



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN

DISEÑO VIRTUAL DE UN ROBOT PARALELO TIPO DELTA

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

PRESENTA:

LUIS ALCÁNTARA MEDINA

TUTOR

M. en I. HUMBERTO MANCILLA ALONSO

OCTUBRE DEL 2015.

Ciudad Nezahualcóyotl, Estado de México



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	2
OBJETIVOS.....	3
ANTECEDENTES.....	4
CAPITULO 1. Levantamiento.....	5
1.1 Necesidad.....	6
1.2 Definición del problema.....	6
1.3 Estado del arte.....	7
1.4 Marco teórico.....	10
1.4.1 Definición Robot Paralelo.....	10
1.4.2 Robot Paralelo Tipo Delta.....	10
1.4.3 Ejemplos de aplicaciones.....	12
CAPITULO 2. Diseño Conceptual.....	14
2.1 Metodología.....	15
2.2 Análisis de funciones.....	16
2.3 Configuración del robot.....	17
2.4 Composición mecánica del robot.....	17
2.4.1 Material.....	18
2.4.2 Dimensiones.....	19
2.4.3 Componentes.....	20
CAPITULO 3. Diseño de Detalle.....	27
3.1 Diseño Mecánico.....	28
3.2 Descripción geométrica.....	32
3.3 Cinemática inversa.....	34
3.4 Implementación de la cinemática inversa en la plataforma NI LabVIEW.....	37
3.5 Integración virtual del ensamble 3D a la plataforma NI LabVIEW.....	39
3.5.1 NI SoftMotion para SolidWorks.....	39
3.5.2 Preparación del ensamble para la simulación.....	40
3.5.3 Conexión de NI LabVIEW con SolidWorks.....	46
CAPITULO 4. Pruebas y resultados.....	64
CONCLUSIONES.....	71
BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.....	72
ANEXO 1. PLANOS.....	73

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de este proyecto inicia a partir de la observación de la realidad que viven instituciones de educación superior públicas en México que ofrecen formaciones afines a la enseñanza de la Ingeniería Mecánica, dichas instituciones en ciertas ocasiones carecen de infraestructura en laboratorios o de suficientes recursos económicos impidiendo cumplir con los objetivos académicos. Uno de estos objetivos es trasladar las ideas desarrolladas en clase a un prototipo, infortunadamente el alumno no siempre cuenta con los recursos o el tiempo suficientes para la fabricación de un prototipo físico que le permita visualizar los principios de operación propuestos. Por otro lado, las instituciones educativas cuentan con plataformas de software de diseño mecánico y control, mediante la integración de ambas, se propone a lo largo de este documento una integración virtual que proporcione una herramienta de apoyo en las metodologías de diseño impartidas en las instituciones educativas y que en su momento permitan reducir costos y tiempos de desarrollo.

Utilizando como caso de estudio la configuración de un robot paralelo tipo delta y siguiendo una metodología de diseño basada en el método de Pahl y Beitz típicamente utilizada en la ***Sala de Proyectos del Club de Mecatrónica de la FES Aragón***, el lector encontrará en este documento la definición de la necesidad y el problema que es de suma importancia para la justificación de esta tesis. Posteriormente con el diseño conceptual, se dará evidencia de la búsqueda de conceptos o principios de solución para el diseño de los distintos componentes del robot, se analiza el problema, se sintetizan varias posibles soluciones y se evalúan respecto a restricciones impuestas. El siguiente capítulo es el de diseño de detalle, a diferencia de las demás fases creativas esta, se caracteriza en que las soluciones propuestas anteriormente deben concretarse en respuestas únicas que deben describirse en su totalidad y con el detalle necesario para su posterior fabricación o implementación. En este capítulo se concretó el diseño de los componentes del robot y se describieron a detalle para una posible fabricación en trabajos futuros.

Además se desglosó el proceso de integración de las dos plataformas de diseño NI LabVIEW® de National Instruments y el software DS SolidWorks® Corp, para la generación de prototipos virtuales. De igual manera se obtuvo la solución de la cinemática inversa y se implementó en la plataforma NI LabVIEW. Habiendo hecho esto, se visualizaron movimientos en el robot, además de verificar la cinemática inversa sin la necesidad de trasladar nuestro diseño a un prototipo físico.

OBJETIVOS

Objetivo general.

Desarrollar el diseño virtual de un robot, empleando como caso de estudio la configuración de un robot paralelo tipo delta, a través de la integración de dos plataformas de diseño: NI LabVIEW® de National Instruments y el software DS SolidWorks® Corp. para la generación de prototipos virtuales, mostrando una herramienta de apoyo en las metodologías de diseño impartidas en las instituciones de educación superior y que en su momento permitan reducir costos y tiempos en el desarrollo de nuevos sistemas y productos.

Objetivos específicos.

- Realizar el modelo virtual de un robot paralelo tipo delta conservando su configuración original, utilizando el software de diseño asistido por computadora DS SolidWorks.
- Obtener la solución de la cinemática inversa e implementarla en la plataforma NI LabVIEW.
- Conectar virtualmente el ensamble 3D elaborado en DS SolidWorks a la plataforma NI LabVIEW utilizando instrumentos virtuales de movimiento del módulo NI SoftMotion, que nos permitan visualizar movimientos en el robot, además de probar y verificar la cinemática inversa sin la necesidad de trasladar el diseño a un prototipo físico.

ANTECEDENTES

El trabajo de tesis que se presenta a continuación no cuenta con antecedentes directos, sin embargo, vale la pena agregar este apartado con la intención de citar los trabajos de tesis desarrollados en la **Facultad de Estudios Superiores Aragón de la UNAM**, concretamente en la sala de proyectos del **Club de Mecatrónica** de dicha facultad y que corresponden a la misma línea de investigación.

La incursión de la robótica en los planes de estudio de las instituciones de educación superior es trascendental para aportar los recursos humanos que se necesitan en un país dependiente de tecnología y así lograr desarrollar la propia, es por ello de la implementación de la robótica como una línea de investigación.

Al momento se han desarrollado tres trabajos de tesis. El primero consistió en desarrollar el diseño y la construcción de un prototipo funcional de un brazo robótico con interfaz en LabVIEW. Retomado este trabajo se desprendió una nueva tesis que consistió en el desarrollo de una interfaz que permite la generación de trayectorias de un manipulador didáctico a través de spline cúbico. En el tercer y último trabajo de tesis se incursionó en el campo de la robótica móvil y se realizó el diseño y construcción de un robot móvil terrestre funcional, capaz de desplazarse en cualquier dirección desde un estado de inmovilidad, manipulado inalámbricamente mediante una interfaz en una computadora.

CAPÍTULO 1. Levantamiento.

1.1 Necesidad.

Instituciones de educación superior públicas en México, que ofrecen formación de recursos humanos afines a la enseñanza de la ingeniería, padecen en determinadas ocasiones de infraestructura en laboratorios. De igual manera los estudiantes no cuentan con los recursos y el tiempo suficiente para realizar prototipos físicos que les permita trasladar sus diseños realizados en el aula a una plataforma visual, esto les impide cumplir con los objetivos académicos. Es por ello de la necesidad de incorporar los prototipos virtuales, también llamados prototipos digitales, como una herramienta de apoyo en las metodologías de diseño impartidas en las instituciones de educación superior y que en su momento permitan reducir costos y tiempos en el desarrollo de nuevos sistemas y productos.

No solo en el ámbito académico, actualmente las empresas se enfrentan cada vez más a problemas comerciales críticos que afectan al equipo de diseño e ingeniería así como al equipo directivo. Los problemas abarcan desde la optimización de la calidad, hasta la reducción del ciclo de desarrollo del producto a fin de lograr una comercialización más rápida. Como consecuencia, el equipo de diseño se encuentra con el reto de producir productos más complejos que mejoren sus diseños anteriores y que además superen los diseños de sus competidores, en menor tiempo a un menor costo.

1.2 Definición del problema.

En ocasiones, la falta de recursos económicos o el poco tiempo con el que se cuenta impide que modelos 3D CAD desarrollados en clase, o en cualquier proyecto de investigación, puedan ser trasladados a la fabricación de un prototipo físico. El prototipado rápido, por ejemplo mediante la utilización de impresoras 3D, ha demostrado ser una herramienta eficaz, sin embargo, es costosa en particular para el alumno. Un problema es el desconocimiento de la existencia de plataformas de desarrollo que ofrecen posibilidades de visualizar el diseño virtualmente y que serviría como una herramienta de apoyo en las metodologías de diseño, impartidas en instituciones educativas para permitir reducir costos y tiempos en el desarrollo de prototipos físicos.

1.3 Estado del arte.

Realizada una investigación íntegra, se recabó la suficiente información que nos muestra la creciente incorporación y estudio de los prototipos virtuales, principalmente en universidades y centros de investigación. A continuación se exponen algunos de los casos de estudio en donde se puede percibir la incorporación de los prototipos virtuales en el diseño.

a) Design of Mass Spectrometer Control in NI LabVIEW and SolidWorks

El diseño que fue desarrollado en la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Tecnología en Brno Republica Checa, consiste en el diseño y prueba de las funciones de un nuevo software para el control de un espectrómetro de masa. Las funciones del modelo 3D en CAD son probadas en un análisis de movimiento virtual, y posteriormente son implementadas en una aplicación real. Las aplicaciones y funciones son desarrolladas en el ambiente de programación grafica NI LabVIEW y los modelos en 3D del dispositivo fueron desarrollados en SolidWorks [Figura 1.1].

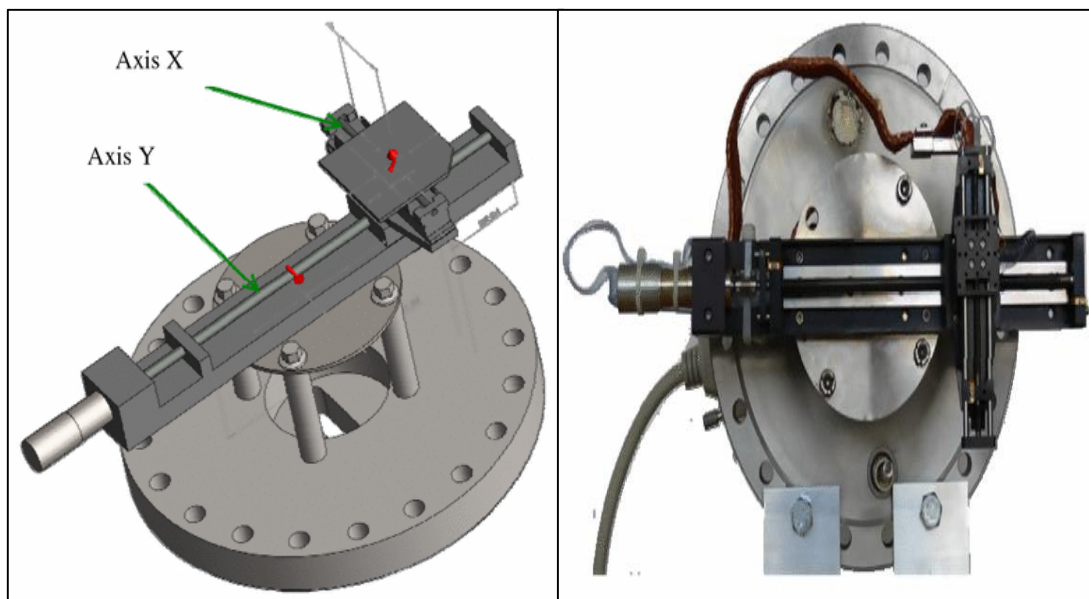


Fig. 1.1 3D model and the real stages for mass spectrometer.

b) CARMA Manipulator.

Dicho manipulador fue desarrollado por Square One Systems Inc., una compañía multidisciplinaria de ingeniería que se especializa en la robótica y automatización. El reto fue desarrollar una plataforma que tuviera la capacidad de visualizar, optimizar y probar las ecuaciones de movimiento del manipulador de seis grados de libertad sin la necesidad de un prototipo físico. Para ello crearon un modelo 3D en SolidWorks, que posteriormente integraron con LabVIEW gracias al módulo NI Softmotion [Figura 1.2].

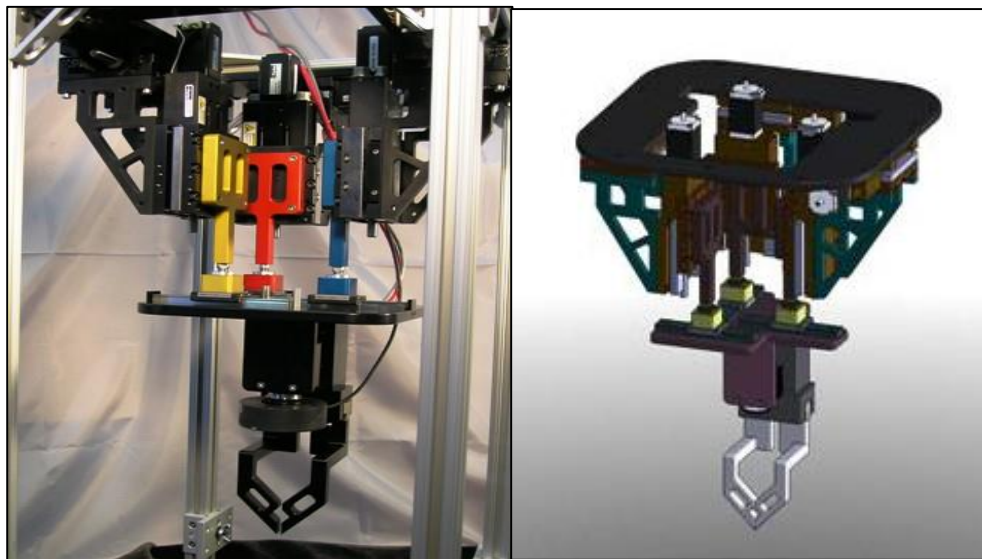


Fig. 1.2 Ensamble en SolidWorks y Manipulador CARMA fabricado.

c) Diseño e Implementación de un Prototipo Virtual de una Mesa de Coordenadas.

Este prototipo virtual fue desarrollado en la Facultad de Ingeniería de la UNAM como un trabajo de tesis de licenciatura. En dicho trabajo se diseñó un modelo virtual de un clásico diseño mecatrónico, una mesa de coordenadas, además el modelo virtual es capaz de reconocer el color y la posición de fichas de distintos colores por medio de software de visión, y luego organizar cada una de las fichas reconocidas en su depósito correspondiente [Figura 1.3].

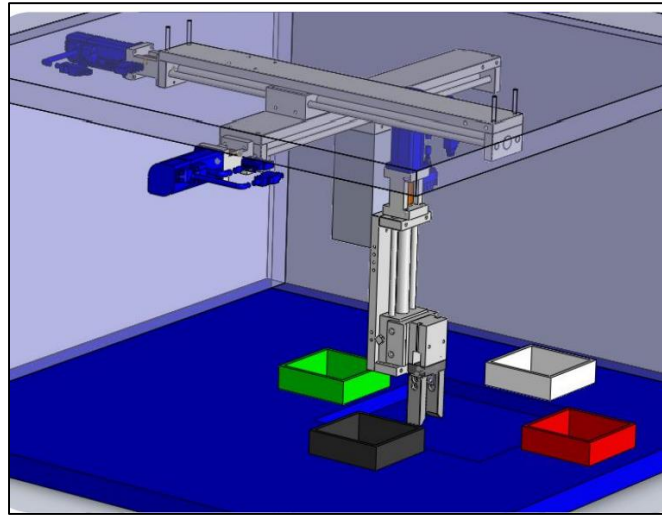


Fig 1.3 Diseño final de la Mesa de Coordenadas.

d) Simulación y Control de un Sistema Mecatrónico Aplicando Diseño Asistido por Computadora.

Este trabajo de investigación fue desarrollado en la Universidad Politécnica de Tlaxcala y fue publicado en la revista “La Mecatrónica en México” en Septiembre de 2013. Se desarrolló una metodología para diseñar una interfaz entre dos software de reconocido nivel, como son SolidWorks y LabVIEW, para diseñar y simular el sistema de control de un equipo cortador para madera, en un ambiente virtual que permite visualizar su desempeño antes de pasar a una etapa de fabricación [Figura 1.4].

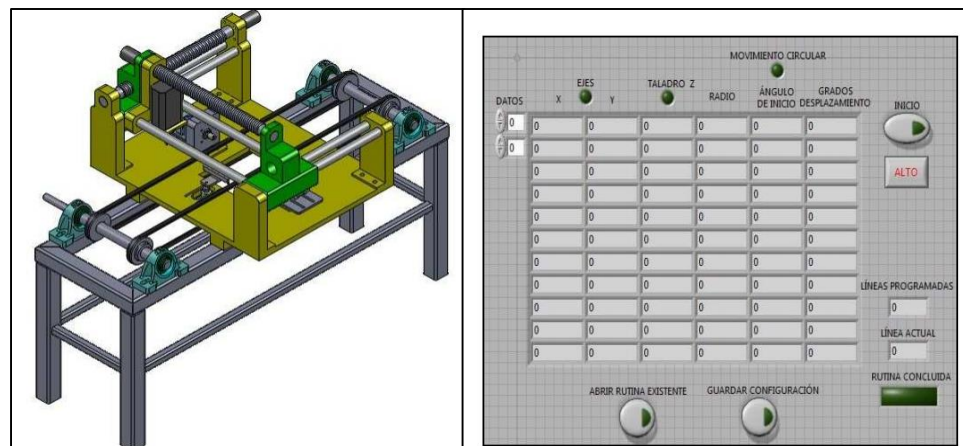


Fig. 1.4 Ensamble en SolidWorks y Panel de control del sistema cortador.

1.4 Marco teórico.

1.4.1 Definición Robot Paralelo.

En general, un manipulador paralelo es un mecanismo de cadena cinemática cerrada cuyo efector final está acoplado a la base por cadenas cinemáticas independientes. Los robots paralelos también pueden ser definidos como sigue: un robot paralelo está compuesto por una plataforma móvil (donde se localiza el órgano terminal) con n grados de libertad y por una plataforma fija (base del robot o tierra mecánica), ambas conectadas por al menos dos cadenas cinemáticas independientes.

1.4.2 Robot Paralelo Tipo Delta.

A finales de los años 80, Raymond Clavel, profesor de Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (EPFL), vino con una brillante idea de usar paralelogramos para construir un robot paralelo con tres grados de libertad. Clavel llamo a su creación robot delta sin sospechar que se consolidaría como uno de los diseños de robots paralelos más exitosos de finales de siglo, con cientos de robots activos alrededor del mundo. En 1999, el Dr Clavel es premiado con el “Golden Robot Award”, otorgado por ABB Flexible Automation, por su trabajo innovador del robot paralelo tipo delta.

La idea básica detrás del diseño de un robot paralelo tipo delta es el uso de paralelogramos. Un paralelogramo permite que un eslabón de salida permanezca en orientación fija con respecto a un eslabón de entrada. El uso de tres de estos paralelogramos restringe completamente la orientación de la plataforma móvil que permanece con únicamente 3 grados de libertad. Los eslabones de entrada de estos tres paralelogramos están montados en palancas rotatorias por medio de juntas de revolución. Las juntas de revolución pueden ser actuadas de dos maneras: mediante motores rotacionales o con actuadores lineales. Finalmente, un mecanismo es utilizado para transmitir movimiento rotacional desde la base al órgano terminal en la plataforma móvil [Figura 1.5].

El uso de actuadores montados en la base y eslabones de poca masa permiten a la plataforma móvil alcanzar aceleraciones de hasta 50G en ambientes experimentales y entre 12 y 15G en aplicaciones industriales. Esto hace a los robots delta un candidato perfecto para operaciones “pick and place” de objetos ligeros entre 10 gr y 1 Kg que involucran objetos ligeros con geometrías simples debido a la sincronización. Los robots delta disponibles en el mercado operan típicamente en un espacio de trabajo de un metro de diámetro y 20 cm de altura.

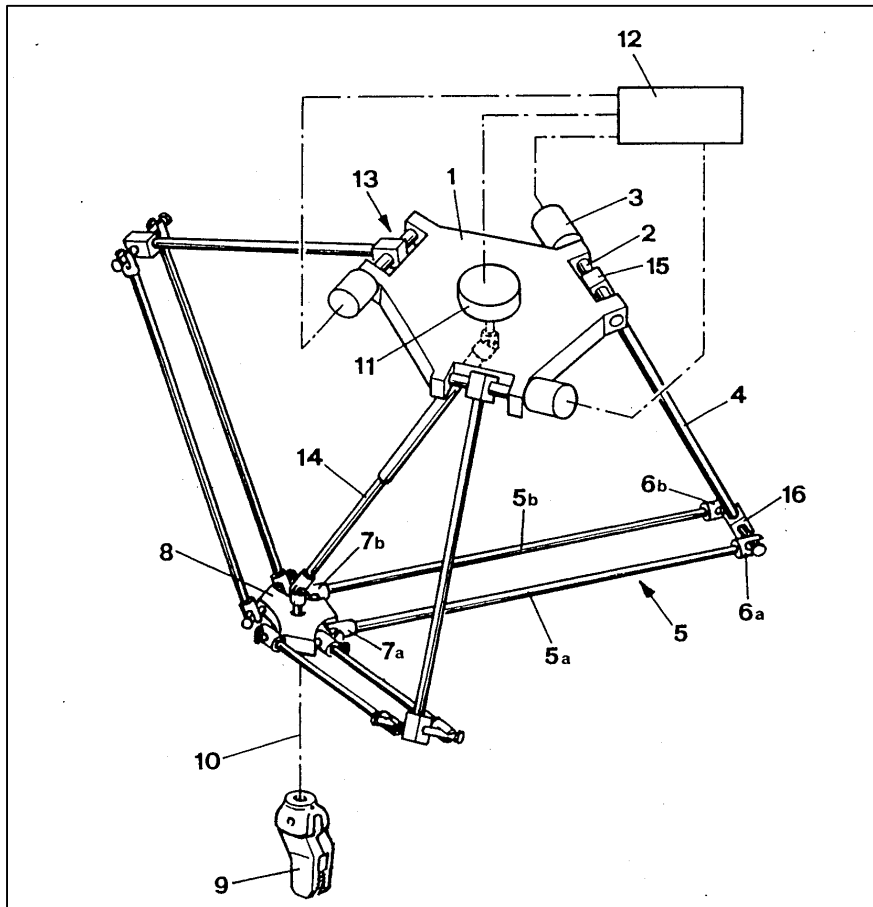


Fig. 1.5 Esquema del Robot Paralelo tipo Delta (de US patent No. 4976582).

- | | |
|--------------------------------|-----------------------------------|
| 1.- Plataforma fija. | 9.- Elemento de trabajo. |
| 2.- Eje. | 10.- Junta para el efector final. |
| 3.- Actuadores. | 11.- Motor Fijo. |
| 4.- Brazo. | 12.- Sistema de Control. |
| 5a, 5b.- Barras de enlace. | 13.- Actuadores. |
| 6a, 6b.- Juntas de revolución. | 14.- Brazo telescópico. |
| 7a, 7b.- Juntas de revolución. | 15.- Primera extremidad. |
| 8.- Plataforma Móvil. | 16.- Segunda extremidad. |

1.4.3 Ejemplos de aplicaciones.

Es posible encontrar un robot paralelo tipo delta en diferentes tipos de industrias. Por ejemplo, en la manufactura de paneles solares, donde usan robots delta para colocar las láminas de silicio fotovoltaico sobre sustratos de vidrio, de igual forma en la industria de iluminación de bajo consumo utilizan robots delta para colocar las lentes en matrices de LEDS. Otra aplicación relevante es en el campo de la medicina, los robots poco a poco empiezan a entrar en este rubro con sistemas como el de Da Vinci (Intuitive Surgical) or Zeus (Computer Motion). Los robots paralelos también juegan un rol importante en esta evolución, un ejemplo es el robot delta Surgi Scope desarrollado por ISIS Robotics, usado como soporte de microscopio [Figura 1.6].



Fig. 1.6 El SurgiScope en acción en el Surgical Robotics Lab, Humboldt-University en Berlin.

Una de las aplicaciones más exitosas de los robots paralelos tipo delta es en aplicaciones “pick and place”, debido a su muy alta tasa de transferencia y precisión. Permite la manipulación de objetos frágiles, tales como los que se usan en la industria alimentaria [Figura 1.7].



Fig. 1.7 Instalación del Demarex's Line-Placer para empaque de pretzels en una panadería industrial.

CAPÍTULO 2. Diseño Conceptual.

2.1 Metodología.

El diseño en ingeniería se puede definir como el proceso de aplicar las diversas técnicas y principios científicos con el propósito de definir un dispositivo, un proceso o un sistema, con suficientes detalles que permitan su realización. El diseño puede ser simple o muy complejo, fácil o difícil, matemático o no matemático puede implicar un problema trivial o uno de gran importancia. No obstante, la complejidad de la materia por lo general requiere que el diseñador disponga de un conjunto de problemas estructurados paso a paso ideados para esclarecer un concepto o conceptos particulares relacionados con el tema particular. Es por ello que el presente trabajo de tesis se basa en el método de diseño de Pahl y Beitz. A continuación se presenta la metodología que se busca seguir en el presente trabajo de investigación [Figura 2.1].

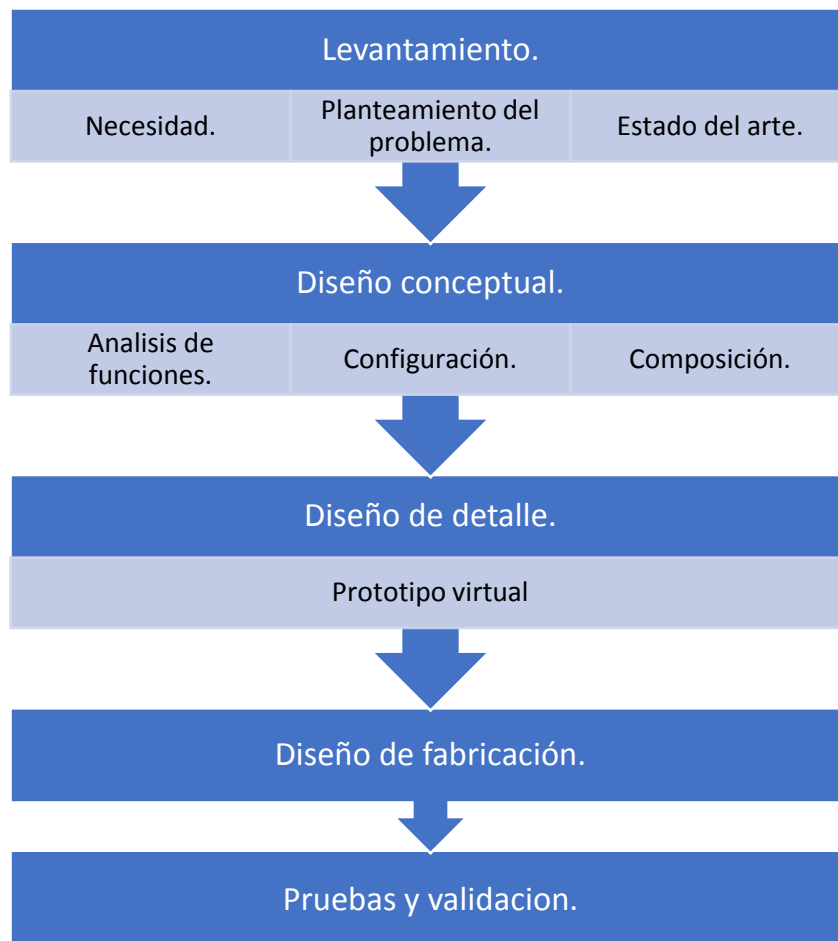


Fig. 2.1 Diagrama de Metodología de diseño.

En este capítulo se desarrollará uno de los pasos primordiales dentro del proceso de diseño, que es la etapa de diseño conceptual, aquí se buscan conceptos o principios de solución al problema, para la cual se analiza el problema identificado, se sintetiza una o varias posibles soluciones y se evalúan con respecto a restricciones (especificaciones) impuesta. En esta fase se generan principios de solución pero no se obtienen estructuras de solución lo suficientemente validas (o acabadas) como para materializar la respuesta al problema.

2.2 Análisis de funciones.

El robot paralelo tipo delta, utilizado como caso de estudio en el presente trabajo de tesis, posee funciones ya establecidas debido a su configuración misma, como lo es los tres grados de libertad que tiene. Por lo tanto el análisis de funciones descrito a continuación se refiere estrictamente a las distintas funciones que deben cumplirse para cumplir con los objetivos planteados anteriormente y no a las funciones del robot delta mismo [Figura 2.2].

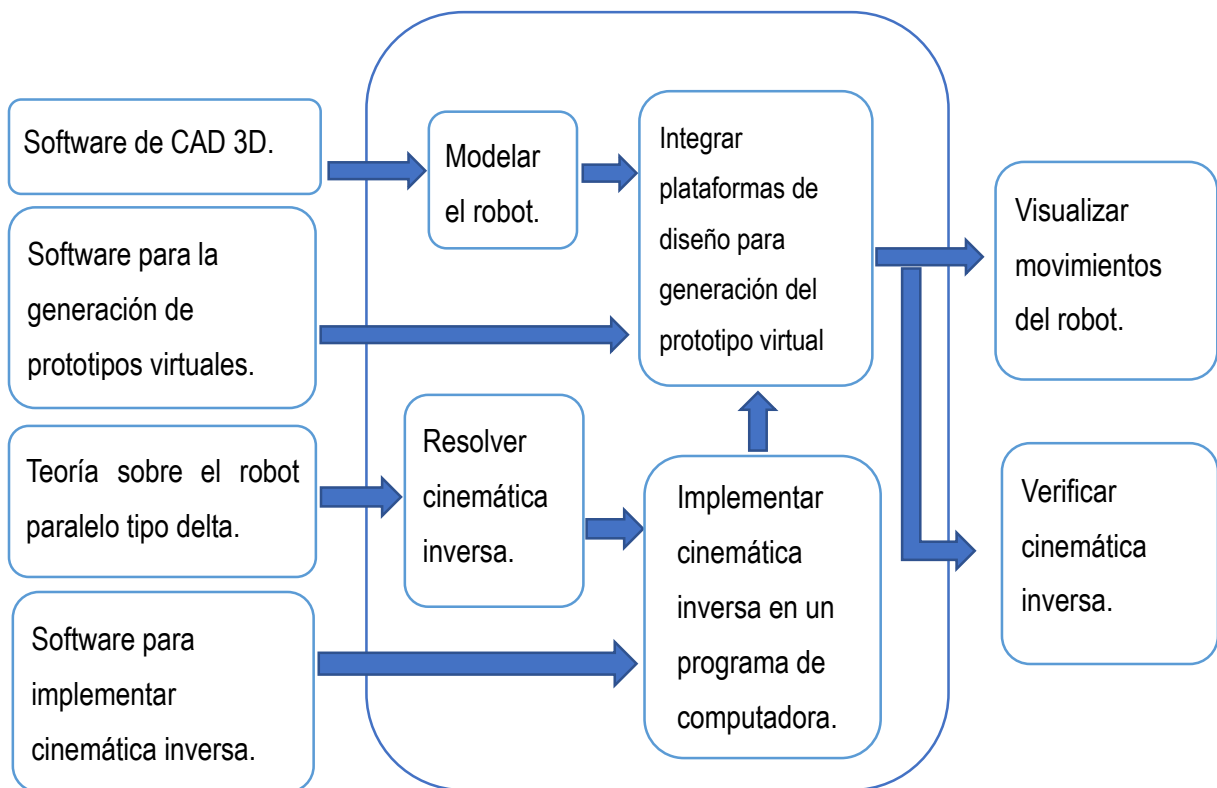


Fig. 2.2 Diagrama de Funciones.

2.3 Configuración del robot.

La configuración es el siguiente paso en la metodología de diseño propuesta en este capítulo, esta se refiere a la manera en que cada una de las funciones debe ordenarse de tal forma que se busque un arreglo que cumpla con los requerimientos de diseño, sin embargo en el caso particular del presente trabajo de tesis como se mencionó en los objetivos se eligió como caso de estudio la configuración del robot paralelo tipo delta. Es por esto que la fase de diseño correspondiente a la configuración se omite, sin embargo la descripción de la geometría del robot se aborda de manera detallada en el capítulo de diseño de detalle y con esto la configuración correspondiente al robot paralelo tipo delta.

2.4 Composición mecánica del robot.

Cabe destacar que uno de los objetivos primordiales del presente trabajo es desarrollar el prototipo virtual del robot sin la necesidad de trasladar el diseño a una plataforma física, es decir la implementación del diseño no se encuentra en los alcances de este trabajo, sin embargo es necesario establecer las características y especificaciones pertinentes que se deben considerar y que se incorporaran a la hora de realizar en diseño en CAD tales como el material y las dimensiones, para lograr una simulación lo más realista posible.

Siempre que se comienza con el diseño de un producto, que tiene como propósito su implementación física es indispensable conocer las capacidades de fabricación con las que se cuenta, suponiendo que el prototipo se fabrique en un futuro como continuación de este proyecto, sería en las instalaciones de la Facultad de Estudios Superiores Aragón, como consecuencia se tiene que buscar facilitar en la manera de lo posible el diseño y construcción ya que se cuentan con operaciones de maquinado convencionales, otro aspecto importante es considerar el presupuesto con el que se cuenta, de ahí la necesidad de poder construir el robot de una manera sencilla y económica.

2.4.1 Material.

Se intenta obtener una simulación lo más realista posible. Por esta razón la incorporación del material al modelo virtual juega un papel muy importante, ya que el software calcula automáticamente los valores de masa e inercia, basándose en la geometría y el material del componente, teniendo como resultado una simulación más realista.

Para simplificar el diseño, se sugiere utilizar un solo tipo de material para la mayoría de los componentes del robot. Dicho material debe cumplir con ciertas características de las cuales las más importantes son maquinabilidad y bajo costo, debido a las limitantes de diseño mencionadas anteriormente. Otra característica a considerar es el peso.

