

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/329874723>

Robot paralelo tipo Diseño de un sistema de movimiento de ejes complejos: Robot paralelo tipo Delta

Thesis · December 2013

DOI: 10.13140/RG.2.2.25952.74246

CITATIONS
0

READS
693

3 authors, including:



Felipe Gonzalez
National University of Colombia

4 PUBLICATIONS 0 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Pedro-F Cardenas
National University of Colombia

46 PUBLICATIONS 315 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Diseño de un Controlador Electrónico para la Reducción de Componentes Armónicos en Redes de Alimentación Trifásica [View project](#)



MÁQUINA CLASIFICADORA DE FLORES: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN [View project](#)



Robot paralelo tipo Delta

**Felipe Gonzalez Roldan
Julian Alexander Vargas Jimenez**

Universidad Nacional de Colombia
Facultad De Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica
Bogotá, Colombia
2013 - II

Diseño de un sistema de movimiento de ejes complejos: Robot paralelo tipo Delta

**Felipe Gonzalez Roldan
Julian Alexander Vargas Jimenez**

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Mecatrónico

Director:
Dr. Ing. Pedro Fabian Cardenas Herrera

Línea de Investigación:
Diseño de robots e implementación de sistemas de control para mecanismos de ejes complejos.
Grupo de Investigación:
UNRobot

Universidad Nacional de Colombia
Facultad De Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica
Bogotá, Colombia
2013 - II

Agradecimientos

En primer lugar deseo agradecer al director de la Tesis Ing. Pedro Fabian Cardenas, quien contribuyó en gran medida con la puesta en marcha y motivación para este emprendimiento; en segundo lugar agradezco a mi madre Angela Maria Gonzalez, quien no sólo durante este proyecto, sino que siempre ha hecho todo lo que está a su alcance para colaborar conmigo. Adicionalmente a mi compañero de proyecto Julian Alexander Vargas, sin el cual este trabajo no habría podido ser llevado a este término.

Finalmente expreso mi gratitud hacia la Universidad Nacional de Colombia, institución en la cual he adquirido la mayoría de conocimientos que me enorgullezco en llevar, pero aún más agradezco la conciencia que me ha permitido desarrollar, tanto humana como académica.

Felipe Gonzalez Roldan

Quiero en primer lugar agradecer a Dios por haberme permitido culminar este trabajo exitosamente y por darme las fuerzas para continuar cada día. En segundo lugar a mis padres por haberme apoyado durante todos estos años de carrera; sin ellos simplemente no hubiese sido posible. En tercer lugar quiero agradecer al Ingeniero Pedro Cardenas por permitirnos realizar el trabajo con él y por su apoyo valioso durante quiero agradecer también a mi compañero de proyecto Felipe por su valioso aporte en el desarrollo del trabajo.

Por último agradezco a la Universidad Nacional de Colombia pues fue la institución que me abrió las puertas para poder lograr lo que hoy estoy culminando: ser un Ingeniero que puede aportar al desarrollo del país.

Julian Alexander Vargas Jimenez

Resumen

Este documento presenta el proceso de diseño general para un manipulador paralelo tipo delta, así como una selección de equipos de control para una potencial implementación del robot. Inicialmente se plantean conceptos básicos de robótica paralela y en particular en desarrollo histórico e industrial del robot delta. Posteriormente se presentan particularidades de la geometría y cinemática del robot delta y se definen los parámetros de diseño, seguido de la descomposición estructural del manipulador y el diseño de conceptos para cada componente. Luego se procede con la definición dimensional mediante la optimización del espacio de trabajo del robot para llegar al diseño de detalle para los componentes estructurales. En seguida, el modelo de simulación desarrollado en Unigraphics NX™ es presentado, donde se evalúan múltiples perfiles de movimiento, que proveen información para la selección de actuadores y verificación de cargas sobre el mecanismo. Ulteriormente los equipos del ámbito de eléctrico y de control son seleccionados para una potencial implementación. Finalmente, se tienen los resultados proporcionados por la simulación que conllevan a la validación del modelo de robot propuesto.

Palabras Clave: Robótica paralela, robot delta, diseño, cadena cinemática, control industrial, espacio de trabajo.

Abstract

This work presents the general design process for a parallel delta manipulator, a control equipment selection for a robot potential building is showed as well. At the beginning parallel robotics basic concepts are proposed with an emphasis on the delta robots historical and industrial development. After that the geometric and kinematic definitions of delta robot are explained and the design parameters are defined; delta's structural division and concept design for each component are presented too. Then the workspace optimization is executed and consequently the adequate dimensions for the manipulator, this process is ended with the detail design for all robot's structural components. The motion simulation model developed in Unigraphics NX is described, in which several motion profiles are tested and with the information acquired actuators selection and load verification under the model are made. Additionally electric and control equipment are chosen for a potential manipulator building. At the end the results provided by the simulation are analyzed in order to reach a final verification of the proposed robot model.

Keywords: Parallel robotics, delta robot, design, kinematic chain, industrial controller, workspace.

Contenido

Agradecimientos	v
Resumen	vii
1. Introducción	2
2. Generalidades	5
2.1. Robótica Paralela	5
2.2. Estado del Arte de manipuladores tipo delta	8
2.3. Manipuladores tipo delta en el mercado	12
2.4. Cinemática robot delta	18
2.4.1. Geometría del manipulador delta	18
2.4.2. Cinemática inversa	20
2.4.3. Cinemática directa	21
3. Concepción y diseño del robot Delta	22
3.1. Definición de requerimientos	22
3.2. Diseño conceptual	23
3.2.1. División estructural del Robot	23
3.2.2. Benchmarking	24
3.3. Diseño y selección de componentes	25
3.3.1. Componentes mecánicos	25
3.3.2. Dimensionamiento de componentes	35
3.4. Diseño de detalle	45
3.4.1. Tabla de piezas y accesorios	45
3.4.2. Sistema de ajuste	45
3.4.3. Conexión de brazos	46
4. Simulación de movimiento del robot Delta	49
4.1. Modelo en software	49
4.2. Perfiles de movimiento e interpoladores	52
4.3. Simulación de movimiento	56
4.4. Selección de actuadores	61
4.5. Simulación estática	65

5. Sistema de Control	68
5.1. Descripción del sistema de control	68
5.2. Selección de componentes	69
5.2.1. Sistema de servo-drives	69
5.2.2. Controlador de movimiento	86
5.2.3. Interfaz hombre máquina	90
5.2.4. Accesorios sistema de control	91
5.2.5. Configuración en red del sistema de control	97
5.2.6. Lógica preliminar del sistema de control	99
5.3. Diseño del gabinete de control	100
6. Conclusiones y recomendaciones	102
6.1. Conclusiones	102
6.2. Recomendaciones	102
A. Lista de piezas del diseño mecánico	103
Bibliografía	104

1. Introducción

En el campo de la robótica se distinguen dos arquitecturas principales en lo concerniente al diseño de mecanismos que componen los robots. La primera de ellas, y más común, es la arquitectura serial donde sólo existe un camino único entre cualesquiera dos puntos del mecanismo. La segunda corresponde a la arquitectura paralela, en donde se pueden presentar múltiples caminos (por diferentes cadenas cinemáticas) que unen dos puntos del mecanismo. El enfoque serial es el más difundido y es el que se ha aplicado en la gran mayoría de los manipuladores industriales; sin embargo, desde principios de los 80's la arquitectura paralela ha tenido grandes avances y se vislumbra como una alternativa sólida a los robots seriales.

A finales de 1980's el investigador de origen francés *Reymond Clavel* introdujo lo que en la actualidad se conoce como manipulador delta, un tipo de mecanismo paralelo con tres conjuntos de brazos que conectan dos plataformas, una de las cuales permanece fija, mientras que la otra es móvil [12]. La gran particularidad de esta clase de robots radica en que los grados de movilidad asociados (3GDL) son meramente translacionales. Este hecho se consigue conectando los brazos activos (brazos conectados a los actuadores) y la plataforma móvil, mediante un mecanismo tipo paralelogramo, que en sus extremos cuenta con una dupla de juntas universales.

En el ámbito investigativo se han desarrollado múltiples prototipos académicos del manipulador delta, donde destacan el manipulador Maryland [25] que figura como uno de los primeros acercamientos al robot delta actual, y el robot NUWAR [25], caracterizado por alcanzar las velocidades más elevadas para un robot de este tipo. En general, la mayor parte de robots tipo delta académicos han sentado las bases para que compañías como FANUC, KAWASAKI, ADEPT, ABB y CODIAN desarrollen modelos industriales.

En el presente trabajo se establecen distintas directrices de diseño, tales como el espacio de trabajo deseado para el manipulador y la velocidad requerida en su efecto final, para describir el proceso de selección general de los componentes del manipulador. Se parte desde la división estructural, considerando el diseño de componentes individuales, finalizando con la proposición de un esquema mecánico de detalle y una alternativa de controlador industrial para el robot.

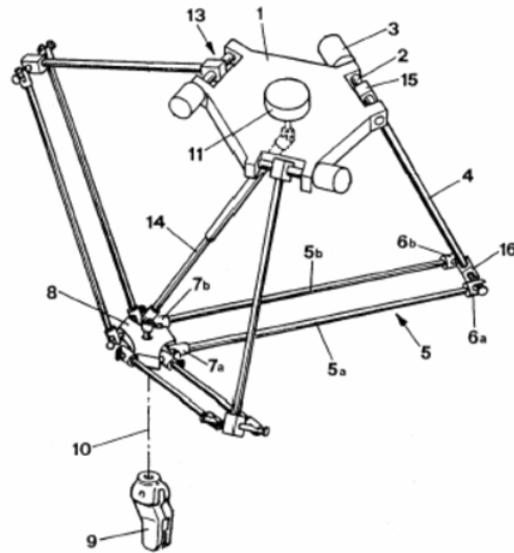


Figura 1-1.: Prototipo de robot Delta patentado por Clavel en 1990.

Objetivo General

- Diseñar un manipulador tipo delta junto con la selección de un sistema de control industrial que permita realizar múltiples trayectorias en un espacio de trabajo predefinido.

Objetivos específicos

- Proponer el diseño mecánico de un robot paralelo tipo delta que satisfaga los requerimientos de movimiento y espacio de trabajo precisados.
- Corroborar por medio de un proceso de simulación el seguimiento de trayectoria en el espacio de trabajo para el manipulador delta, así como la verificación de cargas mecánicas en los elementos críticos del mismo.
- Optimizar las dimensiones del mecanismo del robot delta para usar el máximo espacio de trabajo posible.
- Plantear un esquema de control industrial que permita el control del modelo planteado del robot delta en un potencial entorno industrial.

Metodología

Inicialmente el proyecto consistió en la revisión general de los conceptos de robótica paralela, acompañada de la evolución histórica de los robots paralelos, teniendo como centro el modelo

de manipulador delta, asimismo presentando el desarrollo en la industria que ha tenido este tipo de robot y una explicación de la geometría y cinemática de los robots delta, con el fin de comprender el funcionamiento de este tipo de manipulador.

Posteriormente se desarrolló el proceso de diseño del robot. Teniendo en cuenta las restricciones definidas para el mismo, se inició con una metodología de generación de conceptos para los componentes del robot. Posteriormente se realizó la selección de componentes por uso de las restricciones de diseño y el correspondiente dimensionamiento de los componentes de acuerdo a las necesidades planteadas, para finalmente llegar al diseño de detalle donde se precisan los componentes para el robot.

Con el diseño propuesto se generó un modelo de simulación con el cual se validan las características seleccionadas en el proceso de diseño y se realizó la selección de actuadores de acuerdo a los requerimientos de movimiento del robot. De igual manera se presenta el esquema de control para el robot, así como los componentes industriales que se requerirían para un potencial modelo industrial del manipulador.

Finalmente a partir de los procesos de simulación se generó un modelo de robot delta apto para la construcción y funcionamiento a nivel industrial, tanto desde la perspectiva de mecánica así como de control.

Justificación

Debido al creciente desarrollo de los manipuladores paralelos, el robot tipo delta se erige como una alternativa sólida para enfrentar procesos de manipulación en los que se requiera elevada velocidad sin sacrificar rigidez ni precisión. En este sentido mediante el diseño de este robot, se proporcionaría un precedente definitivo que a nivel industrial promovería el desarrollo de manipuladores paralelos de esta arquitectura en virtud de sus características, y que a nivel académico proveería una plataforma novedosa para la continuación y mejoramiento en áreas afines a la robótica y la automatización, que en el contexto de Ingeniería Mecatrónica representan la línea principal de desarrollo.

2. Generalidades

2.1. Robótica Paralela

En primer lugar es necesario definir que es un robot paralelo: “*Aquellos robots en los que el extremo final está unido a la base por más de una cadena cinemática independiente*” [12]. En términos generales, la arquitectura de los robot paralelos difiere ampliamente de la arquitectura serial, a la cual se está más habituado; sin embargo, los robots paralelos ofrecen ventajas asociadas a la cantidad de peso que son capaces de mover, respecto al peso propio del robot, en cuanto a la rigidez de la estructura y en lo que respecta a la precisión del movimiento en el efecto final, lo que los convierte en una alternativa nada despreciable para múltiples aplicaciones requeridas en la industria moderna.

Ya a comienzos del siglo XIX, el matemático francés Cauchy estudió la rigidez de los polígonos articulados, lo que sentó algunos de los fundamentos matemáticos de posteriores arquitecturas de robots paralelos. Luego de más de 100 años sin avances considerables en 1931, se patentó el primer mecanismo paralelo que se asemejaba a un robot. Se trataba del trabajo de James Ginnnett, una plataforma móvil dirigida a la industria del entretenimiento. No obstante, este trabajo no pasó de ser tan sólo un diseño, en 1940 aparece el primer diseño de un robot paralelo para uso industrial, presentado por Willard L. V. Pollard el cual era un mecanismo con 5 grados de libertad orientado a aplicaciones de pintura con spray.

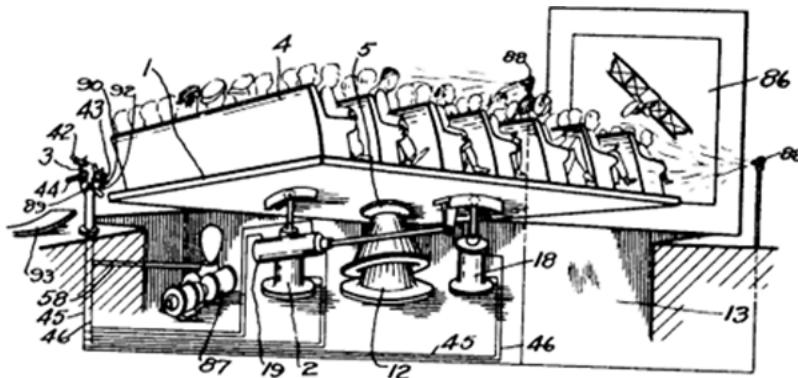


Figura 2-1.: Bosquejo de estructura paralela de Ginnnett.

A pesar de los avances presentados, no fue hasta 1947 cuando el Dr. Eric Gough diseñó un octaedro hexápodo con lados de longitud variable usado como plataforma de pruebas

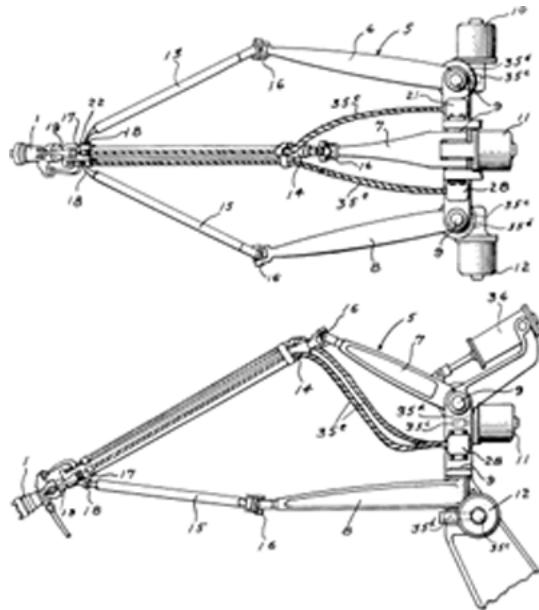


Figura 2-2.: Robot paralelo para pintura con spray diseñado por Pollard.

de neumáticos de la empresa Dunlop. Esta plataforma básicamente medía las cargas que se podían aplicar a los neumáticos en diferentes posiciones y orientaciones, los cuales para la época eran difíciles de fabricar con la tecnología existente, pero ampliamente necesario para garantizar la fiabilidad de los mismos, especialmente en aplicaciones como el aterrizaje de aeronaves. La plataforma de Gough ha evolucionado hasta convertirse en la actualidad en lo que se denominan plataformas MAST (Multi Axis Simulation Table), las cuales gozan de amplia popularidad en la industria actual.

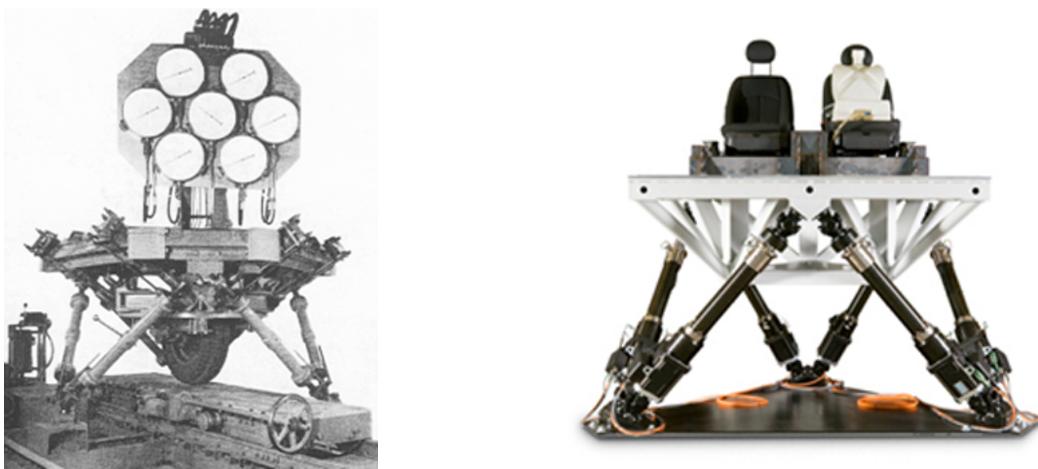


Figura 2-3.: Plataformas Gough: Izquierda (Original), Derecha (simulador moderno).

Con la plataforma de Gough como base, en 1965 Stewart presentó la plataforma más recono-

cida en el campo de la robótica paralela, la cual consistía en una plataforma con seis grados de libertad cuyo propósito estaba ligado a simuladores de vuelo. Inicialmente esta estructura estaba conformada por una base triangular unida a través de articulaciones esféricas a tres actuadores lineales, que se conectaban a una base fija mediante articulaciones universales. La plataforma de Stewart ha gozado de gran popularidad en su tiempo de vida y ha sido el ícono por excelencia de los robots paralelos, tanto así que hasta la fecha se han realizado múltiples variaciones corroborando su versatilidad y excepcional funcionalidad.

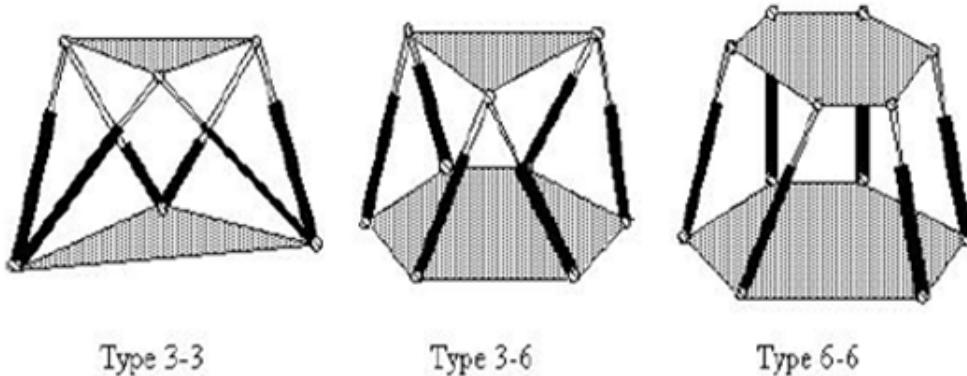


Figura 2-4.: Configuraciones comunes de la plataforma de Stewart.

Simultáneamente al trabajo de Stewart, el ingeniero Alemán Klaus Cappel trabajó en el desarrollo de plataformas paralelas de seis grados de libertad, lo que le valió múltiples patentes de simuladores hexápodos por parte del Franklin Institute Research. Asimismo en 1978, Hunt enfatizó el uso de robots paralelos en la industria aeronáutica, principalmente en el campo de los simuladores de vuelo, y destacó que se debía ahondar en el estudio de arquitecturas más complejas en manipuladores paralelos debido a grandes ventajas como precisión en movimiento y elevada rigidez.

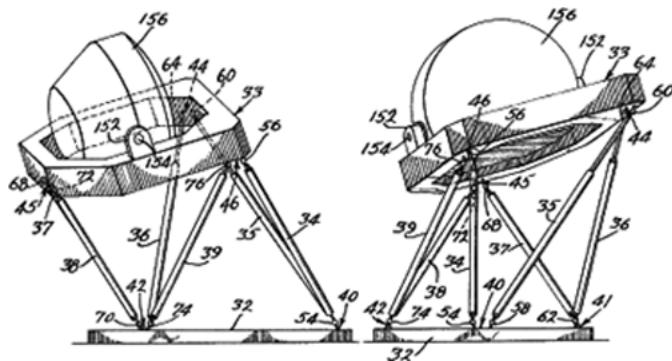


Figura 2-5.: Simulador de vuelo concebido por Cappel.

Ya en la década de los 80's, McCallion y Pham llevaron los robots paralelos a la industria, empleando una plataforma de Stewart como manipulador paralelo para una célula de en-

samble robotizada, debido a que la posición del efecto final era casi insensible a los efectos negativos asociados a los sensores de los robots seriales, así como a la elevada rigidez que garantiza una deformación despreciable en los actuadores, y que se traduce en una gran precisión en los movimientos que es capaz de ejecutar el manipulador.

2.2. Estado del Arte de manipuladores tipo delta

En la década de 1980 Reymond Clavel profesor en el EPFL (École Polytechnique Fédérale de Lausanne) modificó en 1990 el concepto de la plataforma de Stewart, debido principalmente a su engorroso análisis y elevado costo de fabricación, creando el denominado manipulador delta de 3-4 grados de libertad (según el movimiento que de rotación que posea el efecto final). El mayor aporte de Clavel fue la adición de los paralelogramos en los brazos secundarios del manipulador, para asegurar que los grados de libertad del robot fueran netamente translacionales.

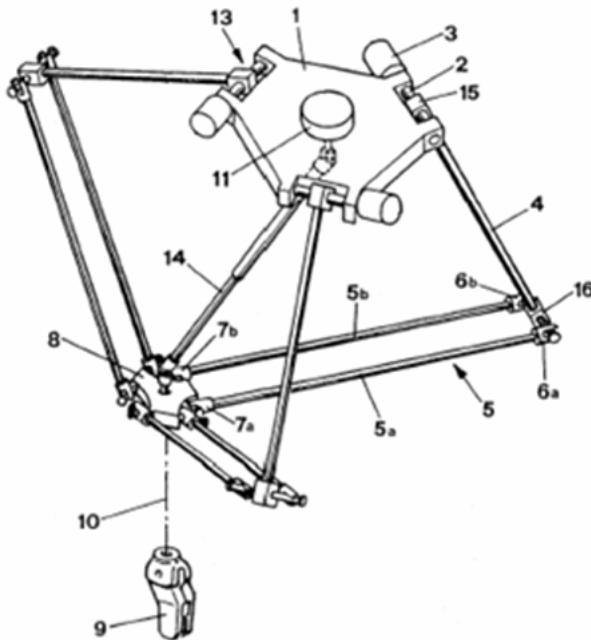


Figura 2-6.: Prototipo de robot Delta patentado por Clavel en 1990 (Patente No. 4.976.582).

Básicamente el manipulador delta consiste en un paralelepípedo de 3 grados de libertad, con una base fija y otra móvil, las cuales están unidas por tres cadenas cinemáticas cerradas, conocidas como “brazos” del robot. Los acoplos de entrada de los paralelogramos se encuentran montados en tres ejes rotativos. Dichos ejes pueden ser activados mediante motores eléctricos o bien a través de actuadores lineales. Normalmente los actuadores encargados de mover la base móvil se encuentran montados en la base fija, de esta manera se reduce la

carga que deben desplazar, lo que se traduce en mejor respuesta dinámica.

Los manipuladores tipo delta cuentan con amplio uso en procesos de manipulación de alimentos, debido la sencillez de su estructura que permite un fácil mantenimiento, procesos de empaquetado, donde generalmente se precisan elevadas velocidades en la traslación de productos a su embalaje final, procesos de mecanizado e incluso en aplicaciones quirúrgicas debido a la elevada rigidez y precisión del manipulador.

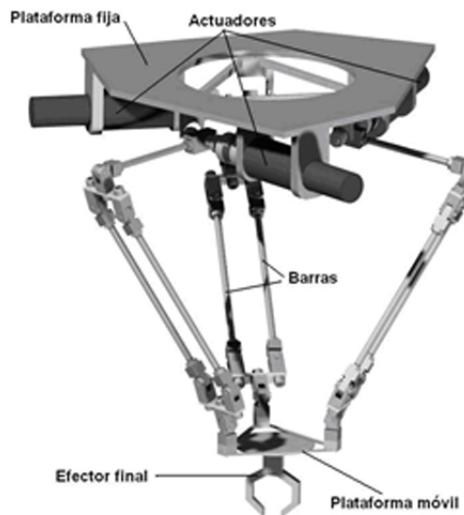


Figura 2-7.: Manipulador paralelo tipo delta con 4 grados de libertad.

A nivel de desarrollo académico se han propuesto o diseñado múltiples manipuladores Delta, explorando mecanismo para la sustitución de los paralelogramos y el reemplazo de actuadores rotativos por lineales. Como referencia general se encuentra el manipulador Delta desarrollado a finales de los 90's en la universidad homónima, el cual se caracteriza porque la plataforma móvil está orientada verticalmente hacia arriba, a diferencia de la mayoría de modelos donde se orienta en la dirección opuesta.

Destaca en el campo de desarrollo experimental el manipulador NUWAR (New University Western Australia Robot), procedente de la universidad de Australia Occidental, caracterizado por alcanzar aceleraciones experimentales de $500 \frac{m}{s^2}$ y presentar una configuración alterna de los motores. Dicha configuración alterna implica un incremento del espacio de trabajo del robot, esto es, una distribución simétrica que aunque respeta la configuración de 120° por actuador, presenta una inclinación en los soportes.

Adicionalmente, en Latinoamérica se han desarrollado una serie de avances en temáticas relacionadas con el diseño de robots de arquitectura paralela tipo delta, entre los cuales vale

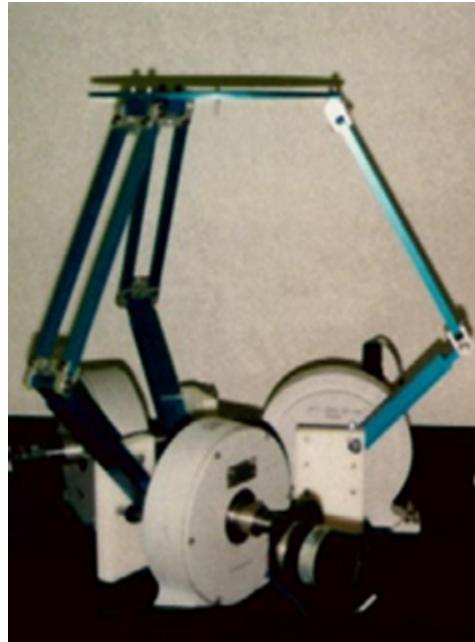


Figura 2-8.: Manipulador Delta desarrollado en la universidad de Maryland.

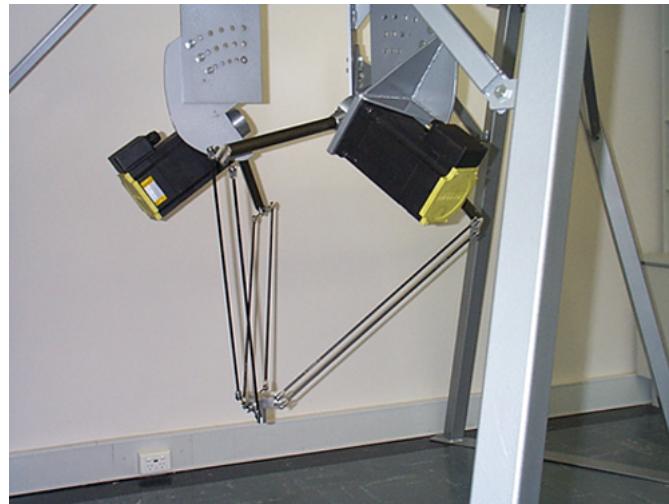


Figura 2-9.: Robot delta NUWAR.

la pena destacar el trabajo de [14] realizado en la Universidad Autónoma de México. Dicho trabajo se enfoca en gran medida a proponer un diseño general de robot delta con ciertas modificaciones de interés, tales como la adición de contra pesos en los brazos principales para reducir los torque vistos por el motor. Del mismo modo, hace hincapié en las diversas opciones disponibles para los motores que precisa el robot para los requerimientos de velocidad. De tales opciones resaltan servomotores, motores paso a paso y motores AC. Para cada alternativa se detalla un esquema de control tentativo y la implementación en el robot;

en la etapa final se propone a los servomotores como la opción con mejor relación potencia/robustez del sistema de control. Finalmente se desarrollan una serie de simulaciones en NX Unigraphics, donde se prueban distintas trayectorias y los correspondientes requisitos de torque en los motores, realizando al mismo tiempo un conjunto de pruebas de la robustez y la integridad estructural del robot mediante análisis de elementos finitos.

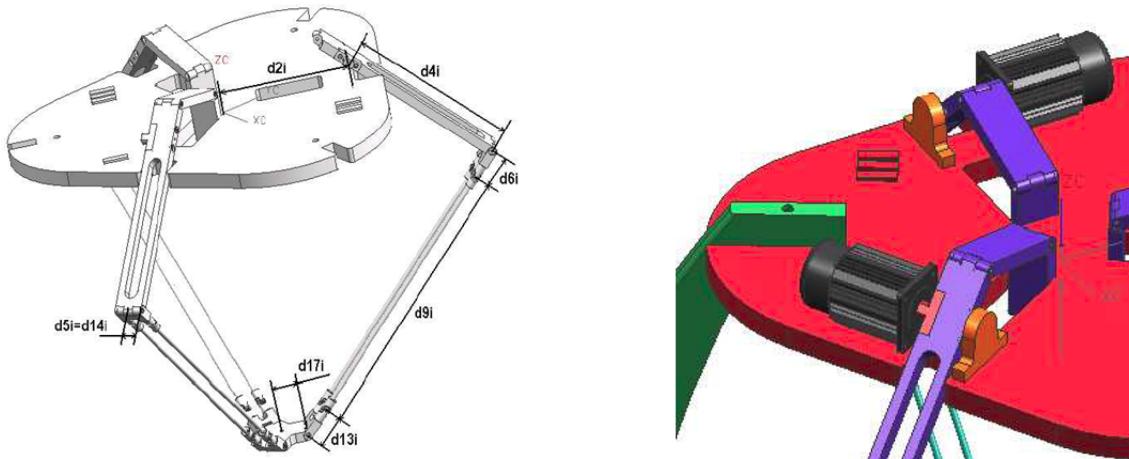


Figura 2-10.: Diseño de Robot Delta con sistema de contrapesos.

Figura 2-11.: Ubicación de servomotores en manipulador delta con contrapesos.

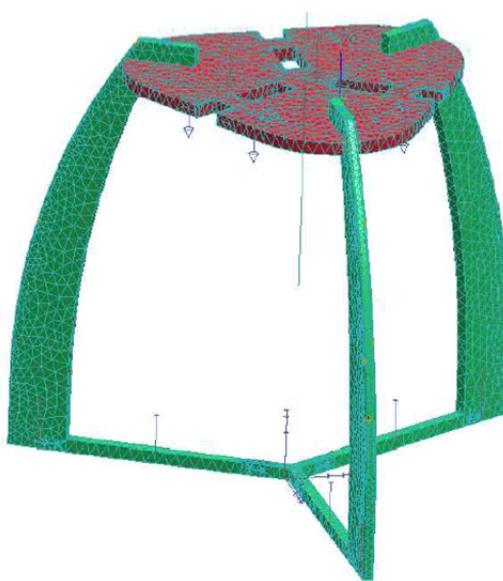


Figura 2-12.: Análisis de elementos finitos para determinar los movimientos del bastidor del robot.

Debido al enfoque del presente proyecto que consiste principalmente en la metodología de diseño y construcción de un robot delta, se encontró que en la Universidad de Bucaramanga

[21] desarrolló un proyecto b, en el cual precisamente se realiza todo el proceso de diseño desde la etapa de selección de componentes, optimización dimensional, simulación de movimiento en ADAMS y simulación de elementos finitos en ANSYS. El punto relevante radica en el enfoque, dado que presenta todo el desarrollo metodológico, a pesar de que no implicó construcción física del modelo, hecho que lo convierte en una importante referencia.

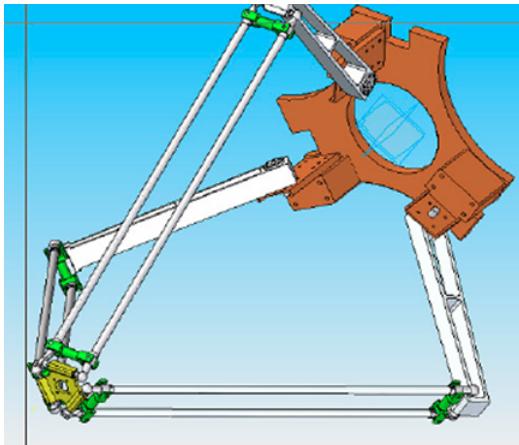


Figura 2-13.: Modelo de Robot Delta plateado como referencia de diseño metodológico.

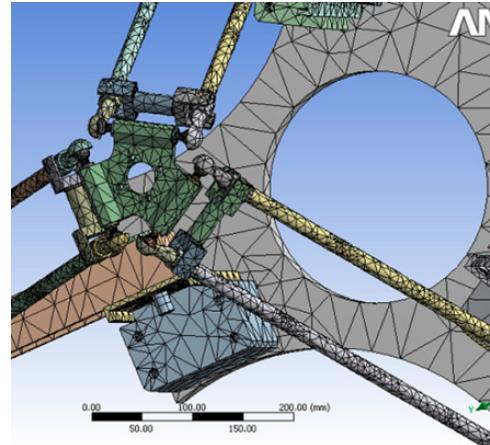


Figura 2-14.: Mallado para simulación en ANSYS.

2.3. Manipuladores tipo delta en el mercado

En el mercado actual se tiene una amplia gama de manipuladores tipo delta, de los cuales se analizan los de mayor parecido con el diseño a proponer, dado que aportan características fundamentales para el proceso de comparación en el benchmarking. En esta medida se tiene que los robots de estructura paralela tipo Delta son ampliamente utilizados en industrias, principalmente en la producción de alimentos, componentes electrónicos, farmacéuticos, manipulación de materiales, empaques, entre otros.

Inicialmente los robots fueron comercializados por la compañía suiza de los hermanos Deumaurex, la cual empezó a producir robots de este tipo a partir de 1987 cuando adquirió una parte de la patente para producir robots de este tipo, pero con un paralelogramo menor a 800mm. La otra parte de la patente (paralelogramos mayores a 800mm) llegó después de algunos acuerdos a manos de la compañía suiza Elekta, la cual se dedicaba a productos clínicos y de laboratorio, en cuanto que la compañía de los hermanos Deumaurex se dirigía principalmente a empresas empacadoras.

