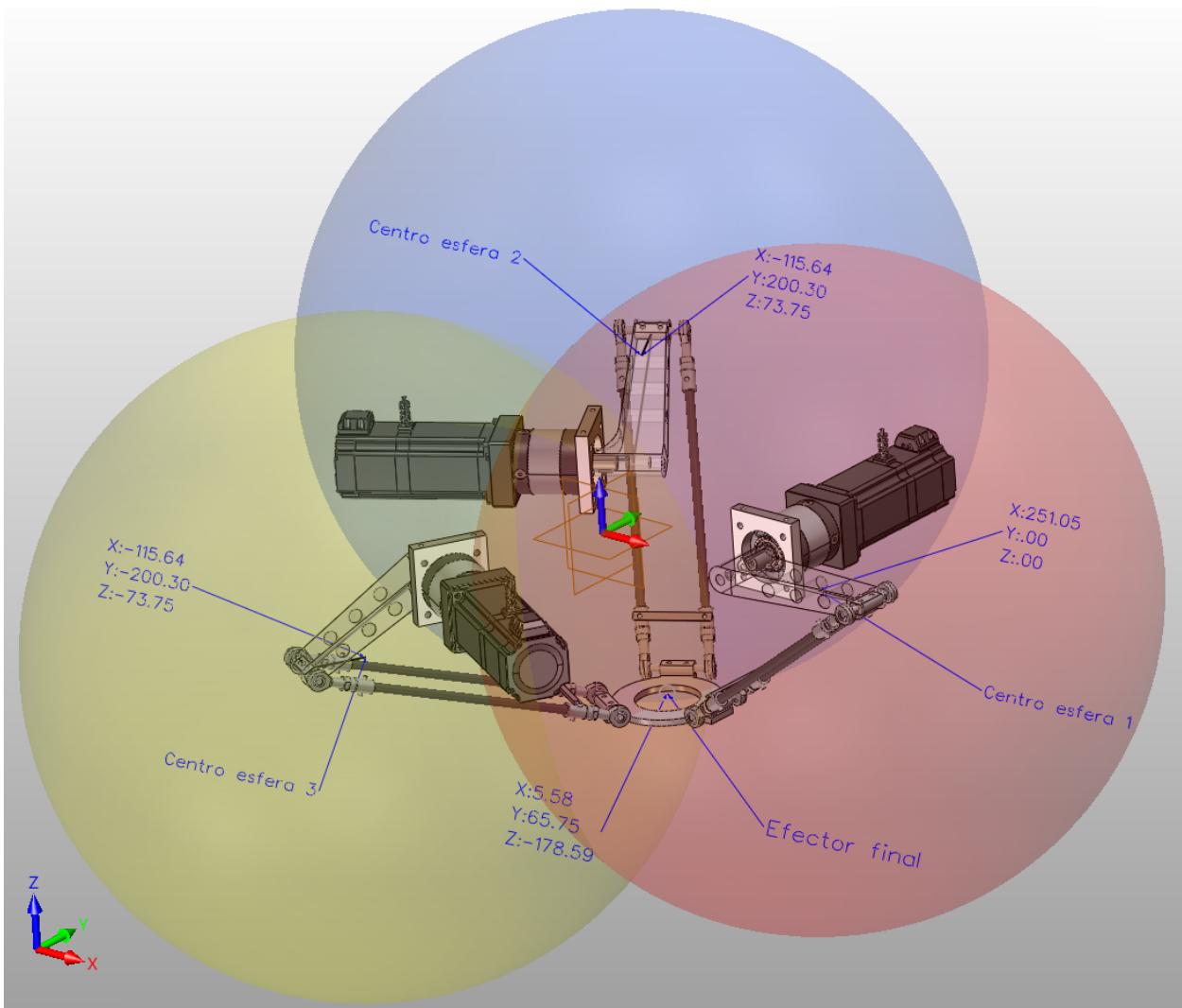


Figura 3-42: Intersección de las esferas con $\theta_1 = 0^\circ$, $\theta_2 = -30^\circ$, $\theta_3 = 30^\circ$. [Autor]

Finalmente, de manera opcional es posible calcular las posiciones de las muñecas a partir de la posición del efecto final.

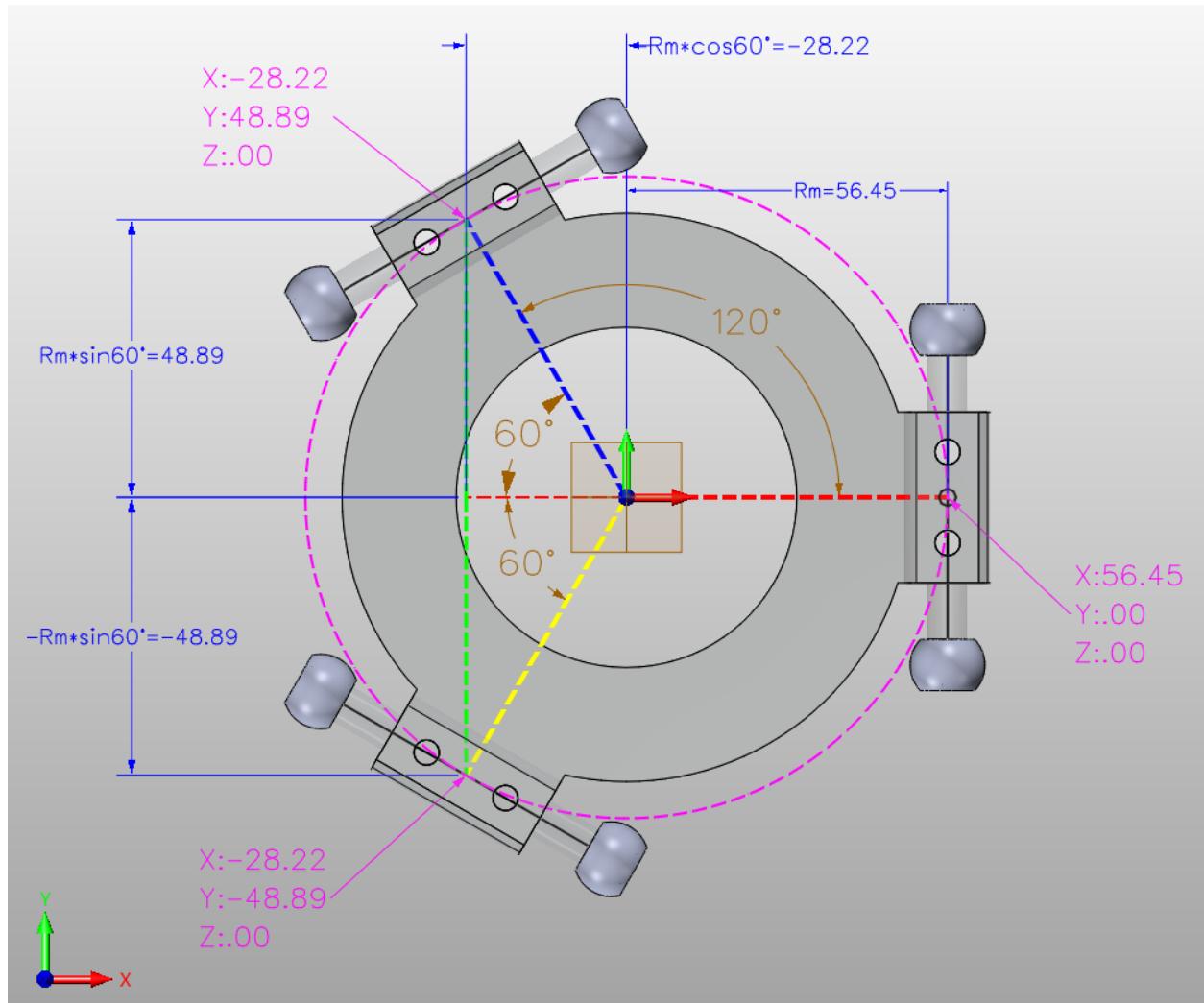


Figura 3-43: Posición de las muñecas con respecto al marco de referencia del TCP. [Autor]

3.4.5. Validación de la cinemática inversa

Haciendo uso de las ecuaciones de cinemática inversa, se define una posición del efecto final y se calculan los ángulos de los actuadores. Como se mencionó anteriormente para el caso del robot delta y haciendo uso de métodos geométricos, se presentan 3 casos. A manera de ejemplo, se procede a calcular la cinemática inversa del brazo número 1 con 3 posiciones diferentes del efecto final que permitan demostrar los 3 posibles casos:

$$\phi_i = \arcsin\left(\frac{Pm_{yi}}{L_p}\right) \quad (3-7)$$

$$\phi_1 = \arcsin\left(\frac{0}{310,6}\right) = 0 \text{ rad} = 0^\circ \quad (3-8)$$

■ **Caso 1:** $0 \leq Pm_{xi} \leq Rf$

Partiendo de una posición del efecto final igual a (68.4, 0, -179.26):

$$Lhm_i = \sqrt{(Rf - Pm_{xi})^2 + (Pm_{zi})^2} \quad (3-9)$$

$$Lhm_1 = \sqrt{(160 - 124,85)^2 + (-179,26)^2} = 182,673 \text{ mm} \quad (3-10)$$

$$\gamma_i = -1 * \arctan\left(\frac{Pm_{zi}}{Rf - Pm_{xi}}\right) \quad (3-11)$$

$$\gamma_1 = -1 * \arctan\left(\frac{-179,26}{160 - 124,85}\right) = 1,3772 \text{ rad} = 78,90^\circ \quad (3-12)$$

$$\beta_i = \arccos\left(\frac{(Lhm_i)^2 + La^2 - (Lp * \cos(\phi_i))^2}{2 * Lhm_i * La}\right) \quad (3-13)$$

$$\beta_1 = \arccos\left(\frac{(182,673)^2 + 147,5^2 - (310,6 * \cos 0)^2}{2 * 182,673 * 147,5}\right) = 2,4453 \text{ rad} = 140,10^\circ \quad (3-14)$$

$$\theta_i = \pi - (\gamma_i + \beta_i) \quad (3-15)$$

$$\theta_1 = \pi - (1,3772 + 2,4453) = -0,680 \text{ rad} = -39,01^\circ \quad (3-16)$$

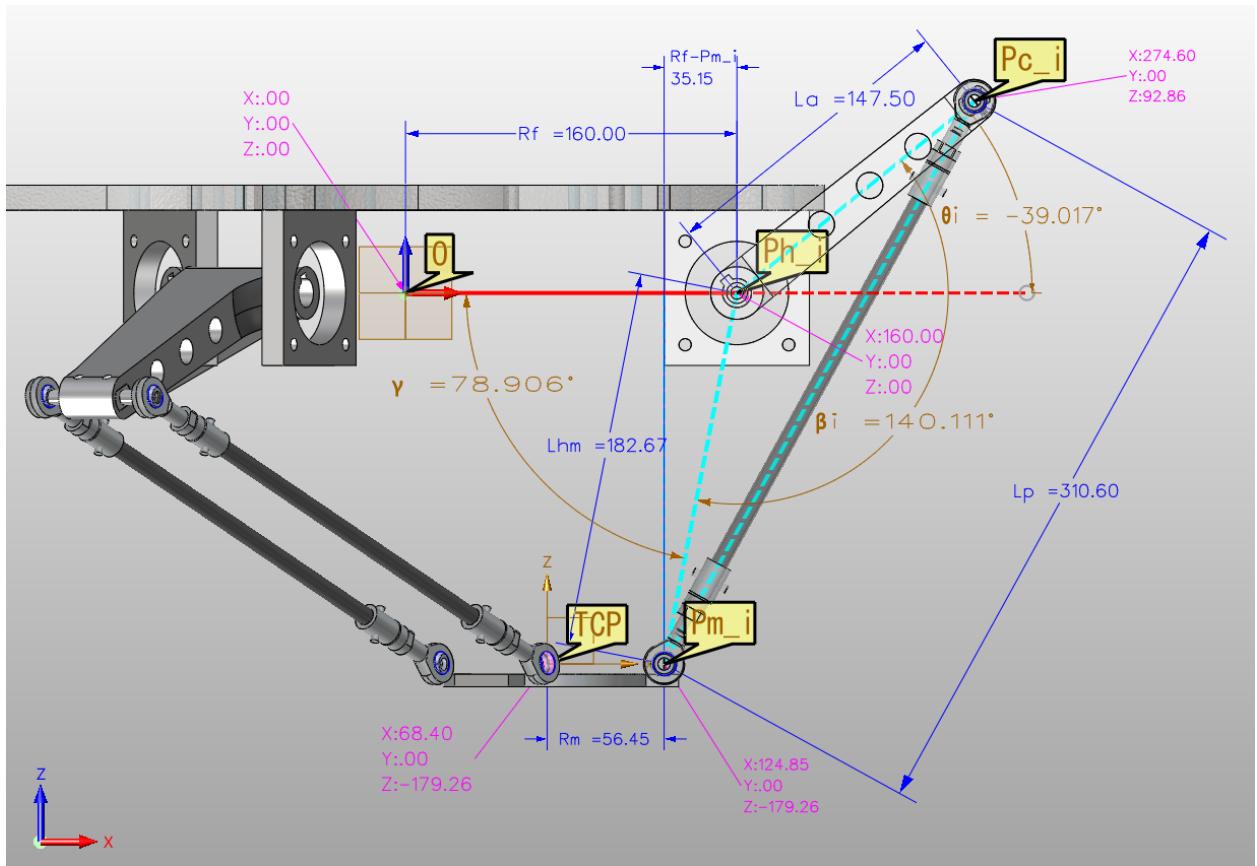


Figura 3-44: Cinemática inversa caso 1: $0 \leq Pm_i \leq Rf$. [Autor]

■ **Caso 2:** $Pm_{xi} < 0$

Partiendo de una posición del efecto final igual a (-86, 0, -218.27):

$$Lhm_i = \sqrt{(|Pm_{xi}| + Rf)^2 + (Pm_{zi})^2} \quad (3-17)$$

$$Lhm_1 = \sqrt{(-29,55)^2 + 160^2 + (-218,27)^2} = 289,086 \text{ mm} \quad (3-18)$$

$$\gamma_i = -1 * \arctan \left(\frac{Pm_{zi}}{|Pm_{xi}| + Rf} \right) \quad (3-19)$$

$$\gamma_1 = -1 * \arctan \left(\frac{-218,27}{|-29,55| + 160} \right) = 0,855 \text{ rad} = 49,028^\circ \quad (3-20)$$

$$\beta_i = \arccos\left(\frac{(Lhm_i)^2 + La^2 - (Lp * \cos(\phi_i))^2}{2 * Lhm_i * La}\right) \quad (3-21)$$

$$\beta_1 = \arccos\left(\frac{(289,086)^2 + 147,5^2 - (310,6 * \cos(0))^2}{2 * 289,086 * 147,5}\right) = 1,4668rad = 84,042^\circ \quad (3-22)$$

$$\theta_i = \pi - (\gamma_i + \beta_i) \quad (3-23)$$

$$\theta_1 = \pi - (0,855 + 1,4668) = 0,8191rad = 46,93^\circ \quad (3-24)$$

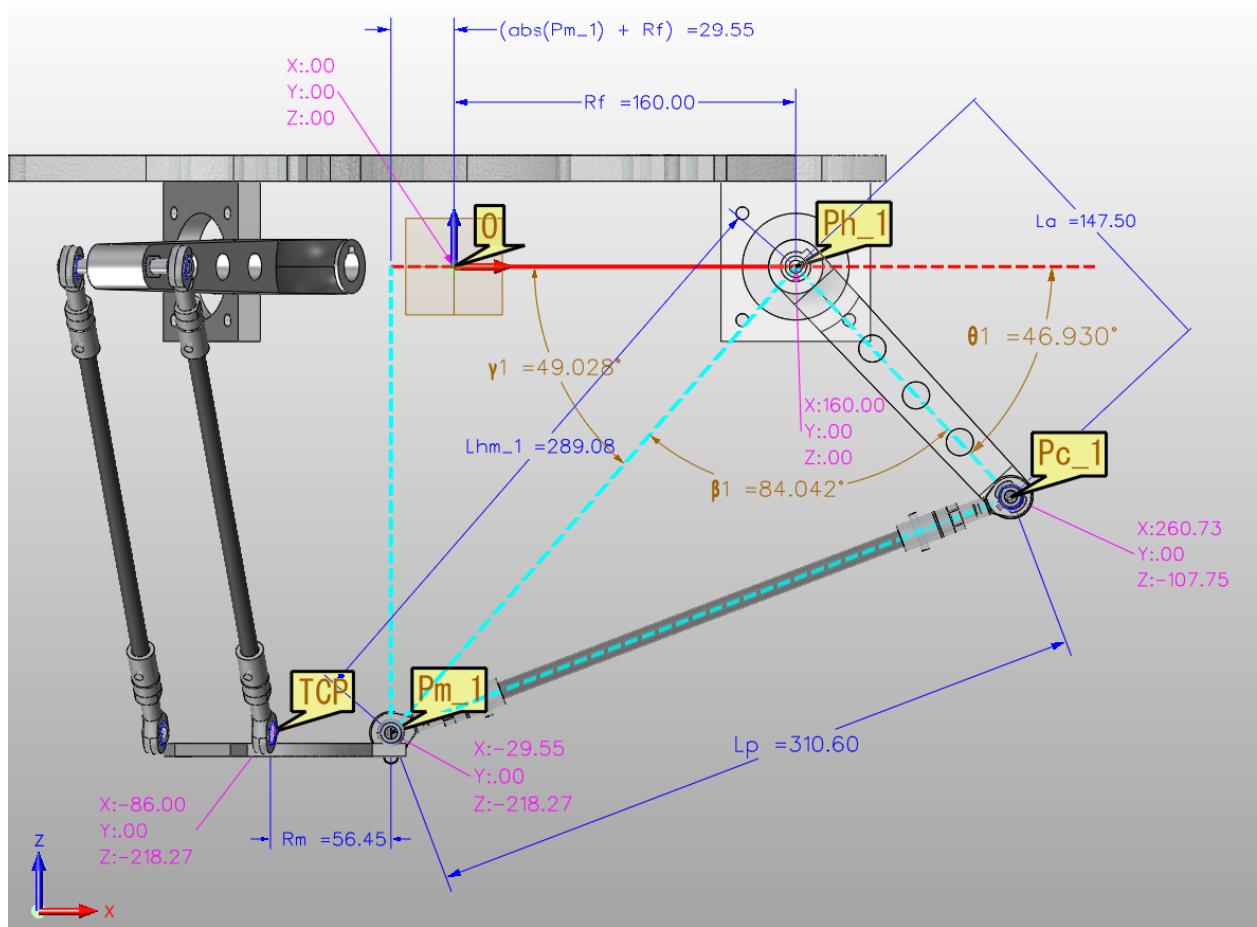


Figura 3-45: Cinemática inversa caso 2: $Pm_{xi} < 0$. [Autor]

■ **Caso 3:** $Pm_{xi} > Rf$

Partiendo de una posición del efecto final igual a (144.72, 0, -263.52):

$$Lhm_i = \sqrt{(Pm_{xi} - Rf)^2 + (Pm_{zi})^2} \quad (3-25)$$

$$Lhm_1 = \sqrt{(201,17 - 160)^2 + (-263,52)^2} = 266,716mm \quad (3-26)$$

$$\gamma_i = -1 * \arctan\left(\frac{Pm_{xi} - Rf}{Pm_{zi}}\right) \quad (3-27)$$

$$\gamma_1 = -1 * \arctan\left(\frac{201,17 - 160}{-263,52}\right) = 0,1549rad = 8,879^\circ \quad (3-28)$$

$$\beta_i = \arccos\left(\frac{(Lhm_i)^2 + La^2 - (Lp * \cos(\phi_i))^2}{2 * Lhm_i * La}\right) \quad (3-29)$$

$$\beta_1 = \arccos\left(\frac{266,716^2 + 147,5^2 - (310,6 * \cos(0))^2}{2 * 266,716 * 147,5}\right) = 1,6163rad = 92,60^\circ \quad (3-30)$$

$$\theta_i = \frac{\pi}{2} - (\gamma_i + \beta_i) \quad (3-31)$$

$$\theta_1 = \frac{\pi}{2} - (0,1549 + 1,6163) = -0,200rad = -11,48^\circ \quad (3-32)$$

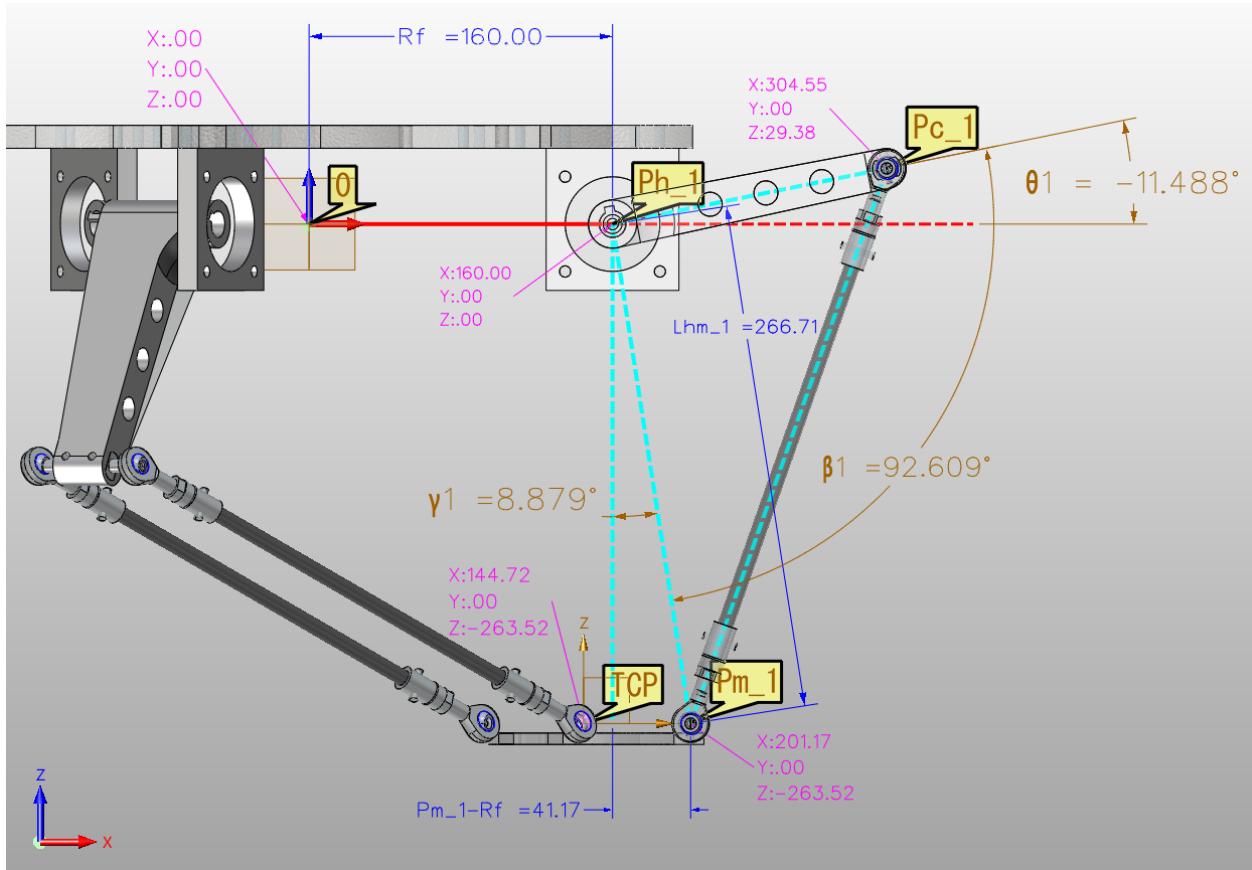


Figura 3-46: Cinemática inversa caso 3: $Pm_{xi} > Rf$. [Autor]

3.4.6. Validación del espacio de trabajo

Validación del espacio de trabajo mediante el uso de cinemática directa

Por medio de un método de barrido de ángulos de los 3 actuadores, se procede a calcular la cinemática directa para cada combinación de ángulos, obteniendo así una serie de posiciones del efecto final alcanzables por el robot. Posteriormente, se procede a graficar las diferentes posiciones obtenidas del efecto final con el fin de visualizar el espacio de trabajo. A su vez, el algoritmo determina cuál fue la configuración de los ángulos de los actuadores en donde se tuvo un mayor alcance del efecto final con respecto al origen del robot de manera independiente para cada uno de los ejes x, y, z .

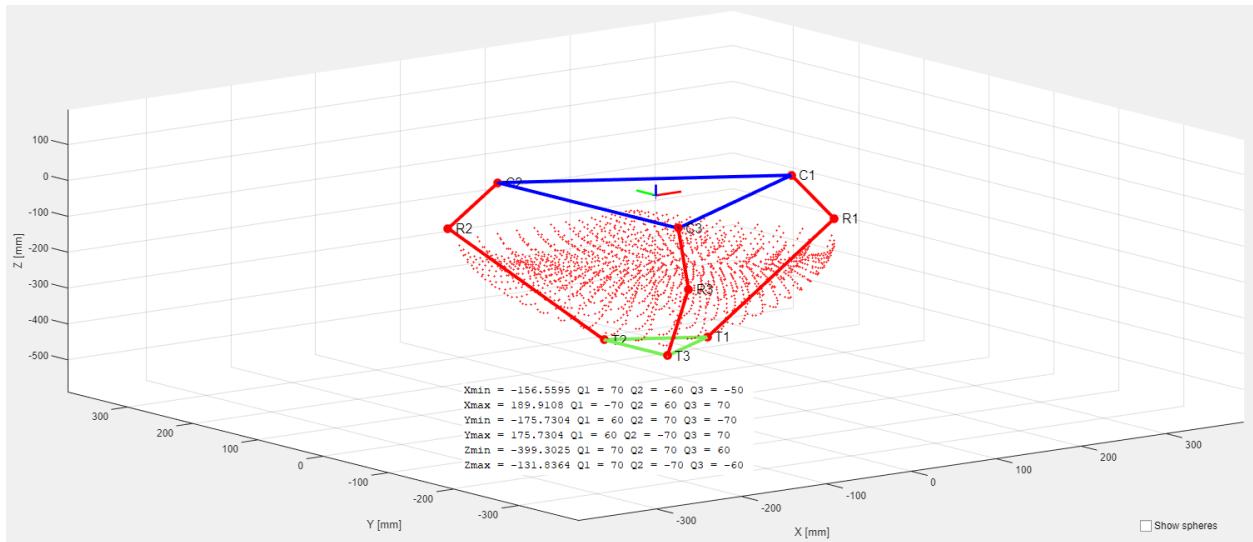


Figura 3-47: Alcance robot usando cinemática directa. [Autor]

Visualizando la gráfica obtenida se puede apreciar que el resultado es un cono, por lo tanto, restringe las posiciones con valores del eje z muy negativos. Según el ejercicio, la altura en el eje z puede variar entre los -132mm hasta los -399mm aproximadamente con respecto al origen del robot, pero debido a la conicidad de los movimientos se requiere restringir los movimientos del eje z hasta aproximadamente los -300mm.