Se propone en la manera de lo posible un material ligero. El robot en movimiento genera momentos de inercia, que a su vez generan fuerzas en los componentes, deformándolos y afectando la precisión del robot. Los momentos de inercia son proporcionales a la masa y a la geometría del componente, por ello se procura reducir el peso y no diseñar componentes con geometría complicada [Figura 2.3].

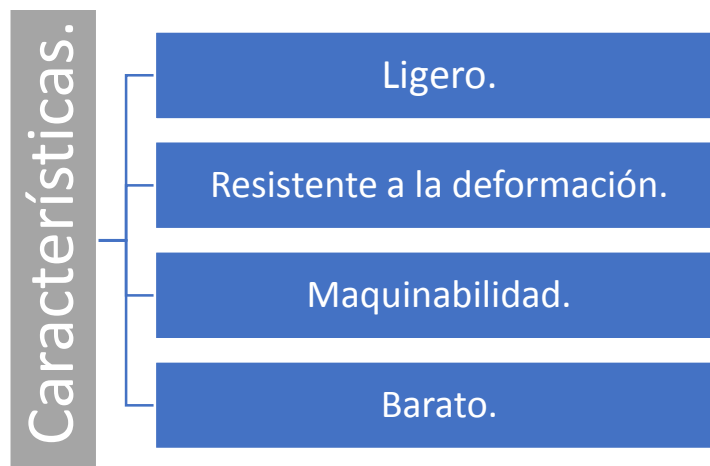


Fig. 2.3 Características del material.

2.4.2 Dimensiones.

Existen diversos trabajos de investigación que se dedican específicamente a la optimización de las dimensiones del robot paralelo tipo delta, y del espacio de trabajo. Realizar un estudio de esta índole no está en los alcances de la presente tesis, es por ello que se decidió tomar las dimensiones básicas del modelo realizado en la Universidad de Western Australia. En esta Universidad se desarrolló un robot paralelo tipo delta llamado “NUWAR”, cuyas dimensiones se encuentran optimizadas para maximizar el área de trabajo. Dichas dimensiones se aprecian en la Figura 2.4.

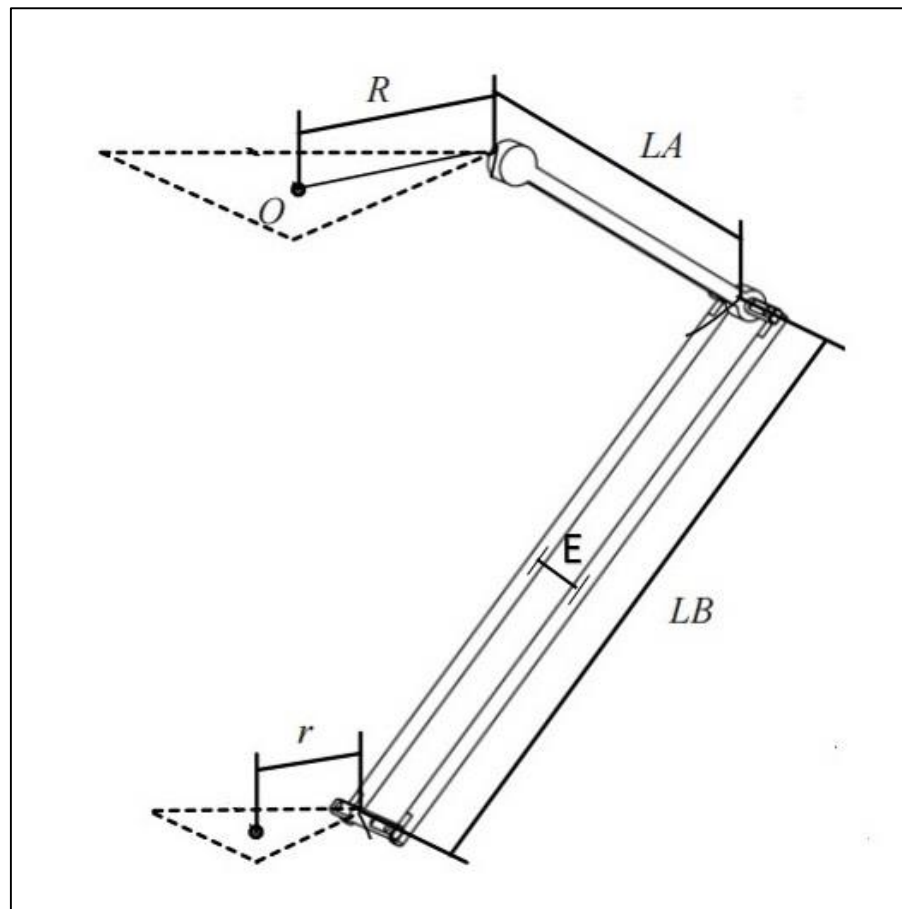


Fig. 2.4 Dimensiones.

Parámetro	R	r	LA	LB	E
Valor	194mm	30mm	260mm	480mm	5mm

2.4.3 Componentes.

Brazo.

El brazo es el componente en el que actuarán las mayores fuerzas, a consecuencia estará sometido a esfuerzos que podrían ocasionar desplazamientos afectando la precisión del robot, es por ello que la pieza debe tener la suficiente resistencia a la deformación. El brazo es la pieza que recibe el movimiento de los motores y es necesario un método de acoplamiento eficaz entre este componente y los motores, principalmente cuidando que no exista deslizamiento entre el eje del motor y el eje de giro del brazo. Además, la pieza debe ser de fácil fabricación, con esto nos referimos a que la geometría tendría que ser lo más sencilla posible para no requerir procesos de maquinado que no sean los convencionales.

Características.

Resistencia a la deformación.

Capacidad de acoplamiento con la plataforma fija.

Capacidad de acoplamiento con los motores.

Fácil fabricación.

Antebrazo.

Al igual que el brazo, el antebrazo estará sometido a fuerzas y ocasionará lo descrito anteriormente para el brazo. Es por ello que se necesita de un material resistente a la deformación y que a su vez sea ligero para evitar momentos de inercia grandes. El antebrazo debe tener la capacidad de poder acoplarse con el brazo y a su vez con la plataforma móvil mediante juntas esféricas como su configuración lo menciona. Además de procurar en la medida de lo posible su fácil fabricación.

Características.

Resistencia a la deformación.

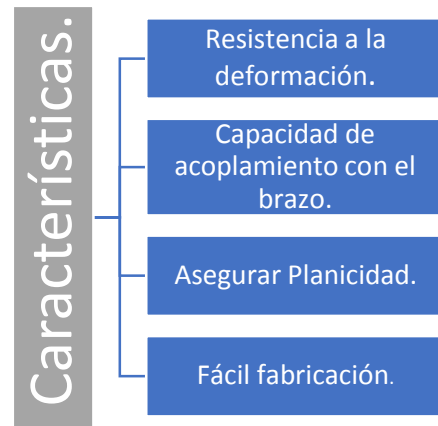
Capacidad de acoplamiento con el brazo.

Capacidad de acoplamiento con la plataforma móvil.

Fácil fabricación.

Plataforma fija.

La plataforma fija, también llamada base, tiene que cumplir con determinadas características debido a las funciones que desempeña. La base sirve de soporte para los actuadores y elementos de control, además, de ella penden todos los componentes de las tres cadenas cinemáticas que componen al robot. Es por ello que la plataforma debe ser lo suficientemente rígida para permitir estabilidad durante el movimiento del robot. Finalmente, considerar una fácil fabricación como en la mayoría de los componentes.



Plataforma móvil.

La plataforma móvil es la que sufre los mayores desplazamientos, por ello debe ser ligera para reducir el peso del robot y aumentar la carga útil. Además el diseño debe permitir el montaje de una herramienta o de un órgano efector.

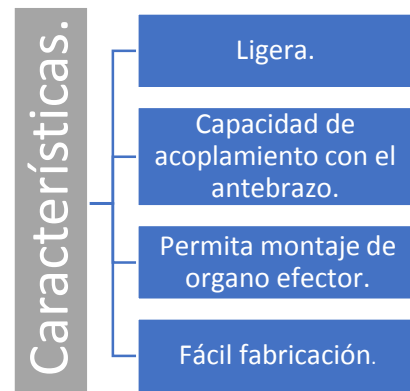


Tabla de conceptos.

Una vez establecidas las características y especificaciones pertinentes, se da comienzo con la composición mecánica del robot. En esta etapa se proponen los distintos tipos de elementos que por sí mismos o en su conjunto resuelven y cumplen con los requerimientos y funciones antes mencionadas. A continuación se describen distintos conceptos generados de los distintos elementos que componen al robot.

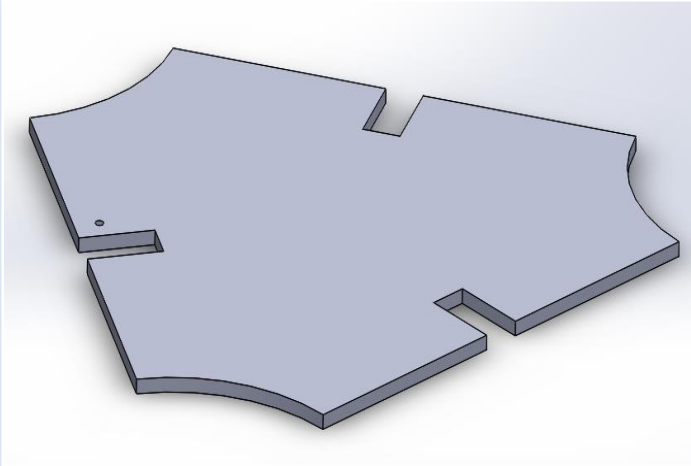
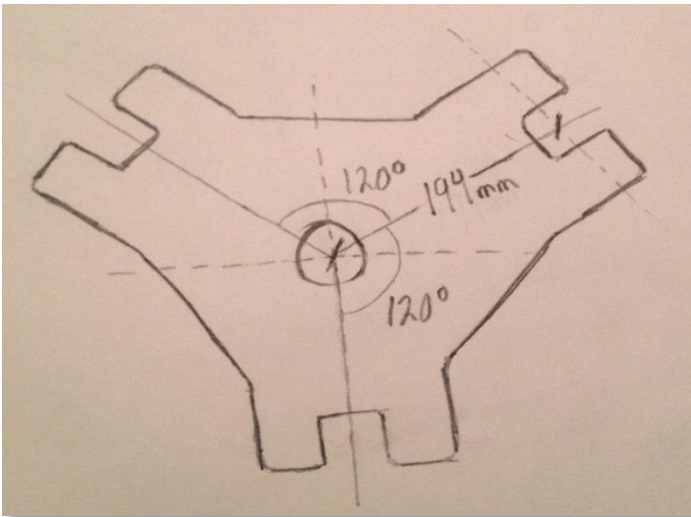
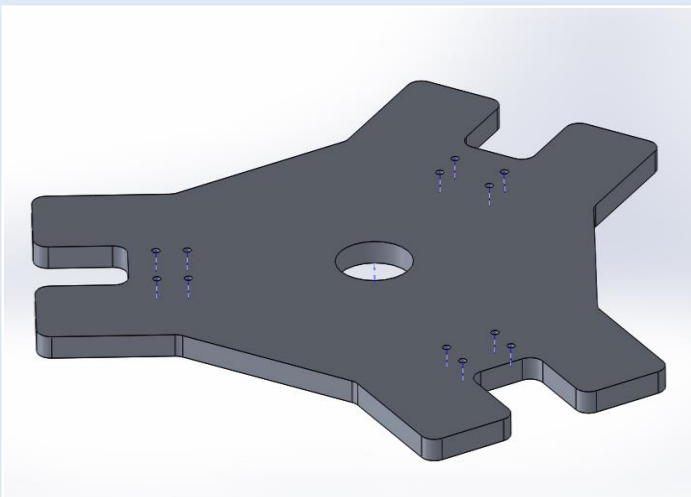
CONCEPTO.	DESCRIPCIÓN.
	<p>La imagen muestra una de las distintas propuestas de la plataforma fija. La geometría cumple con la característica de no contar con complejas operaciones de maquinado para una fácil y económica construcción. La distancia del centro de la base a la ubicación de las tres juntas actuadas es la misma y separadas 120° entre sí, como lo indica la geometría del robot paralelo tipo delta.</p>
	<p>El siguiente boceto muestra una geometría distinta respecto al concepto anterior. Puede observarse que la geometría podría ser más compleja, pero hubo la necesidad de modificarla debido al cambio que se realizó a la primera propuesta del brazo. Este concepto además de mostrar una mejor estética permite un adecuado acoplamiento con el brazo y los actuadores.</p>
	<p>En la imagen se puede observar la siguiente iteración de la plataforma fija antes descrita, pero modelada por computadora.</p>

Tabla 1. Tabla de conceptos de la plataforma fija.

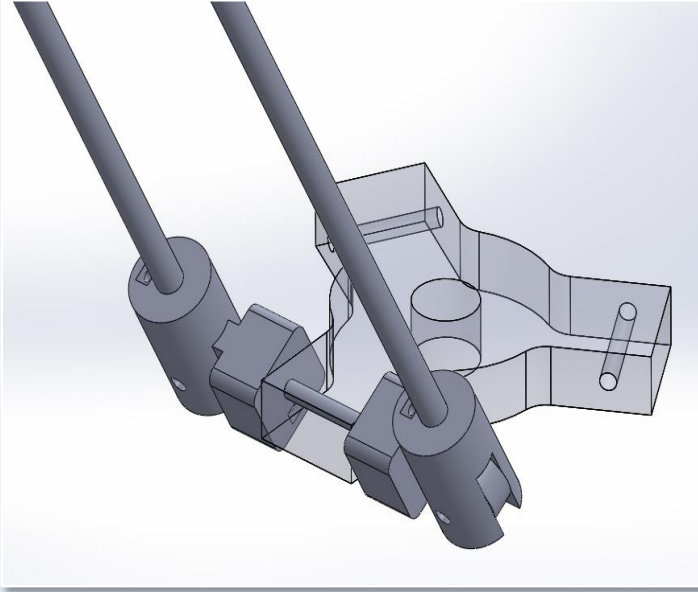
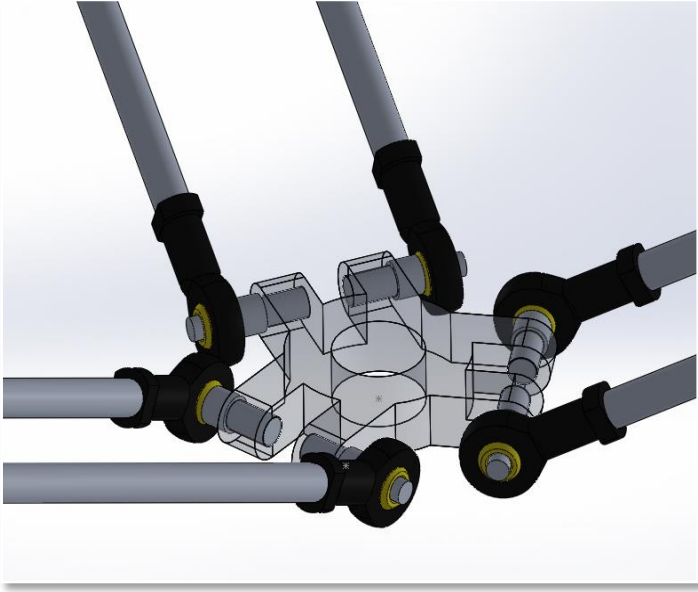
CONCEPTO.	DESCRIPCIÓN.
	<p>La imagen muestra el primer concepto propuesto para el acoplamiento del antebrazo (paralelogramo) y la plataforma móvil. Se observa que la geometría de la plataforma móvil puede ser fabricada con operaciones de maquinado convencionales. También se propone un agujero en el centro para indicar la posición de un posible órgano terminal. El acoplamiento del antebrazo y la plataforma móvil es mediante flechas articuladas que giran libremente sobre la misma. A su vez, las varillas que componen el antebrazo van acopladas a la flecha articulada mediante rótulas diseñadas para esta aplicación.</p>
	<p>La imagen muestra una plataforma móvil con una geometría muy distinta a la anterior. Aunque las operaciones de maquinado son más complicadas, una maquina convencional puede realizarlas. Además de mejorar su estética, la plataforma fue modificada para un mejor acoplamiento con el antebrazo (paralelogramo). La propuesta de diseñar las rótulas que unirían la flecha articular y las varillas del antebrazo en el caso anterior resultó inadecuado, ya que se necesitaría de varios procesos de maquinado por cada rótula, generando procesos de fabricación costosos y complicados. Es por ello que se sugirió el uso de rótulas existentes en el mercado, que por sí mismas generan los tres GDL de la junta esférica requeridos en este acoplamiento.</p>

Tabla 2. Tabla de conceptos de la plataforma móvil y su acoplamiento.

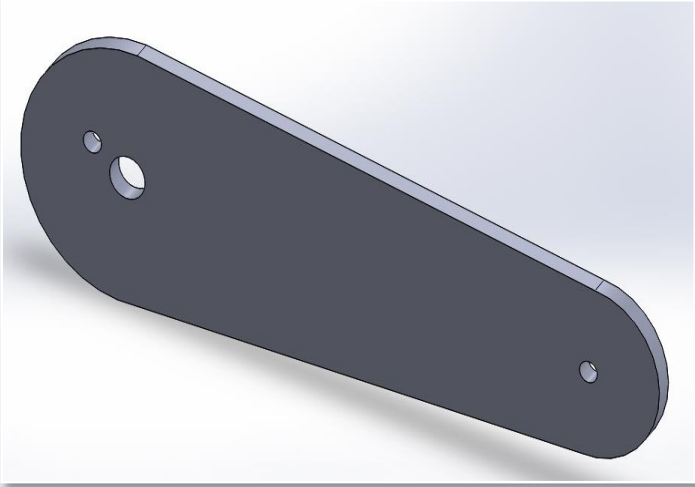
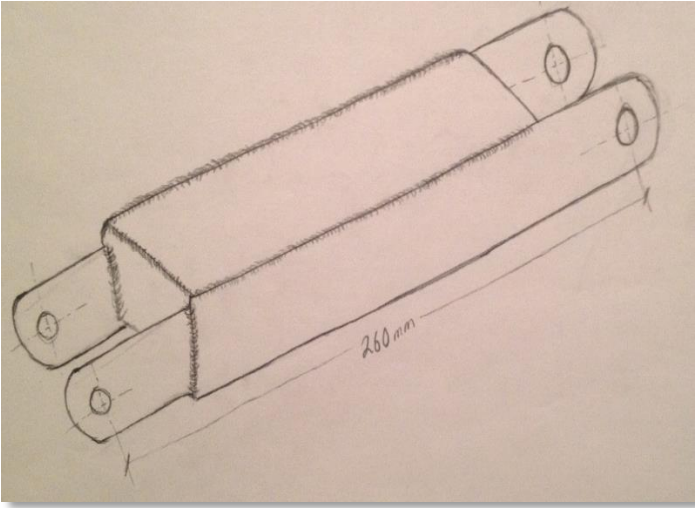
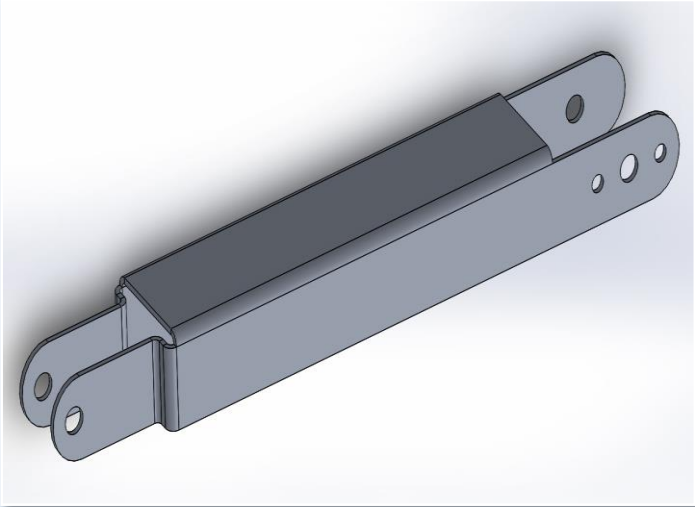
CONCEPTO.	DESCRIPCIÓN.
	<p>La imagen muestra la primera propuesta del brazo. Se puede observar que la geometría cumple con la característica de poder fabricarse con facilidad. Sin embargo, como se detalló anteriormente, su geometría estrictamente necesita ser resistente a la deformación y contar con un eficaz acoplamiento con los actuadores, por lo que esta geometría no favorece mucho a esas características.</p>
	<p>Se propuso realizar un cambio del brazo antes descrito, ya que su geometría podría resultar inadecuada debido a que el ancho y la altura del mismo proporcionan una mayor estabilidad y rigidez al robot, es decir, un ancho adecuado del brazo proporciona una mayor estabilidad en el antebrazo (paralelogramo), evitando giros indeseados en la plataforma móvil. Además, esta geometría favorece a un acoplamiento eficaz con los actuadores y la plataforma fija.</p>
	<p>En la imagen se muestra la siguiente iteración del brazo descrito anteriormente pero modelado por computadora.</p>

Tabla 3. Tabla de conceptos del brazo.

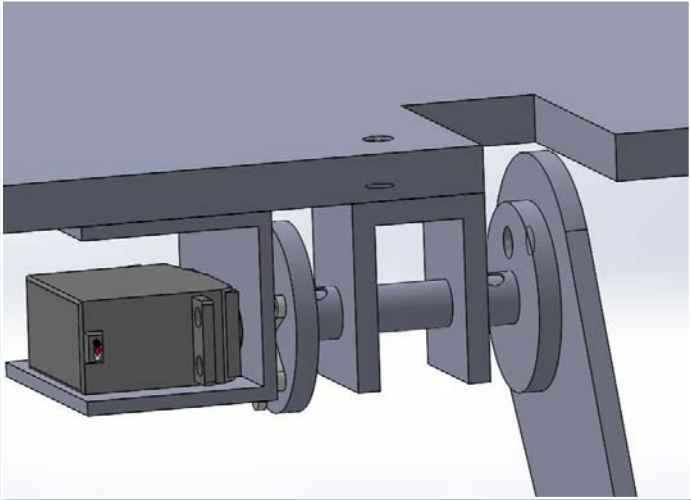
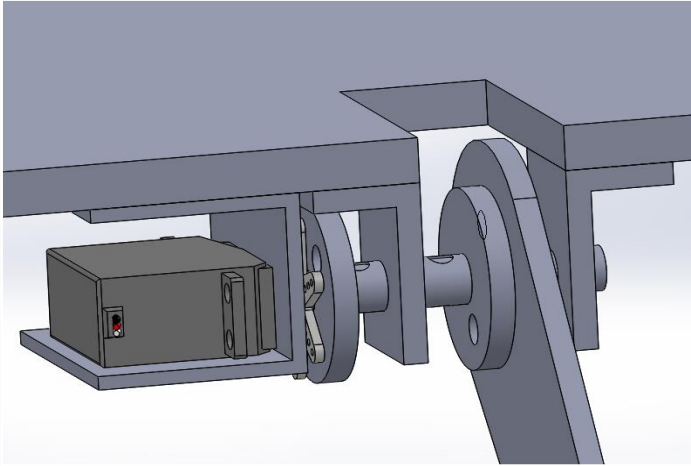
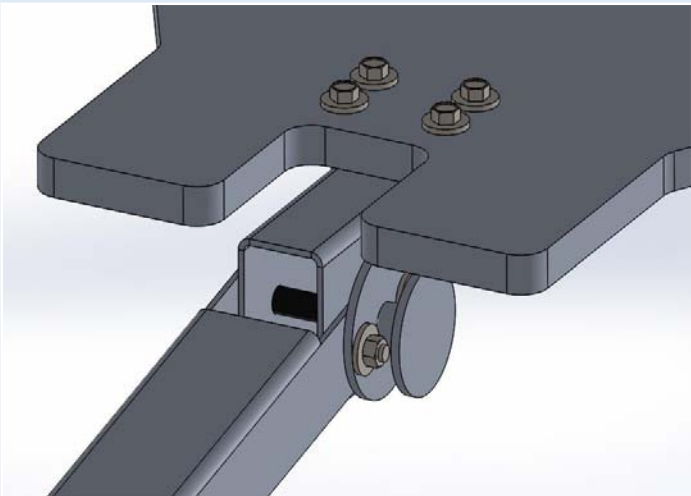
CONCEPTO.	DESCRIPCIÓN.
	<p>Esta imagen muestra el primer concepto para el acoplamiento del brazo. El acoplamiento permite montar y desmontar el actuador sin la necesidad de remover el brazo. El soporte está compuesto por dos bridas y una flecha que permiten una adecuada transmisión del movimiento del actuador hacia el brazo del robot. Los distintos componentes cumplen con la característica de no tener una complicada geometría facilitando su fabricación.</p>
	<p>En la propuesta anterior uno de los extremos del brazo está sostenido por el eje de la fuente motriz. Debido a que todo el peso del robot pende de los brazos, esto generaría un momento en el eje motriz, por lo que se sugirió colocar un soporte del lado contrario del motor, como puede observarse en la imagen.</p>
	<p>A consecuencia de la modificación del brazo por razones antes mencionadas, la propuesta de acoplamiento antes descrita fue modificada. El brazo está acoplado con un componente que sirve de flecha articular y a su vez permite el montaje y desmontaje de un actuador. Estos componentes a su vez se encuentran sujetos de un soporte empotrado en la parte superior de la plataforma fija, como se muestra en la imagen.</p>

Tabla 4. Tabla de conceptos del acoplamiento del brazo.

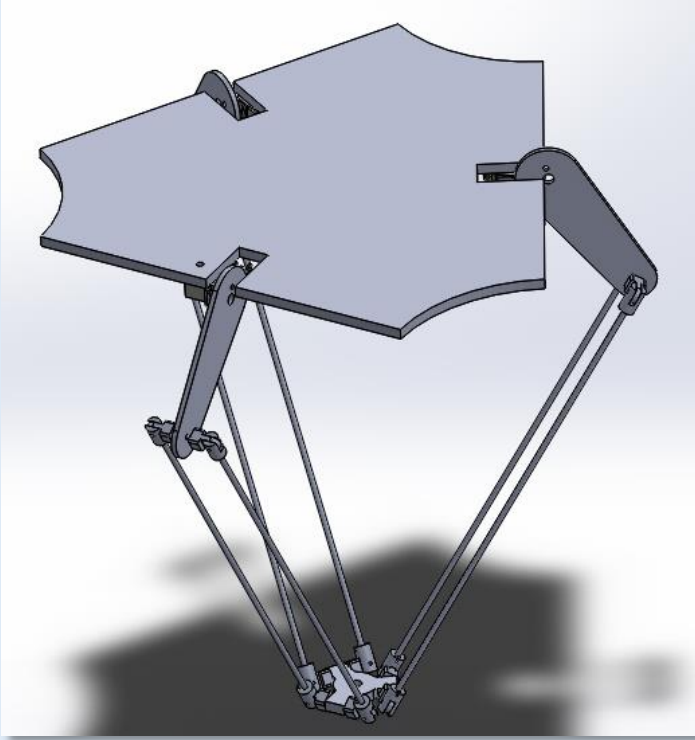

BOCETO	DESCRIPCIÓN
	<p>En etapas tempranas del diseño conceptual se propuso el ensamble mostrado a continuación. Los componentes tales como plataforma fija, plataforma móvil, brazo y antebrazo que componen este diseño fueron descritos por separado en las tablas anteriores. En general, el diseño de cada uno de los componentes de este primer ensamble buscó contar con componentes de geometría sencilla que pudieran maquinarse con procesos de maquinado convencionales.</p>
	<p>En este último concepto del ensamble se utilizaron componentes con geometrías totalmente distintas a las del diseño anterior. Aunque la geometría de algunos de ellos no es tan sencilla como en el diseño anterior, las propuestas cambiaron para darle al robot, entre otras cosas, un acoplamiento adecuado y mejorar la estética, sin llegar a tener componentes con geometrías demasiado complicadas para su fabricación.</p>

Tabla 5. Propuestas de diseño final.

CAPÍTULO 3. Diseño de Detalle.

3.1 Diseño Mecánico.

La fabricación de los componentes del robot paralelo tipo delta no se encuentra en los alcances del trabajo de tesis, sin embargo, su diseño a detalle se desglosa a continuación con la intención de incorporar al ensamble aspectos como dimensiones exactas de cada uno de los componentes, material y otros aspectos que nos proporcionarán un ensamble ideal para la simulación, además, como un antecedente para tener la posibilidad de retomar el trabajo e implementarlo en un futuro. Este paso en general incluye la creación de un conjunto completo de dibujos de ensamble detallados, o archivos de diseño asistido por computadora (CAD), por cada pieza utilizada en el diseño. Cada dibujo detallado debe especificar todas las dimensiones y las especificaciones de material necesarias para fabricar la pieza. Esta fase, al igual que el diseño conceptual, siempre existe en el desarrollo de un proyecto. La fase de diseño de detalle, a diferencia de las demás fases creativas, se caracteriza en que las soluciones propuestas anteriormente deben concretarse en respuestas únicas que deben describirse en su totalidad y con el detalle necesario para su posterior fabricación o implementación. Debido a la simetría del robot paralelo tipo delta, se podrán describir los componentes de una sola cadena cinemática ya que las otras dos cadenas cuentan con los mismos componentes mecánicos.

Plataforma fija.

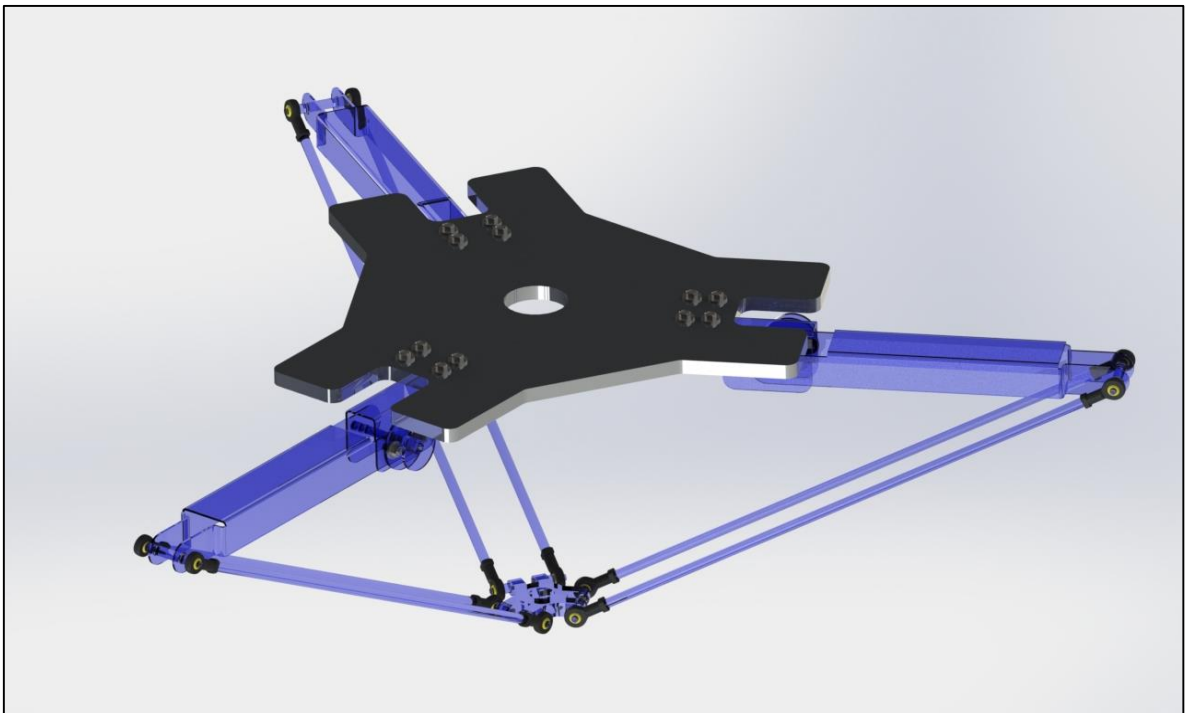


Fig. 3.1 Plataforma fija

La plataforma fija, también llamada base y mostrada en la Figura 3.1, soporta los actuadores, además, de ella penden las tres cadenas cinemáticas que componen al robot. La plataforma tendrá un espesor de 12mm, además de obedecer a las dimensiones antes mencionadas de una distancia de 194mm del centro de la plataforma al eje de giro del brazo y una correcta separación de 120° entre ellos. La geometría del componente es posible maquinarla con procesos de maquinado convencional, las caras se rectifican por el paralelismo que se busca entre las plataformas fija y móvil. Se realizará una serie de barrenos como se muestra en la Figura 3.1, para asegurar el soporte del brazo con la plataforma fija. El material seleccionado para su futura fabricación fue aluminio 6063.

Plataforma móvil.

