



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería
Campus San Juan del Río
Área Electromecánica



Diseño de mecanismo paralelo tipo delta aplicado a posicionamiento de piezas
en tornos de mordazas independientes.

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el título de

Ingeniero Electromecánico

Línea Terminal en:

Mecatrónica

Presenta

Omar Trejo Chávez

Dirigida por:

Dr. Miguel Trejo Hernández

San Juan del Río, Qro. Septiembre, 2016



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CAMPUS SAN JUAN DEL RÍO



Diseño de Mecanismo Paralelo Tipo Delta Aplicado a Posicionamiento de Piezas en
Tornos de Mordazas Independientes.

TESIS

Como parte de los requisitos para obtener el título de
INGENIERO ELECTROMECAÁNICO

Línea Terminal
MECATRÓNICA

Presenta

OMAR TREJO CHÁVEZ

Dirigida por:

DR. MIGUEL TREJO HERNÁNDEZ

SINODALES:

DR. MIGUEL TREJO HERNÁNDEZ (6443)

Presidente

DR. J. JESÚS DE SANTIAGO PÉREZ (6589)

Secretario

DR. JESÚS ROONEY RIVERA GUILLÉN (8943)

Vocal

DR. JUAN PRIMO BENITEZ RANGEL (2088)

Suplente

San Juan del Río, Qro. Septiembre 2016

Resumen

El gran desarrollo tecnológico hoy en día ha llevado a que gran número de maquinaria se vuelva obsoleta o desechada por el incremento en el uso de nuevas máquinas capaces de desarrollar actividades casi por si solas. Y no es que sea innecesario actualizar la maquinaria, sin embargo, también se le puede dar un aprovechamiento a aquella maquinaria que se piensa es inútil ante los nuevos avances tecnológicos.

En este trabajo, se desarrolla un mecanismo paralelo tipo delta donde su campo de acción será precisamente en la maquinaria convencional que necesita ser aprovechada al máximo, siempre y cuando tenga vida útil aún. Específicamente, la funcionalidad de este proyecto se verá reflejado en tornos, fresas, es decir, centros de maquinado convencionales, los cuales aún son operados manualmente o por simples instrucciones del usuario.

El proyecto es el diseño de un mecanismo que sea capaz de efectuar el posicionamiento (puesta a cero) de una pieza cuyas dimensiones sean difíciles de centrar en las máquinas-herramienta más comunes, como lo son el torno y la fresa convencionales, sin que se vean afectadas las características físicas de este tipo de maquinaria.

Para ello se recurre a softwares de diseño, análisis matemático y geométrico de mecanismos paralelos, así como también a la construcción de un prototipo para evaluar su funcionalidad.

Dedicatoria

A Dios por todo lo bueno, lo malo y las lecciones que voy aprendiendo en el camino.

A mis padres por todo su cariño y dedicación hacia cada uno de sus hijos, por inculcarme los valores necesarios en el andar de la vida.

A mis hermanos por todo su apoyo y sus consejos.

Agradecimientos

A la Universidad Autónoma de Querétaro por abrirme sus puertas y brindarme la oportunidad de culminar con una carrera profesional.

A mi director de tesis quién me apoyo a lo largo de toda la elaboración del proyecto y siempre que surgiera alguna duda estuvo ahí para resolverla.

A mis profesores en cada una de las etapas de mi vida como estudiante.

A Samuel Domínguez Villarreal, compañero de carrera, quién me asesoró en cuanto a la construcción del mecanismo.

A los encargados del laboratorio por el tiempo y espacio que me brindaron cuando tuve complicaciones en cuanto a la construcción del mecanismo.

A mis amigos que han estado conmigo para compartir los buenos y los malos momentos, por su apoyo incondicional.

A todos, muchas gracias.

Índice

RESUMEN.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTOS.....	v
ÍNDICE.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
CAPÍTULO I.....	1
1. Introducción.....	1
1.1. Antecedentes.....	2
1.2. Objetivos.....	5
1.2.1. Objetivo General.....	5
1.2.2. Objetivos Específicos.....	5
1.3. Descripción del Problema.....	6
1.4. Justificación.....	6
1.5. Planteamiento General.....	7
CAPÍTULO II.....	8
2. Revisión de Literatura.....	8
2.1. Robots Manipuladores.....	8
2.1.1. Definición.....	8
2.1.2. Estructura.....	9
2.1.3. Elementos.....	9
2.1.4. Configuraciones de Robots.....	10
2.2. Robot Paralelo.....	12

2.2.1. Definición	12
2.2.2. Orígenes	12
2.2.3. Clasificación	15
2.2.4. Robot Delta.....	16
2.3. Cinemática de Robots Paralelos	17
2.3.1. Cinemática Inversa	17
2.3.2. Cinemática Directa	17
2.4. Máquinas Herramienta	18
2.4.1. Torno	18
2.4.2. Fresa	25
2.5. Actuadores	26
2.5.1. Actuadores Eléctricos	26
2.5.2. Actuadores Neumáticos	27
2.5.3. Actuadores Hidráulicos	27
2.6. Softwares de diseño	28
2.6.1. AutoCAD.....	28
2.6.2. INVENTOR.....	29
CAPÍTULO III	31
2. Metodología.....	31
3.1. Cinemática de mecanismo delta	32
3.1.1. Cinemática inversa	32
3.2. Diseño del Sistema Mecánico.....	36
3.2.1. Parámetros del Diseño	36
3.2.2. Material a Utilizar.....	36
3.2.3. Cálculos Para Diseño del Mecanismo	37

3.2.4. Dimensiones del Mecanismo.....	41
3.2.5. Diseño de la Estructura Principal del Mecanismo Delta	41
CAPÍTULO IV	46
4. Resultados y Conclusiones	46
4.1. Construcción del mecanismo.....	46
4.1.1. Construcción de la Estructura Principal	46
4.1.2. Bases del Mecanismo	46
4.1.3. Brazos Principales	48
4.1.4. Brazos Secundarios	49
4.1.5. Soporte para Torno	49
4.2. Mecanismo Paralelo Tipo Delta	50
4.3. Conclusiones.....	55
4.4. Prospectivas	56
Referencias	57
Anexos.....	59

Índice de figuras

Figura 1: Planteamiento General.....	7
Figura 2: Estructura de un Robot.....	9
Figura 3: Elementos de un Robot	10
Figura 4: Configuraciones Básicas de Robots.....	10
Figura 5: Robot Serie.....	11
Figura 6: Robot Paralelo.....	11
Figura 7: Primer Mecanismo Paralelo.....	12
Figura 8: Primer Robot Paralelo Industrial	13
Figura 9: Plataforma Original de Gough (1954)	14
Figura 10: Plataforma de Stewart	14
Figura 11: Robot Paralelo Planar.....	15
Figura 12: Robot Paralelo Espacial, (Plataforma Stewart).....	16
Figura 13: Robot Delta	16
Figura 14: Torno Convencional.....	18
Figura 15: Plato de 3 Mordazas.....	19
Figura 16: Colocación de la Pieza (3 Mordazas).....	20
Figura 17: Primer ajuste con Indicador de Carátula (3 Mordazas).....	21
Figura 18: Ajuste final con Indicador de Carátula (3 Mordazas)	22
Figura 19: Mordazas Independientes.....	23
Figura 20: Plato de Mordazas Independientes.....	23
Figura 21: Colocación de la Pieza (4 Mordazas).....	24
Figura 22: Ajuste Final con Indicador de Carátula (4 Mordazas)	25
Figura 23: Máquina Fresadora.....	26
Figura 24: Software AutoCAD.....	29
Figura 25: Software Inventor Autodesk	30
Figura 26: Metodología.....	31
Figura 27: Articulación F1J1	32
Figura 28: Vista Lateral Para Análisis Geométrico.....	33
Figura 29: Rotación del sistema de referencia.....	35
Figura 30: Dimensiones del Mecanismo	41

Figura 31: Plataforma Fija.....	42
Figura 32: Brazos Principales.....	42
Figura 33: Plataforma Móvil.....	43
Figura 34: Barra de Aluminio.....	43
Figura 35: Junta Esférica o Rotula.....	44
Figura 36: Antebrazo.....	44
Figura 37: Mecanismo Paralelo Tipo Delta Diseño en Software.....	45
Figura 38: Plataforma Fija.....	47
Figura 39: Plataforma Móvil.....	47
Figura 40: Brazos Principales.....	48
Figura 41: Barrenos Brazos Principales.....	48
Figura 42: Antebrazos y Rótulas.....	49
Figura 43: Soporte para Torno.....	50
Figura 44: Ensamble Antebrazo y Rótula.....	50
Figura 45: Ensamble Antebrazos y Brazos Principales.....	51
Figura 46: Ensamble Plataforma Móvil.....	51
Figura 47: Plataforma Fija y Soportes.....	52
Figura 48: Mecanismo Paralelo tipo Delta.....	52
Figura 49: Mecanismo Acoplado en el Torno.....	53
Figura 50: Movimiento Lateral Derecho.....	53
Figura 51: Movimiento Inferior.....	54
Figura 52: Movimiento Superior.....	54
Figura 53: Movimiento Lateral Izquierdo.....	54

Índice de tablas

Tabla 1: Propiedades de los Materiales	37
Tabla 2: Dimensiones del Mecanismo.....	41

CAPÍTULO I

1. Introducción

El presente proyecto pretende la realización de un mecanismo inteligente para la puesta a cero de piezas en tornos de mordazas independientes o centros de maquinado. La integración de sensores como acelerómetros o trazadores para ubicar espacialmente la pieza, además del desarrollo de una interfaz para la visualización 2D y 3D de la misma, el uso de visión artificial y probablemente herramientas de inteligencia artificial serían parte fundamental del proyecto. El diseño del mecanismo es la base principal del proyecto por lo cual es obligatorio darle una vista muy a futuro para la implementación de los sensores, encargados del funcionamiento adecuado del proyecto, cabe mencionar que en esta tesis únicamente se desarrollará el sistema mecánico del proyecto, además de garantizar que el mecanismo puede cumplir con las expectativas que se tienen a fin.

El diseño del mecanismo es la parte principal para el desarrollo del proyecto en conjunto, en este trabajo de tesis se hace una recopilación de trabajos y artículos que han trabajado con mecanismos paralelos tipo delta para así, proponer un diseño de calidad que pueda cumplir con las funciones para las cuales será requerido.

En la actualidad en la industria hay una gran cantidad de robots paralelos debido a ciertas características que hacen de estos una de las principales opciones en el mercado manufacturero, unas que se pueden mencionar son; precisión y velocidad. Son robots que debido a su diseño resultan ser factibles para un sinnúmero de actividades, también se les ha visto en el área de medicina como robots de apoyo en algunas cirugías, en el área de control de calidad, etc.

1.1. Antecedentes

En el ámbito internacional, el proceso de maquinado o la remoción de metal, es utilizado ampliamente en manufactura. Desde que el maquinado forma una parte importante en el costo de productos de mejor calidad y la necesidad de obtener productos de geometría compleja, muy difíciles de fabricar por un operador humano, se ha reducido la intervención de este en dicho proceso mediante la introducción y el uso del control numérico, además del monitoreo de diversas variables para el control de la calidad de la pieza terminada. Un factor predominante que condicionó todo automatismo fue el aumento de productividad. Posteriormente, debido a las nuevas necesidades de la industria aparecieron otros factores no menos importantes como la precisión, rapidez y flexibilidad. Por otra parte, los costos de maquinado son influenciados por varios factores incluyendo herramientas de corte, tiempos muertos, equipo de medida, máquinas herramienta, tipo de material, mano de obra y gastos generales de fabricación. (Smid, 2003).

En cuanto a los dispositivos de sujeción de piezas, éstos, tienen especial importancia en las máquinas herramienta y en las operaciones de maquinado, en el caso de un torno, un extremo de la pieza se sujeta al husillo con una boquilla, plato de arrastre o mandril. Un mandril se suele equipar con cuatro o tres mordazas de sujeción. Los mandriles de tres mordazas o universales, tienen en general un diseño espiral con engranes que los hace autocentrantes; si se usan piezas redondas, como por ejemplo perfiles de barra y tubos, que se pueden centrar con cierta precisión. Los mandriles con cuatro mordazas (independientes) tienen mordazas que se pueden mover y ajustar en forma independiente entre sí, pueden usarse para manejar piezas cuadradas, rectangulares o de formas diversas. Como son más robustos que los de tres mordazas, se usan para piezas pesadas, o para trabajos donde se requieren varias posiciones, donde la concentricidad es importante. En algunos mandriles se pueden invertir las mordazas para permitir sujetar piezas desde sus superficies externas o desde sus superficies internas, cuando son huecas, en piezas como tubos. (Kalpakjian et.al, 2006).

En muchos sectores de producción los manipuladores en serie con 3 o 4 GDL (Grados de Libertad) son utilizados, sin embargo este tipo de cinemática serial sufren de grandes movimientos inerciales. A fin de superar este tipo de deficiencias se han investigado el uso de los manipuladores paralelos. Estos pueden generar alta velocidad, alta rigidez y alta precisión. Recientemente muchos investigadores se han centrado en el tipo delta, este tipo de robot (mecanismo) tiene muy poca inercia de movimiento y el más rápido robot comercial que puede conseguir alcanza una velocidad de 10 m/s. La precisión y el cálculo de la dinámica son muy esenciales en el tipo delta. (Baek et.al, 2013).

Un robot didáctico, al igual que un industrial, es diseñado usando las leyes de la mecánica, y se usa la electrónica para controlar los movimientos por medio de los actuadores y finalmente, la computación para simular los movimientos en un ambiente virtual. Dentro del campo de la robótica, los prototipos de robots paralelos son muy ilustrativos y motivantes en la enseñanza de la Mecatrónica, pues su estructura mecánica está conformada por cadenas cinemáticas cerradas y los actuadores están colocados en cada cadena cinemática. Tumbaco, en su proyecto propone el diseño y construcción de un prototipo de robot paralelo tipo delta, y como efector final un cortador láser capaz de grabar anuncios publicitarios en materiales suaves utilizando software libre. La estructura mecánica puede moverse en un espacio de trabajo limitado por las dimensiones de los eslabones del robot. El robot delta consta de 3 actuadores dispersos uno del otro cada 120 grados, cada actuador transmite el movimiento a cada brazo y estos transmiten el movimiento a los antebrazos conectados a una plataforma móvil. (Tumbaco et.al, 2014).

En el ambiente nacional, se encuentran criterios para la clasificación de robots, según su estructura cinemática y se pueden clasificar en robots seriales, paralelos o híbridos. Un robot es serial si su estructura cinemática es una cadena de lazo abierto, es paralelo si contiene cadenas cinemáticas cerradas. Dentro de la estructura del mecanismo, cada cadena cinemática o brazo se compone de uno o varios eslabones articulaciones o pares cinemáticos. En estas estructuras paralelas, existen dos eslabones llamados plataformas. Uno fijo que forma la base y una móvil llamada plataforma móvil o efector final. Estas dos formas están unidas entre sí por los brazos. En su trabajo diseña y analiza un novedoso robot paralelo

traslacional. El robot consiste en dos mecanismos de 5 barras conectados por dos articulaciones prismáticas, la plataforma móvil se encuentra en la unión de estas dos articulaciones, el modelo propuesto presenta ventajas sobre otros mecanismos paralelos ya desarrollados, desde un mayor espacio de trabajo y la simetría del mecanismo facilita su análisis. (Briones, 2009).

En el trabajo de (Méndez, 2009) se presenta el diseño y construcción de un robot paralelo tipo Delta. Este tipo de robot es utilizado en la industria para propósitos de manipulación del producto a alta velocidad. Durante la fase de diseño se utilizó una metodología basada en el Álgebra de Cuaternios. En esta álgebra existe una transformación lineal con propiedades de una rotación que permite expresar vectores en función de la rotación dada por un ángulo alrededor de un eje definido en el espacio. También se muestran algunos componentes mecánicos utilizados en el robot, se especifica el control implementado en el robot y se explica la forma básica de programar movimientos de los servomotores.