Como conclusión, con este método se determina de manera aproximada que el espacio de trabajo máximo es un cilindro de radio aproximado de 175mm y una altura total aproximada de 168mm.

Validación del espacio de trabajo mediante el uso de cinemática inversa

Realizando una grilla en 3 dimensiones en donde se varían de manera progresiva las posiciones x, y, z del efecto final, se procede a calcular la cinemática inversa de cada posición del efecto final con el fin de encontrar las respectivas posiciones angulares de los actuadores. Si el valor obtenido es singular, se procede a descartar dicha posición del efecto final, ya que se concluye que dicha posición está por fuera del espacio de trabajo del robot.

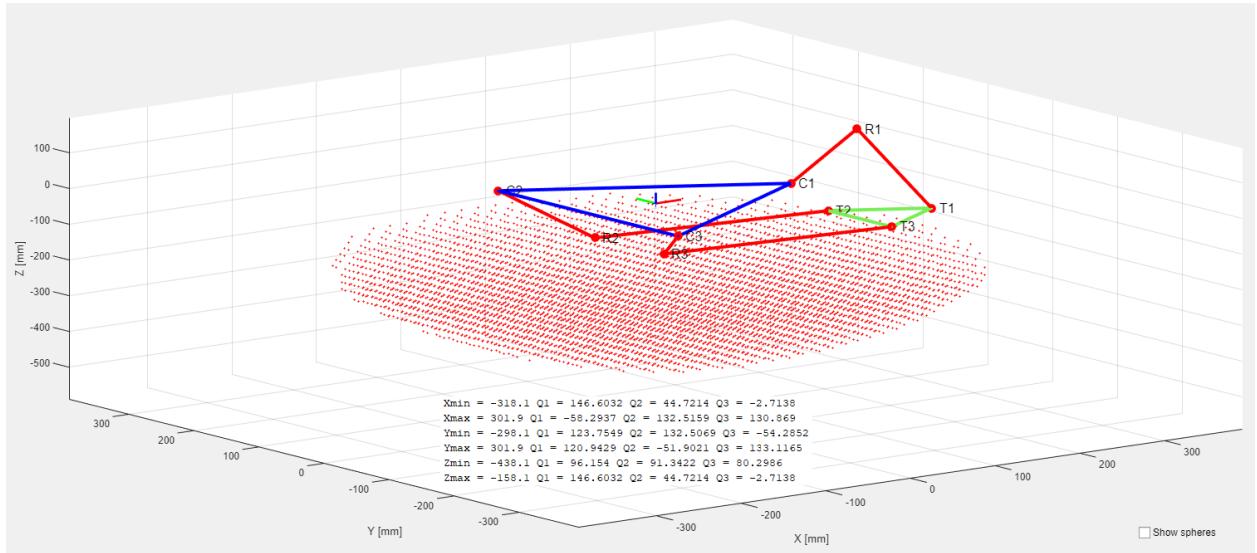


Figura 3-48: Alcance robot usando cinemática inversa. [Autor]

Visualizando la gráfica obtenida se puede apreciar que el resultado es un cono, por lo tanto, es difícil alcanzar los valores del eje z muy negativos. Según el ejercicio, la altura en el eje z puede variar entre los -158mm hasta los -438mm aproximadamente con respecto al origen del robot, pero debido a la conicidad de los movimientos se requiere restringir los movimientos del eje z hasta aproximadamente los -300mm.

Como conclusión, con este método se determina de manera aproximada que el espacio de trabajo máximo es un cilindro de radio aproximado de 300mm y una altura aproximada de 142mm, aunque visualizando la gráfica obtenida es evidente que los ángulos para obtener dichas posiciones son demasiado pronunciados, por lo cual seguramente las restricciones mecánicas del robot hacen que el espacio de trabajo sea limitado en gran medida.

3.4.7. Repositorio

En el siguiente enlace es posible encontrar un repositorio con la recopilación de la información relevante del desarrollo del presente trabajo:

<https://github.com/carlosfpz/UNAL-Delta-Robot/wiki/UNAL-Delta-Robot>

4

Aplicación de sistemas ciberfísicos

En el presente capítulo se describe el ejercicio propuesto de integración del robot delta con una fábrica digital haciendo uso de sistemas ciberfísicos. Adicionalmente, se exponen las comunicaciones involucradas entre el controlador físico y el programa de emulación del sistema de producción virtualizado. Finalmente, se presentan los resultados obtenidos y las recomendaciones para realizar aplicaciones de este tipo.

4.1. Introducción

Con base en los pasos necesarios para realizar un ejercicio de integración de un robot delta con una aplicación de sistemas ciberfísicos descritos en la sección 3.3.4, en la presente sección se desarrollan los pasos 4, 5 y 6 faltantes. Para evidenciar el desarrollo de las 3 primeras etapas requeridas (desarrollo de un modelo 3D del robot, creación de un prototipo funcional del robot y generación de su programa de control) refiérase a las etapas tempranas de la sección 3.4.

Tal y como se propuso en las etapas iniciales del presente trabajo, el programa de CAD avanzado que se utilizará para el desarrollo de la aplicación de sistemas ciberfísicos es Siemens NX Mechatronics Concept Designer (R)(MCD).

El ejercicio propuesto consiste en la emulación de un proceso de *pick and place*, en donde elementos virtualizados viajan desde una zona de producción (no incluida en el presente trabajo) hasta una zona de detección de objetos, en donde son seleccionados y organizados por el robot delta diseñado y fabricado a lo largo del presente trabajo. Las tareas para realizar el proceso de *pick and place* son:

1. Transportar elementos virtuales haciendo uso de una banda transportadora desde el final de una zona de producción (no incluida en el presente trabajo) hasta una zona de detección de objetos.
2. Detectar los objetos virtuales con base en su forma mediante el uso de una cámara virtual.

3. Dependiendo del elemento detectado, el robot delta deberá realizar movimientos para alcanzar el objeto en cuestión, tomarlo y llevarlo a otra zona dedicada únicamente para dicha referencia, permitiendo la selección y organización de diferentes objetos.

El objetivo del ejercicio propuesto consiste en que el gemelo digital se comunique con el controlador de movimiento del robot real y que todos los movimientos ejecutados por el dispositivo físico sean visualizados en el modelo digital con el fin de certificar su grado de desempeño, constatar que su velocidad es suficiente para una hipotética velocidad de producción, detectar posibles colisiones, verificar que las piezas a tomar estén dentro del alcance de trabajo del robot, etc. La generación de trayectorias y el cálculo de las cinemáticas directa e inversa deberán ser calculadas por el controlador de movimiento real.

4.2. Fábrica digital

Haciendo uso del modelo 3D del robot delta (gemelo digital), el cual permitió la validación de los movimientos y verificación de posibles colisiones antes de su fabricación, se procede a integrarlo a una celda de *pick and place* robotizada de una fábrica digital.

usado para

4.2.1. Celda robotizada

El ejercicio propuesto consiste en que por banda transportadora número 1 ingresen 4 referencias diferentes de productos provenientes de una zona de fabricación anterior, los cuales deben ser detectados, atrapados por el robot delta y llevados a su correspondiente banda transportadora para ser separados y recopilados en diferentes contenedores.

En las figuras 4-1, 4-2, 4-3 y 4-4 se pueden observar los elementos principales de la celda de manufactura, en donde se pueden apreciar tres bandas transportadoras (una por donde ingresan los productos y dos por donde salen determinadas referencias de productos luego de que el robot las haya desplazado):

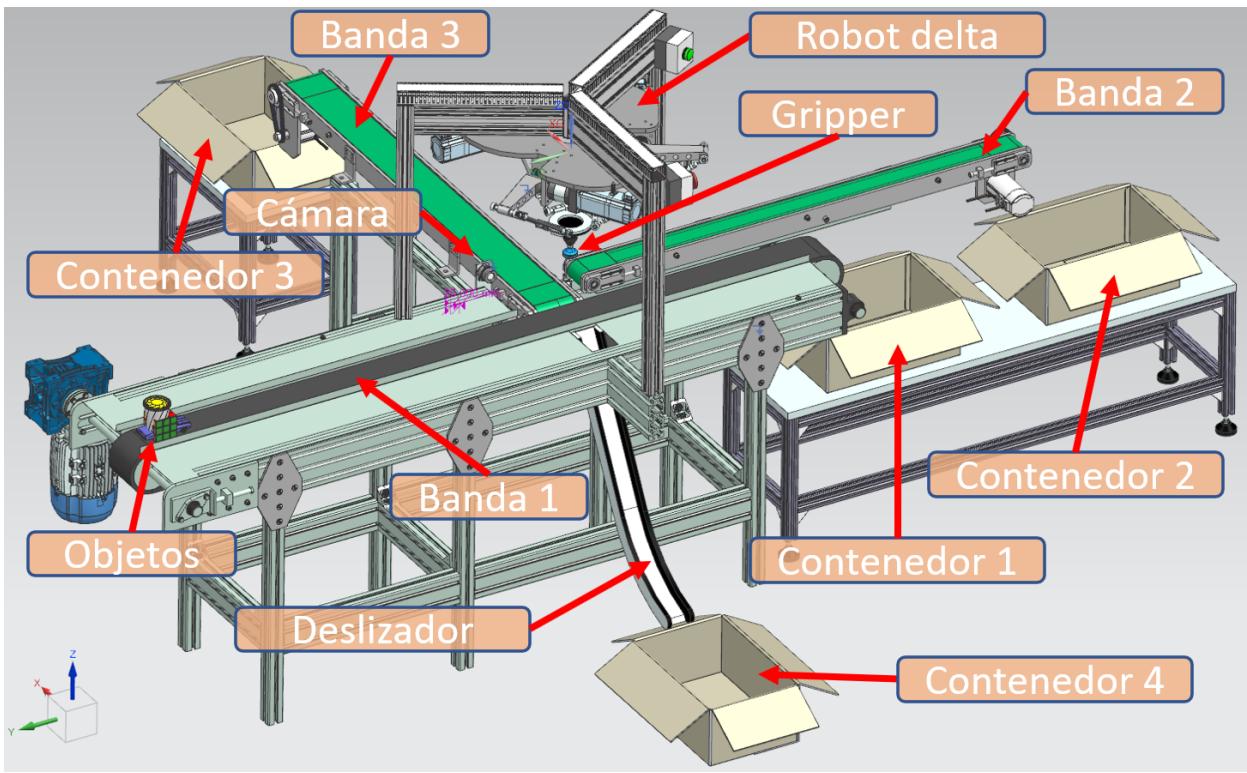


Figura 4-1: Descripción de la celda de *pick and place* robotizada de la fábrica digital. [Autor]

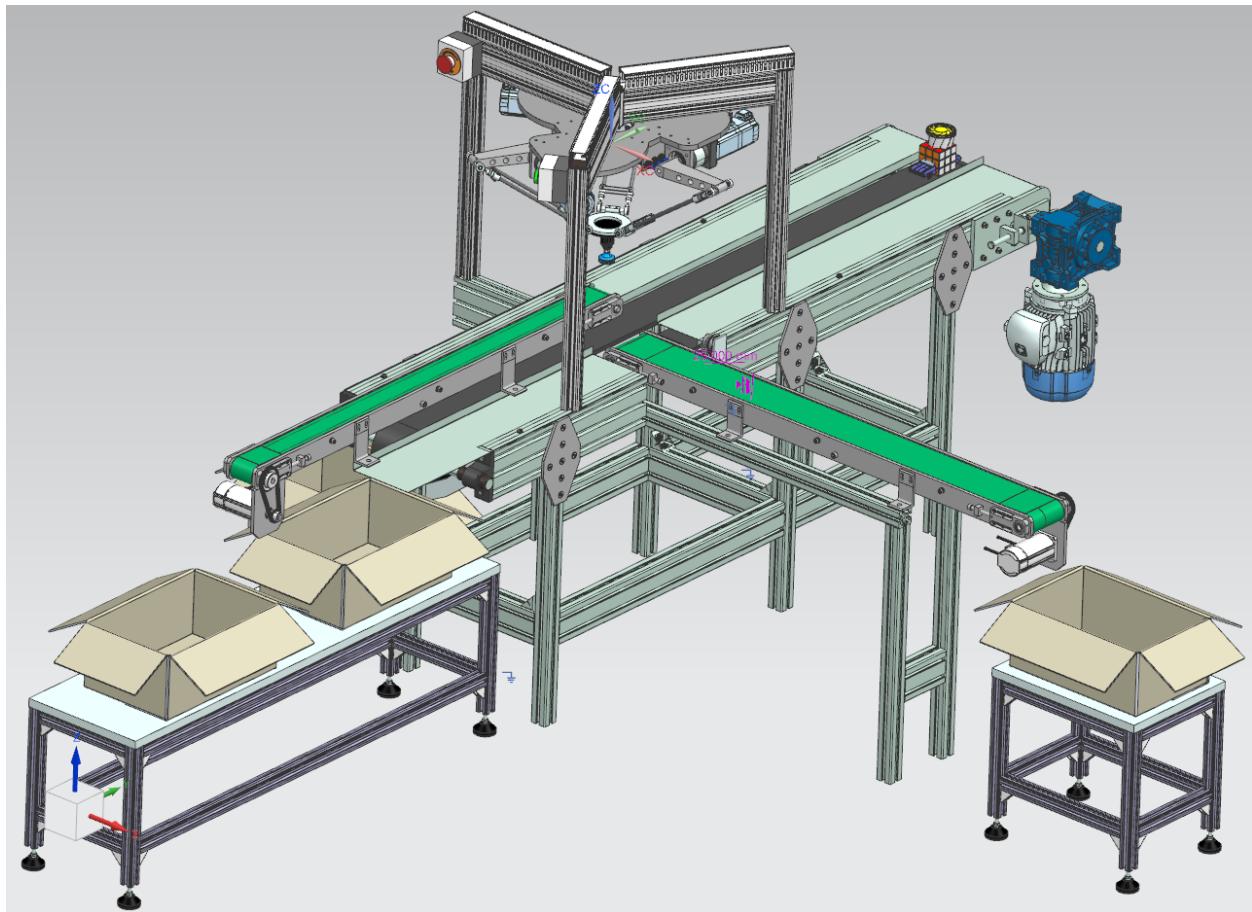


Figura 4-2: Vista lateral derecha de la celda de *pick and place* robotizada. [Autor]

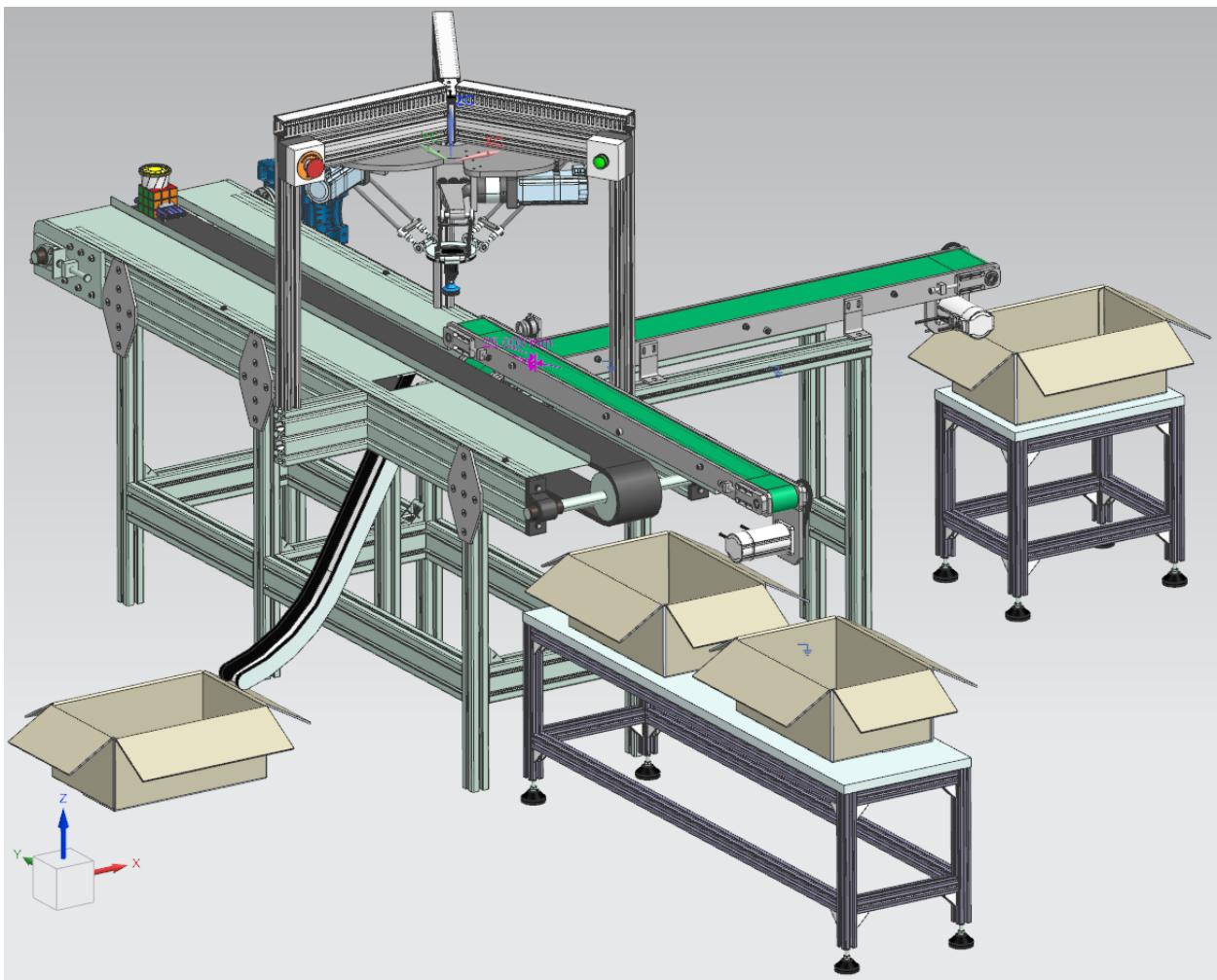


Figura 4-3: Vista lateral derecha de la celda de *pick and place* robotizada. [Autor]

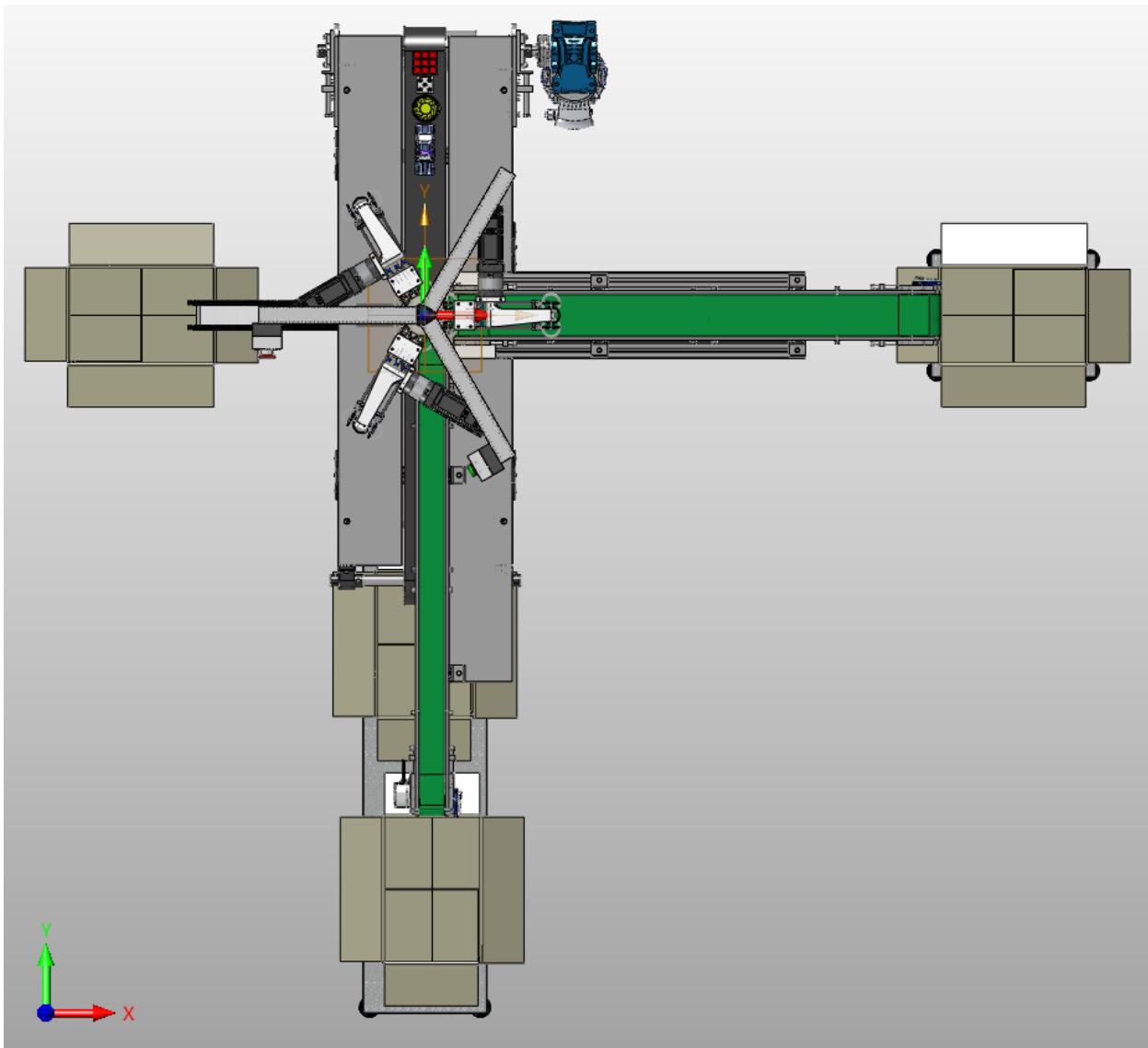


Figura 4-4: Vista superior de la celda de *pick and place* robotizada. [Autor]

4.2.2. Objetos a manipular por la celda de *pick and place* robotizada

Los objetos a detectar y manipular tienen formas diferentes y en especial variaciones en sus alturas tal y como se puede apreciar en la tabla 4-1 y en la figura 4-5, por lo tanto, la posición de reposo del robot tiene que garantizar que los objetos no colisionen con el *gripper* neumático. Además, una vez que el objeto ha sido detectado, el sistema de control tiene que determinar cuál es la altura correcta en la cual debe tomar el objeto en cuestión.

Referencia	Descripción	Altura [mm]
1	Cubo Rubik	57
2	Carro de juguete	31.93
3	Vaso plástico	90
4	Dado	40

Tabla 4-1: Alturas de los objetos a manipular por la celda de *pick and place* robotizada

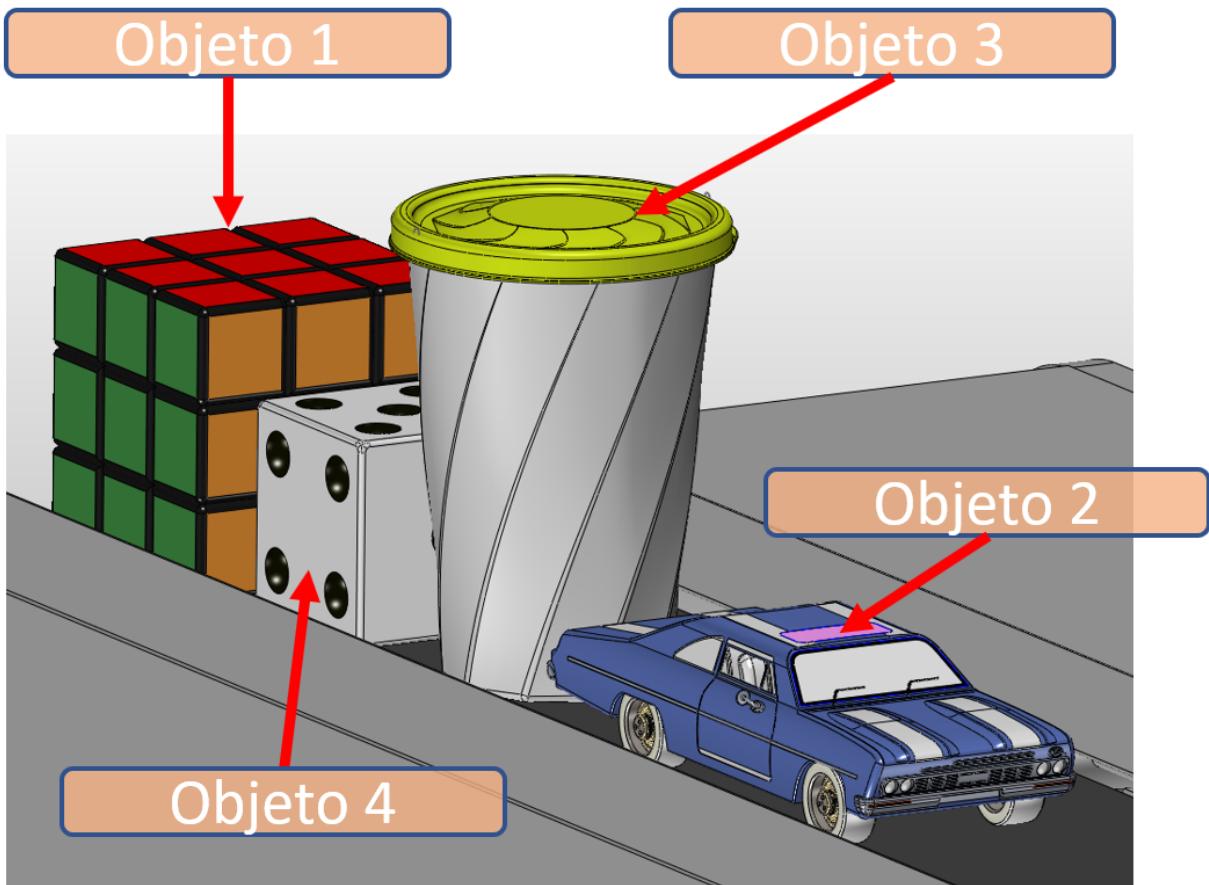


Figura 4-5: Objetos a manipular por la celda de *pick and place* robotizada. [Autor]

4.3. Comunicación entre el robot delta fabricado y el sistema de producción virtualizado

Para poder establecer una comunicación entre el modelo virtual realizado en Siemens NX Mechatronics Concept Designer ®y el programa de control de movimiento del robot real

desarrollado en Microsoft Visual Studio (R)), se emplea una comunicación digital bidireccional mediante sockets TCP corriendo en un hilo independiente (paralelo) del controlador de movimiento con una tasa de actualización de 10ms.