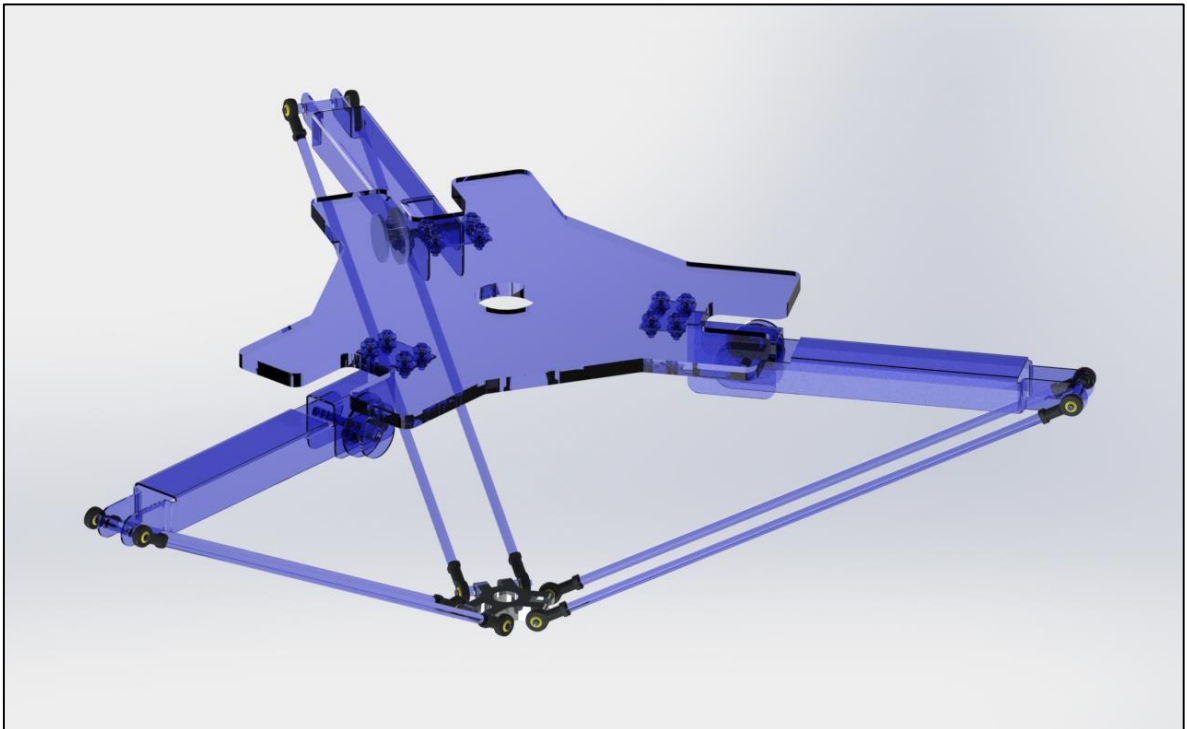


Fig. 3.2 Plataforma móvil.

La plataforma móvil [Figura 3.2] será fabricada de aluminio 6063, el ancho será de 12mm, la distancia del centro de la base al eje, donde tendrán que ir ubicadas las rótulas que desempeñan la función de junta esférica será de 30mm. Dichas juntas esféricas tendrán que tener una separación de 120° como lo especifican las dimensiones antes mencionadas. La geometría favorece a un correcto acoplamiento con los tres paralelogramos que componen a los tres antebrazos. El acoplamiento es mediante pivotes que van ajustados a la plataforma móvil y a las rótulas.

Brazo.

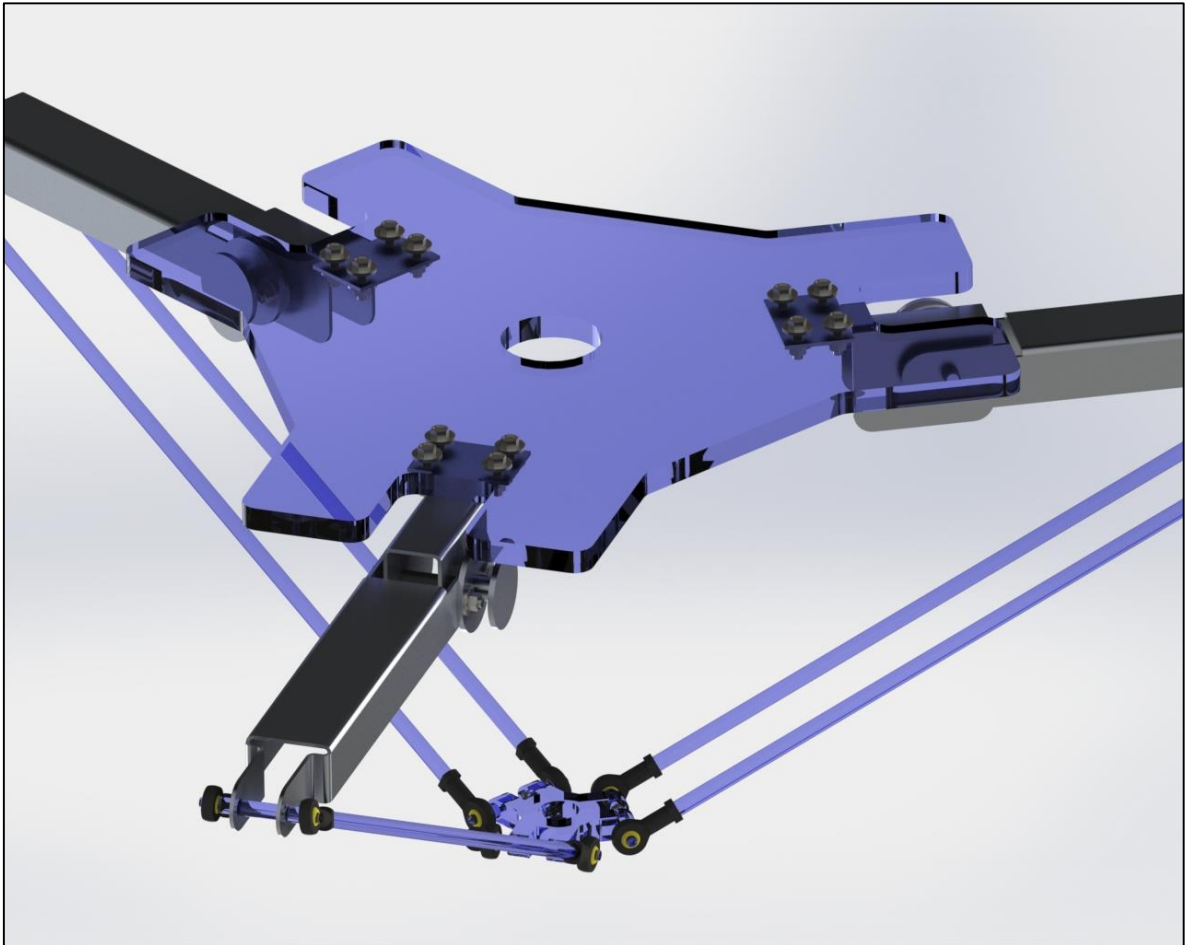


Fig. 3.3 Brazo.

El brazo [Figura 3.3] será fabricado en lámina de aluminio calibre 14 y conformado mediante un proceso de doblado. La geometría del componente evita movimientos no deseados en el robot, es decir, una altura y ancho adecuados del brazo proporcionará una mayor estabilidad y rigidez al robot evitando giros indeseados en la plataforma móvil. La distancia entre el eje de giro del brazo y el eje del acoplamiento con el antebrazo es de 260mm. La geometría favorece a un buen acoplamiento con el soporte del brazo y con el antebrazo. El soporte del brazo será fabricado en lámina de aluminio calibre 14 y conformado mediante un proceso de doblado, este tendrá cuatro barrenos pasados en la parte superior para fijarlo con la plataforma móvil. El componente que servirá como flecha articular y transmitirá el movimiento del motor será fabricado con aluminio 6063, este va sujeto al brazo y sirve de flecha articular que transmite el movimiento del motor.

Antebrazo.

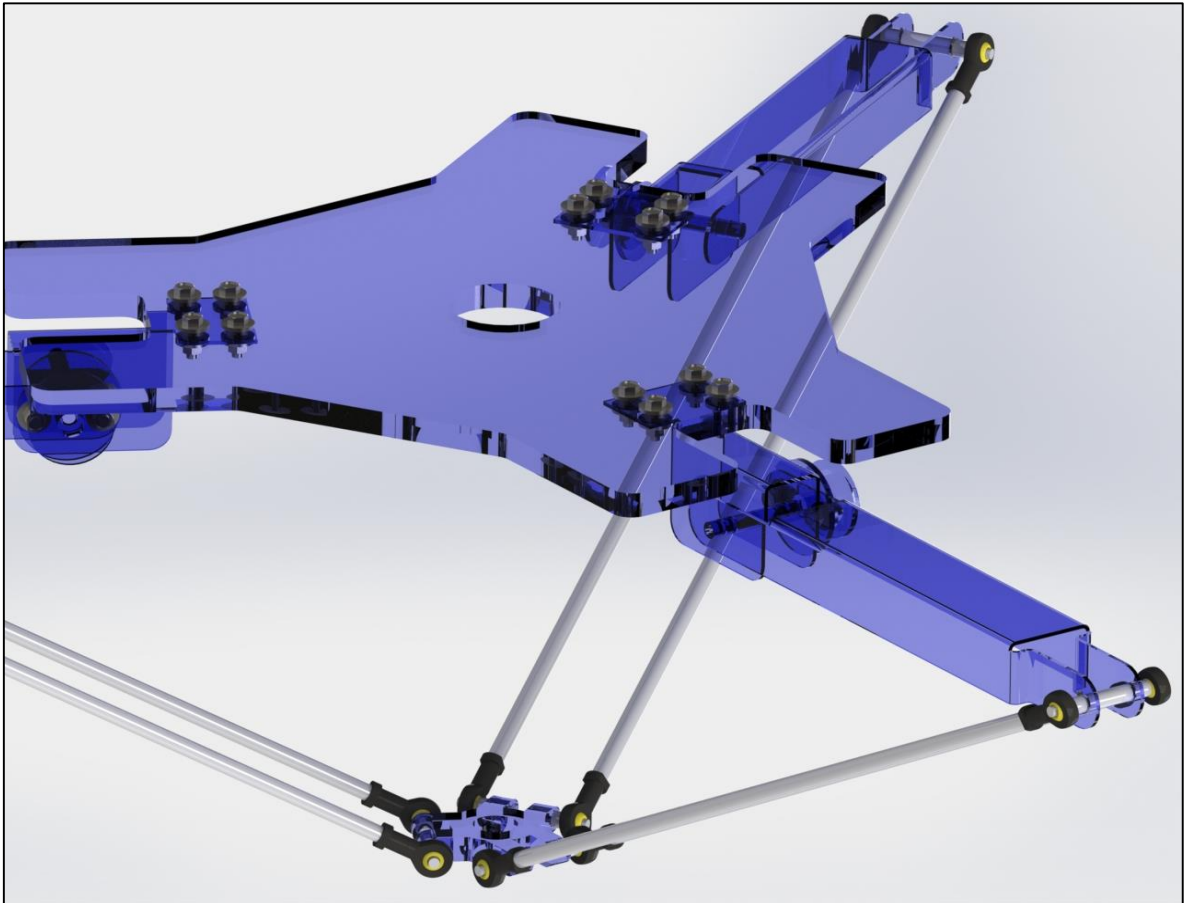


Fig.3.4 Antebrazo

El antebrazo [Figura 3.4] es un paralelogramo el cual es la idea básica detrás del diseño de un robot paralelo tipo delta. Un paralelogramo permite que un eslabón de salida (antebrazo) permanezca en orientación fija con respecto a un eslabón de entrada (brazo). El uso de tres de estos paralelogramos restringe completamente la orientación de la plataforma móvil que permanece con únicamente 3 grados de libertad. El paralelogramo está formado por dos varillas fabricadas en barra redonda de aluminio de 8mm de diámetro, en los extremos de cada una de ellas se realizará una cuerda externa M5 para acoplar las rótulas. Se optó por utilizar rótulas existentes en el mercado, ya que la fabricación de los elementos sería complicada por sus procesos de manufactura, además, la utilización de las rótulas proporcionaría un mejor desempeño del mecanismo de cuatro barras que forma el paralelogramo. El brazo y el paralelogramo están unidos mediante una flecha que va fija al brazo y acoplada con las varillas del paralelogramo mediante las rótulas. La flecha está fabricada de barra redonda de 8mm \varnothing de aluminio.

3.2 Descripción geométrica.

Un diagrama esquemático del robot es croquizado como se muestra en la Figura 3.5, donde la base fija es etiquetada como 0 y la plataforma móvil es etiquetada como 16. Tres cadenas cinemáticas idénticas conectan la plataforma móvil con la plataforma fija, cada cadena cinemática consta de un brazo y un antebrazo. El brazo esta etiquetado con 1, 2, 3. Cada antebrazo está compuesto de un paralelogramo plano de cuatro barras, etiquetados como 4,7,10 y 13 para el primer miembro, 5,8,11 y 14, para el segundo miembro, y 6,9,2 y 15 para el tercer miembro.

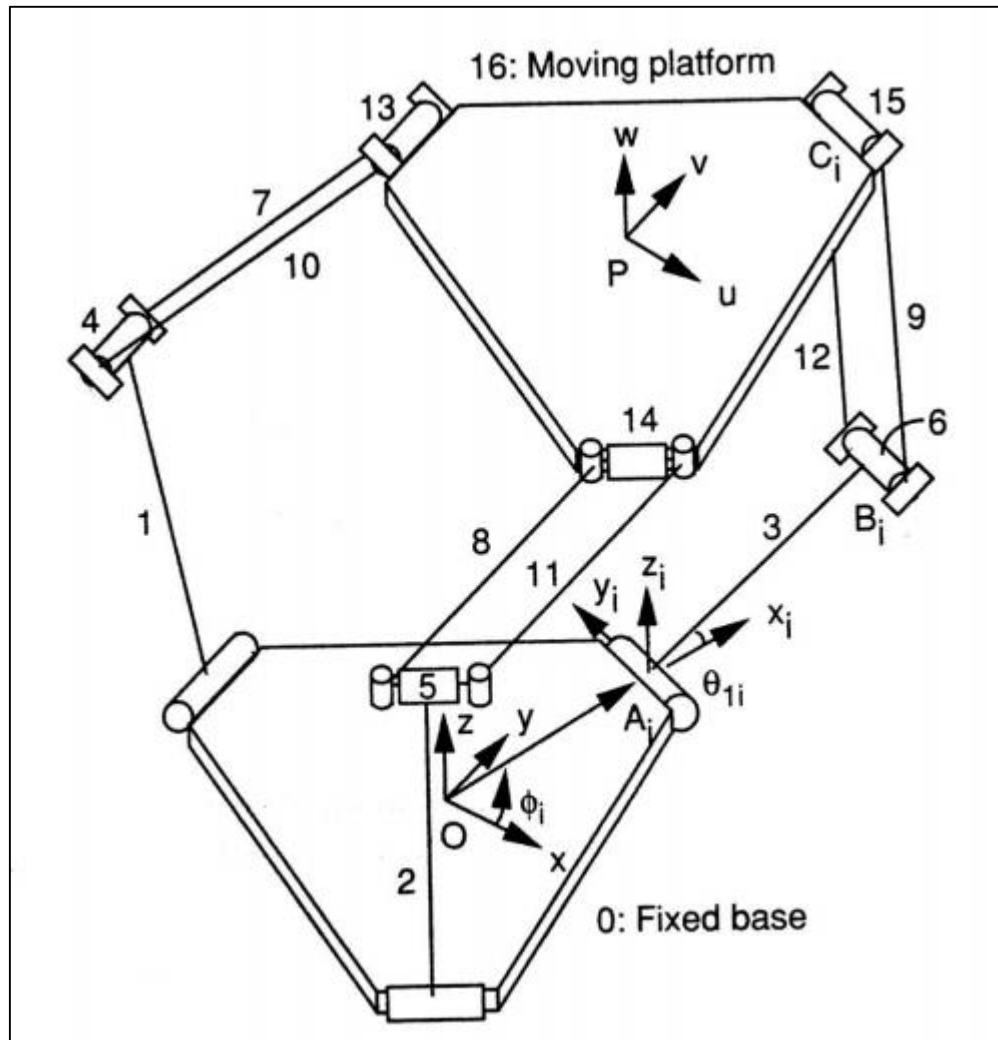


Fig. 3.5 Diagrama esquemático del robot.

Como se muestra en la Figura 3.5 un sistema coordenado de referencia (X, Y, Z) es agregado en el centro de O de la plataforma fija, con sus ejes x y y que yacen en la plataforma fija, y el eje z colocado verticalmente. Otro sistema coordenado (x_i, y_i, z_i) es agregado en la plataforma fija en el punto A_i, tal

que el eje x_i esté en línea con la línea extendida de OA. El eje y_i es orientado a lo largo del eje de la junta de revolución en A_i , y el eje z_i es paralelo al eje z . El ángulo ϕ_i es medido desde el eje x hasta el eje x_i y es una constante permanente del diseño del manipulador.

La Figura 3.6 define los ángulos de las juntas asociadas con una cadena cinemática, donde p es el vector de posición del centroide de la plataforma móvil, θ_{1i} es medido desde el eje X_i hasta AB, θ_{2i} está definido desde la línea extendida de AB hasta la línea definida por la intersección del plano del paralelogramo y el plano X_i-Z_i , y θ_{3i} esta medida desde la dirección y_i hasta B_iC_i . En conjunto hay nueve ángulos de juntas θ_{1i} , θ_{2i} y θ_{3i} para $i = 1, 2$ y 3 , asociadas con el robot.

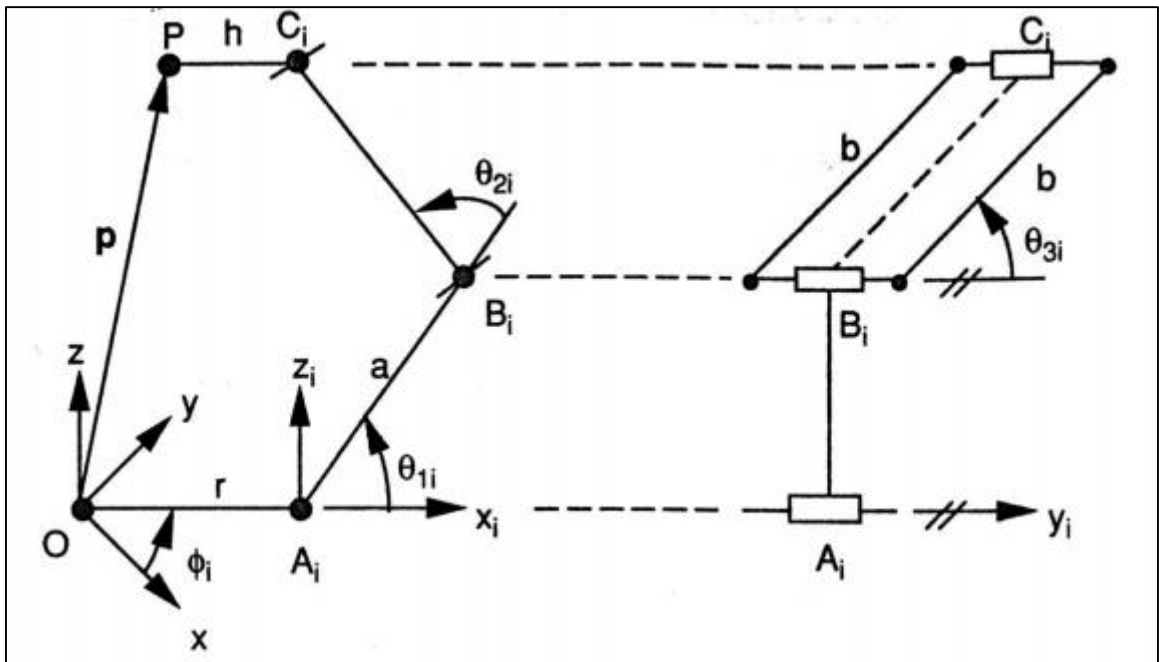


Figura 3.6 Descripción de las juntas de los ángulos.

Para el robot delta, θ_{11} , θ_{12} y θ_{13} , son consideradas como las juntas actuadas o activas. Una ecuación de lazo cerrado puede ser escrita para cada cadena cinemática de la siguiente manera:

$$\overline{A_i B_i} + \overline{B_i C_i} = \overline{O P} + \overline{P C_i} + \overline{O A_i} \quad (1)$$

Expresando una ecuación de lazo respecto al sistema coordenado (x_i, y_i, z_i) , obtenemos:

$$\overline{AB} + \overline{BC} = \overline{AC} \quad (2)$$

Expresado en forma matricial:

$$a \begin{bmatrix} c\theta 1 \\ 0 \\ s\theta 1 \end{bmatrix} + b \begin{bmatrix} s\theta 3c(\theta 1 + \theta 2) \\ c\theta 3 \\ s\theta 3s(\theta 1 + \theta 2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Cxi \\ Cyi \\ Czi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ac\theta 1 + bs\theta 3c(\theta 1 + \theta 2) \\ bc\theta 3 \\ as\theta 1 + bs\theta 3s(\theta 1 + \theta 2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Cxi \\ Cyi \\ Czi \end{bmatrix} \quad (3)$$

Donde

$$\begin{bmatrix} Cxi \\ Cyi \\ Czi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\phi i & s\phi i & 0 \\ -s\phi i & c\phi i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} px \\ py \\ pz \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h - r \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Cxi \\ Cyi \\ Czi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\phi px + s\phi py + h - r \\ -s\phi px + c\phi py \\ -pz \end{bmatrix} \quad (4)$$

Denota la posición del punto Ci relativo al sistema de referencia (x_i, y_i, z_i) , a y b son las longitudes de los eslabones \overline{AiBi} y \overline{BiCi} , respectivamente, y $p = p_x + p_y + p_z$ es el vector de posición del punto P relativo al sistema de referencia (x_i, y_i, z_i) .

3.3 Cinemática inversa.

Para la cinemática inversa, el vector de posición p de la plataforma móvil es dado y el problema es encontrar los ángulos de las juntas θ_{11} , θ_{12} , θ_{13} , requeridas para llevar a la plataforma móvil al punto deseado. Un intuitivo enfoque para la solución es considerar el problema geoméricamente. Podemos notar que una vez dada la posición de p , la posición de Ci es también conocida.

Con la geometría del problema en mente, las soluciones algebraicas son desarrolladas para la resolución de la ecuación (3).

Componentes de cada uno los vectores de la ecuación de lazo (2)

$$\overline{AB} = ac\theta 1_{(i)} + as\theta 1_{(k)}$$

$$\overline{BC} = bs\theta 3c(\theta 2 + \theta 1)_{(i)} + bc\theta 3_{(j)} + bs\theta 3s(\theta 1 + \theta 2)_{(k)}$$

$$\overline{AC} = Cxi_{(i)} + Cyi_{(j)} + Czi_{(k)}$$

Expresión correspondiente a la ecuación de lazo (2)

$$ac\theta 1_{(i)} + as\theta 1_{(k)} + bs\theta 3c(\theta 2 + \theta 1)_{(i)} + bc\theta 3_{(j)} + bs\theta 3s(\theta 1 + \theta 2)_{(k)} + Cxi_{(i)} + Cyi_{(j)} + Czi_{(k)} = 0_{(i)} + 0_{(j)} + 0_{(k)}$$

Sistema de ecuaciones

$$ac\theta_1 + bs\theta_3c(\theta_1 + \theta_2) - Cx = 0 \dots\dots\dots (5)$$

$$bc\theta_3 - Cy = 0 \dots\dots\dots (6)$$

$$as\theta_1 + bs\theta_3s(\theta_1 + \theta_2) - Cz = 0 \dots\dots\dots (7)$$

Solución de θ_3

Despejar θ_3 de (6)

$$c\theta_3 = \frac{Cy}{b}$$

Solución de θ_1

Despejar " θ_1 " de (5)

$$ac\theta_1 + bs\theta_3 \underbrace{[c\theta_1c\theta_2 - s\theta_1s\theta_2]} - Cx = 0$$

Aplicar Identidad Trigonométrica $\cos(A \pm B) = \cos A \cos B \pm \sin A \sin B$

$$c\theta_1 = \frac{Cx + bs\theta_3s\theta_1s\theta_2}{[a + bs\theta_3c\theta_2]} \dots\dots\dots (8)$$

Despejar " θ_1 " de (3)

$$as\theta_1 + bs\theta_3 \underbrace{[s\theta_1c\theta_2 + c\theta_1s\theta_2]} - Cz = 0$$

Aplicar Identidad Trigonométrica $\sin(A \pm B) = \sin A \cos B \pm \cos A \sin B$

$$s\theta_1 = \frac{Cz - bs\theta_3c\theta_1s\theta_2}{[a + bs\theta_3c\theta_2]} \dots\dots\dots (9)$$

Sustituir (8) en (9) y reducir la expresión.

$$s\theta_1 = \frac{Cz - bs\theta_3s\theta_2 \left[\frac{Cx + bs\theta_3s\theta_1s\theta_2}{[a + bs\theta_3c\theta_2]} \right]}{[a + bs\theta_3c\theta_2]}$$

Resultado

$$s\theta_1 = \frac{Cz(a + bs\theta_3c\theta_2) - Cxbs\theta_3s\theta_2}{(a + bs\theta_3c\theta_2)^2 + (bs\theta_3s\theta_2)^2}$$

Solución de θ_2

La biografía dice que la solución de θ_2 es calculada con la ayuda de la magnitud del vector C_i .

$$C_i = C_x^2 + C_y^2 + C_z^2$$

Resolver los binomios al cuadrado y factorizar convenientemente para poder reducir la expresión.

$$[ac\theta_1 + bs\theta_3c(\theta_1 + \theta_2)]^2 + b^2c^2\theta_3 + [as\theta_1 + bs\theta_3s(\theta_1 + \theta_2)]^2 = C_x^2 + C_y^2 + C_z^2$$

Con ayuda de identidades trigonométricas reducir la expresión.

$$a^2[s^2\theta_1 + c^2\theta_1] + b^2s^2\theta_3[s^2(\theta_1 + \theta_2) + c^2(\theta_1 + \theta_2)] + 2ac\theta_1bs\theta_3c(\theta_1 + \theta_2)\theta + 2as\theta_1bs\theta_3s(\theta_1 + \theta_2) + b^2c^2\theta_3 = C_x^2 + C_y^2 + C_z^2$$

$$a^2 + b^2 + 2abs\theta_3 \underbrace{[c\theta_1c(\theta_1 + \theta_2) + s\theta_1s(\theta_1 + \theta_2)]}_{\cos(\theta_1 - \theta_2)} = C_x^2 + C_y^2 + C_z^2$$

Aplicar Identidades trigonométricas

$$\cos(A \pm B) = \cos A \cos B \pm \sin A \sin B, \quad \sin(A \pm B) = \sin A \cos B \pm \cos A \sin B$$

$$a^2 + b^2 + 2abs\theta_3c\theta_2 = C_x^2 + C_y^2 + C_z^2$$

Resultado

$$c\theta_2 = \frac{C_x^2 + C_y^2 + C_z^2 - a^2 - b^2}{2abs\theta_3}$$

3.4 Implementación de la cinemática inversa en la plataforma NI LabVIEW.

La Figura 3.7 muestra el diagrama de bloques en LabVIEW donde se programó la cinemática inversa del robot. Cabe mencionar que el alcance de la tesis no incluye un análisis de cinemática directa o un estudio del espacio de trabajo, es decir, solo se encontró la solución de la cinemática inversa con la cual el vector de posición "p" de la plataforma móvil es dado y la solución nos arroja los ángulos de las juntas θ_{11} , θ_{12} , θ_{13} , requeridas para llevar a la plataforma móvil al punto deseado. Si en determinado momento se introduce un vector de posición el cual no es capaz de alcanzar el robot, el programa en LabVIEW arrojará una notación NaN (Not a Number) en lugar de un ángulo, lo cual significa que no existe una solución para dicho vector de posición.

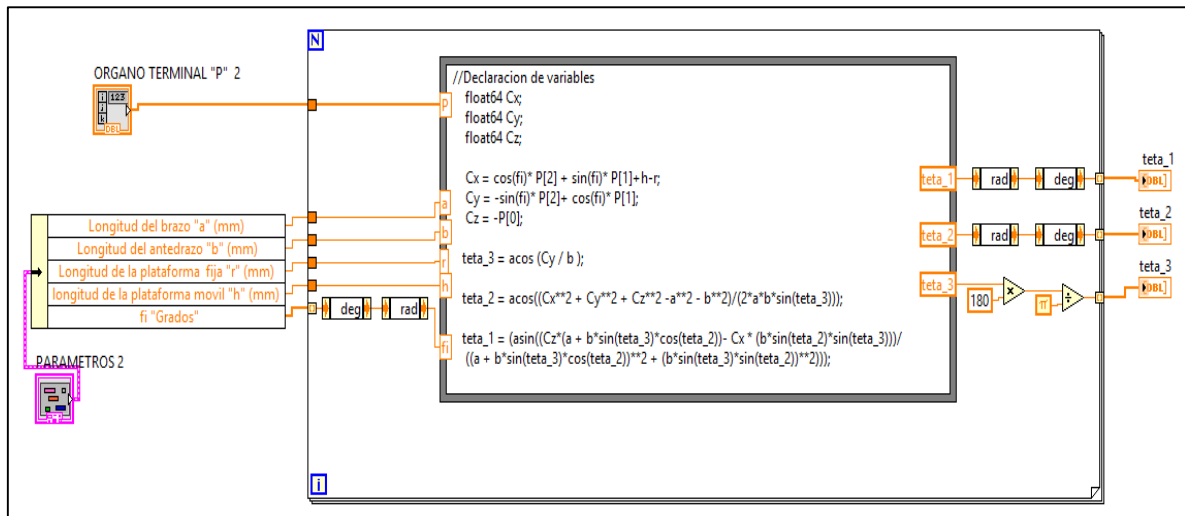


Fig. 3.7 Programación de la cinemática inversa en LabVIEW.

La programación de la cinemática inversa se realizó utilizando la estructura de programación Formula Node de LabVIEW, esta es una conveniente estructura de programación basada en texto que se puede usar para ejecutar operaciones matemáticas en un diagrama de bloques usando sintaxis de lenguaje basado en texto. Es más útil para ecuaciones que tienen muchas variables o de alguna manera son complicadas. El código basado en texto simplifica el diagrama de bloques y aumenta su fluidez. En el programa simplemente se colocaron las ecuaciones correspondientes obtenidas anteriormente dentro de la estructura de programación, después se colocaron las variables de entrada y salida en la parte izquierda y derecha respectivamente de la Formula Node. Las variables de entrada corresponden al vector de posición y parámetros dimensionales del robot y las variables de salida corresponden a los ángulos θ_1 , θ_2 y θ_3 de cada una de las tres cadenas cinemáticas del robot. En la interfaz de usuario

se puede observar de manera clara cada una de las variables involucradas. La Figura 3.8 muestra la interfaz desarrollada en LabVIEW, esta permite al usuario ingresar por medio de controles numéricos el vector de posición “p” para la posición de la plataforma móvil. De igual manera permite ingresar los parámetros de Longitud de brazo “a”, longitud del antebrazo “b”, longitud del centro de la plataforma fija al eje de giro del brazo “r”, longitud del centro de la plataforma móvil al eje de giro del antebrazo “h” y el valor de ϕ (fi). Y lo más importante, al correr el programa nos arroja el resultado de θ_1 , θ_2 y θ_3 correspondientes a cada una de las tres cadenas cinemáticas del robot.

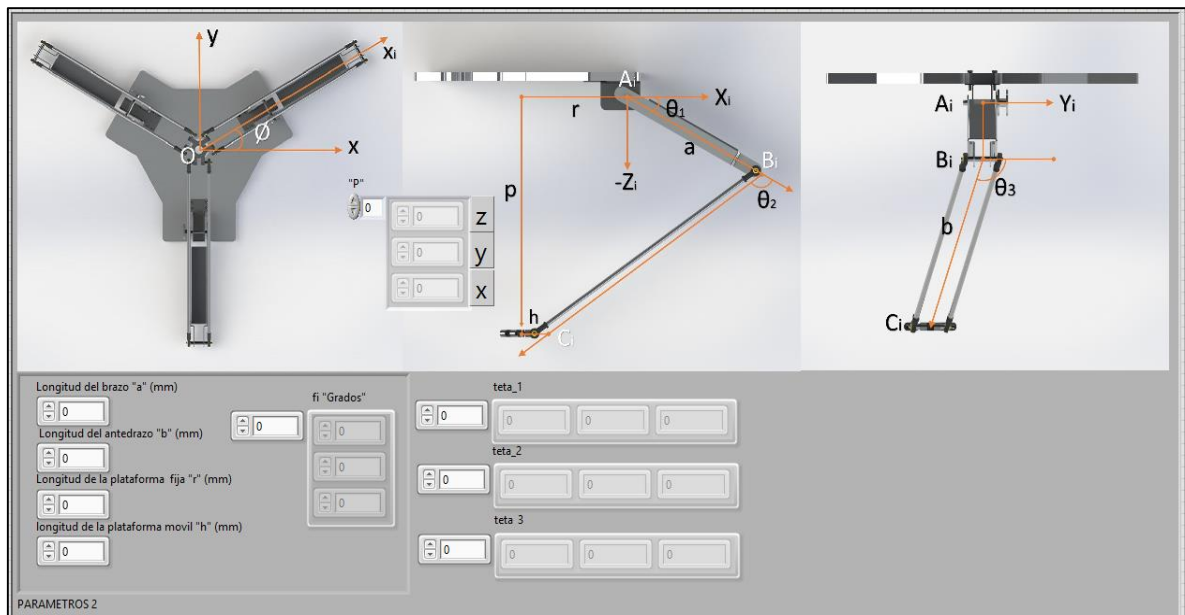


Fig. 3.8 Interfaz en LabVIEW de la cinemática inversa.

3.5 Integración virtual del ensamble 3D a la plataforma NI LabVIEW.

3.5.1 NI SoftMotion para SolidWorks.

Los prototipos virtuales (también llamados prototipos digitales) ofrecen la habilidad de visualizar y optimizar un diseño, y evaluar diferentes conceptos de diseño antes de incurrir en costos de prototipos físicos. La estrecha integración del módulo LabVIEW NI SoftMotion y el software DS SolidWorks ofrece un entorno de diseño que es ideal para la generación de prototipos virtuales. Esta herramienta nos permite conectar fácilmente modelos existentes en SolidWorks CAD a LabVIEW. La integración de simulación de movimiento con CAD simplifica el diseño pues la simulación usa información ya existente en el modelo CAD, tales como puntos de contacto, acoplamientos y propiedades de masa del material [Figura 3.9].