Por otro lado (Martínez et.al, 2009) ejecuta la geometría y el análisis cinemático de un robot manipulador paralelo delta híbrido. Se compone de la unión de dos robots manipuladores paralelos conectados en una configuración serie. Esto permite que el robot tenga un espacio de trabajo más amplio. En este trabajo se presenta el análisis de la cinemática inversa donde el robot manipulador paralelo delta híbrido sigue una trayectoria. Además de proporcionar información detallada acerca de los robots paralelos tipo delta y de algunas limitaciones con las que cuenta este tipo de mecanismos.

Por todo lo anterior, las máquinas-herramienta requieren previamente la ubicación y puesta a cero de la pieza, para poder comenzar con el proceso de maquinado, lo que resulta en un paso sumamente importante para el maquinado total de esta y el operario debe poner especial atención en ello. Por otra parte, en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería en el Campus San Juan del Río de la UAQ, se cuenta con tornos convencionales de mordazas convencionales y tornos de mordazas independientes para maquinado de piezas especiales, donde se puede aterrizar y hacer uso del proyecto que se plantea.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

El objetivo general del presente proyecto es diseñar, modelar y elaborar un mecanismo paralelo tipo delta mediante el cálculo de sus eslabones y la evaluación de su movimiento en software de diseño para su futura aplicación en el posicionamiento de piezas en tornos de mordazas independientes, fresas o centros de maquinado.

1.2.2. Objetivos Específicos

Diseñar y modelar mediante un software CAD un mecanismo paralelo tipo delta encaminado al posicionamiento de piezas en torno con mordazas independientes.

Definir las restricciones geométricas necesarias que permitan la movilidad del mecanismo para que este pueda tener un buen funcionamiento en el fin que ha sido requerido.

Diseñar una plataforma móvil mediante el uso de ranuras espaciales que permita recibir y sujetar un efector final diseñado para la sujeción de diversas piezas.

Diseñar un sistema de acoplamiento sencillo, en la plataforma fija del mecanismo, que permita ubicarlo y utilizarlo como un accesorio en un torno, fresa o centro de maquinado.

Realizar el maquinado de las piezas diseñadas mediante el uso de máquinas-herramienta y procesos de manufactura para su posterior ensamble y evaluación de la funcionalidad del prototipo.

Definir recomendaciones específicas en base a los resultados obtenidos para que el robot tipo delta sirva para el fin requerido y demás aplicaciones.

1.3. Descripción del Problema

Uno de los problemas a los que se enfrentan los operarios en tornos es precisamente el de ubicar las piezas de una forma y posición adecuada, utilizando variedad de herramientas y de manera manual, con indicadores de carátula. Sin embargo, en ocasiones llega a ser una tarea ardua por la forma de la pieza, o la forma en la que se debe de posicionar la pieza que requiera el maquinado, además el tiempo que se lleva realizar este tipo de acciones puede ser bien aprovechado en otras actividades, por lo que con el presente desarrollo se pretende dar una opción para agilizar esta operación, además de hacerla precisa.

1.4. Justificación

En muchas ocasiones, cuando se realizan maquinados, la puesta a cero de una pieza especial resulta ser una tarea que consume mucho tiempo sobre todo para aquellos que van tomando experiencia en esta actividad, requiriendo así, el uso palpadores, indicadores de carátula, niveles, etc. y no solo ocurre esto a nivel educativo sino que también en pequeños y medianos talleres en los cuales se necesita mayor producción y automatizar de alguna manera este tipo de trabajos. Es de esto, que surge la necesidad de integrar herramientas como control inteligente, visión artificial y sensores (o trazadores) en un solo equipo portátil para hacer más rápida y precisa esta tarea. La razón de proponer un mecanismo paralelo tipo delta, es su simplicidad y que se acopla perfectamente para solucionar la necesidad que se está requiriendo, además de que se trata de un accesorio para los centros de maquinado y que no afecta en nada la estructura de los mismos, combinado con que dicho mecanismo resulta ser uno de los más rápidos en la robótica además de que su uso en diversas aplicaciones ha ido en aumento en los últimos años.

1.5. Planteamiento General

El planteamiento general a seguir se puede observar en la Figura 1, también se hace una breve explicación de las etapas a realizar para el desarrollo del proyecto.

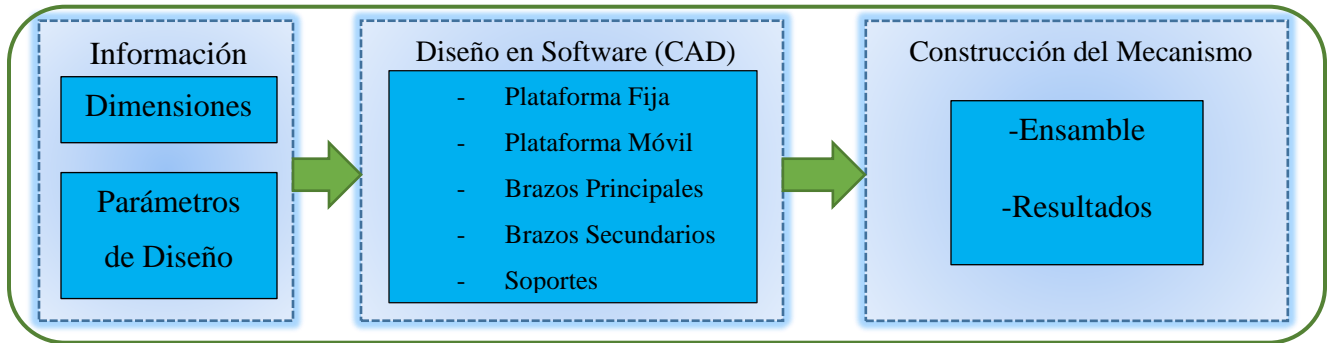


Figura 1: Planteamiento General.

Información: Para la realización del proyecto se recaudará información necesaria acerca de algunos prototipos que ya han sido fabricados y ver qué uso se le puede dar en cuanto al posicionamiento de piezas mecánicas. Una vez recaudada la información es de vital importancia comenzar la realización de bocetos que permitan facilitar la idea del proyecto y así acudir a la matemática de la movilidad de robots, además de seguir retroalimentando el proyecto de los antecedentes anteriormente mencionados.

Diseño en Software: Con los bocetos listos, se propone un modelo a realizar en software de diseño (CAD), que de igual manera se va haciendo un seguimiento metodológico para llevar un orden que en algún momento pueda ayudar en caso de que los resultados no sean los esperados y así poder regresar a donde ocurre el problema. En caso de requerir simulación del proyecto, en el mismo software de diseño se puede realizar y una vez que se tiene la simulación entonces comenzar la construcción física.

Construcción del Mecanismo: Se comienza con la construcción física del mecanismo una vez que se ha terminado el diseño en software además de observar en el ensamble virtual que la dinámica del mecanismo funciona tal y como lo acordado en este tipo de mecanismos paralelos. Haciendo uso de las máquinas-herramienta con las cuales cuenta la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro se fabrica cada una de las piezas del diseño, para finalmente ensamblar las piezas y poder obtener resultados reales.

CAPÍTULO II

2. Revisión de Literatura

2.1. Robots Manipuladores

2.1.1. Definición

En (D’Inca, 2010), se pueden encontrar varias definiciones de lo que es un robot, pero la que debería ser definitiva es la dada por la ISO (International Standards Organization) que dice:

“Un robot industrial es una máquina manipulativa, automáticamente controlada, reprogramable, multi-propósito, con varios ejes reprogramables, los cuales pueden ser fijos o móviles, para uso en aplicaciones de automatización industrial”.

Para los robots no industriales RIA (Robotics Industries Association o Asociación de Industrias de Robótica) prefiere la siguiente definición:

“Un robot es una máquina multifuncional, reprogramable, diseñada para manipular materiales, partes, herramientas, o dispositivos especiales, mediante movimientos variables, programados para la realización de una variedad de tareas”.

Se incluye en esta definición la necesidad de que el robot tenga varios grados de libertad. Una definición más completa es la establecida por la Asociación Francesa de Normalización (AFNOR) que define primero el manipulador y, basándose en dicha definición, el robot:

Manipulador: mecanismo formado generalmente por elementos en serie, articulados entre sí, destinado al agarre y desplazamiento de objetos. Es multifuncional y puede ser gobernado directamente por un operador humano o mediante dispositivo lógico.

Robot: manipulador automático servo controlado, reprogramable, polivalente, capaz de posicionar y orientar piezas, útiles o dispositivos especiales, siguiendo trayectoria variables reprogramables, para la ejecución de tareas variadas. Normalmente tiene la forma de uno o varios brazos terminados en una muñeca. Su unidad de control incluye un dispositivo de memoria y ocasionalmente de percepción del entorno. Normalmente su uso es

el de realizar una tarea de manera cíclica, pudiéndose adaptar a otra sin cambios permanentes en su material.

2.1.2. Estructura

(Barrientos et.al, 2007) Un robot está formado por una serie de elementos o eslabones unidos mediante articulaciones que permiten un movimiento relativo entre cada dos eslabones consecutivos. La mayoría de los robots deben su estructura a imitaciones de elementos de la naturaleza. Para hacer referencia a los distintos elementos que componen el robot, se usan términos como cuerpo, brazo, codo y muñeca, tal y como si se tratara de las extremidades del cuerpo humano como se muestra en la Figura 2.



Figura 2: Estructura de un Robot

2.1.3. Elementos

El movimiento de cada articulación puede ser de desplazamiento, de giro, o de una combinación de ambos. De este modo son posibles diferentes tipos de articulaciones, tal y como se muestra en la Figura 3, en donde se clasifican los tipos de articulaciones de acuerdo a los grados de libertad que nos ofrecen.



Figura 3: Elementos de un Robot

2.1.4. Configuraciones de Robots

El empleo de diferentes combinaciones de articulaciones en un robot, da lugar a diferentes configuraciones con características a tener en cuenta tanto en el diseño y construcción del robot como en su aplicación (Tumbaco et.al, 2014). Las combinaciones más frecuentes son las representadas en la Figura 4, donde se observan las tres principales articulaciones del robot, que son las más importantes a la hora de posicionar su extremo (efector final) en un punto del espacio.

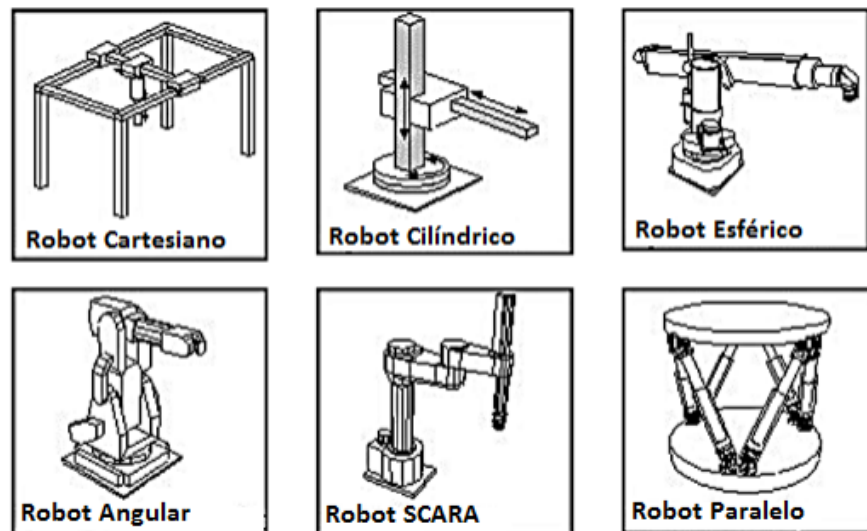


Figura 4: Configuraciones Básicas de Robots

Teniendo en cuenta su estructura, los robots se pueden clasificar en: Robots tipo serie y robots o manipuladores paralelos. Los robots tipo serie están formados por una cadena cinemática abierta, Figura 5. En cambio, los robots paralelos están formados por dos plataformas, una fija y otra móvil, unidas por varias cadenas cinemáticas en paralelo, y por ello, formando cadenas cinemáticas cerradas, Figura 6.



Figura 5: Robot Serie



Figura 6: Robot Paralelo

2.2. Robot Paralelo

2.2.1. Definición

Una definición que brinda una idea clara de un robot paralelo es la siguiente:

“Un robot paralelo generalizado es un mecanismo de cadenas cinemáticas en lazo cerrado, cuyo efector final es unido a la base por varias cadenas cinemáticas independientes (Merlet, 2006).”

2.2.2. Orígenes

El primer mecanismo paralelo se trataba de una plataforma de movimiento destinada a la industria del entretenimiento, Figura 7. Esta plataforma fue patentada en 1931 (US Patent N° 1,789,680) por James E. Gwinnett. Sin embargo, este mecanismo nunca fue diseñado (Aracil, 2006).

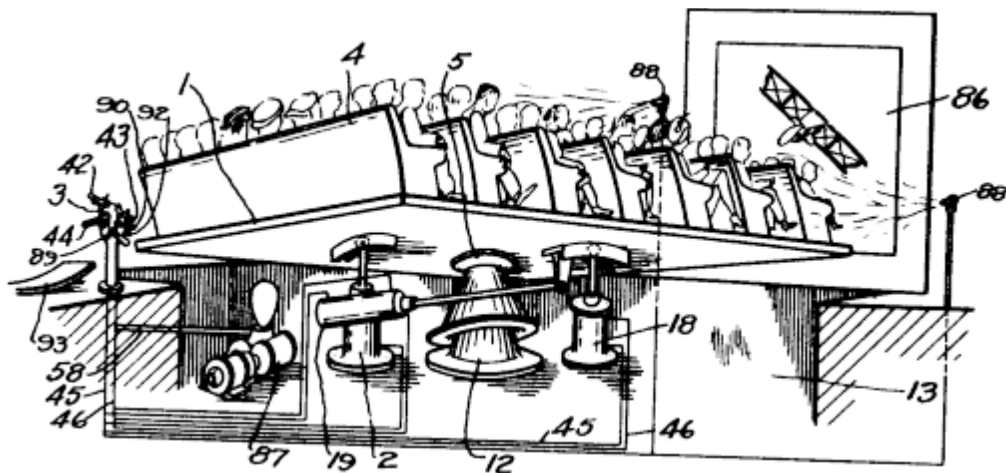


Figura 7: Primer Mecanismo Paralelo

Una década más tarde y solo 17 años después de que se acuñara el término “Robot”, un nuevo robot paralelo fue inventado por Willard L.V. Pollard para automatizar el proceso de pintura en spray, fue considerado como el primer robot industrial, Figura 8 (US patent No. 2, 286,571).