En la figura 4-6 se puede apreciar el enlace entre las variables de entrada y de salida del gemelo digital y las variables de entrada y de salida del programa del controlador de movimiento, de tal manera que cada variable en un programa se comunica con su correspondiente variable del otro programa. Cabe resaltar que se debe tener especial cuidado al seleccionar el tipo de variable a usar, como por ejemplo de tipo boleana o de tipo double, con el fin de garantizar un correcto almacenamiento y comunicación de los datos.

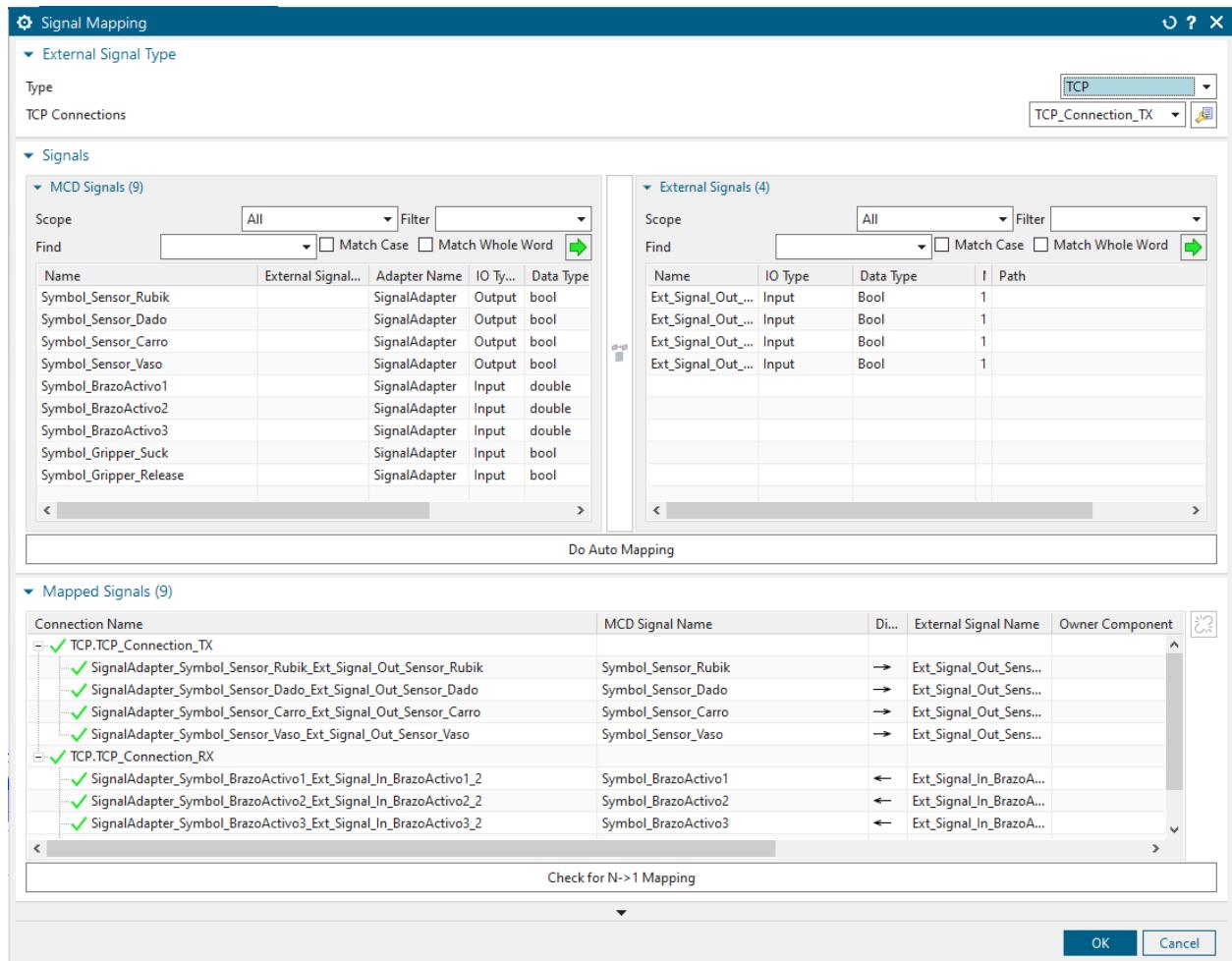


Figura 4-6: Enlace de señales entre MCD y el robot real. [Autor]

4.3.1. Información desde el robot real hacia MCD

La comunicación entre el programa de control del robot y el gemelo digital, requiere tres datos tipo double (datos de 8 bytes) para enviar la información en tiempo real de las tres posiciones articulares del robot y dos datos tipo bool (datos de un bit) para comunicarle al gemelo digital en que momento debe activar o desactivar el *gripper* virtual, por lo tanto en total se necesitan 25 bytes para transmitir toda la información requerida, tal y como se puede apreciar en la tabla 4-2 y la figura 4-7:

Señal	Descripción	Tipo
1	Posición angular actuador 1 (θ_1)	Double (8 bytes)
2	Posición angular actuador 2 (θ_2)	Double (8 bytes)
3	Posición angular actuador 3 (θ_3)	Double (8 bytes)
4	Encendido <i>gripper</i>	Bool
5	Apagado <i>gripper</i>	Bool

Tabla 4-2: Señales desde el robot real hacia MCD

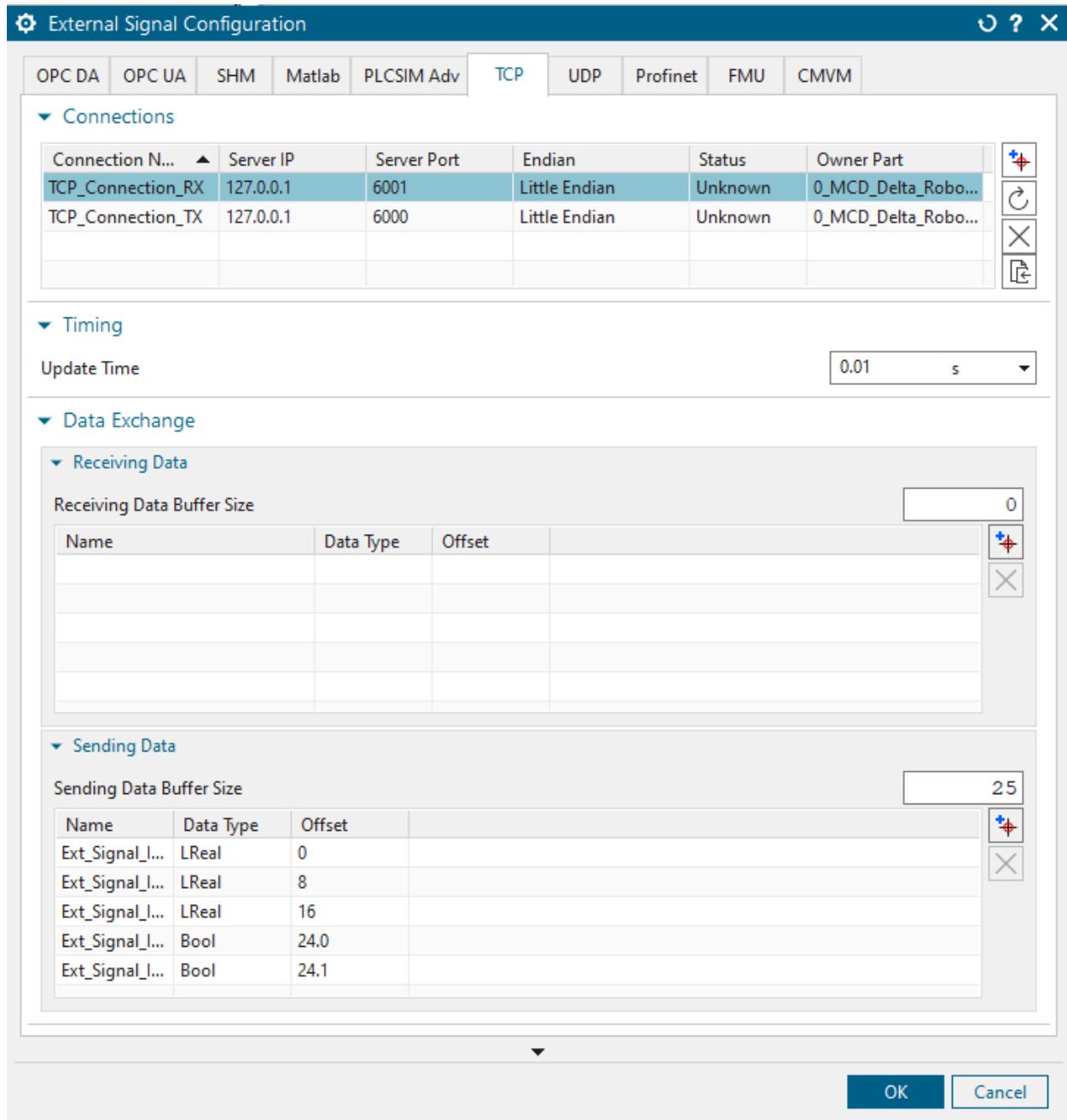


Figura 4-7: Señales desde el robot real hacia MCD. [Autor]

4.3.2. Información desde MCD hacia el robot real

La comunicación entre el gemelo digital y el programa de control del robot, requiere cuatro datos tipo bool (datos de un bit) para comunicarle al programa de control del robot la detección de un nuevo objeto virtual, por lo tanto en total se necesita tan solo un byte para transmitir toda la información requerida, tal y como se puede apreciar en la tabla 4-3 y la

figura 4-8:

Señal	Descripción	Tipo
1	Detección cubo Rubik	Bool
2	Detección carro de juguete	Bool
3	Detección vaso plástico	Bool
4	Detección dado	Bool

Tabla 4-3: Señales desde MCD hacia el robot real

Dada la cantidad de datos transmitidos (4 datos tipo bool) se necesita un byte para transmitir toda la información requerida:

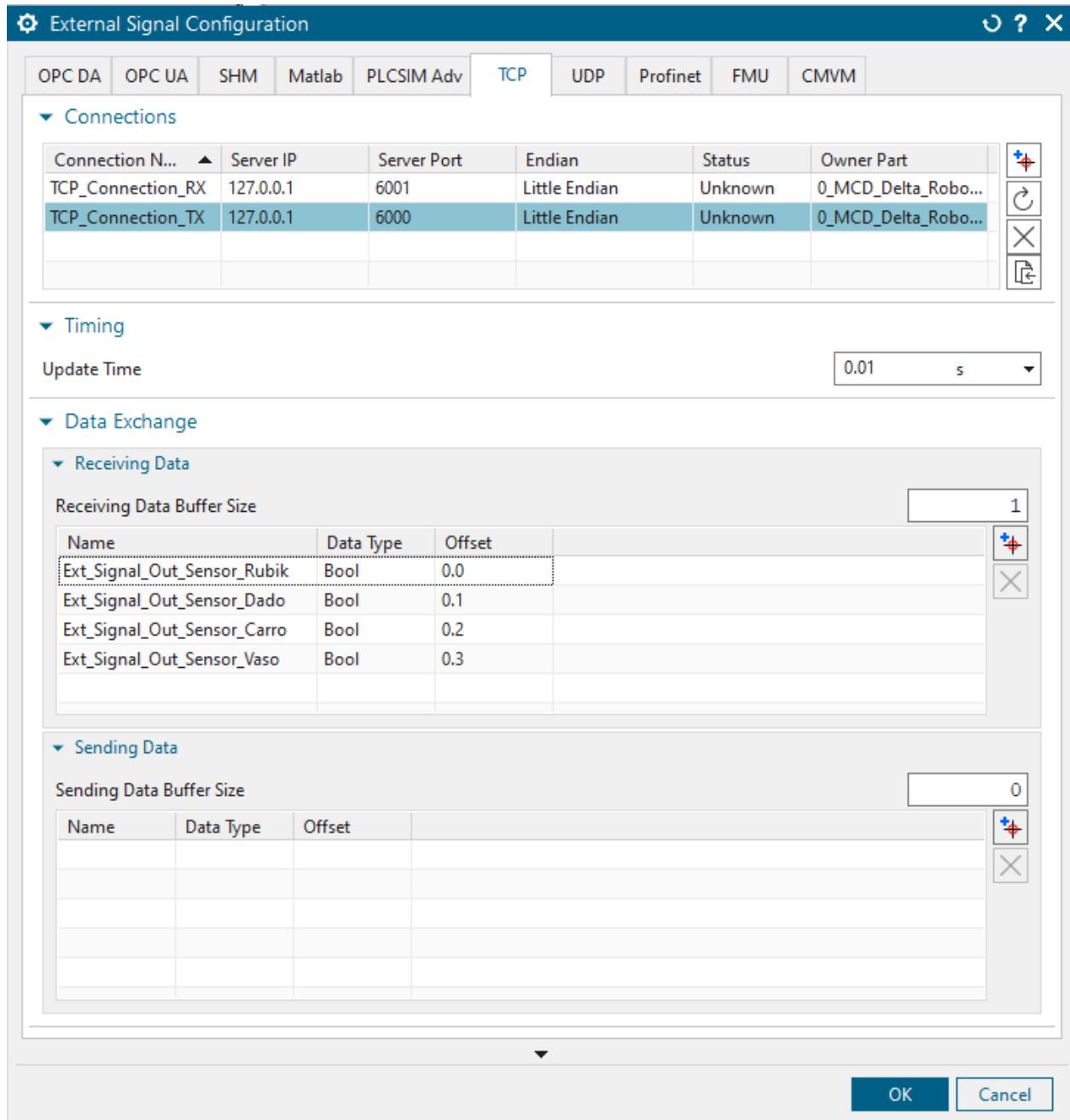


Figura 4-8: Señales desde MCD hacia el robot real. [Autor]

4.4. Resultados

Para desarrollar el ejercicio propuesto haciendo uso de sistemas ciberfísicos, los únicos elementos reales involucrados son los componentes básicos del robot como el control de movimiento del robot, el bastidor, y las tres cadenas cinemáticas. Los elementos netamente

virtuales incluyen las bandas transportadores, el deslizador, los elementos a manipular (carro de juguete, vaso plástico, dado y cubo Rubik) y la cámara de visión artificial.

Para poder realizar el proceso de *pick and place* virtualizado haciendo uso de sistemas ciberfísicos uniendo los elementos del robot desarrollado, en especial el controlador de movimiento físico, real y operativo con la fábrica digital, se requiere que el programa de control del robot ejecute una rutina en la cual el primer paso es llevar el robot a una posición de reposo en donde el *gripper* queda en una posición cercana a cualquiera de los elementos a manipular.

Para mayor detalle de los resultados obtenidos en la aplicación de sistemas ciberfísicos referirse al anexo C.

Como era de esperarse, por medio del ejercicio haciendo uso de sistemas ciberfísicos, se pudieron encontrar falencias en las etapas iniciales de diseño de la celda de *pick and place* robotizada; como por ejemplo, la ubicación inicial de los puntos de sujeción estaban fuera del espacio de trabajo del robot, lo cual ofrece una gran ventaja de diseño al permitir encontrar este tipo de problemas antes de la fabricación de los diferentes componentes.

Tras el análisis, podemos deducir que haciendo uso de humanos para aplicaciones de *pick and place*, se requiere de varias personas para equiparar las velocidades de detección y selección de elementos alcanzados por un robot delta. Adicionalmente, se debe tener en cuenta la pérdida de productividad de los humanos ante largas jornadas de trabajo y las posibles lesiones debido a las tareas repetitivas.

Partiendo de las velocidades de detección y selección de elementos alcanzados en el ejercicio virtualizado, se concluye que se requieren en promedio entre 2 a 4 personas por turno para igualar la labor ofrecida por un robot delta en un proceso de *pick and place*, obviamente dependiendo del peso, tamaño y forma de los objetos a manipular. Por otra parte, el robot puede, bajo condiciones normales, operar las 24 horas del día, los 365 días del año, obviando de esta manera los tiempos muertos por momentos de descanso y cambio de turnos. En la figura 4-9 se puede apreciar la comparación de los costos operativos de un robot versus un humano, en donde se puede apreciar que el costo puede llegar a ser significativamente más bajo haciendo uso de robots para ciertas tareas específicas.

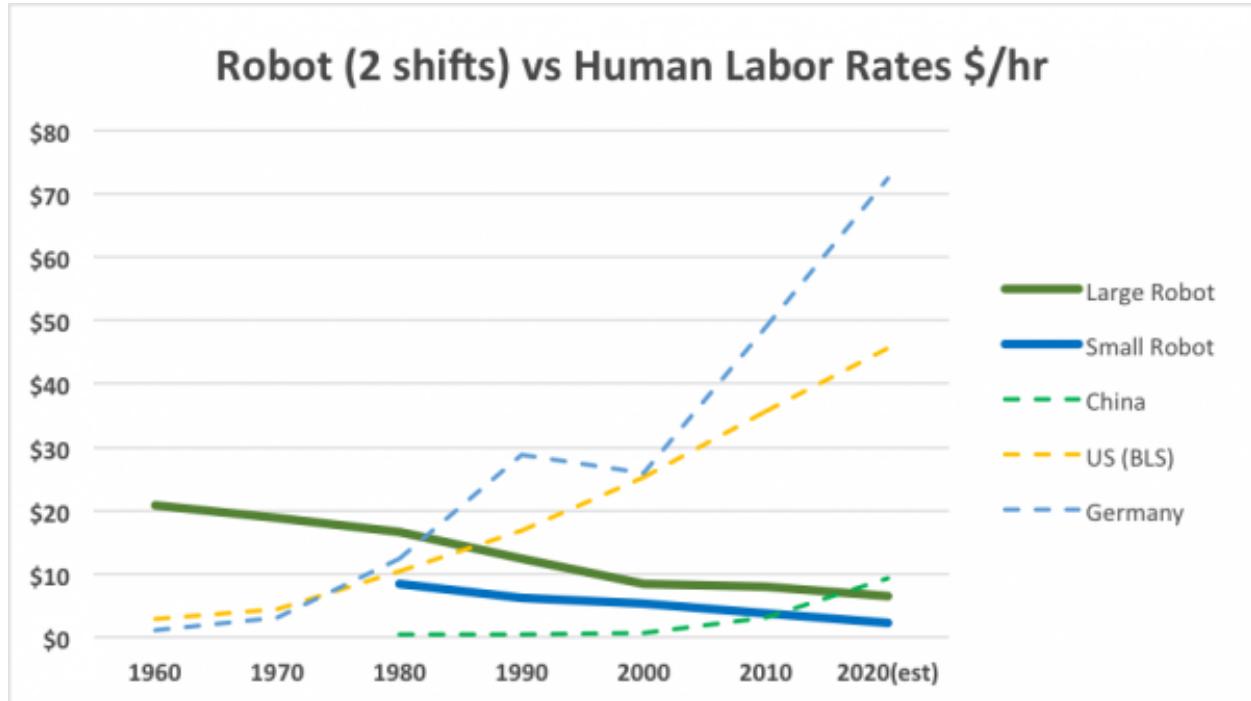


Figura 4-9: Costo hora de trabajo robot vs. humano [32].

En la figura 4-10, es posible constatar el gasto computacional requerido para la aplicación de sistemas ciberfísicos desarrollado en el presente trabajo (fábrica virtual con módulo de *pick and place* robotizado), en donde se evidenció que la mayor parte del tiempo el uso de la GPU del computador (NVIDIA GeForce GTX 670 de 4GB) fue cercano al 100 % y el consumo de memoria RAM, incluyendo todas las aplicaciones necesarias, fue de aproximadamente 10.5GB.

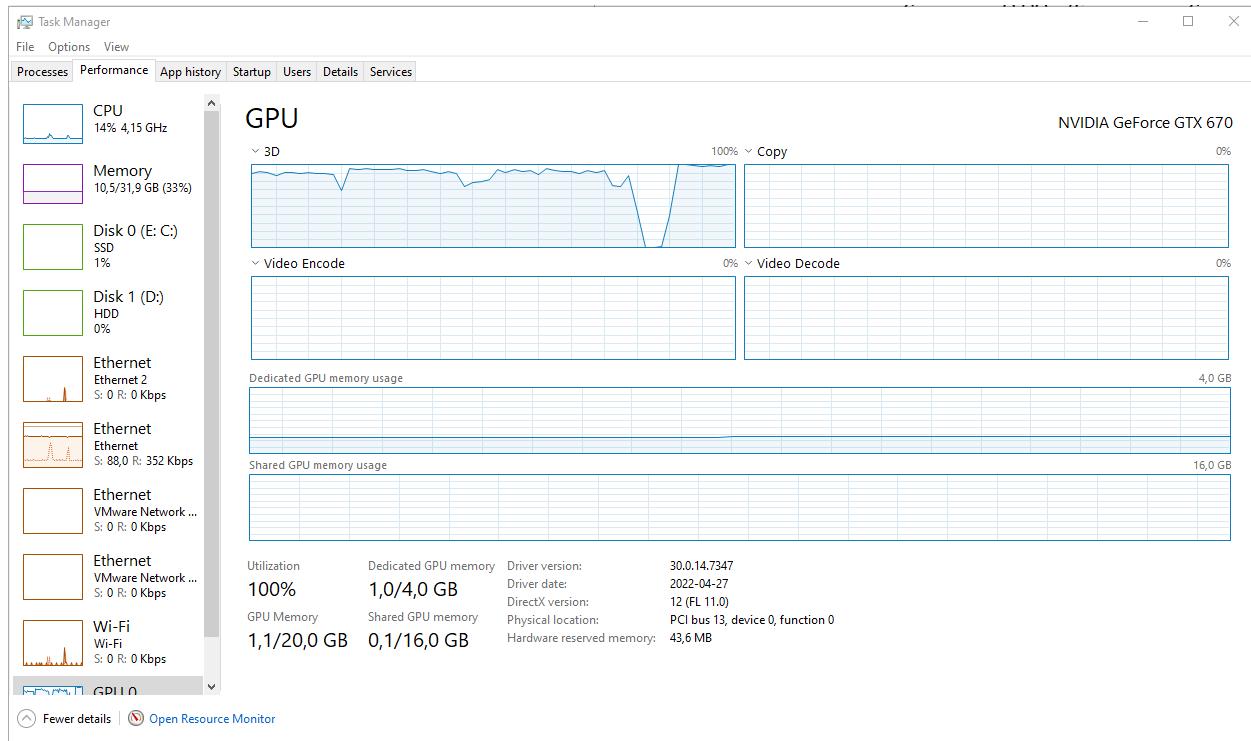


Figura 4-10: Gasto computacional en aplicación de sistemas ciberfísicos. [Autor]

Ahora bien, aunque el programa Siemens Mechatronics Concept Designer ®(MCD) así como el programa de control del robot delta realizado en Visual Studio corren en el mismo computador, en la figura 4-11 se evidencia que los recursos consumidos por los procesos asociados al robot tan solo gastan el 1% de la CPU y 1.6 GB de memoria RAM. Como referencia, el equipo de cómputo en donde se ejecutaron los procesos fue un computador de escritorio, considerado de gama media / alta para el momento en que se desarrolla el proyecto con las siguientes características: CPU AMD Ryzen 7 3800X, 32 GB de memoria RAM DDR4 y SSD M.2 NVMe Gen 4.0, GPU Nvidia GeForce GTX 670 de 4GB, con sistema operativo Windows 10 Professional de 64 bits.