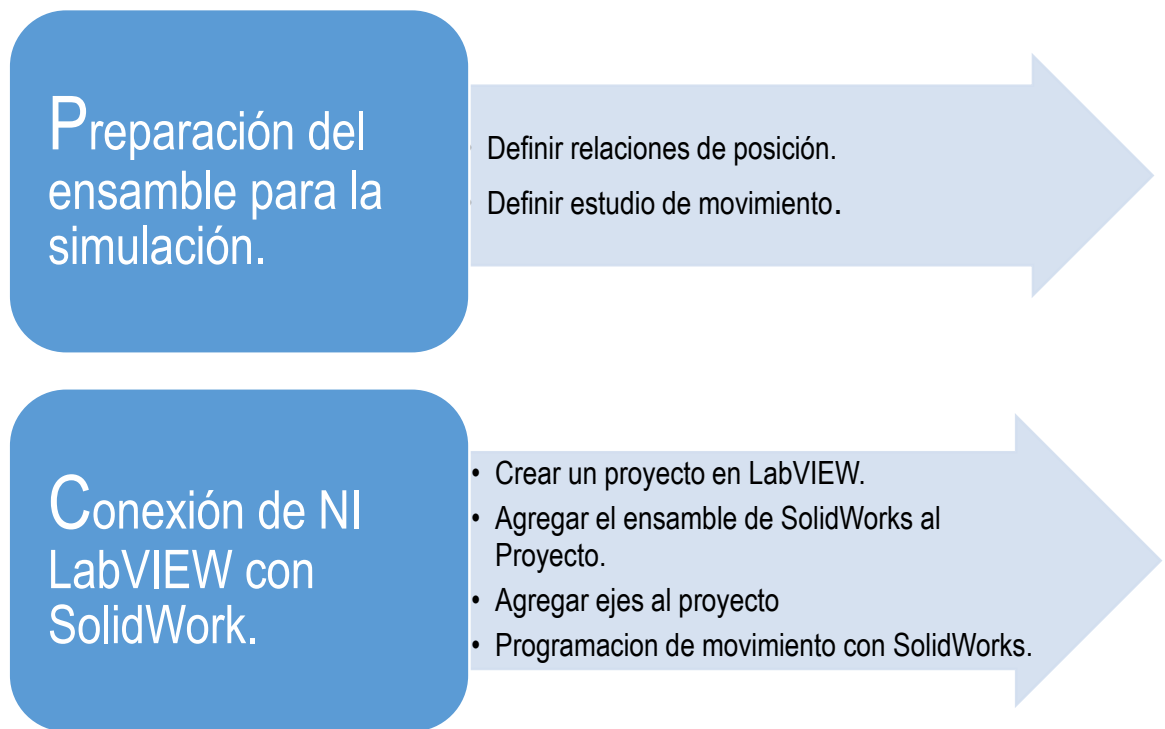


Fig. 3.9 Esquema para la Integración virtual.

3.5.2 Preparación del ensamble para la simulación.

Definir relaciones de posición.

Las relaciones de posición crean relaciones geométricas entre los componentes de un ensamble. A medida que se agregan las relaciones de posición, se definen las direcciones permisibles del movimiento lineal o rotacional de los componentes. Se puede mover un componente dentro de sus grados de libertad, visualizando el comportamiento del ensamble. Por ejemplo, una relación de posición coincidente hace que dos caras planas se conviertan en coplanares, las caras se pueden mover una a lo largo de la otra, pero son inseparables. Una relación de posición concéntrica hace que dos caras cilíndricas se conviertan en concéntricas, las caras se pueden mover a lo largo de un eje común, pero no se pueden separar de este eje.

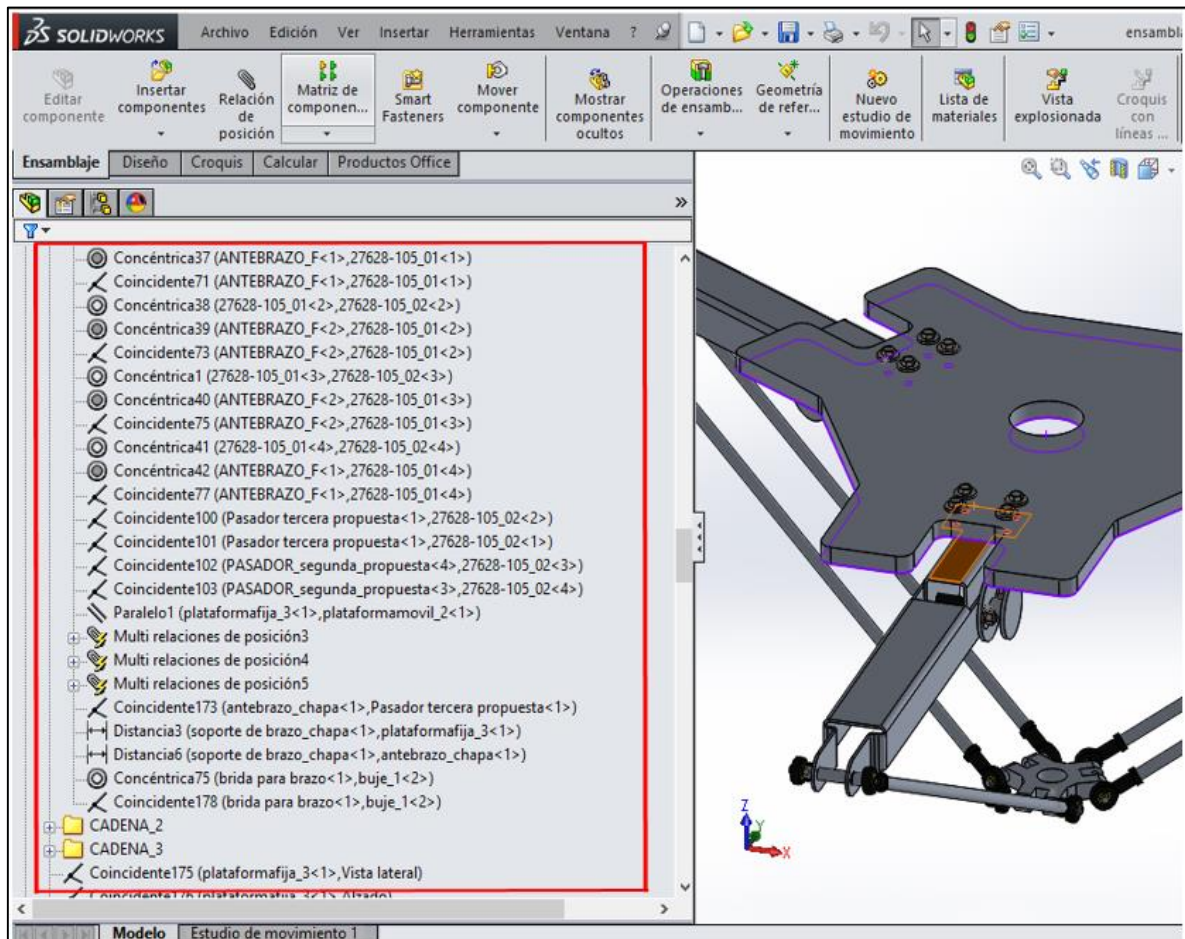


Fig. 3.10 Algunas Relaciones de posición del robot.

La Figura 3.10 señala en un rectángulo rojo algunas relaciones de posición necesarias para la correcta integración del ensamble con SolidWorks.

Relaciones de posición estándar.

Las relaciones de posición estándar son utilizadas para ubicar componentes dentro de un ensamble e incluyen ángulo, coincidente, distancia, bloqueo, paralela, perpendicular y tangente. En el caso de estudio del presente trabajo de tesis se ocupó la gran mayoría de las relaciones de posición estándar disponibles para obtener un ensamble lo suficientemente definido que nos permitiera una correcta integración con LabVIEW [Figura 3.11].

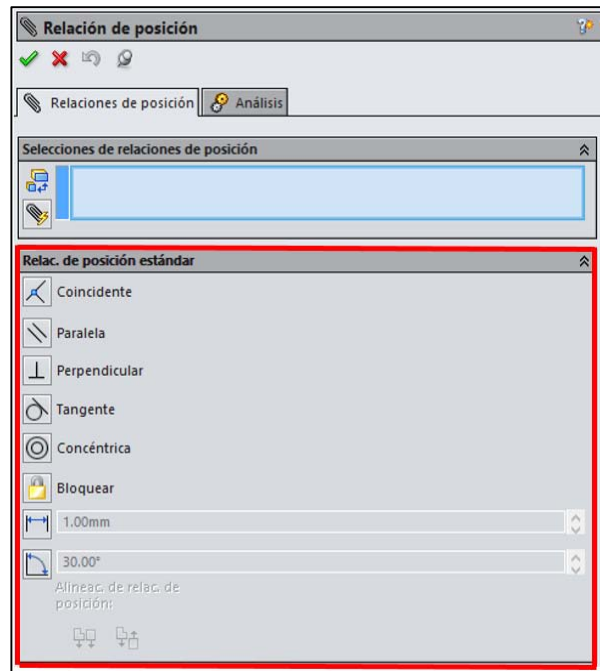


Fig. 3.11 Relaciones de posición estándar.

Relaciones de posición mecánicas.

Las relaciones de posición mecánicas son utilizadas para definir el movimiento de un componente relativo a otro, incluyen relaciones de posición de empujador de leva, engranaje, bisagra, cremallera y piñón, tornillo y junta universal. Los componentes que fueron diseñados para el robot paralelo tipo delta no utilizan engranes, levas o tornillos sin fin, por lo que la utilización de las relaciones de posición estándar fueron suficientes para definir correctamente el ensamble del robot [Figura 3.12].

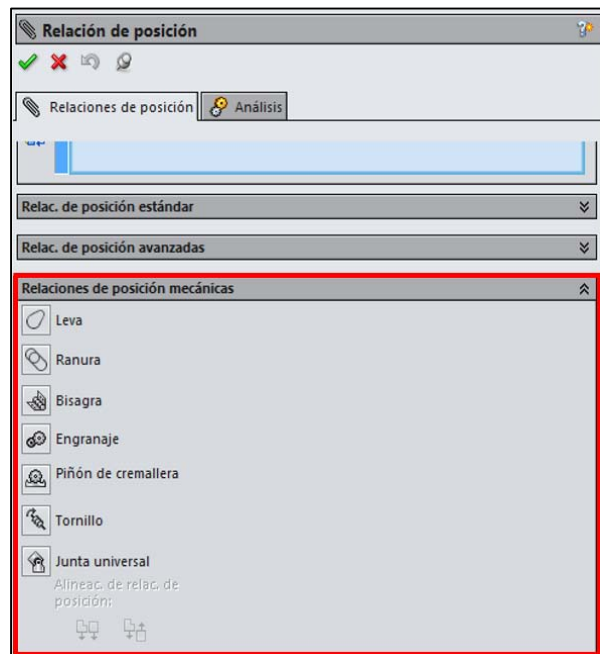


Fig. 3.12 Relaciones de posición mecánicas.

Definir estudio de movimiento.

Los estudios de movimiento son simulaciones gráficas de movimiento para modelos de ensamble. Puede incorporar en un estudio de movimiento propiedades visuales, como iluminación y perspectiva de cámara. Los estudios de movimiento no modifican un modelo de ensamble ni sus propiedades, simulan y animan el movimiento prescrito para un modelo. Puede utilizar relaciones de posición de SolidWorks para restringir el movimiento de componentes en un ensamble al modelar movimiento.

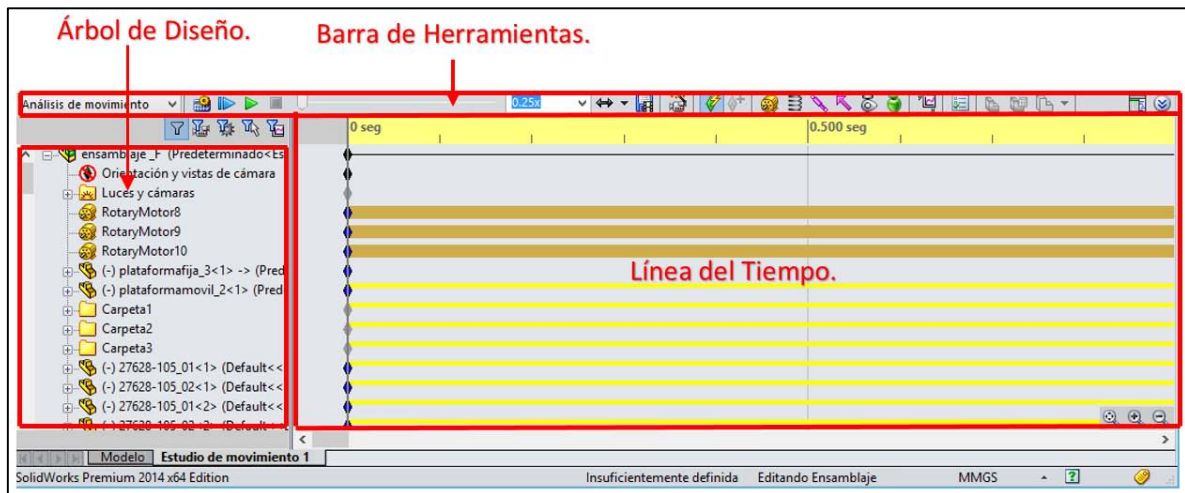


Fig. 3.13 Interfaz MotionManager para estudio de movimiento.

En un estudio de movimiento se utiliza MotionManager, la interfaz con escala de tiempo que incluye tres herramientas de estudio de movimiento:

- Animación.
- Movimiento básico.
- Análisis de movimiento.

Para la comunicación entre LabVIEW y SolidWorks es necesario utilizar la herramienta Análisis de Movimiento [Figura 3.14]. Esta herramienta (disponible con el complemento SolidWorks Motion en la versión SolidWorks Premium) se utiliza para simular y analizar en un ensamble los efectos de elementos de movimiento (incluyendo fuerzas, resortes, amortiguadores y fricción). Un estudio de Análisis de movimiento combina elementos de estudio de movimiento con relaciones de posición en cálculos de movimiento. Por tanto, las restricciones de movimiento, las propiedades de materiales, la masa y los contactos entre componentes se tienen en cuenta en los cálculos realizados por el *solver*

cinemático de SolidWorks Motion. También puede utilizar análisis de movimiento para trazar resultados de simulación y análisis adicionales.

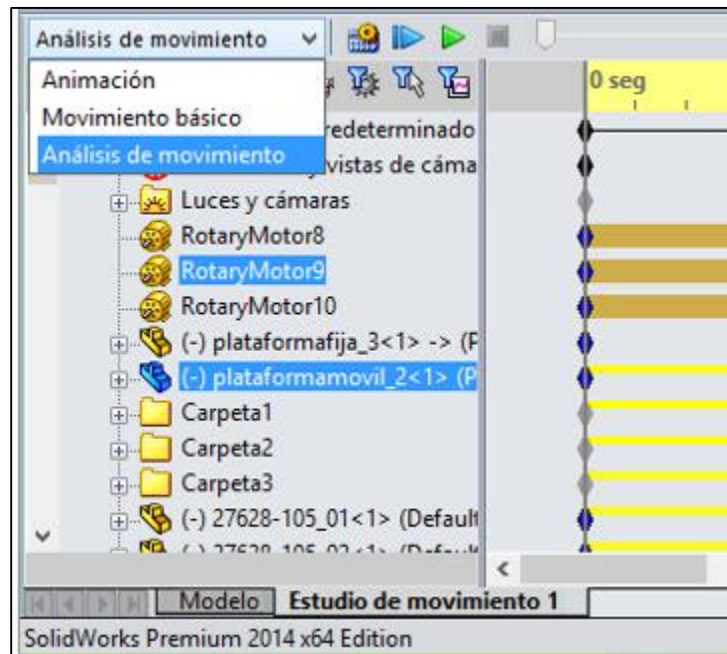


Fig. 3.14 Tipos de estudio de movimiento.

Crear un motor.

Un motor es un elemento en un estudio de movimiento que mueve componentes en un ensamble, simulando los efectos de varios tipos de motores. Los motores mueven componentes en una sola dirección seleccionada, pero no son fuerzas. La fuerza del motor no varía según el tamaño o la masa del componente. Por ejemplo, un cubo pequeño se mueve a la misma velocidad que uno grande si configura la velocidad del motor en un valor específico para ambos. El movimiento originado por motores prevalece sobre el originado por otros elementos de simulación. Si tiene un motor que mueve un componente hacia la izquierda y un resorte lo empuja hacia la derecha, el componente se mueve hacia la izquierda y aumenta el consumo de energía del motor.

La configuración del robot paralelo tipo delta utiliza tres juntas de revolución que corresponden a los tres actuadores de las tres cadenas cinemáticas, dichos actuadores son rotatorios. La figura 3.15 muestra la creación de uno de los tres motores utilizados en la simulación. Al dar clic en "Motor" dentro de la barra de herramientas del estudio de movimiento aparecerá un menú como el mostrado en la figura. Para la creación de un motor se requiere especificar el tipo de motor a utilizar, que en este caso es un motor rotatorio. Para la localización del motor se selecciona una superficie cilíndrica o un

borde circular. En la figura se observa en color azul y una flecha roja que indica la localización del motor virtual. Todo motor configurado en SolidWorks debe ser un motor tipo distancia para su correcta integración con SolidWorks. En el apartado movimiento debe ser seleccionado distancia. Los parámetros de tiempo no son considerados en la simulación con LabVIEW.

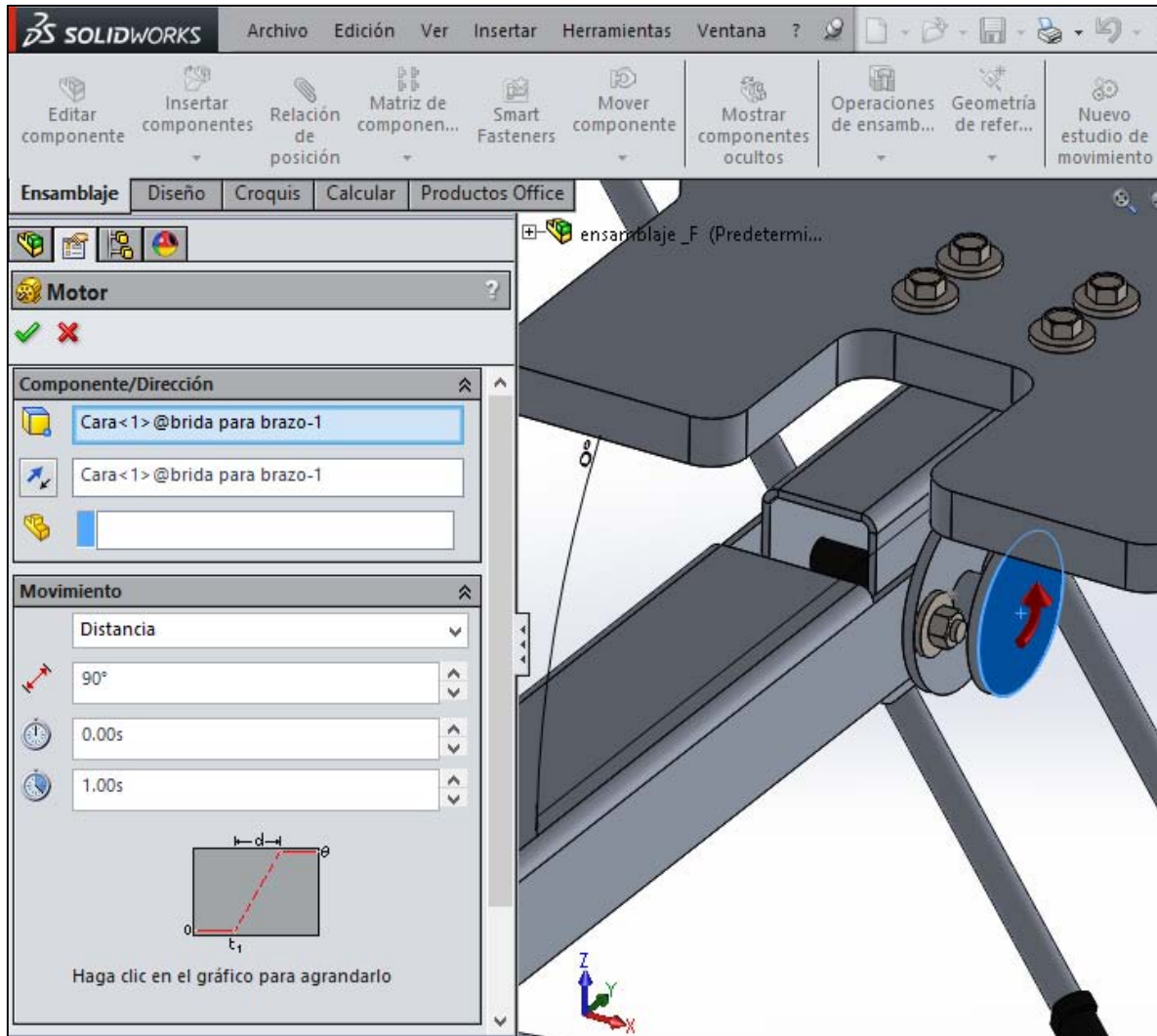


Fig. 3.15 Creación de un motor rotatorio en SolidWorks.

Especificación de la masa en un componente.

La especificación de la masa dentro de SolidWorks puede ser de dos maneras: la primera es definir el material del componente, de esta manera el software asigna automáticamente el valor de la masa del componente basándose en su geometría. La otra manera es ingresar las propiedades de masa manualmente. Una vez asignada la masa y basándose en la geometría del componente, SolidWorks

puede calcular automáticamente su inercia. Para lograr una simulación más realista, la incorporación de la masa al ensamble del robot es primordial [Figura3.16].

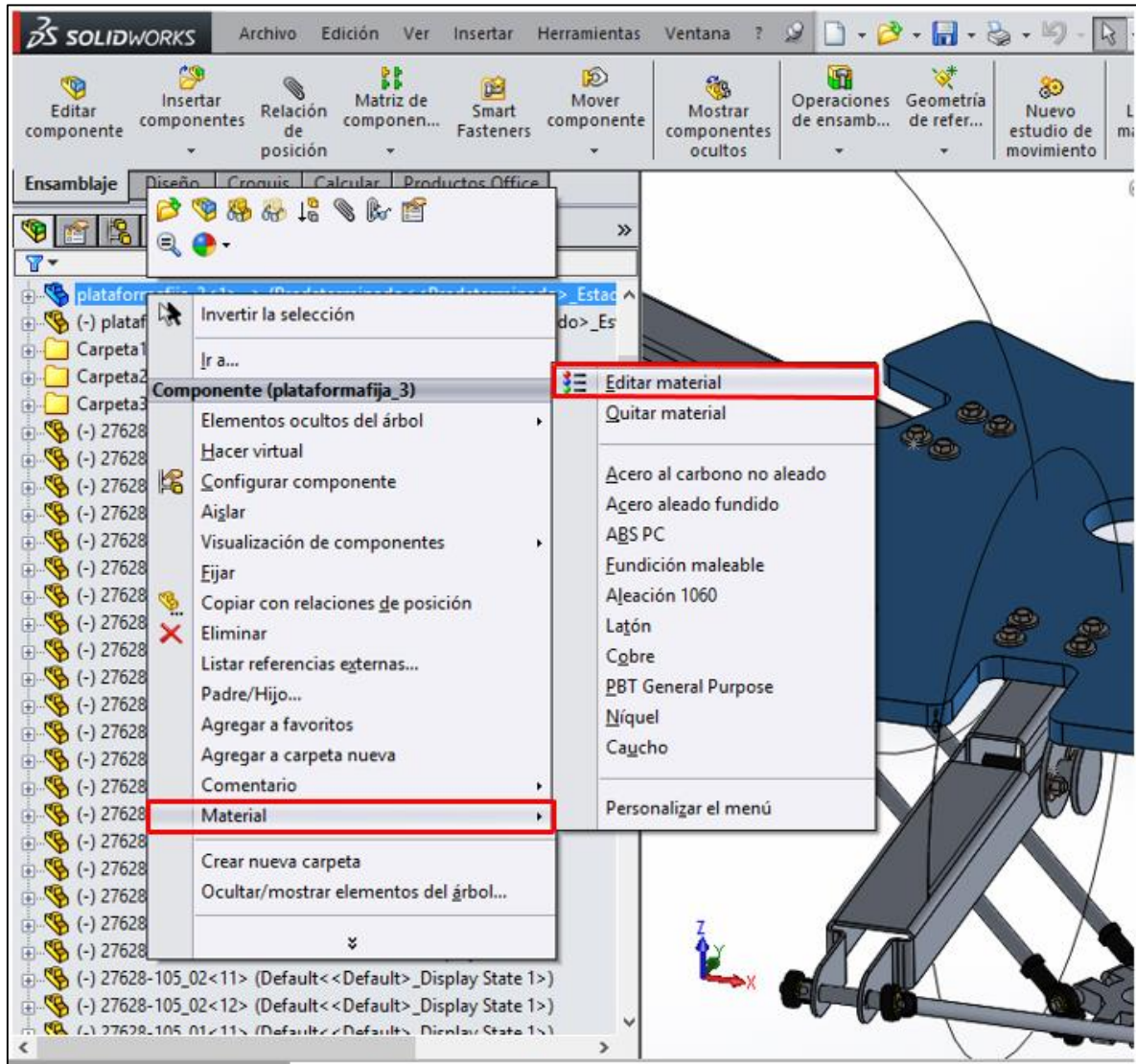


Fig. 3.16 Editar Material de un componente.

3.5.3 Conexión de NI LabVIEW con SolidWorks.

Software requerido.

- NI LabVIEW 2012 o superior.
- Módulo LabVIEW NI SoftMotion Estándar o Premium.
- SolidWorks 2012 o superior.

Se requiere contar con la opción SolidWorks Simulation junto con el complemento de Motion Simulation activado en el menú Herramientas de SolidWorks. Este viene incluido con SolidWorks Premium, Simulation Premium, o Simulation Professional. Cuando active el complemento Motion Simulation desde el cuadro de dialogo de complementos en SolidWorks, marque como seleccionadas las casillas de la izquierda y de la derecha de manera que no debe reactivar el complemento cada vez que use NI SoftMotion para SolidWorks. Se puede descargar una versión de prueba de 7 días del software necesario de National Instruments desde ni.com/downloads/esa [Figura 3.17].

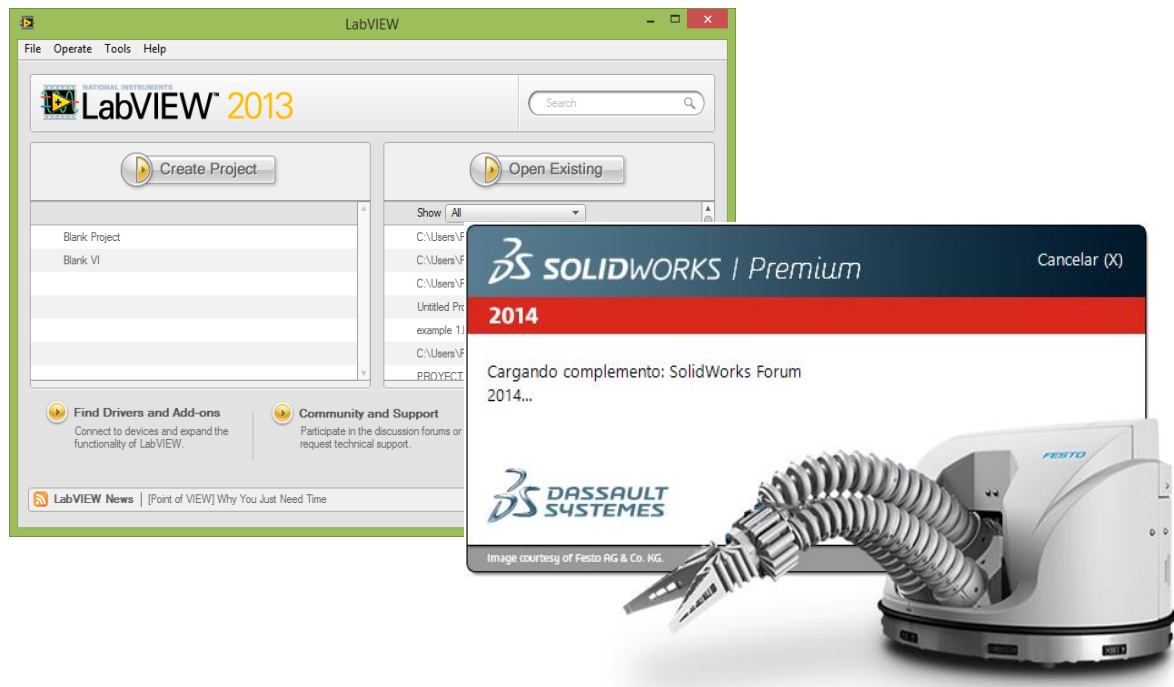


Fig. 3.17 Software Requerido.

Agregar el ensamble de SolidWorks al proyecto.

Antes de comenzar con la programación de movimientos en LabVIEW para la simulación con SolidWorks, es necesario importar la información del ensamble de SolidWorks al Proyecto de LabVIEW, y crear ejes de NI Softmotion para los motores simulados incluidos en el ensamble. Para agregar el ensamble del robot al proyecto primero se debe ejecutar SolidWorks y abrir el ensamble del robot. Una vez abierto el modelo del robot se debe asegurar que los complementos de SolidWorks Motion y SolidWorks Simulation estén marcadas las casillas de la izquierda y la derecha como se muestra en la Figura. 3.18.

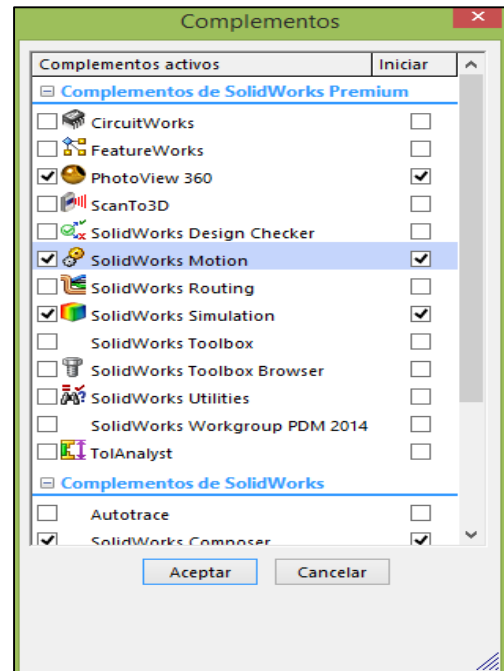


Fig. 3.18 Complementos en SolidWorks.

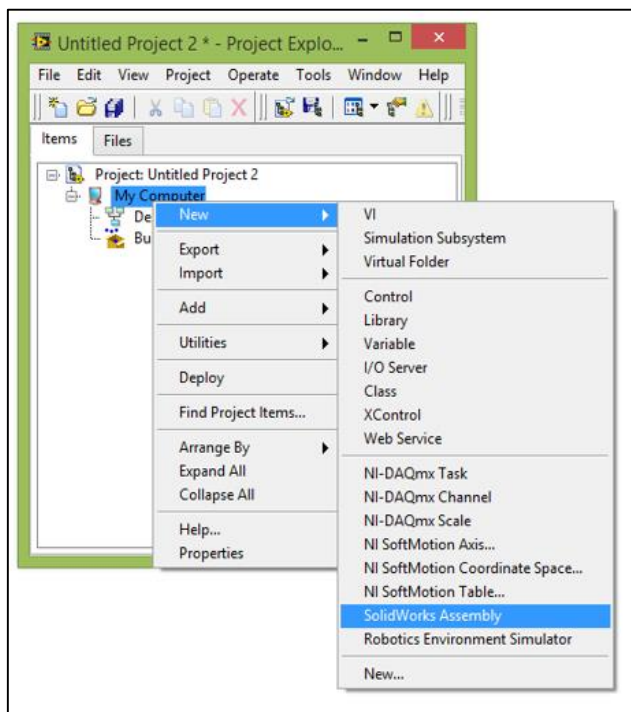


Fig. 3.19 Agregar ensamble al Proyecto

Posteriormente se abre un proyecto de LabVIEW vacío, y se da clic sobre el elemento My Computer en la ventana de Project Explorer y se selecciona New >> SolidWorks Assembly del menú, para abrir el cuadro de dialogo Import SolidWorks Motors from Assembly File. En este cuadro de dialogo se debe seleccionar el ensamble del robot que deberá agregarse al proyecto de LabVIEW. Si el ensamble está actualmente abierto el cuadro de dialogo contiene la ruta de ubicación de ese ensamble. De ser necesario se puede dar clic en Browse para seleccionar un archivo de ensamble

diferente. Finalmente se hace clic en OK y el ensamble del robot es agregado a la ventana de Project Explorer, incluyendo todos los motores contenidos en el estudio de movimiento de SolidWorks.

Agregar ejes al proyecto.