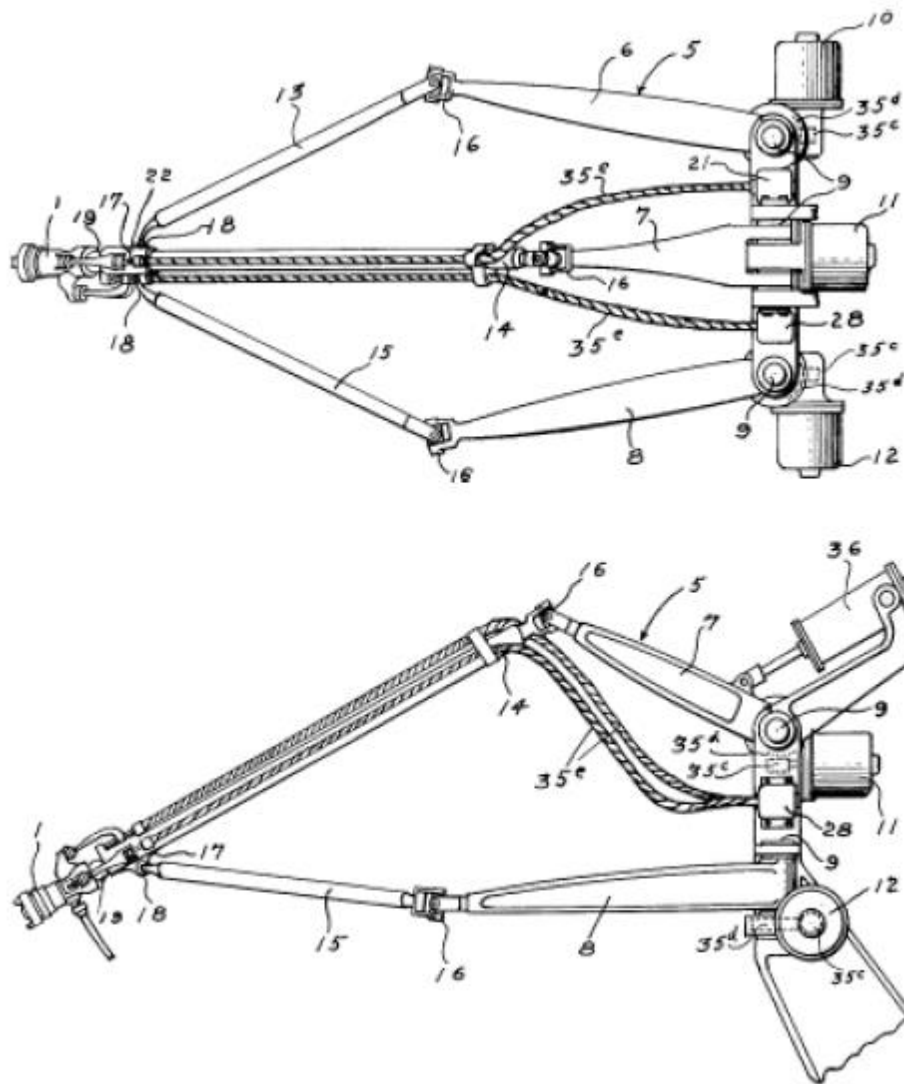


Figura 8: Primer Robot Paralelo Industrial

En 1947, el Dr. Eric Gough, quien construyó el dispositivo octaédrico, fue un distinguido ingeniero automotriz de la Dunlop Rubber Co., en Birmingham, Inglaterra. Se une a Dunlop a la edad de 20 años. La máquina para pruebas de llantas o “Universal Rig”, como él llama a su invento, fue creada para resolver problemas de cargas en los neumáticos al aterrizar los aviones, una máquina universal debía determinar las propiedades de los neumáticos bajo cargas combinadas. Desafortunadamente Eric Gough falleció en 1973 cuando los hexápodos octaédricos incrementaron su popularidad. Figura 9 (Proc. IMechE, 1965-66).

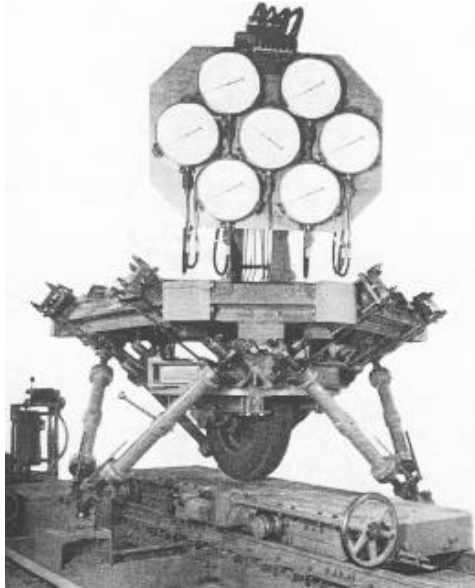


Figura 9: Plataforma Original de Gough (1954)

En 1965 aparece el artículo de D. Stewart en las memorias del British ImechE. En este artículo, Stewart propone un nuevo diseño de mecanismo paralelo, el cual fue usado como simulador de vuelo, se considera que por su particular arreglo, este mecanismo puede formar un elegante diseño para simular vuelos en el entrenamiento de pilotos. Contrario a la mayoría de los simuladores, este no tiene ejes fijos relativos a la tierra, por lo tanto dentro de los límites de diseño este puede verdaderamente simular las condiciones de vuelo. Este diseño fue llamado plataforma de Stewart o mecanismo paralelo de Stewart (SPM). Figura 10 “plataforma de Stewart” (Proc. IMechE, 1965-66).

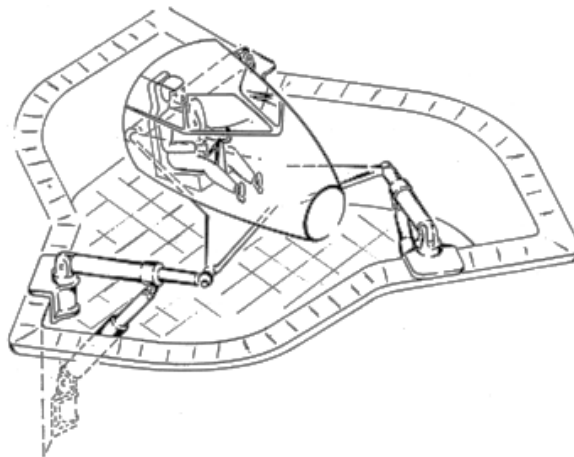


Figura 10: Plataforma de Stewart

Estos son algunos prototipos que dieron origen al uso de los robots paralelos, como se puede ver a medida que avanza la tecnología los elementos que conforman este tipo de robots van cambiando y ofreciendo mejoras en todas sus estructuras robóticas que implican un beneficio en cuanto a su movimiento, precisión, rigidez y capacidades multi-axiales.

2.2.3. Clasificación

Los robots paralelos pueden ser clasificados de acuerdo a su movilidad que puedan desarrollar (Tsai, 1999), de acuerdo a esto pueden ser planares o espaciales y dentro los espaciales se pueden encontrar los robots paralelos esféricos y los traslacionales.

2.2.3.1. Robots Planares

El mecanismo más simple es el de 5 barras, con 2 GDL y un solo lazo cerrado. Formado por 4 eslabones y una base unidos mediante 5 articulaciones rotacionales (5R) como se puede ver en la Figura 11.

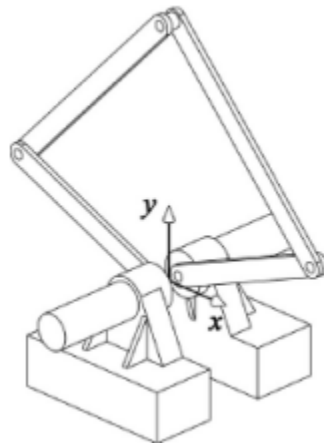


Figura 11: Robot Paralelo Planar

2.2.3.2. Robots Espaciales

Un ejemplo típico es la “Plataforma Stewart” diseñada originalmente por (Stewart, 1965), figura 12 Inicialmente la plataforma fue pensada con 6 GDL, como simulador de vuelo. Actualmente 10 variantes de estos mecanismos son aplicados como máquinas herramienta, dispositivos apuntadores, etc.



Figura 12: Robot Paralelo Espacial, (Plataforma Stewart).

2.2.4. Robot Delta

La idea básica del diseño de robot paralelo Delta es el empleo de paralelogramos, un paralelogramo permite a un eslabón de salida permanecer en orientación fija, con respecto a un eslabón de entrada. El empleo de tres paralelogramos restringe la orientación de la plataforma móvil, que permanece sólo con tres grados de libertad. Los eslabones de entrada de los tres paralelogramos son montados sobre palancas rotativas articuladas: con motores rotacionales o con actuadores lineales. (Tumbaco et.al, 2014)

El robot paralelo tipo Delta, mostrado en la Figura 13, es simétrico, espacial y compuesto por tres eslabonamientos idénticos los cuales conectan la base fija con la plataforma móvil, cuenta con 3 grados de libertad.

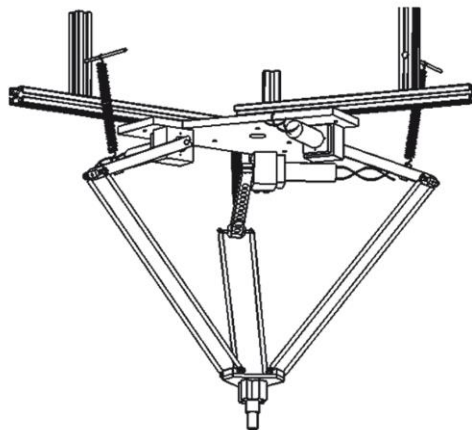


Figura 13: Robot Delta

Al observar las diferentes clasificaciones de robots tomando en cuenta su estructura y configuración, se decide la utilización del “Robot Delta” para el desarrollo del proyecto, pues las ventajas que ofrece son exactamente las que se están buscando, la orientación de la base móvil paralela a la base fija además de tratarse de mecanismos que no son muy robustos y que son bastante rápidos.

2.3. Cinemática de Robots Paralelos

El problema cinemático en un robot es encontrar la relación de la posición del efector final y los ángulos, en el caso del Robot tipo Delta, el análisis cinemático inverso busca encontrar la relación entre la posición de la plataforma móvil. (Peña, 2011)

La cinemática estudia el movimiento de un mecanismo sin tomar en cuenta las fuerzas que lo generan. Aparentemente, es posible imaginar en forma sencilla los movimientos que puede generar un mecanismo, a diferencia de las fuerzas estáticas y dinámicas, que muchas veces no es posible determinar por inspección la forma en que se desarrollan en el mecanismo. Típicamente, la cinemática de un mecanismo se divide en dos: cinemática inversa y la cinemática directa, (Gogu, 2008).

2.3.1. Cinemática Inversa

La cinemática inversa determina las coordenadas articulares de cada actuador para una posición de la plataforma móvil conocida.

Existen varios métodos para el cálculo de la cinemática inversa. En (Bayo et.al, 1994) el autor resuelve la cinemática a partir de las ecuaciones de restricción del mecanismo. Por otro lado se han propuesto métodos para el cálculo de la cinemática inversa: un método analítico y un método geométrico (Merlet, 2006); y Tsai hace una breve comparación entre el método de Denavit-Hartenberg y el método geométrico, (Tsai, 1999). Ambos autores coinciden en que el método geométrico facilita el análisis de la cinemática inversa de mecanismos cuando se componen de un lazo cerrado.

2.3.2. Cinemática Directa

La cinemática directa determina la posición de la plataforma móvil a partir de coordenadas articulares conocidas. Un estudio sobre diferentes métodos para el cálculo de la cinemática directa fue realizado en (Merlet, 1993). En esta investigación se comparan las

ventajas de los métodos iterativos y polinomiales, que son métodos numéricos que requieren cierto tiempo de cálculo para ser realizados. En otras investigaciones se proponen métodos más complejos para calcular la cinemática directa de un mecanismo.

Debido al objetivo general del proyecto en sus tres diferentes etapas se elige trabajar con la cinemática inversa.

2.4. Máquinas Herramienta

2.4.1. Torno

El torno, máquina más antigua, versátil y de mayor uso a nivel mundial, es una máquina herramienta que hace girar la pieza y, por medio de una herramienta, busca dar a la pieza una forma cilíndrica. Los tornos modernos operan a partir del mismo principio básico. La pieza a trabajar se sostiene en un plato y gira sobre su eje, mientras una herramienta de corte avanza sobre las líneas del corte deseado. Con los aditamentos y herramientas de corte adecuadas, en un torno se pueden realizar muchas operaciones de torneado, hacer conos, formados varios, cortar, tronzar, refrentear, taladrar, mandrinar, esmerilar, pulir, roscar y muchas más. (Schwab, 2011)



Figura 14: Torno Convencional

2.4.1.1 Opciones de Centrado en Torno

El plato de tres mordazas ajustables en espiral es un modelo reciente en el diseño de platos de mordazas. Se ajusta fácilmente en pocos minutos para girar centrado dentro de 0.0005 FIM, en inglés Full Indicator Movement (Movimiento total del indicador) en piezas duplicadas, en la Figura 15, se puede ver los elementos principales del plato.

1. El plato ajustable (A) de tres mordazas se asegura a una placa de montaje (B) por medio de tornillos de Allen. El conjunto total se monta al husillo del torno.
2. Existe un piñón (C) en el cuerpo del plato que se usa para mover las mordazas (D) hacia adentro o hacia afuera para sujetar la pieza de trabajo.
3. En el cuerpo del plato de mordazas se reporta un conjunto de cuatro tornillos Allen (E), que se emplean para cambiar el plato (A) y la pieza de trabajo a la alineación requerida.
4. Para mover el plato y el trabajo hacia arriba, afloje el tornillo (E) del fondo y apriete el tornillo (E) de la parte superior.

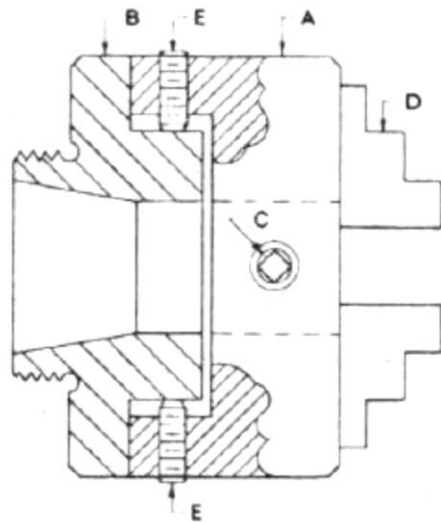


Figura 15: Plato de 3 Mordazas

5. (Ivanacal, 2012) Seleccione una barra de prueba redonda que se haya rectificado y con diámetro cercano al diámetro del trabajo.
6. Limpie las mordazas del plato y la barra (F) de prueba e inserte esta última en el plato del torno de tal manera que 1 pulgada de la barra de prueba como mínimo haga contacto con las mordazas del plato.
7. Introduzca la llave del plato (G) de la cavidad (C) del piñón y apriete las mordazas del plato sobre la barra de prueba.



Figura 16: Colocación de la Pieza (3 Mordazas)

8. Asegure un probador (H) con indicador de caratula en un portaherramientas del torno y ajuste el indicador y el punto (J) a una posición horizontal como se ilustra.
9. Ajuste el husillo del torno en posición neutral, de manera que el husillo se pueda girar con la mano. .
10. Ajuste el punto (J) de manera que toque ligeramente el punto alto sobre la barra (F) de prueba, aproximadamente a 1/2 pulgada de la mordaza del plato, como en la Figura 17.
11. Ajuste y fije el indicador a fin de dar ± 0.010 de carrera en el brazo del indicador y gire el indicador a cero.

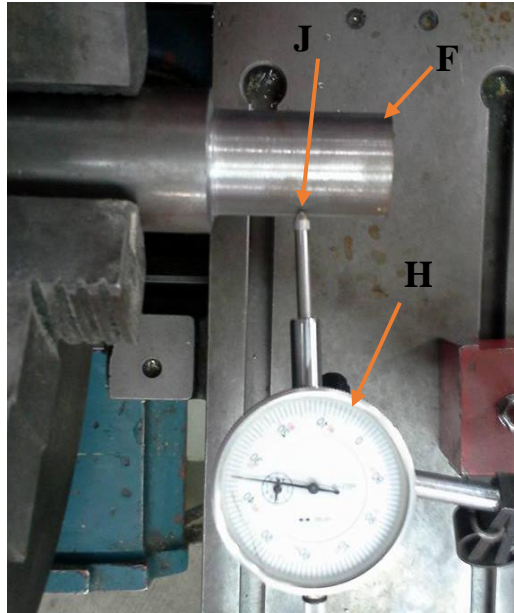


Figura 17: Primer ajuste con Indicador de Carátula (3 Mordazas)

12. Gire manualmente el plato hasta que el brazo del indicador se mueva en el sentido de las manecillas del reloj, hasta el punto de máxima lectura del indicador.
13. Afloje 1/8 de vuelta el tornillo (E) que está cerca de la punta del indicador; apriete el tornillo (E) del lado opuesto.
14. Gire de nuevo el plato para encontrar el punto de lectura máxima y afloje 1/8 de vuelta el tornillo (E) que está cerca de la punta del indicador; apriete el tornillo (E) del lado opuesto.
15. Ajuste como se explicó anteriormente hasta que el movimiento del brazo del indicador esté dentro de 0.001 FIM. Apriete todos los tornillos de ajuste (E) y revise de nuevo la excentricidad de la barra de prueba.