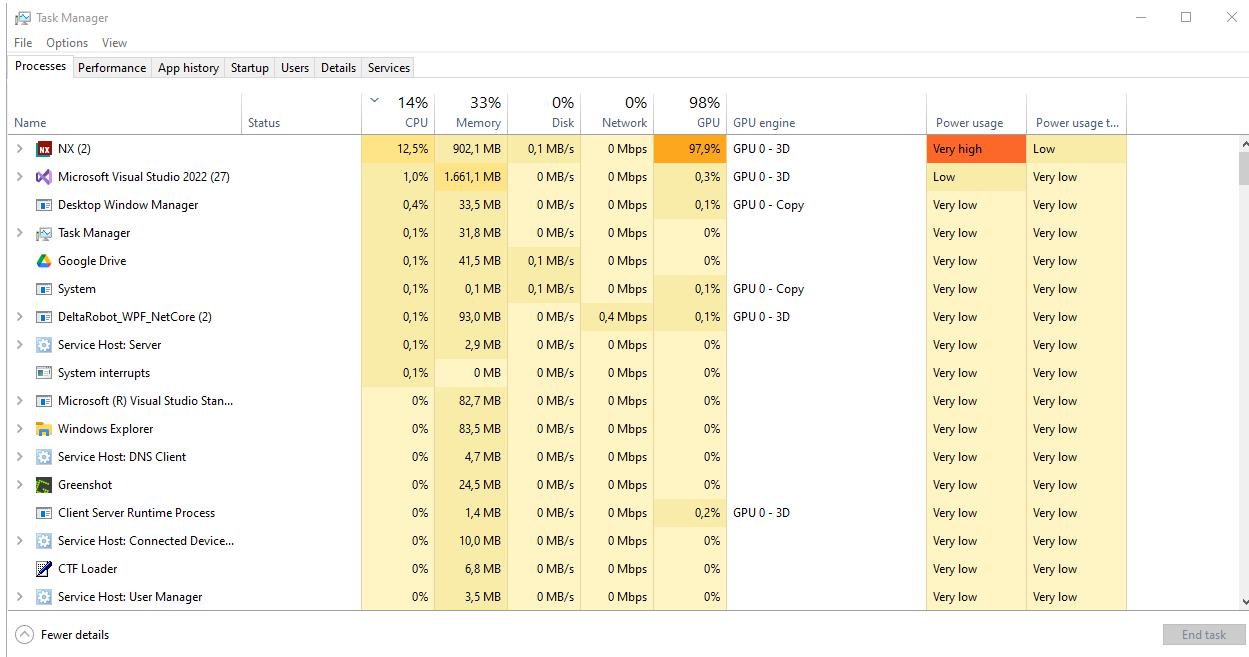


Figura 4-11: Gasto computacional en aplicación de sistemas ciberfísicos. [Autor]

4.5. Recomendaciones

1. Debido a que MCD requiere un gran poder de computo para realizar los cálculos de la física de los elementos dinámicos del modelo CAD, como por ejemplo, el cálculo de la inercia de los objetos, se recomienda incluir en el modelo 3D tan solo las partes fundamentales del proceso, con el objetivo de obtener una emulación más fluida, permitiendo una comunicación en tiempo real con el dispositivo físico.
2. Es importante que la tasa de refresco o velocidad de comunicación entre las partes sea acorde a los movimientos emulados. Por consiguiente, como el robot delta presenta grandes velocidades y aceleraciones, es pertinente usar tasas de muestreo en el orden de los pocos milisegundos. Tras las pruebas realizadas se determinó que una tasa de actualización de 10 ms es un valor balanceado entre carga computacional y una correcta respuesta del proceso de emulación de la fábrica virtual.
3. En lo posible se recomienda minimizar la cantidad de componentes involucrados dentro de la red de comunicaciones. Al momento de tener elementos que aumenten la latencia como enruteadores, servidores intermedios (como por ejemplo haciendo uso de un sistema SCADA o de servidores OPC) la calidad de la emulación se deteriora significativamente; al punto en que no es posible recrear apropiadamente un escenario con sistemas ciberfísicos que involucren elementos de alta velocidad como un robot delta.

4. Los procesos de comunicación del robot con los elementos externos, en este caso con MCD requieren ser ejecutados en un hilo en paralelo, con el objeto de garantizar que los cálculos y movimientos del robot sean continuos y que el dispositivo no falle o se ralentice por culpa de posibles interrupciones o demoras en las líneas de comunicación.

5

Conclusiones

En este capítulo se presentan las conclusiones del trabajo realizado. Adicionalmente, se plantean posibles proyectos futuros con el fin de continuar con el desarrollo del prototipo realizado en el presente trabajo.

5.1. Conclusiones

En este documento se exponen los desarrollos previos de robots paralelos y sus avances a lo largo de la historia, permitiendo entender su funcionamiento básico y su evolución.

Se indicaron algunos de los métodos matemáticos para el cálculo de la cinemática directa e inversa necesarios para la realización de los movimientos del robot. En el primer caso, permite determinar la posición del efecto final según unas posiciones articulares dadas y en el segundo caso, permite encontrar las posiciones articulares requeridas para llevar el efecto final a un lugar deseado que se encuentre dentro del espacio de trabajo del robot.

Se demuestra como realizar los cálculos para el dimensionamiento de los actuadores, los cuales dependen de las velocidades y las aceleraciones deseadas, así como las dimensiones e inercias del sistema. Como resultado se obtienen la velocidad máxima del actuador, par mínimo requerido y la potencia consumida.

Por otra parte, se detalla el desarrollo e implementación de un prototipo funcional, elaborado con el fin de poner en práctica los conocimientos teóricos sobre robots de arquitectura paralela tipo delta y permitir a la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, disponer de una máquina de código abierto, elaborado en su totalidad por estudiantes y disponible para continuar desarrollos y futuras mejoras.

Para terminar, se realiza una aplicación de sistemas ciberfísicos con el objetivo de integrar el dispositivo físico con una fábrica virtual, en un proceso de *pick and place*, demostrando que es posible explotar herramientas modernas para desarrollar líneas de automatización sin tener que construir todos los elementos previamente.

Gracias al desarrollo realizado, es posible extraer las herramientas disponibles a robots delta de diferentes dimensiones, para lo cual tan solo se requiere modificar los cuatro parámetros básicos de la topología del robot: radio de la base fija R_f , radio de la base móvil R_m , longitud del eslabón activo L_a y longitud del eslabón pasivo L_p .

5.2. Trabajos futuros

- Optimizar la topología del robot con el objeto de mejorar el espacio de trabajo del robot.
- Adicionar un interpretador de instrucciones especializado de robótica industrial, como por ejemplo, un interpretador de lenguaje de comandos RAPID.
- Agregar al prototipo de robot un *gripper* o herramienta para realizar aplicaciones especializadas como procesos de *pick and place* para industrias de empacado.
- Implementar un sistema de visión de máquina para realizar funciones automatizadas basadas en colores o formas.
- Elaborar guías de aplicación para los cursos de robótica de la Universidad Nacional de Colombia.
- Desarrollar más aplicaciones de sistemas ciberfísicos, con el propósito de continuar la validación del robot y explorar más a fondo las funcionalidades y ventajas de la unión de elementos reales con elementos virtuales.
- Anexar un cuarto eje rotacional sobre el eje Z en el efecto final para tener un cuarto grado de libertad e incrementar el potencial del robot.
- Ampliar los protocolos de comunicación, con la finalidad de integrar el robot delta desarrollado con otros elementos industriales como PLCs, HMIs, SCADAs, etc.
- Aumentar la rigidez estructural del robot, para mejorar su capacidad de carga y poder ejecutar movimientos haciendo uso de las velocidades y aceleraciones máximas sin llegar a comprometer los elementos mecánicos ni la vida útil del robot.

Bibliografía

- [1] Meneses, X., Méndez, M. (2007). Diseño y Control de un Robot Paralelo. Instituto Tecnológico de San Luis Potosí. 6to Congreso Nacional de Mecatrónica.
- [2] Gausemeier, J., Moehringer, S. (2002). VDI 2206 - A New Guideline for the Design of Mechatronic Systems. University of Paderborn. Paderborn, Alemania.
- [3] Alegard, S., Knutsson, S. (2017). Virtual Commissioning of Smart Factory. Master Thesis. Chalmers University of Technology. Gothenburg, Suecia.
- [4] Bonev, I. (2013). The True Origins of Parallel Robots. <http://www.paralemic.org/Reviews/Review007.html>
- [5] Díaz, M., Quintero, H. (2018). Aplicación de los Robots Paralelos.
- [6] Powell, N. , Whittingham, B. , Gindy, N. (1999). Parallel link mechanism machine tools: acceptance testing and performance analysis in Parallel Kinematic Machines. Springer, London.
- [7] Gonzales, V., Martínez, P. (2013). Análisis, Instrumentación y Manipulación de un Robot Paralelo Híbrido. XIX Congreso Internacional Anual de la SOMIM. <http://somim.org.mx/articulos2010/memorias/memorias2013/pdfs/A2/A2303.pdf>
- [8] Martínez, P., Gonzales, V. (2009). Análisis cinemático de un robot manipulador paralelo delta híbrido. XV Congreso Internacional Anual de la SOMIM.
- [9] Waldron, K., Raghavan, M., Roth, B. (1989). Kinematics of a Hybrid Series-Parallel Manipulation System. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control.
- [10] Shahinpoor, M. (1992). Kinematics of a parallel-serial (Hybrid) manipulator. Journal of Robotic Systems.
- [11] M. Z. Huang, S. -H. Ling and Y. Sheng. (1993). A study of velocity kinematics for hybrid manipulators with parallel-series configurations. Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation.

- [12] B. Shusheng, Z. Guanghua, L. Rong and W. Shoujie. (1997). Accuracy analysis of the serial-parallel micromotion manipulator. IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Computational Cybernetics and Simulation.
- [13] Tanev, T. (2000). Kinematics of a hybrid (parallel- serial) robot manipulator. Mechanism and Machine Theory. (pp. 1183-1196).
- [14] Ouarda, I., K. Wisama. (2006). Inverse Dynamic Modeling of Serial-Parallel Hybrid Robots. IEEE/RSJ International Conference on 2006. (pp. 2156-2161).
- [15] Sellaouti, R. and F.B. Ouezdou. (2005), Design and control of a 3DOFs parallel actuated mechanism for biped application. Mechanism and Machine Theory. (pp. 1367-1393).
- [16] Yen, P., Lai, C. (2006). Developing a Hybrid Cartesian Parallel Manipulator for Knee Surgery. IEEE IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics, 2006. (pp. 1-6).
- [17] Ramadan, A., Inoue, K. (2007). Micro-Nano Two-Fingered Hybrid Manipulator Hand. 2007 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science. (pp. 32-37).
- [18] Rueda, J. (2008). Metodología para el diseño de un robot paralelo industrial tipo delta. Universidad Pontificia Bolivariana. Bucaramanga, Colombia.
- [19] González, F. Roldán, F. (2013). Robot paralelo tipo Delta. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá D.C., Colombia.
- [20] Cortés, J. (2013). Diseño óptimo dimensional de una máquina-robot de arquitectura paralela tipo delta para aplicaciones *pick and place*. Universidad Santo Tomás. Bogotá D.C., Colombia.
- [21] Pachacama, W., Salazar, J. (2017), Diseño y construcción de un prototipo de robot delta para aplicaciones *pick & place*. Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador.
- [22] Sánchez, R., González, J., Castillo, E., García, M. (2016). Análisis Cinemático de un Novedoso Robot Paralelo Reconfigurable. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI, Volume 13, Issue 2. (pp. 247-257).
- [23] Urrea, L. Medina, S. (2013). Diseño e implementación de una plataforma robótica tipo delta. Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá D.C., Colombia.
- [24] Barco, F. (2018). Diseño y construcción de un prototipo de robot paralelo tipo delta. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá D.C., Colombia.
- [25] Williams, R. (2016). The Delta Parallel Robot: Kinematics Solutions. Ohio University. <https://www.ohio.edu/mechanical-faculty/williams/html/PDF/DeltaKin.pdf>

- [26] Uribe, A. (2016). Diseño de un robot delta para el posicionamiento de componentes electrónicos en circuitos impresos durante su ensamblaje. Universidad Autónoma de Occidente. Santiago de Cali, Colombia.
- [27] Zaragoza, U. (2012). Torque Analysis of a Three Translational Degrees of Freedom Parallel Manipulator. Universidad Santo Tomás. Bogotá D.C., Colombia.
- [28] Digital Research S.L (2016). Qué es industria 4.0 y por qué debería importarte si produce átomos. Madrid, España. Papeles de Inteligencia.<https://papelesdeinteligencia.com/que-es-industria-4-0>
- [29] Banco Mundial. (2021). PIB per cápita (US a precios actuales) - Colombia, Korea, Dem. People's Rep., Germany, United States <https://datos.bancomundial.org/indicador/NY.GDP.PCAP.CD?locations=CO-KP-DE-US>
- [30] KUKA. (2022). KR 1000 Titan. <https://www.kuka.com/en-de/products/robot-systems/industrial-robots/palletizing-robots>
- [31] Cano, J. (2015). Puesta en marcha virtual aplicada al robot delta de la Universidad Santo Tomás. Universidad Santo Tomás. Bogotá D.C., Colombia.
- [32] Logicbus. (2022). <https://www.logicbus.com.mx/blog/pick-and-place-uso-de-mano-de-obra-robotica-para-ahorrar-dinero>
- [33] Nexus Integra. (2022). <https://nexusintegra.io/es/implementar-sistemas-ciberfisicos>
- [34] Aguirre, A., Moyano, B. (2019). Diseño e implementación de un sistema multirobot descentralizado para realizar trabajo colaborativo con aplicaciones logísticas, flexibles y escalables. Universidad de las Fuerzas Armadas. Salgolquí, Ecuador.

A

Anexo: Modelamiento CAD de los elementos mecánicos

En la figura **A-1** se observa la estructura básica del robot en donde se van a anclar los diferentes elementos fijos del dispositivo:

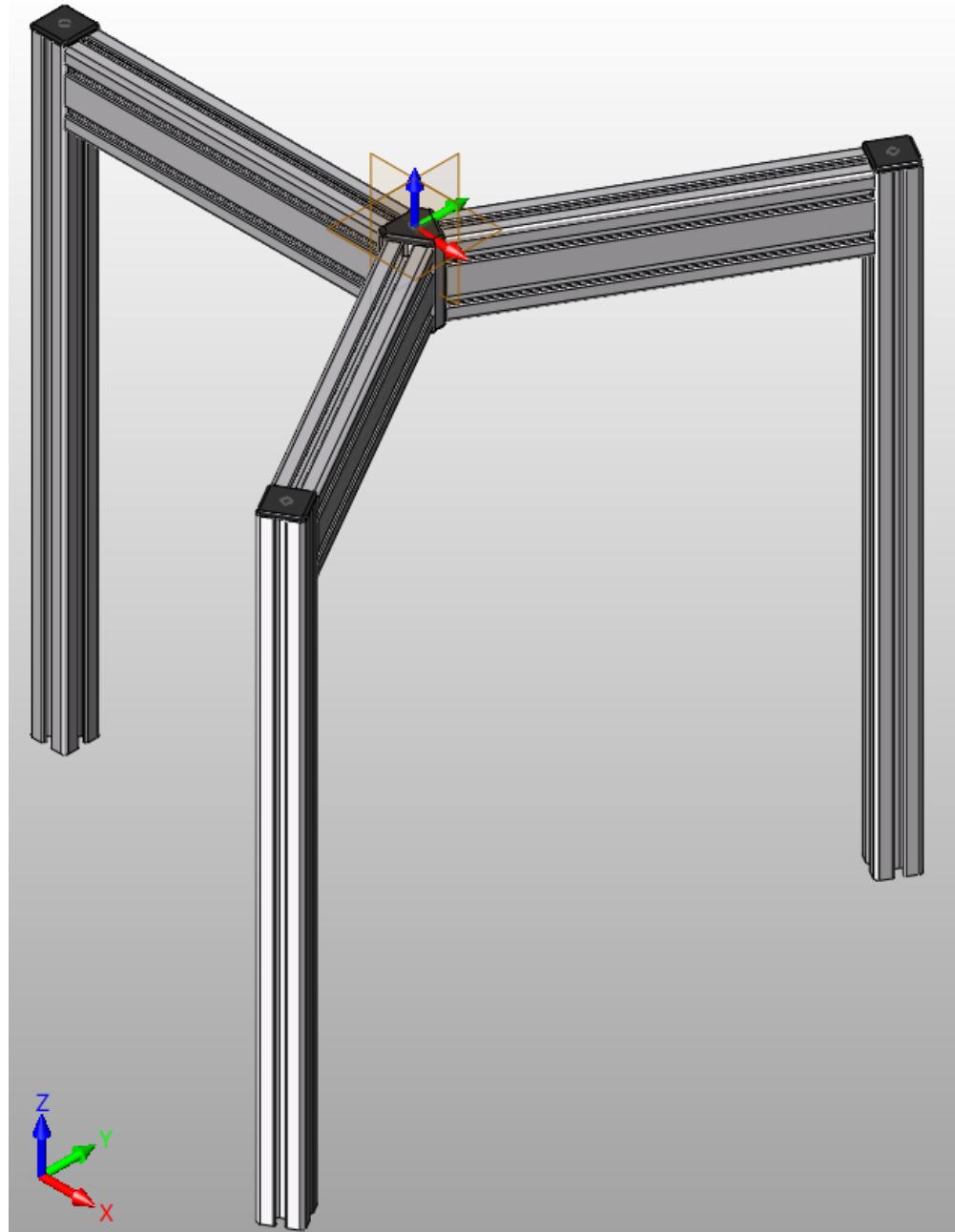


Figura A-1: Bastidor. [Autor]

En la figura **A-2** se observa la geometría de la base fija en la cual van a ir anclados los actuadores (motorreductores) del robot:

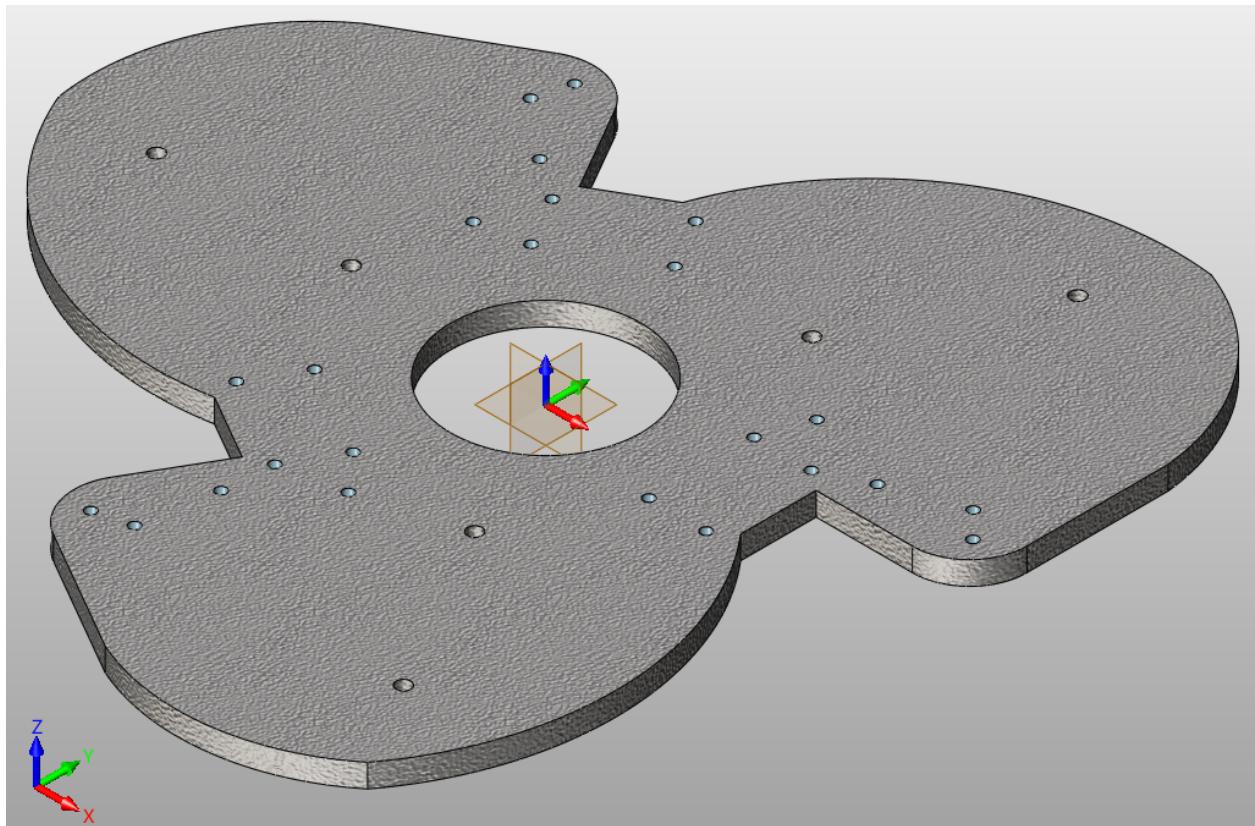


Figura A-2: Base fija. [Autor]

En la figura **A-3** se observa uno de los tres conjuntos reductor y motor, incluyendo su freno electromagnético y *encoder* rotacional incremental anclado al mismo rotor del motor:

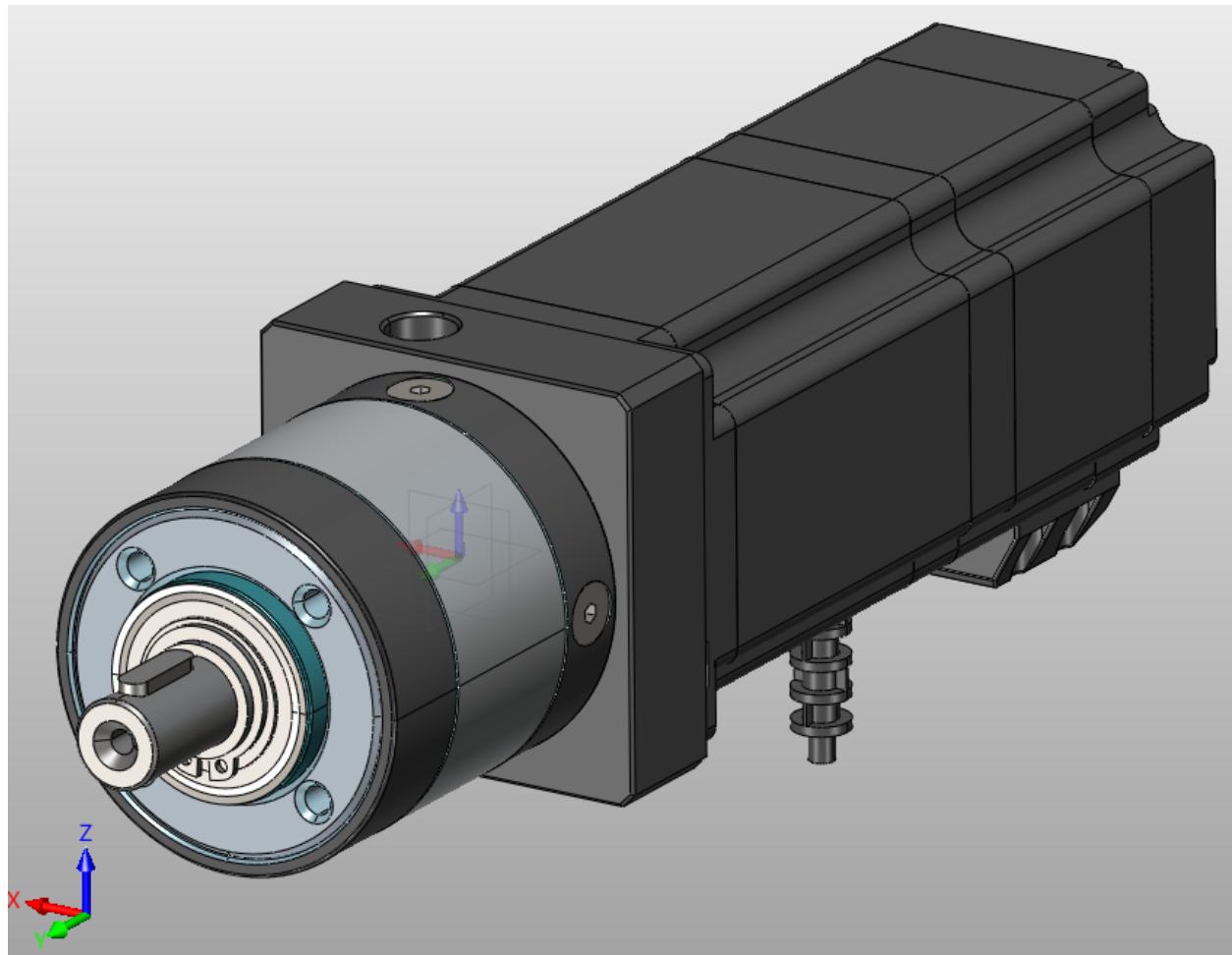


Figura A-3: Motorreductor. [Autor]

En la figura A-4 se observa la geometría de uno de los eslabones activos o brazos, el cual va anclado a la punta del eje de salida del reductor por medio de una chaveta con el fin de permitir movimientos rotacionales. En el otro extremo se puede apreciar las juntas esféricas que soportan al eslabón pasivo:

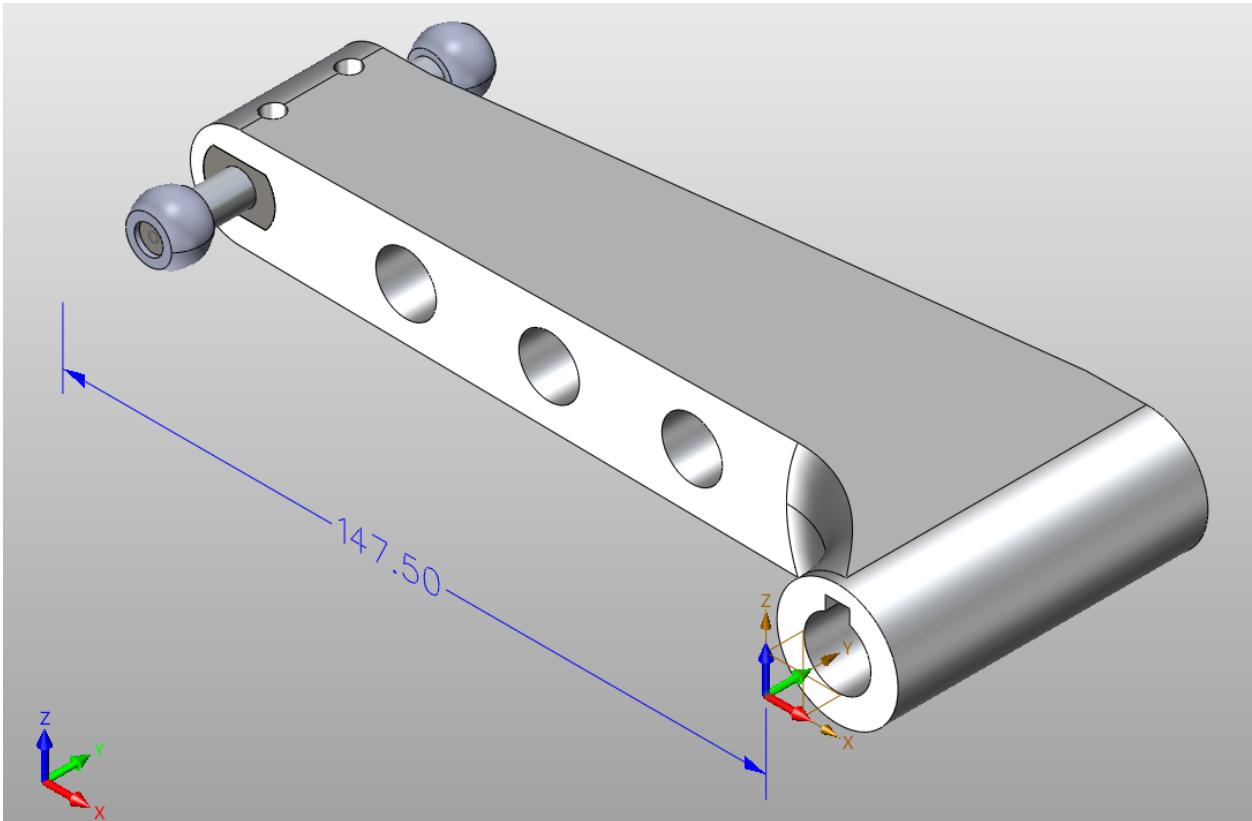


Figura A-4: Eslabón activo o brazo. [Autor]