Para simular usando los motores de SolidWorks incluidos en el modelo, se necesitan asociarlos con ejes de NI SoftMotion. Los ejes de NI SoftMotion son usados cuando se crean nuevos perfiles de movimiento usando los bloques funcionales de NI SoftMotion. Para comenzar se da clic derecho en el elemento My Computer en la ventana del Project Explorer y se selecciona New >> NI SoftMotion Axis del menú para abrir el cuadro de dialogo Axis Manager. En el cuadro de dialogo Axis Manager se da clic en Add New Axis y el nuevo eje se vincula automáticamente a un motor de SolidWorks disponible [Figura 3.20]. Se da

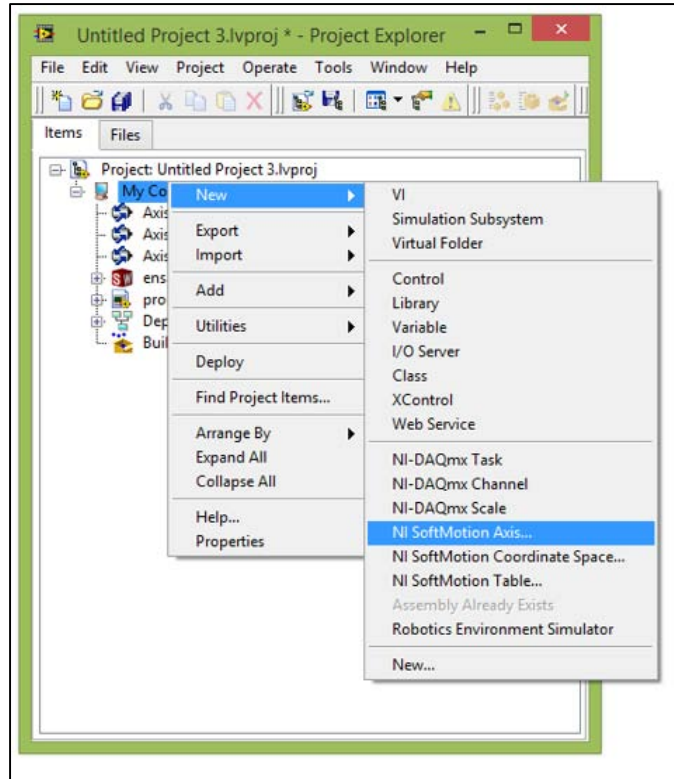


Fig. 3.20 Selección de NI SoftMotion Axis.

clic tres veces hasta que los tres motores rotatorios creados en el ensamble del robot hayan sido asociados con ejes de NI SoftMotion. Finalmente se da clic en OK y los tres ejes del robot son añadidos a la ventana del Project Explorer [Figura 3.21].

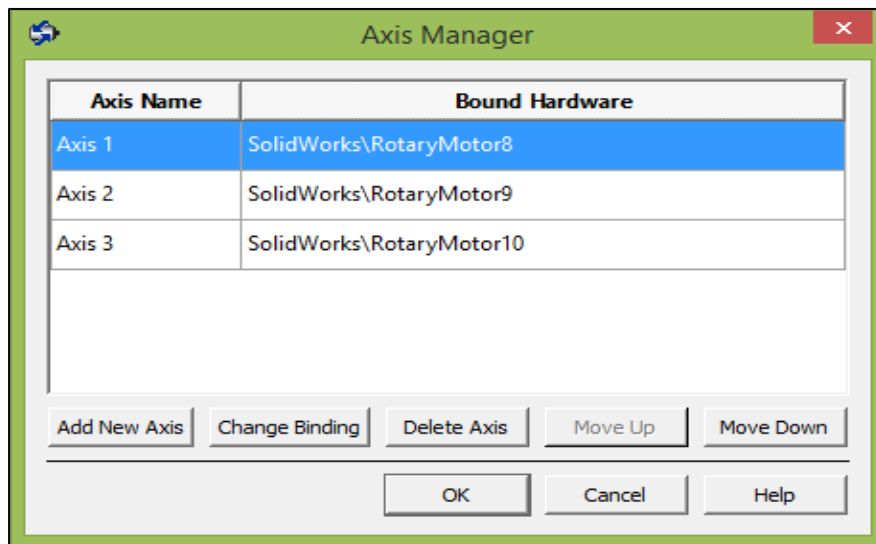


Fig. 3.21 Cuadro de diálogo del Axis Manager.

Introducción al ambiente de programación NI LabVIEW.

NI LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) es un lenguaje de programación gráfica diseñado para ingenieros e investigadores que desarrollan aplicaciones de pruebas, control y mediciones, LabVIEW usa iconos en vez de líneas de texto para crear aplicaciones. Con más de 25 años de innovaciones, la naturaleza intuitiva de la programación gráfica hace que LabVIEW sea más fácil de usar por educadores, investigadores y estudiantes. Los programas de LabVIEW son llamados instrumentos virtuales o VI's, ya que su apariencia y operación generalmente imitan a los instrumentos físicos, como osciloscopios y multímetros. LabVIEW contiene una extensa variedad de herramientas para adquirir, analizar, visualizar y almacenar datos, así como herramientas para ayudar a solucionar problemas en el código que escriba.

Los programas en LabVIEW son llamados instrumentos virtuales (VI's). Los controles son entradas y los indicadores son salidas de información. Cada instrumento virtual contiene tres partes principales:

Panel frontal: la manera en que el usuario interactúa con el instrumento virtual.

Diagrama de bloques: el código que controla el programa.

Conexiones: la manera en que se conecta un instrumento virtual.

En LabVIEW, se construye una interfaz de usuario utilizando un juego de herramientas y objetos. La interfaz de usuario es conocida como el panel frontal. De igual manera se agrega código usando representaciones graficas de funciones para controlar los objetos del panel frontal. El diagrama de bloques contiene este código. Cada control e indicador del panel frontal tiene una terminal correspondiente en el diagrama de bloques [Figura 3.22].

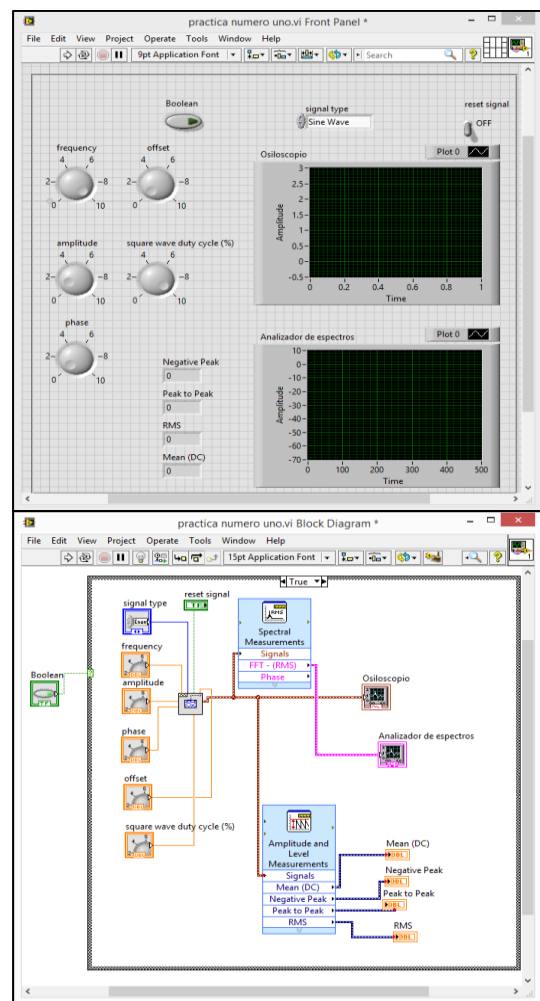


Fig. 3.22 Panel frontal y Diagrama de Bloques.

Programación del movimiento.

Como se mencionó anteriormente el robot paralelo tipo delta consta de tres actuadores. En la Figura 3.23 podemos observar la ventana correspondiente al proyecto donde fueron agregados los tres motores rotatorios creados en SolidWorks y los tres ejes NI Softmotion asociados a cada uno de ellos. Una vez hecho esto, se continúa con la programación del movimiento, comenzando con la configuración del Timed Loop o Ciclo de Tiempo.

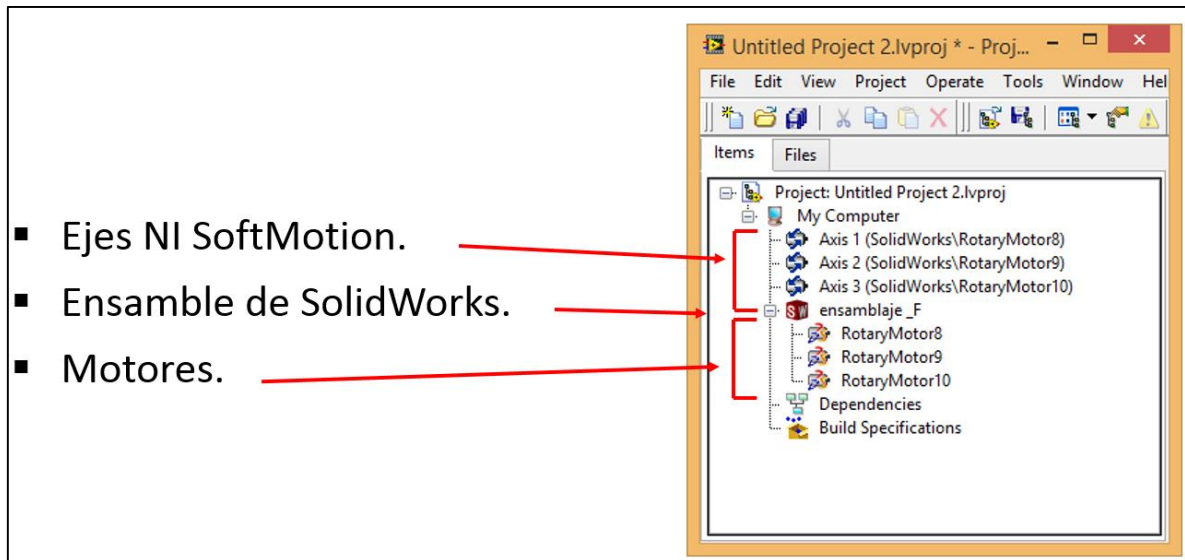


Fig. 3.23 Ventana del Proyecto con el ensamble de SolidWorks y ejes de NI SoftMotion.

Timed Loop.

Un ciclo Timed Loop sincronizado al NI ScanEngine permite a sus aplicaciones de movimiento sensibles al tiempo ser ejecutadas a la velocidad de escaneo. Un Timed Loop garantiza que cualquier código colocado dentro de él se ejecute una vez por periodo de escaneo, o en el intervalo especificado. Es importante minimizar las asignaciones y uso de memoria al usar Timed Loops para evitar variaciones en el sistema. Cuando se usan los bloques funcionales de NI SoftMotion en Windows con una simulación de SolidWorks, el tiempo del NI Scan Engine no está garantizado.

Para agregar la estructura de tiempo se comienza dando clic derecho sobre My computer en el proyecto antes mencionado, se selecciona New >> VI del menú para abrir un VI en blanco. Se da clic derecho en el área blanca del diagrama de bloques, para desplegar la paleta de funciones y se navega en Programming >> Structures >> Timed Structures >> Timed Loop y a continuación de coloca en el diagrama de bloques como lo muestra la Figura 3.24.



Fig. 3.24 Timed Loop.

Para la configuración del Timed Loop se da doble clic en el nodo de entrada del Timed Loop para abrir el cuadro de diálogo Configure Time Loop. Bajo la sección Loop Timing Source, para Source Type, se selecciona Synchronize to Scan Engine. El cuadro de dialogo Configure Timed Loop debe ser similar al que se muestra en la Figura. 3.25.

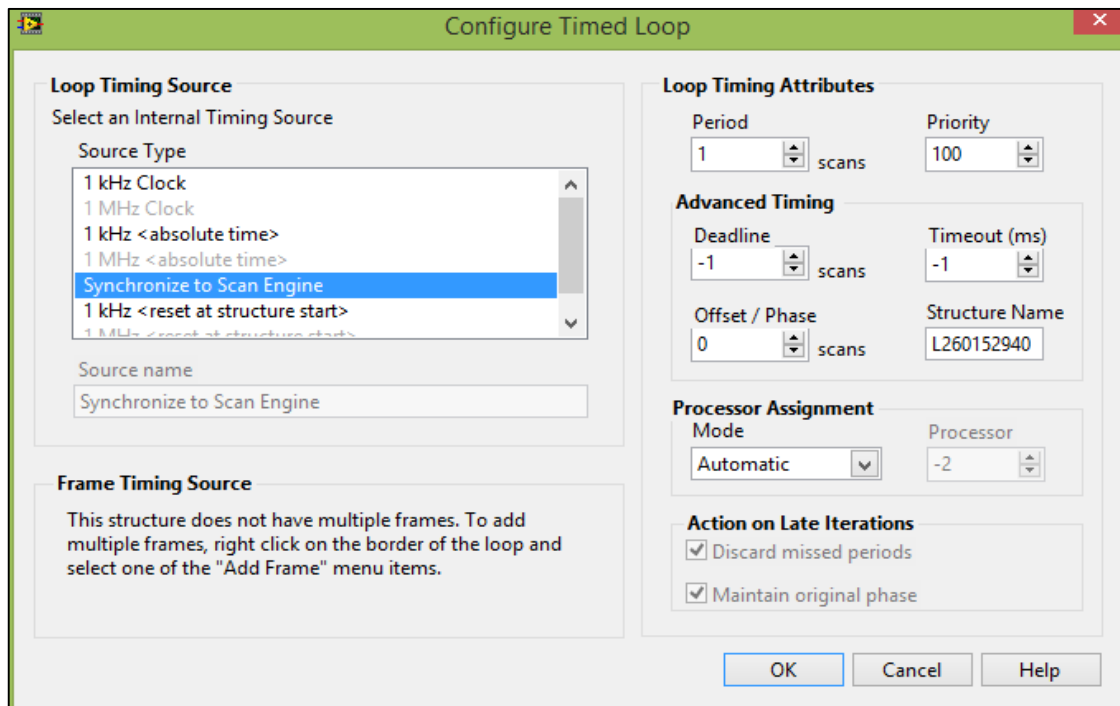


Fig. 3.25 Configuración del Time Loop.

Funciones de movimiento para el robot.

Las funciones de movimiento para la simulación con el ensamble de SolidWorks se crean usando los NI SoftMotion VIs de la paleta de funciones NI SoftMotion. El modulo NI SoftMotion cuenta con estos bloques funcionales capaces de construir perfiles de movimiento que contengan una serie de desplazamientos secuenciales o concurrentes, constituidos de movimientos multiaxiales en línea recta, movimientos en contorno, de arco, e incluso movimientos complejos usando engranajes y levas electrónicas.

Realizan una tarea en específico. Es decir, dependiendo del movimiento que se requiera para cada aplicación, existen distintas funciones de movimiento, por ejemplo en la figura 3.26 se muestra una función de Straight-Line Move.

Tienen entradas y salidas. Dependiendo de la función de movimiento a utilizar, en la parte izquierda se encuentran las funciones de entrada y a la izquierda las funciones de salida.

Pueden ser conectadas juntas para crear trayectorias complejas. Para agregar dichas funciones se navega en Programming >> Vision and Motion >> SoftMotion >> Advanced >> Function Blocks.

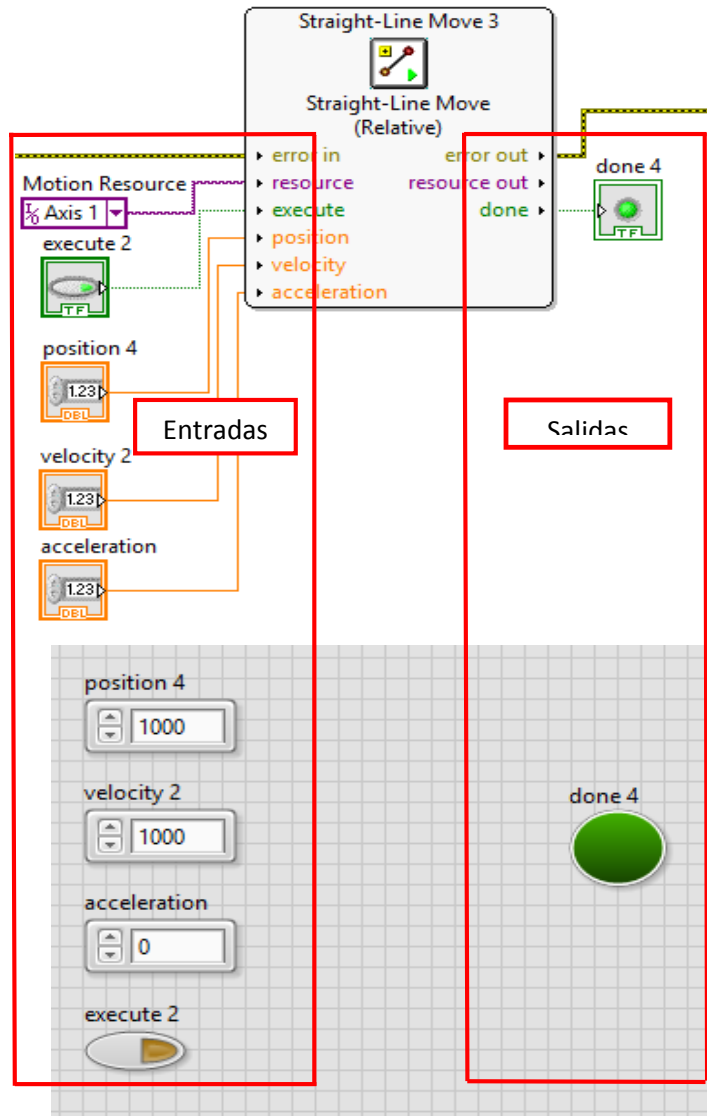



Fig. 3.26 Función de movimiento.

La programación de movimiento del robot se comienza agregando una función de movimiento Straight-Line Move. Esta función trabaja de la misma forma para motores lineales y rotatorios, la única diferencia son las unidades que se le colocarán, es decir, para motores rotatorios en la terminal de posición se introducirán números que representen grados, y en la terminal de velocidad tendrá unidades de grados/segundo. Para el caso de motores lineales la función de bloques es exactamente la misma pero la terminal de posición estará en términos de milímetros. Los motores agregados al proyecto para el robot son rotatorios.

Para comenzar con la programación de movimiento se agrega dentro de un Timed Loop una función de movimiento Straight-Line Move. Se da clic derecho en el área blanca del diagrama de bloques para desplegar la paleta de funciones. Después se da clic en la flecha  para expandir la vista, y se coloca el mouse sobre el menú Vision and Motion, se accede a la categoría NI SoftMotion >> Advanced >> Function Blocks y finalmente se da clic sobre el bloque Straight-Line Move.

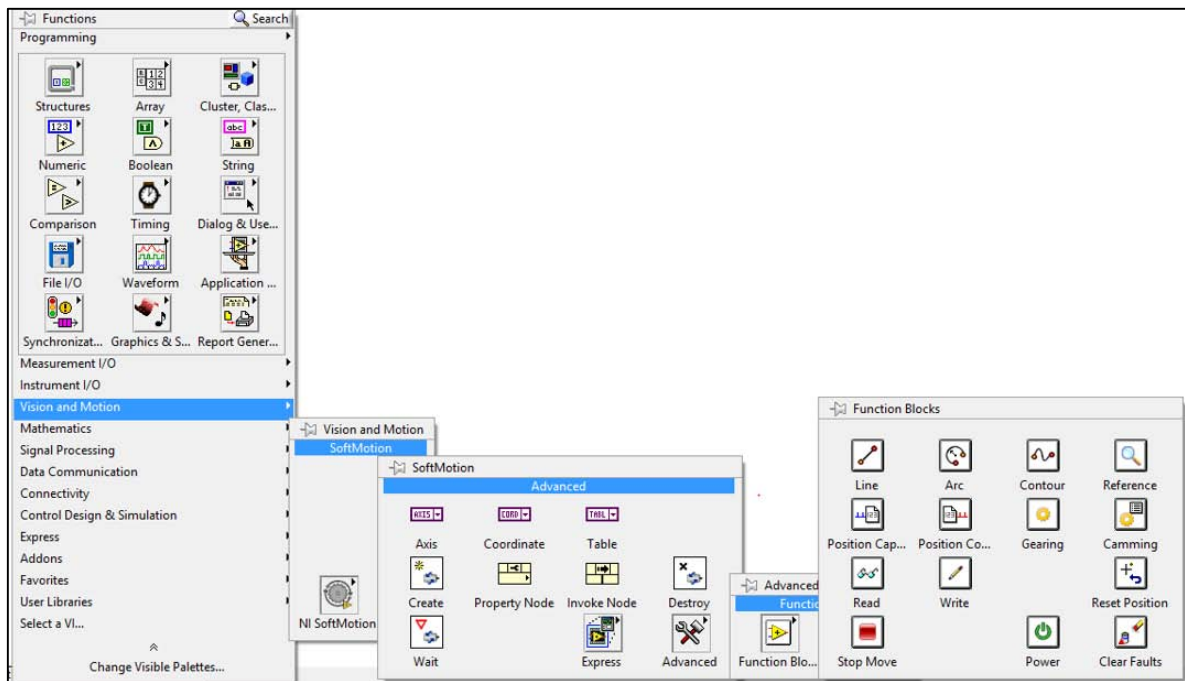


Fig. 3.27 Agregar funciones de movimiento al diagrama de bloques de LabVIEW.

Se coloca la función de movimiento en el área blanca del diagrama de bloques, después se da clic derecho en la entrada execute y seleccione Create >> Control del menú, para agregar a esta entrada un control en el panel frontal, la entrada executed define en qué momento se ejecutará el movimiento programado. Se repite este paso para las entradas position, velocity y acceleration, y seleccione

Create >> Control del menú para agregar controles en el panel frontal correspondiente a cada una de estas entradas. Pueden ser agregados otros parámetros adicionales como desaceleración dando clic derecho en el bloque de funciones. En el cuadro de dialogo Straight-Line Move Function Block Properties se selecciona “Visible?” y se ajusta Data Source a Terminal para cualquier parámetro adicional, después se da clic sobre OK para finalizar la configuración. De igual modo se da clic derecho sobre la salida “done” y se selecciona Create >> Indicator , para agregar su respectivo indicador en el panel frontal, la salida “done” será verdadera o se habilitara cuando la función de movimiento se termine de ejecutar. En la terminal resource tendrá que ir conectado el eje NI SoftMotion que pretendemos mover y que fue agregado en el proyecto, para ello se coloca el cursor sobre el eje y se arrastra hacia el diagrama de bloques dentro del Timmed Loop, como se muestra en la Figura 3.28.

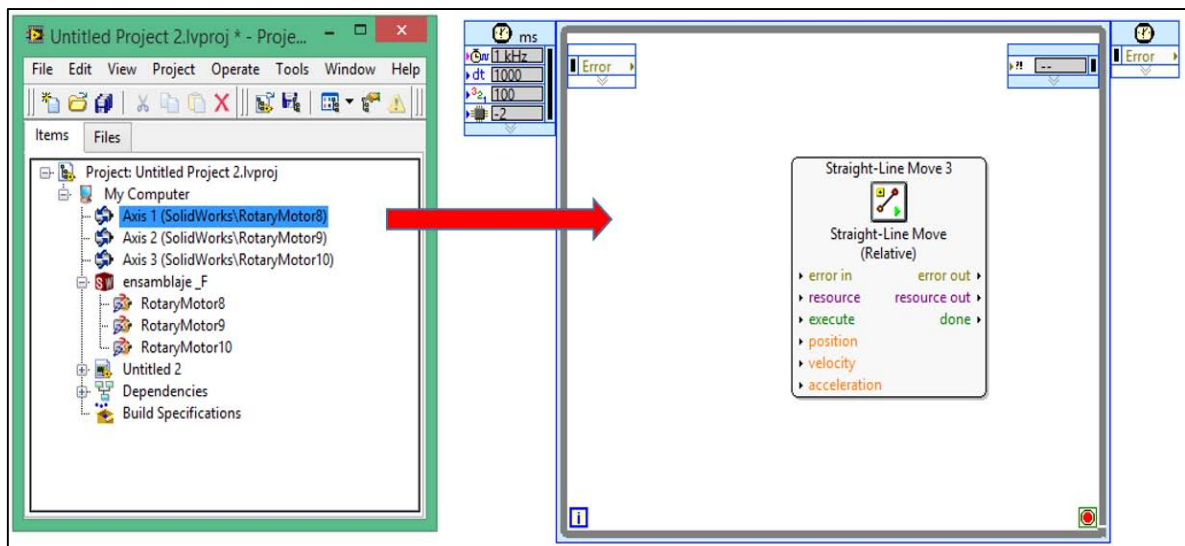


Fig. 3.28 Arrastrando un eje desde el proyecto hasta el diagrama de bloques.

La función Straight-Line Move cuenta con dos métodos de movimiento que podemos utilizar, el movimiento absoluto y relativo. A continuación se describe en que consiste cada uno de ellos.

Absoluto: el movimiento absoluto significa que el motor se mueve con respecto a la posición de inicio de la simulación.

Relativo: el movimiento relativo significa que el motor se mueve con respecto a la posición actual y no a la posición de inicio de la simulación.

Para elegir entre movimiento relativo o absoluto se da clic derecho sobre la función de movimiento, se navega sobre la ventana Select Method y a continuación se da clic sobre el método que se utilizara [Figura 3.29].

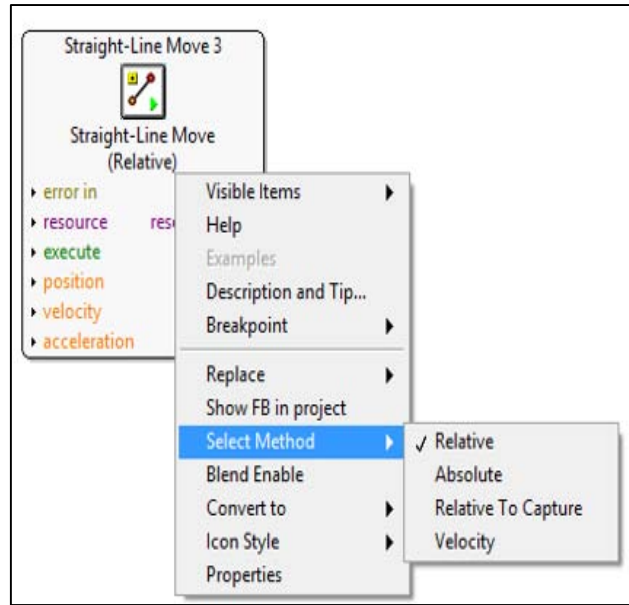


Fig. 3.29. Selección de Método de Movimiento.

Las funciones de movimiento pueden ser conectas en serie o en paralelo. Las funciones de movimiento conectadas en serie se ejecutan secuencialmente, es decir, hasta que se complete el movimiento de una función no puede comenzar la siguiente. En la Figura 3.30 podemos observar un ejemplo de funciones de movimiento conectadas en serie.

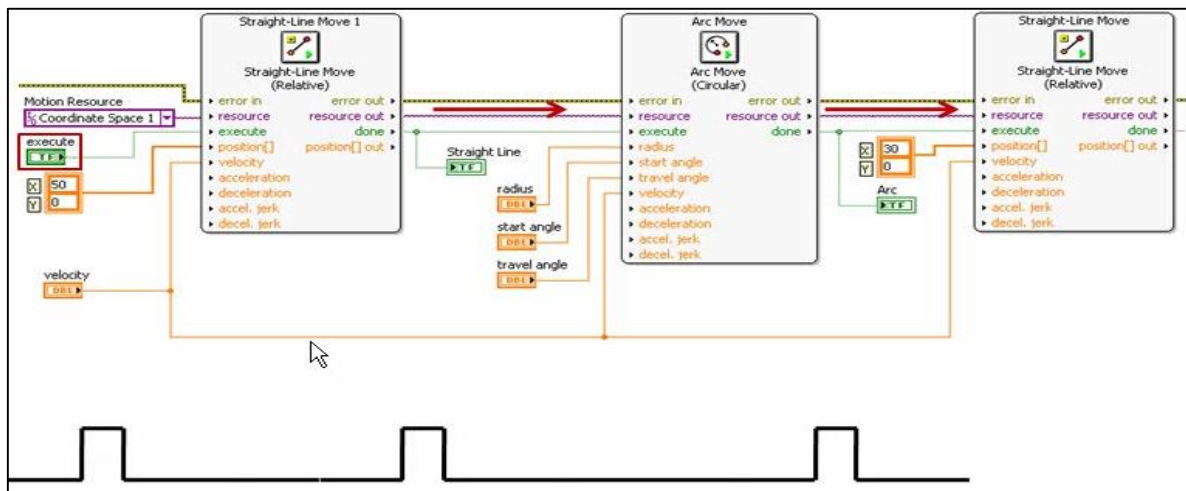


Fig.3.30 Funciones de movimiento conectado en serie.

Por otro lado, las funciones de movimiento conectadas en paralelo se ejecutan simultáneamente, es decir, al ejecutarse el programa las distintas funciones se ejecutan al mismo tiempo. Para la programación de movimiento del robot se conectaron las funciones de movimiento en paralelo ya que el movimiento de los tres motores del robot tiene que ser simultáneo. A continuación se muestra en la Figura 3.31 la programación de los tres motores del robot creados en el proyecto.

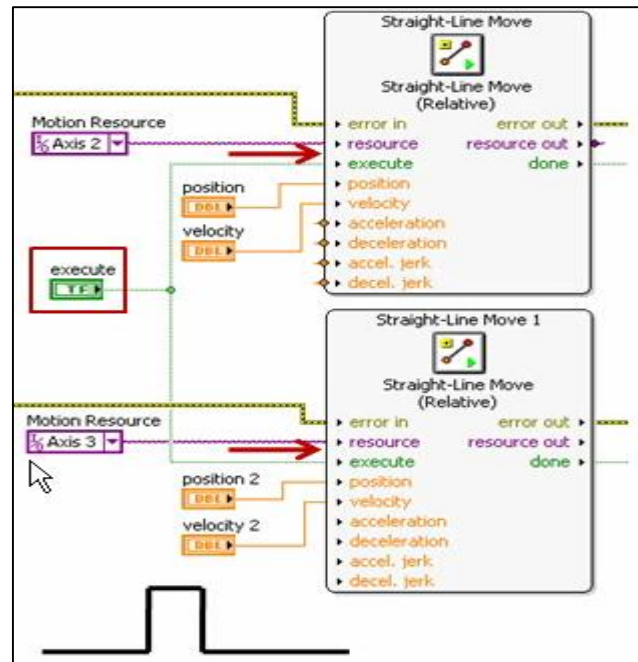


Fig. 3.31 Funciones de movimiento conectadas en paralelo

La figura 3.32 muestra el primer VI que fue utilizado para la visualización de movimientos del robot, se pueden observar tres funciones de movimiento Straight-Line Move, encargadas del movimiento de los tres motores rotatorios del robot, dichas funciones de movimiento están conectadas en paralelo y configuradas para tener un movimiento absoluto. Las entradas de las funciones de movimiento son posición, velocidad, aceleración, los tres ejes de NI SoftMotion agregados al proyecto asociados a los motores creados en el ensamble y el control execute. Por otro lado, las salidas son tres indicadores conectados a cada una de las tres terminales done de las funciones de movimiento. Toda esto se encuentra dentro de un Timed Loop configurado correctamente para un buen funcionamiento. De igual manera la figura 3.32 muestra la imagen de la simulación en proceso, se puede observar la interfaz de usuario, el proyecto de LabVIEW, y el ensamble de SolidWorks.

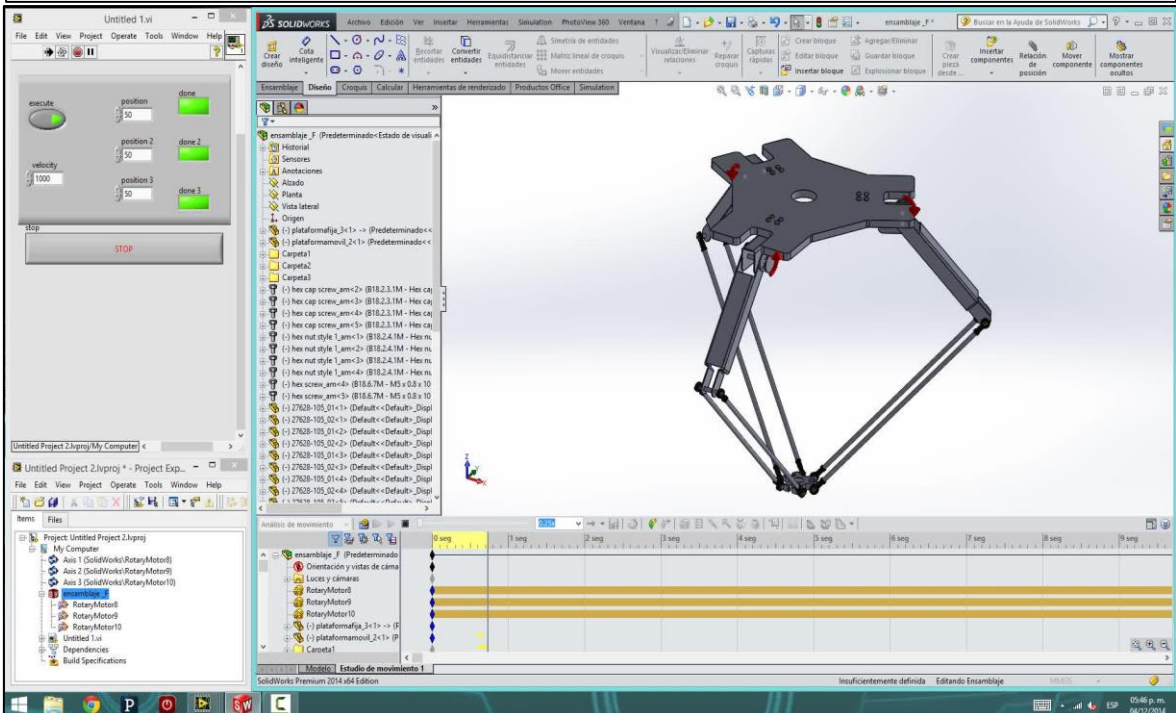
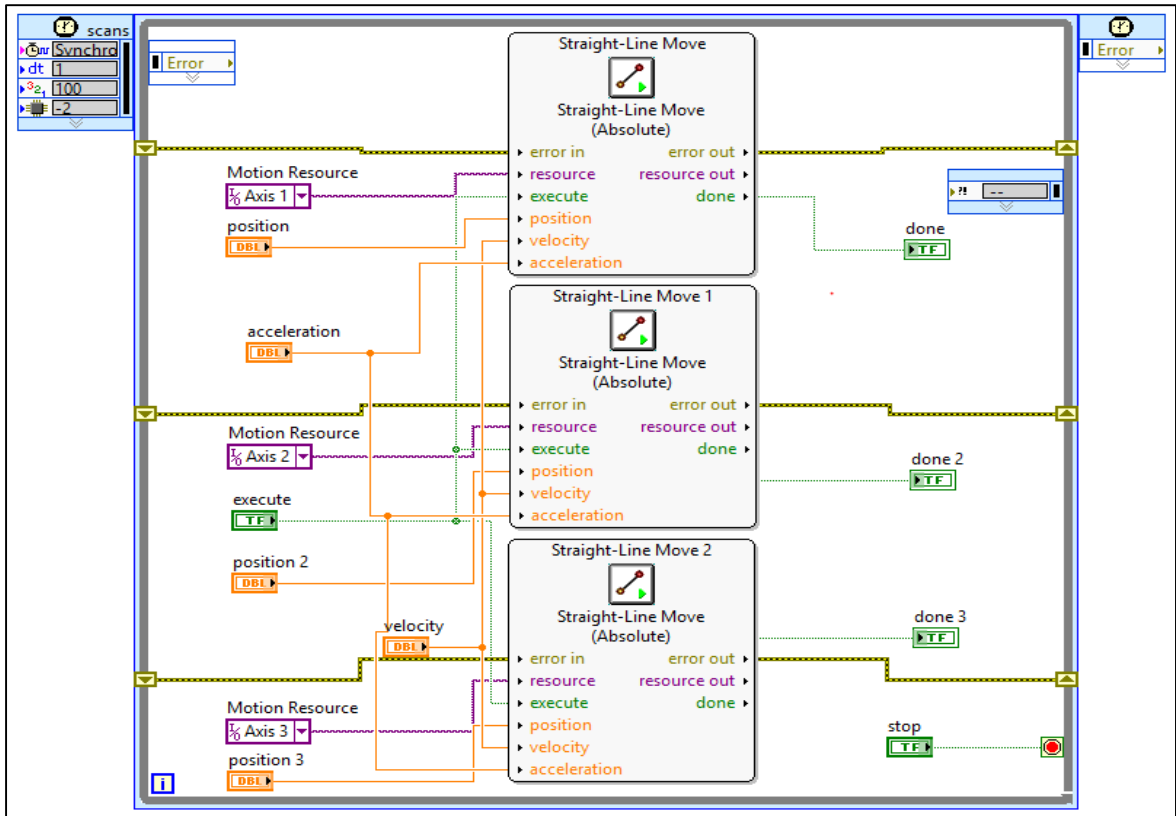


Fig.3.32 Primer VI para la simulación del robot.