La compañía suiza ABB entra en el mercado de la producción de robots paralelos tipo Delta cuando hace un acuerdo con la compañía Elekta y de esta manera empieza a producir robots con paralelogramos mayores a 800mm, empezando una competencia entre el gigante ABB y la empresa Deumaurex. ABB lanza en 1999 el IRB 340, este producto estaba dirigido a los sectores alimenticio, farmacéutico y electrónico principalmente. El robot tenía equipado un sistema de vacío capaz de tomar y dejar objetos de máximo un kilogramo rápidamente. Además venía incluido un sistema de visión de máquina y control de movimiento que permitía alcanzar velocidades de hasta 10m/s, que equivalía aproximadamente a 150 productos por minuto.



Figura 2-15.: Robot paralelo IRB340 de ABB..

Para hacer frente a un mercado dominado por ABB por casi quince años, Deumareux hace una alianza con SIG Group en 1999 y empieza a ofrecer más que robots individuales, una línea completa de celdas de automatización. Actualmente los modelos más difundidos son el C23 y C33.

Una de las ventajas de este robot es la manipulación de hasta 480 productos por minuto, pues su efecto final es capaz de transportar hasta cinco productos simultáneamente. Los brazos del robot son articulados y desmontables rápidamente. Materiales compuestos, motores en posiciones fijas y cables sin flexión proporcionan resistencia, durabilidad y larga vida. Posee cuatro grados de libertad, tres de movimiento transversal y uno que permite la rotación del efecto final. Construido con acero inoxidable e incluye interfaz con el usuario.

En contraste, encontramos el último modelo de ABB, el IRB 360 presentado en la Figura 1 17. Existen cuatro versiones de este modelo las cuales difieren en general del espacio del trabajo y el peso máximo que pueden soportar (máximo 3 kilogramos de payload). Una de

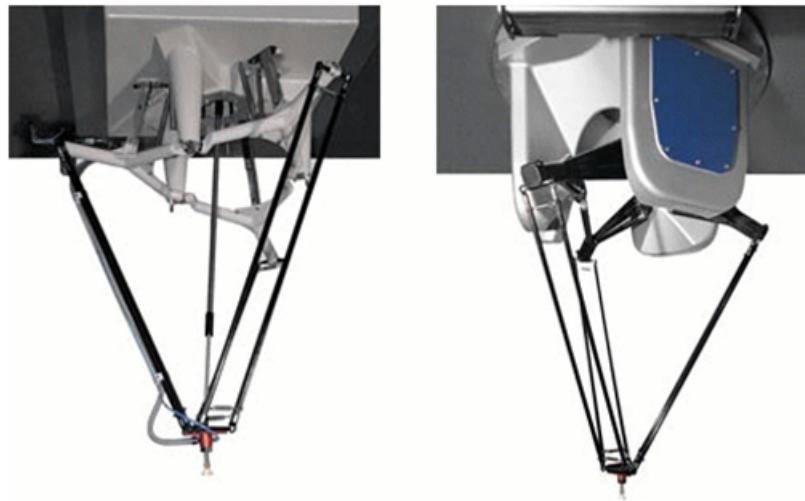


Figura 2-16.: RobotS C23 y C33 de Deumareux.



Figura 2-17.: Robot paralelo IRB360 de ABB.

estas versiones es fabricada en acero inoxidable para aplicaciones de la industria alimenticia, permitiendo una limpieza con detergentes industriales y agua caliente a presión. Al igual que los robots de C23 y C33 este robot cuenta con cuatro grados de libertad.

Aunque ABB y Deumeraux fueron las primeras compañías que se dedicaron al negocio de los robots tipo delta, eso no quiere decir que sean las únicas empresas que actualmente los produzcan. La empresa japonesa FANUC maneja actualmente dos modelos el M-1iA y el M-3iA. Cada modelo tiene disponible dos versiones, una con cuatro ejes y la otra con seis (tres de traslación y tres de rotación). El modelo M-1iA tiene una capacidad de carga de

0.5kg, y en el caso del aversión con cuatro ejes, el eje de rotación puede rotar a 3000 grados por segundo. En cuanto al modelo M-3iA tiene tres servomotores posicionados cerca a cada pata, cada uno con su respectiva transmisión y juntas universales en la base. Este robot por su parte puede manejar velocidades de hasta 2000 grados por segundo.



Figura 2-18.: Robots Delta M-1iA y M-3iA de FANUC.

Otra de las empresas que está consolidada en el mercado de robots paralelos tipo delta es Adept. La particularidad de los modelos de esta empresa es el hecho de tener cuatro brazos en lugar de tres como habitualmente se diseñan, lo cual le da mayor versatilidad y velocidad. Estos modelos cuentan con cuatro grados de libertad, manejan un peso nominal de dos kilogramos, un peso máximo de seis kilogramos y una velocidad de 10 m/s. Específicamente, el s650HS es utilizado en la industria alimenticia previniendo corrosiones y posibilitando una limpieza industrial diaria.



Figura 2-19.: Modelos Robots Delta Adept.

Dentro de las compañías japonesas también se encuentra Kawasaki con la serie Y, estos modelos se enfocan en la manipulación de elementos a grandes velocidades y gran precisión. Tienen cuatro grados de libertad (con posibilidad de un quinto) y un área circular de 1.3m de diámetro y 500 mm de altura en su espacio de trabajo, llevando una carga máxima de

tres kilogramos. Ya que estos modelos se dirigen principalmente a la industria alimenticia, se garantizan todas las condiciones para un lavado industrial diario.



Figura 2-20.: obot Delta, Serie Y de Kawasaki.

Es importante también mencionar que este tipo de robots se están llevando a escalas cada vez más pequeñas. Es el caso del Pocket Delta, el cual es un robot miniatura que es utilizado para operaciones de micro-ensamblaje, por supuesto, este tipo de robots poseen una capacidad limitada en cuanto a la carga (0.2kg), pero se debe de tener en cuenta que no es el objetivo de los mismos.

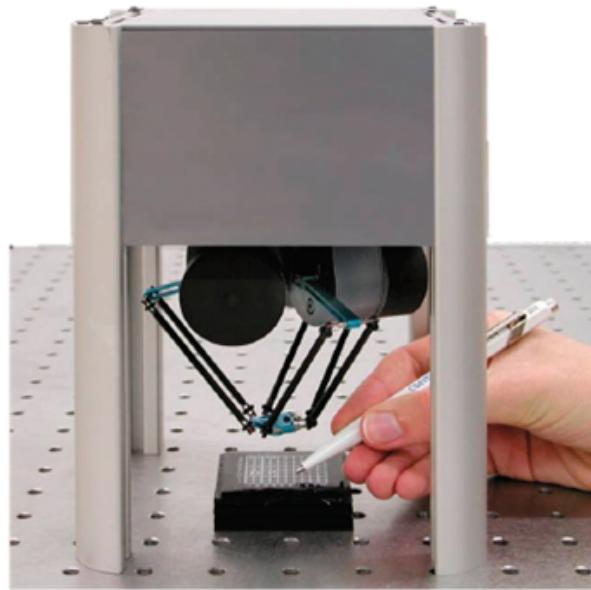


Figura 2-21.: Pocket Delta.

Finalmente, como parte de la revisión actual del mercado de robots delta para aplicaciones industriales *Pick and Place*, la empresa surcoreana **Hoonga**, la cual lleva desde 1970 desarrollando maquinaria para la industria de empaquetamiento (*packaging machinery*), creó una solución de empaquetamiento para la industria farmacéutica, basada en la utilización de un robot delta. Lo interesante de esta propuesta es que la compañía Hoonga utilizó un robot delta Codian de cuatro ejes, realizando el control del mismo con tecnología Motion Control propia de Rockwell Automation: para los cuatro ejes se utilizaron motores brushless de la serie MPL (low inertia motors, o motores de baja inercia), mientras que el servo-sistema utilizado fue la serie multi-ejes Kinetix 6000 con comunicación por fibra óptica SERCOS (SERCOS Interface). Todo el control del servo-sistema fue realizado mediante un Controlador de Automatización Programable (PAC, Programable Automation Controller) ControlLogix. Adicionalmente, se integró a todo el sistema de control un terminal gráfico táctil HMI de la serie Panel View Plus 6, también de Rockwell Automation, con el fin de brindar a todo el sistema robótico una interfaz fácil y amigable de configuración, pruebas y simulación del mismo.

La propuesta de Hoonga soportada en tecnología Motion Control de Rockwell Automation, permite al mismo tiempo reducir los costos de desarrollo, ya que la plataforma Kinetix es abierta, estandarizada y flexible, con lo cual el sistema de empaquetamiento puede enlazarse y sincronizarse rápidamente con ejes adicionales como bandas transportadoras. Además, el software de programación de los controladores ControlLogix posee código y funciones nativas propias para aplicaciones de Pick and Place, lo cual redujo considerablemente el tiempo de desarrollo y pruebas de la solución a un mes, comparado con los doce meses que ha requerido la empresa Hoonga al crear soluciones similares con servo sistemas propietarios de fabricantes de Robots Delta.



Figura 2-22.: Robot Delta Industrial Hoonga, automatizado con tecnología de Rockwell Automation.

2.4. Cinemática robot delta

2.4.1. Geometría del manipulador delta

El modelo geométrico del robot tiene como referencia la Figura 2-23, en la cual se tiene un sistema de referencia fijo notado como O en el centro de la plataforma fija. En este sistema el eje coordenado z es perpendicular a la plataforma fija y su sentido positivo apunta a la plataforma móvil; asimismo el eje x es perpendicular al eje del primer motor. El segundo sistema coordenado de interés se ubica en el centro de la plataforma móvil, por lo tanto sirve para describir la posición del mismo. Además se tiene que en este sistema notado como P , los ejes coordenados están alineados con el sistema O .

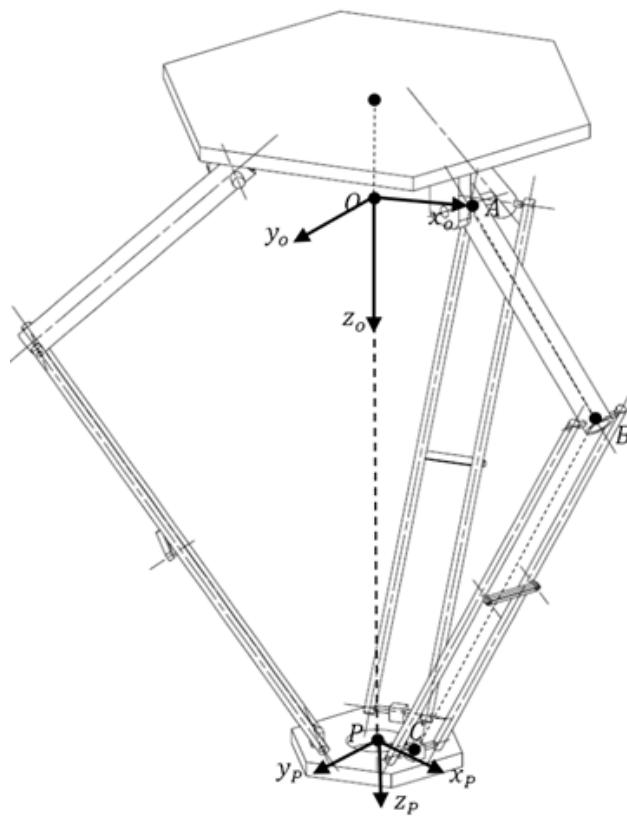


Figura 2-23.: Modelo geométrico del manipulador delta.

Debido a la simetría de los brazos del robot (los cuales se encuentran desplazados 120° entre sí), es posible realizar un análisis independiente de cada cadena cinemática. Para el brazo se tiene una longitud l_1 (brazo principal), mientras que el antebrazo posee una longitud l_2 (brazo secundario). En la misma forma, la distancia desde el sistema O hasta la conexión con el brazo se denominará R , y en el caso de la distancia entre la conexión del antebrazo con la base móvil hasta el sistema O , se designará r .

Para completar el análisis es necesario tener tres sistemas coordenados adicionales, el primero ubicado en la conexión del motor con la junta del brazo principal, el cual se notará como **A**, el segundo en la conexión del brazo principal con los brazos secundarios denominado **B**, y el tercero en la conexión de los brazos secundarios con la plataforma móvil designado como **C**.

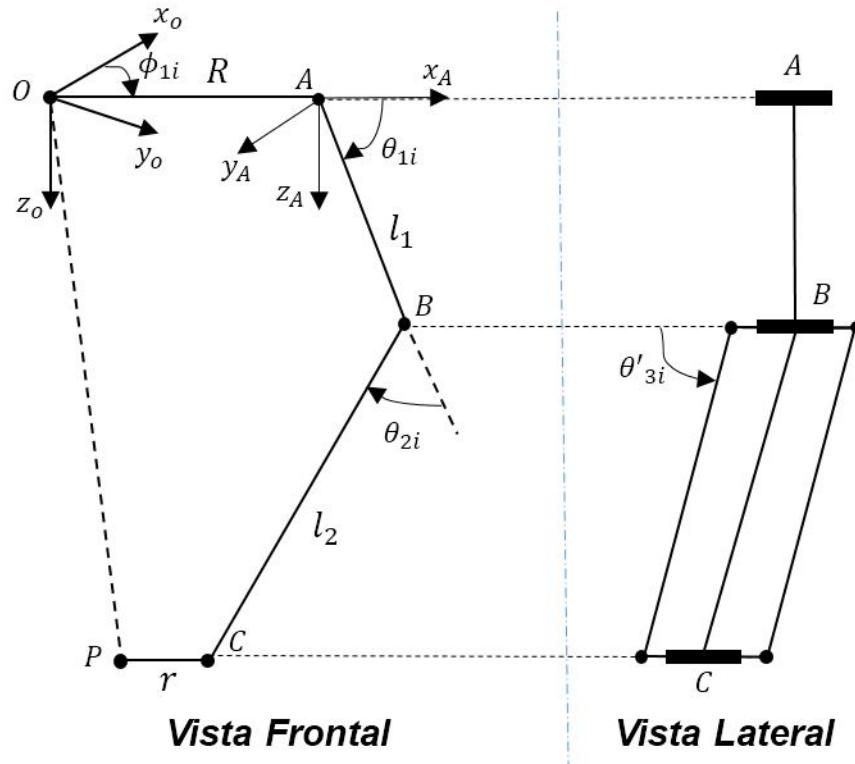


Figura 2-24.: Parámetros geométricos del manipulador delta.

De tal manera se tienen cuatro ángulos de interés en la geometría del robot delta, el primer ángulo está asociado a la distribución de los brazos respecto al sistema **O** en la base fija. Dicho parámetro se nota como ϕ_i (donde el sufijo i representa el brazo al que corresponde); normalmente la distribución se toma como (0° , 120° y 240°). Los restantes ángulos del mecanismo están vinculados al brazo del robot, por convención se denotarán θ_{1i} , θ_{2i} y θ_{3i} . El primer ángulo theta es la única variable actuada del sistema, puesto que es dónde se conectan cada uno de los tres actuadores. El segundo ángulo theta, es uno de los dos grados de movilidad sub-actuados de la junta universal, tiene el mismo eje de rotación que θ_{1i} . Finalmente θ_{3i} corresponde al segundo movimiento subactuado de la junta universal, este ángulo tiene como eje al vector normal al plano formado por el eje de θ_{2i} y la extensión del brazo principal, con centro en la conexión de la junta, esto es, en el centro del sistema **B**. En conjunto esta serie ángulos son lo que proveen de movilidad al mecanismo del robot delta.

2.4.2. Cinemática inversa

La cinemática inversa del manipulador delta consiste en hallar la terna de ángulos θ_{11} , θ_{12} y θ_{13} a partir de una posición $[O_x O_y O_z]$ de la base móvil. El análisis radica en determinar la solución a la ecuación vectorial 2-1, la cual representa las trayectorias para llegar desde el sistema de coordenadas fijo hasta el sistema del efecto final, teniendo como referencia el sistema \mathbf{O} .

$$\overline{OA_i} + \overline{A_i B_i} + \overline{B_i C_i} + \overline{C_i P} = \overline{OP} \quad (2-1)$$

Dada la geometría del manipulador delta, el análisis cinemático se puede facilitar si se utilizan como referencias inicial y final los puntos A_i y C_i respectivamente. Asimismo, cambiando el sistema coordenado de origen al centrado en \mathbf{A} , la ecuación quedaría:

$$\overline{A_i B_i} + \overline{B_i C_i} = \overline{OP} - \overline{OA_i} + \overline{C_i P} \quad (2-2)$$

Con base en la Figura 2-24 se puede establecer la equivalencia de cada término usando los parámetros geométricos del mecanismo, esto es:

$$\begin{bmatrix} l_1 \cos\theta_{1i} \\ 0 \\ l_1 \sin\theta_{1i} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_2 \sin\theta_{3i} \cos(\theta_{1i} + \theta_{2i}) \\ l_2 \cos\theta_{3i} \\ l_2 \sin\theta_{3i} \sin(\theta_{1i} + \theta_{2i}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\phi_i & \sin\phi_i & 0 \\ -\sin\phi_i & \cos\phi_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{R} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{r} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

En este caso es necesario añadir una matriz de rotación para cada brazo, dado el desfase de 120° que existe entre los mismos. Adicionalmente, para el primer brazo cuyo sistema de referencia \mathbf{A} puede no estar alineado con \mathbf{O} , se obtiene:

$$\overline{A_i B_i} + \overline{B_i C_i} = \begin{bmatrix} C_{xi} \\ C_{yi} \\ C_{zi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_2 \sin\theta_{3i} \cos(\theta_{1i} + \theta_{2i}) \\ l_2 \cos\theta_{3i} \\ l_2 \sin\theta_{3i} \sin(\theta_{1i} + \theta_{2i}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\phi_i & \sin\phi_i & 0 \\ -\sin\phi_i & \cos\phi_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{r} - \mathbf{R} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

De la ecuación 2-4 se puede obtener directamente los ángulos θ_{2i} y θ_{3i} , el primero por despeje directo de la segunda fila de la matriz, y el segundo por la suma de cuadrados de todas las filas de la matriz, esto es:

$$\theta_{3i} = \arccos \left(\frac{C_{yi}}{l_2} \right) \quad (2-5)$$

$$C_{xi}^2 + C_{yi}^2 + C_{zi}^2 = 2|\theta_{3i}| \cos(\theta_{2i}) + l_1^2 + l_2^2 \rightarrow \theta_{2i} = \arccos \left(\frac{C_{xi}^2 + C_{yi}^2 + C_{zi}^2 - l_1^2 - l_2^2}{2|\theta_{3i}|} \right) \quad (2-6)$$

Para encontrar el último ángulo θ_{1i} , se reorganizan la primera y tercera fila la ecuación matricial 2-4 y se tiene:

$$\begin{bmatrix} \cos\theta_{1i} \\ \sin\theta_{1i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 + l_2 \sin\theta_{3i} \cos\theta_{2i} & -l_2 \sin\theta_{3i} \sin\theta_{2i} \\ l_2 \sin\theta_{3i} \sin\theta_{2i} & l_1 + l_2 \sin\theta_{3i} \cos\theta_{2i} \end{bmatrix} \quad (2-7)$$

En la ecuación 2-7, al desarrollar la solución se puede encontrar la función arco tangente para despejar el ángulo θ_{1i} .

2.4.3. Cinemática directa

El problema de la cinemática directa en el robot delta consiste en determinar la posición del sistema \mathbf{P} solidario al centro de la base móvil respecto al sistema coordenado \mathbf{O} . En este caso se conoce la terna de ángulos $[\theta_{11} \theta_{12} \theta_{13}]$ y se desea determinar el vector $[P_x \ P_y \ P_z]^T$. A grandes rasgos la solución de la cinemática directa está supeditada a la intersección de tres esferas formadas por cada uno de los brazos del manipulador, las cuales tienen como centro cada sistema coordenado B_i y radio \mathbf{l}_2 , razón por la cual se pueden considerar cuatro casos:

- **Solución genérica:** Se hallan dos soluciones a la intersección de las tres esferas, cabe resaltar que dichas soluciones están reflejadas con respecto a un plano de simetría.
- **Solución única:** Una de las esferas es tangente al círculo formado por la intersección de las dos restantes, en consecuencia solo existe una solución posible.
- **Solución singular:** En este caso los centros de dos esferas coinciden, por lo que resulta un número infinito de soluciones. Esta configuración es poco probable puesto que requiere que $[\theta_{11} \theta_{12} \theta_{13}] = 90^\circ$ y $\mathbf{l}_1 = \mathbf{l}_2$.
- **Sin solución:** Las tres esferas no se interceptan, esto es un punto fiera del espacio de trabajo del manipulador.

3. Concepción y diseño del robot Delta

3.1. Definición de requerimientos

Para el diseño del robot delta fue necesario tomar en consideración requerimientos asociados al movimiento que desarrollaría el robot, así como del espacio en el cual se podría desplazar. Estos requerimientos se recopilan en la Tabla 3-1.

Requerimiento	Especificación
Ciclo Pick and Place	Definido formalmente para un Robot Delta como la operación de movimiento en el efecto final, desde una posición home hasta una posición de recogida y el movimiento de regreso a la posición home. El estándar especifica un movimiento de subida de 25 mm, de recorrido lineal de 300 mm y bajada de 25 mm. Para el robot delta propuesto se definió como requerimiento <i>60 ciclos Pick and Place</i> por minuto.
Espacio de trabajo	El espacio de trabajo mínimo se definió como un cilindro de radio 150 mm y altura 120 mm. Desde luego el espacio de trabajo cinemáticamente alcanzable es mayor pero mediante el sistema de control se restringe.
Capacidad de carga (medida en el efecto final)	Dado que el efecto final del robot se debe desplazar con celeridad se determinó admisible una capacidad de carga de 300 g.

Tabla 3-1.: Requerimientos robot delta.

El ciclo *Pick and Place* (en adelante P&P) es por definición el movimiento básico que realiza un robot para recoger un elemento, desplazarlo a otro punto preestablecido liberarlo. En términos generales se puede tener el ciclo completo cuando el robot retorna a la posición de partida o a la posición de home en su defecto. En el caso de manipuladores tipo delta no existe un consenso acerca del ciclo P&P estándar. Sin embargo, Codian propone un ciclo normalizado para la serie de manipuladores delta que produce [6], el cual se define como un movimiento de tres etapas:

1. Movimiento de elevación de 50 mm.
2. Movimiento de traslado lineal 300 mm.
3. Movimiento de bajada 50 mm.
4. Retorno a posición inicial.

En el caso que el movimiento se realice hasta el punto 3, se tiene medio ciclo. Codian ofrece robots que van desde los 60 hasta los 200 picks por minuto.

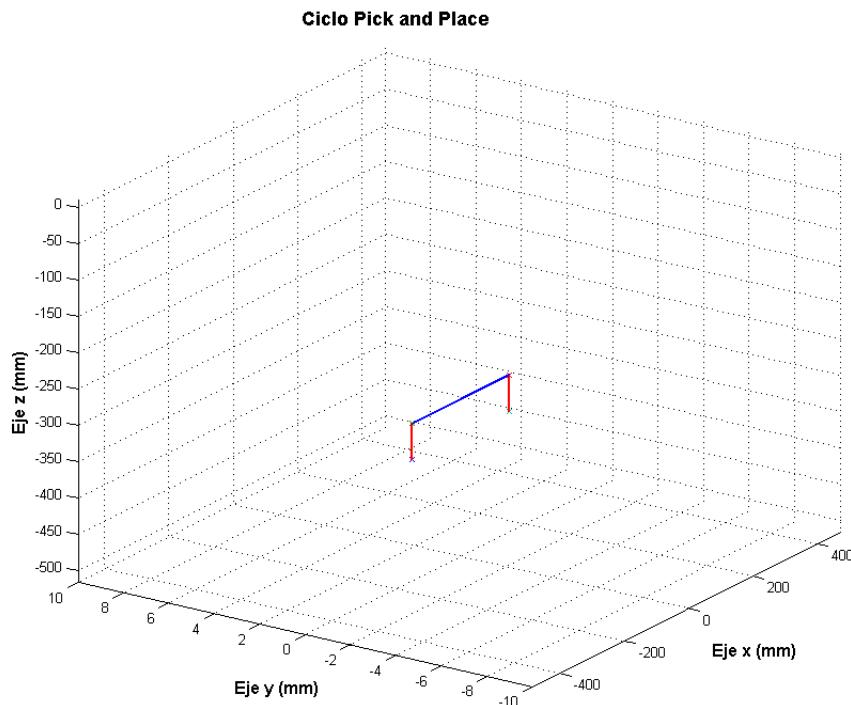


Figura 3-1.: Ciclo pick and place estándar.

3.2. Diseño conceptual

3.2.1. División estructural del Robot

El manipulador delta puede ser subdivido en una serie de grupos separados por composición, esto es, división por categorías de acuerdo al grupo estructural al que pertenezcan. En este sentido, se tienen categorías que facilitan la generación de conceptos para cada grupo de manera independiente.

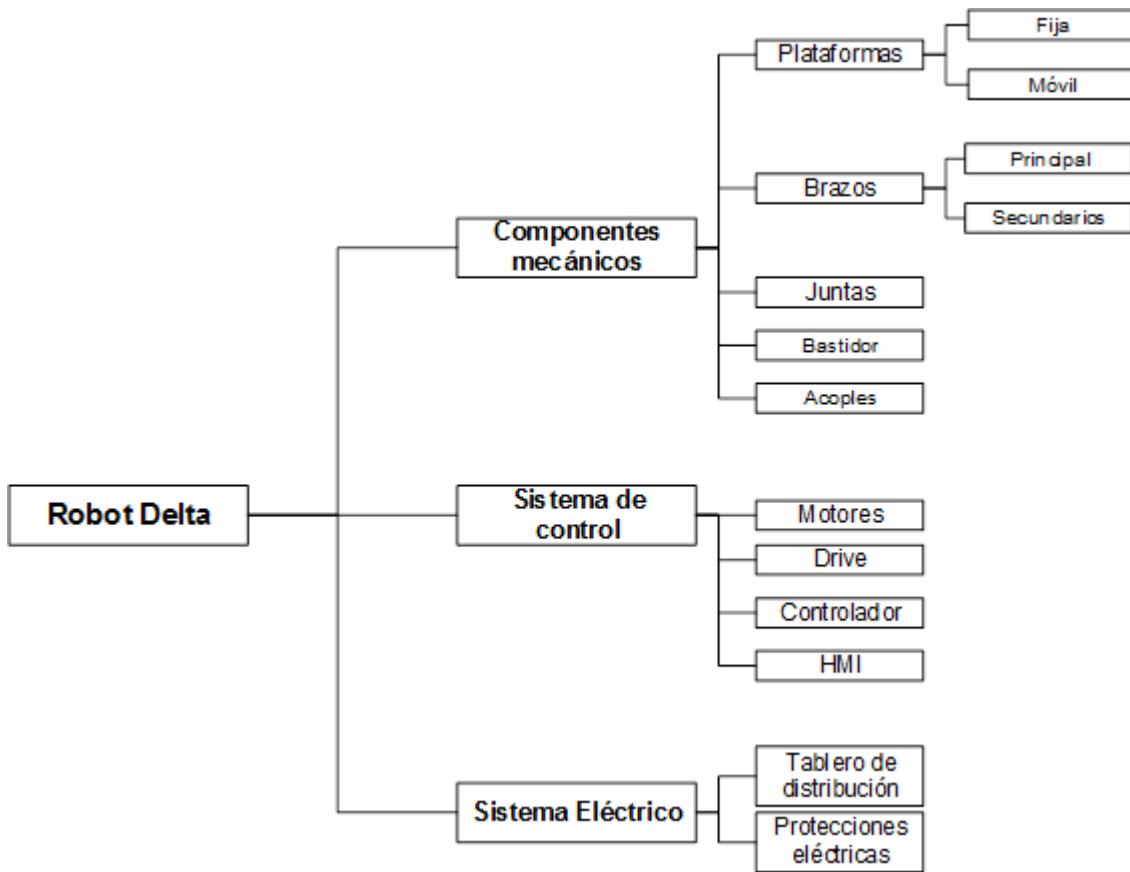


Figura 3-2.: Descomposición estructural del robot delta.

3.2.2. Benchmarking

La principal técnica de creatividad que presentó mayor utilidad consistió en el benchmarking, esto es, la comparación de dispositivos existentes con características semejantes al robot a desarrollar, con el fin de cuantificar características de interés, tales como: velocidad del efecto final, cantidad de ciclos pick and place por minuto, dimensión del espacio de trabajo, capacidad de carga del robot, consumo de energía, entre otras. A partir de estas características se pudo establecer con mayor claridad la funcionalidad del robot delta propuesto, así como tener parámetros de referencia para delimitar los requerimientos del robot y facilitar el proceso de dimensionamiento del mismo. El proceso de benchmarking agrupó la mayoría de los robots presentados en el análisis de mercado (Tabla 3-2), si bien se añadieron varios modelos adicionales para agregar diversidad al grupo de estudio. La información seleccionada de cada modelo de robot se extrajo de los respectivos catálogos de datos. Sin embargo, para ciertos modelos la información de todas las categorías no estuvo completamente disponible.

Fabricante	Modelo	Ejes	Repetibilidad (mm)	Ciclo P&P		Velocidad	Payload (kg)	Espacio de trabajo	
				25/305/25 [mm] - 0,1Kg				Altura (mm)	Radio (mm)
ABB	IRB 360/800	4	0.1	0.3	-	1	250	400	
Adept	650HS-005D	4	0.1	0.3	10 m/s	6	500	650	
	s800H-031A1	4	0.15	-	10 m/s	4	500	800	
AsyriL	DesktopDelta 350	3	0.002	-	-	2	175	330	
	PocketDelta 100	3	0.0025	-	-	2.5	120	50	
	PocketDelta 150	3	0.003	-	-	0.2	135	75	
Autonox 24	HD-RL3/4-800	4	0.1	0.44	130 p/min	1	200	400	
	HD-RL3/4-1100	4	0.1	0.44	130 p/min	1	300	550	
	IP65-RL2/3-1000	3	0.15	0.3	200 p/min	1	340	500	
	IP65-RL3/4-600	4	0.1	0.3	200 p/min	1	140	300	
	IP65-RL3/4-1200	4	0.1	0.3	200 p/min	1	220	600	
BOSCH	C23	4	-	0.625	480 p/min	-	190	400	
	C33	4	-	0.75	320 p/min	1.5	300	500	
Codian	D2-800	2	0.2	0.3	200 p/min	3	225	400	
	D2-1000	2	0.3	1.2	50 p/min	30	350	500	
	D2-1000 Twin	2	0.3	1.5	40 p/min	40	350	500	
FANUC	D2-1500	2	0.3	1.3	45 p/min	35	350	750	
	M-1iA	6-Apr	0.02	0.3	-	0.5	100	140	
	M-3iA	6-Apr	0.1	-	-	6	500	675	
Kawasaki	Y Series	4	0.1	0.27	10 m/s	3	500	650	
Schneider	Robot P4	4	0.1	-	10 m/s	1.5	225	600	

Tabla 3-2.: Benchmarking de robots delta.

3.3. Diseño y selección de componentes

3.3.1. Componentes mecánicos

■ **Plataformas:** La plataforma fija es el componente principal de soporte de todos los demás elementos que conforman la estructura del robot. Este elemento está diseñado para soportar los tres conjuntos brazo principal y servomotor, a partir de los cuales se enlazan los demás componentes que dan forma al robot. Además, la plataforma fija permite establecer el parámetro geométrico ***R*** (distancia desde el origen geométrico de coordenadas hasta el punto de articulación del brazo principal), el cual es fundamental para definir correctamente la cinemática inversa y por ende, el espacio trabajo máximo alcanzable. Desde el punto de vista de la geometría del robot delta, es imprescindible que los brazos principales estén espaciados entre si cada 120° sobre un círculo inscrito de radio ***R*** en un triángulo equilátero; por tanto, esto implica que la forma base de la plataforma permita este tipo de disposición geométrica. Para obtener la plataforma fija se consideraron entonces tres formas geométricas principales durante todo el proceso de diseño:

- *Base Hexagonal Regular:* Se consideró inicialmente una base hexagonal regular con un espesor escogido arbitrariamente para efectos de dimensionamiento de los servomotores del robot, sin hacer un compromiso con la disposición final real de los servomotores y su tamaño relativo respecto a la misma. La base hexagonal tiene la ventaja de que es posible ubicar los tres brazos principales espaciados 120° , con lo cual cada brazo queda ubicado en un cara del hexágono y separados por una cara intermedia.

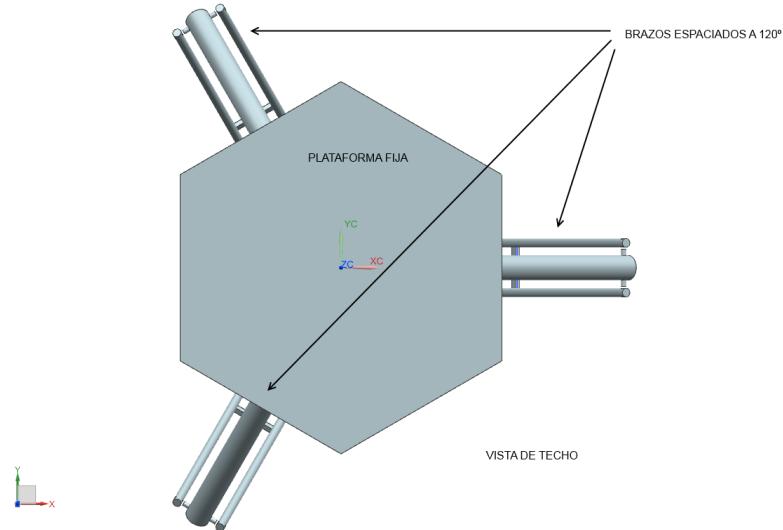


Figura 3-3.: Geometría hexagonal para la base fija.

- *Base Triangular Deformada:* Durante una buena parte del diseño del robot se optó por cambiar a una geometría base triangular equilátera, pero se le añadieron ciertas protuberancias para permitir más adelante la adición de los servomotores, de manera que estos al ser posicionados no interfirieran con el movimiento de los brazos principales o secundarios.

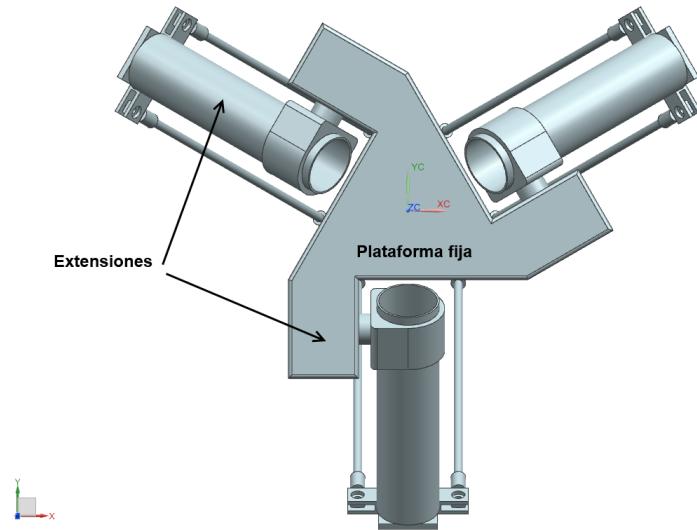


Figura 3-4.: Geometría triangular modificada para la base fija.