Figura 18: Ajuste final con Indicador de Carátula (3 Mordazas)

En un plato de cuatro mordazas independientes, cada una se puede ajustar de manera independiente, lo que permite centrar el trabajo dentro de 0.001 FIM (Movimiento total del indicador). Las mordazas también se pueden invertir para facilitar la sujeción del trabajo tanto por el diámetro interno como por el diámetro externo.

1. El plato de cuatro mordazas no tiene espiral para mover todas las mordazas al mismo tiempo hacia dentro o hacia afuera.
2. En un plato de torno de cuatro mordazas, cada una se puede mover de forma independiente. Por esta razón se llama plato de cuatro mordazas independientes.
3. Las mordazas de un plato de torno se pueden invertir para sujetar piezas que tengan diámetros mayores como se muestra en la Figura 19.
4. Las mordazas de un plato de cuatro mordazas se ajustan para sujetar piezas cuadradas o con formas irregulares, así como piezas de trabajo redondas.

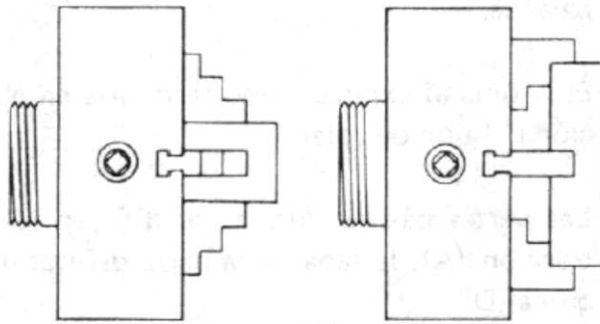


Figura 19: Mordazas Independientes

5. En la industria se emplean diversos métodos para centrar piezas redondas en un plato de cuatro mordazas. El método del indicador de carátula es el que se explicará a continuación.
6. Las mordazas (A) del plato se montan en el cuerpo del plato (B) como se muestra en (Figura 20), para trabajos con diámetros pequeños.
7. Ajuste el husillo del torno en posición neutral y fije las mordazas (A) a un diámetro ligeramente mayor al de la pieza de trabajo.
8. Utilice los anillos (C) maquinados de manera concéntrica en la cara del plato, como una guía para acomodar las cuatro mordazas a igual distancia del centro del plato.

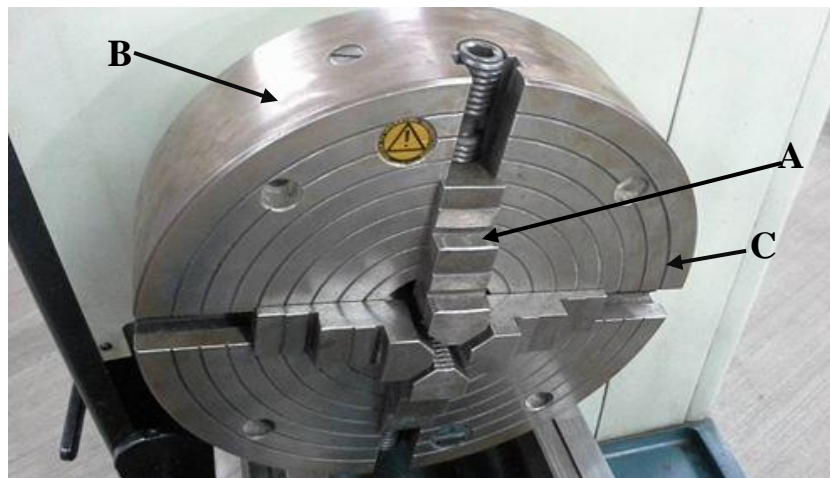


Figura 20: Plato de Mordazas Independientes

9. Las mordazas que se utilizan en un plato de cuatro mordazas tienen resaltes en las superficies de agarre para una mejor sujeción.
10. Monte la pieza (D) en un plato (B) utilizando una pieza de aluminio (E) con un espesor de 1/16 de pulgada entre la pieza de trabajo y cada mordaza del plato a fin de proteger las superficies críticas.
11. Apriete las mordazas del plato (F) en forma uniforme y coloque el indicador de carátula (G) en un portaherramientas del torno.
12. Ajuste el punto (H) de tal forma que toque ligeramente el punto más alto de la pieza de trabajo a 1/2 pulgada de la mordaza del plato. Ajuste el indicador para el máximo de carrera del brazo y fije el indicador a cero.

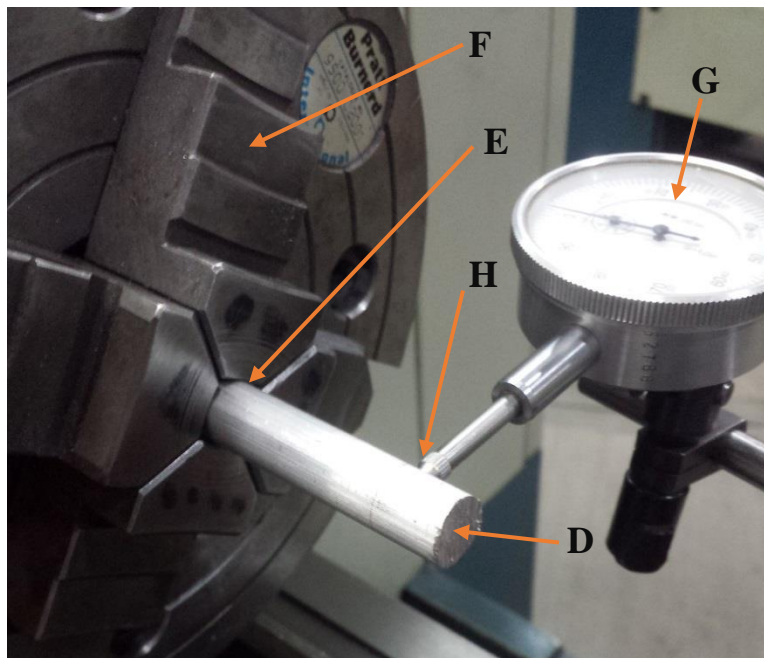


Figura 21: Colocación de la Pieza (4 Mordazas).

13. Gire manualmente el plato de mordazas hasta que el brazo del indicador se mueva en sentido contrario al de las manecillas del reloj y llegue a la medida más baja en el indicador de carátula.
14. Afloje 1/8 de vuelta el piñón (J) más cercano al punto del indicador y apriete el piñón del lado opuesto.

15. Gire nuevamente el plato de mordazas para encontrar el punto más bajo y afloje aproximadamente 1/8 de vuelta el piñón (J) más cercano al punto del indicador. Apriete el piñón del lado opuesto.
16. Ajuste como se explicó anteriormente hasta que la excentricidad total esté dentro de 0.001 FIM. Apriete los cuatro piñones (J) y verifique de nuevo que el movimiento total del indicador sea de 0.001.

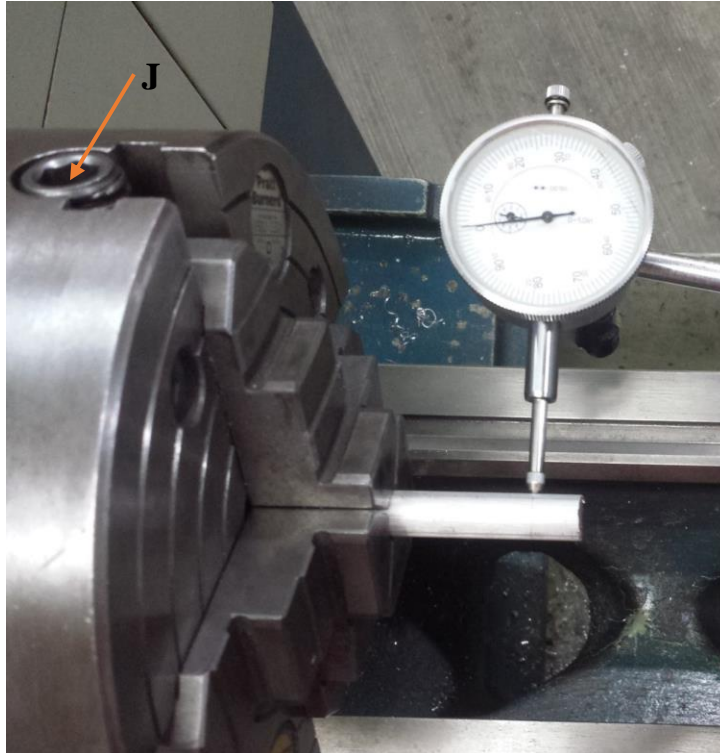


Figura 22: Ajuste Final con Indicador de Carátula (4 Mordazas)

2.4.2. Fresa

Las máquinas fresadoras son máquinas herramientas que se utilizan para producir con precisión una o más superficies mecanizadas sobre una pieza. Su versatilidad convierte a las fresadoras en la segunda máquina herramienta de mecanizado de mayor consumo y utilización en el mundo entero. (Schwab, 2011)



Figura 23: Máquina Fresadora

2.5. Actuadores

Un actuador es aquel dispositivo que tiene la finalidad de transformar cierto tipo de energía en un proceso automatizado. Dicha energía puede ser hidráulica, neumática o eléctrica. (www.quiminet.com).

El trabajo y los procesos que realiza un actuador puede ser lineal, rotativo, o combinado y su selección dependerá del tipo de trabajo que se requiera realizar, por lo tanto se puede elegir de entre varios tipos de actuadores como por ejemplo:

- Actuadores Electrónicos
- Actuadores Hidráulicos
- Actuadores Neumáticos
- Actuadores Eléctricos

2.5.1. Actuadores Eléctricos

Se le da el nombre de actuadores eléctricos cuando se usa la energía eléctrica para que el robot ejecute sus movimientos. Los actuadores eléctricos se utilizan para robots de tamaño mediano, pues éstos no requieren de tanta velocidad ni potencia como los robots

diseñados para funcionar con actuadores hidráulicos o neumáticos. Los robots que usan la energía eléctrica se caracterizan por una mayor exactitud y repetitividad.

Son los más utilizados en los robots industriales en la actualidad, pero no solo ahí sino también en el entorno de la investigación y la enseñanza y por supuesto en domótica. Existen multitud de motores eléctricos siendo su campo de aplicación realmente extenso pues podemos encontrarlos en los sitios más diversos.

2.5.2. Actuadores Neumáticos

En ellos la fuente de energía es aire a presión entre 5 y 10 bar. En general y debido a la compresibilidad del aire, los actuadores neumáticos no consiguen una buena precisión de posicionamiento. Sin embargo, su sencillez y robustez hacen adecuado su uso en aquellos casos en los que sea suficiente un posicionamiento en dos situaciones diferentes (todo o nada). Por ejemplo, son utilizados en manipuladores sencillos, en apertura y cierre de pinzas o en determinadas articulaciones de algún robot (como el movimiento vertical del tercer grado de libertad de algunos robots tipo SCARA).

2.5.3. Actuadores Hidráulicos

Este tipo de actuadores no se diferencia mucho de los neumáticos. En ellos, en vez de aire se utilizan aceites minerales a una presión comprendida normalmente entre los 50 y 100 bar, llegando en ocasiones a superar los 300 bar. Existen, como en el caso de los neumáticos, actuadores del tipo cilindro y del tipo motores de aletas y pistones.

Sin embargo, las características del fluido utilizado en los actuadores hidráulicos marcan ciertas diferencias con los neumáticos. En primer lugar, el grado de compresibilidad de los aceites usados es considerablemente menor al del aire, por lo que la precisión obtenida en este caso es mayor.

Por otra parte, este tipo de actuadores presenta estabilidad frente a cargas estáticas. Esto indica que el actuador es capaz de soportar cargas, como el peso o una presión ejercida sobre una superficie.

2.6. Softwares de diseño

La aplicación de programas de diseño asistido por computadora (CAD, por sus siglas en inglés), permite aumentar la eficiencia en los procesos de diseño y dibujo mecánico, en los aspectos de facilidad de uso, ahorro de tiempo y formación de librerías para intercambio.

2.6.1. AutoCAD

AutoCAD es un programa que por sus características de adaptabilidad a las tareas de usuarios específicos, su gran diversidad de comandos y herramientas y su estructura de arquitectura abierta, se ha convertido en el instrumento indispensable para quienes efectúan su trabajo por medio del manejo de gráficos. El dominio adecuado de las herramientas de AutoCAD permitirá a los participantes mejorar sus habilidades, optimizar tiempos de ejecución y aumentar la calidad de su trabajo.

La versatilidad de este software lo ha convertido en un estándar general que permite:

- Dibujar de una manera ágil, rápida y sencilla, con acabado perfecto y sin las desventajas que encontramos si se ha de hacer a mano.
- Permite intercambiar información no solo por papel, sino mediante archivos, y esto representa una mejora en rapidez y efectividad a la hora de interpretar diseños, sobretodo en el campo de las tres dimensiones.
- Es importante en el acabado y la presentación de un proyecto o plano, ya que tiene herramientas para que el documento en papel sea perfecto, tanto en estética, como, lo más importante, en información, que ha de ser muy clara.



Figura 24: Software AutoCAD

2.6.2. INVENTOR

Autodesk Inventor es un programa desarrollado por Autodesk desde 1999, el cual ha tenido como principal objetivo, convertirse en el mejor software de diseño mecánico e industrial en 3D para plataforma Windows. Entre sus principales características se encuentra: Diseño de sólidos paramétricos de gran complejidad, Manejo de ensamblajes de más de 1000 componentes, Creación de Presentaciones y despieces, Generación automática de planos de fabricación, Manejo de Tecnología Adaptable, Módulo de Soldadura 3D, Módulo de Doblado de lámina, Módulo para animación mecánica y foto-realismo, entre muchas características que lo convierten en una herramienta de gran poder. (Leija, 2012).

Los productos Autodesk Inventor son fáciles de aprender y utilizar, además ofrecen características que contribuyen al diseño en ingeniería, tales como:

- Constituyen una gama flexible de herramientas para diseño mecánico en 3D, productividad de CAD, comunicación de diseños, simulación de productos, sistemas enrutados y diseño de moldes.
- El software de CAD 3D Inventor le permite integrar los dibujos 2D de AutoCAD y los datos 3D en un modelo digital único, para crear una representación virtual del producto final con la que validar la forma, el ajuste y la función del producto antes de fabricarlo.

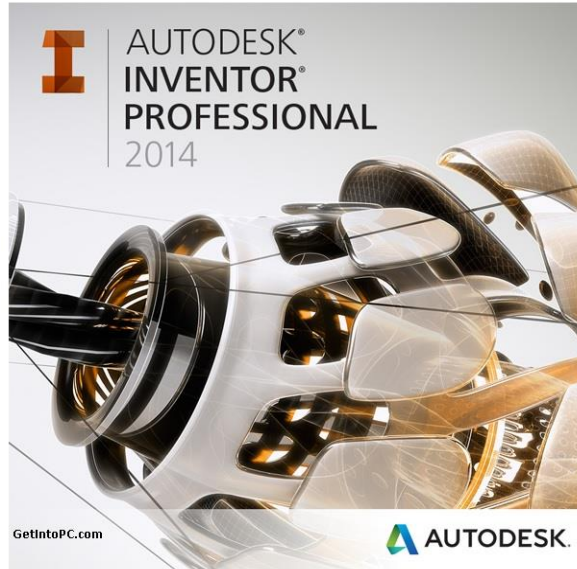


Figura 25: Software Inventor Autodesk

CAPÍTULO III

2. Metodología

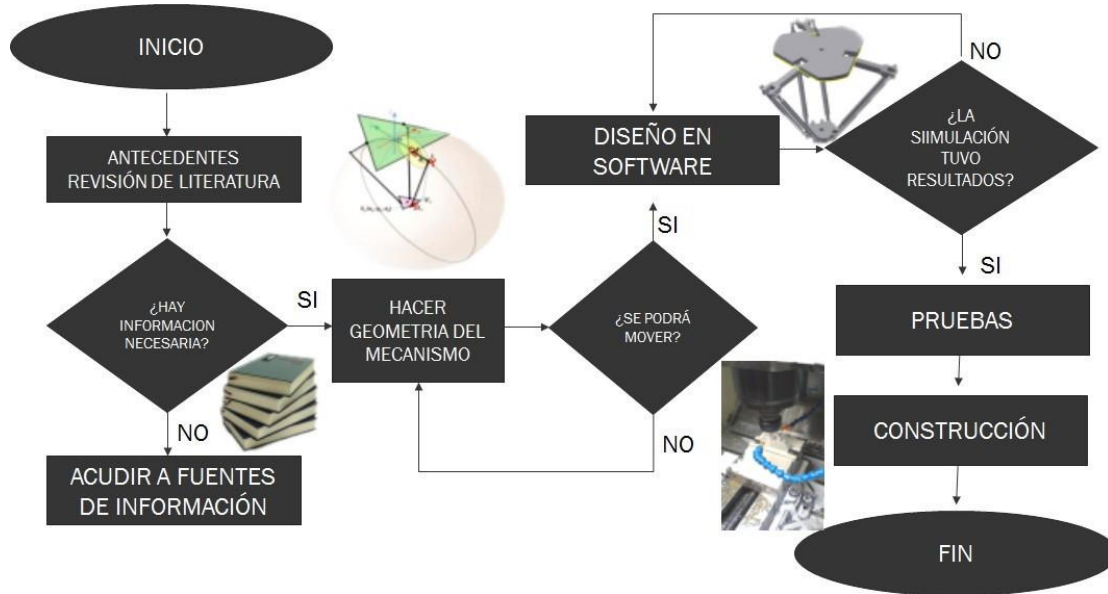


Figura 26: Metodología.