En la figura A-5 se observa un eslabón pasivo compuesto por dos brazos con cuatro soportes de las juntas esféricas ubicados en los extremos de los mismos:

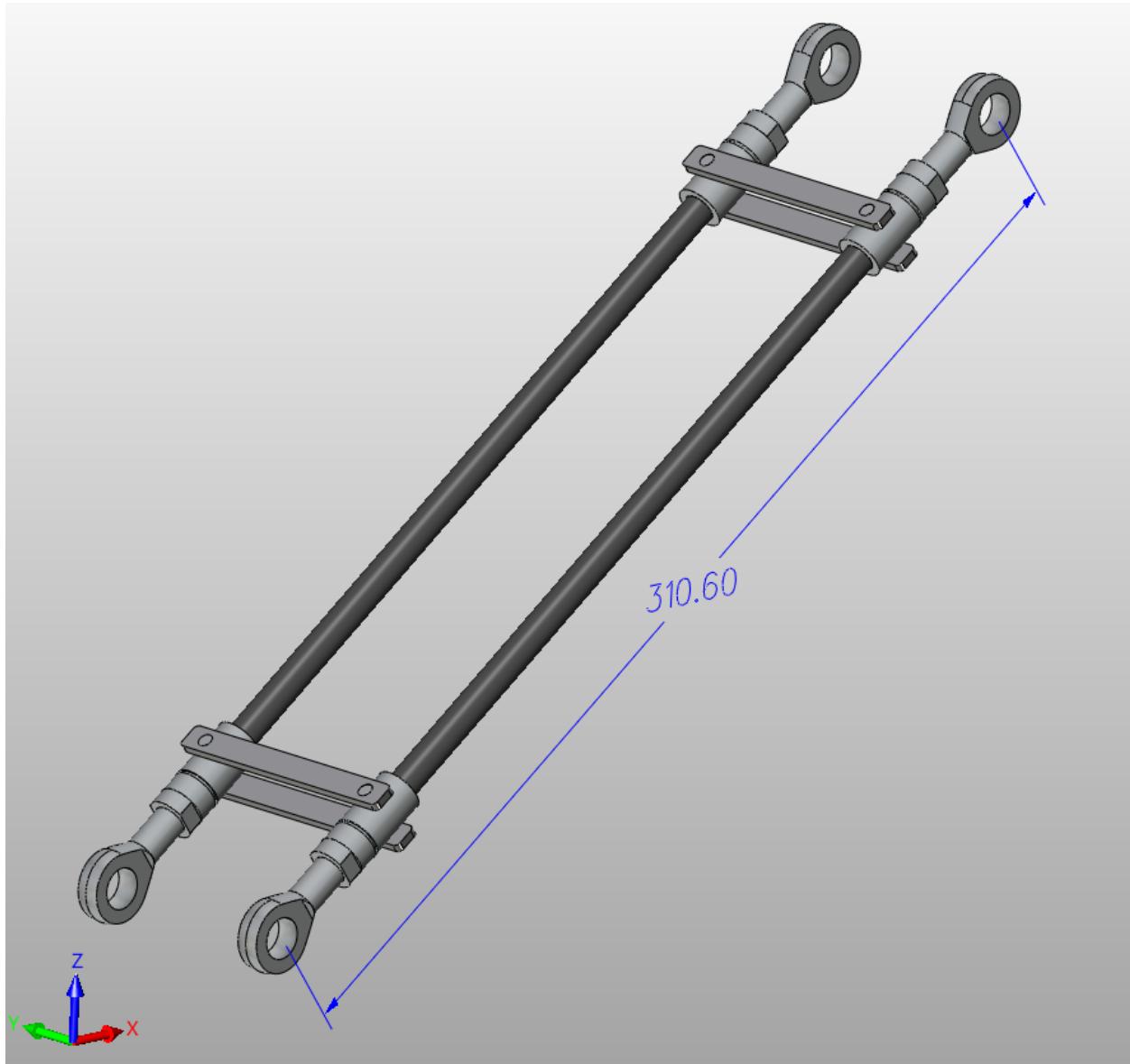


Figura A-5: Eslabón pasivo o antebrazo. [Autor]

En las figuras **A-6** y **A-7** se observa la base móvil la cual se sujetta por medio de los tres eslabones pasivos o antebrazos:

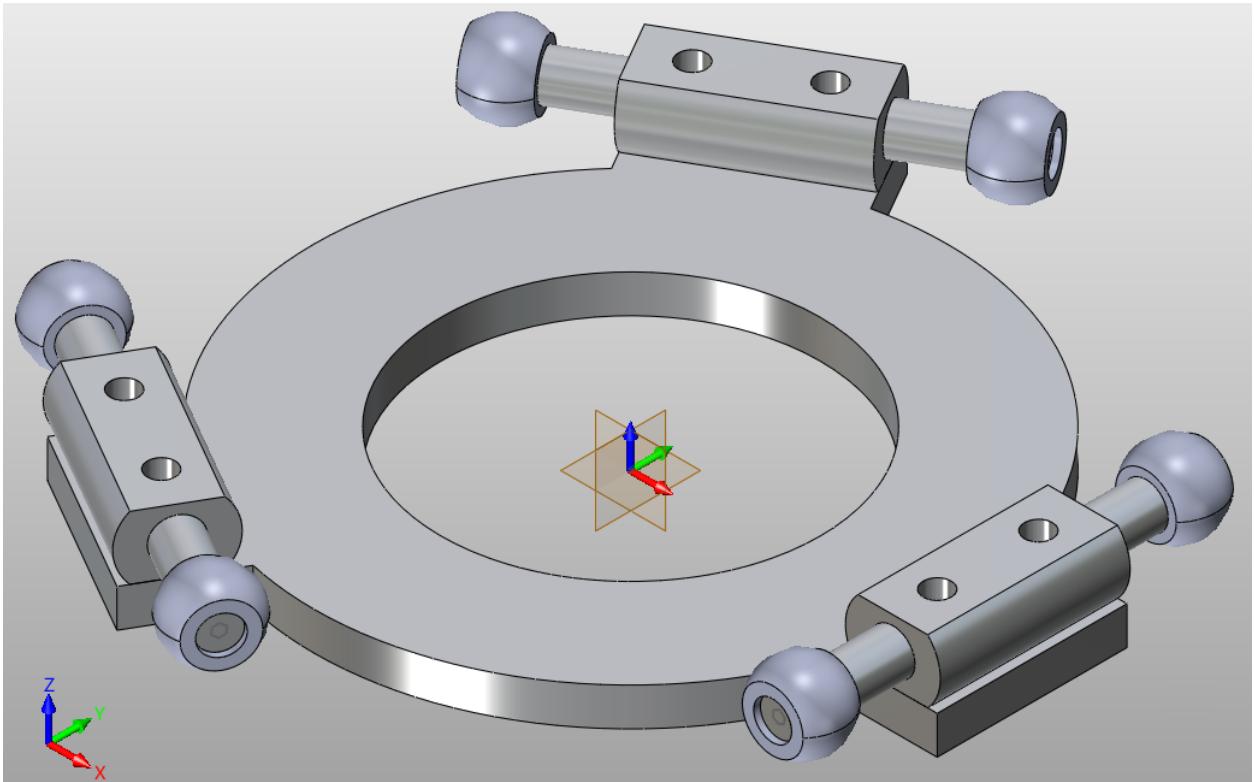


Figura A-6: Base móvil. [Autor]

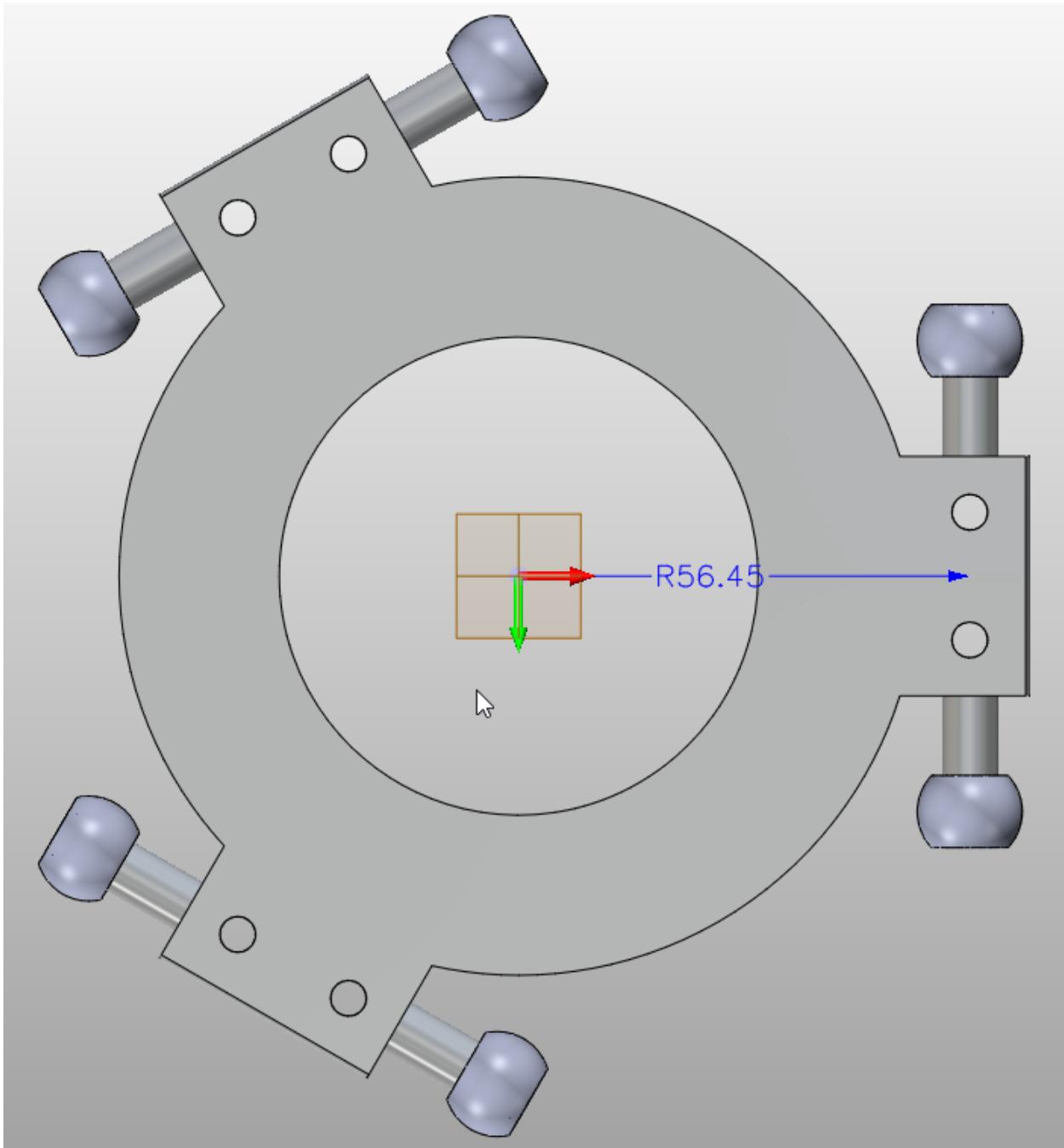


Figura A-7: Base móvil. [Autor]

En la figura **A-8** se observa el ensamblaje principal de las tres cadenas cinemáticas del robot delta, incluyendo los motorreductores y la base móvil:

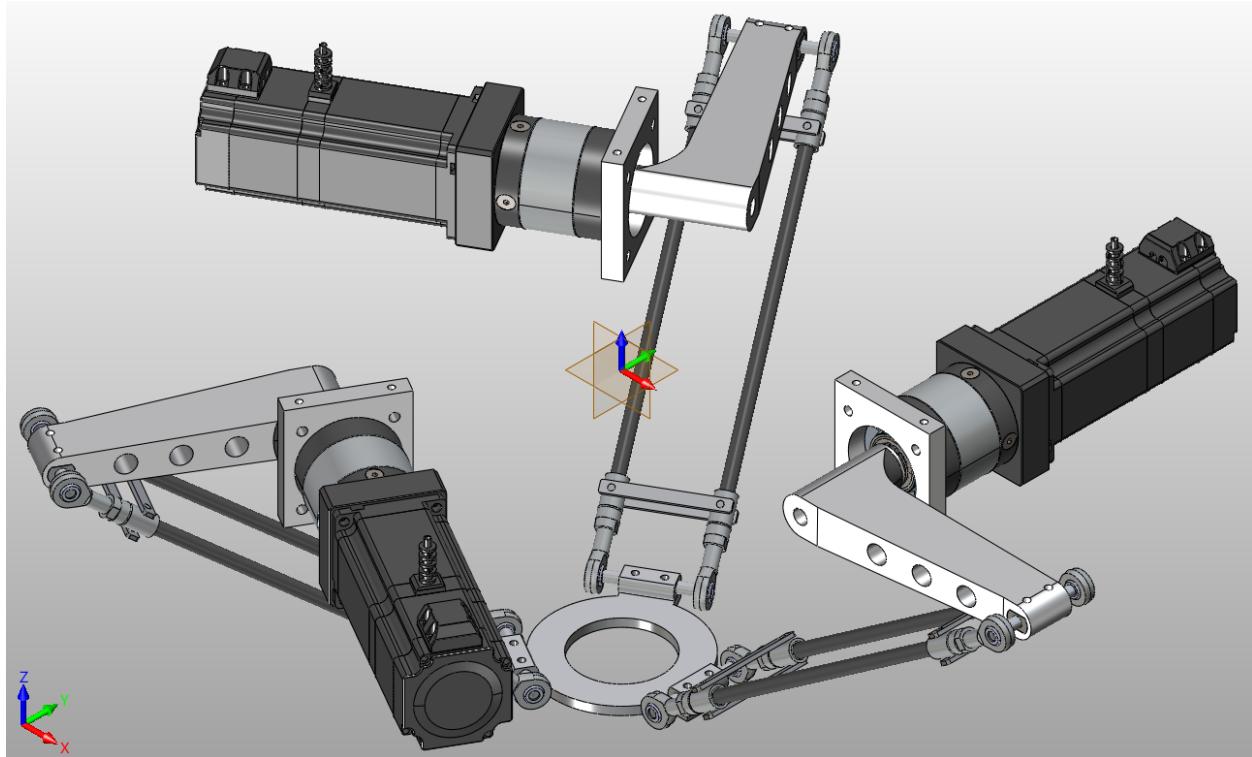


Figura A-8: Ensamble principal robot delta. [Autor]

En la figura A-9 se observa el soporte en donde van anclados tres sensores finales de carrera de tipo inductivo de uno de las cadenas cinemáticas del robot. Los sensores de los extremos sirven para detectar cuando uno de los brazos del robot alcanzo el extremo positivo o negativo con el fin de detener su movimiento y evitar colisiones o daños en el robot. El sensor central es el de referenciamiento o sensor de *home*. Su función es permitir buscar de manera automática una posición de referencia con el fin de alcanzar una posición conocida de la cadena cinemática:

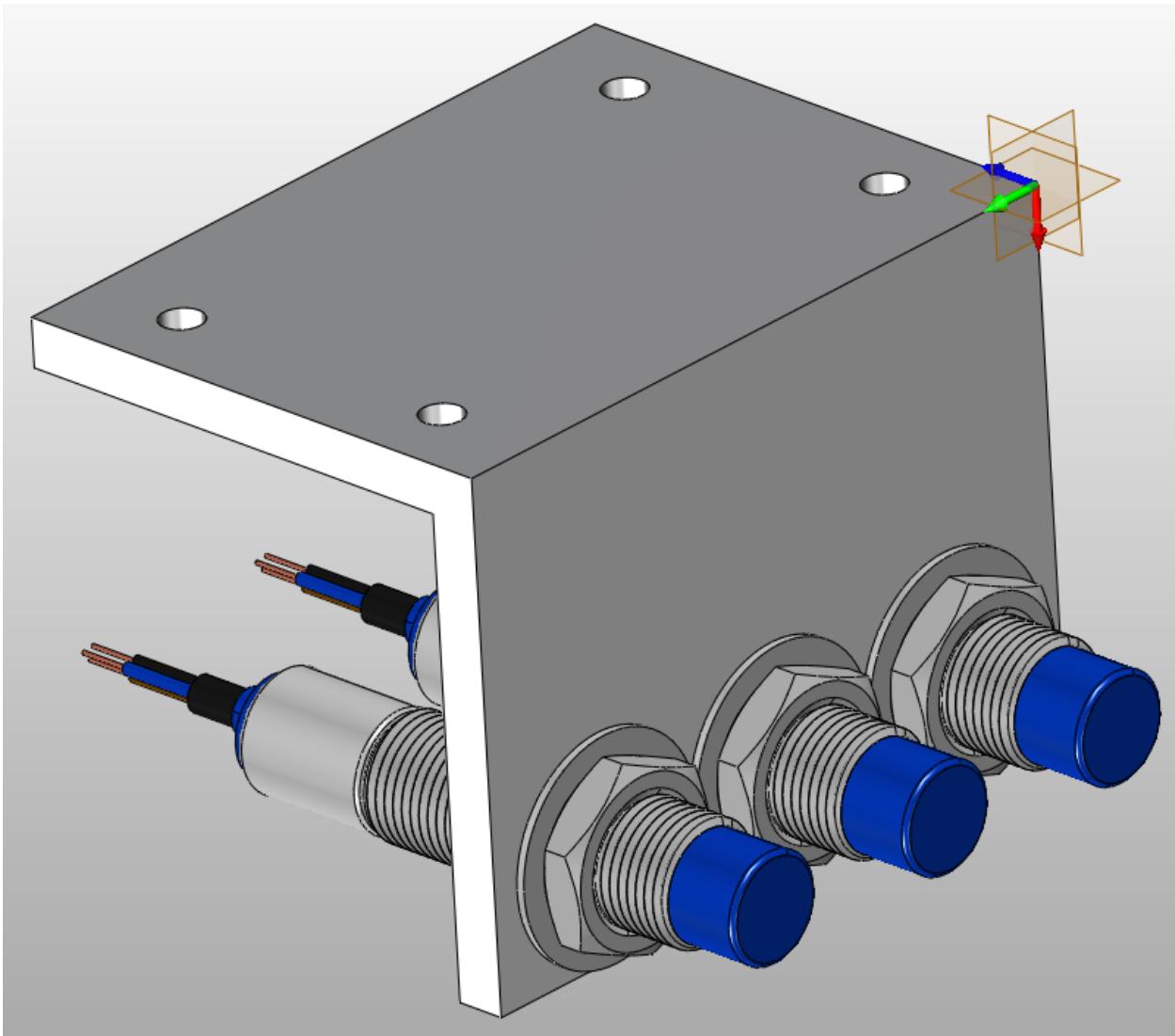


Figura A-9: Base sensores inductivos. [Autor]

En la figura **A-10** se puede observar el ensamblaje completo de todos los elementos fijos del robot, el cual incluye el bastidor, la base fija, los sensores finales de carrera, la parada de emergencia y un indicador lumínico que indica que la máquina está energizada:

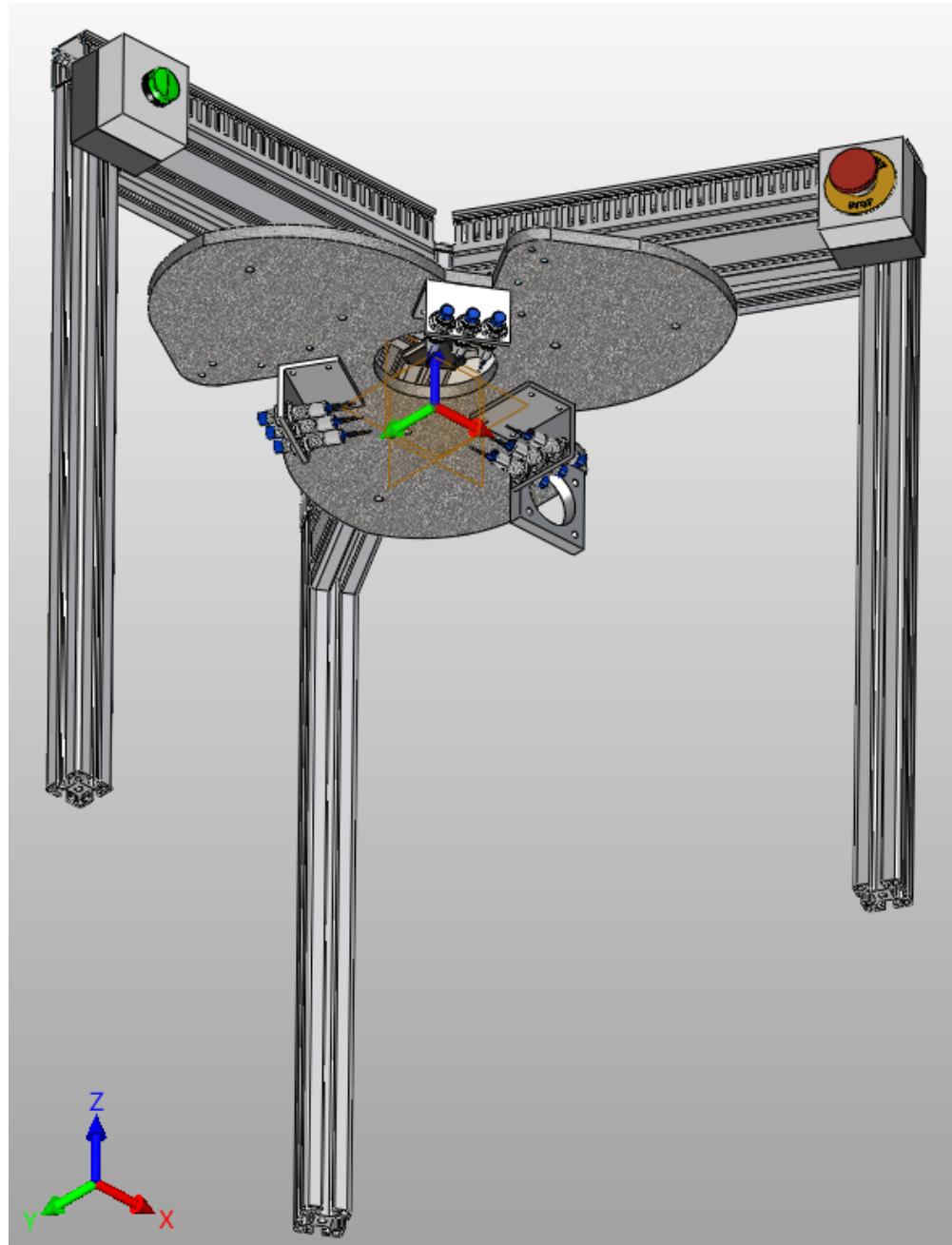


Figura A-10: Ensamble sistema fijo.[Autor]

En las figuras **A-11**, **A-12** y **A-13** se puede observar el ensamble general del robot incluyendo el gabinete eléctrico, el pedestal, canaletas ranuradas que sirven como guía para los cables eléctricos, la base fija, las tres cadenas cinemáticas completamente armadas, la base móvil, entre otros:

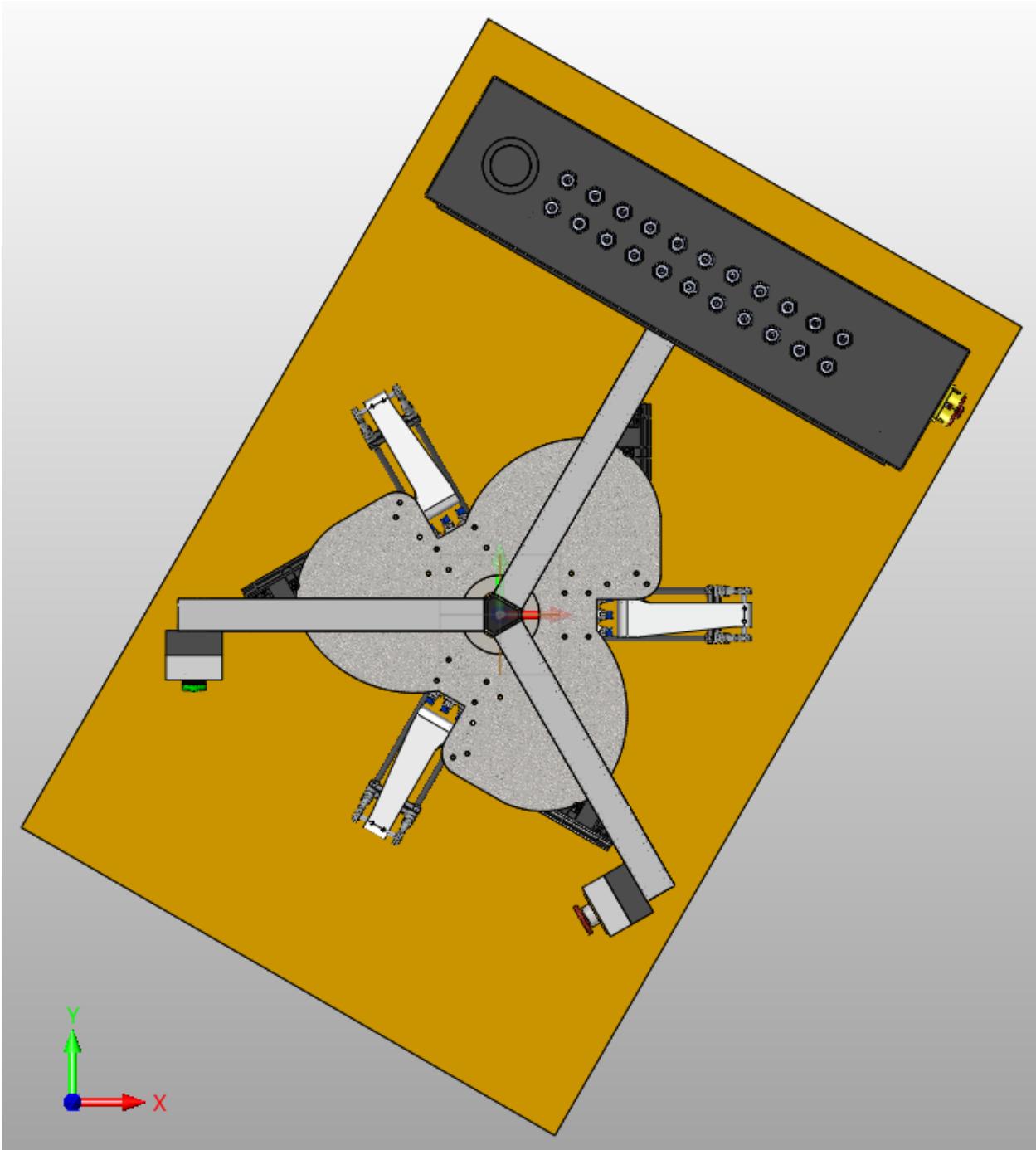


Figura A-11: Ensamble general robot delta. [Autor]