- *Base Triangular Final:* Finalmente el diseño de la plataforma fija se realizó totalmente en un triángulo equilátero simple con un espesor reducido (20 mm) para

quitarle peso total al robot. Este diseño aparte de ser simple de maquinar, permite realizar un montaje de todo el robot completo a cualquier estructura de soporte desde la parte superior de la misma, lo que facilita el ensamblaje y/o reposicionamiento del conjunto en prácticamente cualquier espacio o ambiente de trabajo. En lo referente a la plataforma móvil su función principal es servir como referen-

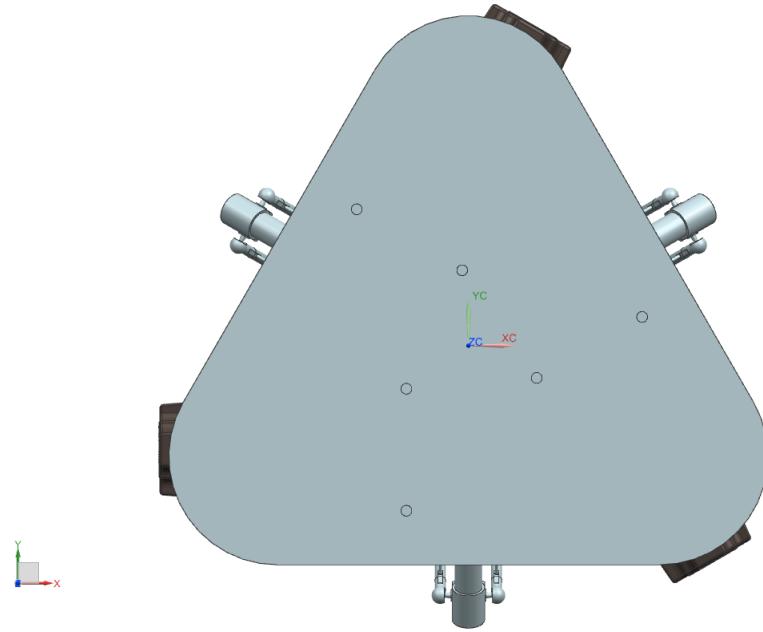


Figura 3-5.: Geometría triangular suavizada para la base fija.

cia de efecto final y brindar el espacio para la potencial adición de un elemento tipo gripper, o en su defecto algún mecanismo adicional para la manipulación de objetos por parte del robot. Asimismo se puede considerar como el último eslabón que cierran las cadenas cinemáticas de los brazos activos (brazos principales) y los brazos pasivos (brazos secundarios), y en este sentido sirve de sostén para los acoplos que la conectan con los brazos pasivos. Respecto a la geometría de la base móvil se tienen tres posibles arreglos para satisfacer las condiciones de simetría requeridas por la naturaleza del manipulador. Inicialmente se considera una base triangular por la distribución equitativa cada 120° . En este mismo sentido una forma hexagonal posee esta propiedad y adicionalmente posee aristas alineadas a dicho ángulo lo cual en potencia proporciona una guía para el montaje de soportes; finalmente una forma circular es considerada. Dentro de las opciones presentadas la que más beneficios proveía desde el punto de vista de simetría y montaje es la base con geometría hexagonal, dado que las caras rectas cada 120° proporcionan una guía de montaje para los soportes que la conectan con los brazos pasivos. Asimismo contiene más espacio utilizable que una base de tipo triangular y una superficie semejante a la base circular. De la misma manera, en el centro de la

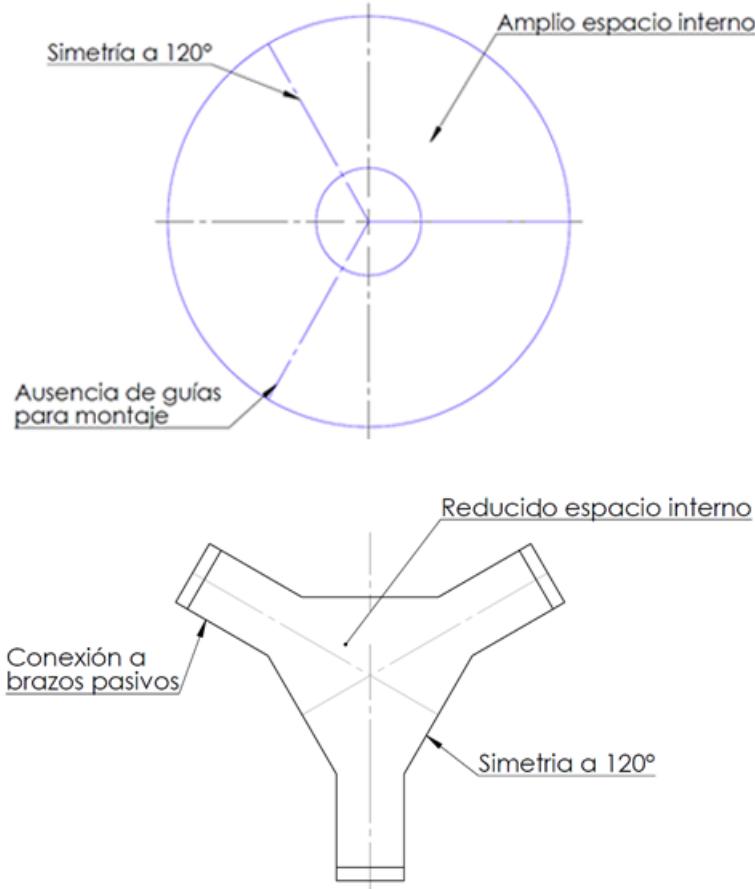


Figura 3-6.: Geometrías circular y triangular para la base móvil.

figura hexagonal se cuenta con suficiente espacio para el posible montaje de un elemento de manipulación adicional, tal como un gripper.

- **Brazos:** En lo referente a los brazos se tienen dos categorías independientes, los componentes asociados a los brazos principales y subsecuentemente los asociados a los brazos secundarios. Para el caso del manipulador delta propuesto con actuadores rotacionales, los brazos principales conectar la junta rotatoria acoplada al actuado con el extremo superior del mecanismo del paralelogramo y su dupla de juntas universales; por su parte los brazos secundarios constituyen por par cada mecanismo de paralelogramos, enlazando los brazos principales en su extremo superior con la plataforma móvil en la parte inferior. Por otra parte, los brazos del manipulador delta precisan una estructura resistente, puesto que son los eslabones encargados de efectuar la transferencia de movimiento entre actuadores y efecto final, asimismo es deseable que sean elementos de bajo peso para no incidir negativamente con cargas adicionales sobre los motores. En este sentido se emplean con cierta frecuencia elementos cilíndricos rígidos, o en su de-

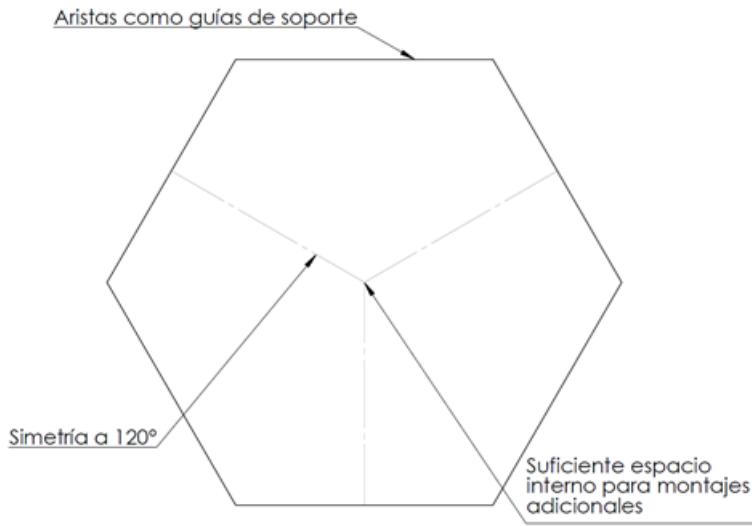


Figura 3-7.: Geometría hexagonal para la base móvil.

fecto huecos (tubos) elaborados en materiales compuestos, principalmente en fibra de carbono; dado que este material en su forma entrelazada es altamente ligero (densidad promedio $1,8 \frac{q}{cm^3}$) además de resistente a esfuerzos de compresión y fuerzas radiales. De tal modo que para los brazos principales se prefiere una estructura tubular, puesto



Figura 3-8.: Tubos y barras elaboradas en fibra de carbono.

que permite una separación crucial entre los brazos del paralelogramo y en consecuencia una mayor rango de movilidad para la dupla de juntas ubicadas en cada extremo lateral del mismo. Por otro lado en el caso de los brazos secundarios es deseable una estructura en forma de vara, dado que su función principal es la de conectar los extremos del paralelogramo, por ende varas relativamente delgadas acoplables a las juntas presentan una mayor armonía con el diseño en general, además reducen el peso de la estructura a desplazar por los actuadores. Un factor relevante asociado a las estructuras en fibra de carbono consiste en la integración con el manipulador, principalmente en lo relativo a la conexión con los elementos restantes, en este sentido se tiene que la

fibra de carbono se puede enlazar a estructuras preferentemente metálicas mediante adhesivos sintéticos, en particular resinas epóxicas [18], a través de este mecanismo se consigue una conexión lo suficientemente sólida para las tareas a las que potencialmente se puede someter el manipulador delta. Sin embargo esta condición implica que las piezas conectadas mediante el adhesivo sean desde la práctica inseparables, lo que resta utilidad desde la perspectiva de la modularidad. No obstante por la reducción en términos de peso y la elevada resistencia a cargas, tanto los tubos como las varas elaboradas en fibra de carbono resultan adecuadas para conformar los brazos primarios y secundarios del robot.

- **Juntas:** En consideración al mecanismo que compone el robot delta, se tiene que las articulaciones que conforman cada uno de sus brazos secundarios terminan en una dupla de juntas universales, por tanto, es de suponer que una alternativa dominante sea replicar este concepto directamente sobre el diseño del robot. Sin embargo, el modelo de las juntas universales puede ser emulado por uno con juntas esféricas, las que presentarían la restricción de girar sobre el eje que conecta las juntas inferiores y superiores. Esta restricción se puede lograr de dos maneras; inicialmente con la inclusión de un mecanismo adicional que conecte las dos barras del paralelogramo del brazo secundario, o bien con un doble resorte en cada extremo del brazo, solidario a cada junta uno por costado, para evitar el movimiento mencionado. En general se partió del concepto de juntas universales, del cual se produjo un diseño preliminar, posteriormente se analizaron tres modelos de robot con juntas esféricas, en ese progresión se incorporaron modificaciones procedentes de los diseños anteriores, para finalmente generar un diseño que se adaptase congruentemente a las necesidades presentadas.

- **Diseño de juntas universales:** El diseño inicial con juntas universales consistió en un eje con dos terminaciones tipo horquilla que en forma general consiste en la primera junta rotacional, el segundo par de juntas rotacionales estaban constituidos por un par de ejes que atravesaban cada una de la horquillas, mediante el mecanismo tipo horquilla se garantizaba la perpendicularidad de los ejes de cada junta rotacional y en modo general se tenía una junta universal. No obstante el modelo de junta rotacional implicaba múltiples inconvenientes desde el punto de vista constructivo, dos de los principales es que precisaba de rodamientos tanto como en el eje principal y su conexión con el brazo primario y dos pares para los ejes secundarios en cada horquilla; esto con el fin de garantizar un movimiento fluido y sin restricciones por fricción. El inconveniente constructivo radicaba en la cantidad de mecanizados de precisión para el ajuste de los rodamientos así como el costo en sí de los rodamientos, puesto que se precisarían de 24 de ellos, 12 para los ejes secundarios y 12 para los ejes primarios. Los inconvenientes en general opacaban la mayor ventaja que ofrecen las juntas universales, que es la mínima restricción que oponen ante movimientos en cualquiera de los dos ejes, principalmente en los ejes secundario donde para θ_{3i} se precisa cierta libertad para garantizar un

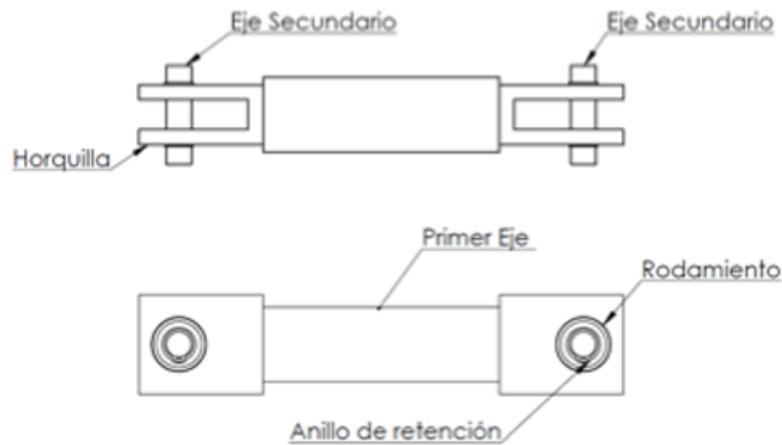


Figura 3-9.: Modelo de junta universal adaptada para el manipulador delta.

espacio de trabajo amplio. De tal forma que las juntas universales fueron tomadas en cuenta para un diseño inicial del robot delta, no obstante se reemplazarían por juntas esféricas en virtud de las ventajas que éstas ofrecían.

- **Alternativa de diseño 1 - Juntas esféricas:** El diseño inicial con juntas esféricas consistió básicamente en la sustitución de juntas universales del diseño previo por juntas esféricas, dada la complejidad de la junta esférica como tal en términos de fabricación, se optó por usar un modelo comercial, el modelo empleado es de la empresa de origen alemán Norelem, la cual se especializa en la fabricación de múltiples elementos mecánicos entre ellos todo tipo de juntas para mecanismos, las juntas seleccionadas [1] están normalizadas bajo el estándar DIN 71802, el modelo particular fue Norelem 27650-1006 (Figura 2 10). Cabe resaltar que en la junta sin modificar existe un anillo de retención que permite extraer la rótula del socket, sin embargo dadas las condiciones de movilidad para el manipulador delta la sujeción de la junta es ejecutada mediante el mecanismo de resorte. Asimismo se evidencia que la junta esférica se conecta mediante roscas, en la sección de la rótula (junta esférica macho) por rosca externa y en la sección del socket (junta esférica hembra) a través de un roscado interno. La junta en cuestión sirvió como modelo inicial, no obstante, requirió una serie de modificaciones para adecuarla a los requerimientos de movimiento precisados. Dichas modificaciones consistieron en un corte de 2,5 mm sobre la parte que sirve de alojamiento para la esfera, esto con el fin de incrementar el ángulo lateral de rotación (θ_3 en el modelo cinemático del robot delta); el cual está limitado a 18° por costado (36° en total), a 35° por costado, significando un total de 70°. Desde luego el corte implica que la junta no se mantendría ensamblada por sí sola, en ese sentido los eslabones entre brazos o los resortes, cumplen la función de mantener unida las juntas del paralelogramo.
- **Alternativa de diseño 2 - Juntas esféricas inclinadas:** Con el propósito de incre-

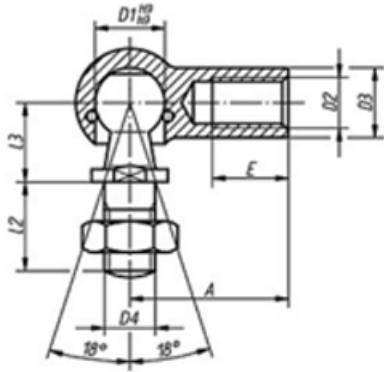


Figura 3-10.: Junta Esférica Norelem con restricción de movimiento.

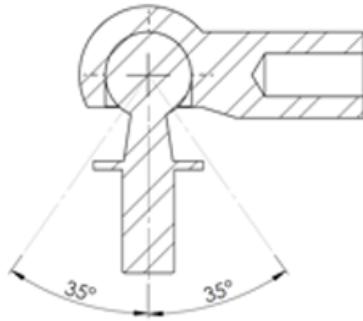


Figura 3-11.: Junta esférica modificada, rango de movimiento incrementado a 70°.

mentar el rango de movimiento provisto por las juntas esféricas, se consideró ubicar las juntas esféricas con un ángulo menor a 15° en el lugar de empotramiento. Inicialmente esto proveía un incremento del ángulo de inclinación sobre el rango de movimiento de la junta, en lo que al ángulo lateral concierne, sin embargo, la limitación radica en que el mecanismo de paralelogramo del brazo secundario, restringe el movimiento de manera simultánea, esto es, si bien se gana en rango de movimiento el ángulo de inclinación por un costado, el costado adyacente limita este mismo ángulo, y los que es aún peor debido a la restricción se perdería en general del movimiento total un equivalente al ángulo con el cual se posicionasen las juntas. De manera gráfica al inclinar las juntas 10°, se forma un ángulo de 100° entre el enclavamiento de la junta y la parte móvil de la misma; como posición inicial, en consideración del rango de movimiento de la junta de 35° por costado, al tener la inclinación de 10° se pierde esta magnitud en el rango de movimiento, debido a que ya se presentarían choque y el movimiento dual entre juntas. Del mismo modo otra de las limitaciones con el posicionamiento de las juntas de forma inclinada, es que precisaría de una superficie planeada con el ángulo de inclinación requerido, que en términos de manufactura generaría cierto nivel



Figura 3-12.: Juntas inclinadas a 10°.

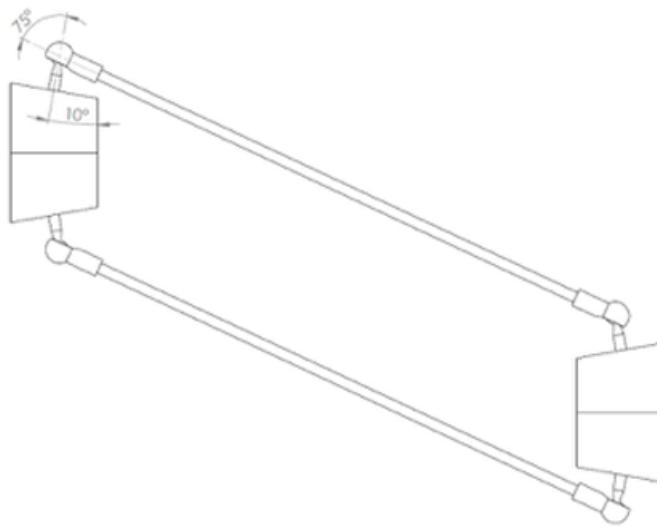


Figura 3-13.: Restricción de movimiento a 25° (pérdida de 10° por inclinación).

de complejidad adicional, sin que se refleje ventaja alguna desde el punto de vista de movilidad del robot.

- **Bastidor:** El bastidor es la estructura que permite soportar en una posición fija y estable todo el conjunto ya ensamblado del robot. Los criterios de diseño del bastidor se basan establecer un compromiso equilibrado entre peso, resistencia, rigidez y complejidad de ensamblaje (ensamblabilidad), pues ya que el robot diseñado estará destinado principalmente a demostraciones en ferias industriales, se requiere que el bastidor sea lo más compacto posible y con el menor peso posible para poder ser transportado con relativa facilidad. Considerando los criterios de diseño establecidos previamente, se procedió a diseñar un bastidor que además permita al robot un espacio de trabajo totalmente libre y flexible para el desarrollo de distintas aplicaciones típicas de Pick & Place. El sistema de ensamblaje que se utilizó para el bastidor fue el conocido Sistema de Perfilería Estructural de Aluminio. La eliminación prácticamente de la realización

de perforaciones adicionales o uniones mediante soldaduras o pegamentos industriales, junto con una alta relación resistencia/peso por perfil y accesorios, y su gran difusión y utilización para el desarrollo de maquinaria, hacen que este sistema sea el más apropiado como bastidor del robot en cuestión. Como marca de referencia se utilizó la línea de perfilería de aluminio estructural ofrecida por el grupo alemán Bosch Rexroth; sin embargo se debe tener en cuenta que solo es para referencia constructiva, ya que se pueden utilizar marcas similares, claro que utilizando referencias parecidas a las indicadas en este documento. El diseño completo del bastidor se describe completamente en la sección de Diseño de Detalle de este documento; adicionalmente se pueden consultar los planos correspondientes para obtener mayores detalles constructivos.

- Acoplos:** En general los acoplos son los elementos conectivos para generar el ensamblaje completo del manipulador delta, como por ejemplo el conector que une la parte inferior de los brazos secundarios con la plataforma móvil. Los acoplos son el resultado de la formalización de los demás subsistemas puesto que dependen de su diseño final para proporcionar el método de conexión adecuado, por lo tanto previamente a una formulación de los potenciales diseños de cada acople, es preciso citar los principales que se incluirán en el manipulador.

Nombre del acople	Descripción
Conector motor - base fija	Este acople fija el motor con la base fija de modo que se tenga un soporte estable para los motores.
Acople motor- brazo principal	Mediante este acople se conecta el eje del motor con la parte posterior del brazo principal, dado que el brazo está formado por un tuco de fibra de carbono se precisa de un terminal que enlace el conector con el brazo.
Acople brazo principal - paralelogramo	La parte anterior del brazo principal aloja este acople que funciona como terminal al mismo tiempo, en este conector residen los componentes machos de las juntas esféricas con las que se enlazan los brazos secundarios de paralelogramo.
Acople brazo secundario	Son el par de terminales en cada extremo que permiten conectar las varas de fibra de carbono que los componen con los elementos hembras de las juntas esféricas.
Acople brazo secundario - base móvil	Es el elemento conector de la parte inferior del paralelogramo con la plataforma móvil, de manera análoga que el acople brazo principal con paralelogramo, en éste residen los componentes machos de la dupla de juntas esféricas.

Tabla 3-3.: Descripción de acoplos presentes en el robot delta.

3.3.2. Dimensionamiento de componentes

- **Optimización del espacio de trabajo:** Para el caso del robot Delta la función a optimizar era el volumen de trabajo, dicho volumen no se trataba de una figura regular; como en muchos procesos de optimización, en este caso se trabajaba con una nube de puntos dentro de los que la cinemática inversa del robot tenía solución. Asimismo se debían tener en cuenta ciertas limitantes de espacio, las cuales en modo general representarían las restricciones para la función de optimización. Las restricciones empleadas se obtuvieron de tres fuentes principales, inicialmente las limitantes del mecanismo del robot delta (Figura 3-14 y Figura 3-15), que en general se derivan de la geometría del mismo, en segunda medida el espacio de trabajo deseado preliminarmente; por medio del cual se creó una idea inicial de las dimensiones aproximadas del robot y finalmente en concordancia con el punto anterior, se obtuvieron parámetros de referencia a partir del benchmarking, en términos de similitudes con los robots existentes, esto es se observó que de modo general existe una relación en la que la altura del espacio de trabajo corresponde al 40 % de la longitud máxima entre plataformas del robot delta, cabe destacar que este resultado se obtuvo de manera comparativa entre los modelos empleados en el benchmarking, pero no constituye una ley general para el diseño de robots tipo delta.

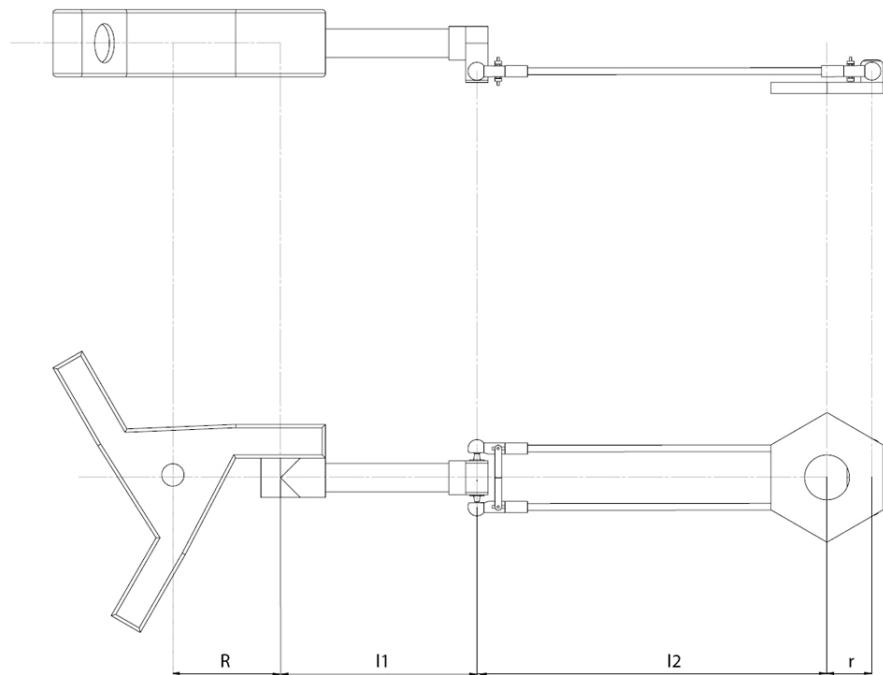


Figura 3-14.: Restricciones geométricas para el robot delta (Alcance horizontal).

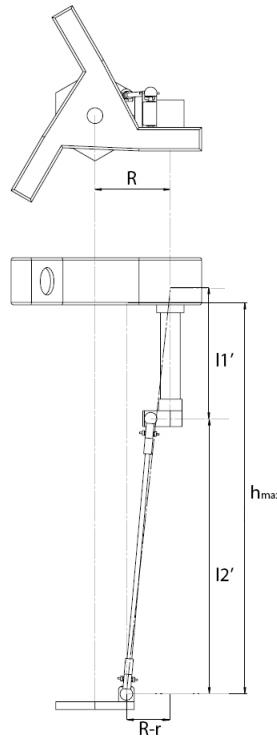


Figura 3-15.: Restricciones geométricas para el robot delta (Altura).

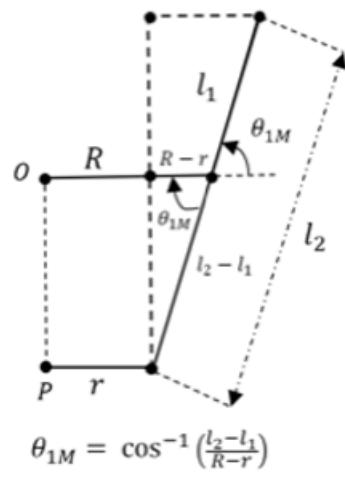


Figura 3-16.: Restricciones geométricas para el robot delta (ángulo actuado máximo).

- **Algoritmo de optimización:** El proceso de optimización se puede dividir en tres etapas, definición espacio máximo y restricción de parámetros, variación de parámetros de prueba y evaluación de espacio obtenido, esta secuencia se fundamento en los trabajos [16] y [15].

1. Discretización: En esta etapa se definen las dimensiones máximas de la nube de puntos, en esta fase son importantes las limitaciones geométricas del mecanismo, ya que éstos corresponderán a los máximos del espacio a evaluar, de modo que no se incluirán puntos que simplemente por limitaciones físicas no estén en el espacio de trabajo, y en segunda media es espaciado entre estos puntos, en términos prácticos 1 mm debería ser la medida de paso entre puntos, sin embargo para reducir cálculos se tomó 10 mm (Dado que se requiere resolver la cinemática inversa para cada punto de ésta nube, lo cual representaría una gran cantidad de cálculos). Del mismo modo definido el espacio de trabajo máximo se precisan las restricciones de los parámetros a optimizar, como se mencionó previamente dichas limitaciones provienen de la geometría del mecanismo y del proceso de benchmarking.
2. Variación: Una vez definidas las restricciones de los parámetros y la nube de puntos, se procede a variar los parámetros en pasos de 10mm para cada uno, esto implica bucles anidados para la variación de cada uno de los parámetros (4 ciclos) y tres bucles más para la validación de cada conjunto de dimensiones para la nube de puntos. Dado que el objetivo es encontrar la combinación de dimensiones que generen la mayor cantidad de puntos con solución para la cinemática inversa, se almacenan una variable booleana que sirve de prueba para confirmar la existencia del punto.
3. Evaluación: Finalmente la serie de valores correspondientes a los parámetros que presenten la mayor cantidad de puntos, es la que maximiza el espacio de trabajo del robot y por tanto la que se considera óptima.

- **Dimensiones óptimas:** Las dimensiones óptimas para el robot delta fueron aquellas que produjeron el volumen máximo del espacio de trabajo discretizado, esto es las dimensiones que tuviesen la mayor cantidad de puntos en el espacio cinemáticamente alcanzable (puntos para los cuales existiera una solución a la cinemática inversa), dichos valores se presentan en la siguiente tabla con su respectivo parámetro asociado.

Restricciones		Resultados
Restricción para espacio de trabajo vertical	$l_1 + l_2 = 480 mm$	$l_1 = 352 mm$
Restricción específica para dimensiones de los brazos	$\frac{l_2}{2} \leq l_1 \leq \frac{3l_2}{4}$	$l_2 = 176 mm$
Restricción dimensional para la base fija	$96 mm \leq R \leq 160 mm$	$R = 96 mm$
Restricción dimensional para la base móvil	$20 mm \leq r \leq 40 mm$	$r = 40 mm$

Tabla 3-4.: Restricciones dimensionales planteadas para el robot delta.

- **Espacio de trabajo alcanzable cinemáticamente:** Una vez definidos los parámetros dimensionales del robot delta, es preciso revisar el espacio de trabajo que se alcan-

zaría cinemáticamente, esto es las coordenadas de la nube de puntos, para las cuales existe una solución a la cinemática inversa, sin tener en consideración ninguna restricción física del mecanismo como tal, de modo pues que éste sería el mayor espacio de trabajo posible. No obstante dada la presencia de restricciones geométricas del manipulador delta que limitan el espacio de trabajo, además de las juntas, es preciso definir los límites laterales como de altura de la nube de puntos con la que se evalúa el espacio de trabajo, con las dimensiones optimas determinadas los rangos de la nube de puntos se encuentran en la Tabla 3-5; cabe resaltar que para la restricción de altura superior de determino mediante la iteración del mayor punto para el cual existía una solución para la cinemática inversa considerando un ángulo máximo $\theta_1 = 56^\circ$, el cual se obtiene por la restricción de subida máxima de los brazos principales. Cabe resaltar que

Restricciones	Máximo	Mínimo
Alcance lateral	$l_1 + l_2 + r - R = 472 \text{ mm}$	$l_1 = 352 \text{ mm}$
Altura	$\sqrt{(l_1 + l_2)^2 - (R - r)^2} \cong 500 \text{ mm}$	170 mm

Tabla 3-5.: Rangos dimensionales para la nube de puntos.

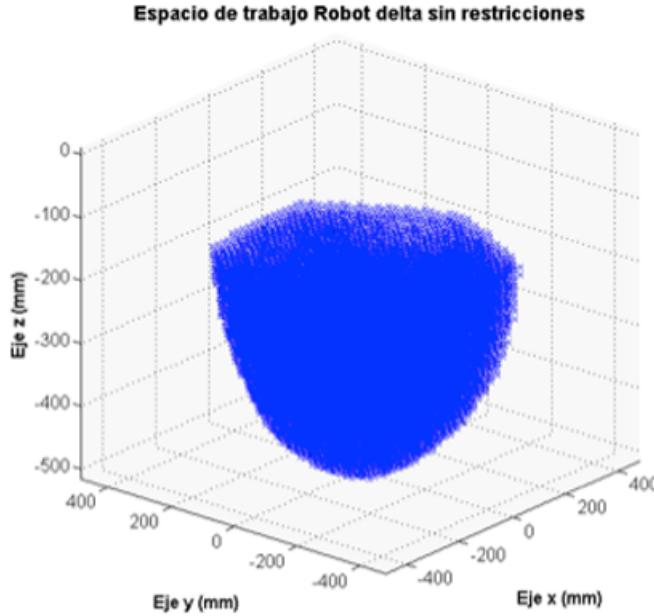


Figura 3-17.: Espacio de trabajo del robot delta sin restricciones.

visto desde el plano x,y se observa una figura semejante a un hexágono regular, y en el caso de los planos x,z y y,z se tiene una proyección de dicho hexágono similar a un parabolóide. Es destacable que mediante el algoritmo de cálculo de espacio de trabajo, se obtuvieron los puntos límite para caja eje de movimiento, los cuales se presentan en la Tabla 3-6.

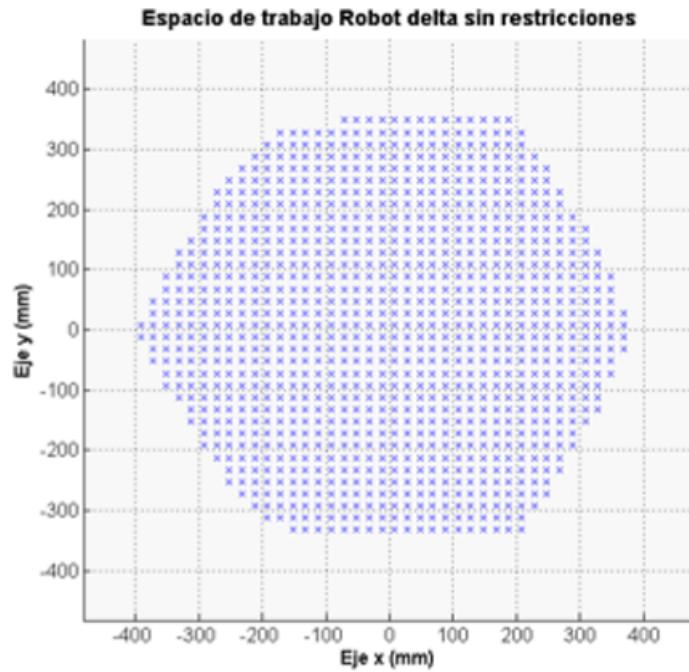


Figura 3-18.: Espacio de trabajo del robot delta sin restricciones –Plano xy.

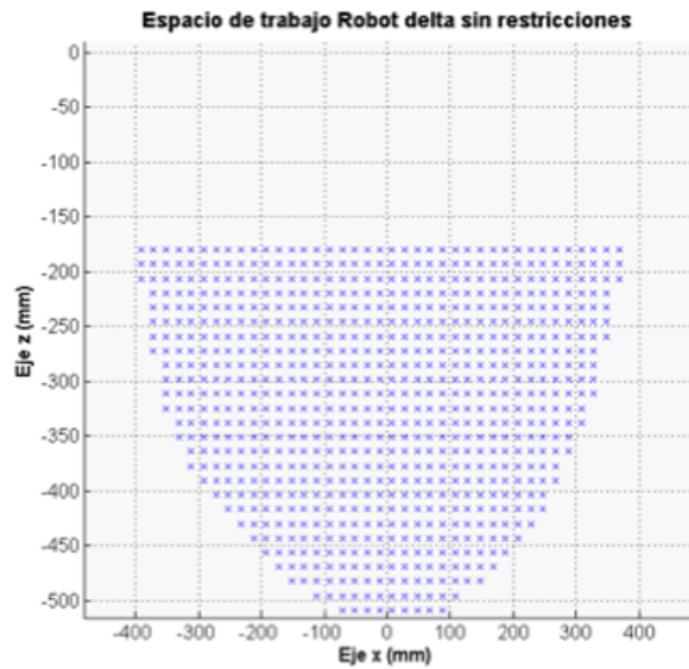


Figura 3-19.: Espacio de trabajo del robot delta sin restricciones –Plano xz.