En la figura 3.33 se muestra el segundo VI utilizado para la simulación del robot. A diferencia del primer VI utilizado solamente para la visualización de movimientos en el robot, este incorpora la programación de la cinemática inversa explicada anteriormente. A continuación se describen las partes mostradas en la figura 3.33.

1.- En esta parte se muestran las tres variables de salida que se obtuvieron de la solución de la cinemática inversa, es decir, los ángulos de las juntas θ_{11} , θ_{12} y θ_{13} correspondientes a los tres motores del robot y requeridas para llevar a la plataforma móvil al punto deseado.

2.- En esta parte del VI se muestran las entradas de las funciones de movimiento, las cuales son: posición (los ángulos de las juntas θ_{11} , θ_{12} y θ_{13}), velocidad, aceleración, los tres ejes de NI SoftMotion agregados al proyecto asociados a los motores creados en el ensamble, y el control execute.

3.- Aquí se muestran las tres funciones de movimiento Straight-Line Move, encargadas del movimiento de los tres motores rotatorios del robot. Dichas funciones de movimiento están conectadas en paralelo y configuradas para tener un movimiento absoluto.

4.- En esta parte se muestran las salidas de las funciones de movimiento, las cuales son dos indicadores booleanos. Uno nos indica que la simulación está en proceso y el otro cuando la simulación ha concluido.

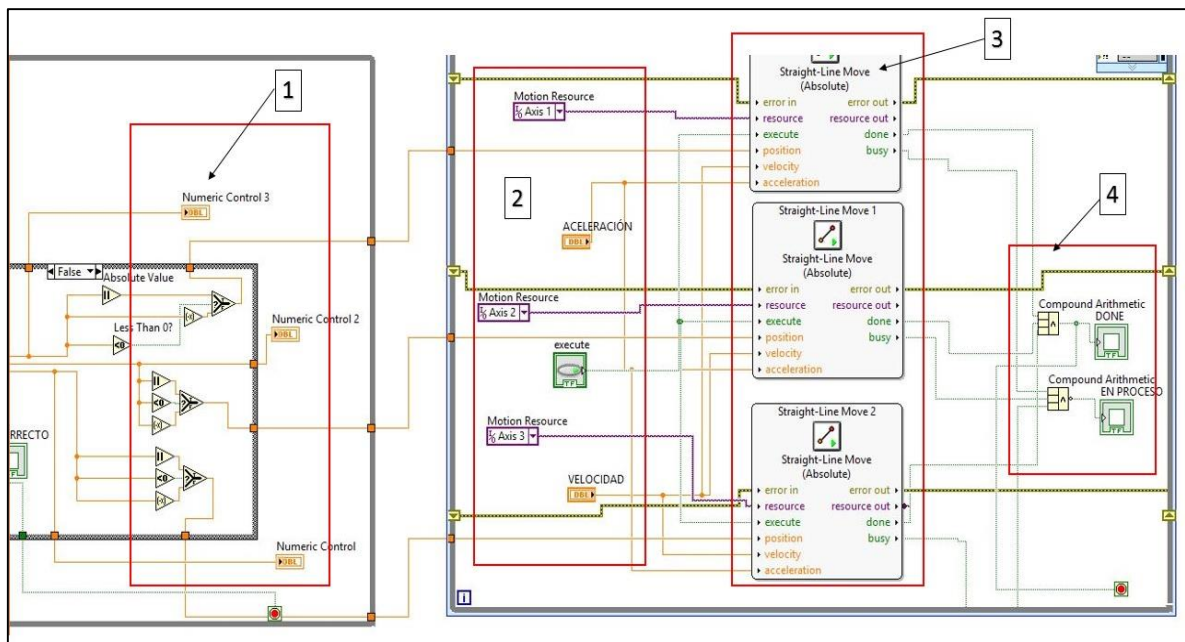


Fig.3.33 VI de funciones de movimiento.

Finalmente, la figura 3.34 muestra una imagen de la simulación en proceso. Se puede observar la interfaz de usuario, el proyecto de LabVIEW, y el ensamble de SolidWorks.

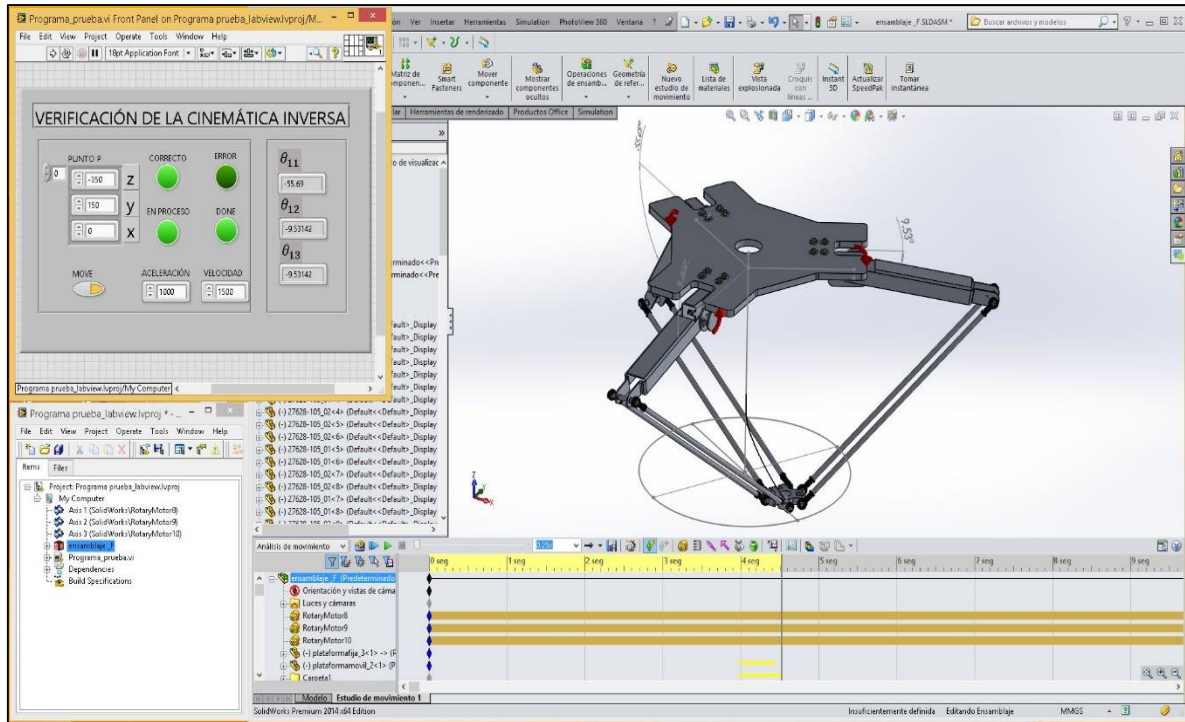


Fig.3.34 Simulación en proceso.

Hasta el momento se completó la preparación del ensamble del robot y la conexión virtual del mismo con la plataforma NI LabVIEW. Finalmente, el siguiente paso es establecer la comunicación entre SolidWorks y LabVIEW para tener una correcta simulación a la hora de correr el programa en LabVIEW [Figura 3.34]. A continuación se describe el proceso para establecer la comunicación y en el capítulo siguiente se detallarán los resultados obtenidos de la simulación.

Comunicación entre LabVIEW y SolidWorks.



Fig. 3.35 Comunicación entre LabVIEW y SolidWorks.

NI Scan Engine.

El NI Scan Engine habilita la comunicación entre LabVIEW y SolidWorks, durante la simulación el intercambio de datos es a la velocidad única del periodo de escaneo. Para habilitar el NI Scan Engine se da clic derecho sobre el ítem My Computer en la ventana del proyecto y se selecciona Properties para mostrar el cuadro de dialogo My Computer Properties, a continuación se oprime Scan Engine de la lista Category y se activa la opción Start Scan Engine on Deploy, como se muestra en la Figura 3.30.

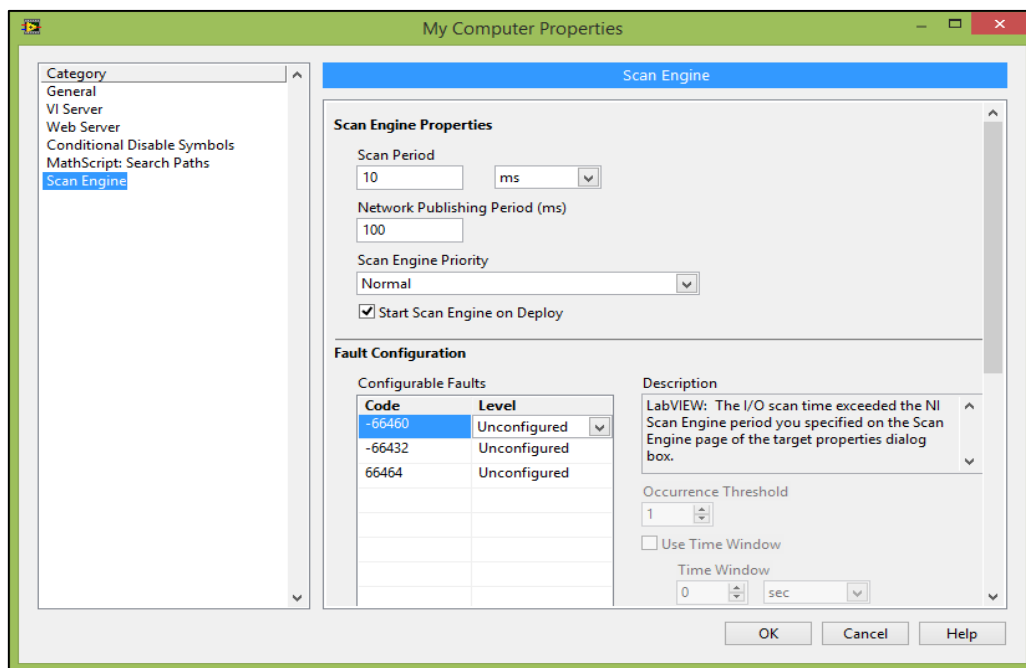


Fig. 3.36 Cuadro de Dialogo My Computer Properties.

Activación automática de los ejes.

Se asume que los ejes asociados a los motores de SolidWorks son servomotores. Debido a que los ejes no están asociados con el hardware real, es necesario realizar solo una configuración mínima. Para comenzar con la configuración de los ejes se da clic derecho sobre el eje en la ventana de Project Explorer y se selecciona Properties en el menú para abrir el cuadro de dialogo Axis Configuration. La siguiente figura muestra las partes del cuadro de dialogo Axis Configuration usadas en los ejes de SolidWorks [Figura 3.37].

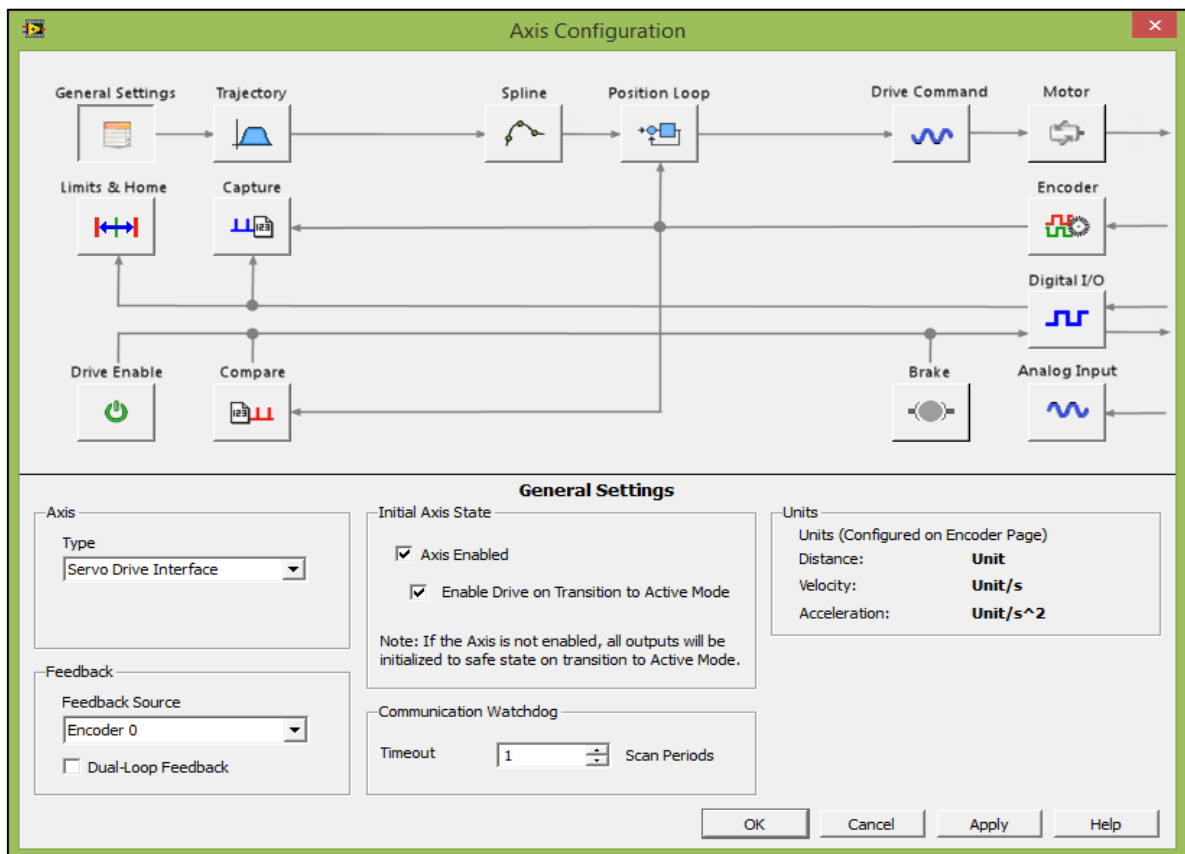


Fig. 3.37 Cuadro de dialogo Axis Configuration para ejes de NI SoftMotion para SolidWorks.

En el cuadro de dialogo se deben seleccionar las casillas de Axis Enabled y Enable Drive on Transition to Active Mode. Esto activa automáticamente todos los ejes cuando el NI Scan Engine cambie a modo activo. (También es posible usar el bloque funcional Power en el VI para activar y habilitar los ejes). Se da clic en OK para cerrar el cuadro de dialogo de Axis Configuration. El procedimiento anterior se debe realizar para los tres ejes agregados al proyecto.

Habilitar los componentes de NI SoftMotion.

Los componentes de NI SoftMotion deben ser deployed (implementados) la primera vez que vayan a ser usados o cuando se hayan realizado cambios en la configuración del proyecto. Para comenzar se seleccionan los ítems My Computer, los tres ejes NI SoftMotion, y el ensamble, en la ventana de Project Explorer, se da clic derecho y se seleccione Deploy del menú contextual como se muestra en la Figura 3.38. LabVIEW despliega todos recursos E/S y ajustes que el VI requiere, cambia el NI Scan Engine a modo Activo, y comienza la simulación en SolidWorks. Si se presenta alguna resolución de conflictos, seleccione Apply. Para asegurar que la simulación se ejecute correctamente, siempre se deben desplegar los ejes NI SoftMotion y no únicamente el ítem My Computer.

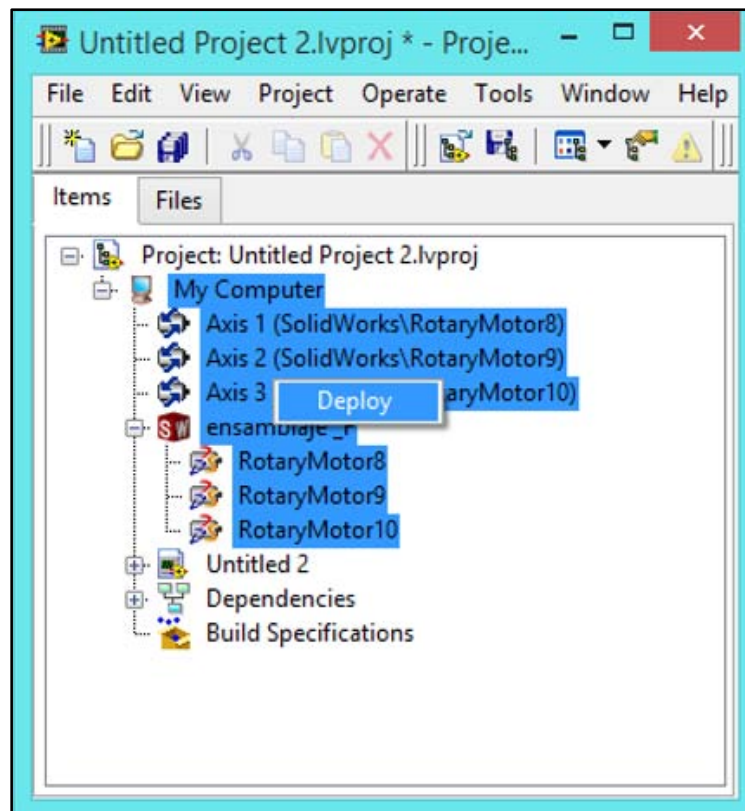


Fig. 3.38 Deploy de los elementos del proyecto de LabVIEW.

Ejecutar y detener la simulación.

Para comenzar con la simulación por primera vez se necesita haber implementado los componentes de NI SoftMotion, como se hizo en el paso anterior. Una vez hecho esto, se da clic derecho sobre el ensamble en la ventana del proyecto y se selecciona Start Simulation para comenzar la simulación de

movimiento en SolidWorks. Después se ejecuta el instrumento virtual, y al presionar el control execute, LabVIEW comenzará a realizar la función de movimiento programada. Para simulaciones subsiguientes a la primera se debe asegurar que el NI Scan Engine este en el modo Switch to active para comenzar la simulación, es decir, cuando el NI Scan Engine se encuentra en el modo Switch to Active la comunicación entre LabVIEW y SolidWorks se habilita. Para verificarlo se da clic derecho en el ítem My computer se selecciona Utilities >> Scan Engine Mode y finalmente Switch to Active, como se muestra en la Figura. 3.39 Para finalizar la simulación primero se detiene el instrumento virtual, después se da clic derecho sobre el ensamble de SolidWorks en la ventana del proyecto y se selecciona Stop Simulation.

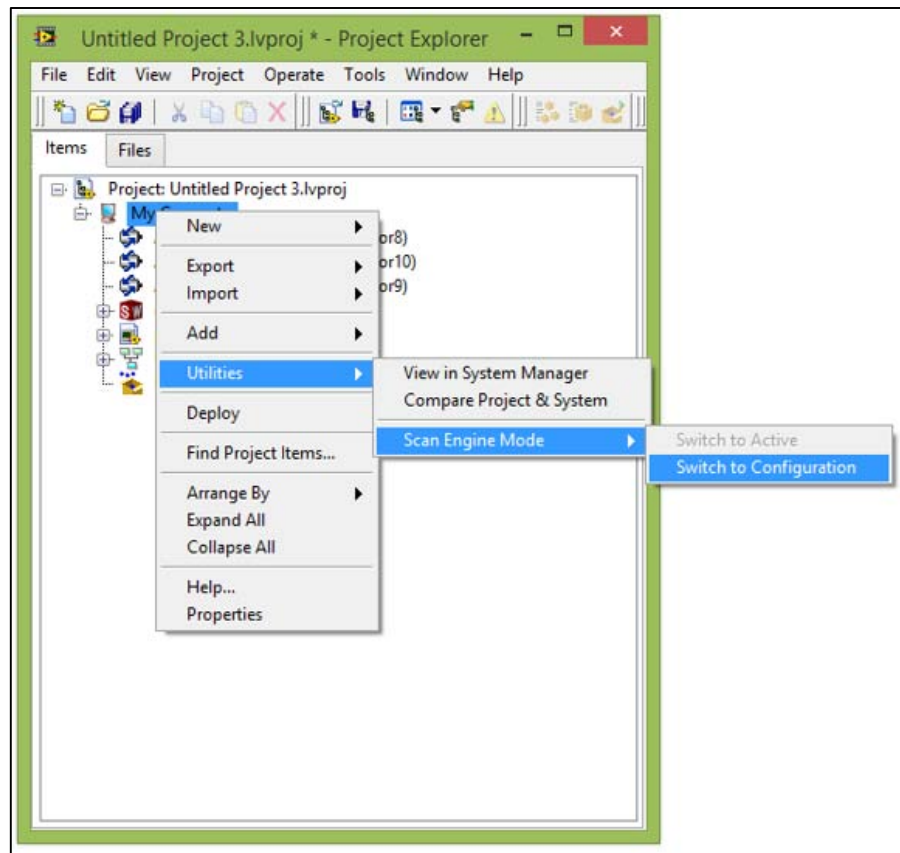


Fig. 3.39 Selección de Switch to Configuration ó Switch to Active.

CAPÍTULO 4. Pruebas y resultados.

Visualización de movimientos en el robot.

En cuanto a la visualización de movimientos los resultados fueron satisfactorios, el robot respondió correctamente cuando en primera instancia se colocaron valores arbitrarios a los ángulos correspondientes a los tres motores del robot, con el fin último de visualizar el correcto movimiento. Los valores que se teclearon en la interfaz para una de las pruebas fueron $(50^\circ, 50^\circ, 50^\circ)$, $(25^\circ, 60^\circ, 60^\circ)$, $(60^\circ, 60^\circ, 25^\circ)$, $(60^\circ, 25^\circ, 60^\circ)$ y $(0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$. Esta fue la primera prueba que permitió visualizar movimientos acordes con los proporcionados en la interfaz, además de que esta fue la primera vez después de varias iteraciones que el ensamble obedecía a movimientos enviados desde LabVIEW, es decir, se logró una comunicación exitosa entre LabVIEW y SolidWorks. Los tres motores agregados al ensamble del robot son rotatorios, entonces el valor numérico que se colocó en la interfaz para el desplazamiento angular de los mismos están en grados. La posición inicial del robot es la que se muestra en la figura 4.1. Dicha posición corresponde a un desplazamiento de 0° en los tres motores.

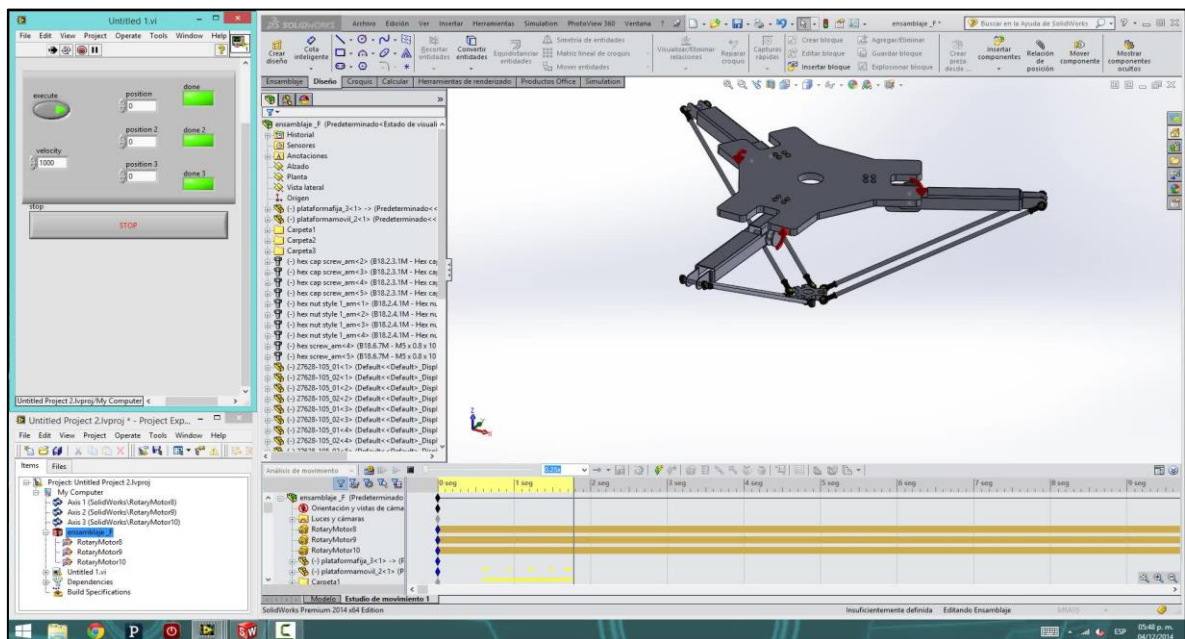


Fig. 4.1 Primera imagen de la simulación del robot.

A continuación se muestran tres imágenes de la simulación del robot. En la imagen a) se colocó un valor de 50° en cada uno de los motores, en la imagen b) $60^\circ, 60^\circ, 25^\circ$, y en la imagen c) $60^\circ, 25^\circ, 60^\circ$, en las tres imágenes se puede observar que el desplazamiento de cada uno de los brazos del robot corresponde a los valores proporcionados en la interfaz.

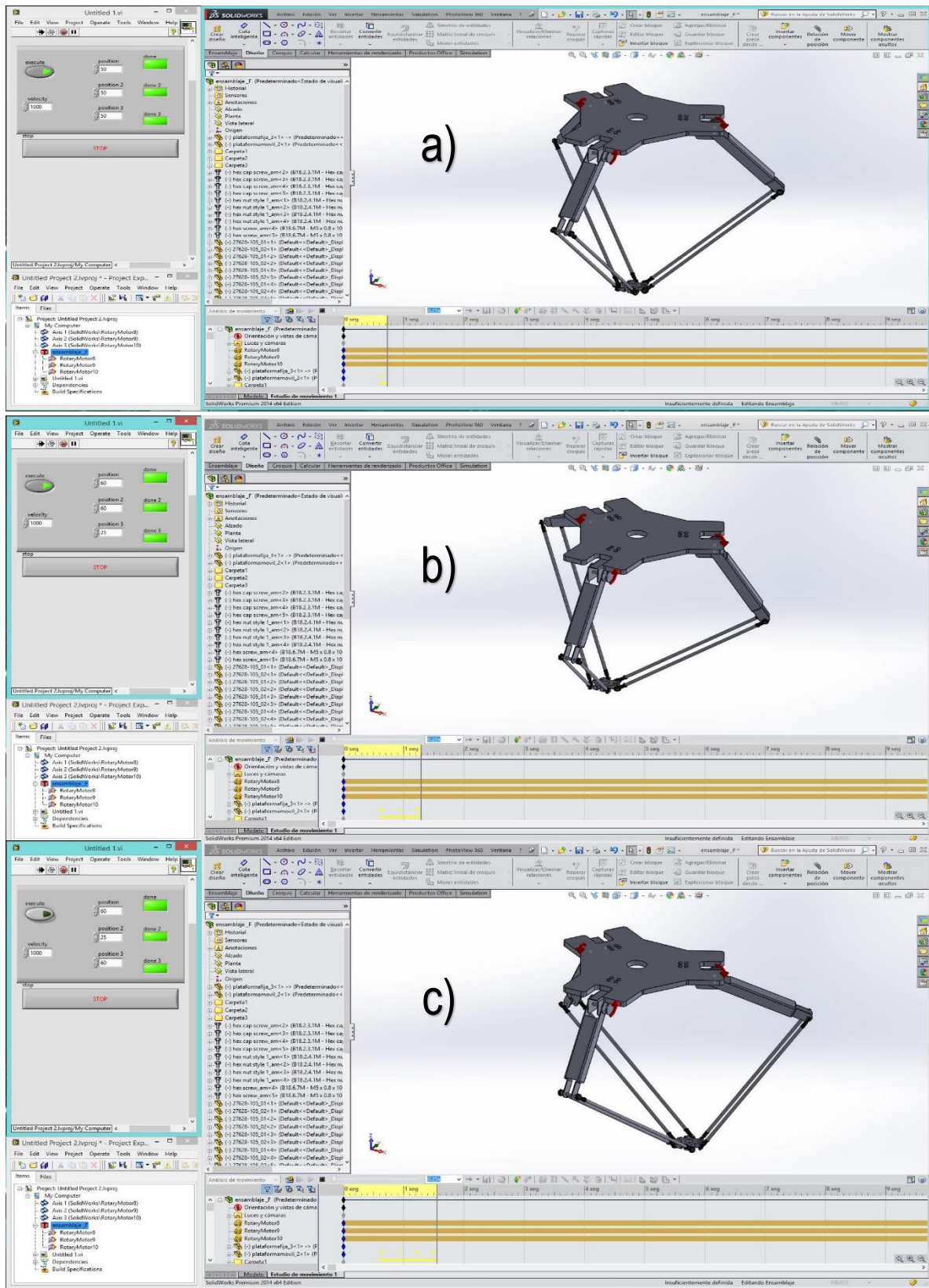


Fig. 4.2 Visualización de movimientos en el robot.

Verificación de la cinemática inversa del robot.

En cuanto a la verificación de la cinemática inversa los resultados fueron satisfactorios. Primeramente se tomó la decisión de elegir distintos valores para el vector de posición “p” que nos permitieran visualizar distintos movimientos en el robot. Cabe mencionar que los alcances del presente proyecto no contemplan un estudio del espacio de trabajo. La elección de los vectores de posición se hizo basándonos en las dimensiones del robot y evitando salirnos del espacio de trabajo. En la figura 4.3 se muestra la simulación de movimiento para el vector de posición (0, 150,-350). El vector de posición se tecleó en la interfaz de usuario arrojando como solución los ángulos -55.69° para θ_{11} , -9.5314° para θ_{12} , y -9.5314° para θ_{13} . Al concluir la simulación se pudo verificar que efectivamente el robot se movió los ángulos arrojados por el cálculo de la cinemática inversa. De igual manera se pudo verificar que el órgano terminal se posicionó correctamente, como se puede observar en la parte inferior de la figura 4.3. El mismo ejercicio

se realizó con distintos vectores de posición mostrando un resultado satisfactorio. A manera de ejemplo, a continuación se muestra la simulación de los vectores de posición (0, 0,-400), (0, 0,-200), y (0, -150,-350).

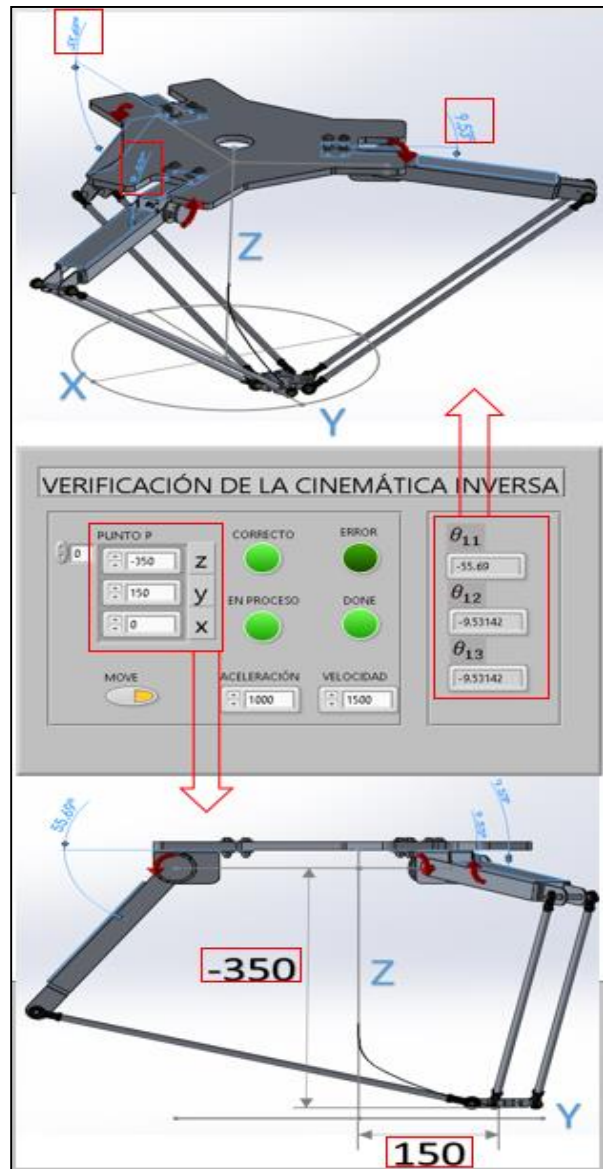


Fig. 4.3 Simulación de Movimiento.