En este capítulo se registran los pasos que se irán teniendo en el proyecto, donde se utilizarán los conceptos anteriormente vistos, cada uno de los cuales tienen un fin específico para llevar a cabo el desarrollo teórico y práctico de esta unidad.

Para tener una idea clara se comienza con las ecuaciones de movimiento, es decir la configuración que tendrá el mecanismo para llevar a cabo las acciones que se requieran, una vez que se obtiene la configuración del robot se pueden saber los parámetros de diseño del mecanismo y los alcances del mismo.

3.1. Cinemática de mecanismo delta

3.1.1. Cinemática inversa

Por el propio diseño del mecanismo se cuenta con una plataforma delta “triángulo” en donde se encuentran dispuestos 3 actuadores mecánicos los cuales se encuentran ubicados de manera perpendicular con el eje en el que se encuentran, cada uno con un brazo acoplado.

Por el diseño del mecanismo la articulación F_1J_1 solo se puede rotar en el plano YZ formando una circunferencia en el punto F_1 y con radio r_f . Por el contrario F_1, J_1 y E_1 son las llamadas articulaciones universales, lo que significa que E_1J_1 pueden rotar libremente en relación al punto E_1 , formando una esfera con centro en E_1 y radio r_e , tal y como se puede observar en la Figura 27.

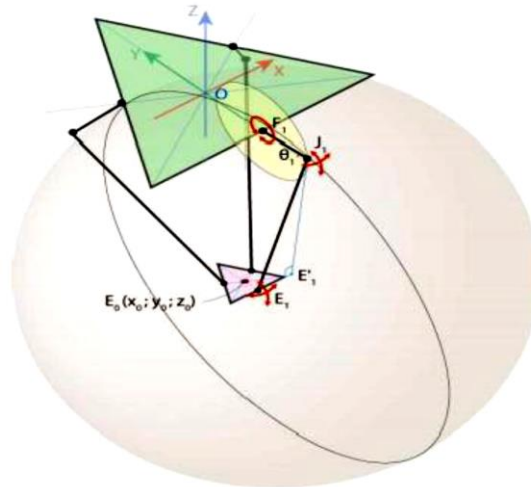


Figura 27: Articulación F1J1

La intersección de la circunferencia y la esfera se produce en dos puntos, se toma como solución el punto con menor valor en la coordenada Y. Al determinar la posición del punto J_1 se puede obtener el ángulo θ_1 del actuador, en la Figura 28. Se presentan los parámetros geométricos para el cálculo de las coordenadas

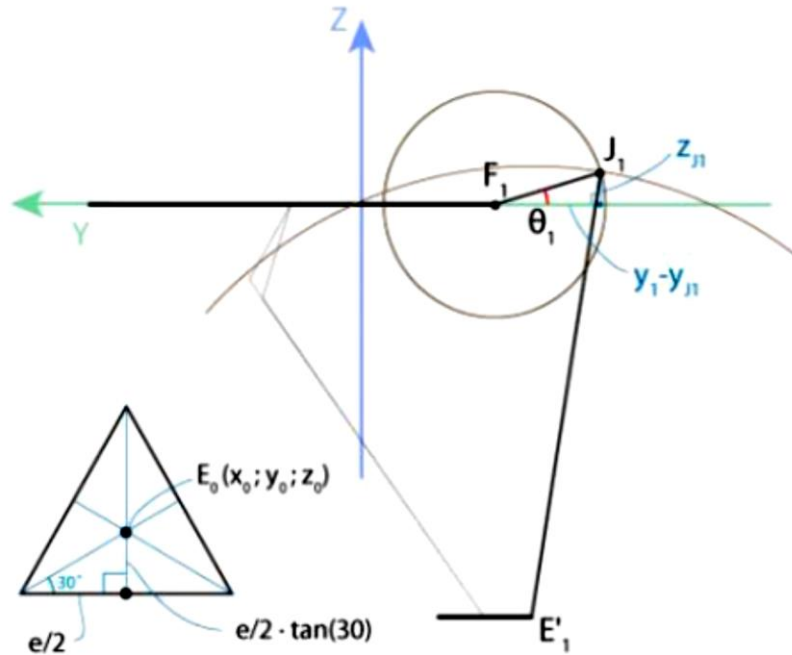


Figura 28: Vista Lateral Para Análisis Geométrico

Sabiendo que se trata de un triángulo equilátero cuyas longitudes de sus lados son iguales y los ángulos internos también, se puede conocer la posición del punto F_1 que servirá para obtener de manera geométrica el valor del ángulo θ_1 .

Coordenadas del punto E_0, F_1, E'_1 .

Primero se realiza la sustitución para obtener las coordenadas de los puntos E'_1, J_1 en el eje Y. Por lo tanto sustituimos los valores siguientes:

$$L_1 = Y_{F_1} = \frac{e}{2\sqrt{3}}; \quad L_2 = Y_{E'_1} = \frac{f}{2\sqrt{3}}$$

Dónde:

e = longitud de los lados del triángulo equilátero de la plataforma fija.

f = longitud de los lados del triángulo equilátero de la plataforma móvil.

Con los datos anteriores se tienen las coordenadas de la siguiente manera:

$$E_0(x_0, y_0, z_0); \quad F_1(0, -L_1, 0); \quad E'_1(0, y_0 - L_2, z_0)$$

Con las coordenadas de los puntos, se plantea un sistema de dos ecuaciones no lineales que permiten encontrar la posición del punto J1, con la cual se puede calcular el ángulo que forma el brazo con el plano horizontal Y, obteniendo así la solución esperada.

Para este sistema de ecuaciones relacionamos las coordenadas de los movimientos que tendrá el mecanismo en sus ejes de acción, es decir la circunferencia que forma en el plano YZ y la esfera que por supuesto tiene coordenadas en XYZ. Por lo cual, se recurre a las ecuaciones cartesianas de la circunferencia y la esfera.

Sistema de ecuaciones:

$$(y_{J1} + \frac{f}{2\sqrt{3}})^2 + z_{J1}^2 = r_f^2 \quad (3.1)$$

$$(y_{J1} - y_0 + \frac{e}{2\sqrt{3}})^2 + (z_{J1} - z_0)^2 = r_e^2 - x_0^2 \quad (3.2)$$

Resolviendo este sistema de ecuaciones, se llega a la siguiente ecuación cuadrática (3.3) que sirve para obtener la solución.

$$ay_{J1}^2 + by_{J1} + c = 0 \quad (3.3)$$

Dónde los valores de a, b y c son:

$$a = (1 + \frac{L_1 - y_0 + L_2^2}{z_0})$$

$$b = (2 \left(\frac{L_1 - y_0 + L_2}{z_0} \right) \left(\frac{r_e^2 - x_0^2 - z_0^2 - r_f^2 - L_1^2}{2z_0} \right) - 2L_1)$$

$$c = \left(\frac{r_e^2 - x_0^2 - z_0^2 - r_f^2 - L_1^2}{2z_0} \right) - L_1^2 - r_f^2$$

De la cual obtenemos dos valores, pero uno de ellos solo tiene sentido cuando el argumento de la raíz cuadrada es positivo, de las dos posibles soluciones se toma la menor de las dos. El valor del ángulo del brazo 1 se calcula con la ecuación 3.4.

$$\theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{z_{J1}}{y_{F1}-y_{J1}}\right) \quad (3.4)$$

Para los otros brazos se usa la matriz de rotación con un ángulo de 120° para el brazo 2 y 240° para el 3. Esta matriz de rotación permite girar el sistema de coordenadas de manera que se pueda usar la solución descrita para el cálculo de los restantes ángulos.

Lo primero es rotar el sistema en el plano XY 120° alrededor del eje z en sentido anti-horario, Figura 29.

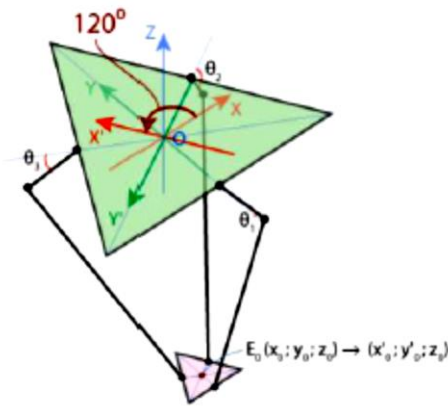


Figura 29: Rotación del sistema de referencia.

Para obtener las ecuaciones de rotación en base al sistema de referencia se utiliza la matriz de rotación para dos dimensiones.

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Para rotar vectores columna se multiplica el vector por la matriz de rotación, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

En base a la ecuación (3.6) se obtienen las coordenadas respecto al eje de referencia inicial:

$$x' = x \cos(120) + y \sin(120)$$

$$y' = -x\sin(120) + y\cos(120)$$

Esto da un nuevo sistema de referencia $X'Y'Z'$ y en este sistema de referencia se encuentra θ_2 utilizando el mismo algoritmo que para θ_1 . El único cambio que se necesita hacer es determinar las nuevas coordenadas x'_0 y y'_0 para el punto E_0 , esto se puede hacer fácilmente aplicando la correspondiente matriz de rotación.

Para encontrar θ_3 hay que rotar el sistema de referencia en sentido horario y realizar el mismo proceso.

3.2. Diseño del Sistema Mecánico

3.2.1. Parámetros del Diseño

Para el diseño de cada una de las partes que conforman el mecanismo es necesario tomar en cuenta los parámetros principales, como son el material y las dimensiones que se necesitan para el adecuado funcionamiento del proyecto.

3.2.2. Material a Utilizar

El material a utilizar en el mecanismo debe cumplir con ciertas características, debido a los momentos de inercia que se generan por cada movimiento que se realiza, por lo tanto, para disminuir el momento de inercia de manera considerable el material debe ser ligero.

Además de ser ligero, el material debe tener una muy importante resistencia a la deformación, debido a los esfuerzos presentes por el hecho de llevar una carga.

Otro parámetro muy importante para tomar en cuenta es la maquinabilidad del material, pues este debe de ser mecanizado por arranque de viruta con las máquinas-herramienta que se tienen en el taller de la Facultad.

En resumen, el material debe de tener las siguientes características:

- Bajo Peso
- Resistente
- Maquinable

El material que cuenta y que cumple con las características deseadas son el Aluminio por su bajo peso, el cual se utilizará para la estructura principal del mecanismo, que es donde se

generan los movimientos. En cuanto a la plataforma para la estabilidad y del mecanismo se utilizará un material como el acero.

Para tener una idea más clara acerca de los materiales que se deciden utilizar, se hace una pequeña descripción de los mismos.

Aluminio: este material es un metal no ferroso, posee propiedades que lo hacen muy útil en la ingeniería mecánica, como su baja densidad y su alta resistencia a la corrosión y se mecaniza con facilidad es el metal que más se utiliza después del acero.

Acero: El acero es la aleación de hierro y carbono muy resistente, tiene su densidad casi 3 veces mayor al aluminio.

Tabla 1: Propiedades de los Materiales

Material	Densidad (g/cm^3)	Módulo de elasticidad [GPa]
Acero	7.85	200
Aluminio	2.7	68.9

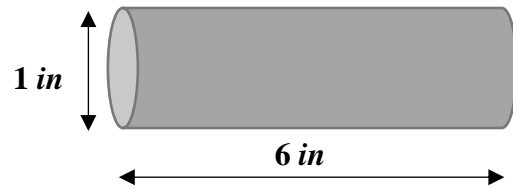
3.2.3. Cálculos Para Diseño del Mecanismo

Se desarrollará un análisis de esfuerzos principalmente en la parte del mecanismo que se espera tenga un mayor trabajo con el fin de verificar que las dimensiones que se utilizarán son las adecuadas para llevar acabo el diseño del mecanismo.

Para ello se realiza un simple cálculo de esfuerzo por sobrecarga el cual tiene la característica de ser variable, según el material que se vaya a colocar en el mecanismo.

Consideraciones:

Suponiendo que se tiene una barra de acero de 1 in de diámetro por 6 in de largo, se calcula el volumen de la pieza con la ecuación (3.7).



$$V = A * l \quad (3.7)$$

Dónde:

$V = \text{Volumen de la pieza}$

$A = \text{Área de la sección transversal}$

$l = \text{Longitud de la pieza}$

De esta manera sustituyendo los valores en la ecuación (3.7), se obtiene el siguiente resultado:

$$(\pi 0.5^2)(6) = 4.712 \text{ in}^3 = 77.215 \text{ cm}^3$$

Se sabe que la densidad del acero es: 7.85 g/cm^3 , entonces la masa de una barra como la que se propone queda en términos de la siguiente ecuación:

$$m = \rho V \quad (3.8)$$

Donde:

$m = \text{Masa total de la pieza}$

$\rho = \text{Densidad del Aluminio}$

$V = \text{Volumen total de la pieza}$

Ahora, sustituyendo los valores en la ecuación (3.8), se obtiene la masa total de la pieza a maquinar.

$$m = \left(7.85 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right) (77.215 \text{ cm}^3) = 606.13 \text{ g} = 0.606 \text{ Kg}$$

Con la masa que se supone es el máximo peso que soportara el mecanismo se realiza un análisis de esfuerzo, con las siguientes características:

- Brazo de palanca (Barra de Aluminio)

- Peso Máximo 0.606 Kg
- Flexión pura
- Factor de seguridad (n=2)
- Resistencia a la fluencia para el aluminio (S= 55 Mpa)
- $Z = ?$ (Módulo de sección)

Dónde se supone hay una fuerza actuando en el extremo de la barra debido al peso del material, el cual se calcula con la siguiente ecuación

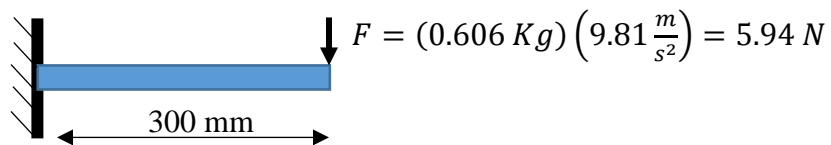
$$F = ma \quad (3.9)$$

Dónde:

$$m = \text{Masa del Material (Kg)}$$

$$a = \text{Aceleración de la gravedad } \left(\frac{m}{s^2}\right)$$

Sustituyendo los datos en la ecuación (3.9), se llega al siguiente resultado:



$$F = (0.606 \text{ Kg}) \left(9.81 \frac{m}{s^2}\right) = 5.94 \text{ N}$$

Debido a que se trata de 6 barras las que sostendrán el peso, se divide la fuerza entre seis.

$$\frac{F}{6} = 0.99 \text{ N}$$

Cálculo del momento máximo en términos de la siguiente ecuación:

$$M_{max} = F * d \quad (3.10)$$

Donde:

$$M_{max} = \text{Momento Maximo}$$

$$F = \text{Fuerza ejercida sobre la barra}$$

$$d = \text{Distancia de la barra}$$

Sustituyendo valores en la ecuación (3.10).

$$M_{max} = (0.99N)(0.3 m) = 0.297 N \cdot m$$

$$\sigma = \frac{M_{max}}{Z} \quad (3.11)$$

$$n = \frac{S}{\sigma} \quad (3.12)$$

Despejando Z de la ecuación (3.11) y σ de (3.12) para obtener el módulo de la sección circular de la barra.

$$Z = \frac{(M_{max}) * (n)}{S} = \frac{(0.297 N \cdot m) * (2)}{55Mpa} = 1.18 \times 10^{-8} m^3$$

Se sabe que el módulo (Z) de una sección circular es:

$$Z = \frac{\pi}{32} d^3 \quad (3.13)$$

Despejando d de la ecuación (3.13), se obtiene:

$$d = \sqrt[3]{\frac{Z * 32}{\pi}} = \sqrt[3]{\frac{1.18 \times 10^{-8} m^3 * 32}{\pi}} = 4.94 \times 10^{-3} m = \mathbf{4.94 mm}$$

El diámetro mínimo permitido es de **4.94 mm** para cada una de las 6 barras que serán diseñadas, sin embargo debido a los diámetros comerciales de las juntas esféricas (6 mm) se decide utilizar un diámetro de ½” para las barras secundarias, en las cuales serán acopladas dichas juntas esféricas, a su vez se hacen los cálculos correspondientes de forma inversa a las ecuaciones anteriores para obtener el peso máximo antes de una deformación en el material.