- **Espacio de trabajo alcanzable con restricciones por mecanismo:** Tomando en consideración las limitaciones de movimiento que tiene el mecanismo que compo-

Eje coordenado	Máximo (mm)	Mínimo (mm)
Eje x	-392	368
Eje y	-332	348
Eje z	180	522

Tabla 3-6.: Rango de movimiento del robot delta por cada eje coordinado.

ne al robot delta, en particular lo referente a juntas, se generan ciertas restricciones cinemáticas, que inciden negativamente en el espacio de trabajo, esto es, dichas restricciones limitan en gran medida la movilidad del robot. En la Tabla 3-7, se describe la incidencia que tiene cada uno de los ángulos asociados a la cinemática del manipulador delta, así como la relación de estos con la junta mecánica a la que corresponden. En consideración al tipo de juntas esféricas con las que se pretende construir el robot delta, teniendo en cuenta la mejor relación precioutilidad se tiene proyectado la adquisición de juntas que viene limitadas a un ángulo por lado, en el caso de emplearse las juntas sin modificación se tendría un espacio de trabajo extremadamente limitado, por lo tanto se plantea la modificación de dichas juntas para lograr un espacio de trabajo más amplio, incrementando el ángulo lateral a 35° , este proceso implicaría el corte de parte del zócalo de las juntas, un procedimiento que en términos general no implica una gran complejidad ni elevados costos. De manera tal que con las restricciones de movimiento para las juntas esféricas y el ángulo máximo que puede alcanzar el brazo principal, el espacio de trabajo resultante consistiría en un prisma con base hexagonal de apotema 172 mm durante una altura constante en el rango de 200 mm hasta 400 mm (zonas roja y azul de la Figura 2-20), para finalizar la parte inferior en forma de paraboloide (zona negra de la Figura 2-20). No obstante, la restricción del ángulo máximo para el brazo principal es únicamente geométrica y en la práctica el robot delta no sería capaz de alcanzar un ángulo tan elevado, por lo tanto como medida de seguridad en lugar de emplear la restricción geométrica de $\theta_1 = 56^\circ$, se redefine como $\theta_{1M} = 20^\circ$ abogando principalmente a términos de diseño de la plataforma fija, dado que para ángulos superiores representaría una colisión directa, asimismo se maneja un rango de 8° como factor de seguridad, puesto que a pesar de que en la práctica el controlador implementaría esta restricción es necesario proveer un espacio de desaceleración para los actuadores como elemento preventivo. Se destaca el hecho de que en la zona coloreada de rojo, en la periferia se observan perdidas volumétricas en el espacio de trabajo, ocasionadas por la restricción del ángulo de subida, sin embargo no están tan acentuadas. Asimismo se tiene que si no se considerase esta restricción al sumar las franjas roja y azul, se tendría un espacio de trabajo muy superior al precisado como requerimiento, en términos de altura, pero bastante ceñido a lo precisado en lo referente al radio. Con la restricción del ángulo de subida máximo se limita parcialmente el espacio de trabajo, principalmente en términos de altura, se aprecia que la zona en rojo de la Figura

Junta	Ángulo	Incidencia
Rotacional	θ_1	Es la junta que conecta la salida del motor/reducción al brazo principal del mecanismo. Ne general por el diseño geométrico puede tener un rango de movimiento de 180° esto es partiendo como posición de 0° están alineada con la base fija y a partir de allá un movimiento de 90° por cada sentido. Dada el diseño del robot en esta junta no se tienen limitaciones físicas sin embargo están asociadas limitaciones de control para garantizar el espacio de movimiento deseado.
Esférica	θ_2	Es el primer ángulo de movimiento de la junta esférica este movimiento es concordante con θ_1 y en general la junta no está restringida en este ángulo por lo tanto no afecta la movilidad del mecanismo.
	θ_3	Previamente denominado movimiento lateral constituye el segundo grado de movimiento de la junta esférica además de ser el más influyente en la movilidad del robot. Dado que de este ángulo depende en gran medida el radio del espacio de trabajo del robot si este grado de movimiento es limitado se tendrá un espacio de trabajo bastante restringido. Sin embargo por la construcción física de la junta este movimiento no puede superar los 45° en la mayoría de los casos.
Rotacional	Restricción junta esférica	Para evitar el tercer grado de movimiento asociado a la junta esférica se emplea en general un eslabón que vincule los dos brazos del paralelogramo los cuales se conectan mediante juntas rotacionales de manera que este sistema no limita el espacio de trabajo sino por el contrario garantiza que se pueda lograr.

Tabla 3-7.: Incidencia de las juntas que conforman el mecanismo del robot delta.

3-21 se ha reducido considerablemente, respecto a la zona de la Figura **3-20**, además este volumen se asemeja a la intersección de tres esferas. Cabe resaltar que el espacio representado por la franja azul conserva de modo general sus dimensiones, lo que se traduce en un potencial para ser el espacio de trabajo final. En lo referente al volumen coloreado de negro no representa gran utilidad debido a que decrece constantemente de radio, lo cual resultaría inconveniente como parte del espacio de trabajo efectivo. Finalmente para la determinación del espacio de trabajo efectivo mediante el modelo

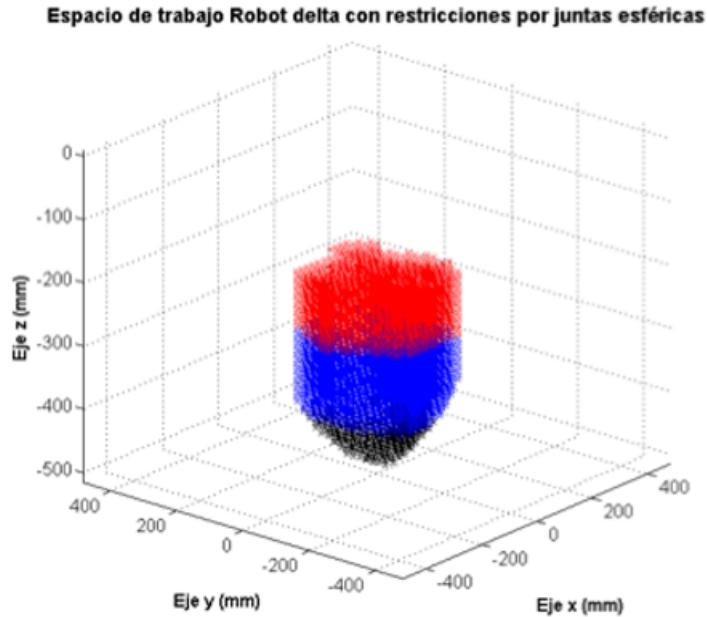


Figura 3-20.: Espacio de trabajo del robot delta con restricciones por juntas.

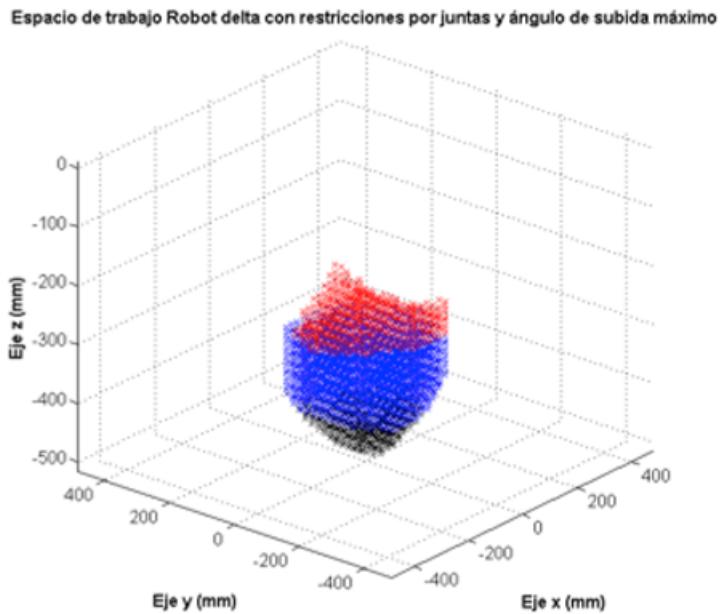


Figura 3-21.: Espacio de trabajo del robot delta con restricciones por juntas y ángulo de subida.

virtual de robot, se verificó la presencia de colisiones en el espacio coloreado de azul en la Figura 3-21, considerando las restricciones geométricas que lo limitan, a pesar de la reducción en términos de volumen del espacio de trabajo, con esto se garantizó una zona libre de colisiones y con rangos de seguridad como medida preventiva. En

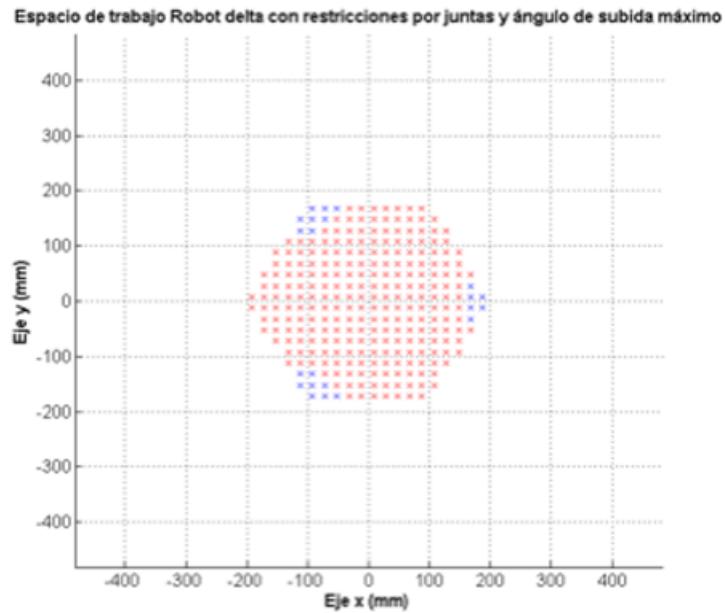


Figura 3-22.: Espacio de trabajo robot delta con restricciones por juntas y ángulo de subida
- Plano xy.

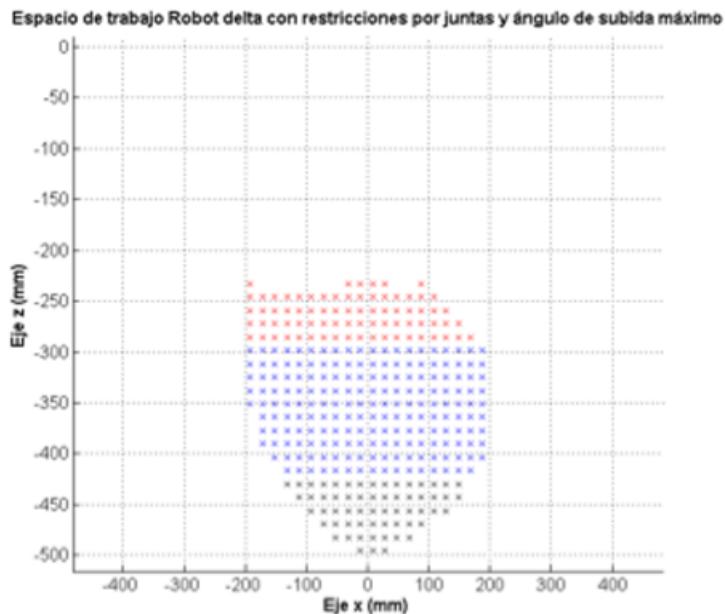


Figura 3-23.: Espacio de trabajo robot delta con restricciones por juntas y ángulo de subida
- Plano xz.

general la forma del espacio de trabajo final resultó en un cilindro cuyas dimensiones se consignan en la Tabla 3-1. Cabe resaltar que con la potencial implementación del controlador dicho espacio de trabajo sería manejado por tal conjunto de dispositivos, así

como elementos de seguridad adicionales para un apropiado control del manipulador.

Espacio de trabajo final - Dimensiones cilindro				
Radio	Rango x-y	Altura	Rango z	Posición home
170 mm	$\sqrt{x^2 + y^2} \leq 170 \text{ mm}$	130 mm	[-290, , -420]	[0 0 – 350] mm

Tabla 3-8.: Rangos dimensionales del espacio de trabajo final.

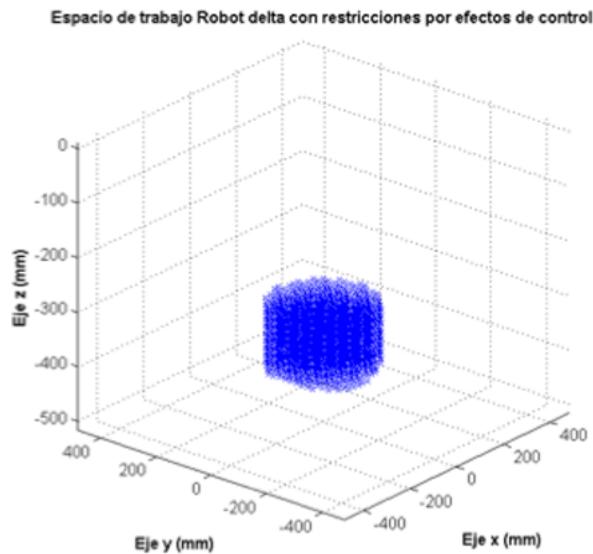


Figura 3-24.: Espacio de trabajo del robot delta con restricciones por control.

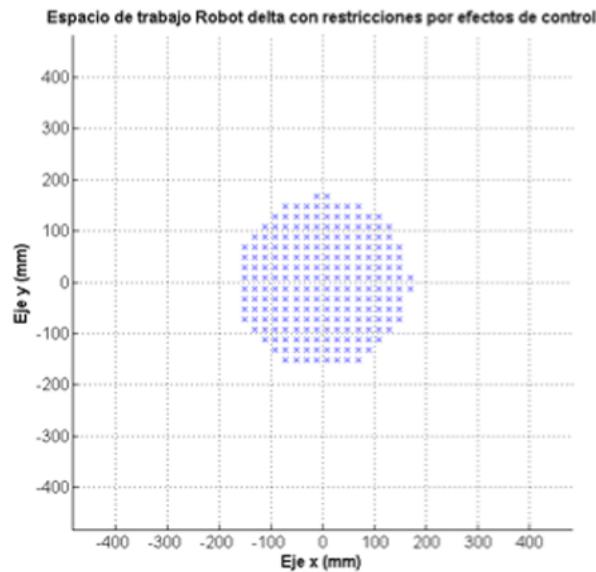


Figura 3-25.: Espacio de trabajo del robot delta con restricciones por control – Plano xy.

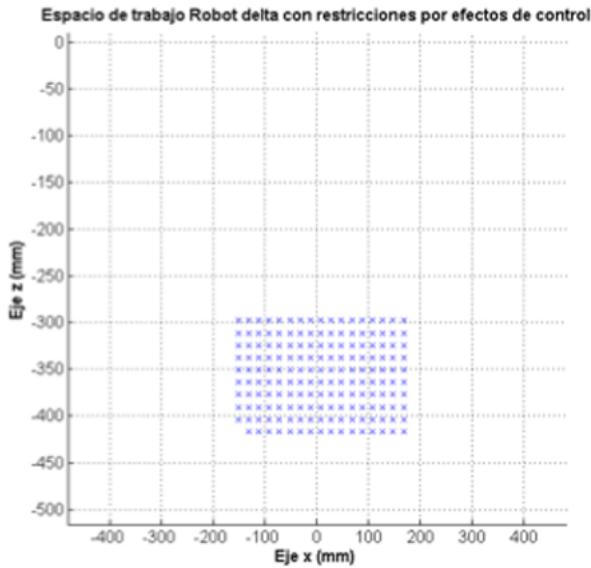


Figura 3-26.: Espacio de trabajo del robot delta con restricciones por control – Plano xz.

3.4. Diseño de detalle

3.4.1. Tabla de piezas y accesorios

Véase anexo A.

3.4.2. Sistema de ajuste

Para garantizar la precisión en los montajes que requiere el robot delta, en particular los que se encuentran conectados mediante tornillos, tuercas o roscas, se optó por la adición de un elemento adicional denominado pin de ajuste, el cual es un cilindro de reducido diámetro que se utiliza como guía para enlazar dos piezas, en general se añadieron en duplas de pines para restringir la movilidad de la conexión. Este sistema es necesario, puesto que por sí mismos los tornillos no se usan como guías de montaje, su función primordial es la de establecer una unión desmontable entre varias piezas. Cabe resaltar que de la dupla de pines considerados uno de los agujeros donde se incrusta el pin requiere de una tolerancia dimensional positiva, esto es debe ser dimensionalmente mayor al diámetro del pin, esto con el fin de permitir cierta holgura necesaria al momento del ensamblaje de las piezas a conectar. Los pines de montaje se utilizaron en dos acoplos, inicialmente en el acople de motor a base fija, donde únicamente se planteaba una conexión directa mediante dos tornillos de cabeza tipo Allen por cada soporte, a pesar de que este la cabeza de este tipo de tornillos permite la alineación de los mismos, fue necesaria la adición de los pines, debido a la geometría de la base fija, esto es, dada la complejidad dimensional si no se cuenta con una guía precisa para el montaje de los soportes, el funcionamiento del manipulador puede verse comprometido por diferencias

en los parámetros geométricos requeridos. El segundo acople en el que se emplearon pines de ajuste fue el encargado de conectar el motor con el brazo principal, más exactamente la brida que ajusta con la chaveta del eje del motor y el brazo principal, en este caso aunque se empleó un arreglo de 6 tornillos para sujetar la piezas mencionadas, los pines de ajuste garantizan la correcta alineación de los tornillos con el agujero pasante que atraviesan. El

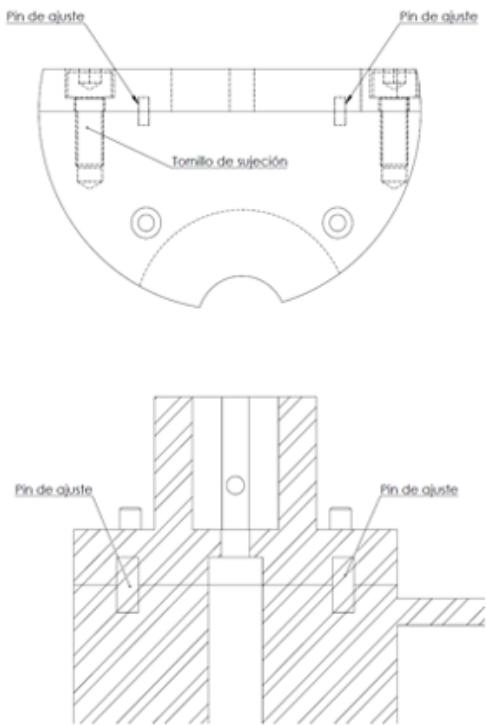


Figura 3-27.: Conjuntos de pines de ajuste usados en acoplos del manipulador delta (Base fija – superior, Acople chaveta – inferior).

pin de ajuste elegido fue un cilindro de diámetro 4 mm y 10 mm de altura, elaborado en acero AISI 1020; la tolerancia dimensional para los agujeros donde se inserta el pin fue de $\pm 0,2\text{ mm}$ para garantizar la fácil inserción del mismo.

3.4.3. Conexión de brazos

Para la conexión de los tubos y varas que componen los brazos principales y secundarios respectivamente a los acoplos de enlace, se precisa de un adhesivo especial para pegar superficies de fibra de carbono con superficies metálicas. En este caso se tienen cuatro puntos de conexión: acople motor –brazo principal con tubo brazo principal, tubo brazo principal con el acople brazo principal – paralelogramo y conector brazo secundario con vara tubo secundario, este último que conecta en ambos extremos por tanto cuenta como dos enlaces. En el primer caso la superficie de contacto es un cilindro de 30 mm de altura y 25.4 mm

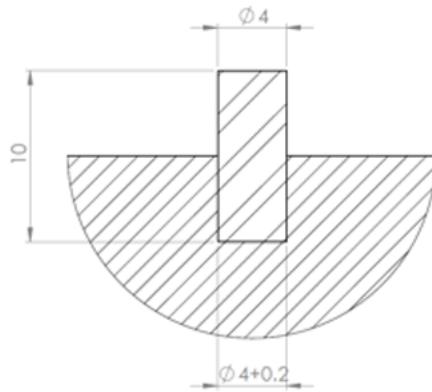


Figura 3-28.: Pin de ajuste y agujero contenedor.

de diámetro, para la segunda unión también se tiene una cilindro con el mismo diámetro pero con una altura de 25 mm; el fabricante de los tubos de carbono recomienda usar una longitud del 5 % al 10 % de la longitud del tubo para el proceso de unión, en este caso al tratarse de un tubo con una longitud de 144 mm ambas superficies de contacto cumplen el requerimiento, respecto a las uniones del brazo secundario se tienen cilindros de 6 mm de radio y 20 mm de altura para una vara de 282 mm, de modo que también se satisface tal requerimiento. Del mismo modo en lo referente al adhesivo recomienda adicionar una tolerancia geométrica al acople donde se conecta el tubo o vara de fibra de carbono de +0,4 mm (0.015 in), sin embargo para los tubos propuestos en el brazo principal con un diámetro de 25.4 mm (1 in) dicha tolerancia puede solicitarse al momento del encargo, resultando en un tubo con diámetro externo de 25 mm (0.985 in). En lo relativo al acople del brazo secundario dado que la vara de fibra de carbono que conecta ambos extremos de este brazo se consigue en medida estándar de 6 mm es necesaria la adición de una tolerancia geométrica al agujero donde encaja la vara de 0.4 mm.

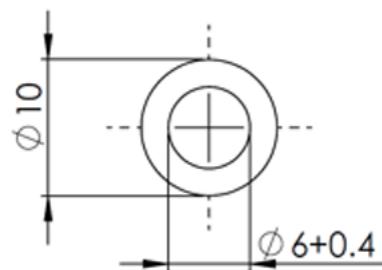


Figura 3-29.: Adición de tolerancia geométrica en el conector del brazo secundario.

En cuanto al adhesivo el fabricante de los tubos de fibra de carbono recomienda el producto denominado LOCTITE HYSOL®9430 [18], que en términos generales se trata de una resina

epóxicas con dos componentes, la resina propiamente hablando y un reactivo endurecedor, para la aplicación requerida se debe manejar una proporción de 100:20, esto es por cada 100 unidades de resina 20 unidades de endurecedor. Como se trata de seis junturas en los brazos principales y doce junturas para los brazos secundarios, teniendo un estimado de 20 *g* por juntura se precisaría de un total de 400 *g* de resina y 100 *g* de endurecedor.

4. Simulación de movimiento del robot Delta

4.1. Modelo en software

El modelo de manipulador delta propuesto fue implementado en dos software de modelado y simulación, para efectos de modelado y ensamblajes se usó Solidworks 2013®y para procesos de simulación dinámica y de elementos finitos se empleó Unigraphics NX®(en esta sección se tratará el modelo desarrollado en este último software). A partir del diseño de detalle de los componentes del manipulador delta se desarrolló el correspondiente modelo CAD de cada pieza, procurando la asignación de materiales y sus respectivas propiedades; la principal ventaja de Unigraphics NX®es que el entorno de simulación para mecanismos está basado en conexiones por juntas, en consecuencia la implementación del modelo del robot delta está más acorde al comportamiento real del mecanismo. Cabe resaltar que Unigraphics NX®usa el solver NASTRAN NX para el ambiente de simulación dinámica y análisis de elementos finitos.



Figura 4-1.: Modelo del manipulador delta sin bastidor en Unigraphics NX.

Para la simulación del manipulador delta los componentes de la división estructural se agruparon en 4 tipos de eslabones, con el fin de simplificar el modelo del mecanismo (Tabla 4-1), en lo concerniente a las juntas únicamente se emplearon uniones rotacionales y esféricas (Tabla 4-2), con la adición de resortes para limitar el movimiento de las justas esféricas en un grado de libertad rotacional.

Tipo de eslabón	Cantidad	Componentes
Base fija	1	Base fija
Brazo activo	3	Acople motor - brazo principal
		Brazo primario
		Acople brazo principal - paralelogramo
Brazo pasivo	6	Brazo secundario
		Acople brazo secundario
Base móvil	1	Base móvil
		Acople brazo secundario - base móvil

Tabla 4-1.: Eslabones del mecanismo de simulación para el robot delta.

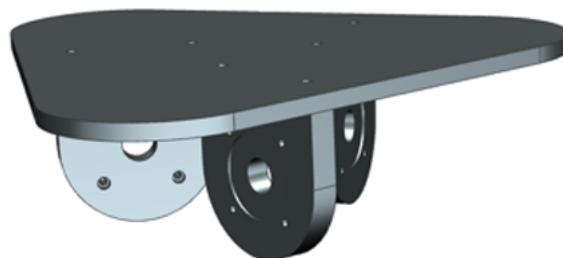


Figura 4-2.: Eslabón tipo 1 - Base fija.

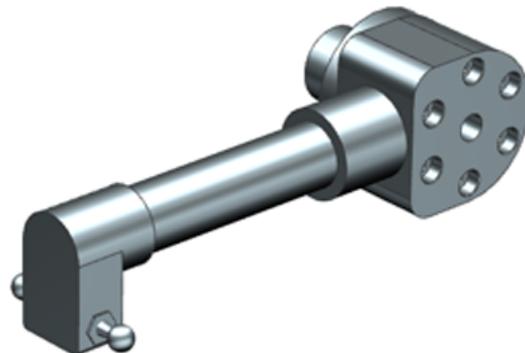


Figura 4-3.: Eslabón tipo 2 – Brazo activo.



Figura 4-4.: Eslabón tipo 3 – Brazo pasivo.

Tipo de junta	Cantidad	Conexiones	Movilidad (GDL)
Juntas rotacionales	3	Eje motor - Brazo activo	1
Juntas esféricas superiores	6	Brazo activo - Brazo pasivo	2
Juntas esféricas inferiores	6	Brazo pasivo - Base móvil	2

Tabla 4-2.: Juntas utilizadas para el modelo se simulación.

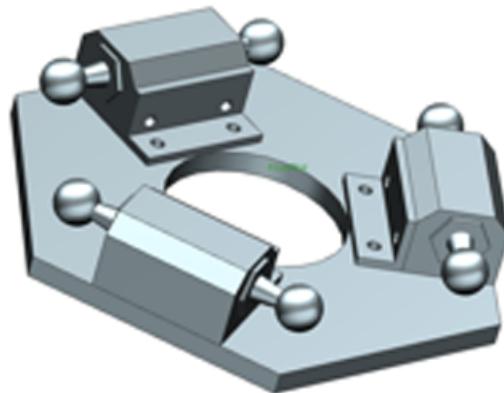


Figura 4-5.: Eslabón tipo 4 – Plataforma móvil.

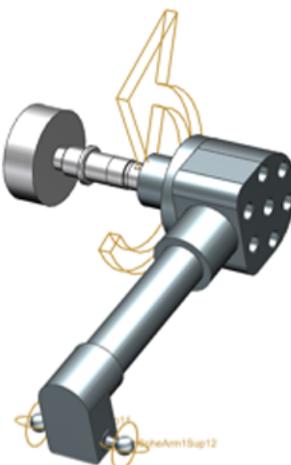


Figura 4-6.: Junta rotacional y juntas esféricas superiores.

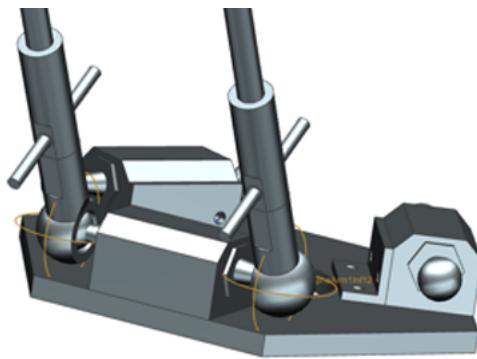


Figura 4-7.: Juntas esféricas inferiores.

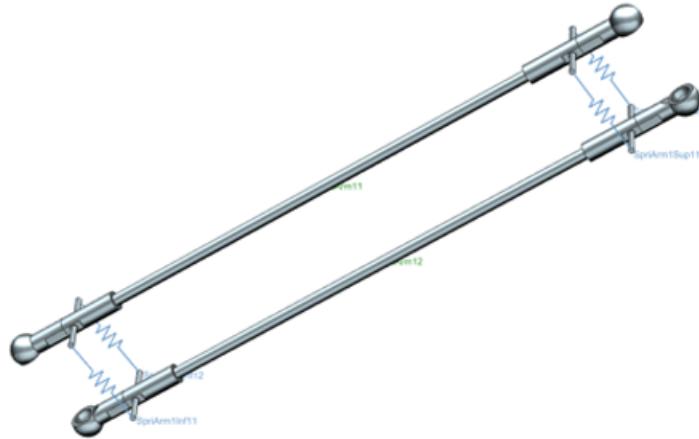


Figura 4-8.: Resortes de conexión en brazo pasivo.

Tipo de restricción	Cantidad	Conexiones	Restricción (GDL)
Resortes de conexión	12	Conexión entre brazos secundarios (4 por brazo pasivo, 2 en la sección superior y 2 en la sección inferior).	1 (Grado de rotación en cada junta esférica en el sentido el brazo secundario).

Tabla 4-3.: Restricciones empleadas en el modelo de simulación.

4.2. Perfiles de movimiento e interpoladores

Para la simulación se precisaron perfiles de movimiento para cada brazo articulado, sin embargo previamente se requirió la definición de la trayectoria que seguiría el efecto final del robot, para efectos de prueba se utilizó el ciclo Pick and Place estándar entre los puntos

(-150, 0, -350), (-150, 0, -300), (150, 0, -300) y (150, 0, -350). Esta trayectoria se encuentra en la Figura 3-9. Inicialmente los perfiles de movimiento se consideraron tipo trapezoidal

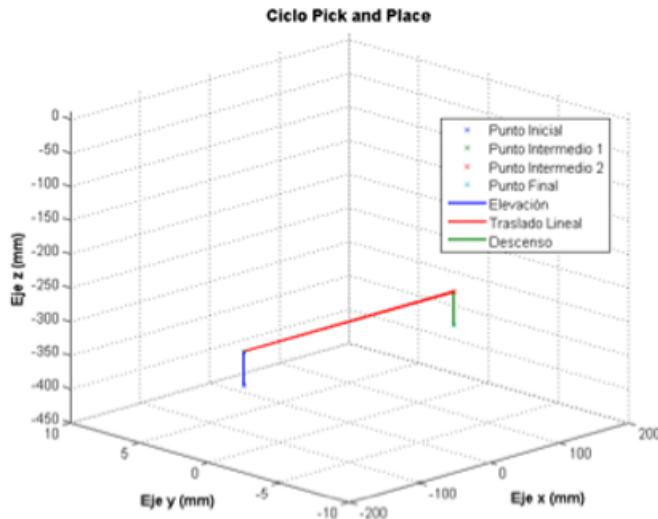


Figura 4-9.: Ciclo de pick and place de prueba.

para la velocidad angular de manera tal que se obtuviera una función de segundo orden para la posición angular, el movimiento se compone en tres trayectorias una primera de subida, luego desplazamiento horizontal para finalizar con la bajada, la distribución en tiempo de estos movimientos fue 15 %, 70 % y 15 % respectivamente, asimismo para cada movimiento individual, se empleó una organización tipo 3/10 - 4/10 - 3/10, lo que se traduce como una primera etapa de aceleración de 3/10 del tiempo seguida de una fase de velocidad constante de 4/10 del tiempo, para finalizar con desaceleración de 3/10 del tiempo. Dado que el movimiento es en solamente dos ejes coordenados, dos articulaciones para ser precisos, la segunda y tercera presentan el mismo perfil de movimiento, de manera que los perfiles se tienen en la Figura 4-10 y en la Figura 4-11. Los perfiles de movimiento de la Figura 4-10 y Figura 4-11 son interpolaciones realizadas para tres movimientos, sin embargo únicamente contienen 4 puntos de control, es decir los puntos iniciales y finales de cada segmento de movimiento, esta situación para efectos de implementación no sería útil debido a que no existiría seguimiento en toda la trayectoria propuesta. Para solventar esta situación es necesario crear una serie de puntos intermedios entre los extremos de la trayectoria a recorrer, este proceso constituye una interpolación en el espacio de la tarea, es decir cada cierto periodo de tiempo se generan puntos intermedios de la trayectoria para que el extremo del robot siga con determinada orientación, posteriormente dichos puntos se convierten al espacio de las articulaciones y se generan una serie de perfiles de movimiento para los actuadores con los que se especifica el movimiento que va a seguir el robot.

Para interpolar en el espacio de la tarea se emplearon perfiles de tipo trapezoidal en velocidad [3], lo que se traduce a un perfil de segundo orden para posición, para la definición de los

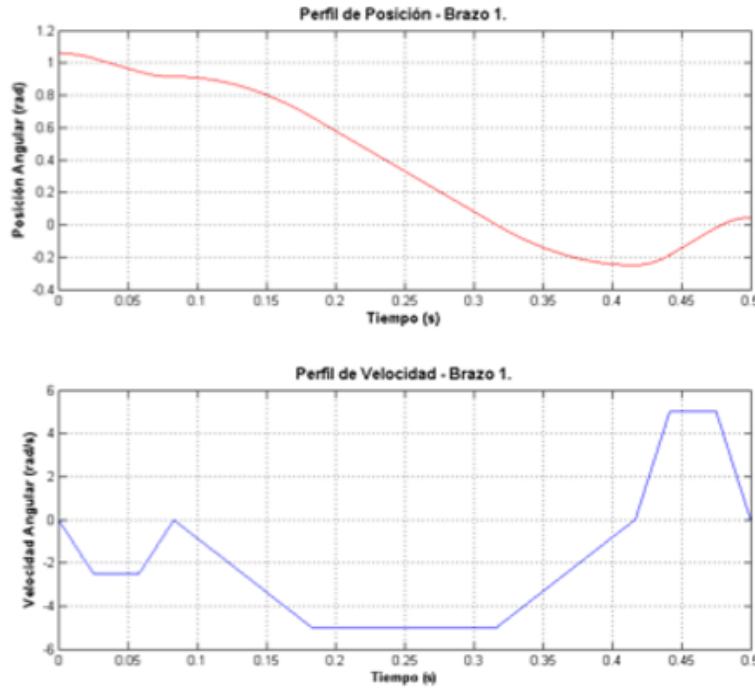


Figura 4-10.: Perfiles de movimiento para el brazo 1.

perfíles de movimiento se precisan de tres parámetros relevantes los cuales se consignan en la Tabla 4-4.

Parámetro	Símbolo	Descripción
Tiempo de aceleración	T_a	Es el tiempo en que se desarrollan los procesos de aceleración y desaceleración del perfil de movimiento.
Paso de tiempo	p	Intervalo de tiempo en el que se subdivide el tiempo de movimiento total.
Velocidad máxima	v_{max}	Es la velocidad tope que se logra con el perfil de movimiento.

Tabla 4-4.: Parámetros del perfil de movimiento trapezoidal.

A modo de ejemplo se tiene un conjunto de perfiles de movimiento con un desplazamiento total de 30 unidades, se definió un tiempo de aceleración de 1 unidad de tiempo y una velocidad tope de 10 unidades de distancia sobre tiempo, se observa que los dos primeros parámetros fijan las pendientes de subida y bajada para el perfil trapezoidal, con lo cual se define por completo el movimiento, para efectos de implementación también se requiere definir una variable para discretizar el transcurso del tiempo denominada paso. De manera general el interpolador puede definir una trayectoria en línea recta entre cualesquiera dos

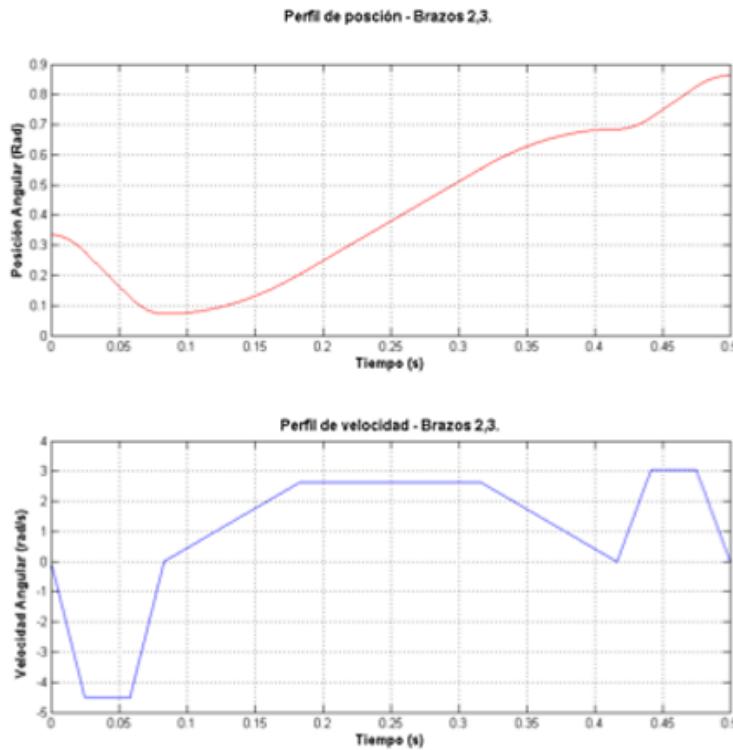


Figura 4-11.: Perfiles de movimiento para los brazos 2 y 3.