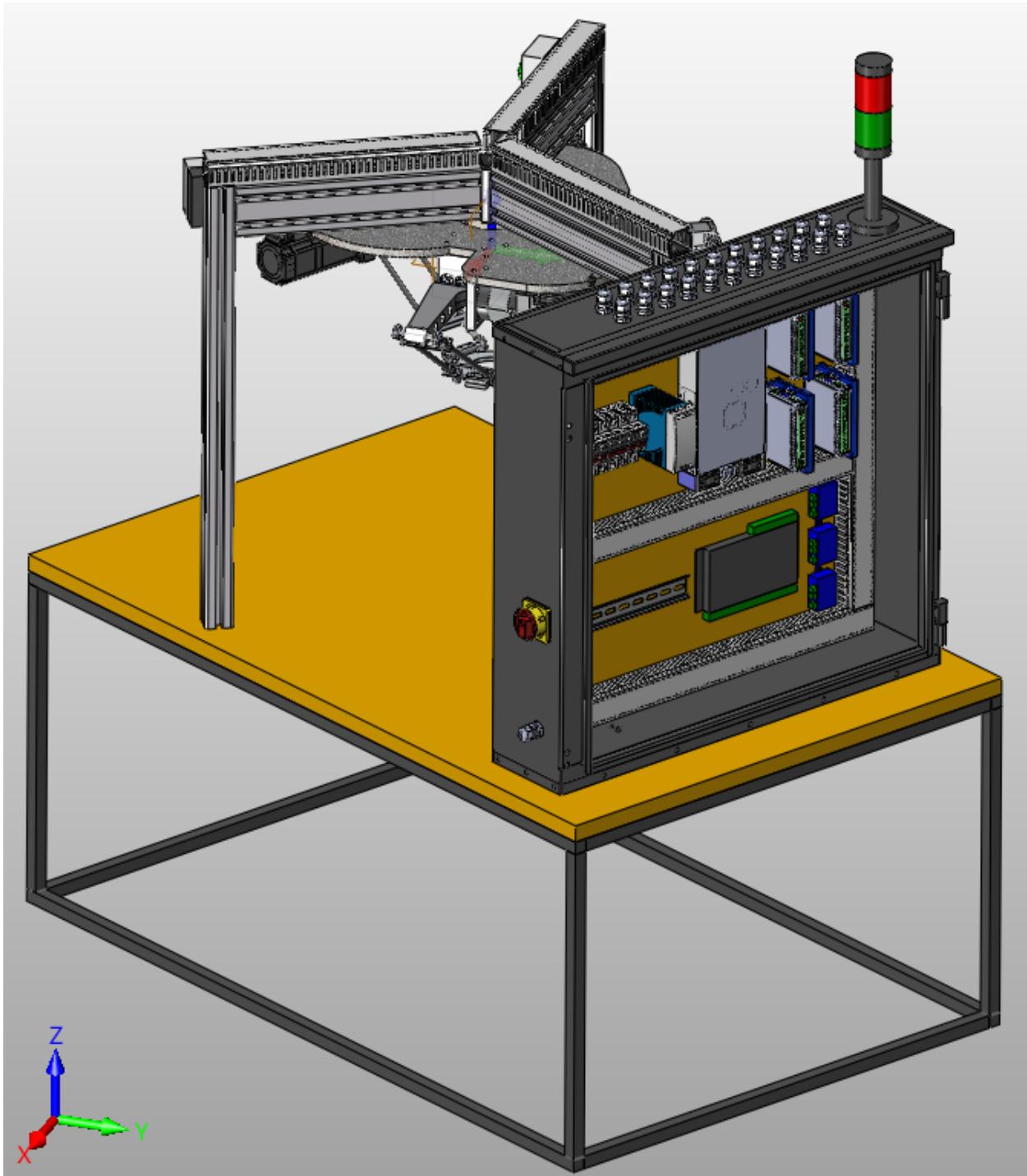


Figura A-12: Ensamble general robot delta. [Autor]

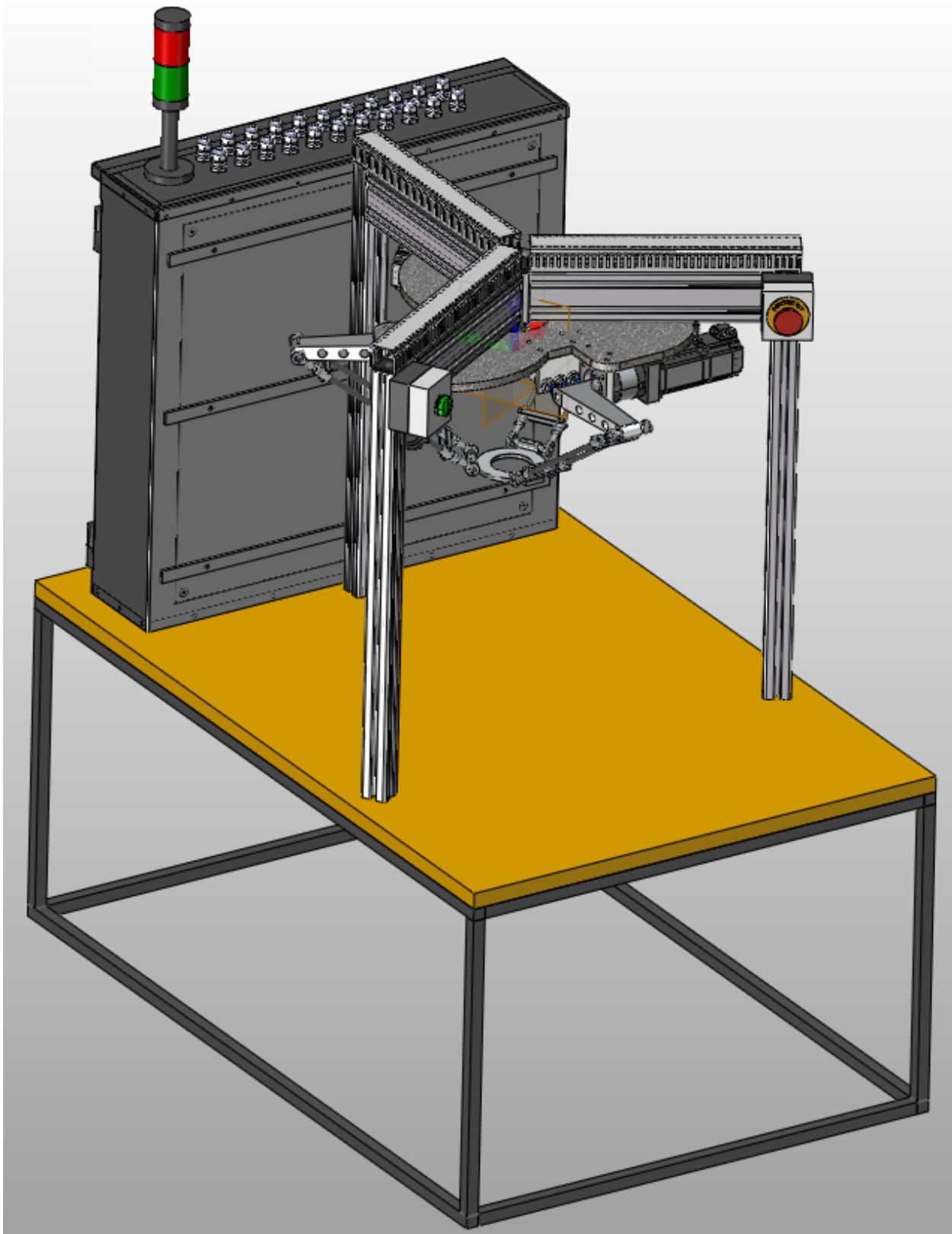


Figura A-13: Ensamble general robot delta. [Autor]

En la figura **A-14** se puede observar la distribución final de los ejes del robot, en donde se puede apreciar que el eje *x* es paralelo al eje número 1 del robot:

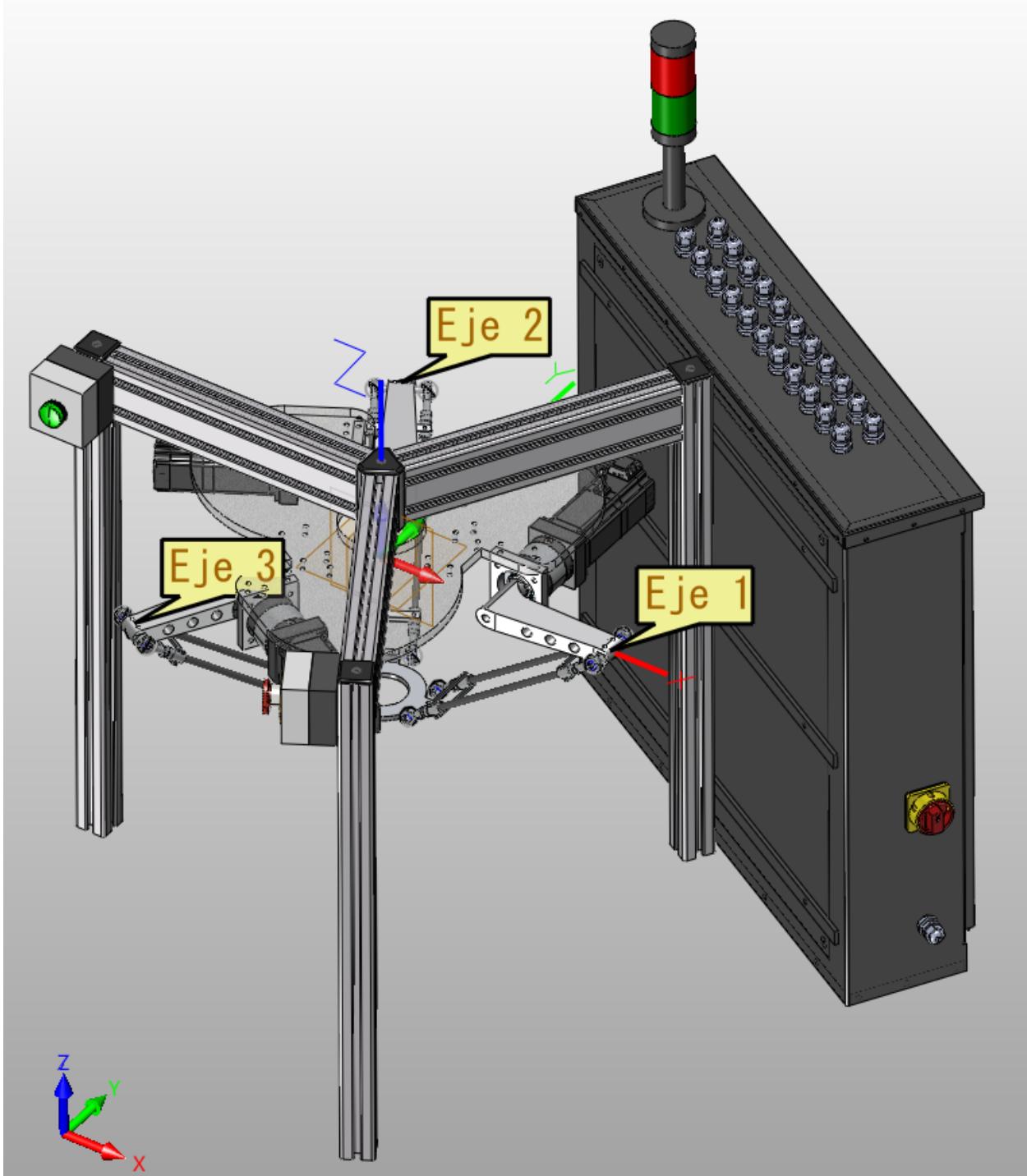


Figura A-14: Distribución final de los ejes. [Autor]

B

Anexo: Implementación sistema mecánico

B.0.1. Piezas mecánicas

- Bastidor: Elaborado con perfilería de aluminio extruido. Ver figura B-1:



Figura B-1: Perfil de aluminio extruido. [Autor]

- Base fija: Elaborada en hierro y cortada con corte por plasma. Ver figura B-2:

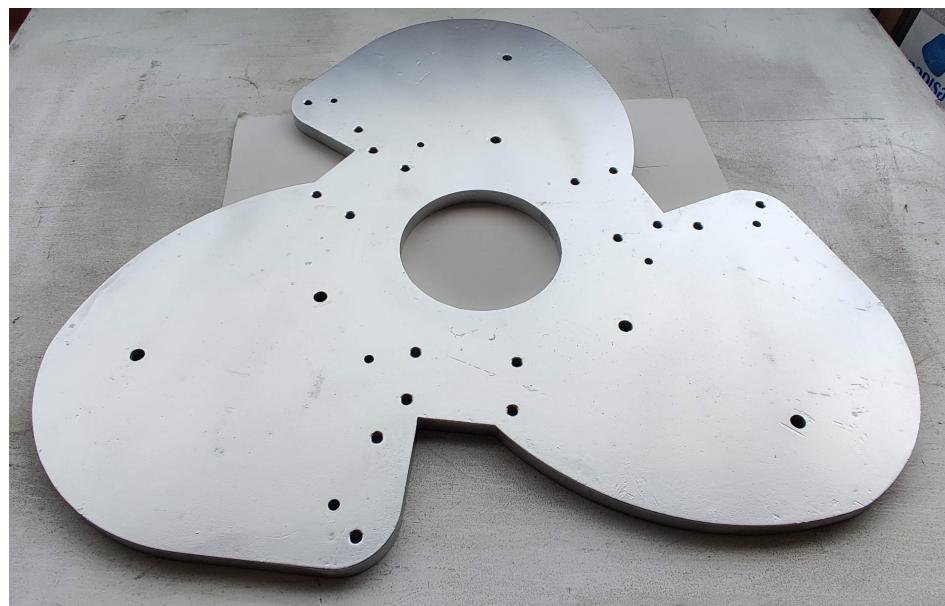


Figura B-2: Base fija. [Autor]

- Bases motorreductores: Elaborados en aluminio y mecanizados en centro de mecanizado CNC. Ver figura **B-3**:

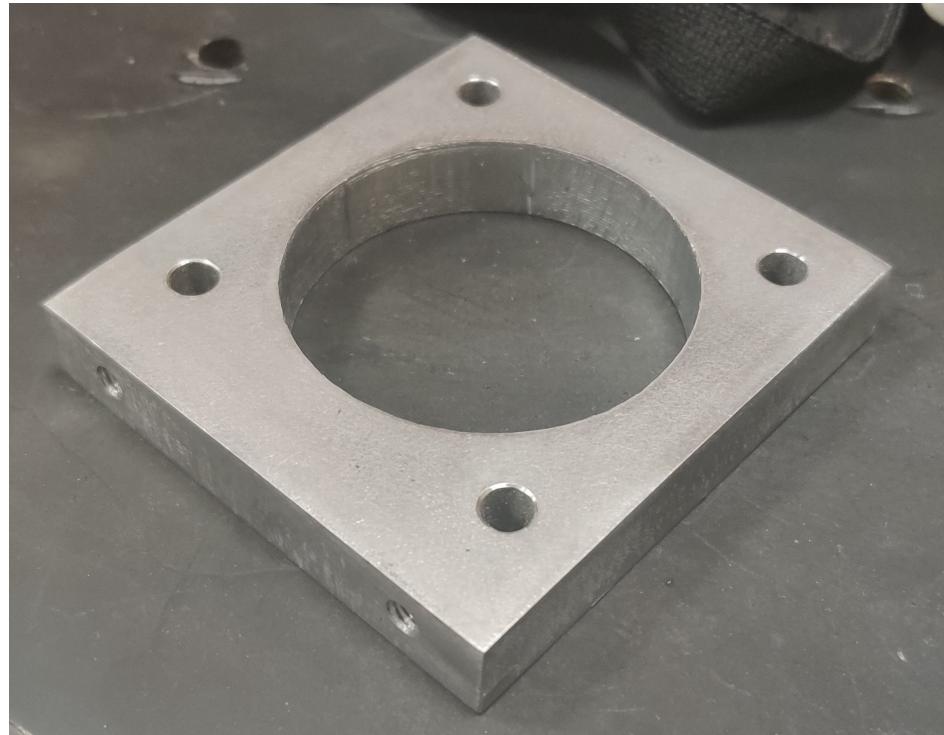


Figura B-3: Bases motorreductores. [Autor]

- Motorreductores: Motores paso a paso NEMA 24 con retroalimentación por medio de encoders incrementales con frenos de disco electromagnéticos y reductores planetarios. Ver figuras **B-4, B-5** y **B-6**:

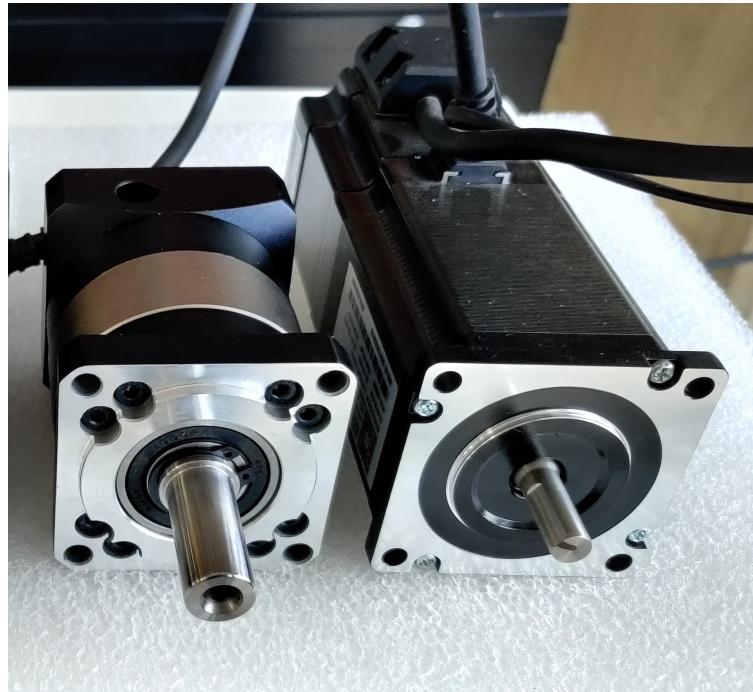


Figura B-4: Motorreductor. [Autor]

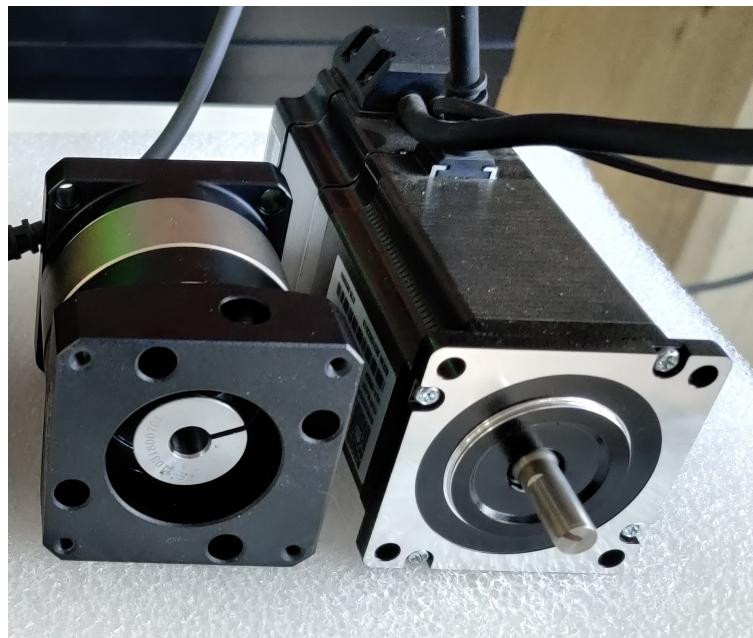


Figura B-5: Motorreductor. [Autor]

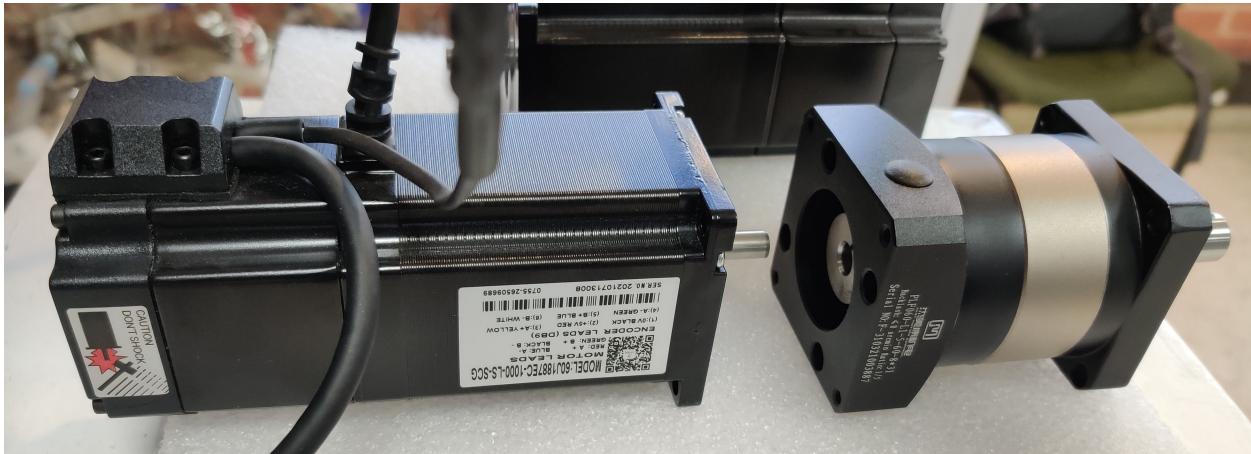


Figura B-6: Motorreductor. [Autor]

- Bases sensores inductivos: Elaborados en aluminio y mecanizados en centro de mecanizado CNC. Ver figura **B-7**:



Figura B-7: Bases sensores inductivos. [Autor]

- Eslabones activos: Elaborados en EMPACK (Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular) y mecanizados en centro de mecanizado CNC. Ver figuras **B-8**, **B-9** y **B-10**:

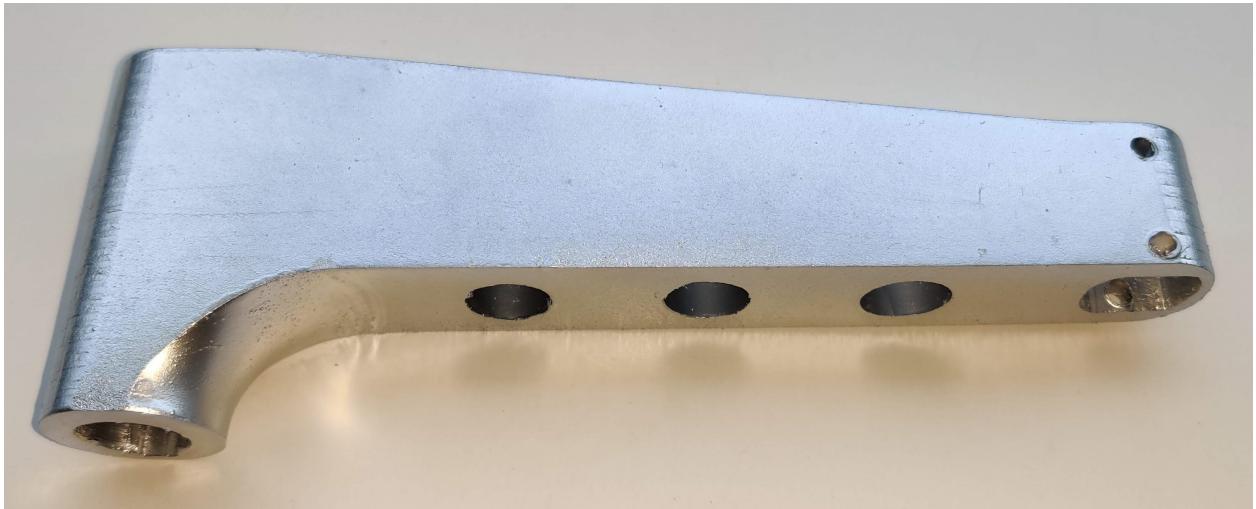


Figura B-8: Eslabones activos. [Autor]