3.2.4. Dimensiones del Mecanismo

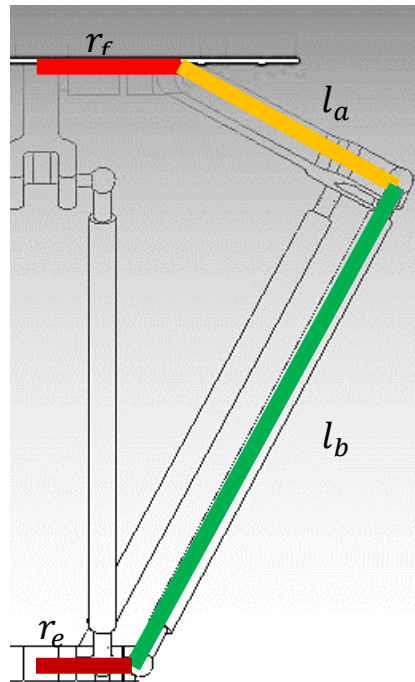


Figura 30: Dimensiones del Mecanismo

Elemento	Símbolo	Dimensión (mm)
Radio Base Fija	r_f	112.5
Radio Base Móvil	r_e	35
Longitud Brazo 1	l_a	137.863
Longitud Brazo 2	l_b	300

Tabla 2: Dimensiones del Mecanismo

3.2.5. Diseño de la Estructura Principal del Mecanismo Delta

La estructura principal es donde se encuentran todas las partes móviles del mecanismo, las cuales van acopladas a los actuadores mecánicos que se encuentran estables en la plataforma fija.

El diseño de cada parte del mecanismo son ideas a partir de robots ya realizados, como el robot NUWAR desarrollado en la Universidad Western Australia, el robot Delta IRB 340 un robot industrial de estándar internacional fabricado por ABB.

El diseño de cada parte que conforma el mecanismo se describe a continuación.

- **Plataforma Fija:** Es la pieza donde se acoplan los servomotores, los brazos principales, la plataforma móvil y el efector final. Además esta parte se acopla a la base o estructura secundaria hecha de acero para mantener estático al mecanismo. Figura 31.

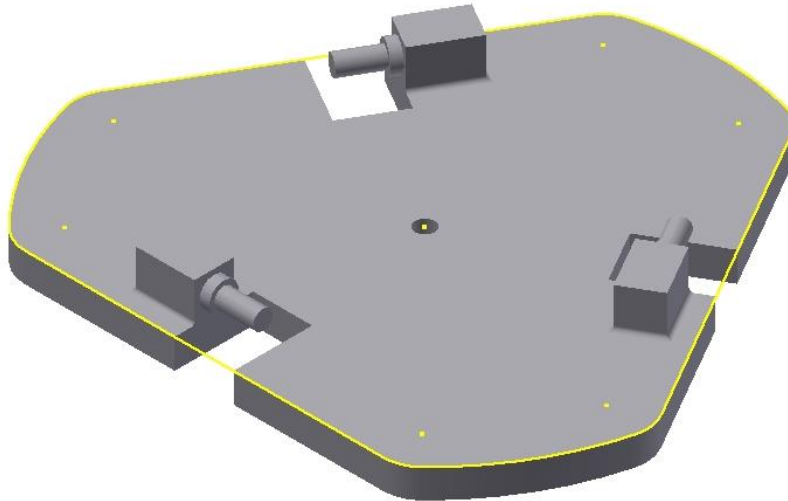


Figura 31: Plataforma Fija

- **Brazos principales:** Son las piezas que reciben los movimientos de los actuadores mecánicos (servomotores) por ello deben de tener un acoplamiento del brazo con el servo. Esta pieza debe de ser ligera y tener resistencia a la deformación. Además de tener un acople para las juntas esféricas (ball joint) que transmiten el movimiento a los antebrazos. Figura 32.

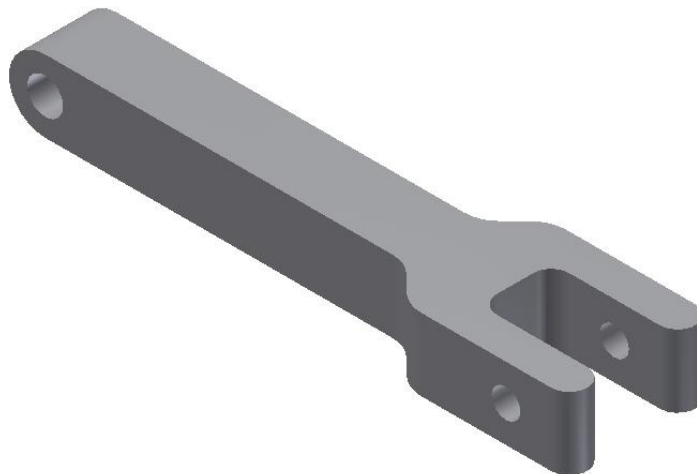


Figura 32: Brazos Principales

- **Plataforma móvil:** Debe de ser ligera, es la parte en donde se coloca el efector final que el usuario requiera, es triangular al igual que la plataforma fija para poder adaptarse a los antebrazos. (Figuras 34-36).

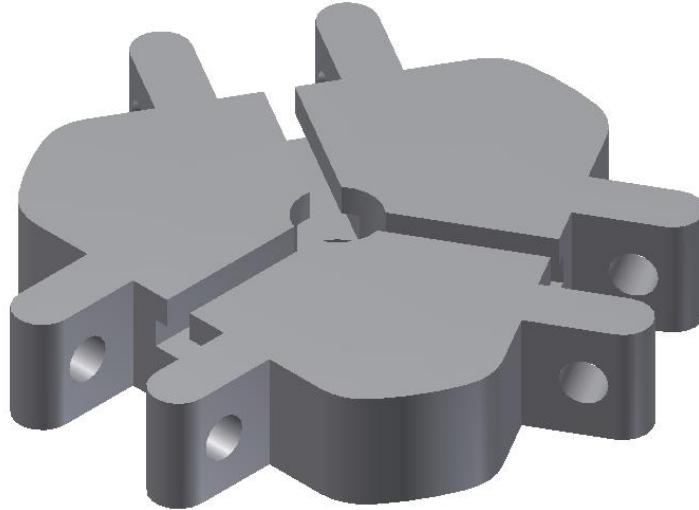


Figura 33: Plataforma Móvil

- **Antebrazos:** Los antebrazos están conformados por dos barras de aluminio y en cada extremo de la misma se encuentra acoplada una junta esférica las cuales son fabricadas por las complicaciones que conllevan, se encuentran en el mercado y son fáciles de conseguir, se encuentran en tamaños comúnmente usados. En las siguientes figuras se puede observar cómo están conformados los antebrazos.



Figura 34: Barra de Aluminio.



Figura 35: Junta Esférica o Rotula.



Figura 36: Antebrazo.

Finalmente con las piezas diseñadas, se hace un ensamble dentro del *Software Inventor*, para visualizar el armado del mecanismo, en la Figura 37, se puede observar dicho ensamble.

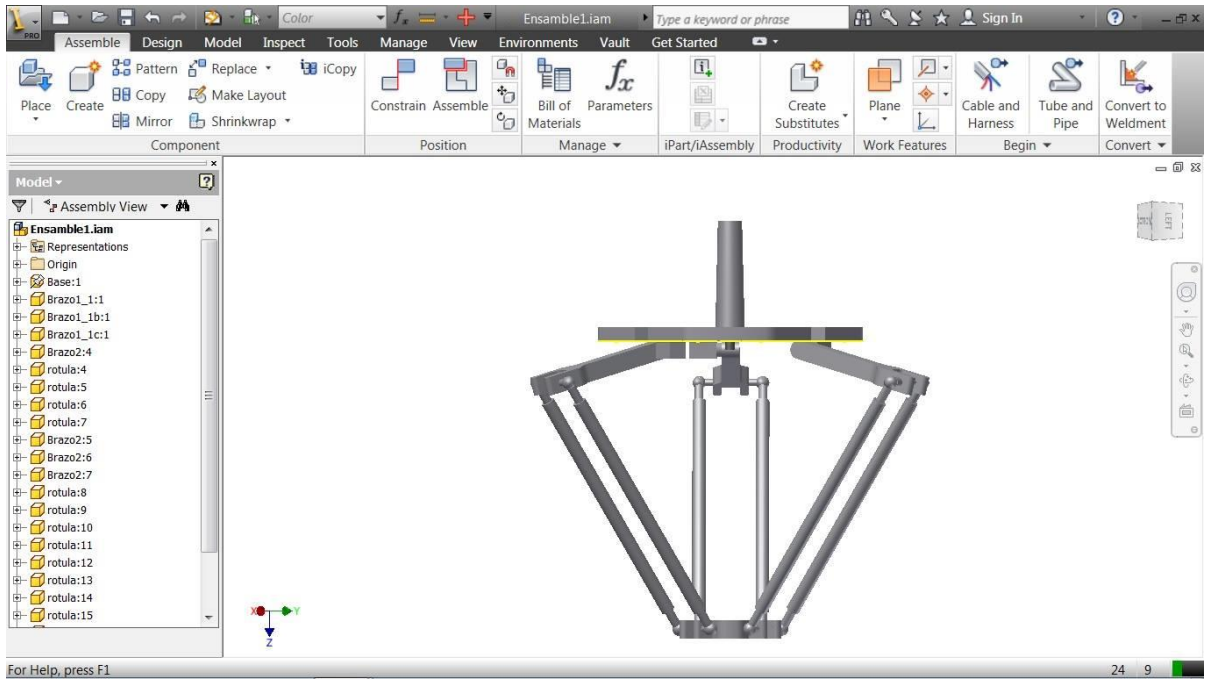


Figura 37: Mecanismo Paralelo Tipo Delta Diseño en Software

CAPÍTULO IV

4. Resultados y Conclusiones

Este capítulo muestra los resultados del proyecto, aquí se presenta la construcción de cada uno de los diseños del mecanismo delta, además de registrar las conclusiones que se obtuvieron al momento de tener el modelo físico del mecanismo, las restricciones con las que tenía que cumplir y detallar los alcances tecnológicos a los que puede ser objeto dicho mecanismo.

4.1. Construcción del mecanismo

4.1.1. Construcción de la Estructura Principal

Ahora bien, en base a los diseños anteriormente señalados, se comienza con la construcción del mecanismo delta, por lo cual se utiliza maquinaria CNC para la fabricación de todas y cada una de las piezas.

Los materiales a utilizar anteriormente señalados, tienen dimensiones un tanto superiores a las propuestas por los diseños antes descritos, para facilitar trabajos de desbaste y corte de las piezas.

4.1.2. Bases del Mecanismo

La construcción de las bases se realiza en una sola placa de aluminio que contuviera las dimensiones de ambas bases, fija y móvil. Con maquinaria CNC propia de la Universidad Autónoma de Querétaro, se hacen los debidos procedimientos para poder maquinar las piezas del mecanismo delta.

Para ello fue necesario el uso de los siguientes materiales:

- CNC DYNA-DM4322
- Placa de Aluminio
- Cortadores
- Madera
- Herramienta para DYNA-DM4322

En cuanto a la base fija (Figura 38) no hubo problemas en el maquinado, debido a que se podía trabajar en una sola posición, no así en el plataforma móvil (Figura 39), la cual se tenía que barrenar de forma perpendicular a la posición inicial, sin embargo al ver la complejidad que esta acción requería se vio la necesidad de barrenar fuera de la CNC, con un taladro industrial ó también llamado de banco.



Figura 38: Plataforma Fija.



Figura 39: Plataforma Móvil.

4.1.3. Brazos Principales

La construcción de los brazos principales también requirió de una sola barra en aluminio para cubrir con la totalidad de los brazos (3). Al igual que los procedimientos anteriores, los cortes se hicieron en una sola dirección para que facilitara el trabajo, Figura 38. En estas piezas también se hicieron barrenos perpendiculares a la posición inicial por lo cual también se hizo uso del taladro industrial, Figura 41.



Figura 40: Brazos Principales.



Figura 41: Barrenos Brazos Principales.

4.1.4. Brazos Secundarios

Los brazos secundarios, debido a que se trata de barras circulares pudieron ser maquinadas en el torno convencional, para una mayor precisión se utilizó un torno de mordazas independientes con un ajuste fino para que la pieza se encontrara totalmente nivelada, se comenzó con el desbaste y posterior a ello se hicieron las debidas cuerdas de $\frac{1}{4}$ ", para que se adaptaran a las juntas esféricas las cuales fueron adquiridas por un proveedor externo, como ya se mencionó es muy complejo maquinas en máquinas convencionales como las que se encuentran en la Institución (UAQ).



Figura 42: Antebrazos y Rótulas.

4.1.5. Soporte para Torno

Para llevar a cabo las actividades a fin del proyecto, era necesario construir un soporte que se adaptará a las necesidades del proyecto, para ello se hace el maquinado del soporte en forma de cono morse para poder adaptarlo en el contrapunto de un torno convencional.

Para la construcción de este soporte se utiliza acero *cold rolled*, debido a que se adapta mejor a las necesidades, además, como se trata de un soporte que será removido en diversas ocasiones, se necesita un material que pueda conservar sus propiedades, tratándose de un soporte con cuerda en el extremo para situar allí el mecanismo delta, Figura 43.



Figura 43: Soporte para Torno.

4.2. Mecanismo Paralelo Tipo Delta

Finalmente, con todas las piezas listas, se ensambla el mecanismo paralelo tipo delta paso por paso, como lo indica el siguiente procedimiento:

1. Unir los antebrazos con las rótulas, y verificar que ambos extremos tengan la misma orientación, además de que la medida de todos los antebrazos sea la misma, esto debido a que la cuerda que tienen los antebrazos en los extremos hace que al apretar las rótulas, éstas no coincidan en la misma orientación y por tal motivo se tienen que ajustar, tanto en orientación como en dimensión, Figura 44.



Figura 44: Ensamble Antebrazo y Rótula.

2. Unir los antebrazos con los brazos principales, además de fijar bien las tuercas para que no exista un juego entre las diferentes piezas, Figura 45.



Figura 45: Ensamble Antebrazos y Brazos Principales.

3. Ensamblar los extremos restantes de los antebrazos con la plataforma móvil, Figura 46.



Figura 46: Ensamble Plataforma Móvil.