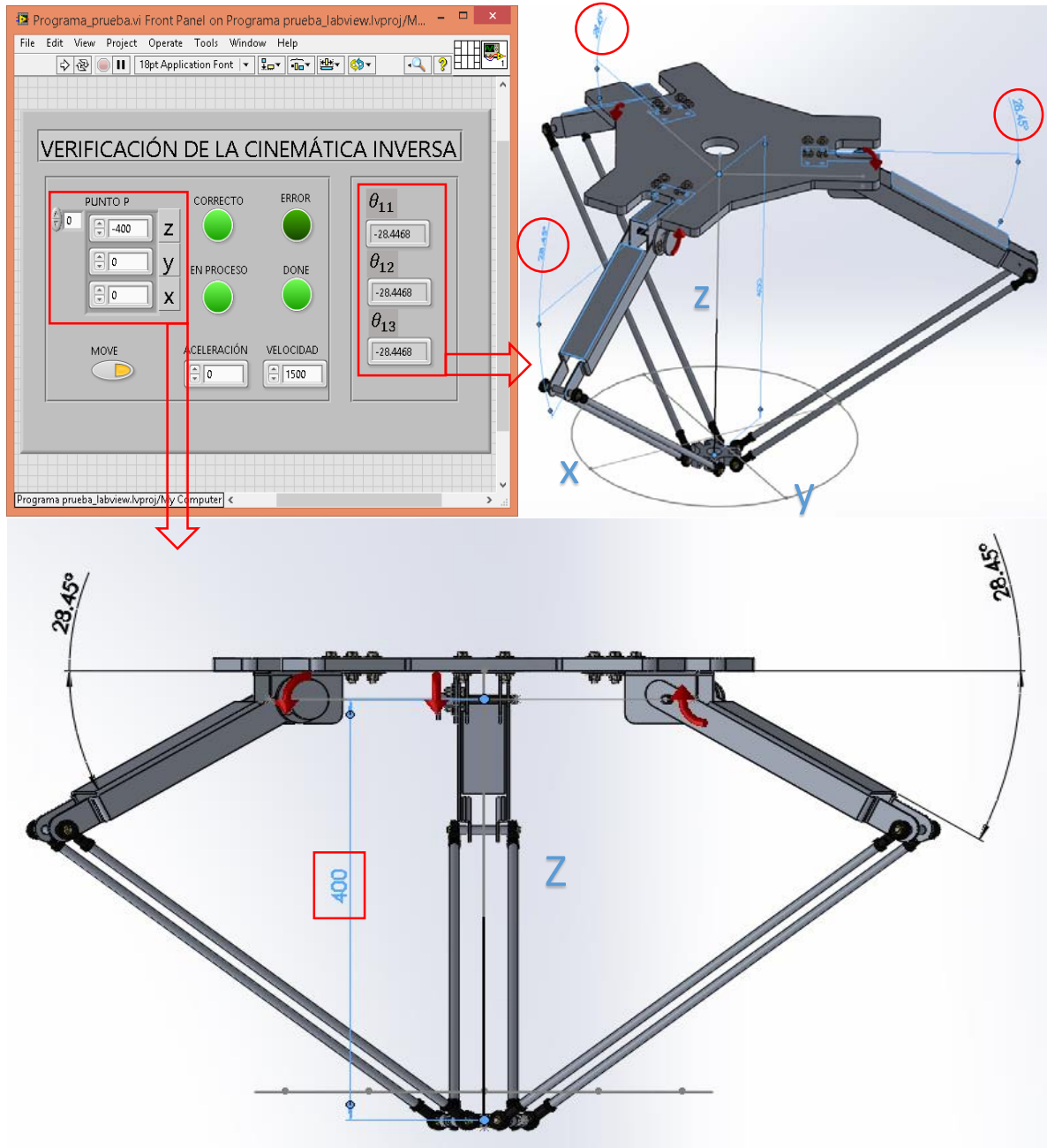


Fig. 4.4 Simulación de movimiento.

En la figura 4.4 se muestra la simulación de movimiento para el vector de posición $(0, 0, -400)$. El vector de posición se tecleó en la interfaz de usuario arrojando como solución los ángulos -28.4468° para θ_{11} , -28.4468° para θ_{12} , y -28.4468° para θ_{13} . Al concluir la simulación se pudo verificar que efectivamente el robot se movió los ángulos arrojados por el cálculo de la cinemática inversa. De igual manera se pudo verificar que el órgano terminal se posicionó correctamente, como se puede observar en la parte inferior de la figura 4.4.

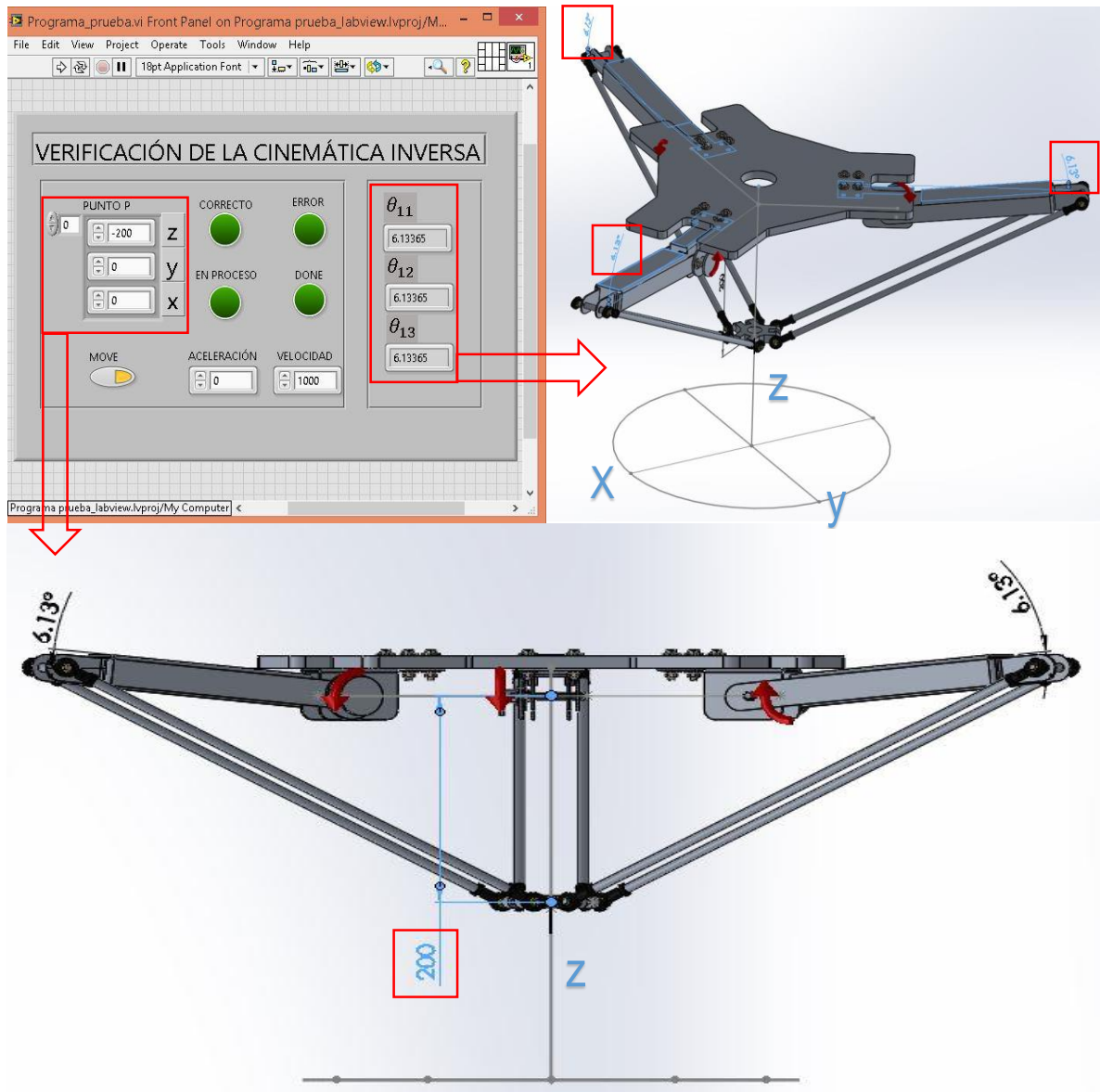


Fig. 4.5 Simulación de movimiento.

En la figura 4.5 se muestra la simulación de movimiento para el vector de posición $(0, 0, -200)$. El vector de posición se tecleó en la interfaz de usuario arrojando como solución los ángulos 6.13365° para θ_{11} , 6.13365° para θ_{12} , y 6.13365° para θ_{13} . Al concluir la simulación se pudo verificar que efectivamente el robot se movió los ángulos arrojados por el cálculo de la cinemática inversa. De igual manera se pudo verificar que el órgano terminal se posicionó correctamente, como se puede observar en la parte inferior de la figura 4.5.

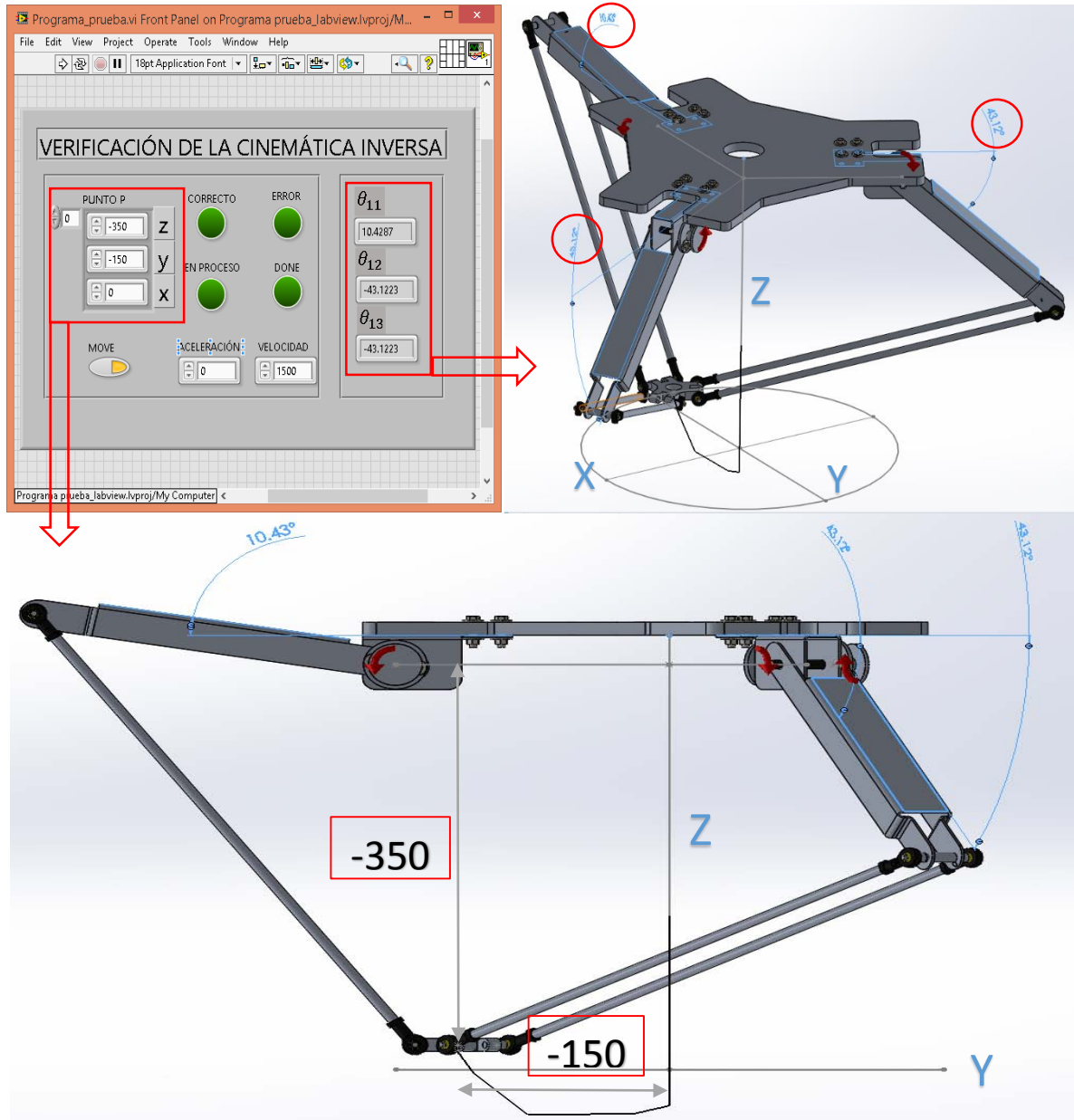


Fig. 4.6 Simulación de movimiento.

Como último ejemplo, en la figura 4.6 se muestra la simulación de movimiento para el vector de posición (0,-150,-350). El vector de posición se tecleó en la interfaz de usuario arrojando como solución los ángulos 10.4287° para θ_{11} , -43.1223° para θ_{12} , y -43.1223° para θ_{13} . Al concluir la simulación se pudo verificar que efectivamente el robot se movió los ángulos arrojados por el cálculo de la cinemática inversa. De igual manera se pudo verificar que el órgano terminal se posicionó correctamente, como se puede observar en la parte inferior de la figura 4.6.

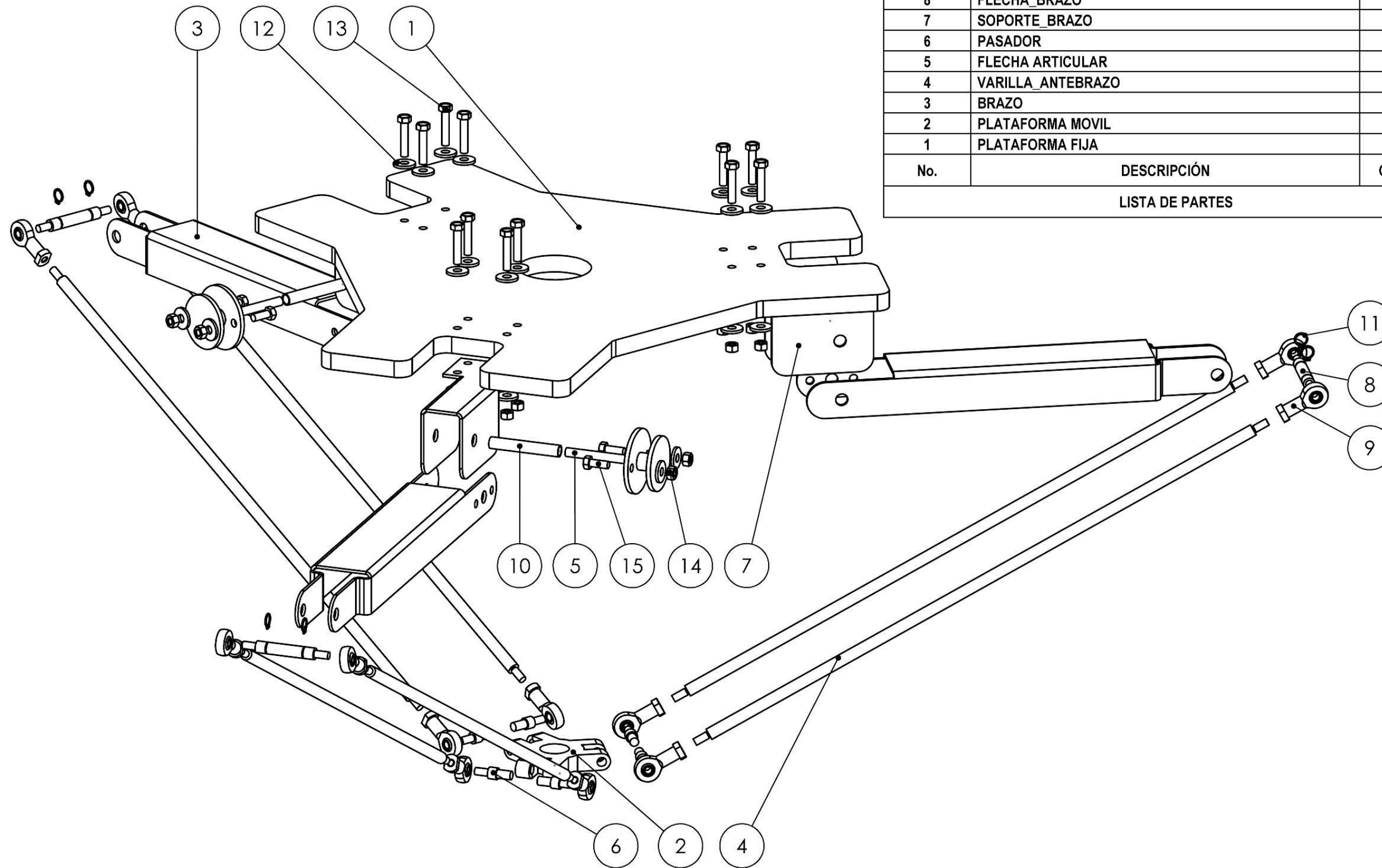
CONCLUSIONES.

- La integración de dos plataformas de diseño; NI LabVIEW® de National Instruments y el software DS SolidWorks® Corp, para la generación de prototipos virtuales demostró ser útil para la visualización de movimientos en el robot y la verificación de la cinemática inversa, como se mostró en los resultados.
- La integración de dichas plataformas mostró ser una herramienta de apoyo así como una posible opción en las metodologías de diseño impartidas en las instituciones de educación superior, ya que permitiría trasladar diseños en CAD realizados en el aula a una plataforma visual sin la necesidad de incurrir en prototipos físicos.
- Existiría un impacto favorable en la enseñanza de la Ingeniería Mecánica, ya que tópicos como Dibujo Asistido por Computadora, Cinemática, Dibujo y diseño en ingeniería y robótica pueden ser vinculados gracias a la herramienta de integración virtual. En este proyecto se utilizó como caso de estudio la configuración de un robot paralelo tipo delta, pero igualmente se puede aplicar a otro tipo de robots y mecanismos dependiendo del caso de estudio analizado en el aula.
- Un posible inconveniente es la necesidad de contar con un equipo de cómputo adecuado ya que el proceso de simulación demanda muchos recursos de la computadora. National Instruments recomienda un sistema con al menos un procesador Intel Pentium 4 de 3GHz o equivalente y 2 GB de RAM para un óptimo rendimiento, sin embargo, en primera instancia se probó la simulación en una computadora con 2GB de memoria RAM y el desempeño fue ineficiente dado que no se visualizó ningún movimiento en el robot. En un segundo intento se probó la misma simulación en una computadora con memoria RAM de 5GB y un procesador Intel Core i5 logrando un mejor desempeño.
- Como una segunda etapa en el proyecto se podría retomar más a detalle las distintas herramientas que proporciona la integración de estas dos plataformas. De igual manera se podría trabajar en la elaboración de un manual que permita a los alumnos acceder y facilitar el aprendizaje e integración de dichas plataformas en el aula.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.

1. Carro J., Flores I., Flores F., *Simulación y Control de un Sistema Mecatrónico Aplicando Diseño Asistido por Computadora*. La Mecatrónica en Mexico, Vol. 2, No 3, paginas 90-98, Septiembre 2013.
2. Castillo, C.E, Vazquez, R.A.O, Gonzalez, H. A (2012) *Desarrollo del robot paralelo Parallax LKF-2040*. Ingenio Magno. Vol. 3, pp. 48-47. Universidad Santo Tomas – CIAM.
3. Clavel, R. (1991). *Conception d' un robot parallélerapide á 4 degrés de liberté*, Tesis doctoral, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suiza, 1991.
4. Jablonski, J., Tomas, B. (2011). *Mechatronics Recent Technological and Scientific Advances* Warsaw University of Technology, Springer.
5. Jiménez Luna, C. V. (2010). *Diseño e implementación de un prototipo virtual de una mesa de coordenadas*. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
6. Mancilla, H. (2010) *Máquina rotatoria llenadora y selladora de ampollitas plásticas*. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.
7. Merlet. J.P. (2006). *Parallel Robots* INRIA, Sophia-Antipolis, France, Springer.
8. National Instruments, *Getting Started with NI SoftMotion for SolidWorks*, National Instruments Corporation, U.S.A. 2010.
9. Tsai, Lung - Wen. (1999). *Robot Analysis: The mechanic of Serial and Parallel Manipulators*, John Wiley & Sons, Inc.

ANEXO 1. PLANOS



15	TORNILLO HEXAGONAL M5 x 13 mm	6
14	B18.2.4.1M - Hex nut, Style 1, M5 x 0.8 --D-N	18
13	TORNILLO HEXAGONAL M5 x 25mm	12
12	ROLDANA PLANA 5mm	30
11	ANILLO DE RETENCIÓN EXTERNO 8mm	6
10	BUJE	3
9	CABEZA ARTICULADA CON ROSCA INTERIOR	12
8	FLECHA_BRAZO	3
7	SOPORTE_BRAZO	3
6	PASADOR	6
5	FLECHA ARTICULAR	3
4	VARILLA_ANTEBRAZO	6
3	BRAZO	3
2	PLATAFORMA MOVIL	1
1	PLATAFORMA FIJA	1
No.	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD.
LISTA DE PARTES		



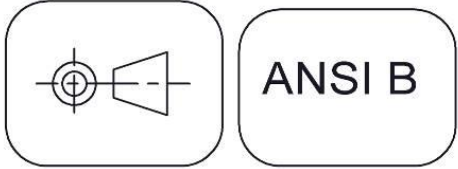
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Estudios Superiores Aragón

Proyecto: DISEÑO VIRTUAL DE UN ROBOT PARALELO TIPO DELTA

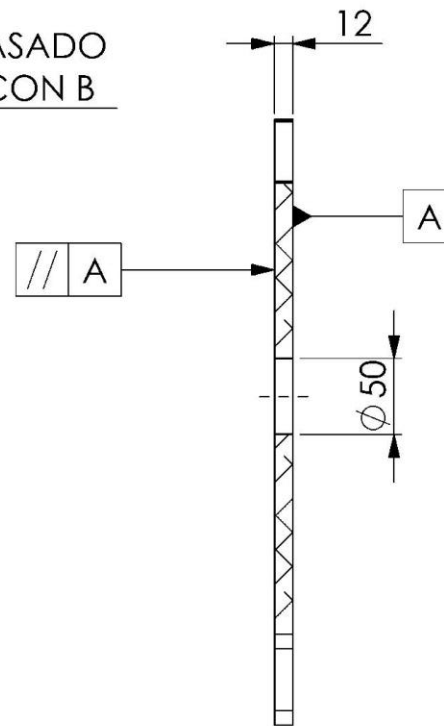
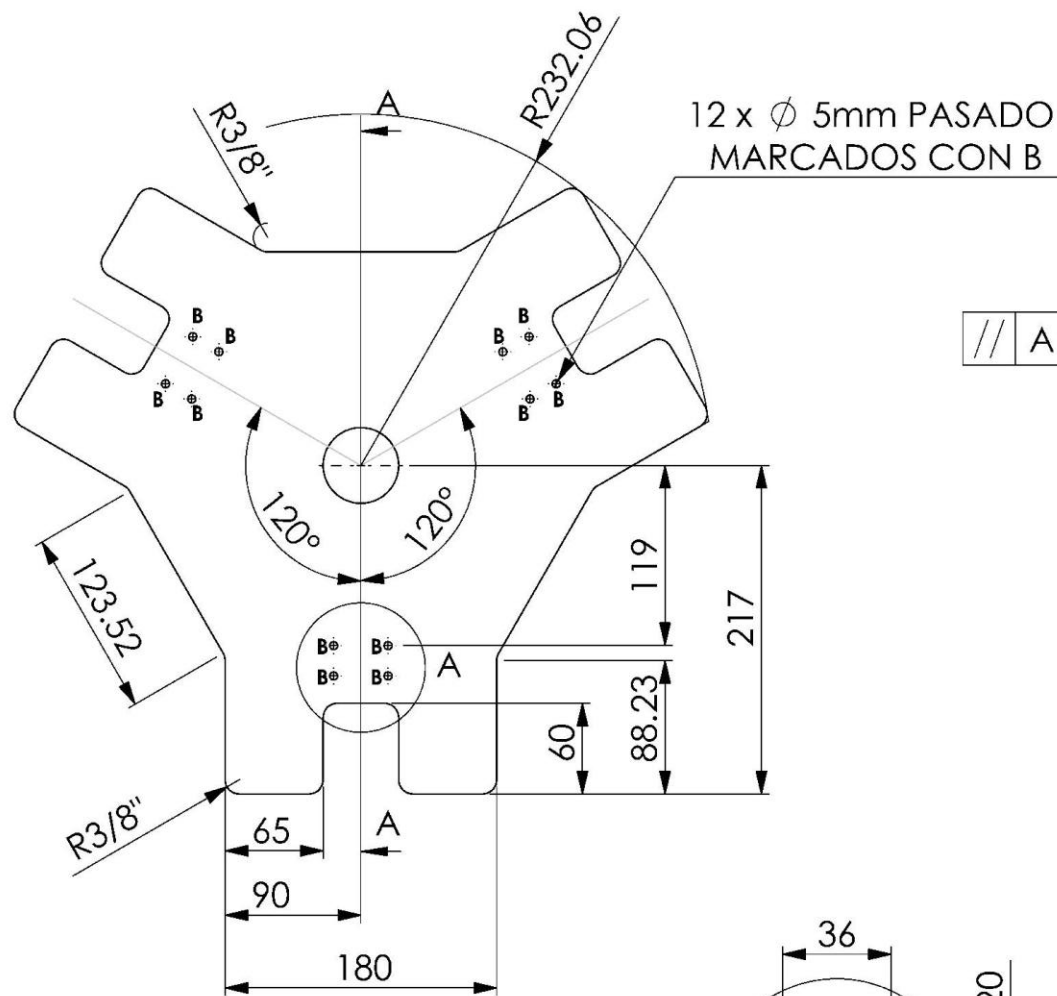
Pieza: ENSAMBLE GENERAL

Plano No. : RPD-BOM-500-0

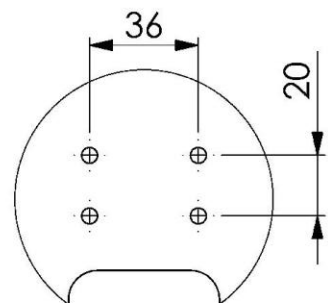
Dibujó: LAM	Cotas: IN/MM
Revisó: HMA	Escala: 1:3
Aprobó: HMA	Fecha Rev: 05/06/2015



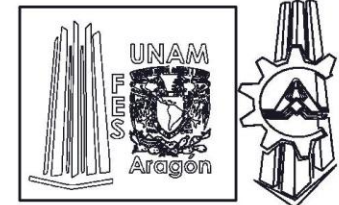
La información contenida en este documento forma parte del acervo patrimonial del Club de Mecatrónica. Queda prohibido el uso indebido como la distribución con fines de lucro y la divulgación del contenido de este documento, así como también cualquier modificación a la información contenida en este, el préstamo plagio de los mismos. Para hacer uso del presente se requerirá la autorización previa del M. en I. Humberto Mancilla Alonso.



SECCIÓN A-A



DETALLE A
ESCALA 2 : 5



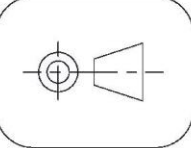
Universidad Nacional
Autónoma de México
Facultad de Estudios Superiores
Aragón

Proyecto: DISEÑO VIRTUAL DE UN
ROBOT PARALELO TIPO DELTA

Pieza: PLATAFORMA FIJA

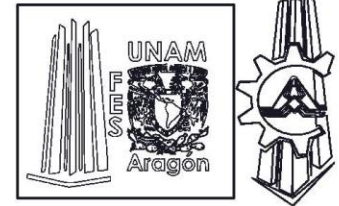
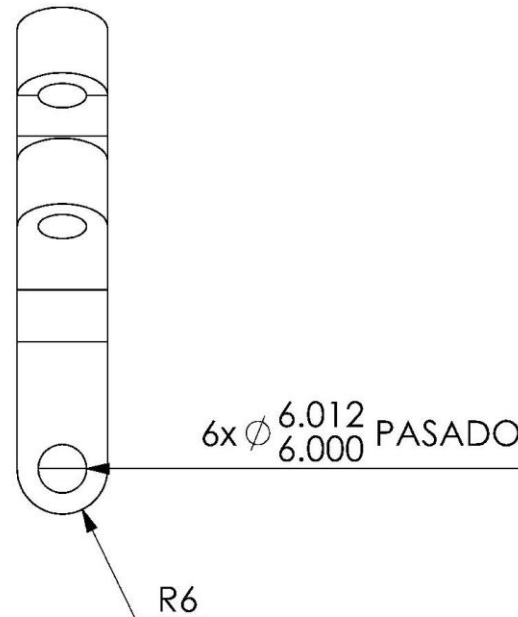
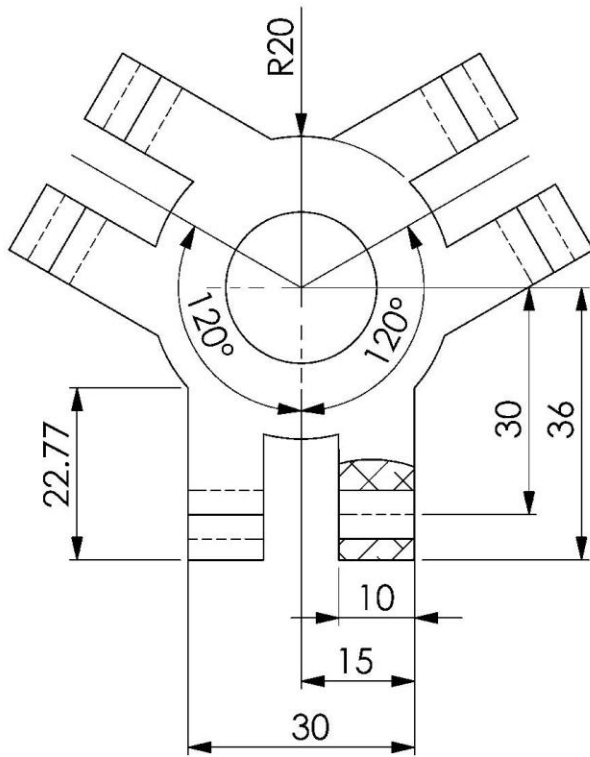
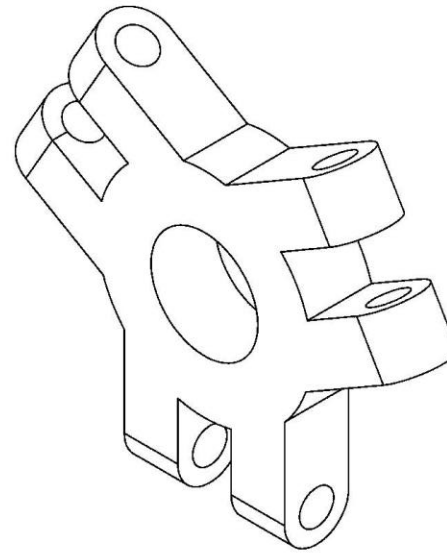
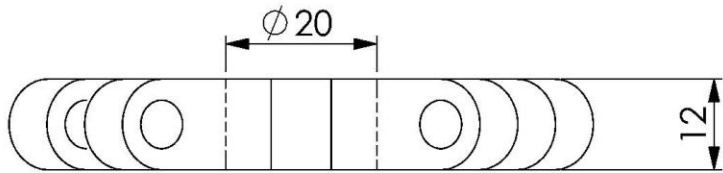
Plano No. : RPD-MEC-500-0

Dibujó: LAM	Cotas: IN/MM
Revisó: HMA	Escala: 1:5
Aprobó: HMA	Fecha Rev: 05/06/2015



ANSI A

La información contenida en este documento forma parte del acervo patrimonial del Club de Mecatrónica. Queda prohibido el uso indebido como la distribución con fines de lucro y la divulgación del contenido de este documento, así como también cualquier modificación a la información contenida en este, el préstamo plagio de los mismos. Para hacer uso del presente se requerirá la autorización previa del M. en I. Humberto Mancilla Alonso.



Universidad Nacional
Autónoma de México
Facultad de Estudios Superiores
Aragón

Proyecto: DISEÑO VIRTUAL DE UN
ROBOT PARALELO TIPO DELTA

Pieza: PLATAFORMA MOVIL

Plano No. : RPD-MEC-501-0

Dibujó: LAM

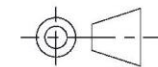
Cotas:MM

Revisó: HMA

Escala: 1:1

Aprobó: HMA

Fecha Rev:
05/06/2015



ANSI A

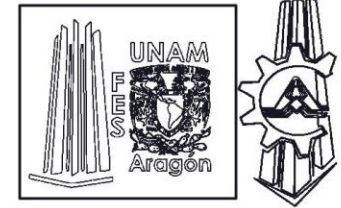
La información contenida en este documento forma parte del acervo patrimonial del Club de Mecatrónica. Queda prohibido el uso indebido como la distribución con fines de lucro y la divulgación del contenido de este documento, así como también cualquier modificación a la información contenida en este, el préstamo plagio de los mismos. Para hacer uso del presente se requerirá la autorización previa del M. en I. Humberto Mancilla Alonso.