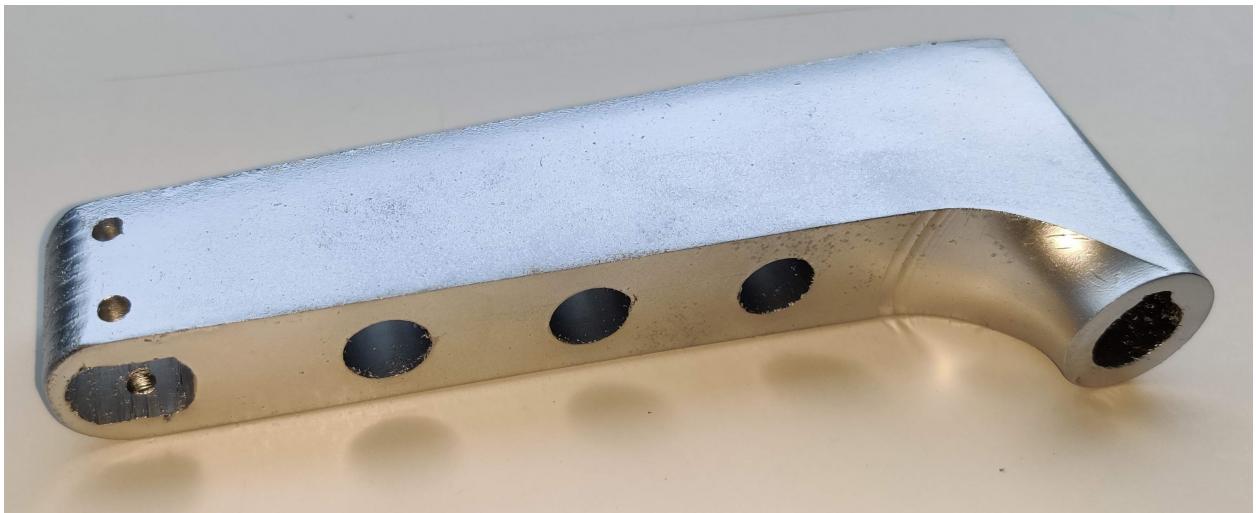


Figura B-9: Eslabones activos. [Autor]



Figura B-10: Medición de la masa de eslabón activo. [Autor]

- Eslabones pasivos. Construidos con tubos aluminio. Para la unión con los eslabones activos y la base móvil se adicionan juntas esféricas. Ver figura **B-11**:

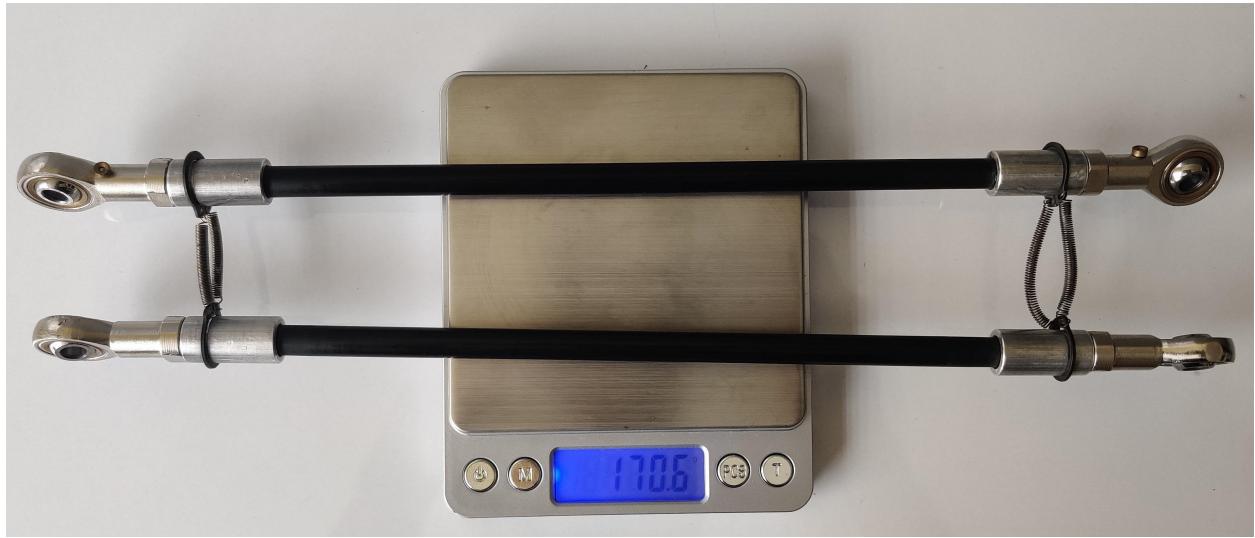


Figura B-11: Medición de la masa de eslabón pasivo. [Autor]

-
- Base móvil. Fabricada en aluminio y mecanizada en centro de mecanizado CNC. Ver figura **B-12**:



Figura B-12: Medición de la masa de la base móvil. [Autor]

B.0.2. Ensamble

En la figura **B-13** se puede observar la base fija anclada a los tres soportes de los motorreductores:

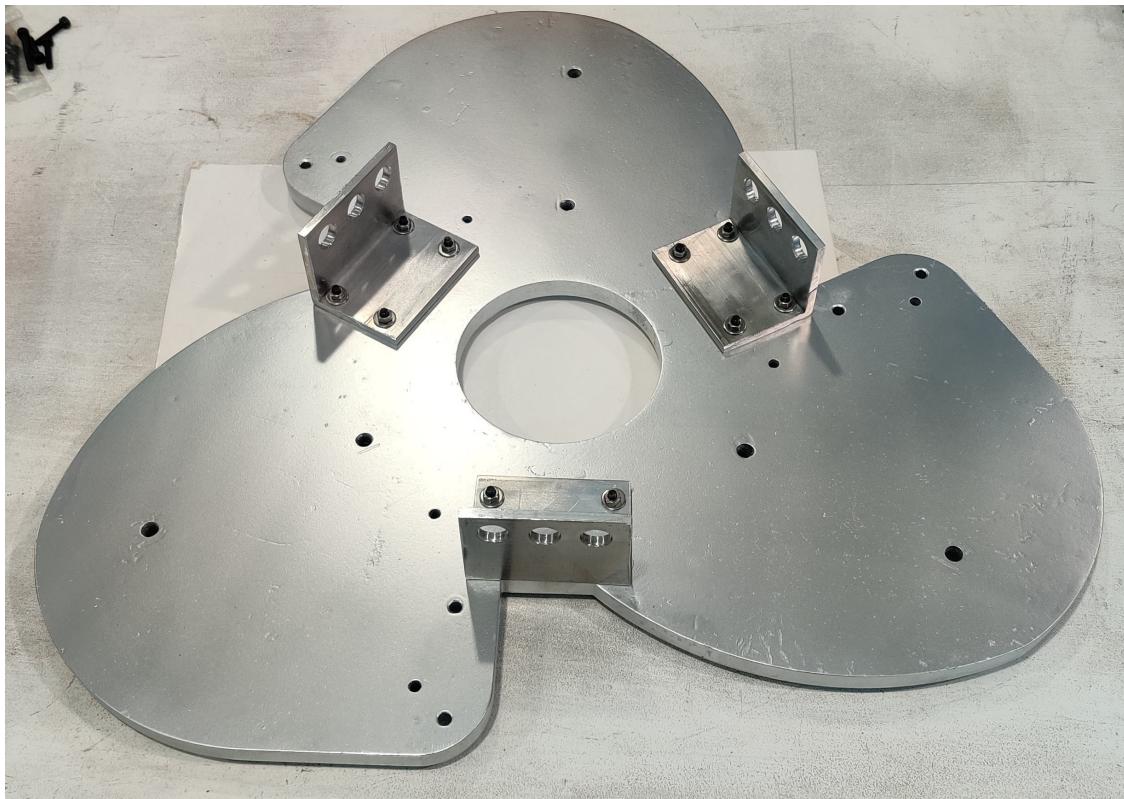


Figura B-13: Ensamble de la base fija con bases de los sensores inductivos. [Autor]

En la figura **B-14** se puede observar los eslabones activos acoplados a todos los elementos de la base fija:



Figura B-14: Ensamble de los eslabones activos. [Autor]

En la figura **B-15** se puede observar una vista superior del ensamble general del robot:

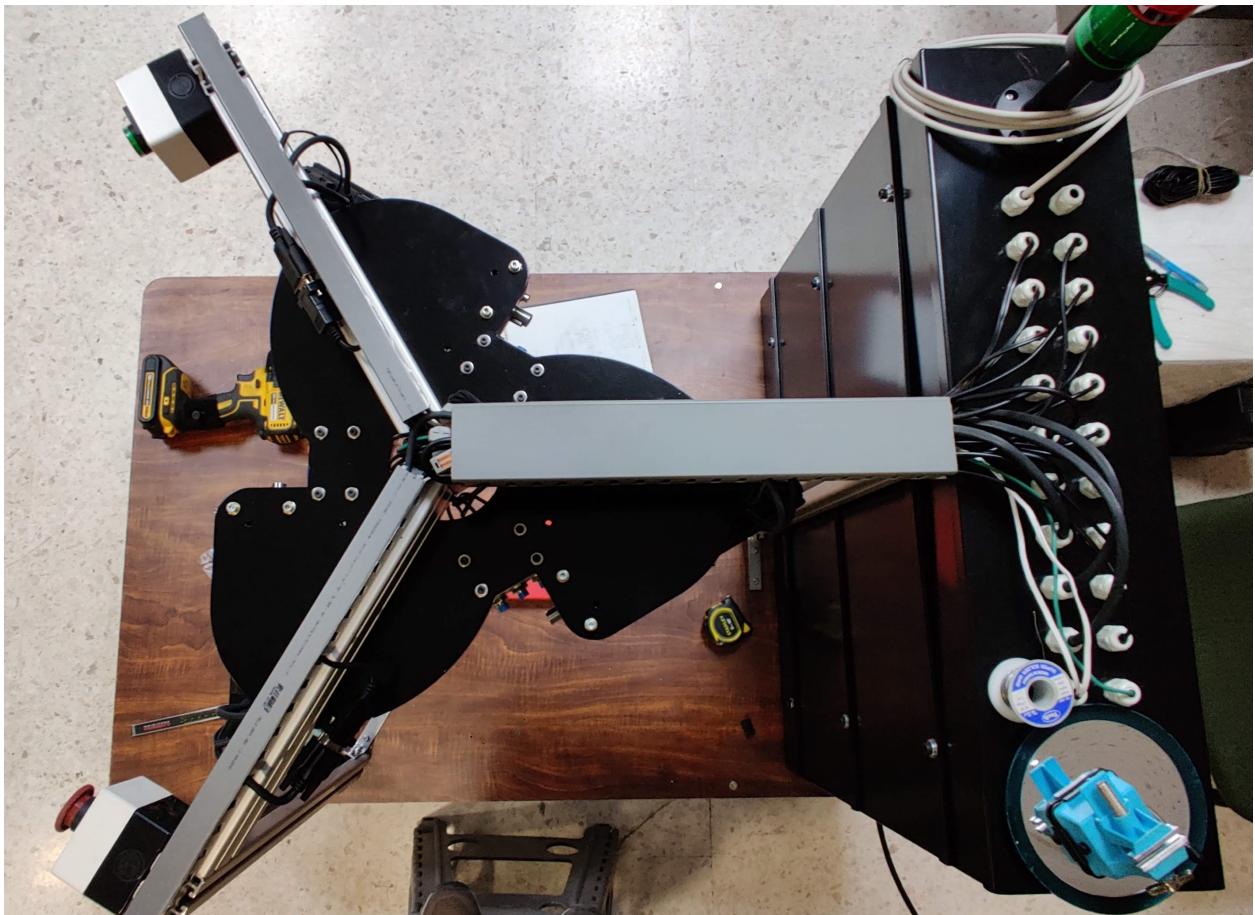


Figura B-15: Ensamble general - vista superior. [Autor]

En la figura **B-16** se puede observar una vista inferior del ensamble general del robot:



Figura B-16: Ensamble general - vista inferior. [Autor]

B.0.3. Alineación y nivelación

En las figuras **B-17** y **B-18** se puede observar el proceso de alineación de la mesa de trabajo y del sistema fijo haciendo uso de un nivel digital y un alineador láser:



Figura B-17: Nivelación de la mesa de trabajo. [Autor]

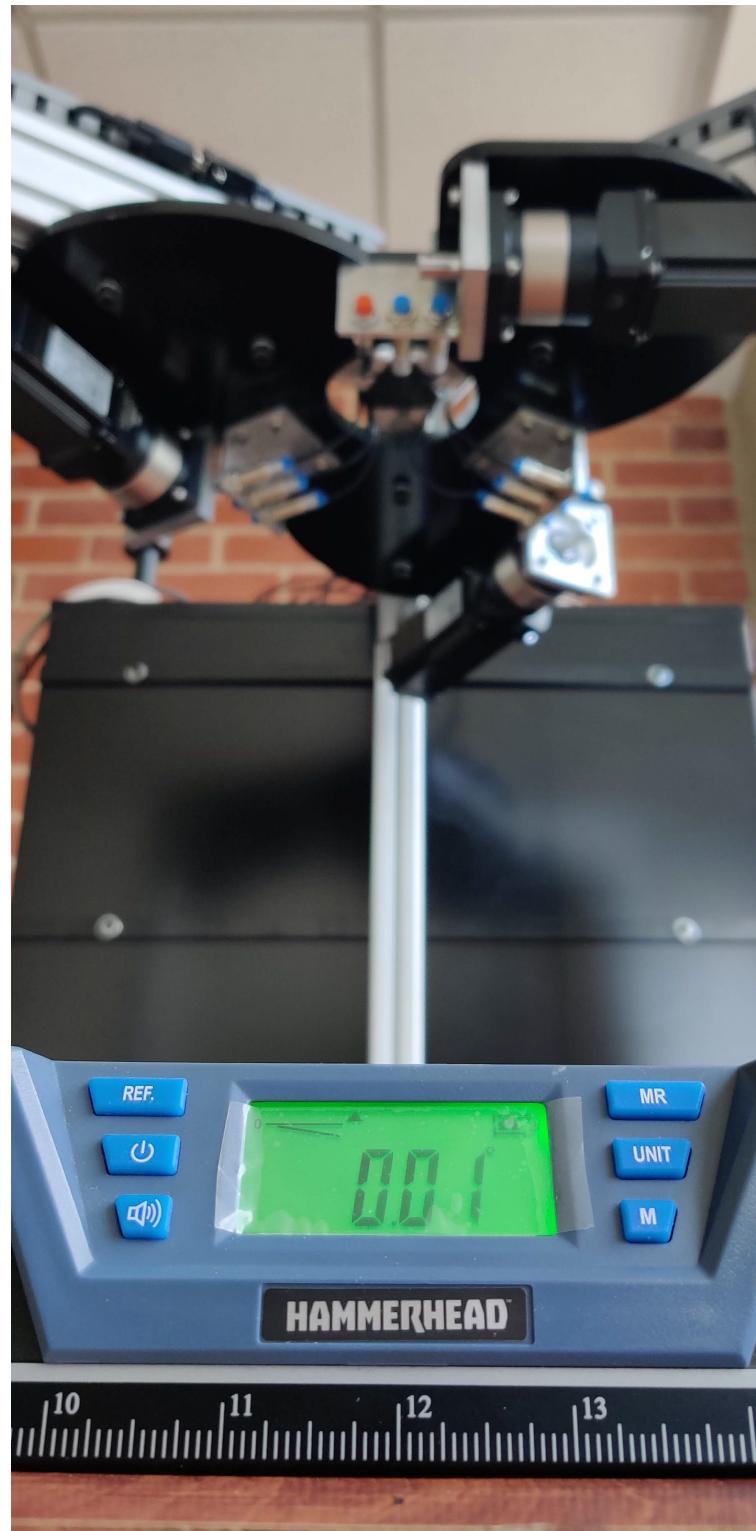


Figura B-18: Destalle de la nivelación de la mesa de trabajo. [Autor]

En la figura **B-19** se puede observar el proceso de alineación del bastidor, de la base fija y de los hombros:

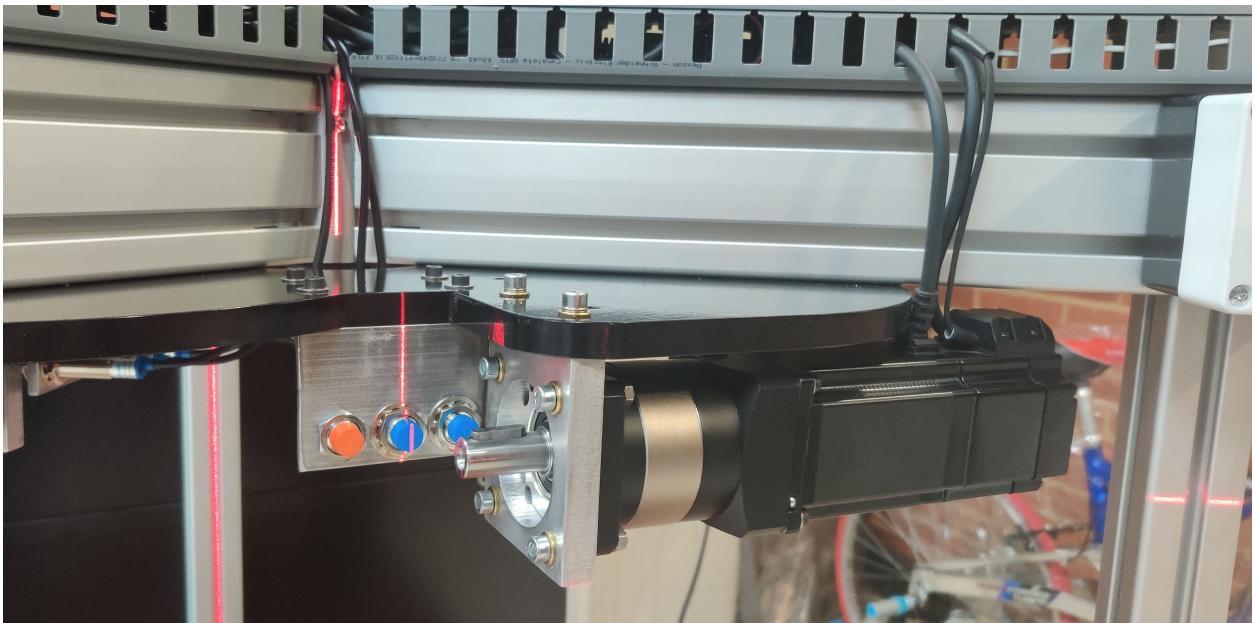


Figura B-19: Alineación de la base fija, bastidor y posición de los hombros. [Autor]

C

Anexo: Aplicación de sistemas ciberfísicos - Resultados

En C-1 se puede observar el gemelo digital en su posición de reposo comandada desde le controlador de movimiento:

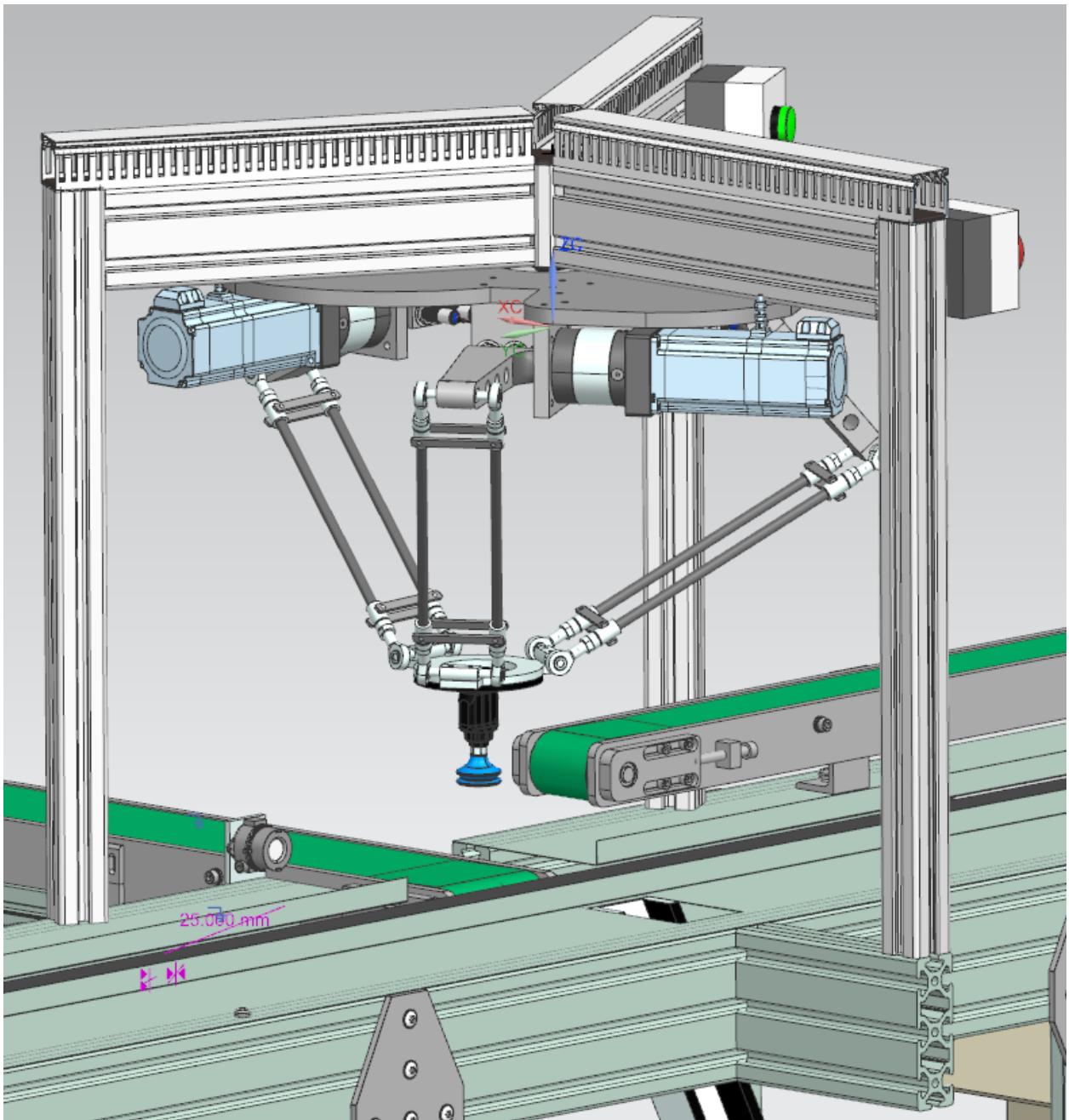


Figura C-1: Posición de reposo del sistema de *pick and place*. [Autor]

En las figuras **C-2**, **C-3** y **C-4** se puede apreciar la detección y manipulación de un carro de juguete, llevándolo desde la banda transportadora de ingreso de material (banda número 1) hasta la banda transportadora número 2:

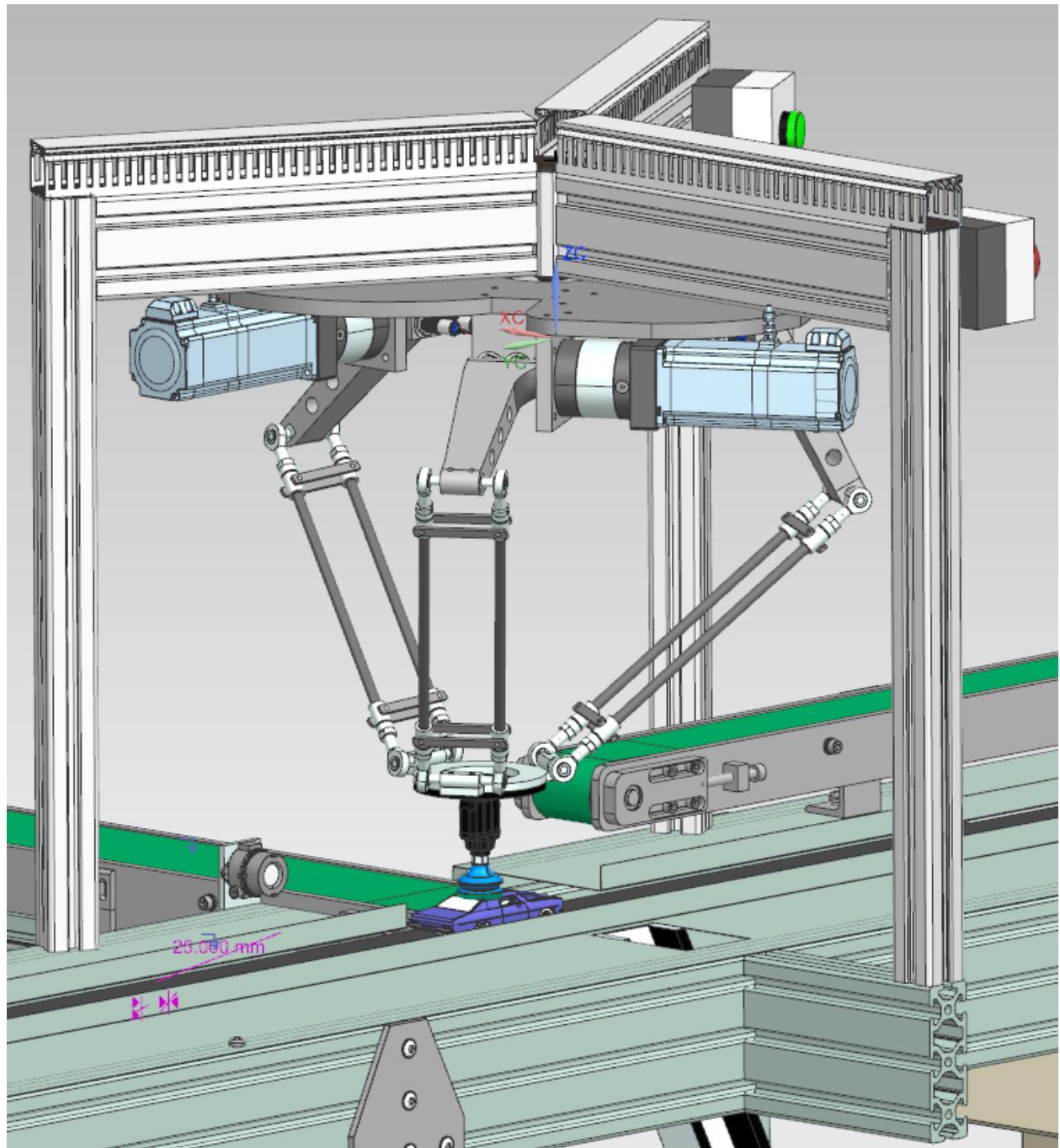


Figura C-2: Sujeción carro de juguete. [Autor]