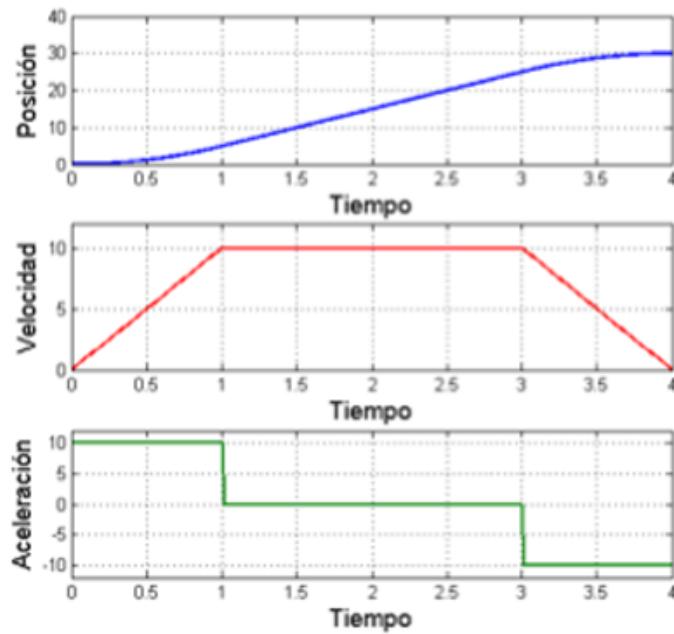


Figura 4-12.: Perfiles de movimiento para un desplazamiento de 30 unidades.

puntos en un espacio tridimensional, en el caso particular del robot delta si la definición

de los extremos de la trayectoria están dentro del espacio de trabajo del manipulador, es posible seguir el trayecto con los puntos generados por el interpolador. Debido a que el proceso de interpolación se realiza en el espacio de la tarea son requeridos naturalmente dos parámetros adicionales, la posición inicial q_0 y la posición final q_1 de la trayectoria, dado que sirven para definir la distancia total a recorrer, así como la dirección del movimiento. Asimismo resulta conveniente dividir el movimiento en tres etapas, la primera de ellas la fase de aceleración, la segunda la fase de movimiento con velocidad constante y finalmente la etapa de desaceleración. En lo relativo al tiempo también es posible añadir dos términos, el primero y totalmente necesario es el tiempo inicial t_0 y el segundo es el tiempo final, el cual se pude calcular con todos los parámetros previos, sin embargo para efectos de notación se toma como t_f . A partir de la subdivisión por etapas se determinan las ecuaciones que rigen el movimiento en términos de posición, esto es la posición está definida por una función en cada etapa, como una función definida a trozos, dichas ecuaciones generales son:

$$q(t) = \begin{cases} q_0 + \frac{v_{max}}{2T_a}(t - t_0)^2 & t_0 < t < t_0 + T_a \\ q_0 + v_{max}(t - t_0 - \frac{T_a}{2}) & t_0 + T_a < t < t_1 - T_a \\ q_1 + \frac{v_{max}}{2T_a}(t_1 - t)^2 & t_1 - T_a < t < t_1 \end{cases} \quad (4-1)$$

Mediante la modificación de los parámetros asociados al interpolador es posible enlazar múltiples trayectorias, para conseguir un movimiento de mayor complejidad, el parámetro de velocidad máxima puede ser fijado, mientras que se modifica por cada trayecto los tiempos iniciales y finales, así como las posiciones. Con el conocimiento de la cinemática inversa del manipulador delta y los datos proporcionados por el interpolador (en términos prácticos constituye una matriz de 4 filas y tiempo del recorrido/paso columnas), se calcula la cinemática inversa para cada terna de puntos y para caso tiempo asociado se poseen los valores angulares para cada variable actuada del sistema en este caso la terna de ángulos $[\theta_{11} \ \theta_{12} \ \theta_{13}]$.

4.3. Simulación de movimiento

A partir del modelo del manipulador delta en Unigraphics NX® se empleó en ambiente de simulación de movimiento para evaluar la dinámica del prototipo ante un movimiento típico de retorno a posición inicial y ciclo pick & place estándar con la adición de la carga sobre el efecto final de 5 N, lo que equivale a la carga máxima descrita en los requerimientos del manipulador. Para la simulación de movimiento se fijó el punto de partida en la posición [0 0 -410], con respecto a un sistema de referencia fijo en el plano medio que cruza los tres ejes de movimiento, asimismo el punto de interés era un sistema de coordenadas ubicado en el centro de un plano que contiene las intersecciones medias de las juntas inferiores de los paralelogramos de los brazos secundarios con la base móvil, respectivamente estos dos sistemas coordinados tienen la equivalencia con los sistemas O y P del modelo geométrico del manipulador. Con dichas referencias determinadas, se estableció que la posición de home del

manipulador estaría representada en [0 0 -350], por lo tanto la primera trayectoria consistió en trasladar el efecto del robot a la posición de home, posteriormente se efectuó el ciclo de pick & place en este caso desde la posición de home hasta [-150 0 -350] pasando luego a [-150 0 -300], [150 0 -300] y finalizando en [150 0 -350], este ciclo se definió como requerimiento estándar y el tiempo precisado para realizarlo de 1 segundo, sin embargo para llevar el manipulador a condiciones de mayor exigencia y asegurar su correcto funcionamiento para dicho movimiento la trayectoria total de posicionamiento en home más el ciclo de programo para ejecutarse en el mismo tiempo. Cabe resaltar que los perfiles de movimiento se generaron con los parámetros consignados en la Tabla 4-5. Con la trayectoria planeada en el espacio de

Parámetro	Símbolo	Valor de prueba
Tiempo de aceleración	T_a	0,05 s
Paso de tiempo	p	10
Velocidad máxima	v_{max}	800 $\frac{mm}{s}$

Tabla 4-5.: Parámetros del perfil de movimiento trapezoidal utilizado para simulación de movimiento.

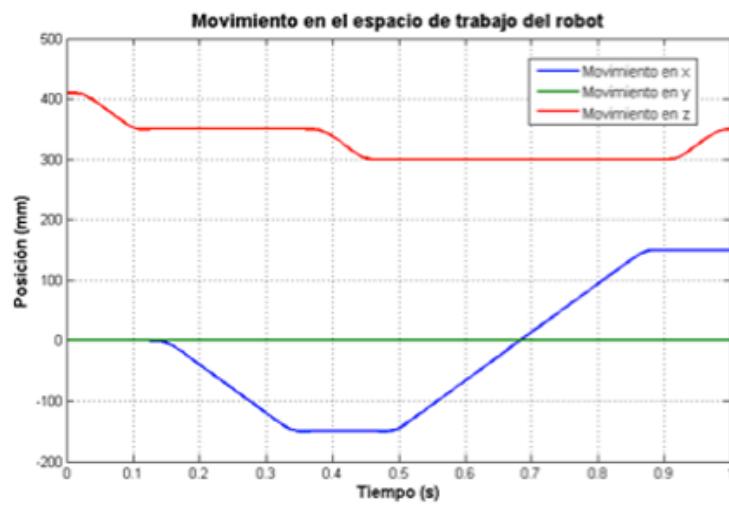


Figura 4-13.: Movimiento en el espacio de la tarea para la simulación de movimiento.

la tarea se calcularon mediante la cinemática inversa Figura 3-14 los perfiles de movimiento de posición angular requeridos para cada una de las variables actuadas, dado que el movimiento se desarrolla en el plano xz dos perfiles de movimiento articular están sobreponidos, esto es debido a la simetría del manipulador delta dos brazos describen el mismo movimiento, lo cual se observa en la Figura 4-14.

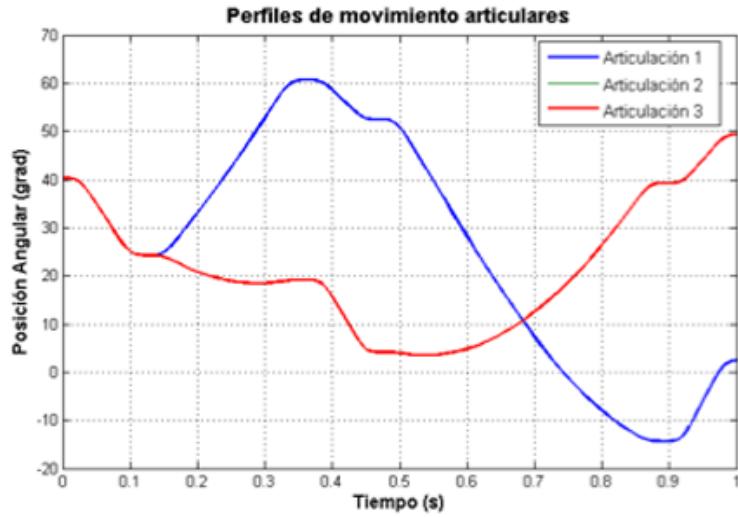


Figura 4-14.: Perfiles de movimiento articulares simulación de movimiento.

Los perfiles de la Figura 4-14 fueron calculados como posiciones angulares absolutas, sin embargo para el proceso de simulación del solver de Unigraphics NX® emplea un desplazamiento angular, esto es desde la posición inicial de ensamblaje se tiene el origen de movimiento, de manera tal que los perfiles de movimiento articular deben comenzar necesariamente en 0° para que el movimiento corresponda al requerido. Este factor es de gran relevancia puesto que si no se realiza la corrección de los perfiles de movimiento, el resultado no correspondería al planteado, de manera tal que se resta la posición inicial de cada valor del perfil (es decir un valor DC igual a la posición inicial) consiguiéndose el perfil necesario para la simulación, el cual se encuentra en la Figura 4-15. Como resultado de la simulación de movimiento fue

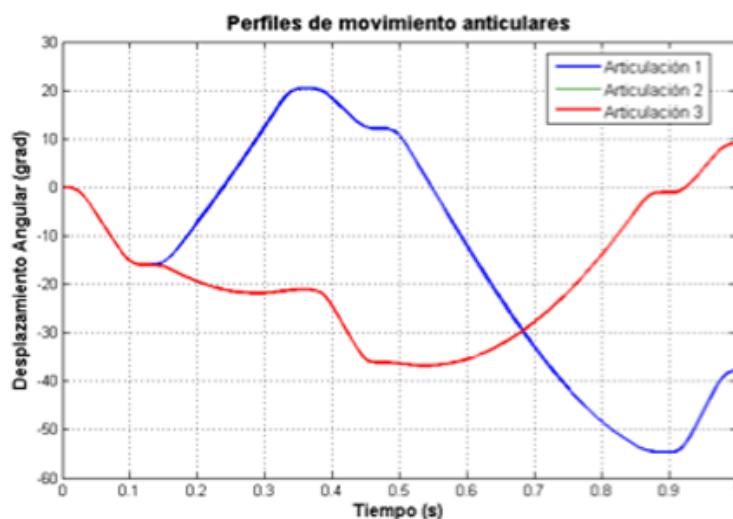


Figura 4-15.: Perfiles de movimiento articulares de desplazamiento angular neto.

possible obtener el comportamiento de torque instantáneo en para cada junta actuada, por ende el torque requerido para los respectivos actuadores, en la Figura 4-16 se presentan los torques absolutos correspondientes a cada articulación, de esta manera es posible determinar el torque pico requerido en el sistema. Cabe resaltar que para la articulación 1, la cual se encuentra alineada con el eje x del sistema de referencia **O** se tiene la mayor exigencia en torque debido a que la mayor parte del movimiento se encuentra en este eje. Asimismo por razones de simetría del manipulador las articulaciones 2 y 3 presentan perfiles superpuestos de torque ya que en la práctica describen el mismo perfil de movimiento. En lo referente a

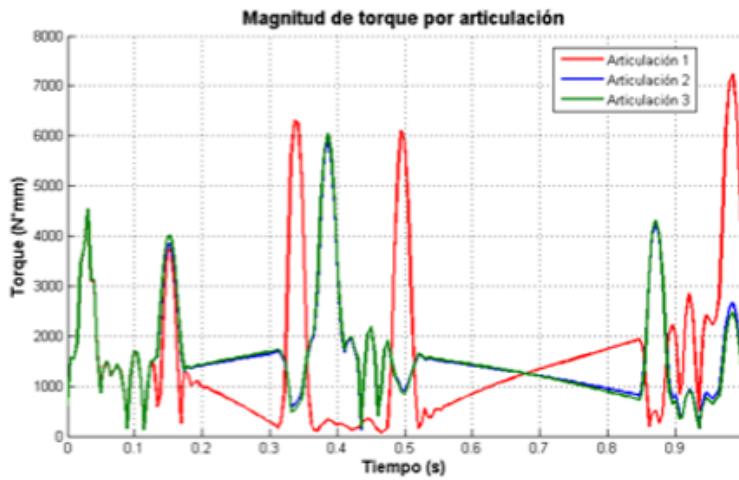


Figura 4-16.: Magnitud de torque por articulación.

velocidad angular, se obtuvieron perfiles superpuestos para las articulaciones 2 y 3, debido a que describen el mismo movimiento, de igual forma se tiene que el comportamiento de la velocidad angular es la derivada del perfil de posición angular provisto a cada actuador, con la particularidad de estar descrito en términos de magnitud, se puede apreciar en la Figura 3-17 que la mayor velocidad desarrollada se presenta en la articulación 1, debido principalmente a que el movimiento descrito por el manipulador se encuentra alineado con dicha articulación. Cabe resaltar que el requerimiento principal del robot está en términos de torque puesto que la velocidad máxima desarrollada no supera las 50 rpm. Otra magnitud de interés es la velocidad lineal absoluta que desarrolla el efecto final del manipulador, puesto que es un parámetro relevante al evaluar el desempeño del robot, en este caso se observa el resultado directo de los perfiles de movimiento trapezoidal que se generaron para describir la trayectoria, puesto que la velocidad máxima del perfil fue de $800 \frac{mm}{s}$ lo cual se observa con claridad en la Figura 4-18. Del mismo modo se aprecian los 5 recorridos de la trayectoria de prueba, inicialmente el trayecto a home y posteriormente el ciclo de pick & place representado en los tres trapezoides finales. Finalmente respecto a la magnitud de aceleración en el efecto final, se aprecia en la Figura 4-19 que el tope de aceleración se encuentra cercano a 3.5 G, con la mayoría de los picos de aceleración en 3G. En general se tienen dos fases

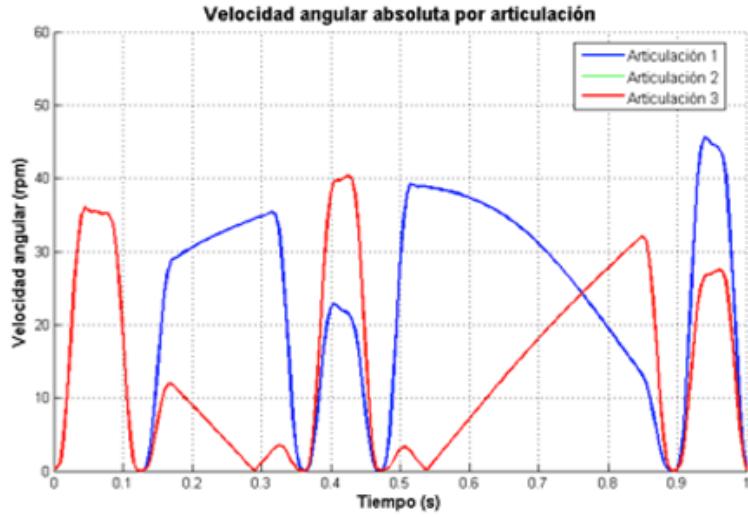


Figura 4-17.: Magnitud de velocidad angular por articulación.

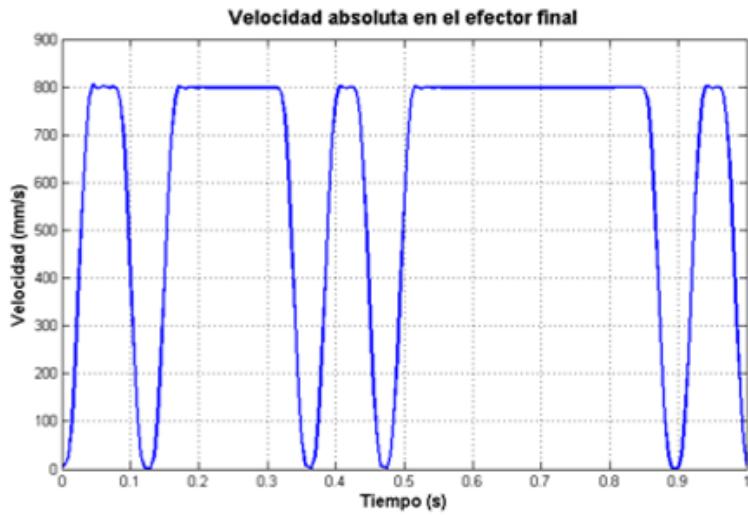


Figura 4-18.: Magnitud de velocidad lineal en el efecto final.

de cambio de aceleración por casa perfil de forma trapezoidal de la velocidad lo cual está en concordancia con la trayectoria propuesta en la simulación de movimiento. Asimismo se tienen fases de aceleración nula en presencia de velocidad constante, la cual es mayormente visible en el periodo de tiempo entre 0.5 s y 0.9 s, que corresponde a l movimiento de mayor longitud que se desarrolla en la trayectoria total.

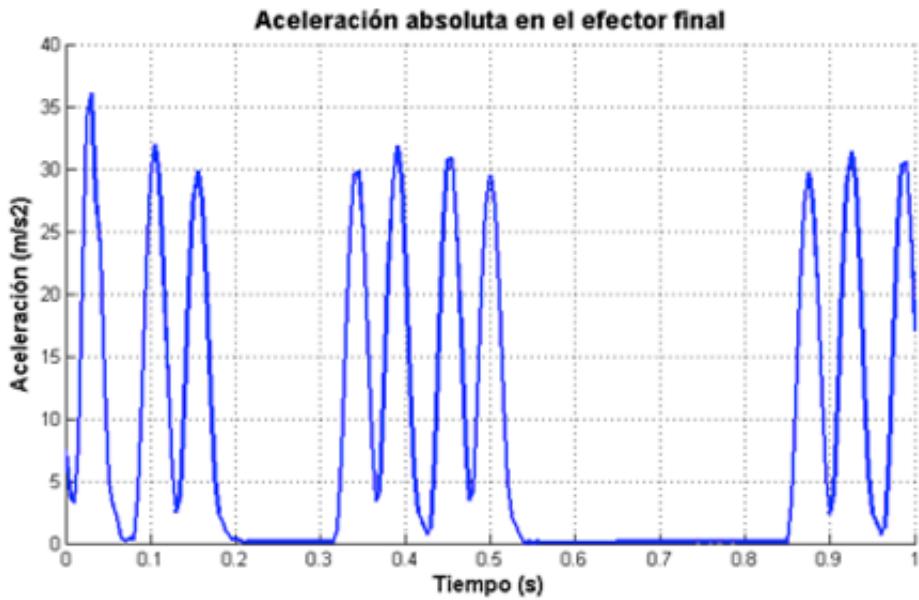


Figura 4-19.: Magnitud de aceleración lineal en el efecto final.

4.4. Selección de actuadores

Para la selección de los actuadores que impulsarían el manipulador delta se precisan datos relativos a torques (pico y RMS), velocidad angular máxima y relación de inercia entre la carga y la inercia del motor. Tanto para el torque pico y la velocidad angular máxima se puede acudir a la Figura 4-16 y la Figura 4-17, en cada caso la articulación presenta los valores tope de dichas variables. Para torque RMS se precisó de un cálculo adicional de los datos de torque instantáneo, esto es, a partir de la ecuación 3.2 y mediante el diagrama en Simulink® de la se obtuvo esta magnitud.

$$\tau_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} |\tau(t)|^2 dt} \quad (4-2)$$

En lo referente a la inercia de la carga, mediante la simulación del modelo fue posible obtener la inercia reflejada sobre el eje del actuador en cada instante, con esta información se tiene un parámetro adicional para la selección de los motores, como se aprecia en la Figura 3-21 para las articulaciones 2 y se tiene el mismo perfil de inercia, dado que están siguiendo el mismo perfil de movimiento y en el caso de la primera articulación es la que presenta la mayor inercia reflejada, lo cual puede ser entendido en la medida que la trayectoria de prueba esta alienada con esta articulación, por lo tanto sobre este actuador se verá reflejada la mayor parte de la carga. Finalmente en la Tabla 4-6 se consignan los valores de torque, velocidad angular e inercia de la carga requeridos para la selección de los actuadores, en cada caso se presenta el valor máximo para cada magnitud, con esto se garantiza que los actuadores sean capaces de trabajar frente a la condición más rigurosa en el manipulador.

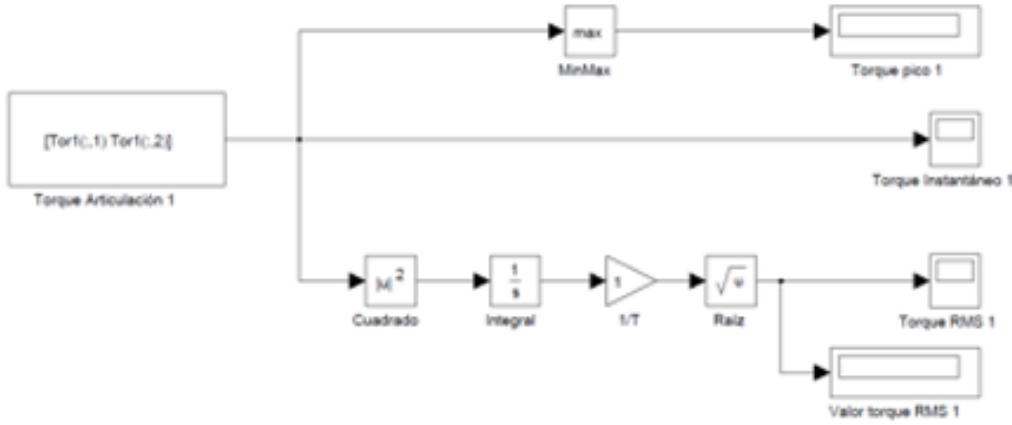


Figura 4-20.: Bloque en *Simulink* para calcular Torque RMS.

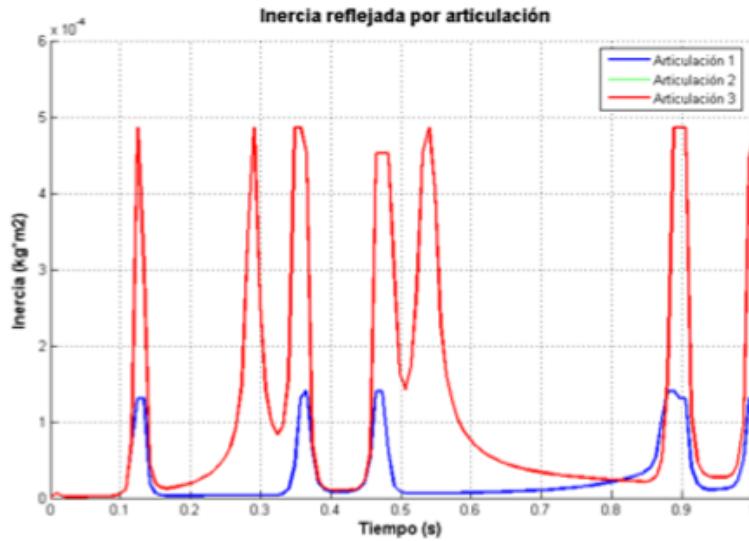


Figura 4-21.: Inercia de la carga reflejada en el eje de cada actuador.

Magnitud	Símbolo	Valor Máximo
Torque Pico (N*mm)	τ_p	7200
Torque RMS (N*mm)	τ_{RMS}	2300
Velocidad Angular (rpm)	ω_{max}	44
Inercia de la carga (kg*m^2)	J_{max}	0.0005

Tabla 4-6.: Datos requeridos para la selección de actuadores.

En lo relativo a la marca de los actuadores previamente se había optado por la empresa **Rockwell Automation**, puesto que todo el sistema de control había sido concebido con

equipos de esta empresa, consecuentemente los motores por temas de compatibilidad y protocolos deben ser provistos por dicha compañía. En cuanto a la tecnología de los actuadores se optó por servomotores, dado los requerimientos de movimiento precisados no son tan exigentes, así como la facilidades de control, tales como la previa implementación de interpoladores y la solución cinemática del manipulador delta; todo esto acompañado que el modelo de controlador permite un manejo de altas velocidades con elevada precisión lo cual es esencial en el robot delta. Cabe resaltar de la misma manera que para el caso de aplicación no se propone el uso de reductor, dado que la carga de torque solicitada al actuador es relativamente baja, así como la inercia reflejada, por lo tanto un motor de inercia baja o media es capaz de cumplir los requerimientos, en lo referente a la velocidad angular precisada, debido a que la mayoría de servomotores industriales son capaces de mantener los atributos de torque en un rango amplio de velocidades, en la práctica no existiría inconveniente.

Los criterios de selección del actuador fueron adaptados de [27], los cuales se presentan en la Tabla 4-7, se consideraron factores de seguridad del 20 % para el torque pico y del 30 % para el torque continuo, asimismo se optó por la serie de servomotores con el costo más reducido pero adecuado para la aplicación con el propósito de disminuir el costo de la potencial implementación del manipulador.

Criterios de selección de los actuadores	
Velocidad	La velocidad nominal del motor debe ser igual o superior a la velocidad máxima de la aplicación.
Torque Intermitente	El torque intermitente del motor debe ser igual o superior al torque máximo de la carga.
Torque Continuo Nominal	El torque nominal del motor debe ser igual o superior al torque RMS de la carga.
Relación de inercias	La relación de inercias entre la carga y el rotor no debe exceder 6:1.

Tabla 4-7.: Datos requeridos para la selección de actuadores.

En consideración a los criterios de selección y sobre dimensionamiento como factor de seguridad para los parámetros de torque se consignan los resultados obtenidos en la simulación de movimiento en la Tala 4-8.

Magnitud	Símbolo	Valor Máximo	F.S./Criterio	Valor de selección
Torque Pico (N*mm)	τ_p	7200	1.3	9400
Torque RMS (N*mm)	τ_{RMS}	2300	1.2	2750
Velocidad Angular (rpm)	ω_{max}	44	1.2	60
Inercia de la carga (kg*m ²)	J_{max}	0.0005	6:01	0.00008

Tabla 4-8.: Valores para la selección de actuadores.

Teniendo como referencia el manual AB Rotary Servo Motor Selection [2] se eligió el servomotor con referencia VPL-A1003F-PJ14AA, este actuador hace parte de la serie Kinetix VP de baja inercia y posee las características presentadas en la Tabla 4-9.

Característica	Valor
Torque Pico (N*mm)	11150
Torque continuo (N*mm)	4180
Velocidad Angular Nominal (rpm)	3250
Inercia del rotor (kg*m ²)	0.00012
Voltaje de operación AC (V)	200
Potencia de salida nominal (kW)	1.9
Peso del motor (kg)	4.5
Fuerza radial máxima sobre el eje (1500 rpm) (kgf)	68.6
Fuerza axial máxima sobre el eje (1500 rpm) (kgf)	22

Tabla 4-9.: Características del servomotor seleccionado.

Adicionalmente cabe resaltar tres características concernientes al servomotor, con respecto a la retroalimentación de posición angular el modelo seleccionado cuenta con un encoder absoluto de 18 bits multigiro de hasta 4096 revoluciones, lo cual garantiza elevada precisión en la medición de parámetros angulares del servomotor. De la misma manera posee un eje con chavetero incluido, lo cual permite la conexión a través del acople motor-brazo principal, y finalmente se determinó conveniente que servomotor contara con un freno DC de 24 V; esta característica es fundamental cuando se des energizan los motores puesto que permiten conservar la posición actual de cada servomotor, lo que se traduce en que posiciones permanentes para el manipulador aun cuando los motores no estén en operación, concretamente esto permite mantener el manipulador en su posición de home cuando todo el sistema este apagado. Cabe resaltar que la inclusión del freno implica la adición de una fuente de 24 V independiente para operar dicho dispositivo.

Para determinar si los criterios de selección se han cumplido para las características del motor, se comparan los parámetros asociados a cada magnitud de selección en la Tabla 3-10; de manera adicional, mediante la simulación dinámica del modelo se determinaron las fuerzas axiales y radiales que experimentaría el eje del actuador durante la ejecución de la trayectoria más exigente, por lo cual dichos parámetros se pudieron someter a validación.

Magnitud	Valor Selección	Valor Motor	Validación	Relación de magnitudes
Torque Pico (N*mm)	9400	11150	Cumple	1:1.2
Torque RMS (N*mm)	2750	4180	Cumple	1:1.8
Velocidad Angular (rpm)	60	3250	Cumple	1:54
Inercia de la carga (kg*m ²)	0.00008	0.00012	Cumple	1:1.5

Tabla 4-10.: Valores para la selección de actuadores.

4.5. Simulación estática

La simulación estática o de equilibrio se realizó con el objetivo de determinar el **torque de retención** necesario para mantener en posición de equilibrio o reposo al robot. Este parámetro es muy importante pues se debe verificar que los servomotores seleccionados efectivamente posean un freno de retención capaz de soportar dicho torque en los instantes en que el sistema de control sea des-energizado (para garantizar una posición fija del robot cuando se ha des-energizado).

Los servomotores ofrecidos por la empresa de automatización Rockwell Automation (es la marca que se utilizó para el sistema de control de movimiento del robot) se distribuyen en una amplia gama que incluye modelos con la posibilidad de un freno de retención accionado por una señal de tensión en corriente directa (24 VDC). Precisamente el servomotor escogido, la referencia **VPL-A1003F-PJ14AA**, tiene incluido ya el freno de retención.

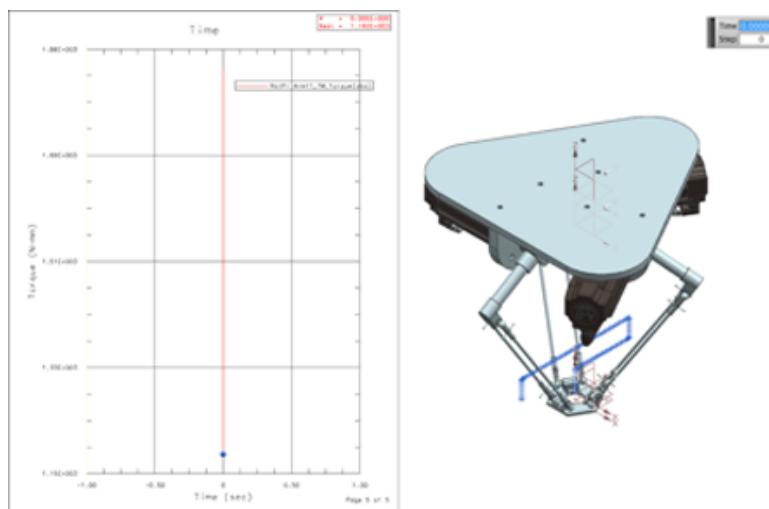


Figura 4-22.: Simulación estática (o de equilibrio) del robot.

El freno de retención de estos motores tiene la característica de que se desactiva cuando se le aplica un voltaje DC (24VDC) en los terminales del freno (adjuntos al terminal de conexión del servomotor), de manera que evidentemente este se activa cuando no se aplica ningún voltaje. Este comportamiento lo hace muy favorable, pues en caso de un fallo de energía, estos se activarían inmediatamente, reteniendo el eje del motor.

Para llevar a cabo la verificación del freno de retención se utilizó el mismo modelo de simulación dinámica utilizado en la selección de los servomotores, pero esta vez se manejó el ambiente de simulación estática en Unigraphics NX®. Esto se hace dentro del mismo entorno de simulación de movimiento, pero se cambia el tipo de solución a una de tipo estática, como se evidencia en la Figura 4-24.

Después de ejecutar la simulación (el resultado puede verse en la Figura 4-22) se obtuvieron los torques de equilibrio en las tres articulaciones rotacionales del modelo; este torque de

equilibrio (pues efectivamente el modelo no presenta movimiento alguno, a pesar de los efectos de la aceleración gravitatoria) es precisamente el torque de retención, el cual **NO DEBE** exceder el torque de retención nominal del freno del servomotor seleccionado. Los resultados para cada una de las articulaciones actuadas pueden verse en la Tabla 4-11.

Articulación Rotacional	Torque de equilibrio
1	1827.432 N·mm (1.83 N·m)
2	1827.433 N·mm (1.83 N·m)
3	1827.433 N·mm (1.83 N·m)

Tabla 4-11.: Resultados de Torques de equilibrio por articulación rotacional (actuada).

Se observa que en general para las tres articulaciones actuadas el torque de retención corresponde a aproximadamente 1.83 N·m. Para verificar si este valor está dentro de los límites permitidos por el servomotor, se procedió a comparar este valor con el máximo especificado por el fabricante Rockwell para el servomotor seleccionado. Para este caso se utilizó la publicación GMC-TD001D-EN-P [2] de Rockwell Automation, correspondiente a las especificaciones técnicas de toda la línea de servomotores rotativos de Rockwell. Según la tabla de la página 8 de dicha publicación, la cual contiene las especificaciones del freno de retención para la serie de servomotores VPL Low Inertia (ver Figura 4-23), el torque máximo de retención para la serie VPL-A/B1003x es de **4.18 N·m**; este valor establece un factor de seguridad de $4.18/1.83=2.28$, lo cual indica que efectivamente el freno de retención del servomotor (en realidad los tres servomotores en conjunto) podrá soportar sin problemas la estructura completa del robot en una posición de equilibrio.

Kinetix VP Low Inertia Motor Brake Specifications						
Motor Cat. No.	Backlash, max (brake engaged) arc minutes	Holding Torque N·m (lb·in)	Cell Current at 24V DC A	Brake Response Time		Brake Motor Weight, approx kg (lb)
				Release ms	Engage ⁽¹⁾ ms	
VPL-A/B0611	30	1.50 (13)	0.297...0.363	38	25	1.18E-05 (0.00010)
VPL-A/B0612						1.94E-05 (0.00017)
VPL-A/B0613						2.71E-05 (0.00024)
VPL-A/B0751		3.0 (27)	0.567...0.693	66	42	1.82E-05 (0.00016)
VPL-A/B0752						2.87E-05 (0.00026)
VPL-A/B0753						4.12E-05 (0.00036)
VPL-A/B1001	30	4.18 (37)	0.45...0.55	90	65	5.9E-05 (0.00052)
VPL-A/B1002						9.3E-05 (0.00082)
VPL-A/B1003						1.35E-04 (0.0012)
VPL-A/B1152		6.55 (58)	0.621...0.759	90	95	2.89E-04 (0.0025)
VPL-A/B1153						4.09E-04 (0.0036)
VPL-A/B1303						4.33E-04 (0.0038)
VPL-A/B1304		14.10 (125)	0.738...0.902	125	120	5.51E-04 (0.0049)
VPL-A/B1306						8.11E-04 (0.0072)
VPL-B1651						8.45E-04 (0.0075)
VPL-B1652	32.0 (283)	1.053...1.287	140	120	120	1.53E-03 (0.013)
VPL-B1653						2.79E-03 (0.019)
VPL-B1654						2.95E-03 (0.026)
						27.50 (60.63)

Figura 4-23.: Tabla de especificaciones del freno de retención para la serie de motores VPL de Rockwell Automation.