LISTA DE BARRENOS.

SIMBOLO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
G	Ø 8mm	4
H	Ø 5mm	2

TABLA DE PLIEGUES

Etiqueta	Dirección	Ángulo	Radio interior
A	HACIA ABAJO	90°	2
B	HACIA ARRIBA	90°	2
C	HACIA ARRIBA	90°	2
D	HACIA ABAJO	90°	2
E	HACIA ABAJO	90°	2
F	HACIA ABAJO	90°	2



Universidad Nacional
Autónoma de México

Facultad de Estudios Superiores
Aragón

Proyecto: DISEÑO VIRTUAL DE UN
ROBOT PARALELO TIPO DELTA

Pieza: BRAZO

Plano No. : RPD-MEC-502-0

Dibujó : LAM

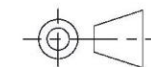
Cotas : MM

Revisó : HMA

Escala : 1:2

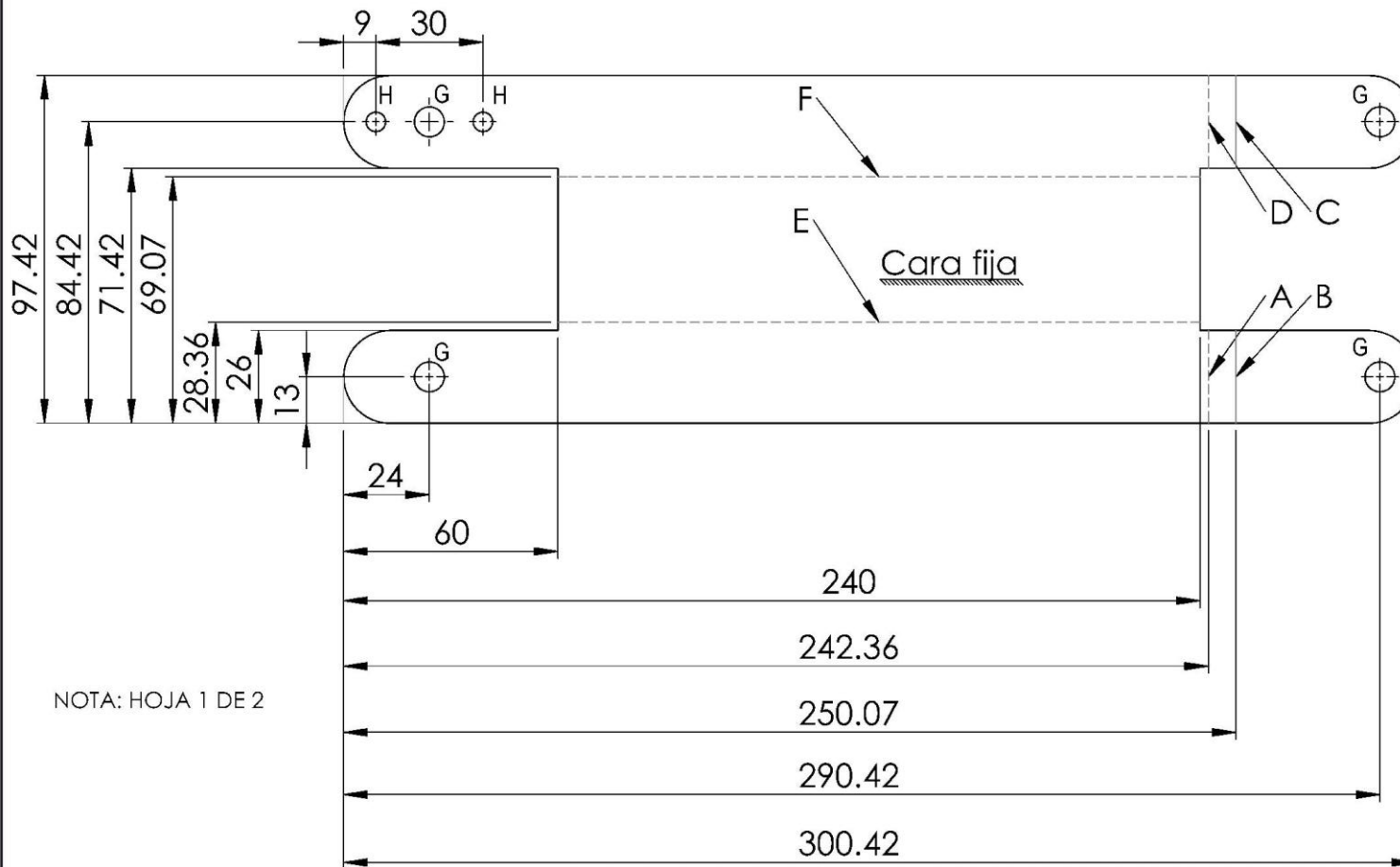
Aprobó : HMA

Fecha Rev:
09/06/2015



ANSI A

La información contenida en este documento forma parte del acervo patrimonial del Club de Mecatrónica. Queda prohibido el uso indebido como la distribución con fines de lucro y la divulgación del contenido de este documento, así como también cualquier modificación a la información contenida en este, el préstamo plagio de los mismos. Para hacer uso del presente se requerirá la autorización previa del M. en I. Humberto Mancilla Alonso.



NOTA: HOJA 1 DE 2



Universidad Nacional
Autónoma de México
Facultad de Estudios Superiores
Aragón

Proyecto: DISEÑO VIRTUAL DE UN
ROBOT PARALELO TIPO DELTA

Pieza: BRAZO

Plano No. : RPD-MEC-502-0

Dibujó: LAM

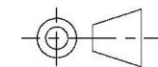
Cotas: MM

Revisó: HMA

Escala: S/N

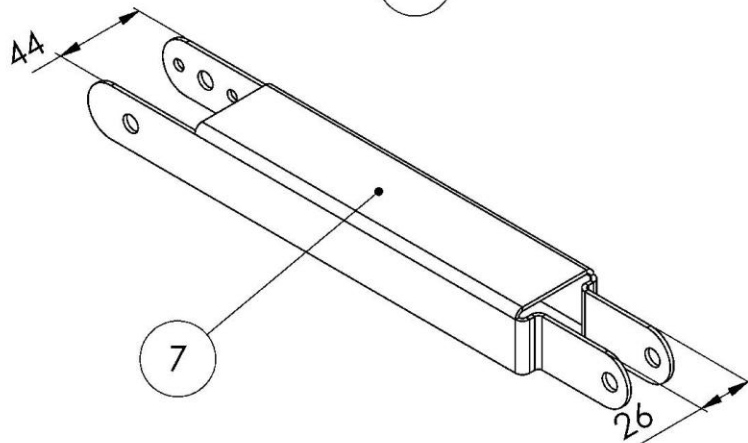
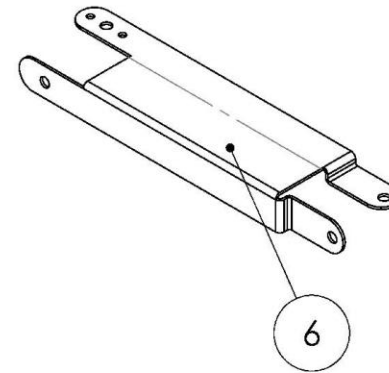
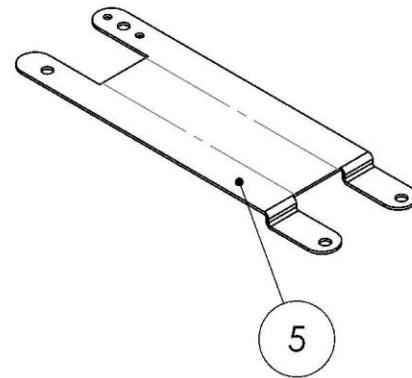
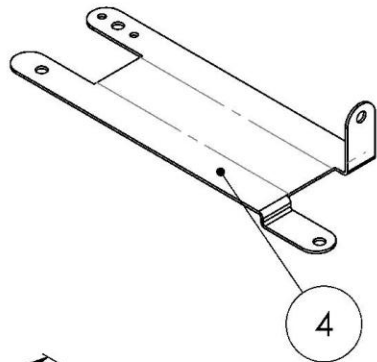
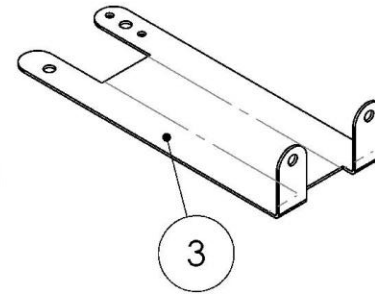
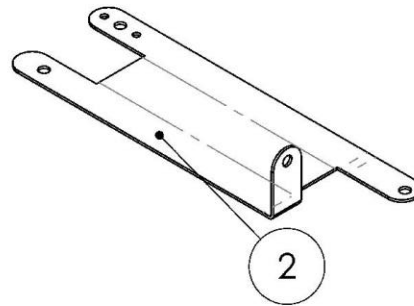
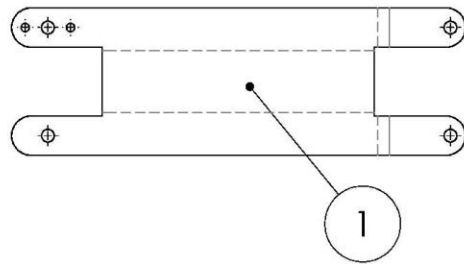
Aprobó: HMA

Fecha Rev:
09/06/2015



ANSI A

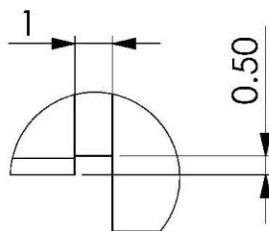
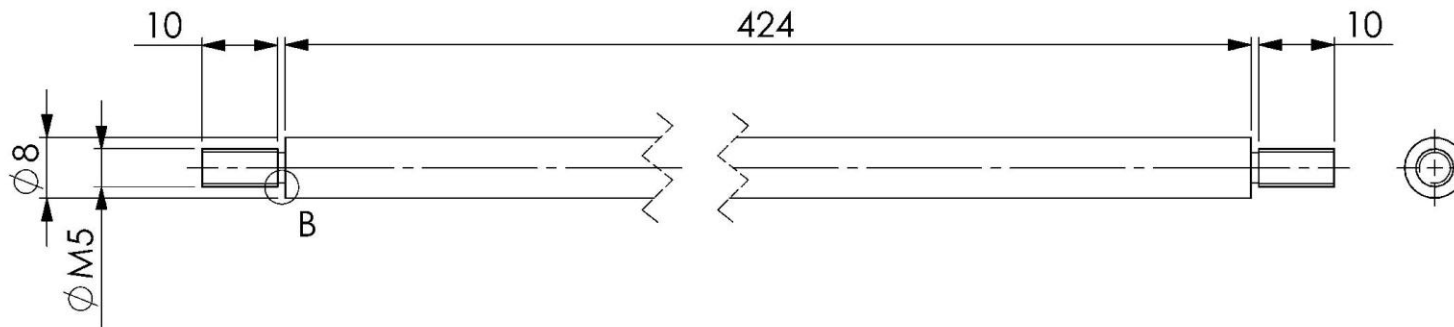
La información contenida en este documento forma parte del acervo patrimonial del Club de Mecatrónica. Queda prohibido el uso indebido como la distribución con fines de lucro y la divulgación del contenido de este documento, así como también cualquier modificación a la información contenida en este, el préstamo plagio de los mismos. Para hacer uso del presente se requerirá la autorización previa del M. en I. Humberto Mancilla Alonso.



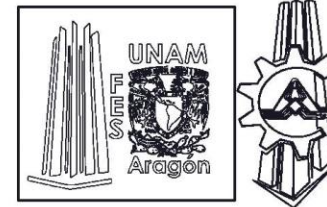
NOTA: HOJA 2 DE 2

TABLA DE PROCESOS

PROCESO	DIRECCIÓN	ÁNGULO	RADIO INTERIOR
1	CHAPA DESPLEGADA		
2	HACIA ARRIBA	90°	2
3	HACIA ARRIBA	90°	2
4	HACIA ABAJO	90°	2
5	HACIA ABAJO	90°	2
6	HACIA ABAJO	90°	2
7	HACIA ABAJO	90°	2



DETALLE B
ESCALA 5 : 1



Universidad Nacional
Autónoma de México
Facultad de Estudios Superiores
Aragón

Proyecto: DISEÑO VIRTUAL DE UN
ROBOT PARALELO TIPO DELTA

Pieza: VARILLA_ ANTEBRAZO

Plano No. : RPD-MEC-503-0

Dibujó: LAM

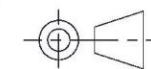
Cotas: MM

Revisó: HMA

Escala: 1:1

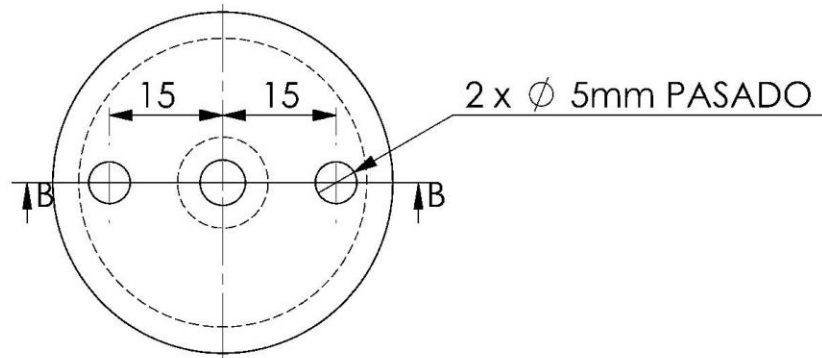
Aprobó: HMA

Fecha Rev:
05/06/2015

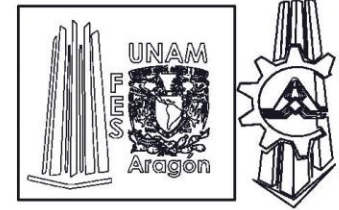
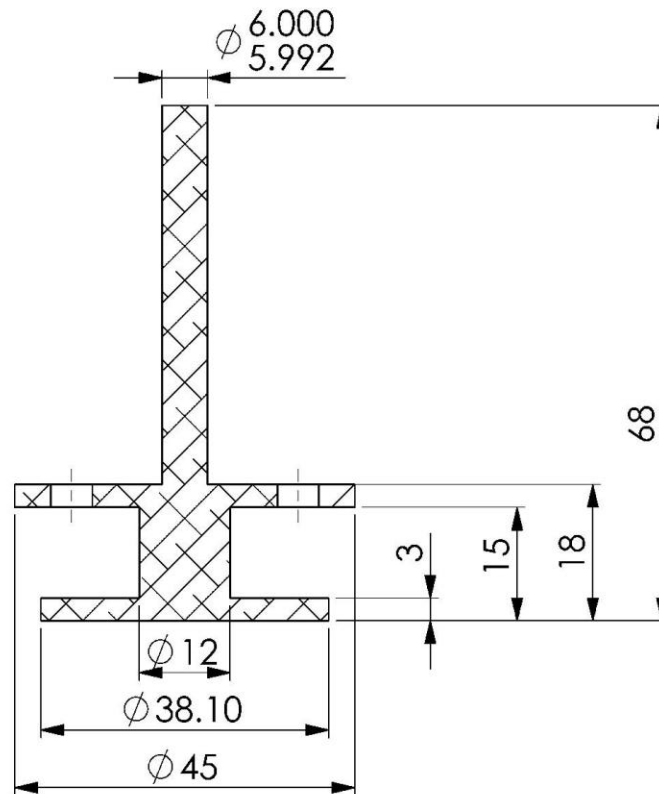


ANSI A

La información contenida en este documento forma parte del acervo patrimonial del Club de Mecatrónica. Queda prohibido el uso indebido como la distribución con fines de lucro y la divulgación del contenido de este documento, así como también cualquier modificación a la información contenida en este, el préstamo plagio de los mismos. Para hacer uso del presente se requerirá la autorización previa del M. en I. Humberto Mancilla Alonso.



SECCIÓN B-B



Universidad Nacional
Autónoma de México
Facultad de Estudios Superiores
Aragón

Proyecto: DISEÑO VIRTUAL DE UN
ROBOT PARALELO TIPO DELTA

Pieza: FLECHA ARTICULAR

Plano No. : RPD-MEC-504-0

Dibujó: LAM

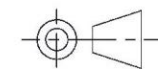
Cotas: MM

Revisó: HMA

Escala: 1:1

Aprobó: HMA

Fecha Rev:
05/06/2015



ANSI A

La información contenida en este documento forma parte del acervo patrimonial del Club de Mecatrónica. Queda prohibido el uso indebido como la distribución con fines de lucro y la divulgación del contenido de este documento, así como también cualquier modificación a la información contenida en este, el préstamo plagio de los mismos. Para hacer uso del presente se requerirá la autorización previa del M. en I. Humberto Mancilla Alonso.



Universidad Nacional
Autónoma de México
Facultad de Estudios Superiores
Aragón

Proyecto: DISEÑO VIRTUAL DE UN
ROBOT PARALELO TIPO DELTA

Pieza: PASADOR

Plano No. : RPD-MEC-505-0

Dibujó: LAM

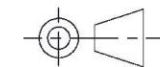
Cotas: MM

Revisó: HMA

Escala: 3:1

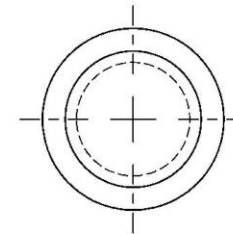
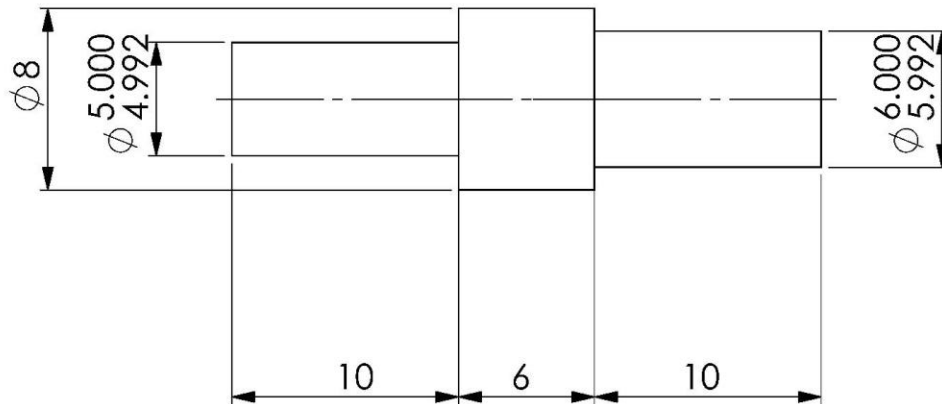
Aprobó: HMA

Fecha Rev:
05/06/2015



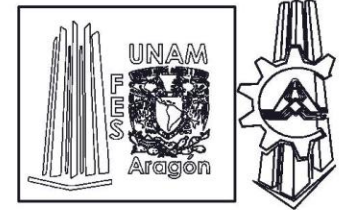
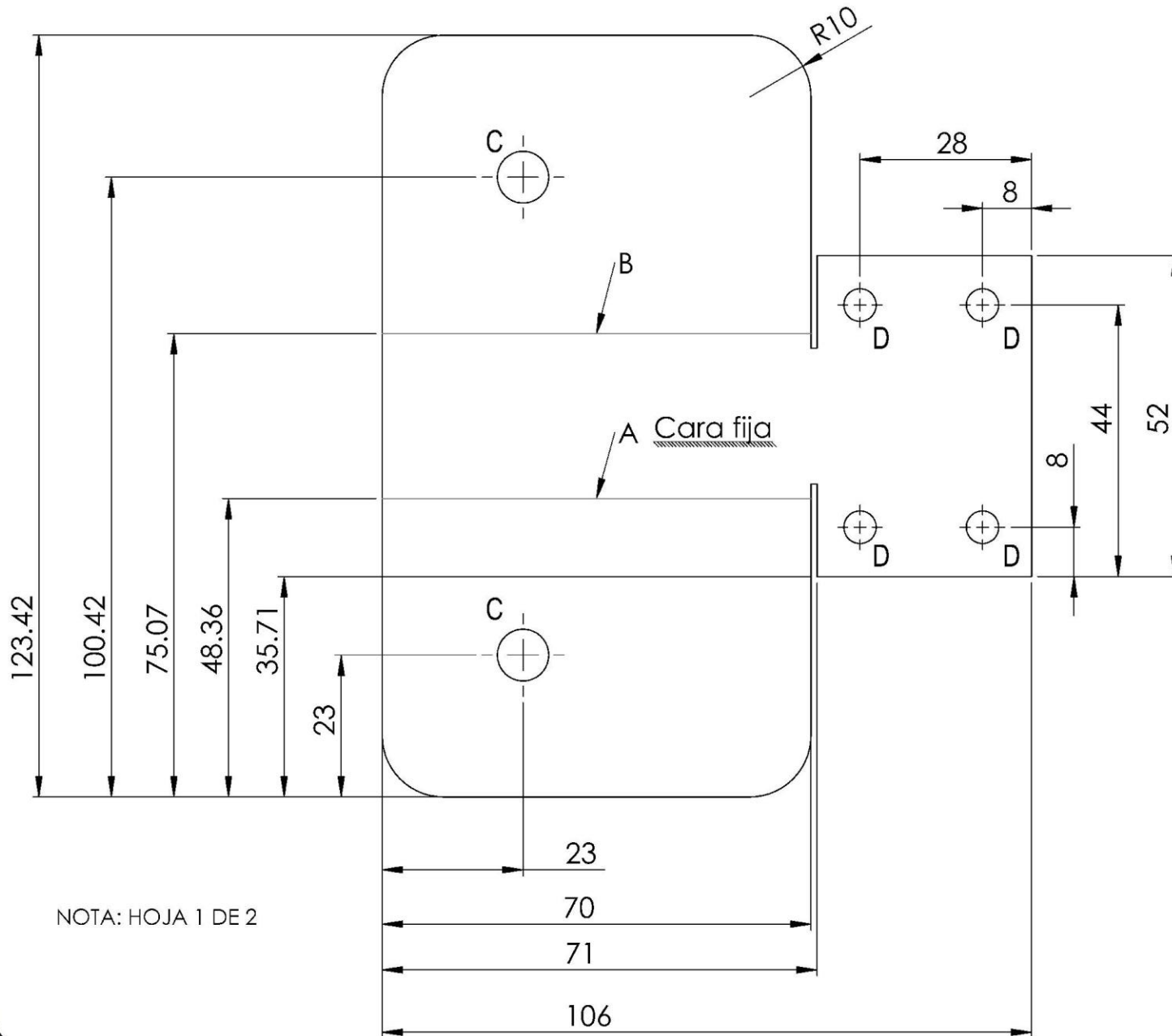
ANSI A

La información contenida en este documento forma parte del acervo patrimonial del Club de Mecatrónica. Queda prohibido el uso indebido como la distribución con fines de lucro y la divulgación del contenido de este documento, así como también cualquier modificación a la información contenida en este, el préstamo plagio de los mismos. Para hacer uso del presente se requerirá la autorización previa del M. en I. Humberto Mancilla Alonso.



LISTA DE BARRENOS		
ETIQUETA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
C	Ø 8mm	2
D	Ø 5mm	4

TABLA DE PLIEGES			
Etiqueta	Dirección	Ángulo	Radio interior
A	HACIA ARRIBA	90°	2
B	HACIA ARRIBA	90°	2



Universidad Nacional
Autónoma de México
Facultad de Estudios Superiores
Aragón

Proyecto: DISEÑO VIRTUAL DE UN
ROBOT PARALELO TIPO DELTA

Pieza: SOPORTE_BRAZO

Plano No. : RPD-MEC-506-0

Dibujó: LAM

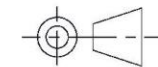
Cotas: MM

Revisó: HMA

Escala: 1:1

Aprobó: HMA

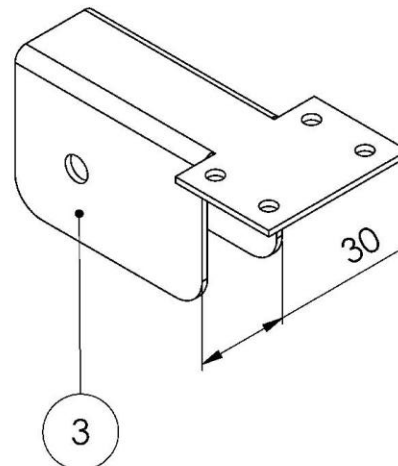
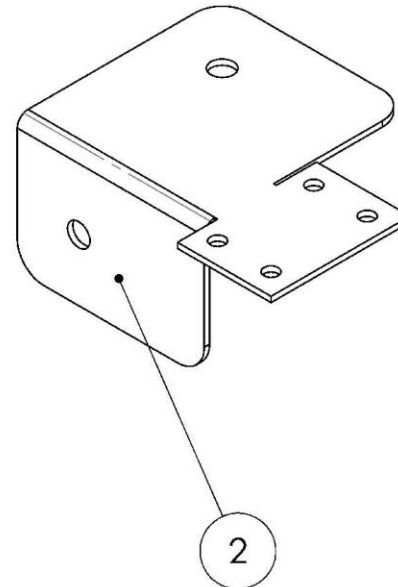
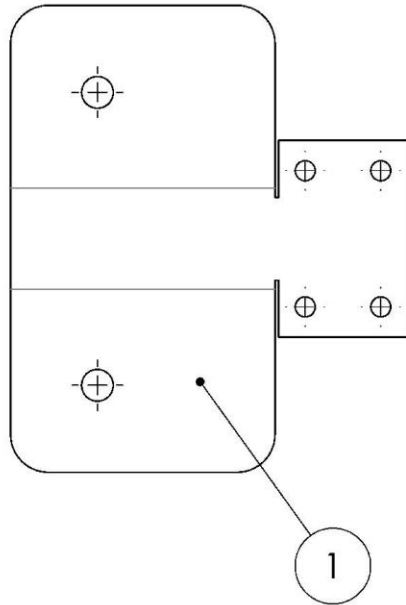
Fecha Rev :
09/06/2015



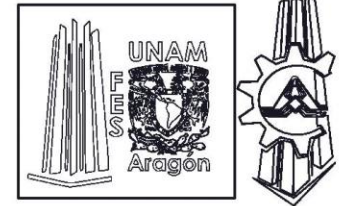
ANSI A

La información contenida en este documento forma parte del acervo patrimonial del Club de Mecatrónica. Queda prohibido el uso indebido como la distribución con fines de lucro y la divulgación del contenido de este documento, así como también cualquier modificación a la información contenida en este, el préstamo plagio de los mismos. Para hacer uso del presente se requerirá la autorización previa del M. en I. Humberto Mancilla Alonso.

TABLA DE PROCESOS			
PROCESO	DIRECCIÓN	ÁNGULO	RADIO INTERIOR
1	CHAPA DESPLEGADA		
2	HACIA ARRIBA	90°	2
3	HACIA ARRIBA	90°	2



NOTA: HOJA 2 DE 2



Universidad Nacional
Autónoma de México
Facultad de Estudios Superiores
Aragón

Proyecto: DISEÑO VIRTUAL DE UN
ROBOT PARALELO TIPO DELTA.

Pieza: SOPORTE_BRAZO

Plano No. :RPD-MEC-506-0

Dibujó: LAM

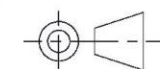
Cotas:MM

Revisó: HMA

Escala: 1:2

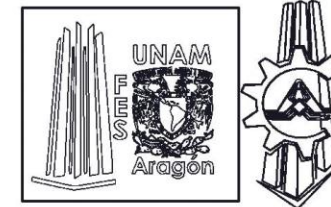
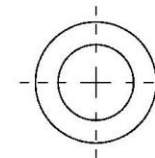
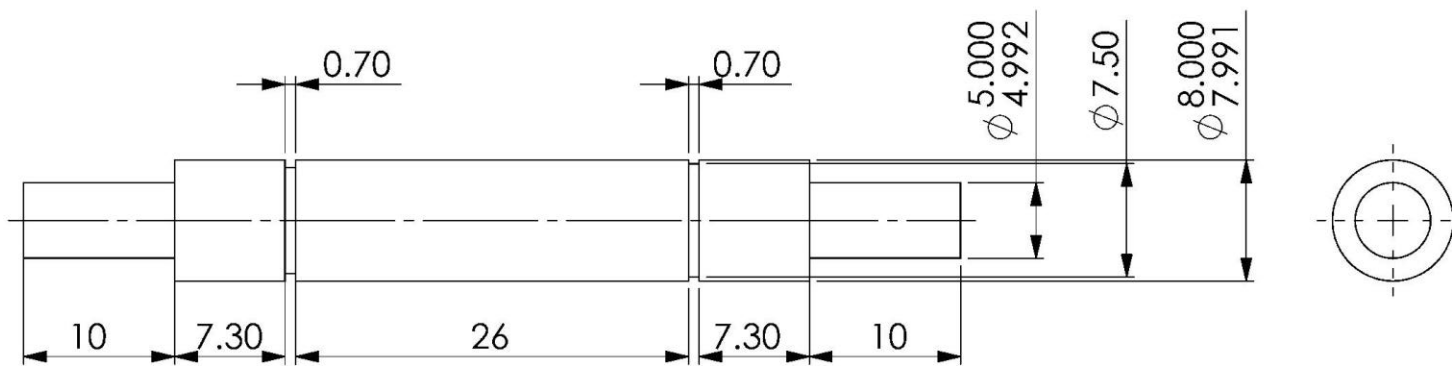
Aprobó: HMA

Fecha Rev
09/06/2015



ANSI A

La información contenida en este documento forma parte del acervo patrimonial del Club de Mecatrónica. Queda prohibido el uso indebido como la distribución con fines de lucro y la divulgación del contenido de este documento, así como también cualquier modificación a la información contenida en este, el préstamo plagio de los mismos. Para hacer uso del presente se requerirá la autorización previa del M. en I. Humberto Mancilla Alonso.



Universidad Nacional
Autónoma de México
Facultad de Estudios Superiores
Aragón

Proyecto: DISEÑO VIRTUAL DE UN
ROBOT PARALELO TIPO DELTA

Pieza: FLECHA_BRAZO

Plano No. : RPD-MEC-507-0

Dibujó: LAM

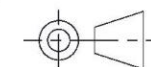
Cotas: MM

Revisó: HMA

Escala: 2:1

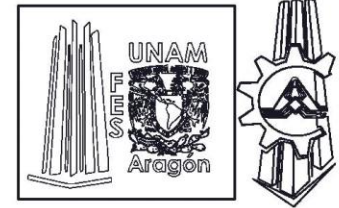
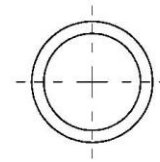
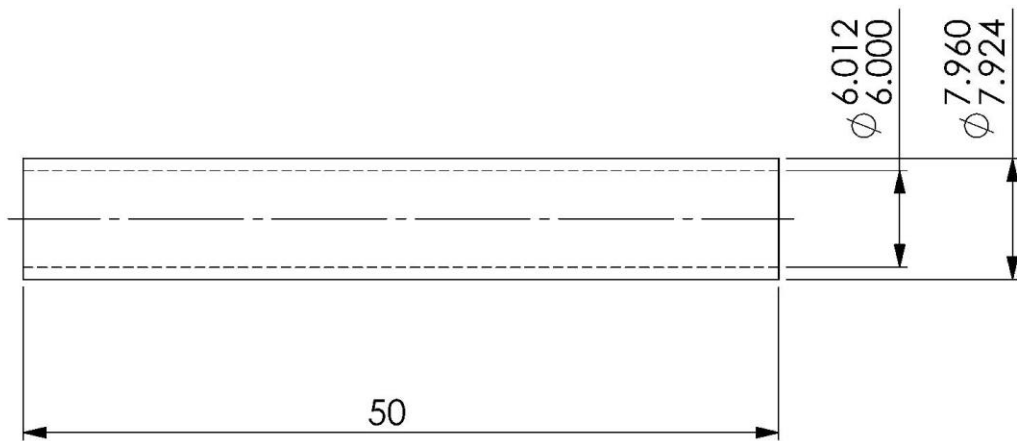
Aprobó: HMA

Fecha Rev:
05/06/2015



ANSI A

La información contenida en este documento forma parte del acervo patrimonial del Club de Mecatrónica. Queda prohibido el uso indebido como la distribución con fines de lucro y la divulgación del contenido de este documento, así como también cualquier modificación a la información contenida en este, el préstamo plagio de los mismos. Para hacer uso del presente se requerirá la autorización previa del M. en I. Humberto Mancilla Alonso.



Universidad Nacional
Autónoma de México
Facultad de Estudios Superiores
Aragón

Proyecto: DISEÑO VIRTUAL DE UN
ROBOT PARALELO TIPO DELTA

Pieza: BUJE

Plano No. : RPD-MEC-508-0

Dibujó: LAM

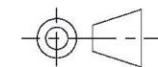
Cotas: MM

Revisó: HMA

Escala: 2:1

Aprobó: HMA

Fecha Rev:
05/06/2015



ANSI A

La información contenida en este documento forma parte del acervo patrimonial del Club de Mecatrónica. Queda prohibido el uso indebido como la distribución con fines de lucro y la divulgación del contenido de este documento, así como también cualquier modificación a la información contenida en este, el préstamo plagio de los mismos. Para hacer uso del presente se requerirá la autorización previa del M. en I. Humberto Mancilla Alonso.