4. Ensamblar los brazos principales con los soportes que se maquinaron, asimilando que se trata de los servomotores que se vayan a utilizar para este proyecto, Figura 47.

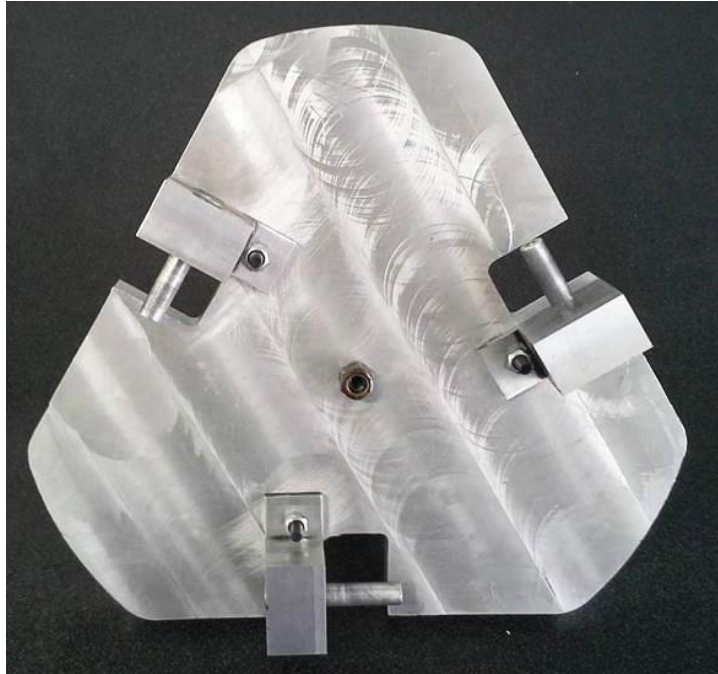


Figura 47: Plataforma Fija y Soportes.

5. Una vez que se han hecho los ensambles correspondientes, se juntan todos los elementos en los soportes, para formar el mecanismo paralelo tipo delta, Figura 48.

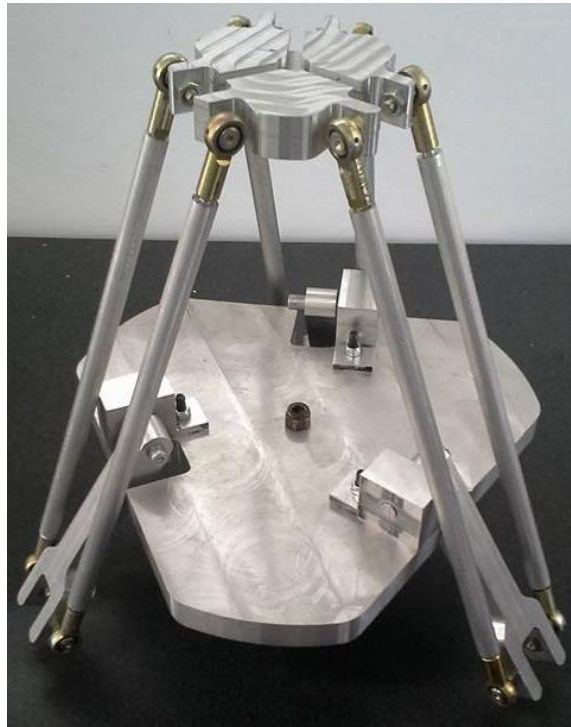


Figura 48: Mecanismo Paralelo tipo Delta.

6. Se coloca el mecanismo en el torno, para ver que el funcionamiento es el adecuado, en la Figura 49 se puede observar como es acoplado en el contra punto del torno.



Figura 49: Mecanismo Acoplado en el Torno.

7. Se hacen simples pruebas de ubicación para la plataforma móvil para observar el movimiento adecuado del mecanismo, a su vez garantizando que las dimensiones del diseño cumplen con las expectativas del proyecto, como se puede observar en las Figuras 50, 51, 52 y 53.



Figura 50: Movimiento Lateral Derecho.

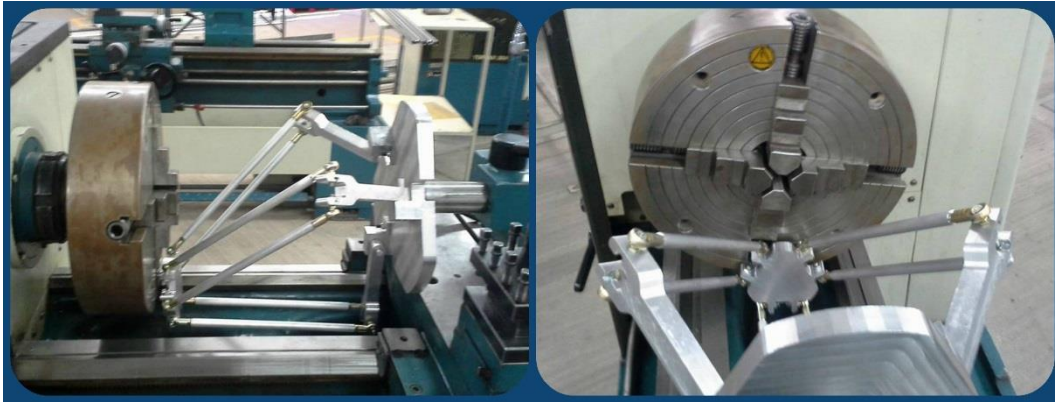


Figura 51: Movimiento Inferior.

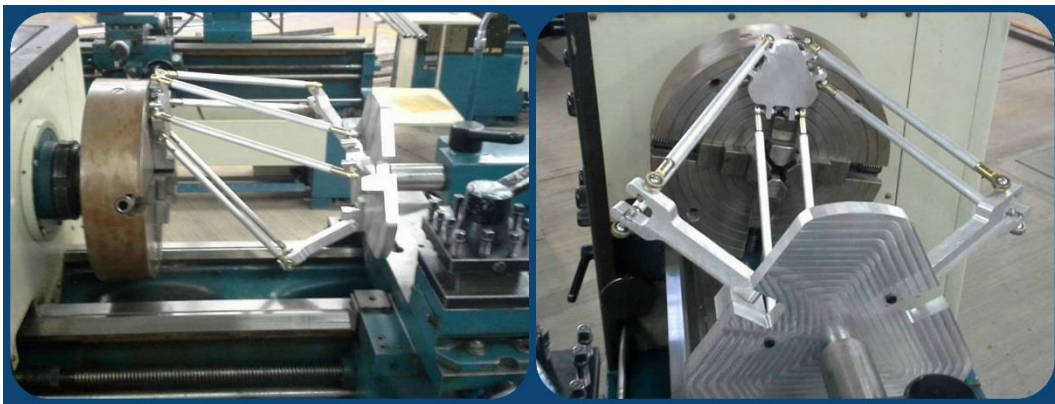


Figura 52: Movimiento Superior.



Figura 53: Movimiento Lateral Izquierdo.

4.3. Conclusiones

Se obtuvo el diseño de un mecanismo paralelo tipo delta en software Inventor el cual cumple con los objetivos descritos con anterioridad.

El modelo cumple con las dimensiones necesarias para la actividad que es requerido como se puede observar en las figuras 49-52, además puede realizar variedad de actividades.

Se tuvieron problemas en el momento del diseño por el manejo de las restricciones con las que se tiene que trabajar el maquinado sin embargo se solucionaron casi en su totalidad.

En cuanto al diseño del mecanismo se observa la funcionalidad de cada elemento que lo compone, para llevar a cabo la tarea para la que puede ser requerido el proyecto.

El diseño y las dimensiones del mismo toman un rol importante en la cinemática del mecanismo, de la cinemática depende el trabajo que puede ser capaz de desarrollar el proyecto y los alcances dimensionales que puede solventar.

4.4. Prospectivas

En vista de los resultados obtenidos, además de comprobar que el funcionamiento del mecanismo es adecuado, se hacen las siguientes prospectivas a realizar a corto y mediano plazo, para terminar así con el objetivo general del proyecto en conjunto. Cabe mencionar que dichas prospectivas no son enlistadas en orden de importancia, sino como algunas mejoras que se pueden hacer, también mencionar que el mecanismo puede ser aplicado en distintas actividades que haya por hacer dentro de los proyectos que se realizan en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro.

- Acoplar los actuadores (Servomotores) con los eslabones o brazos principales del mecanismo y así realizar el control y probar el funcionamiento del prototipo.
- Terminar por acoplar un dispositivo como efector final acorde a las necesidades del proyecto en general.
- Para una mayor información acerca del diseño se puede realizar un análisis por elemento finito de la estructura principal del mecanismo.
- Dejar el mecanismo como un banco de pruebas en el cual puedan ser aplicados algoritmos de movimiento, tanto posición como velocidad, todo a partir del sistema de control que vaya a ser utilizado en un futuro.

Referencias

Acosta Romero, A. & Valdez Guevara, J.J. (2005). Seguimiento de Trayectoria de un Robot Paralelo Tipo Delta. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería UAQ.

Álvarez Muñoz, R. (2004). Calibración de un robot paralelo planar de 3gdl. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, UAQ.

Briones León, J. Antonio. (2009). Diseño, análisis y control de un robot paralelo traslacional. Tesis de Maestría en Tecnología Avanzada, IPN.

Clavel, R. (1990). Patent No. 4,976,582. EUA.

Gogu, G. (2008). Structural Synthesis of Parallel Robots. Springer.

Ivanacal. (12 de 2012). *Ivanacal*. Centrado de Piezas en Torno. Obtenido de <https://ivanacal.files.wordpress.com/2012/12/centrado-de-pieza-en-torno.pdf>

Kalpakjian, S.; Schmid, S.R. (2006). Manufacturing Engineering and Technology, 5th ed.; Pearson Prentice Hall: Upper Saddle River, NJ, USA.

Martínez Zamudio P., González Villela, V.J., López Parra, M. & Gustavo Rojas, H. (2009). Análisis Cinemático de un Robot Manipulador Paralelo Delta Híbrido. UNAM.

Méndez, M. (2000). “Dinámica de cuerpos rígidos con Cuaterniones: una aplicación a los mecanismos”. Tesis de Doctorado en ingeniería, Universidad Anáhuac del Sur.

Merlet, J. (2006). Parallel Robots. Springer.

R. Clavel. (1999). The delta parallel robot, Parallel Kinematic Machines, Theoretical Aspects and industrial requirements, Advanced Manufacturing Series. Springer.

Shi Baek Park, Han Sung Kim, Changyong Song & Kyunghwan Kim. (2013). Dynamics Modeling of a Delta-type Parallel Robot.

Smid Peter. (2003). CNC Programming Handbook: A Comprehensive Guide to Practical CNC Programming (2nd Ed.). Industrial Press Inc., New York.

Stewart, D. (1965). A Plataforma with Six Degrees of Freedom. Institute of mechanical Engineering.

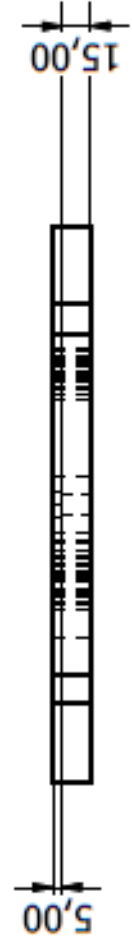
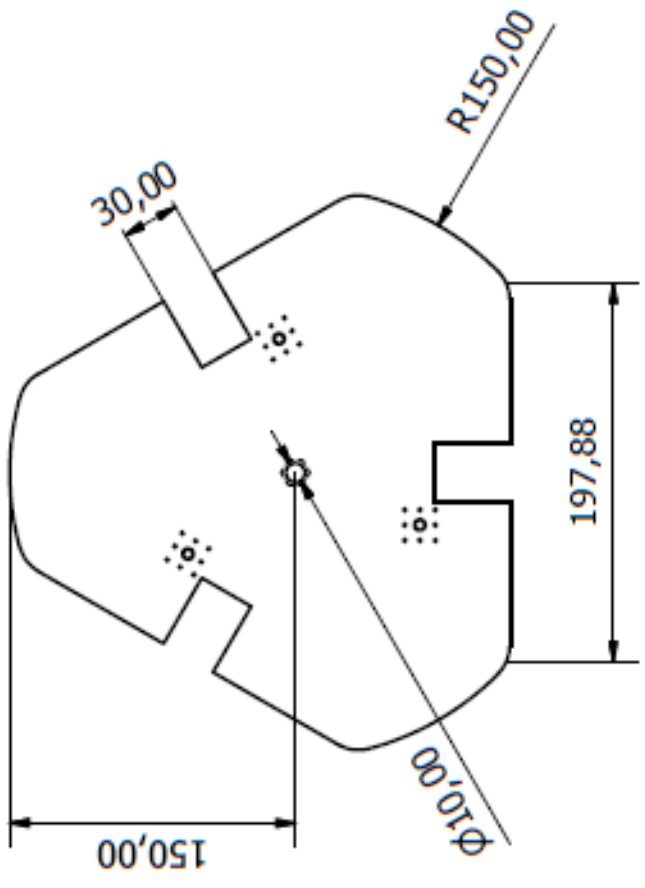
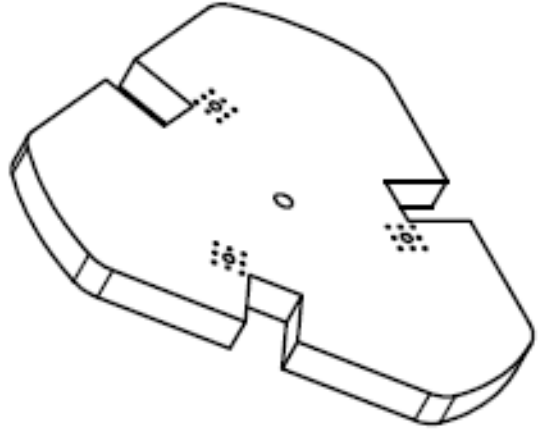
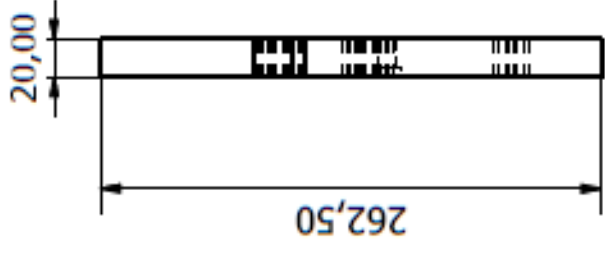
Tsai, L.W. (1999). Robot Analysis, The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators.

Tumbaco Mendoza, D.C.; Quimbita Zapata, W.E., (2014). “Diseño y construcción de un prototipo de robot delta con implementación de un cortador láser CNC utilizando la plataforma Robotic Operating System (ROS) para la elaboración de artículos publicitarios”. Tesis de Licenciatura. Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE. Ecuador.