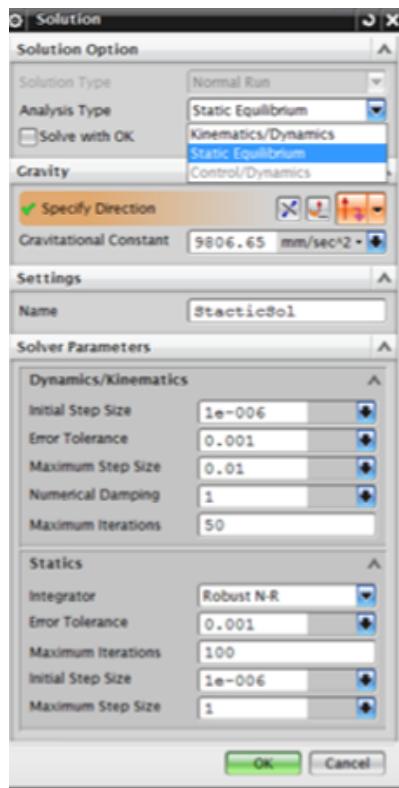


Figura 4-24.: Pantalla de configuración para el entorno de simulación estática (equilibrio).

5. Sistema de Control

5.1. Descripción del sistema de control

Dentro del alcance de diseño del robot delta, se limitó el diseño del sistema de control a la selección más adecuada de un sistema de control movimiento para aplicaciones industriales. Esto implica que no se puede realizar una verificación del funcionamiento del sistema de control mediante simulación, pues esta verificación requiere los elementos de hardware como controladores de movimiento y servo-drives, además de las herramientas de desarrollo (software licenciado) implicadas.

Para el sistema de control industrial de movimiento se decidió continuar con la línea ofrecida por Rockwell Automation, **Kinetix Motion Control**, debido a que precisamente los servomotores elegidos pertenecen a la serie *VPL Low Inertia* de Rockwell Automation, lo cual simplifica enormemente el desarrollo de la configuración y programación del sistema de control, pues la integración de los servomotores con el hardware de control de movimiento de Rockwell es directa.

Teniendo en cuenta que el robot bajo diseño es de tipo industrial, y el conjunto completo (robot, bastidor y sistema de control) debe ser una unidad compacta que permita ser transportada con relativa facilidad, se pretende diseñar una gabinete de control que pueda contener y organizar los distintos elementos de hardware que componen el sistema de control de movimiento.

El sistema de control tiene las siguientes características principales:

- Se basa en una arquitectura abierta de control industrial, es decir, el sistema de control debe utilizar protocolos de comunicación industrial estándar para facilitar la integración de futuras aplicaciones para el robot (como visión de máquina, control remoto a través de internet, entre otras).
- El sistema de control cuenta con una Interfaz Hombre Máquina a nivel de máquina (integrada en el mismo conjunto de robot), mediante la cual es posible configurar parámetros esenciales del robot, o realizar verificaciones de control y posicionamiento.
- El gabinete de control que contiene los elementos de hardware debe integrarse fielmente a la estructura de soporte del robot, con el fin de establecer una unidad compacta fácil de transportar y ensamblar/desensamblar.

5.2. Selección de componentes

5.2.1. Sistema de servo-drives

La selección del conjunto de servo-drives se realizó teniendo en cuenta la referencia de servomotor elegido para cada eje del robot, el número de ejes a controlar (en este caso son tres por defecto; sin embargo se permite un eje adicional de movimiento o grado de libertad) y la información técnica suministrada por las distintas guías de diseño y selección de control de movimiento de Rockwell Automation.

De acuerdo a la guía Kinetix Motion Control Selection Guide (referencia GMC-SG001U-EN-P) de Rockwell Automation [10], correspondiente a la guía general de selección de los distintos sistemas de control de movimiento, el sistema de control de movimiento más apropiado para los servomotores de la serie VPL Low Inertia es el denominado Kinetix 5500. El procedimiento de selección general puede verse en la Figura 5-2. Se puede observar que este sistema es el más apropiado para las características de control requeridas, pues primero, efectivamente el sistema de control de movimiento está integrado a la red Industrial Ethernet/IP; segundo, el robot es un sistema de solo tres ejes, lo cual hace apropiado al sistema Kinetix 5500 por ser diseñado para pocos ejes. Adicionalmente, la guía de selección indica que el sistema Kinetix ha sido especialmente diseñado para la serie de servomotores *VPL Low Inertia*.



Figura 5-1.: Drives del sistema Kinetix 5500.

Una vez seleccionada la serie Kinetix 5500 se procedió a elegir la referencia exacta de drive (o amplificador) para cada servomotor. Es importante resaltar que el drive es el hardware que regula la potencia eléctrica suministrada al motor de acuerdo a las señales de control generadas por un controlador especializado en aplicaciones de movimiento.

La serie Kinetix 5500 ofrece seis versiones de drive, cada una con especificaciones máxi-

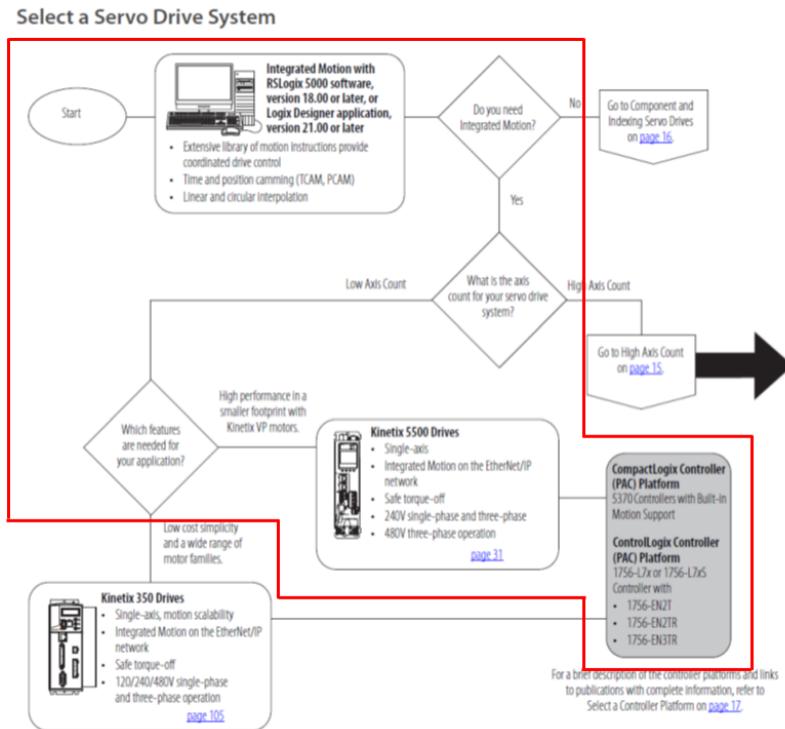


Figura 5-2.: Algoritmo de selección del sistema de servo-drives para el robot.

mas en potencia continua, corriente continua, y corriente pico máxima (la cual depende del torque pico máximo exigido al servomotor). El rango permitido de potencia RMS continua (relacionada directamente con el torque continuo RMS de la aplicación) para la serie de drives Kinetix 5500 va desde los 0.2 kW hasta los 14.6 kW (dependiendo de si la tensión de suministro es monofásica o trifásica, a 120VAC, 230 VAC o 480 VAC), lo cual efectivamente corresponde a aplicaciones de baja inercia. En la Tabla 4-1 se resumen las principales características de los drives de la serie Kinetix 5500. Para obtener más características, debe consultarse el manual de información técnica de los sistemas Kinetix (documento referencia GMC-TD003D-EN-P) [11]. Se debe resaltar también que cada drive posee todos los terminales de entrada y salida necesarios para conectar el servomotor, las señales de potencia y control y las señales de comunicación.

Observese en la Tabla 5-1 que a medida que la referencia de servo drive aumenta en el número H0xx, este es capaz de soportar motores de más potencia; este potencia además se duplica prácticamente si el voltaje de entrada es trifásico a 480 VAC). En dicha tabla se puede ver que también la configuración del drive se ofrece en tres tamaños distintos de bastidor; a medida que el drive ofrece más potencia continua, el tamaño del drive aumenta. Este parámetro de diseño debe considerarse en el instante de diseñar el gabinete de control.

De acuerdo a la Guía de Diseño del sistema Kinetix 5500 (documento referencia GMC-RM009B-EN-P) [8], el driver más apropiado para el servomotor escogido, teniendo en cuenta

Referencia de Drive	Tamaño de Bastidor	Voltaje de Entrada AC	Potencia Continua (kW)	Corriente Continua de Salida (A, 0-pico)
2198-H003-ERS	1	195-264 VAC, monofásica	0.2	1.4
		195-264 VAC, trifásica	0.3	
		324-528VAC, trifásica	0.6	
		195-264 VAC, monofásica	0.5	3.5
		195-264 VAC, trifásica	0.8	
		324-528VAC, trifásica	1.6	
2198-H015-ERS	2	195-264 VAC, monofásica	1	7.1
		195-264 VAC, trifásica	1.5	
		324-528VAC, trifásica	3.2	
		195-264 VAC, trifásica	2.4	11.3
		324-528VAC, trifásica	5.1	
		195-264 VAC, trifásica	4	
2198-H040-ERS	3	324-528VAC, trifásica	8.3	18.4
		195-264 VAC, trifásica	7	32.5
2198-H070-ERS		324-528VAC, trifásica	14.6	

Tabla 5-1.: Propiedades básicas de los servo drives disponibles para el sistema Kinetix 5500.

la potencia nominal y corriente continua RMS del mismo, pueden ser dos referencias: la referencia **2198-H040-ERS** y la referencia **2198-H070-ERS**. La indicación de esta selección puede verse en la Figura 4-3. Observe que dependiendo del drive escogido la corriente y torques pico puede ser menor o mayor, respectivamente. Sin embargo, para ambos casos, la potencia del motor escogido es independiente, 1.9 kW, de manera que el servo drive escogido debe suministrar al menos esta potencia en continuo. Otra restricción importante de diseño es que el voltaje de entrada debe ser una acometida trifásica a 230VAC, ya que generalmente corresponde a los sistemas típicos en industrias, pero sobre todo en ferias industriales. Es importante resaltar que si bien la potencia nominal de motor de 1.9kW es bastante inferior a la máxima permitida para las referencias 2198-H040-ERS y 2198-H070-ERS (4.0 y 7.0 a 320 VAC, respectivamente), la guía de diseño especifica estos drives debido a los requerimientos de corriente continua (A en 0-pico) del servomotor de 15.62 A o más (ver Figura 5-3). Simplemente a partir del servo drive 2198-H040-ERS están disponibles 18.4 A (ver Tabla 5-1), de manera que las referencias inferiores no son adecuadas a pesar de tener potencias de salida cercanas a la requerida por el servomotor.

Aunque la selección preliminar se realizó considerando cada eje del robot (conjunto servomotor+ servo-drive) como independientes, es claro que el movimiento del robot es altamente complejo y por tanto implica coordinación entre los ejes del robot. Esta condición establece que el sistema de control de movimiento no es de ejes independientes (tipo Single Axis) sino que corresponde a una aplicación conocida como multi-ejes (multi axis).

Teniendo en cuenta la anterior premisa, el sistema Kinetix 5500 permite configurar de manera totalmente flexible aplicaciones Single Axis y Multi-Axis. Para aplicaciones Multi-Axis el sistema hace uso del concepto Bus Compartido de Potencia (en inglés Shared Bus). Los

Bulletin VPL Motor Performance Specifications with Kinetix 5500 (200V-class operation) Drives

Rotary Motor	Rated Speed, max rpm	System Continuous Stall Current A 0-pk	System Continuous Stall Torque N·m (lb-in)	System Peak Stall Current A 0-pk	System Peak Stall Torque N·m (lb-in)	Motor Rated Output kW (Hp)	Speed at Motor Rated Output rpm	Kinetix 5500 Drives (200V-class operation)
VPL-A0631E	4500	1.20	0.46 (4.0)	3.50	1.12 (9.91)	0.19 (0.25)	4500	2198-H003-ERS
				4.20	1.33 (12.0)			2198-H008-ERS
VPL-A0631M	7200	1.92	0.46 (4.0)	6.48	1.33 (12.0)	0.28 (0.38)	7200	2198-H008-ERS
VPL-A0632F	4800	2.55	0.93 (8.0)	8.75	2.69 (24.0)	0.39 (0.52)	4800	2198-H008-ERS
VPL-A0633C	3000	2.50	1.27 (11.0)	8.75	4.09 (36.0)	0.37 (0.50)	3000	2198-H008-ERS
VPL-A0633F	4500	3.52	1.27 (11.0)	8.80	2.87 (25.0)	0.44 (0.59)	4500	2198-H008-ERS
				12.60	4.09 (36.0)			2198-H015-ERS
VPL-A0751E	4800	2.90	1.01 (9.0)	8.80	2.20 (19.0)	0.50 (0.67)	4800	2198-H008-ERS
				9.12	2.27 (20.0)			2198-H015-ERS
VPL-A0752C	3300	3.80	1.61 (14.0)	13.30	4.39 (39.0)	0.49 (0.66)	3300	2198-H015-ERS
VPL-A1003F	5500	15.62	4.18 (37.0)	45.90	10.25 (90.0)	1.90 (2.55)	5500	2198-H040-ERS
				50.0	11.15 (99.0)			2198-H070-ERS
VPL-A1152B	2150	6.17	5.10 (45.0)	17.70	10.95 (96.0)	1.02 (1.37)	2150	2198-H015-ERS
				21.19	13.12 (116)			2198-H025-ERS
VPL-A1152E	3300	10.60	5.08 (45.0)	28.30	12.14 (107)	1.47 (1.97)	3300	2198-H025-ERS
				32.10	13.12 (116)			2198-H040-ERS
VPL-A1152F	5000	13.56	4.70 (42.0)	45.80	13.12 (116)	2.16 (2.90)	5000	2198-H040-ERS
VPL-A1153C	2300	8.88	6.55 (58.0)	28.30	18.30 (162)	1.35 (1.81)	2300	2198-H025-ERS
				33.0	20.33 (180)			2198-H040-ERS
VPL-A1303B	1950	10.34	8.80 (78.0)	28.30	19.85 (175)	1.61 (2.16)	1950	2198-H025-ERS
				31.0	20.72 (183)			2198-H040-ERS

Figura 5-3.: Recomendación de selección de servo-drive para los servomotores escogidos.

amplificadores o drives se caracterizan por utilizar como entrada una señal AC (puede ser monofásica o trifásica), para luego realizar una etapa de conversión a señal DC para realizar el control de la señal al motor. Una vez se ha tratado correctamente dicha señal, se realiza de nuevo una inversión a señal AC para ser aplicada directamente a las tres bobinas del servomotor. Es precisamente en la etapa de DC que se requiere la mayor cantidad de potencia para poder ejercer movimiento sobre el eje del servomotor. Desde este punto de vista se hace visible el concepto de Bus compartido. Es posible compartir el bus de AC de alimentación para incrementar la potencia efectiva a la entrada, o compartir el bus DC entre los distintos servo-drives para incrementar la potencia efectiva suministrada a cada servomotor. Además, este tipo de arquitecturas reduce el consumo de potencia total respecto a un sistema de control de ejes independientes, pues la potencia efectiva consumida es ahora compartida. El sistema de control de movimiento Kinetix 5500 permite cuatro arquitecturas de Bus compartido:

- **Bus AC compartido (Shared AC):** En este tipo de configuración, la etapa de alimentación AC es compartida entre los distintos drives, pero la etapa DC de potencia es independiente para cada eje. Con esto, cada servo soporta máximo la potencia nominal para la cual fue diseñado. Además, el bus DC de control es también compartido. Cada drive requiere adicionalmente una entrada de 24VDC para alimentar los distintos circuitos electrónicos de baja potencia, generalmente usados para el control del mismo. Al compartir este bus con una sola fuente de alimentación, se logra reducir la cantidad

total de elementos del sistema de control, y por ende también el costo global. Una condición importante es que todos los drives que comparten el bus AC deben ser de la misma potencia nominal de salida. Un ejemplo de esta configuración puede verse en la Figura 5-4 [9].

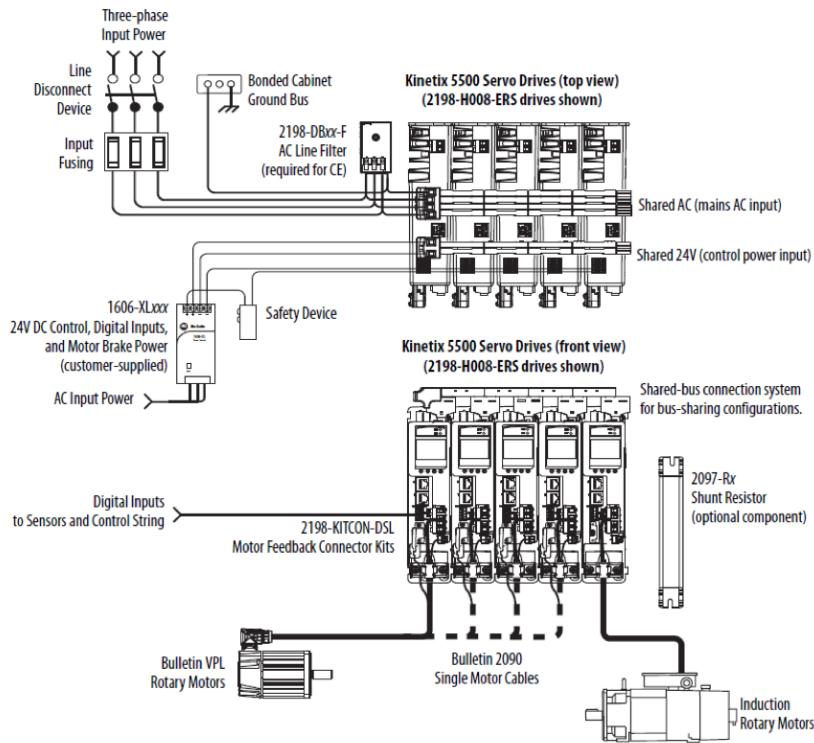


Figura 5-4.: Ejemplo de configuración de Bus AC compartido.

- **Buses AC/DC compartidos (Shared AC/DC):** en esta configuración además de compartir el bus AC, también se comparte el bus DC de potencia. El bus DC de control en esta configuración también debe ser compartido para reducir costos. La configuración AC/DC requiere que los drives interconectados sean de la misma potencia nominal. Un ejemplo típico de esta configuración puede verse en la Figura 5-5 [9]. Esta configuración tiene la característica de que la potencia total disponible en DC se reduce un 30% respecto a la nominal.
- **Bus DC Compartido (Shared DC Common):** para éste caso la etapa de AC de entrada únicamente se conecta al primer drive de la izquierda. El bus DC de potencia es compartido con todos los drives. Esto quiere decir que el primer driver desde la izquierda actúa como conversor principal de AC a DC, mientras que los demás drives actúan como “seguidores de DC” del primer drive. Esto implica que el drive principal debe tener al menos una potencia nominal igual (o mayor) que la potencia de cada

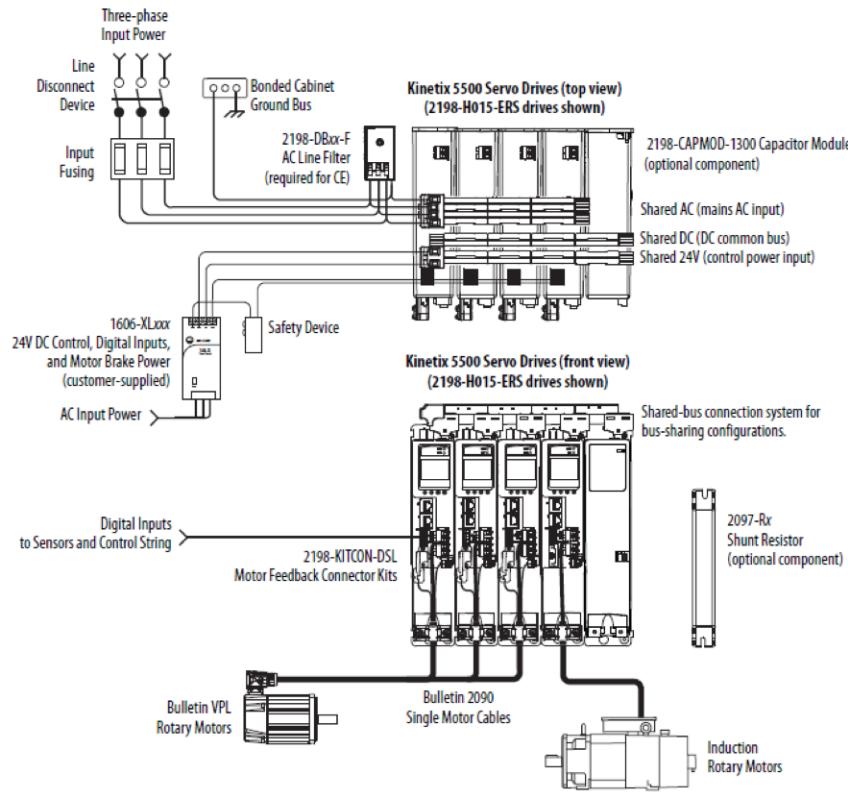


Figura 5-5.: Ejemplo de configuración de Buses AC/DC compartidos.

uno de los drives seguidores. En este caso también es posible compartir el bus DC de control. Una configuración típica de este modo se ilustra en la Figura 5-6 [9].

- **Bus AC/DC Híbrido (Hybrid AC/DC):** En este tipo de configuración el bus de AC se comparte para algunos de los primeros drives desde la izquierda, mientras que el bus DC de potencia es totalmente compartido a todos los drives. Con esto se logra incrementar la potencia DC suministrada a cada drive. Esta configuración requiere que el conversor AC/DC de cada drive sea igual en potencia nominal, pero esta potencia debe ser mayor o igual a la potencia del inversor DC/AC de cada drive. Un ejemplo típico de configuración se observa en la Figura 5-7 [9]. Esta configuración tiene la característica de que la potencia total disponible en DC se reduce un 30 % respecto a la nominal.

Para escoger la configuración correcta de aplicación multi-ejes (y por ende la referencia de servo-drives requeridos) se utilizó el **Apéndice C** del manual del sistema Kinetix 5000 (documento referencia GMC-RM009B-EN-P) [9]. De acuerdo a esta guía de selección, el principal criterio a considerar es la potencia efectiva que podrá utilizar libremente cada eje de movimiento. Como segundo criterio importante de selección es el número máximo de ejes que permita configurar el sistema para un eventual aumento flexible de ejes de movimiento;

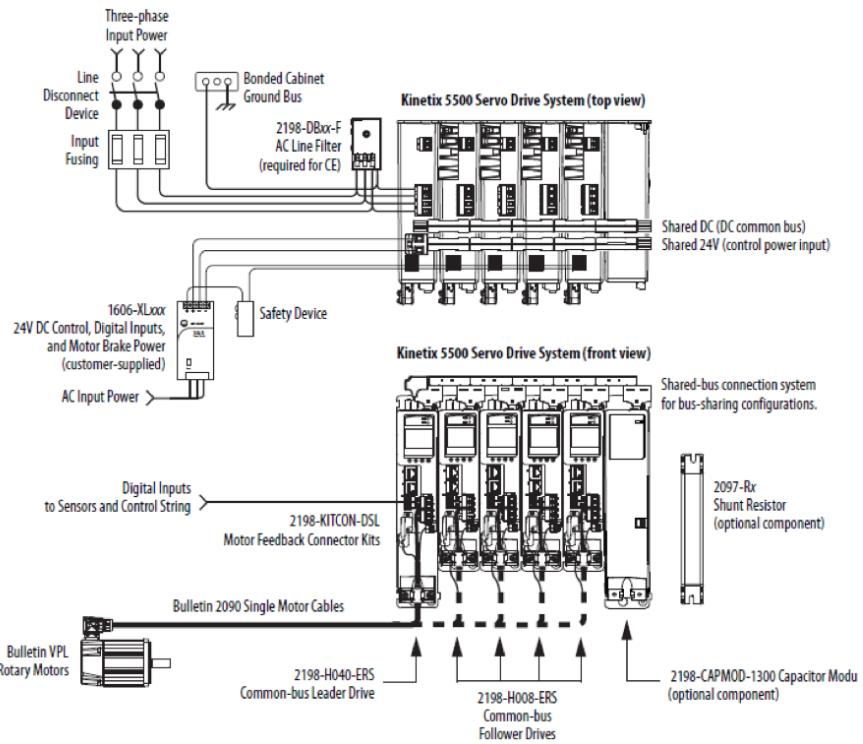


Figura 5-6.: Ejemplo de configuración de Bus DC compartido.

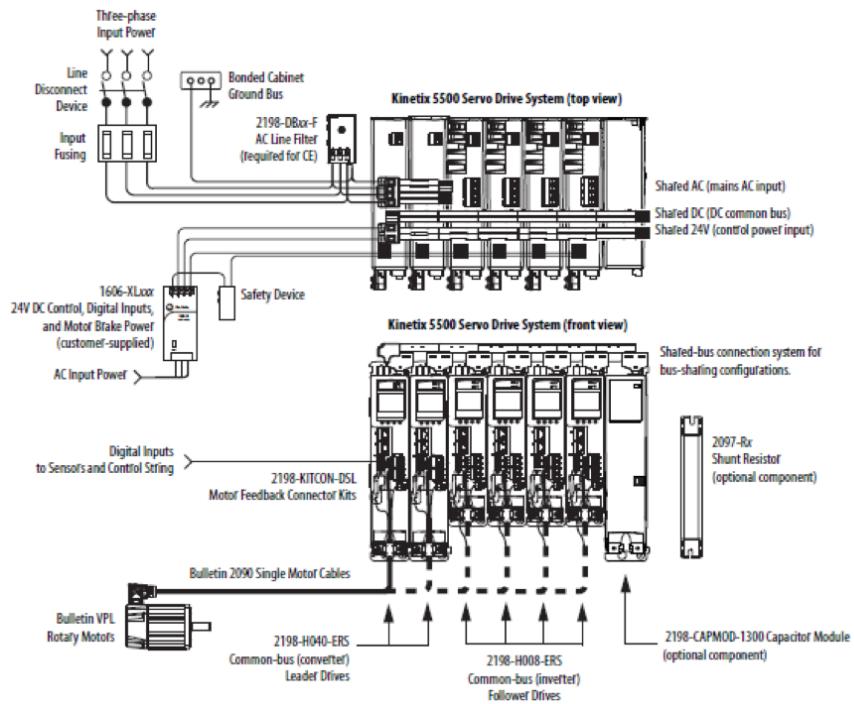


Figura 5-7.: Ejemplo de configuración de Bus AC/DC Híbrido.

para el caso del robot delta debe considerarse que al menos el sistema soporte cuatro ejes de movimiento, con tres ejes requeridos y uno de reserva para un posible eje adicional de rotación (el cual no se considera en este trabajo).

Se revisó cada configuración detalladamente para determinar cuál era la más apropiada para el sistema de control de movimiento del robot. El proceso de revisión y selección se describe a continuación (las tablas de configuración descritas fueron obtenidas del Apéndice C del manual del sistema Kinetix 5500 (documento referencia 2198-UM001B-EN-P) [9]:

- 1. Sistema de Bus AC Compartido:** El sistema AC permite compartir la potencia de entrada AC a todos los drives del sistema, con lo cual cada drive posee de manera independiente un convertidor AC/DC y un inversor DC. Esto implica que la potencia DC suministrada para cada eje corresponde a la nominal del correspondiente drive. A primera vista esta configuración parece la más adecuada; sin embargo al revisar la cantidad máxima de drives permitidos en AC según la Tabla 5-2, para los drives permitidos por el servomotor escogido, 2198-H040-ERS y 2198-H070-ERS, se permite un máximo de tres y dos drives, respectivamente. Desde este punto de vista se debe descartar este modo de conexión, ya que la condición de diseño es que debe permitirse al menos un eje adicional de movimiento en el futuro, más los tres iniciales para cada articulación actuada del robot.

Referencia de Drive	Tamaño de Bastidor	Número máximo de drives en Bus AC Compartido
2198-H003-ERS	1	5
2198-H008-ERS		
2198-H015-ERS	2	3
2198-H025-ERS		
2198-H040-ERS	3	2
2198-H070-ERS		

Tabla 5-2.: Configuración máxima permitida para Bus AC Compartido.

- 2. Sistema de Bus DC compartido:** El sistema de Bus DC compartido permite compartir la potencia DC generada por el conversor AC/DC del primer drive (conocido como Drive Líder) a los demás drives del sistema (drives seguidores). Por tanto, la potencia DC de salida disponible corresponde a la máxima permitida por el drive líder y es compartida por todo el conjunto de drives. Si se observa la cantidad máxima de drives que se pueden conectar en la Tabla 5-4 para los drives permitidos por el servomotor escogido, se tiene que se logra un máximo de siete drives para la referencia 2198-H040-ERS (un líder + seis seguidores) y ocho drives para la referencia 2198-H070-ERS (un

líder + siete seguidores). A primera vista esta podría ser la configuración más adecuada por la cantidad de ejes que permitiría configurar (hasta ocho ejes). Sin embargo se debió revisar con detalle la potencia total disponible para los ejes requeridos, que deben ser mínimo cuatro (tres iniciales, uno de reserva). Se asumió que el cuarto eje no superará la potencia nominal de las tres articulaciones actuadas del robot, debido a las características de la carga que debe soportar el robot. Cada servomotor requiere 1.9 kW y la alimentación del sistema debe ser a 230 VAC trifásico. El cálculo de potencia para los drives permitidos, 2198-H040-ERS y 2198-H070-ERS, se resume en la Tabla 5-3.

Servo drive líder utilizado	Potencia nominal de salida a 230 VAC	Potencia requerida para		Diferencia de Potencia para	
		3 ejes (kW)	4 ejes (kW)	3 ejes (kW)	4 ejes (kW)
2198-H040-ERS	4.0 kW	1.9*3=5.7	1.9*4=7.6	4.0-5.7=-1.7	4.0-7.6=-3.6
2198-H070-ERS	7.0 kW			7.0-5.7=1.3	7.0-7.6=-0.6

Tabla 5-3.: Cálculo de potencia para el modo de Bus DC compartido.

Observese que la única posibilidad en este modo de configuración es utilizar un servo drive líder referencia 2198-H070-ERS, pues es el único que es capaz de suplir los 7.6 kW totales de potencia para cuatro ejes de movimiento, que corresponde al de máximas especificaciones para el sistema Kinetix 5500, algo que desde el punto de vista de costos puede influir considerablemente. Por tanto, la configuración en modo DC puede ser un drive líder 2198-H070-ERS más tres drives seguidores 2198-H040-ERS. No obstante aunque esta opción es posible, es muy limitada en potencia total y por ende en posibilidades de expansión para las características de carga en cada eje de movimiento del robot, si éstas llegasen a ser similares a 1.9 kW por eje adicional de movimiento, y por tanto se descartó como diseño inicial del robot delta en cuestión. En caso de que las cargas estimadas por eje adicional sean inferiores en potencia, y si la cantidad de ejes adicionales es considerable, esta sería la opción más adecuada.

3. **Sistema de Buses AC/DC Compartidos:** El sistema de buses AC/DC compartidos como su nombre lo indica, permite compartir tanto el bus AC de potencia como al bus DC del sistema. Con esto se logra más potencia total (ya que el sistema de inversión DC/AC es compartido), pues se logra incrementar la potencia que suministran e paralelo los convertidores AC/DC de los drives en conjunto. Este sistema sin embargo tiene la restricción de que la potencia total disponible se reduce un 30 % (derateo) respecto a la nominal, que corresponde a la suma de las potencias nominales de salida de todos los drives en conjunto. Considerando la Tabla 5-6, se descartó de manera inmediata la referencia 2198-H070-ERS, pues permite un máximo de dos drives, lo cual ni siquiera cubre la cuota mínima requerida de tres ejes de movimiento (sin posibilidades de expansión). Los drives inferiores a la referencia 2198-H040-ERS se descartaron igualmente debido a que como se explicó anteriormente en esta sección, no cumplen los

Combinación de tamaño de bastidor	Drive Líder	Máximo número de drives seguidores	Referencia de drives seguidores permitidos		
1	2198-H003-ERS	4	2198-H003-ERS		
	2198-H008-ERS	4	2198-H008-ERS		
2 y 1	2198-H015-ERS	6	2198-H003-ERS		
			2198-H008-ERS		
2	2198-H025-ERS	6	2198-H015-ERS		
2 y 1			2198-H003-ERS		
			2198-H008-ERS		
2			2198-H015-ERS		
2 y 1	2198-H040-ERS	6	2198-H025-ERS		
			2198-H040-ERS		
2			2198-H003-ERS		
			2198-H008-ERS		
3 y 1	2198-H070-ERS	7	2198-H015-ERS		
			2198-H025-ERS		
3 y 2			2198-H040-ERS		
			2198-H070-ERS		
3					

Tabla 5-4.: Configuración máxima permitida para Bus DC Compartido.

requisitos de corriente continua y pico requeridos por los servomotores seleccionados. Así que la única opción disponible en el modo AC/DC es la referencia 2198-H040-ERS, ya que según la Tabla 5-6, se permiten hasta cuatro drives, suficientes para los tres ejes actuados del robot más un eje de reserva. Se procedió luego a verificar las condiciones de potencia total disponible para cuatro ejes de movimiento. El cálculo de potencia se resume en la Tabla 5-5. Igual que en anteriores casos, se consideró la restricción de una acometida de alimentación a 230 VAC trifásica.

Servo drive utilizado	Potencia nominal disponible a 230 VAC		Potencia requerida para		Diferencia de Potencia	
	3 ejes (kW)	4 ejes (kW)	3 ejes (kW)	4 ejes (kW)	3 ejes (kW)	4 ejes (kW)
2198-H040-ERS	4.0*3*0.7=8.4	4.0*4*0.7=11.2	1.9*3=5.7	1.9*4=7.6	8.4-5.7=2.7	11.2-7.6=3.6

Tabla 5-5.: Cálculo de potencia para el modo de Bus AC/DC compartidos.

Según se ve en la Tabla 5-5, tanto para un sistema de tres ejes, como para un sistema

de cuatro ejes, el modo de configuración Buses AC/DC compartidos permite suministrar de manera suficiente la potencia a cada uno de los ejes del robot, pues se logra respectivamente una potencia total disponible de 8.4 kW y 11.2kW, y una diferencia de potencia positiva (o de reserva) de 2.7 kW y 3.6 kW, respectivamente. Teniendo en cuenta el anterior resultado, se determinó que el sistema multi-ejes apropiado para el robot delta en cuestión consiste inicialmente en un sistema de tres servo-drives referencia 2198-H040-ERS conectados en el modo de Buses AC/DC compartidos. Se permite además la adición futura de un cuarto eje de movimiento con una potencia máxima de 3.6kW (utilizando otro drive 2198-H040-ERS) para permitir la rotación (un solo grado de libertad) del efecto final del robot delta. Se debe tener en cuenta que la tensión de entrada debe ser la de un sistema trifásico a 230 VAC.

Referencia de Drive	Tamaño de Bastidor	Número máximo de drives configurados como Buses AC/DC compartidos
2198-H003-ERS	1	8
2198-H008-ERS		
2198-H015-ERS	2	4
2198-H025-ERS		
2198-H040-ERS		
2198-H070-ERS	3	2

Tabla 5-6.: Configuración máxima permitida para Buses AC/DC compartidos.