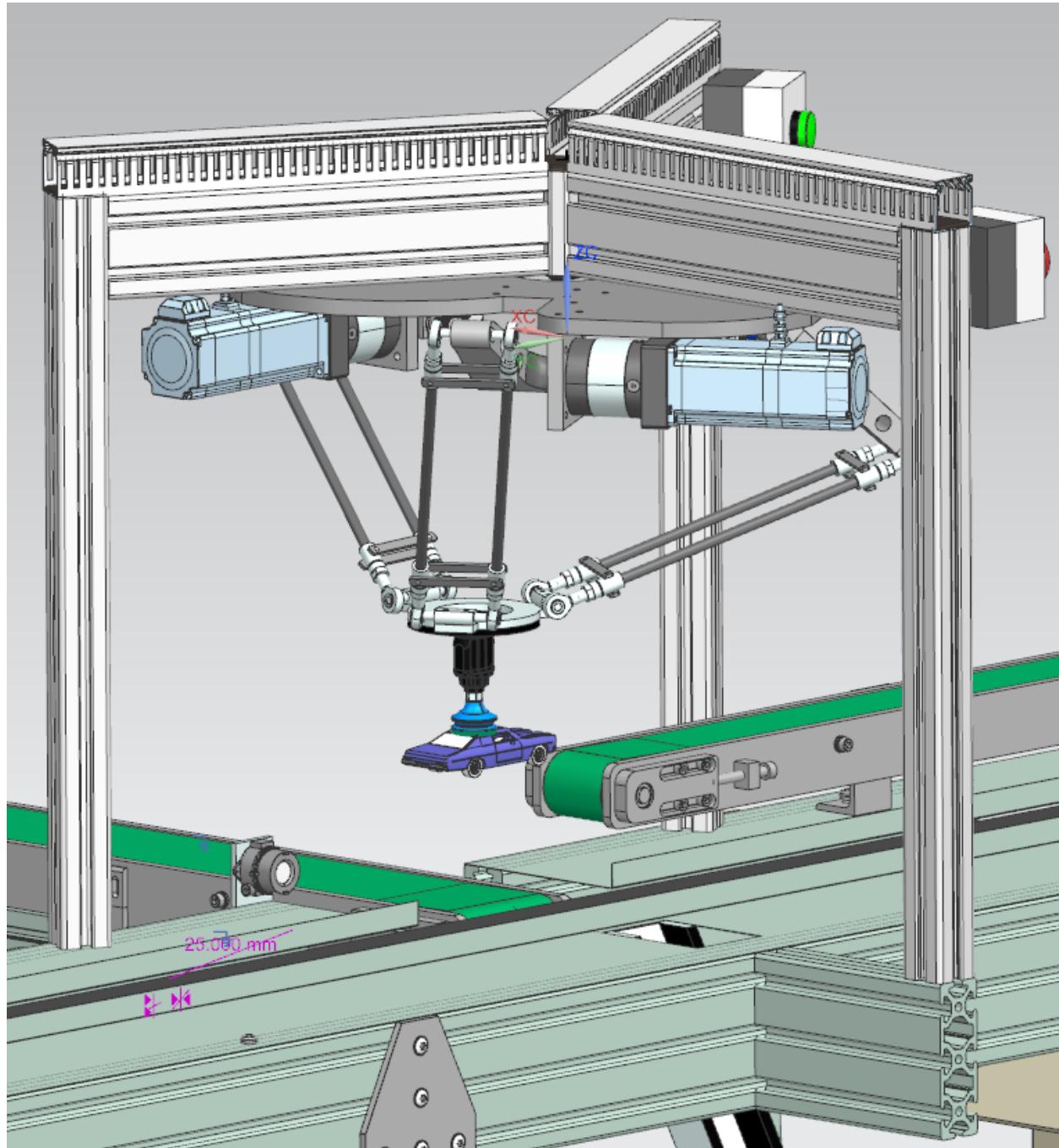


Figura C-3: Traslado carro de juguete. [Autor]

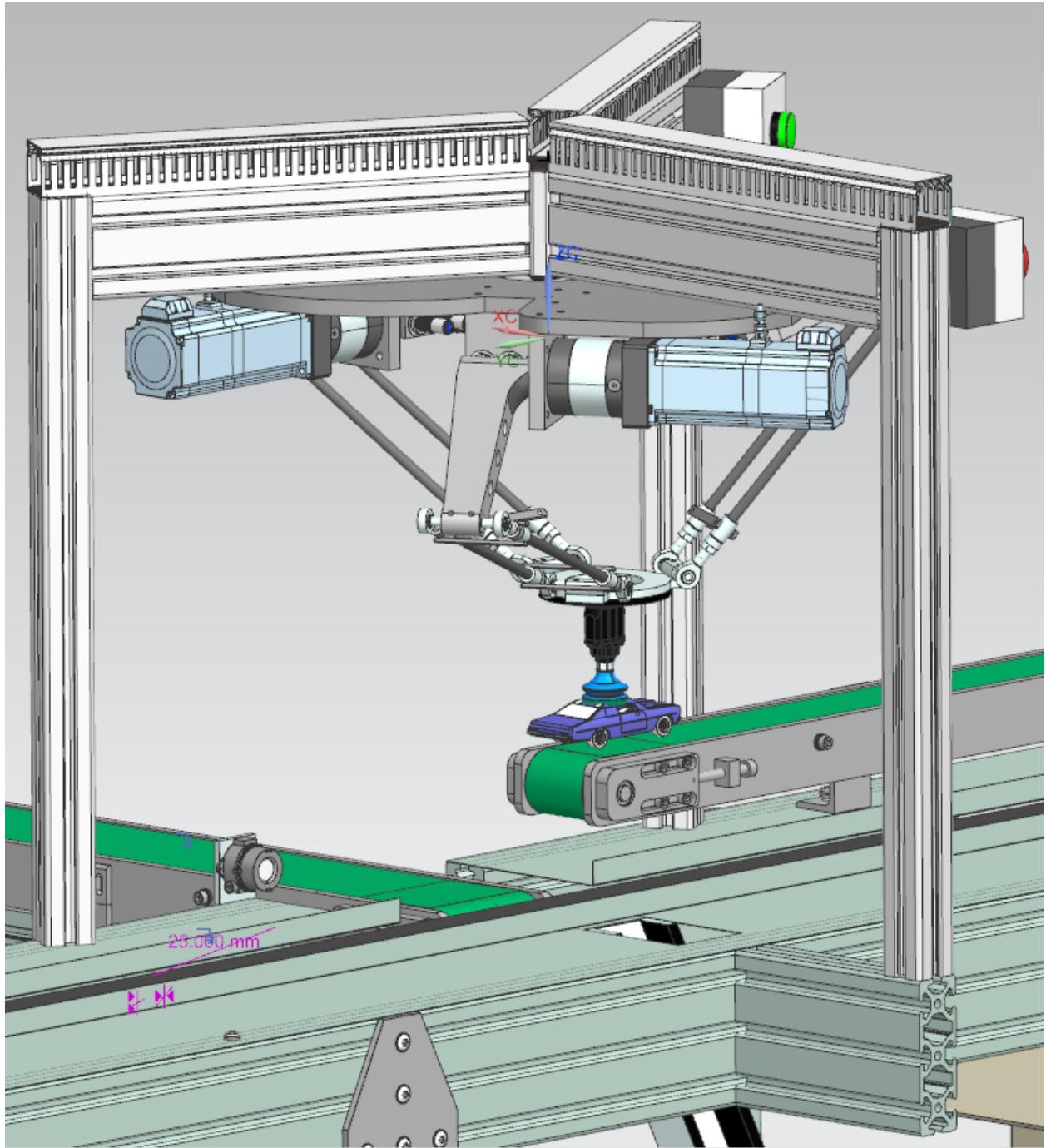


Figura C-4: Posición de liberación carro de juguete. [Autor]

De manera similar, en la figura C-5 se puede apreciar la detección y manipulación de un vaso plástico, llevándolo desde la banda transportadora de ingreso de material (banda número 1) hasta la banda transportadora número 3:

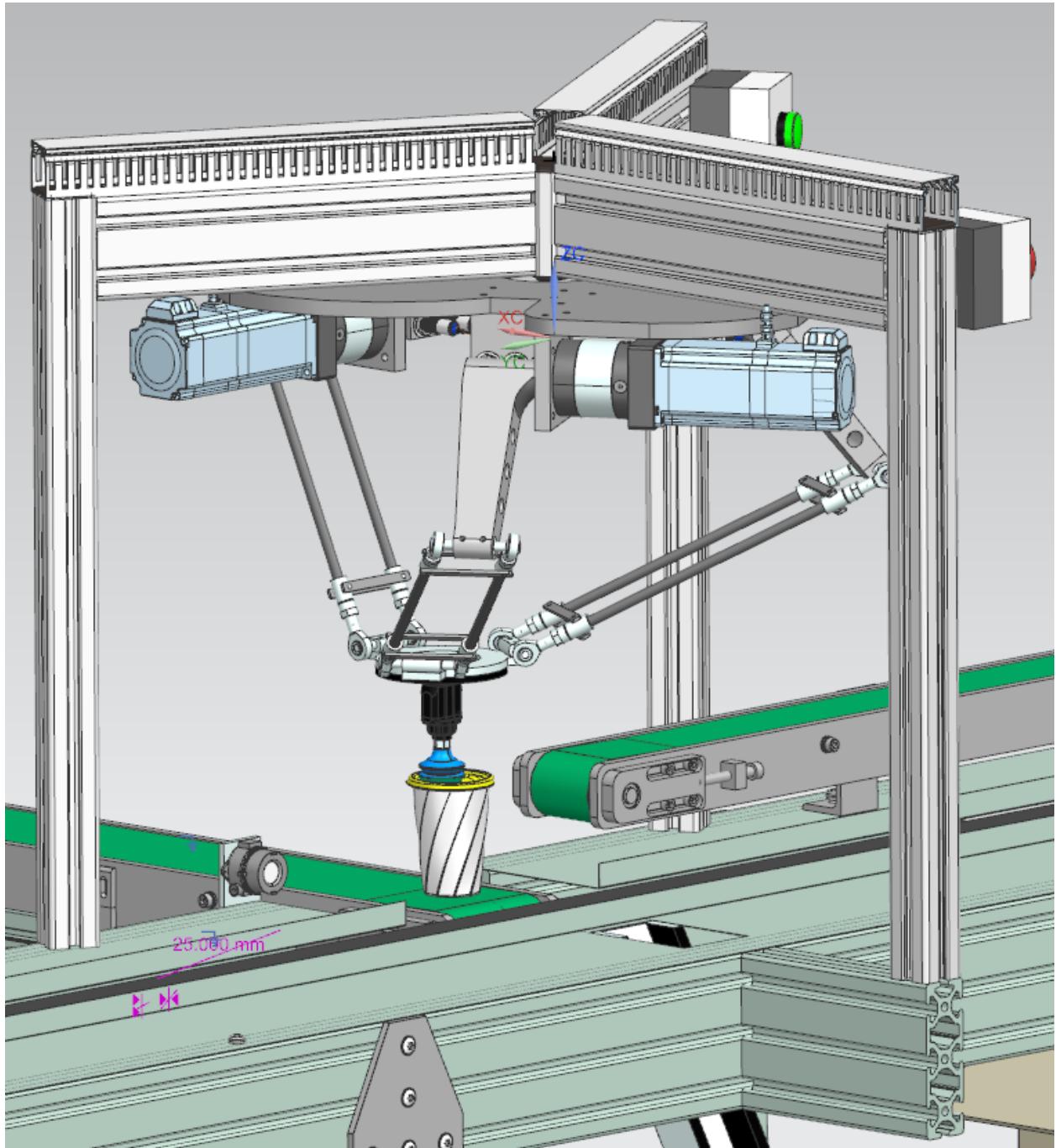


Figura C-5: Sujeción vaso plástico. [Autor]

A su vez, en las figuras **C-6** y **C-7** se puede apreciar la detección y manipulación de un dado, llevándolo desde la banda transportadora de ingreso de material (banda número 1) hasta el deslizador:

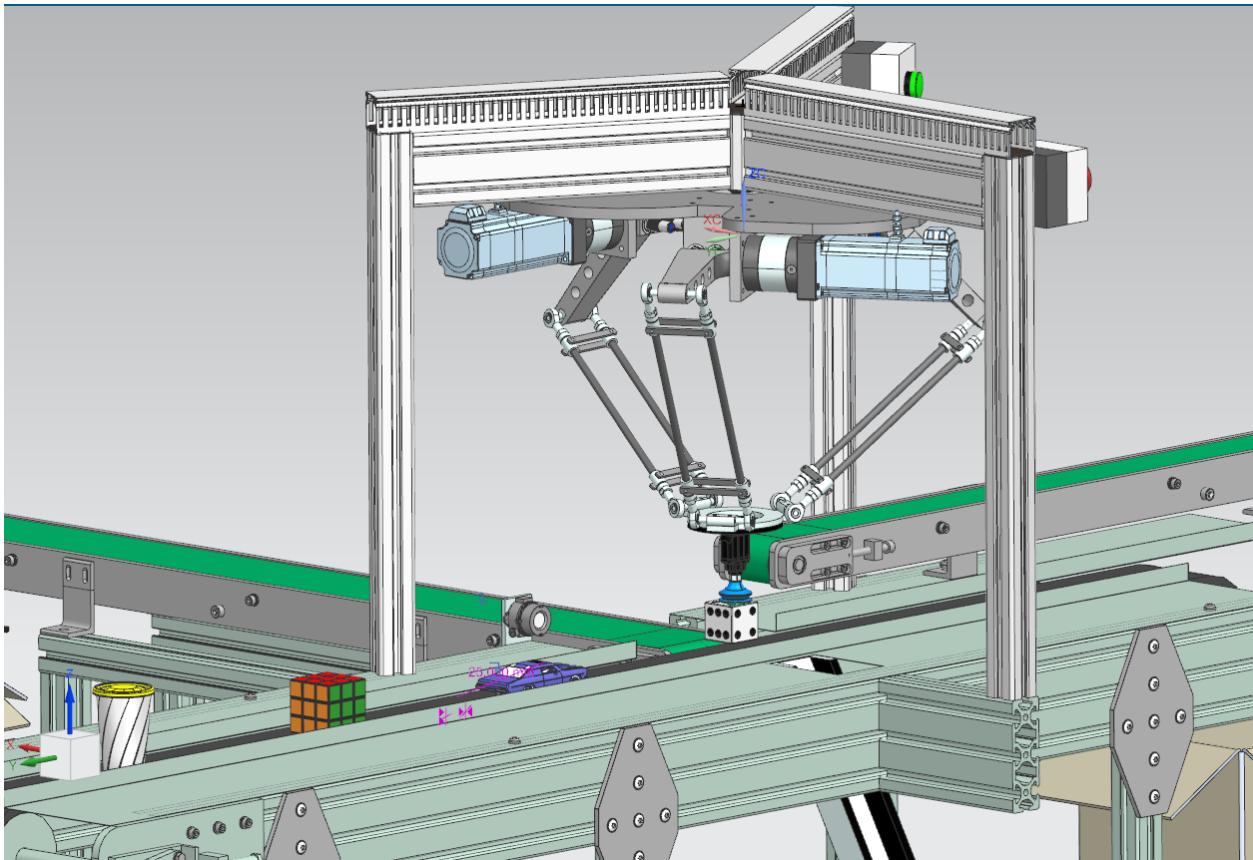


Figura C-6: Sujeción dado. [Autor]

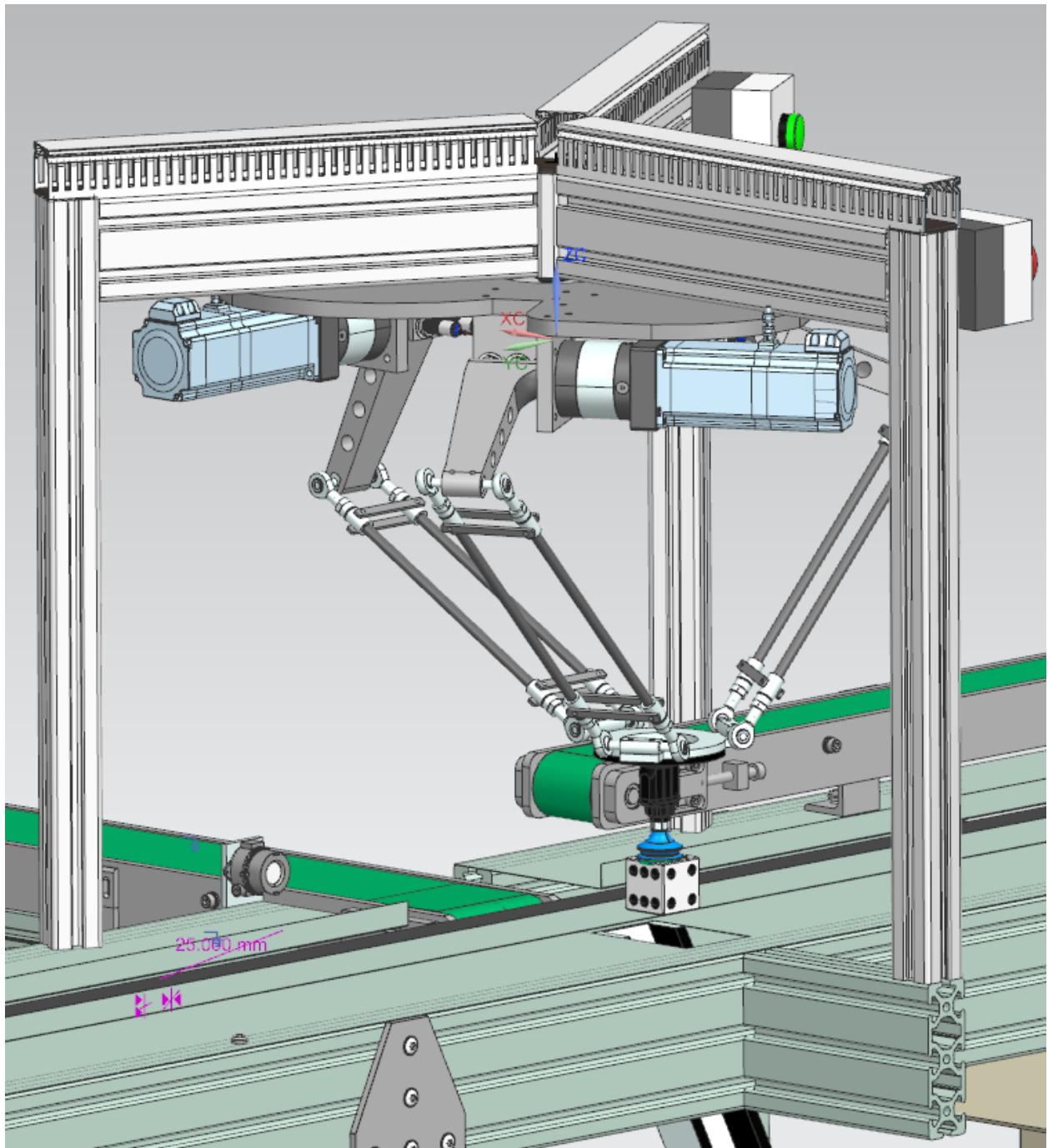


Figura C-7: Posición de liberación de dado. [Autor]

En la figura C-8 se puede observar la línea de producción en funcionamiento continuo, en donde diversas referencias viajan por la banda transportadora de ingreso de material (banda número 1), llegando hasta la zona de detección de productos, en donde el elemento principal es una cámara de visión artificial que detecta las diferentes geometrías de los productos para posteriormente manipularlos y organizarlos en diferentes cajas:

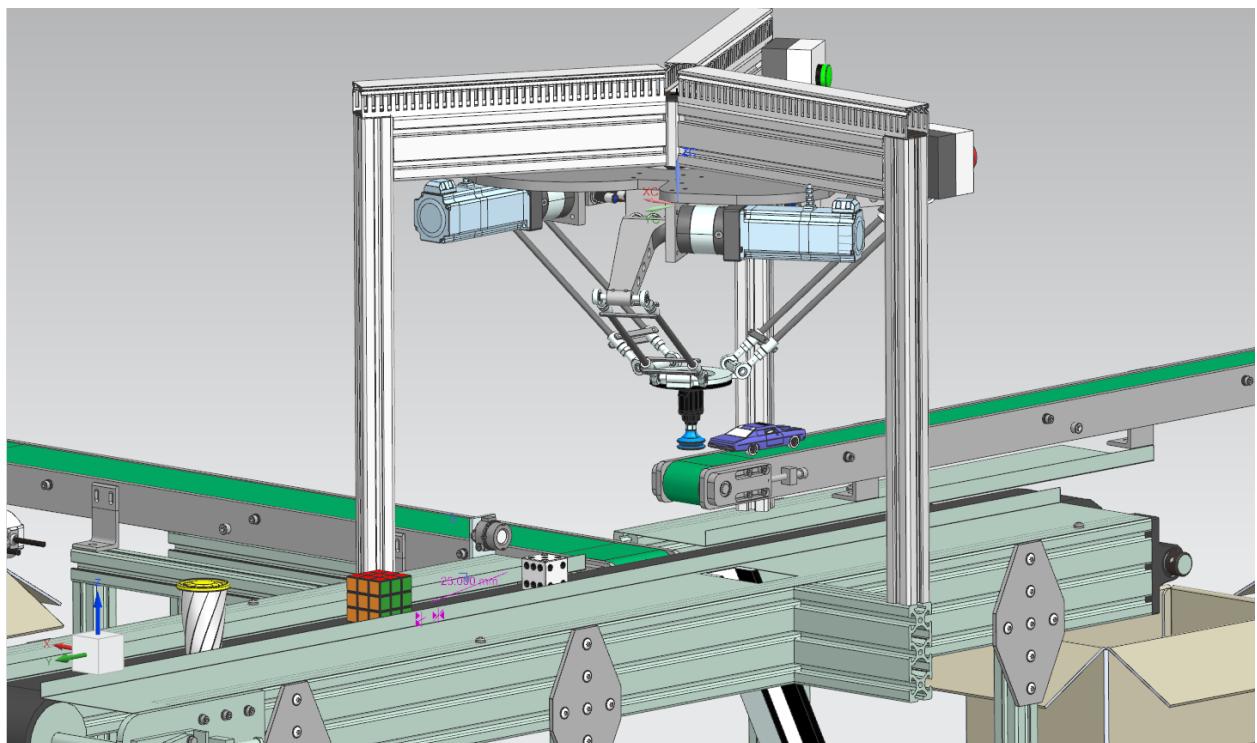


Figura C-8: Línea de producción en funcionamiento. [Autor]

En la figura **C-9**, se puede observar varios productos ya organizados por el sistema de selección de productos robotizado:

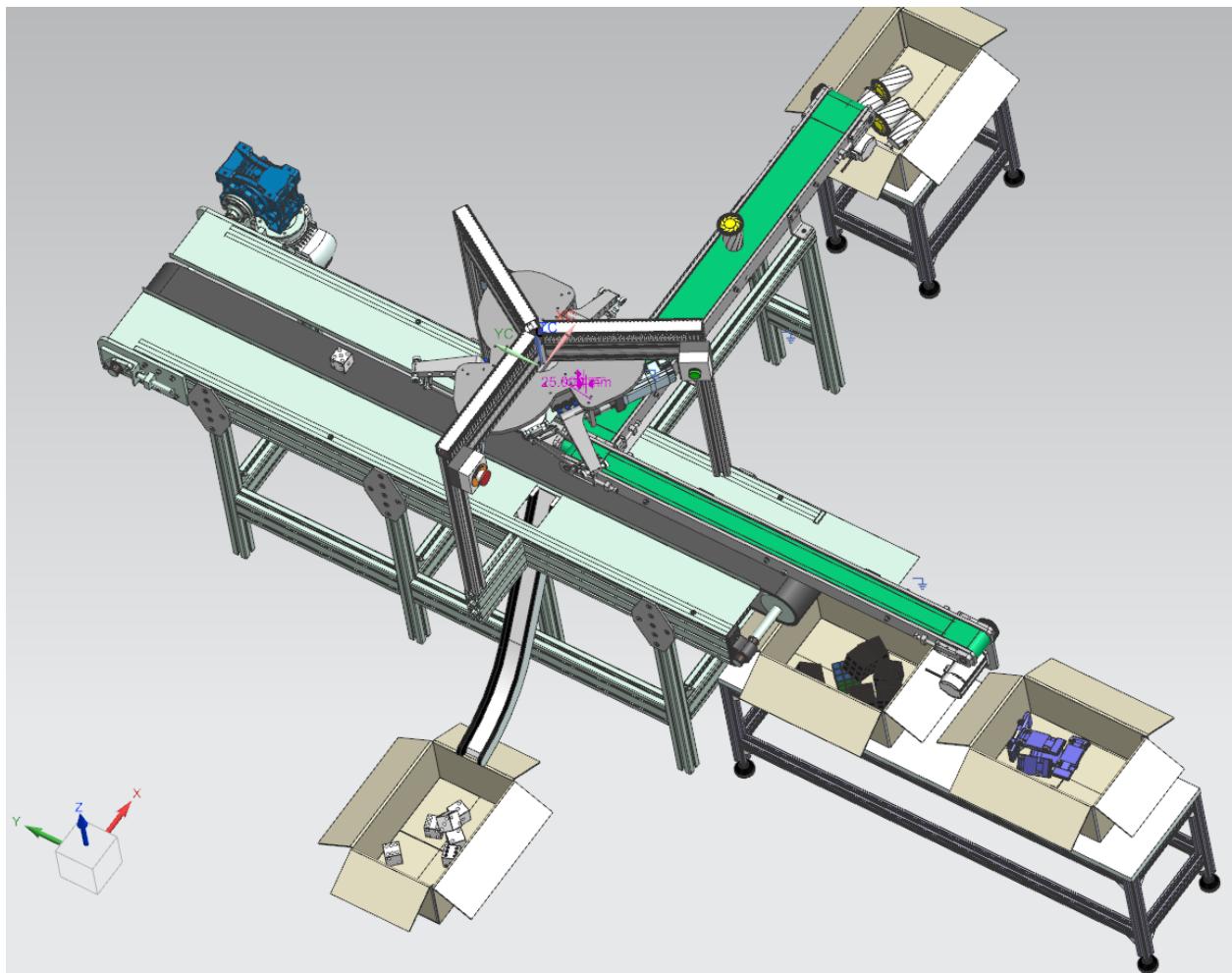


Figura C-9: Productos organizados. [Autor]