4. **Sistema de Buses AC/DC compartidos híbridos:** este sistema como se explicó anteriormente, es uno modo intermedio entre Bus AC y Bus DC. Esto es evidente ya que en este modo de conexión no todas las etapas de conversión AC/DC de los drives que conforman el sistema están conectadas al bus AC de potencia, sino que mínimo dos, hasta el máximo permitido según la Tabla 4-6. Además, la conexión del Bus DC está regulada por lo indicado en la Tabla 4-4. Con esto se logra incrementar el número posible de ejes permitidos en modo AC/DC puro (según la Tabla 5-6) pero siempre respetando la potencia total máxima disponible en DC, la cual se obtiene simplemente multiplicando la potencia nominal de los drives en modo AC/DC por el número total de drives en modo AC/DC. Desde este punto de vista, si bien la configuración del sistema de drives para el robot ya fue establecida en el punto anterior como un sistema AC/DC compartido con hasta cuatro ejes de movimiento, es posible añadir más ejes de movimiento en modo DC compartido, siempre y cuando estos ejes no superen los 3.6kW de reserva disponibles. Esto flexibiliza aún más la configuración futura del robot, ya que es posible añadir ejes adicionales de movimiento que no requieran mover cargas

elevadas en masa y/o inercia (por ejemplo bandas transportadoras para objetos livianos o adicionar más grados de libertad rotacionales al efecto final, con la ventaja de integrarlos directamente al sistema de control de movimiento que ya posee el robot).

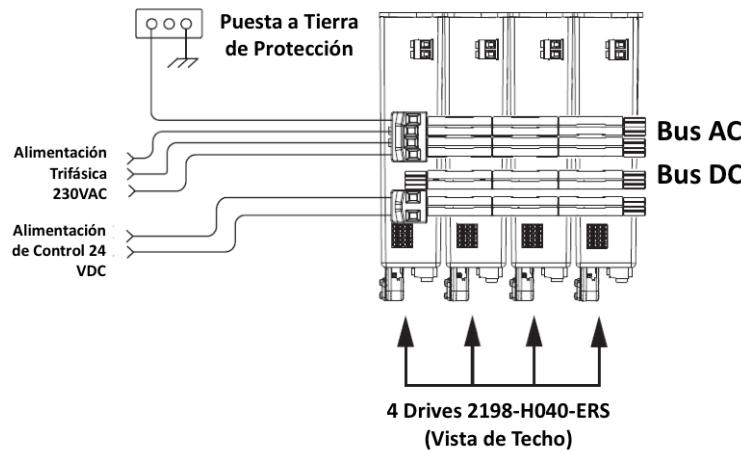


Figura 5-8.: Configuración elegida para el sistema de drives.

La configuración del sistema de drives seleccionada puede verse en la Figura 5-8. Observe en la figura que para los buses AC de potencia, DC de potencia y DC de control se requieren accesorios especiales para formar dichos buses, este conjunto de accesorios hacen parte del Kit de Conectores de Buses del Sistema Kinetix 5500; estos accesorios debieron seleccionarse y especificarse para una futura construcción del robot. Además, se requiere también hacer la selección de los cables de conexión de drive a servomotor, así como elementos adicionales para la protección y correcto funcionamiento del ServoDrive. Ya que la cantidad de accesorios es considerable, se optó por usar la herramienta de diseño de Rockwell **Motion Analyzer** en su versión 7.1. Este software es una herramienta potente que permite simplificar enormemente el diseño de un sistema de control de movimiento basado en producto Kinetix.

Selección de accesorios del bus compartido

Se utilizó para este caso el modo simple de cotización de Motion Analyzer, en el cual simplemente se adicionan las referencias requeridas de servo-drives, y luego este permite escoger los accesorios fácilmente. La configuración para cuatro ejes con el servo-drive y el servomotor elegidos puede verse en la Figura 5-9. Se observa que efectivamente se creó un grupo de Servo Drives Kinetix 5000, y se añadieron cuatro ejes cada uno configurado con el servo-drive 2198-H040-ERS y el servomotor VPL-A1003F-PJ14AA.

El siguiente paso en el software consistió en definir el modo de configuración de los buses AC/DC de potencia y control, para así lograr obtener los accesorios requeridos de conexión.

Para llevar a cabo esa tarea se procedió a abrir el modo de configuración de alimentación del grupo de servos seleccionado. Este proceso puede verse en la Figura 5-10.

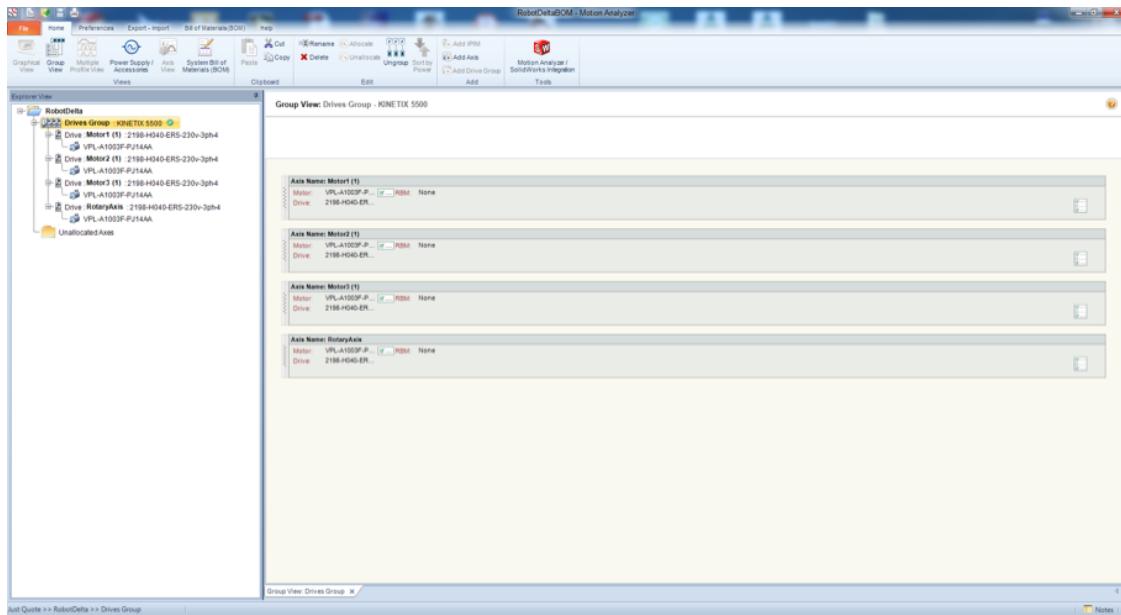


Figura 5-9.: Software Motion Analyzer, configuración del sistema elegido.

Al abrir este módulo de configuración, se abrió la pantalla que se ve en la Figura 5-11. Observese en la figura que es posible configurar los modos de conexión multi-ejes descritos anteriormente (AC, DC, AC/DC o AC/DC híbrido). La configuración elegida en el software fue el modo AC/DC, según lo que se determinó anteriormente. Esto es evidente al ver en la Figura 5-11 que para cada drive se escogió la correspondiente casilla de compartir tanto el bus AC como el bus DC de potencia.

Finalmente, se procedió a abrir el módulo de Lista de Materiales para así obtener los accesorios requeridos. El resultado obtenido fue el de la Figura 5-12. Los accesorios requeridos típicos se tienen resaltados en la Figura 5-13. Observe que cada accesorio que permite integrar un servo-drive al bus compartido, consiste en un conector en forma de T que se inserta en el terminal correspondiente del drive, y una serie de conectores con láminas de cobre para interconectar dos drives adyacentes a través del conector T.

Se observa en la Figura 5-12 que para el sistema de conexión de buses se requieren los siguientes accesorios:

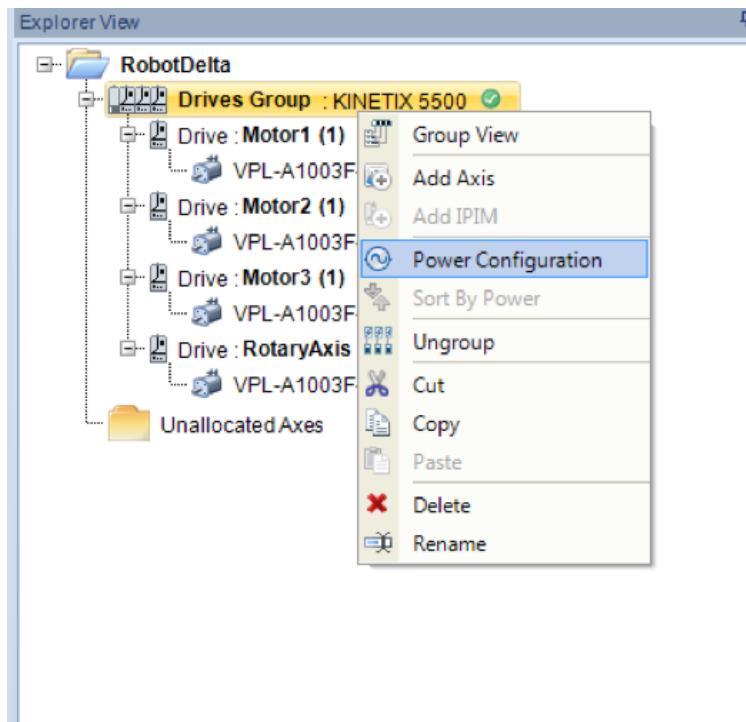


Figura 5-10.: Software Motion Analyzer, acceso al modo de configuración de conexión de Buses (Power Configuration).

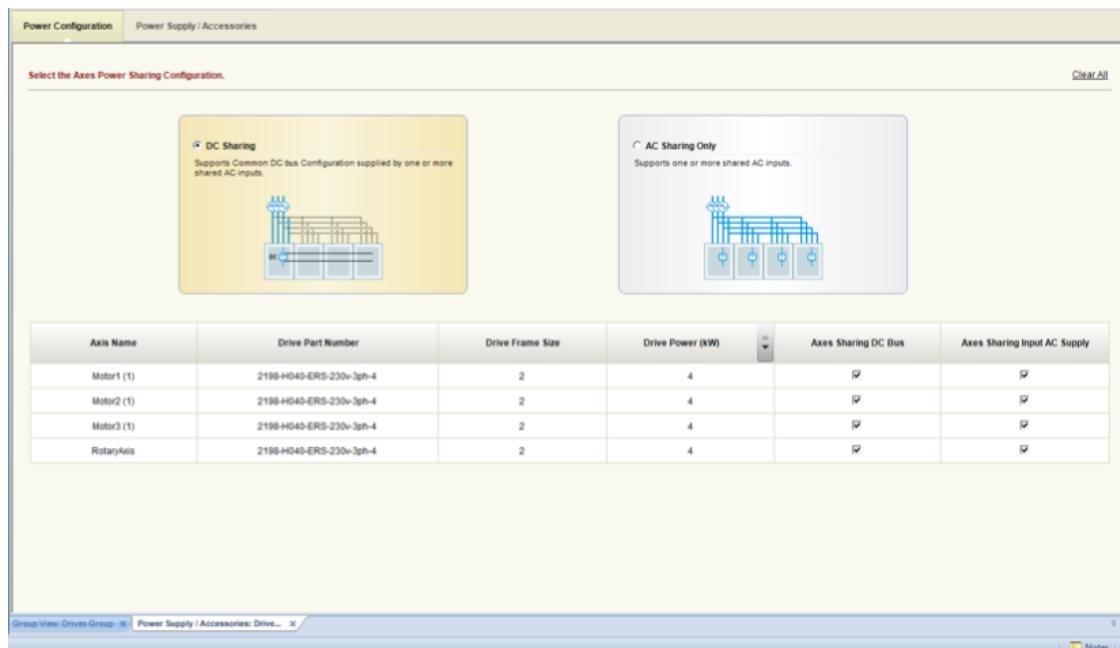


Figura 5-11.: Software Motion Analyzer, modo de configuración de conexión de Buses (Power Configuration).

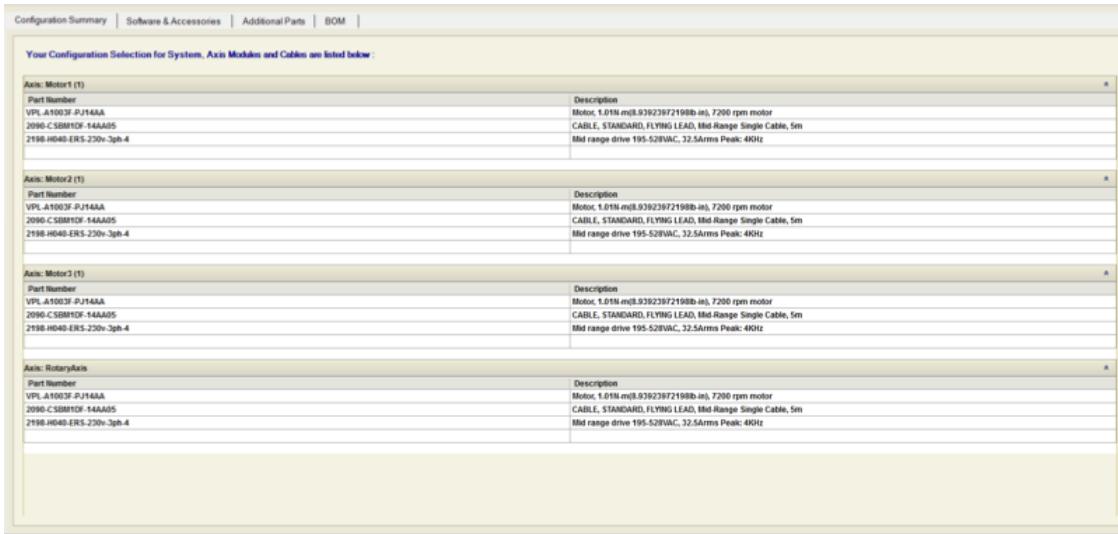


Figura 5-12.: Software Motion Analyzer, resultado de configuración del sistema elegido.

Cantidad	Referencia Accesorio	Descripción
1	2198-H040-ADP-IN	Kit de conectores de entrada para el drive líder bastidor tamaño 2; contiene un conector de entrada para el bus AC, un conector T para el bus DC, y un conector de entrada para el bus DC de control.
3	2198-H040-ADP-T	Kit de conectores,entrada para un drive seguidor bastidor tamaño 2; contiene un conector T para el bus AC, un conector T para el bus DC, y 8 conectores de barras de 55mm para interconexión de dos drives en cada tipo de bus.

Tabla 5-7.: Accesorios de conexión de Bus Compartido requeridos para el sistema Kinetix 5500 elegido.

Por tanto, el cableado eléctrico de los drives se reduce simplemente a conectar tres cables de potencia en los tres terminales del conector AC del accesorio 2198-H040-ADP-IN, y tres cables (provenientes de una fuente de 24VDC externa) a los dos terminales del conector DC de control del accesorio 2198-H040-ADP-IN. Los accesorios 2198-H040-ADP-T se encargarán de repartir las señales AC, DC de potencia y DC de control drive a drive, reduciendo así la complejidad en el cableado eléctrico del sistema de control.

Se aclara que los accesorios de la Tabla 5-7 corresponden a un sistema de cuatro drives (cuatro ejes de movimiento), de manera que si inicialmente solo se configuran tres ejes, solo se requerirán dos accesorios referencia 2198-H040-ADP-T; el accesorio 2198-H040-ADP-IN sigue siendo necesario. Para una mejor información, las Figura 5-14 y Figura 5-15 corresponden a una descripción detallada de los accesorios de Bus compartido disponibles para los tamaños 1 y 2 de los drives del sistema Kinetix 5500.

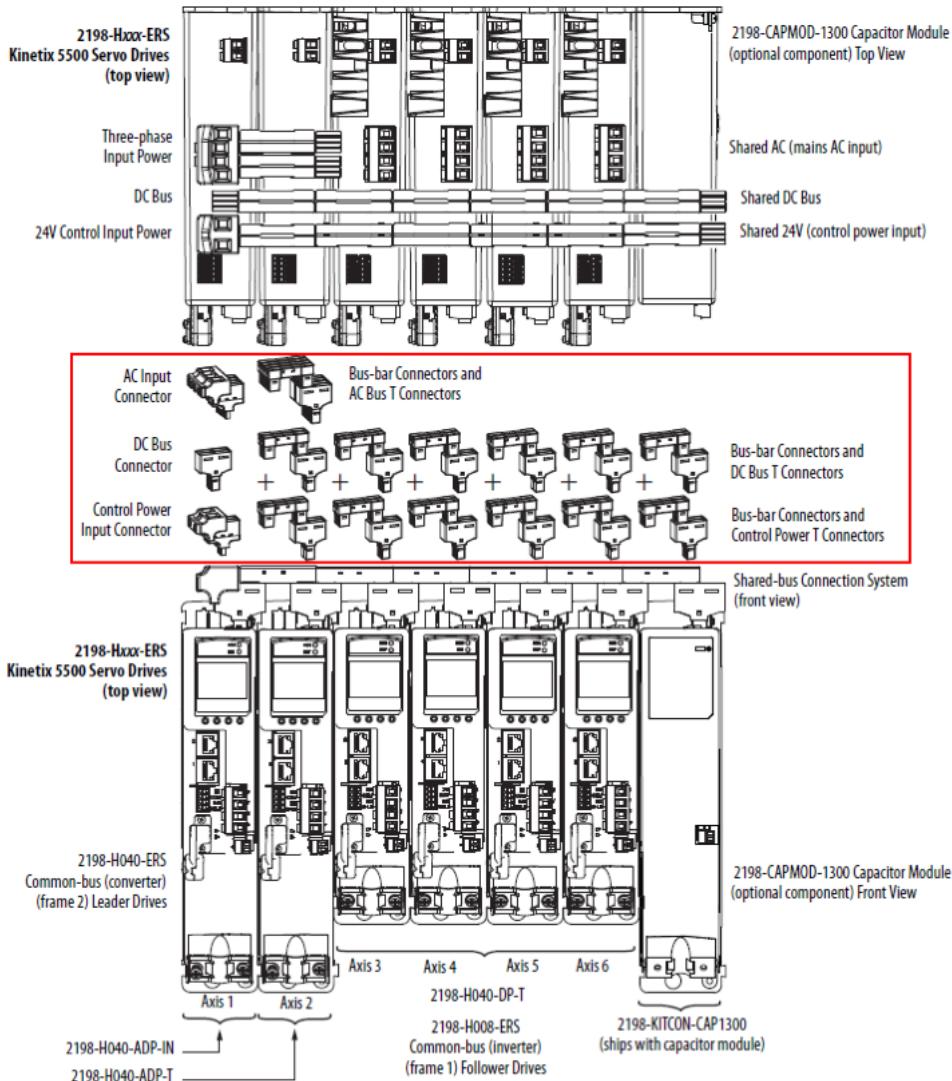


Figura 5-13.: Configuración típica de Buses compartidos para el sistema Kinetix 5500.

Input Power Connector Kit Catalog Numbers

Frame Size	Cat. No.	Description	Contents	Illustration
1 and 2	2198-H040-ADP-IN	Kinetix 5500 Frame 1 and 2 connectors for the first drive in a multi-axis system.	<ul style="list-style-type: none"> • AC input connector for frame 1 and 2 drives • DC bus T-connector • Control power input connector 	 AC Input Connector
3	2198-H070-ADP-IN	Kinetix 5500 Frame 3 connectors for the first drive in a multi-axis system.	<ul style="list-style-type: none"> • AC input connector for frame 3 drive • DC bus T-connector • Control power input connector 	 DC Bus T-connector

Figura 5-14.: Accesorios de Conexión de Alimentación (drive líder) para el sistema Kinetix 5500.

Frame 1 or 2 Follower Drive Connector Kit Catalog Numbers

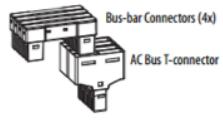
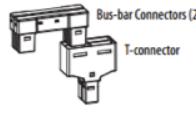
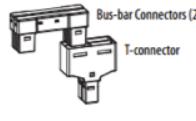
Cat. No.	Description	Contents	Illustration
2198-H040-A-T	T-connector and bus-bars for the AC bus on Frame 1 or 2 follower drives	<ul style="list-style-type: none"> • AC bus T-connector • Bus-bar connectors, 55 mm, quantity 4 	
2198-H040-D-T	T-connector and bus-bars for the DC bus on Frame 1 or 2 follower drives	<ul style="list-style-type: none"> • DC bus T-connector • Bus-bar connectors, 55 mm, quantity 2 	
2198-H040-P-T	T-connector and bus-bars for control power on Frame 1 or 2 follower drives	<ul style="list-style-type: none"> • Control power T-connector • Bus-bar connectors, 55 mm, quantity 2 	
2198-H040-AD-T	T-connectors and bus-bars for the AC and DC bus on Frame 1 or 2 follower drives	<ul style="list-style-type: none"> • AC bus T-connector • DC bus T-connector • Bus-bar connectors, 55 mm, quantity 6 	 AC Bus T-connector Bus-bar Connectors (2x)
2198-H040-AP-T	T-connectors and bus-bars for the AC bus and control power on Frame 1 or 2 follower drives	<ul style="list-style-type: none"> • AC bus T-connector • Control power T-connector • Bus-bar connectors, 55 mm, quantity 6 	 T-connector Bus-bar Connectors (2x)
2198-H040-DP-T	T-connectors and bus-bars for the DC bus and control power on Frame 1 or 2 follower drives	<ul style="list-style-type: none"> • DC bus T-connector • Control power T-connector • Bus-bar connectors, 55 mm, quantity 4 	 DC Bus T-connector Bus-bar Connectors (2x) Control Power T-connector
2198-H040-ADP-T	T-connectors and bus-bars for the AC bus, DC bus, and control power on Frame 1 or 2 follower drives	<ul style="list-style-type: none"> • AC bus T-connector • DC bus T-connector • Control power T-connector • Bus-bar connectors, 55 mm, quantity 8 	 AC Bus T-connector Bus-bar Connectors (2x) DC Bus T-connector Bus-bar Connectors (2x) Control Power T-connector

Figura 5-15.: Accesorios de Conexión para drive seguidor (tamaño 1 y 2 únicamente), para el sistema Kinetix 5500.

Selección de cables de conexión de servomotores

Como se indicó durante el proceso de selección de los servomotores del robot, estos servomotores se caracterizan por tener integrado un encoder de alta resolución (18 bits) para retroalimentación al drive de la posición angular del eje del servomotor. Además se seleccionó un servo drive con freno de retención integrado, que funciona a 24 VDC. El diseño del servomotor VPL posee un solo conector que engloba las señales mencionadas antes, junto con las señales de potencia del mismo; esto se traduce en la utilización de un solo cable compacto para conectar al servomotor, lo cual nuevamente simplifica enormemente el tiempo y complejidad de construcción del robot.

Rockwell así ofrece una amplia gama de cables para todos los tipos de servomotores y motores que ofrece, de manera que resulta difícil realizar de forma manual la selección del cable requerido. Por esta razón, se acudió de nuevo al software Motion Analyzer, mediante el cual se logró la selección de los cables de los servomotores en cuestión de minutos. El resultado puede igualmente verse en la Figura 5-12. De esta se observa que para los tres ejes se obtuvo

la misma referencia de cable: 2090-CSBM1DF-14AA05. Este cable corresponde a una versión estándar (ya que existe una versión flexible especial para aplicaciones en los que el servomotor se mueve con la carga) y posee una longitud de 5 metros, la cual se estimó considerando a priori las dimensiones del bastidor. Observe en la Figura 5-16 que en el software Motion Analyzer en la vista de configuración de cada eje del sistema, simplemente se escoge si el cable es tipo estándar o flexible y la longitud del mismo; así el mismo software se encarga de escoger la mejor referencia teniendo en cuenta los parámetros ingresados, y el servo drive y servomotor escogido.

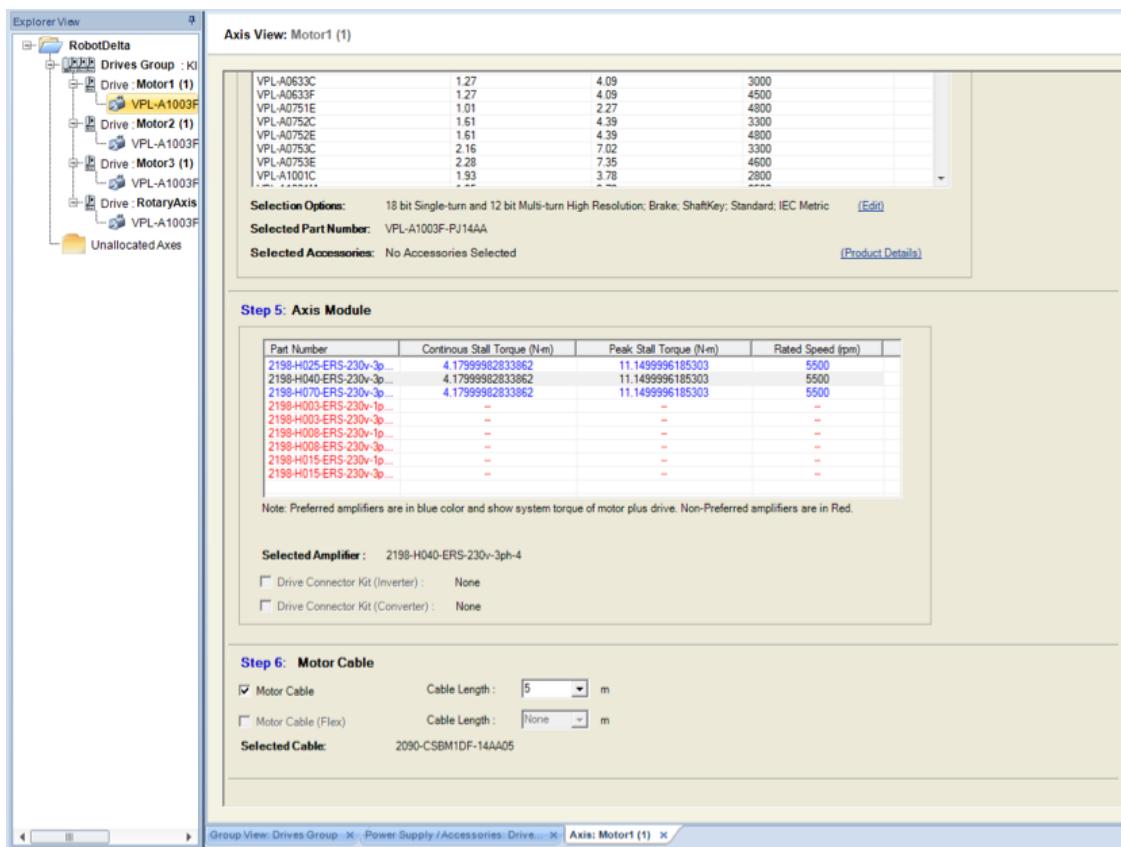


Figura 5-16.: Selección del cable del servomotor en el software Motion Analyzer.

5.2.2. Controlador de movimiento

El controlador de movimiento es el dispositivo de hardware mediante el cual es posible coordinar la serie de movimientos para un sistema de ejes de movimiento completo.

Rockwell ofrece distintas series de controladores programables que van desde aplicaciones simples y pequeñas, hasta aplicaciones de altas prestaciones con cantidades considerables de entradas y salidas.

De acuerdo a la guía de selección de Control de Movimiento de Rockwell (documento referencia GMC-SG001U-EN-P) [10], el controlador más adecuado para el sistema de drives **Kinetix 5500** es la serie de controladores programables de gama media **CompactLogix**, o la serie de altas prestaciones **ControlLogix**. Este proceso de selección puede verse en la Figura 5-2.

Ya que se buscan costos reducidos para el robot delta diseñado, se hace evidente que se requiere un controlador que no sea demasiado costoso. Considerando únicamente este criterio, se decidió seleccionar el controlador de gama media **CompactLogix**.



Figura 5-17.: Controladores CompactLogix de Rockwell Automation.

El paso final de selección por tanto consistió en elegir el controlador más apropiado para el control de movimiento, de acuerdo a siguientes requerimientos:

- El controlador debe poder integrarse fácilmente a la red de comunicaciones industriales Ethernet/IP, pues cada drive del sistema Kinetix 5500 recibe los comandos de control mediante este tipo de interfaz.
- El controlador debe permitir el control independiente y/o coordinado de mínimo tres ejes de movimiento rotacionales, los requeridos por el robot en su estado inicial de diseño.
- El controlador debe contar con entradas/salidas (digitales y/o analógicas) adicionales para permitir la adición futura de sensores y actuadores especiales, como por ejemplo finales de carrera para evitar colisiones, válvulas neumáticas para distintos tipos de efectores finales ubicados en la plataforma móvil del robot (para efectos de manipulación),

entre otros. Estas señales deben poder integrarse perfectamente a la programación de control de movimiento del controlador, ya que todas estas señales generalmente están explícitamente coordinadas con los movimientos del robot para lograr aplicaciones de posicionamiento específicas en la industria.

- Se debe establecer un compromiso adecuado entre costo/beneficios del controlador. El costo del controlador no se posee, de manera que se asumió de manera natural que un controlador será más costoso entre más funciones posea.

Para llevar a cabo la selección del controlador CompactLogix más apropiado para el robot de acuerdo a los criterios preestablecidos, se utilizó la guía de selección de CompactLogix (documento referencia 1769-SG001O-EN-P) [5]. La tabla de la página siete de la guía de selección brinda un panorama general de la gama de controladores para la serie CompactLogix. Esta tabla se resume en el presente documento en la Tabla 5-8.

Característica	Controladores CompactLogix 5370L1	Controladores CompactLogix 5370L2	Controladores CompactLogix 5370L3	Controladores CompactLogix 1768
Campo de Aplicación	Aplicaciones pequeñas, incluye I/O embebidas	Aplicaciones pequeñas, incluye I/O embebidas	Aplicaciones de propósito general	Seguridad Integrada, Control de Movimiento mediante SERCOS (fibra óptica)
Capacidad de Programa	32 tareas; 100 programas/tarea	32 tareas; 100 programas/tarea	32 tareas; 100 programas/tarea	32 tareas; 100 programas/tarea
Memoria de usuario	1769-L16ER: 384KB 1769-L18ER(M): 512KB	1769-L24ER: 750KB 1769-L27ER: 1MB	1769-L30ER-(NSE) 1769-L30ERM: 1MB 1769-L33ER: 2MB 1769-L33ERM: 2 MB 1769-L36ERM: 3 MB	1768-L43: 2 MB 1768-L43S: 2 MB + 0.5 MB seguridad. 1768-L45: 3 MB 1768-L45S: 3 MB + 1 MB seguridad
Puertos integrados	2 puertos Ethernet/IP 1 USB	2 puertos Ethernet/IP 1 USB	2 puertos Ethernet/IP 1 USB	1 puerto serial RS-232.
Opciones de comunicación	Ethernet/IP doble puerto	Ethernet/IP doble puerto DeviceNet	Ethernet/IP doble puerto DeviceNet	Ethernet/IP ControlNet DeviceNet

Tabla 5-8.: Características generales de los Controladores CompactLogix.

De la Tabla 5-8 se infiere que dentro la gama existen dos tipos principales: la serie 5370 y la serie 1768. La serie 5370 es especial para aplicaciones estándar, mientras que la serie 1780 se utiliza para funciones avanzadas de seguridad. Asimismo en la serie 5370 la comunicación es Ethernet/IP, mientras que la 1780 puede usar varios protocolos. Dado que la serie 5370 posee dos puertos Ethernet/IP integrados, mientras que la 1780 requiera de módulos adicionales, hace que la serie 5370 sea la más adecuada para el diseño del robot.

El proceso final de selección consistió en determinar dentro de la serie CompactLogix 5370 cuál controlador cumple los dos requisitos de diseño restantes. Utilizando la guía de selección de CompactLogix [5], se determinó que para cada sub-serie (L1, L2 o L3) existen controladores con la función de Control de Movimiento integrada, y controladores sin dicha función. Por simplicidad en la Tabla 5-9 se presentan algunas características relevantes para los controladores de movimiento.

Sub-serie 5370	Referencia	Memoria de Usuario	Puertos de Comunicación	I/O embebidas	Conexiones Ethernet /Conexiones IP	Control de Movimiento sobre Ethernet/IP	Capacidad de Expansión
L1	1769-L18ERM-BB1B	512 KB	2 EtherNet/IP 1 USB	16 DI 24VDC 16 DO 24VDC	256/120	2 ejes máx.	8 puntos de módulos I/O
L2	1769-L27ERM-QBFC1B	1 MB	2 EtherNet/IP 1 USB	16 DI 24VDC	256/120	4 ejes máx.	4 módulos serie1769
				16 DO 24VDC			
				4 AI			
				2 AO			
				4 HSC DO			
L3	1769-L30ERM	1 MB	2 EtherNet/IP 1 USB	Ninguna	256/120	4 ejes máx.	8 módulos serie1769
	1769-L33ERM	2 MB	2 EtherNet/IP 1 USB	Ninguna	256/120	8 ejes máx.	16 módulos serie1769
	1769-L36ERM	3 MB	2 EtherNet/IP 1 USB	Ninguna	256/120	16 ejes máx.	30 módulos serie1769

Tabla 5-9.: Características principales de los controladores con Control de Movimiento Integrado de la serie CompactLogix 5370.

De la Tabla 5-9 se pudo determinar que dentro de la serie 5370, la sub-serie L1 corresponde a la gama básica (de bajas prestaciones y por ende económica), la sub-serie L2 corresponde a la gama media (precio moderado y aplicaciones medianamente complejas), y la sub serie L3 corresponde a la gama alta (altas prestación y aplicaciones complejas). El parámetro más importante para seleccionar en definitiva el controlador a usar es el número máximo de ejes de control de movimiento que puede manejar. Este parámetro está claramente definido en la Tabla 5-9. Se observa que el único controlador que no cumple con las condiciones es el correspondiente a la sub-serie L1: el controlador referencia 1769-L18ERM-BB1B, el cual solo puede controlar hasta dos ejes de movimiento; claramente no es posible usar este controlador, pues al menos se requieren tres ejes de movimiento, de manera que este controlador se rechazó. Por tanto se debió elegir el controlador entre los ofrecidos por las sub-series L2 y L3.

Se tiene que el controlador de la serie L2, con referencia 1769-L27ERM-QBFC1B, puede ser el controlador apropiado, pues permite un máximo de cuatro ejes de movimiento, además de poseer embebidas (sin necesidad de hardware adicional) 16 entradas digitales a 24 VDC, 14 salidas digitales a 24VDC, y una fuente interna de 24 VDC de salida para alimentación de las I/O, lo que le hace un controlador muy compacto y posiblemente con un precio relativamente aceptable. Este controlador en teoría cumple con los requisitos de selección del controlador de movimiento, pero puede tener una desventaja si adicionalmente se busca una expansión de más de cuatro ejes de movimiento integrados al sistema de control del robot.

Por la razón anterior, se decidió finalmente elegir el controlador de la sub-serie L3, el **1769-L33ERM**, que permite un máximo de ocho ejes de movimiento. Esta característica le da al sistema de control de movimiento una capacidad más que suficiente de expansión futura para mejorar el robot, o para una aplicación compleja que requiera ejes adicionales de movimiento. Una desventaja de la sub-serie L3 es que no posee I/O embebidas, de manera que al controlador se le adicionó módulo de expansiones de I/O, más una fuente de alimentación

de 24 VDC para las señales del módulo de I/O.

5.2.3. Interfaz hombre máquina

Como se indicó al inicio de la sección del sistema de control, el robot requiere de una interfaz Hombre-Máquina (o HMI, por sus siglas en inglés, *Human-Machine Interface*), precisamente a nivel de máquina, con el propósito de permitir la operación directa e inicial del robot, además de ser un punto visual de configuración de los parámetros del robot y del sistema de control y de la red Ethernet/IP del mismo. Los criterios de selección que se establecieron para escoger correctamente la HMI se listan a continuación:

- La HMI debe poder integrarse fácilmente al sistema de control de movimiento, pues a través de esta interfaz gráfica será posible configurar parámetros del robot, así como llevar a cabo acciones básicas de posicionamiento. Ya que tanto el controlador como el conjunto de drives se comunican a través del protocolo Ethernet/IP (mediante puertos RJ-45), es necesario por tanto que la HMI también posea al menos un puerto Ethernet RJ-45 con el protocolo Ethernet/IP integrado.
- La HMI debe tener un tamaño razonable que permite ver con buena resolución los distintos despliegues de configuración.
- En lo posible debe ser táctil para facilitar la manipulación de la misma; no obstante es importante que este posea botones de presión, ya que será un complemento sobre todo para el posicionamiento del robot en su espacio de trabajo.

La selección de la HMI se realizó igualmente con los productos ofrecidos por Rockwell Automation destinados a visualización de procesos. La línea especializada en este sector se conoce como **FactoryTalk View**. La selección se realizó con la ayuda de la Guía de Selección para Soluciones de Visualización de Rockwell Automation (documento referencia VIEW-SG001H-EN-P) [26]. En términos generales, se buscó que el HMI tuviese opción de comunicación mediante Ethernet/IP, que fuese lo suficientemente grande para brinda una buena resolución en los despliegues, que además de ser táctil tuviese teclado tradicional, y que tuviese funciones adicionales compatibles con aplicaciones de Windows, para eventuales aplicaciones futuras que requieran software especializado. De acuerdo a la guía el HMI más adecuado fue el correspondiente a la serie **PanelView Plus 6** con la referencia **2711P-B10C4A9**. Este HMI se caracteriza básicamente por ser de 10.4 pulgadas, contar con una pantalla táctil a full color, además de poseer un teclado adicional completo (alrededor de 30 teclas con variadas funciones). Una ventaja importante de este Panel es que posee integrado el sistema operativo Windows CE 6.0, el cual viene totalmente abierto para abrir documentos, explorar la web y realizar operaciones típicas de un sistema operativo Windows clásico. Las propiedades más relevantes de la HMI escogida se presentan en la Tabla 5-10.

Característica	Descripción
Entrada de Operario	Teclado/Pantalla táctil
Tipo de pantalla	Matriz TFT a color
Tamaño	10.4 pulgadas
Área de visualización	211x158 mm
Resolución	600x480 pixeles permite imágenes con color de 18 bits
Teclado	32 teclas teclas con membrana de acero inoxidable incluyen teclas numéricas de navegación y función
Memoria disponible	512 MB en RAM no volátil
Sistema Operativo	Windows CE 6.0 con funciones extendidas
Puertos de Comunicación	1 Ethernet/IP (RJ-45), 1 RS232, 2 USB, permite módulos opcionales para DeviceNet y ControlNet
Alimentación	85-264 VAC 50/60 Hz
Consumo de potencia	Máximo 160 W
Peso Aproximado	2.8 kg
Dimensiones (HxWxD)	248x389x55mm

Tabla 5-10.: Características principales de la HMI 2711P-B10C4A9.

Es importante resaltar que se requiere el software FactoryTalk View ME (Machine Edition), mínimo en la versión 6.0 para poder configurarlo. El alcance de este proyecto en cuestión no implica el desarrollo de la aplicación de visualización del HMI para el robot, pues simplemente no se contó con el software licenciado, ni fu considerado dentro del alcance del proyecto desde el inicio. Por tanto, es importante que tras la construcción del robot diseñado, se adquieran las licencias pertinentes y se desarrolle la aplicación, de acuerdo a las necesidades de la misma para el robot. En la Figura 5-18 se tiene una apariencia aproximada de la HMI. Se puede ver con detalle en la figura que efectivamente la HMI cuenta con un teclado bastante completo que le brinda al robot una flexibilidad en cuanto a posicionamiento y configuración desde la terminal gráfica. Por ejemplo, las teclas de navegación pueden ser útiles para lograr desplazamientos paso a paso en el robot, mientras que las teclas de función pueden ser destinadas a macros preestablecidas de movimiento.

5.2.4. Accesorios sistema de control

1. **Selección de la Fuente DC de Control para el Sistema Kinetix 5500:** De acuerdo al manual del sistema Kinetix 5500 [9], cada drive dentro de un sistema de control de movimiento, así haya sido configurado en modo independiente (single-axis),

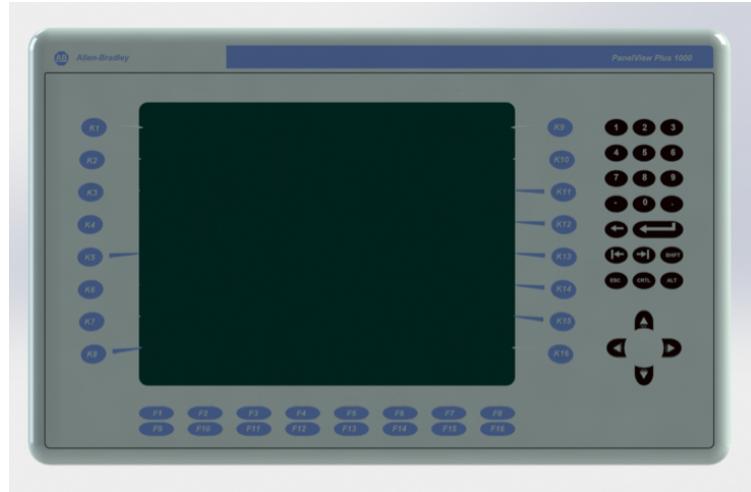
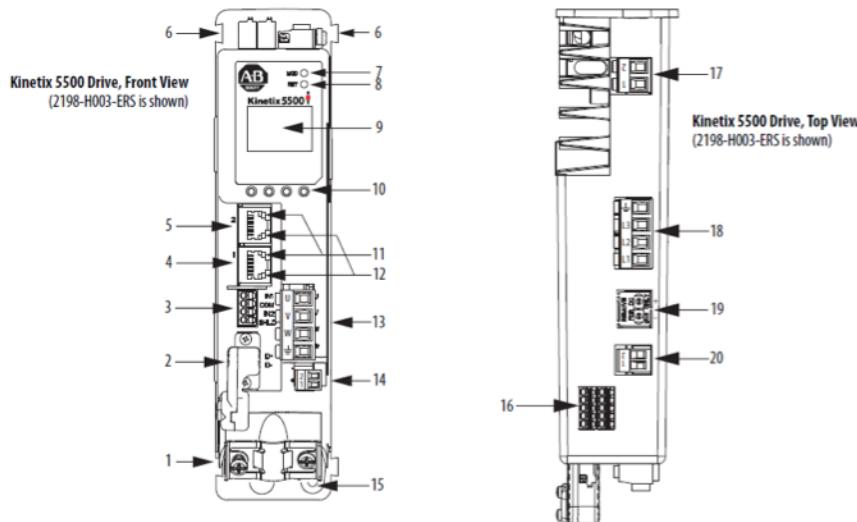


Figura 5-18.: HMI PanelView Plus 6 1000 seleccionado.

o en modo bus compartido (multi-axis), requiere de una fuente externa de alimentación a 24 VDC para la circuitería de la electrónica de control interna del mismo drive.

Kinetix 5500 Drive Features and Indicators



Item	Description
1	Motor cable clamp
2	Motor feedback (MF) connector
3	Digital inputs (IOD) connector
4	Ethernet (PORT1) RJ45 connector
5	Ethernet (PORT2) RJ45 connector
6	Zero-stack mounting tab/cutout
7	Module status indicator

Item	Description
8	Network status indicator
9	LCD display
10	Navigation pushbuttons
11	Link speed status indicators
12	Link/Activity status indicators
13	Motor power (MP) connector
14	Motor brake (BC) connector

Item	Description
15	Ground terminal
16	Safe torque-off (STO) connector
17	Shunt resistor (RC) connector
18	AC mains input power (IPD) connector
19	DC bus (DC) connector (under cover) ⁽¹⁾
20	24V control input power (CP) connector

(1) DC bus connector ships with protective knock-out cover that can be removed for use in shared-bus configurations.

Figura 5-19.: Descripción general de un servo-drive Kinetix 5500.

El conector de 24 VDC para la circuitería de la electrónica de control interna puede verse como el ítem #20 en la Figura 5-19 [11]. Es en este terminal en donde debe conectarse la salida DC de la fuente de alimentación requerida.

Para dimensionar correctamente la fuente DC requerida, se siguieron las recomendaciones del Apéndice C del manual del usuario del sistema Kinetix 5500 [9]. Este documento contiene una tabla (tabla 70) con los consumos de corriente DC de la circuitería de control para cada referencia de drive, la cual se resume en este documento en la Tabla 5-11.

Drive	Corriente para servomotor sin freno DC (24 VDC)	Corriente para servomotor con freno DC (24 VDC)	Corriente de arranque (24 VDC)
2198-H003-ERS	0.4 A	2.4 A	2.0 A
2198-H008-ERS			
2198-H015-ERS	0.8 A	2.8 A	3.0 A
2198-H025-ERS			
2198-H040-ERS			
2198-H070-ERS	1.3 A	3.3 A	

Tabla 5-11.: Consumo de Corriente DC para la circuitería de control de los drives Kinetix 5500.

Así que para calcular la fuente de 24VDC, que es compartida por todos los drives que están en modo de Bus compartido, simplemente consiste en multiplicar el número de drives por las respectivas corrientes de la Tabla 5-11. El total obtenido para cada parámetro fueron en conjuntos los utilizados para seleccionar la fuente DC. Una importante restricción es que la fuente debe ser con alimentación monofásica a 220 VAC, ya que la acometida principal del sistema de control es precisamente trifásica a 220 VAC; esto con el fin de reducir tiempo y cantidad de cableado eléctrico.

Por tanto, considerando cuatro ejes de movimiento iguales con el drive escogido, la referencia 2198-H040-ERS, se procedió a calcular el consumo total de corriente DC de la circuitería de control del drive. Se consideró que cada servomotor tiene integrado un freno DC de retención, de manera que este será el parámetro principal de diseño; la corriente de arranque inicial será un parámetro especial para escoger la fuente DC con mejor rendimiento. El cálculo realizado y sus resultados se resumen en la Tabla 5-12.

Drive	Corriente para servomotor sin freno DC (24 VDC)	Corriente para servomotor con freno DC (24 VDC)	Corriente de arranque (24 VDC)
2198-H040-ERS	0.8*4=3.2A	2.8*4=11.2A	3.0*4=12A

Tabla 5-12.: Consumo de Corriente DC para el sistema de drives elegidos.

Por tanto, ya que los servomotores conectados tienen frenos DC integrados, la corriente

continua que deberá soportar la fuente DC será de 11.2A, y deberá soportar también una corriente de arranque de 12 A. Considerando un voltaje de operación de 24 VDC, esto se traduce en potencia mediante la Ley de Ohm como $11.2 \times 24 = 270$ W aproximadamente, el parámetro necesario para seleccionar la fuente (ya que estas generalmente se especifican en potencia de salida DC).

Continuando con la línea de productos de Rockwell Automation para darle consistencia al sistema de control y facilitar las tareas futuras de mantenimiento, se decidió utilizar la serie de fuentes DC de propósito general serie 1606. La selección se llevó a cabo con la herramienta online de configuración de productos de Rockwell Automation [19], cuya ventana inicial puede verse en la Figura 5-20.



Figura 5-20.: Configurador Online de Productos de Rockwell Automation.

Se seleccionó luego la categoría Power Supplies y la correspondiente subcategoría Switched Mode. Finalmente apareció la serie de fuentes DC de modo conmutado (Switched Mode). Se procedió a acceder al configurador haciendo clic en el correspondiente enlace. Este proceso se resume con detalle en la Figura 5-21.

La selección final en el configurador online puede verse en la Figura 5-22. La referencia de la fuente es 1606-XLS480EC, caracterizada por brindar una potencia de salida continua de 480 W y una potencia de arranque de hasta el 150 % respecto a la nominal. Esta fuente DC de modo conmutado es ampliamente mayor a los 270 W esperados para la aplicación, pero debió seleccionarse la de 480 W, ya que la referencia anterior solo puede cubrir hasta 240 W. Otra característica importante es que la entrada de la fuente es efectivamente monofásica y puede soportar voltajes de entrada en el rango 100-240 VAC. Una representación real de la fuente puede verse en la Figura 4-23.

2. La selección del elemento de protección contra cortocircuitos de todo el sistema de



Figura 5-21.: Selección de la serie 1606 de fuentes DC en el configurador online de Rockwell Automation.



Figura 5-22.: Selección final de la fuente DC externa para la circuitería de control DC de los servo drives elegidos.

control se llevó a cabo utilizando el software Motion Analyzer nuevamente, ya que este hace una selección automática de la protección con base en la configuración del sistema de control de movimiento ingresada.

Se decidió emplear el elemento más común para proteger contra cortocircuitos: el disyuntor magneto-térmico, conocido comúnmente como Breaker (o Circuit Breaker).

La selección puede ver en Figura 5-24. Observe que el software seleccionó un breaker tripolar (para un sistema trifásico) con una corriente nominal de 60 A, cuya referencia es 140-G2C3-60, fabricado por Rockwell Automation. El breaker corresponde a la serie 140U, un breaker tipo MCCB (Molded Case Circuit Breaker). Este se caracteriza por tener una capacidad de ruptura de 65 kA a 240 VAC. Las dimensiones y apariencia aproximadas del MCCB pueden verse en la Figura 5-25.



Figura 5-23.: Fuente DC referencia 1606-XLS480EC seleccionada para la circuitería de control de los servo drives elegidos.

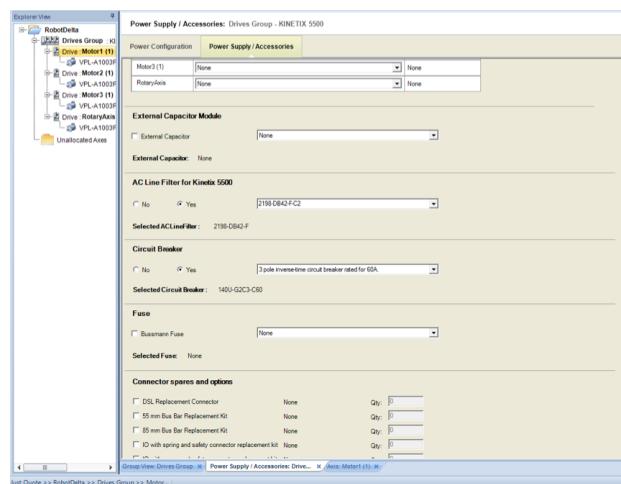


Figura 5-24.: Selección del disyuntor magneto-térmico totalizado para el sistema de control.

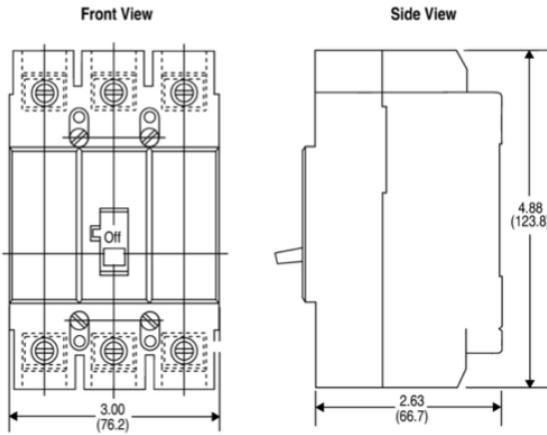


Figura 5-25.: Dimensiones del disyuntor magneto-térmico totalizador seleccionado para el sistema de control (pulgadas/milímetros).

5.2.5. Configuración en red del sistema de control

Una vez seleccionados los distintos elementos de hardware del sistema de control, se procedió a elegir la topología de red de comunicación más adecuada. Teniendo en cuenta que todo el hardware fue seleccionado para utilizar el protocolo Ethernet/IP bajo una red física Ethernet 10/100 Base Tx (puerto físico RJ-45), el diseño del sistema de comunicación se basó enteramente en los distintos modos de red disponibles para esta arquitectura.

Según el manual de diseño del sistema Kinetix 5000 [5], existen tres tipologías de red disponibles, Linear, en Anillo y en Estrella, las cuales se describen brevemente a continuación:

- **Topología Linear:** en esta tipología los elementos se conectan en red, uno detrás de otro. Tiene la gran desventaja de que si un elemento falla interrumpe la comunicación entre los elementos separados por el equipo en falla. Por esta razón, debido a que se requiere 100 % de disponibilidad de la red para comandar el sistema de control de movimiento Kinetix 5500, se debió descartar esta tipología. Un ejemplo de tipología linear puede verse en la Figura 5-26.
- **Topología en Anillo:** En esta tipología de red los dispositivos se conectan uno al lado del otro, formando un circuito físico cerrado. En esta configuración aunque un equipo falle, la comunicación sigue funcionando sin problemas entre los demás dispositivos. No obstante requiere de hardware adicional por cada dispositivo que no posea doble puerto físico para completar el anillo. Por esta razón fue también descartada. Un ejemplo típico se tiene en la Figura 5-27.
- **Tipología en Estrella:** en esta tipología todos los equipos se concentran en un dispositivo común conocido como switch. Igual que en la tipología de anillo, si un solo nodo de la red falla, no afecta para nada la comunicación entre los equipos restantes. La

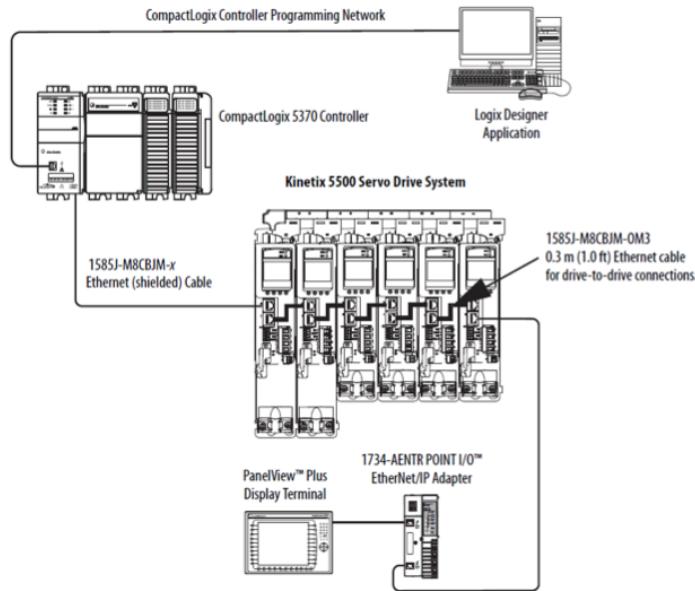


Figura 5-26.: Tipología de red Linear típica para un sistema Kinetix 5500.

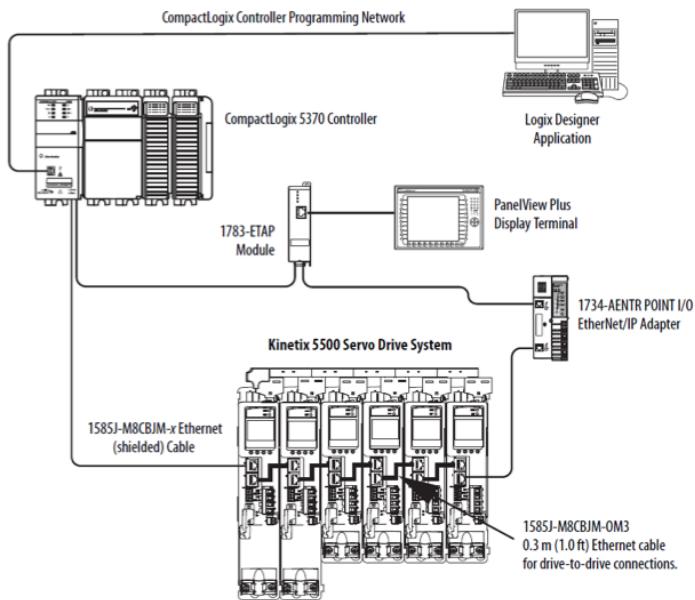


Figura 5-27.: Tipología de red en Anillo típica para un sistema Kinetix 5500.

gran ventaja es que solo requiere de un dispositivo básico de hardware para funcionar (un switch), y su forma de configuración es de las más sencillas. Por este principio se decidió utilizar la tipología en estrella.

Obsérvese en la Figura 4-28 que solo se requiere de un switch para lograr la comunicación entre todos los dispositivos de la red. Se propone por tanto la utilización de un Switch no

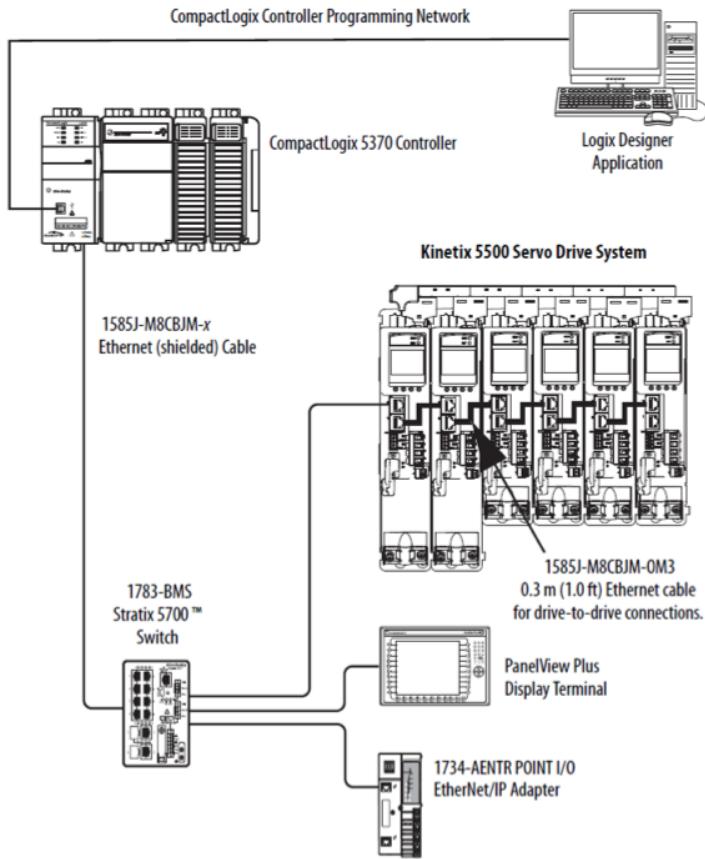


Figura 5-28.: Tipología de red en Estrella típica para un sistema Kinetix 5500.

administrado (es decir que no requiere configuración) de la serie Stratix 2000 de Rockwell Automation con referencia 1783-US05T. Este switch se caracteriza por tener cinco puerto de conexión, que son más que suficientes para conectar el sistema de servos Kinetix 5500, la HMI y el controlador de movimiento (serían en total 3 puertos, quedarían disponibles dos).

5.2.6. Lógica preliminar del sistema de control

Para el desarrollo de este proyecto se decidió realizar una exploración preliminar al software de programación y configuración del sistema Kinetix 5500 y del controlador de movimiento CompactLogix. La herramienta desarrollada por Rockwell para este fin se conoce como Studio 5000 Logix Designer (en su versión actual V21.0), la cual es una herramienta que permite programar de manera integrada tanto controladores como sistemas de drives para control de movimiento.

Se planteó en esta sección simplemente una exploración inicial de configuración del controlador junto con los drives, pero se advierte que el desarrollo completo de una lógica de control requiere del robot físico ya construido y con el hardware de control completamente instalado.

y cableado. Ya que durante este proceso solo se contó con una licencia de prueba del software Studio 5000, el desarrollo que se hizo fue bastante simple y limitado.

5.3. Diseño del gabinete de control

El gabinete de control es el elemento que permite organizar y proteger todos los elementos de potencia y control en un único espacio confinado. Con esto se logra también facilitar el cableado requerido para interconectar los distintos elementos y darle así una estructura organizada. Los gabinetes de control deben ser diseñados en Colombia de acuerdo a los procedimientos y recomendaciones del Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (por sus siglas en español, RETIE), además de las propias recomendaciones del fabricante de cada hardware que se instala en dicho gabinete. De igual manera deben cumplir las normas internacionales reguladas por la IEC (Comisión Electrotécnica Internacional). Ya que los elementos en el gabinete trabajan en un rango de voltaje inferior a los 1000 VAC (o Vrms), se considera un gabinete de baja tensión según RETIE [13], artículo 12, de manera que el gabinete debe ser diseñado cumpliendo la norma internacional específica IEC 61439-1 para gabinetes de baja tensión.

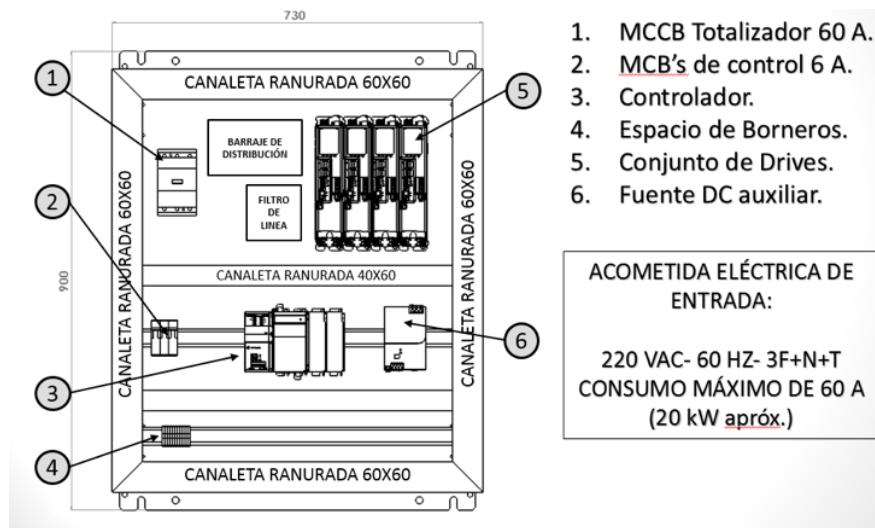


Figura 5-29.: Distribución de elementos del sistema de control en el gabinete (en la bandeja de ensamble).

Los requerimientos importantes para el diseño del gabinete de control fueron los siguientes:

- El cofre como tal debe ser del tipo consola para así permitir integrar en un solo conjunto el sistema de control y la interfaz de operación del robot.
- El cofre debe ser capaz de proteger los elementos con un grado de protección mínimo IP54 (típico para gabinetes eléctricos instalados en ambientes encerrados).

- El cofre debe ser construido en lámina de acero tipo cold rolled con un calibre mínimo 18 para garantizar una buena resistencia mecánica frente a deformaciones (según RETIE [13]).
- Todas las áreas o partes expuestas del cofre deben estar totalmente protegidas con pinturas o aditivos que brinden suficiente protección contra la corrosión.
- Para la distribución de los elementos deben considerarse sus medidas con el fin de seleccionar las dimensiones adecuadas para el cofre, además de tener en cuenta las recomendaciones e indicaciones de los fabricantes de los elementos a instalar en el cofre, en lo que se refiere a formas de instalaciones y separaciones y espacios libres necesarios.

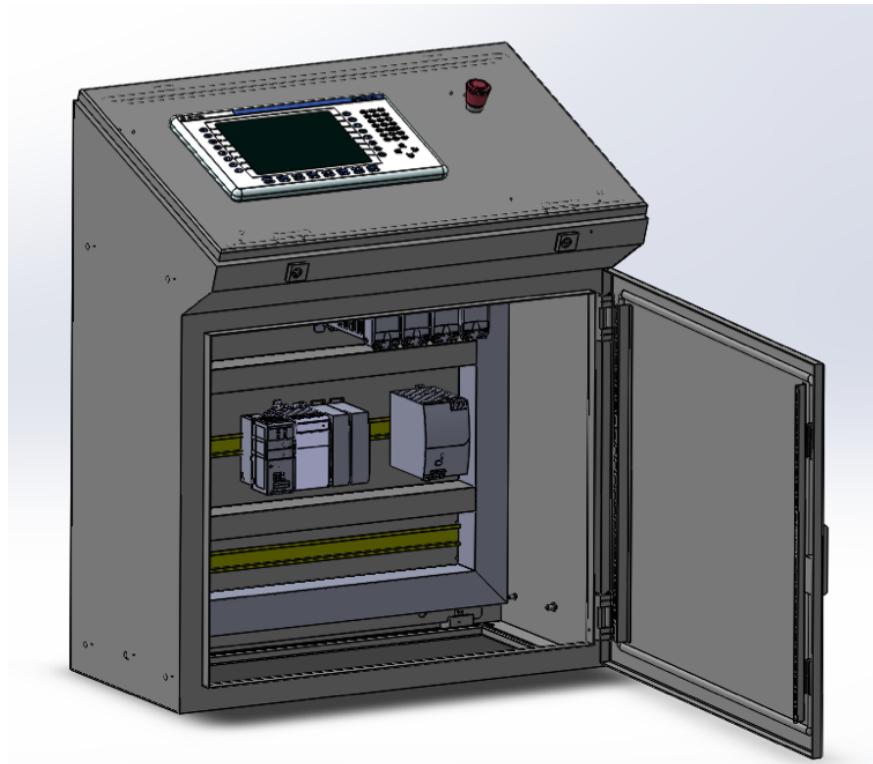


Figura 5-30.: Apariencia final de diseño del gabinete (bandeja de ensamble e interfaz de operación).

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones

- Para el correcto cálculo del espacio de trabajo del robot no sólo se requirió la verificación cinemática de la nube de puntos propuesta, fue también necesaria la confirmación mediante el modelo CAD del robot, puesto que de esa manera se determinaron posiciones para las que se presentaban colisiones entre los elementos estructurales del robot, principalmente entre acoples y brazos pasivos. Asimismo, como medida preventiva fue necesaria la adición de rangos de seguridad para evitar colisiones entre las componentes del manipulador, dadas las velocidades relativamente elevadas que puede desarrollar. Esta circunstancia conjunto a una reducción moderada del espacio de trabajo del robot.
- El proceso de diseño es altamente iterativo, esto se evidenció en el diseño de la mayoría de los componentes estructurales del robot, los cuales tuvieron que ser modificados en múltiples ocasiones, aduciendo principalmente a causas de manufacturabilidad y facilidad de consecución. En esta medida se establece que a pesar de que se realizó un diseño con modelos de validación por simulación, el potencial proceso de construcción del manipulador permitiría incluir modificaciones para un modelo más refinado.
- A pesar de que se desarrolló un modelo de simulación del robot, el cual es posible de conectar a entornos de controladores virtuales, no fue posible realizar la simulación integral del robot con todo el sistema de control, debido a las limitaciones existentes en el software de Rockwell Automation.

6.2. Recomendaciones

Se presentan como una serie de aspectos que se podrían realizar en un futuro para emprender investigaciones similares o fortalecer la investigación realizada. Deben contemplar las perspectivas de la investigación, las cuales son sugerencias, proyecciones o alternativas que se presentan para modificar, cambiar o incidir sobre una situación específica o una problemática encontrada. Pueden presentarse como un texto con características argumentativas, resultado de una reflexión acerca de la tesis o trabajo de investigación.

A. Lista de piezas del diseño mecánico

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD	PLANO
1	Plataforma fija	1	7RCBFPP
2	Servomotor VPL-A1003F-PJ14AA (con accesorios)	3	N/A
3	Acople chaveta	3	9RCBPACH
4	Acople Motor - Base fija	3	8RCBFAMF
5	Acople Motor - Brazo Principal	3	10RCBFPAMP
6	Tubo Brazo Principal	3	11RCBPTBP
7	Acople Brazo Principal - Paralelogramo	3	12RCBPPBPP
8	Junta Esférica - Macho	12	13RCBPJEM
9	Vara Brazo Secundario	6	16RCBSVBS
10	Acople Brazo Secundario	12	15RCBSABS
11	Junta Esférica Hembra	12	14RCBSJEH
12	Conecotor rosado para resorte	12	17RCBSCCR
13	Plataforma Móvil	1	23RCBMPM
14	Acople Brazo secundario - Base Móvil	3	20RCBSASM
15	Acople de fijación para base Móvil	3	21RCBSAFM
17	Tornillo cabeza Allen M3x0.5x5	9	N/A
18	Tornillo cabeza Allen M3x0.5x6	6	N/A
19	Tornillo cabeza Allen M3x0.5x10	6	N/A
24	Tornillo cabeza Allen M4x0.7x50	18	N/A
20	Tornillo cabeza Hexagonal M4x0.7x10	6	N/A
21	Tornillo cabeza Allen M5x0.8x12	3	N/A
22	Tornillo cabeza Allen M6x1.0x40	12	N/A
23	Tornillo cabeza Allen M10x1.5x16	6	N/A
24	Tuerca Hexagonal M3x0.5	6	N/A
25	Tuerca Hexagonal M4x0.7	18	N/A
26	Tuerca Hexagonal M6x1.0	12	N/A

Dibujo: GRUPO TESIS ROBOT DELTA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Versión: Ing. Pedro Cárdenas
Diseño de Sistema de Ejes Complejos: Robot Delta

Corporativo:
Robot Delta Sin bastidor
A3

PLANO: 01RC
Cantidad: 1
ESCALA 1:3
Fecha: 2014/03/05
Hojas 1 DE 1

Bibliografía

- [1] *27650 Ball joints DIN 71802*. Norelem. 2012.
- [2] *AB Rotary Servo Motor Selection*. Rockwell Automation Inc. 2013.
- [3] Luigi Biagiotti y Claudio Melchiorri. *Trajectory Planning for Automatic Machines and Robots*. 1st. Springer Publishing Company, Incorporated, 2008.
- [4] L. Bonev. *Delta Parallel Robot - The story of success*. The Parallel Mechanism Information Center, 2001.
- [5] *CompactLogix System Selection Guide*. Rockwell Automation Inc. 2013.
- [6] *D2-800 Product Sheet*. Codian Robotics. 2012.
- [7] S. Khandani. “Engineering Design Process”. 2005.
- [8] *Kinetix 5500 Drive Systems Design Guide*. Rockwell Automation Inc. 2013.
- [9] *Kinetix 5500 Servo Drives User Manual*. Rockwell Automation Inc. 2013.
- [10] *Kinetix Motion Control Selection Guide*. Rockwell Automation Inc. 2013.
- [11] *Kinetix ServoDrives Especifications*. Rockwell Automation Inc. 2013.
- [12] J. P. Merlet. *Parallel Robots*. 2nd. Springer Publishing Company, Incorporated, 2010.
- [13] Ministerio de Minas y Energía de Colombia. http://www.minminas.gov.co/minminas/energia.jsp?cargaHome=3&id_categoria=157&id_subcategoria=770. Accessed: 30-08-2013.
- [14] Breña Ortega. “Diseño mecánico de un robot paralelo tipo delta de tres grados de libertad”. UNAM, 2005, pág. 122.
- [15] C. A. Peña Cortes, E. M. Oviedo y P. F. Cárdenas Herrera. “Optimización dimensional de un robot paralelo tipo delta basado en el menor consumo de energía”. En: *Ciencia e Ingeniería Neogranadina* (2011), págs. 73-88.
- [16] C. Peña, E. Martínez y E. Yime. “Diseño óptimo de un robot paralelo con configuración delta para aplicaciones educativas”. En: *Educación en Ingeniería* (2010), págs. 110-119.
- [17] V. Poppeová y col. “Delta Robots - Robots for high speed manipulation”. En: *Technical Gazette* 18 (2011), págs. 435-445.
- [18] *Product Description Sheet Hysol Product 9430*. Sika A.G.
- [19] *Product Selection and Configuration Directory*. Rockwell Automation Inc. 2013.

- [20] M. J. Riaza, M. J. Lopez y D. B. Saravia. “Revisión del estado del arte de manipuladores paralelos”. En: *Scientia et Technica* 42 (2009), págs. 81-86.
- [21] Juan Diego Rueda. “Metodología para el diseño de un robot paralelo industrial tipo delta”. Pontificia Universidad de Bucaramanga, 2008.
- [22] L. A. Silva. “Control Visual de Robots Paralelos”. Universidad Politécnica de Madrid, 2005.
- [23] Mark W. Spong. *Robot Dynamics and Control*. 1st. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, Inc., 1989.
- [24] *Stock Procuts Finish, Bonding and Mounting Options*. Rock West Composites. 2013.
- [25] Lung-Wen Tsai. *Robot Analysis and Design: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators*. 1st. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, Inc., 1999.
- [26] *Visualization Solutions Selection Guide*. Rockwell Automation Inc. 2013.
- [27] A. Voss. *A comprehensible guide to servo motor sizing*. Copperhill Technologies Corporation, 2007.