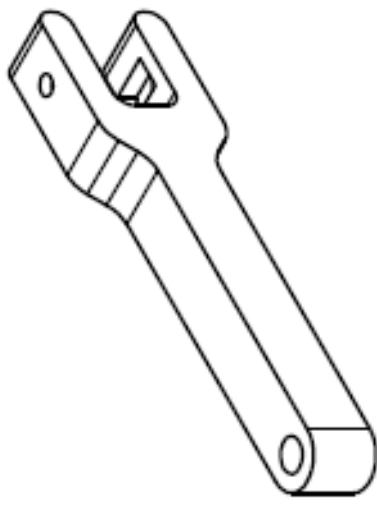
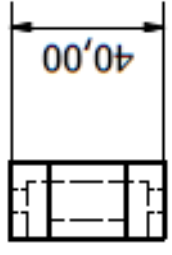
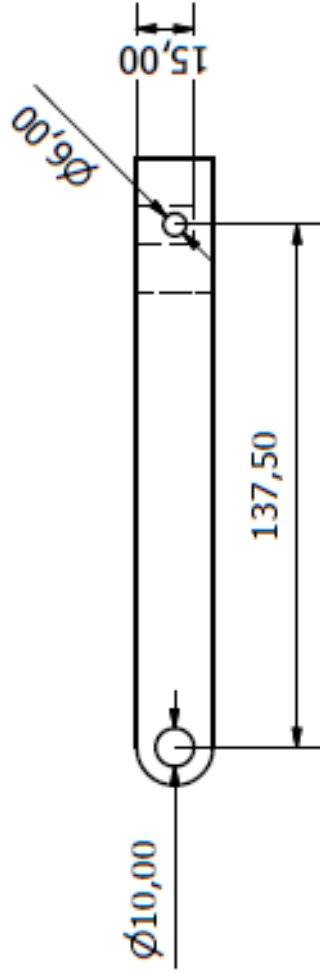
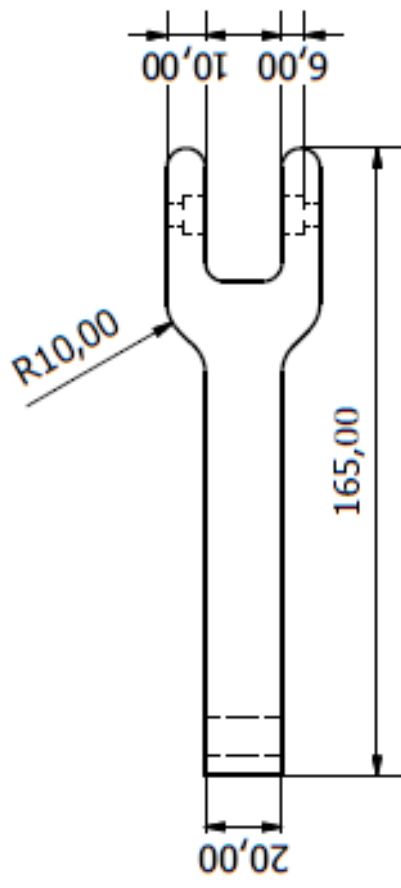
Anexos

En esta sección se muestran los planos del diseño de cada uno de los elementos que componen el mecanismo paralelo tipo delta, además de especificar las dimensiones que en la sección de metodología no se muestran, para ello se enlistan los planos de la siguiente manera:

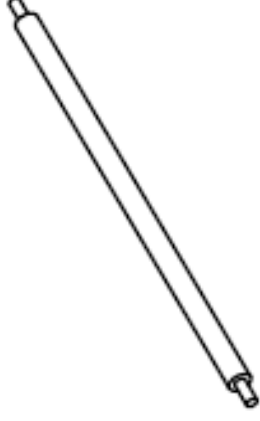
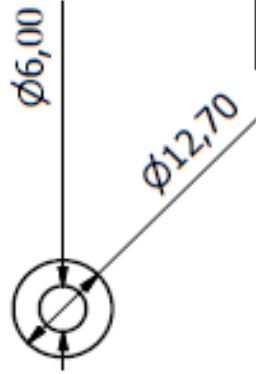
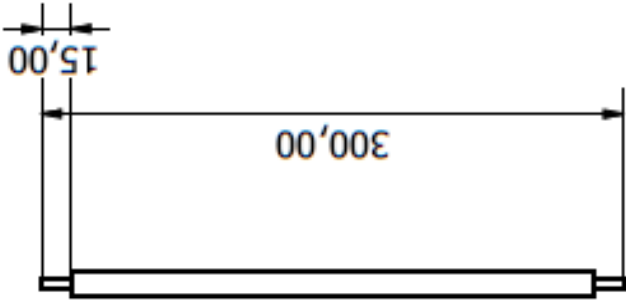
- Lámina 1: Plano plataforma fija.
- Lámina 2: Plano brazo principal.
- Lámina 3: Plano brazo secundario.
- Lámina 4: Plano plataforma móvil.
- Lámina 5: Ensamble de los elementos principales del mecanismo.
- Lámina 6: Soporte para acoplamiento en el torno.
- Lámina 7: Soporte para acoplamiento entre la plataforma fija y los brazos principales.



05-01-16	Universidad Autónoma de Querétaro		Elemento: E: 1	Lámina: L: 1
Dibujado: Omar Trejo Chávez	<h1>Base Fija</h1>			
Revisada: Miguel Trejo Hernández				
		Escala: 1-4	Acotación: mm	



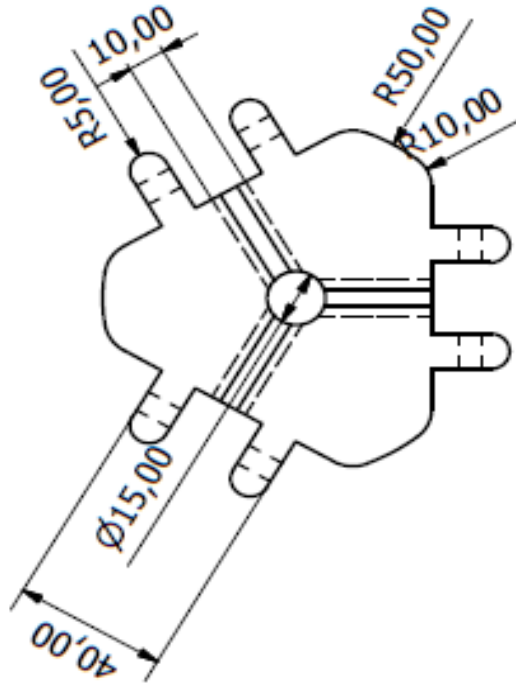
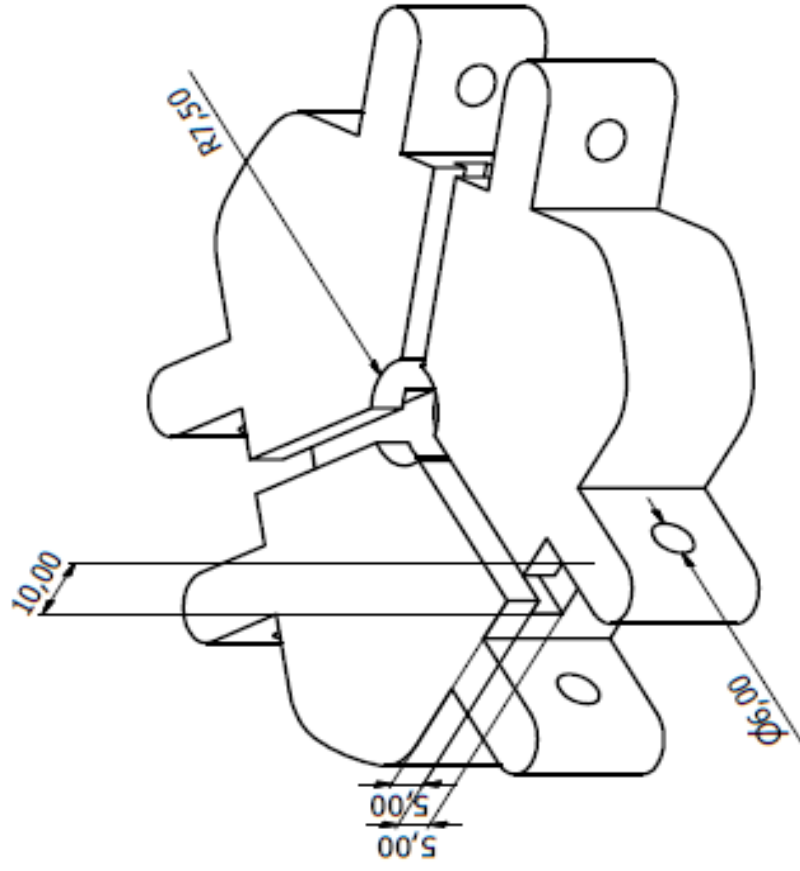
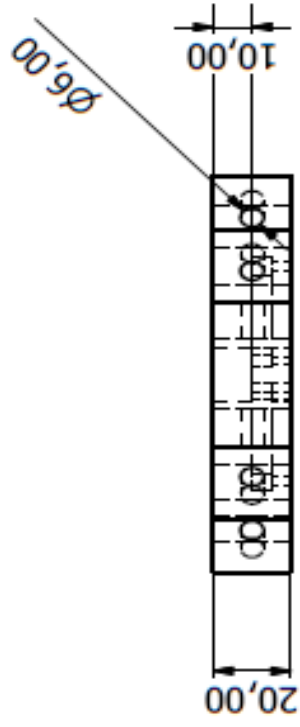
05-01-16	Universidad Autónoma de Querétaro	Elemento: E: 2	Lamina: L: 2
Dibujado: Omar Trejo Chávez	Brazo Principal	Escala: 1-2	
Revisado: Miguel Trejo Hernández		Acotación: mm	



05-01-16
 Dibujado:
 Omar Trejo Chávez
 Revisada:
 Miguel Trejo Hernández

Universidad Autónoma de Querétaro
Brazo Secundario

Elemento:
E: 3
 Lámina:
L: 3
 Escala: 1-4
 Acotación: mm



05-01-16
 Dibuja: Omar Trejo Chávez
 Revisada: Miguel Trejo Hernández

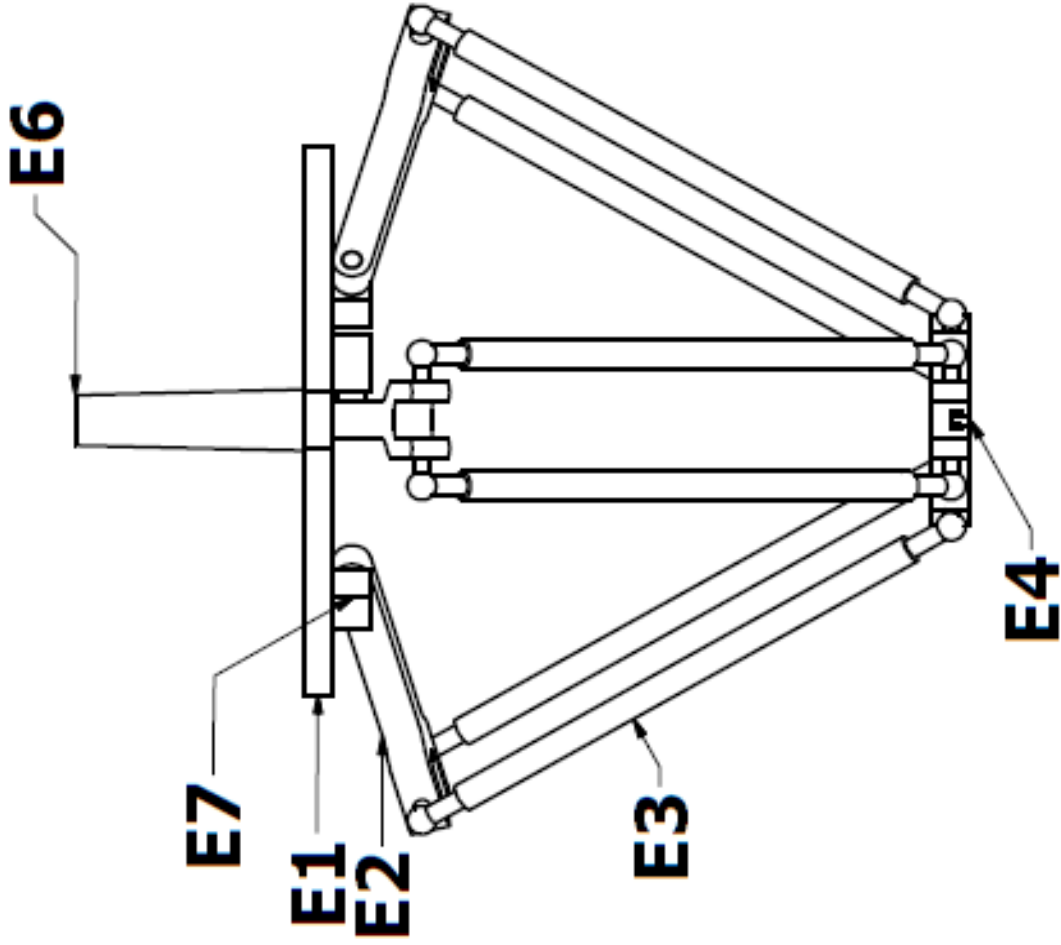
Universidad Autónoma de Querétaro

Elemento: E: 4
 Lámina: L: 4

Escala: 1-1

Base Móvil

Acotación: mm



05-01-16

Dibujado:
Omar Trejo Chávez

Revisada:
Miguel Trejo Hernández

Universidad Autónoma de Querétaro

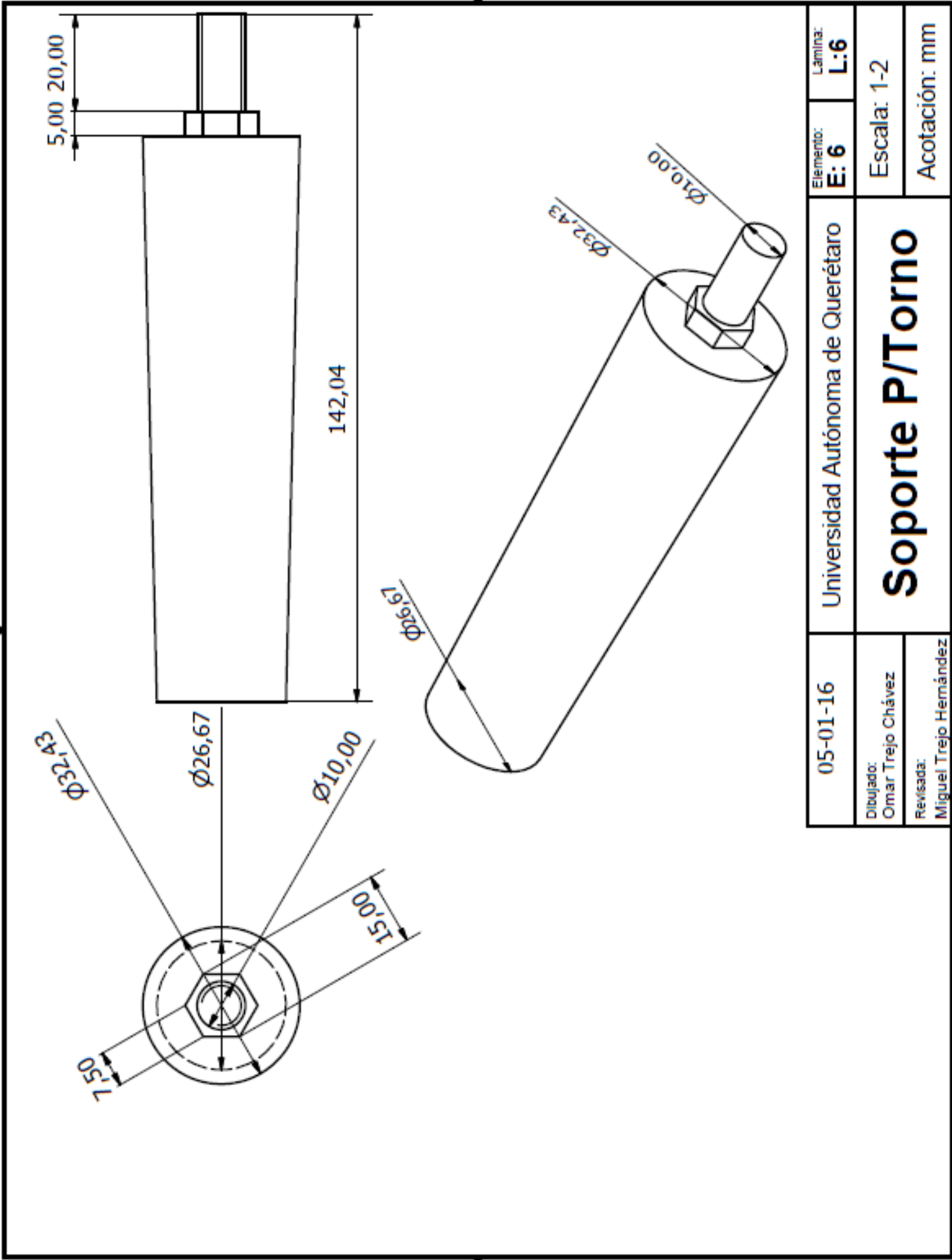
**Mecanismo Paralelo
Delta**

Ensamble:
1

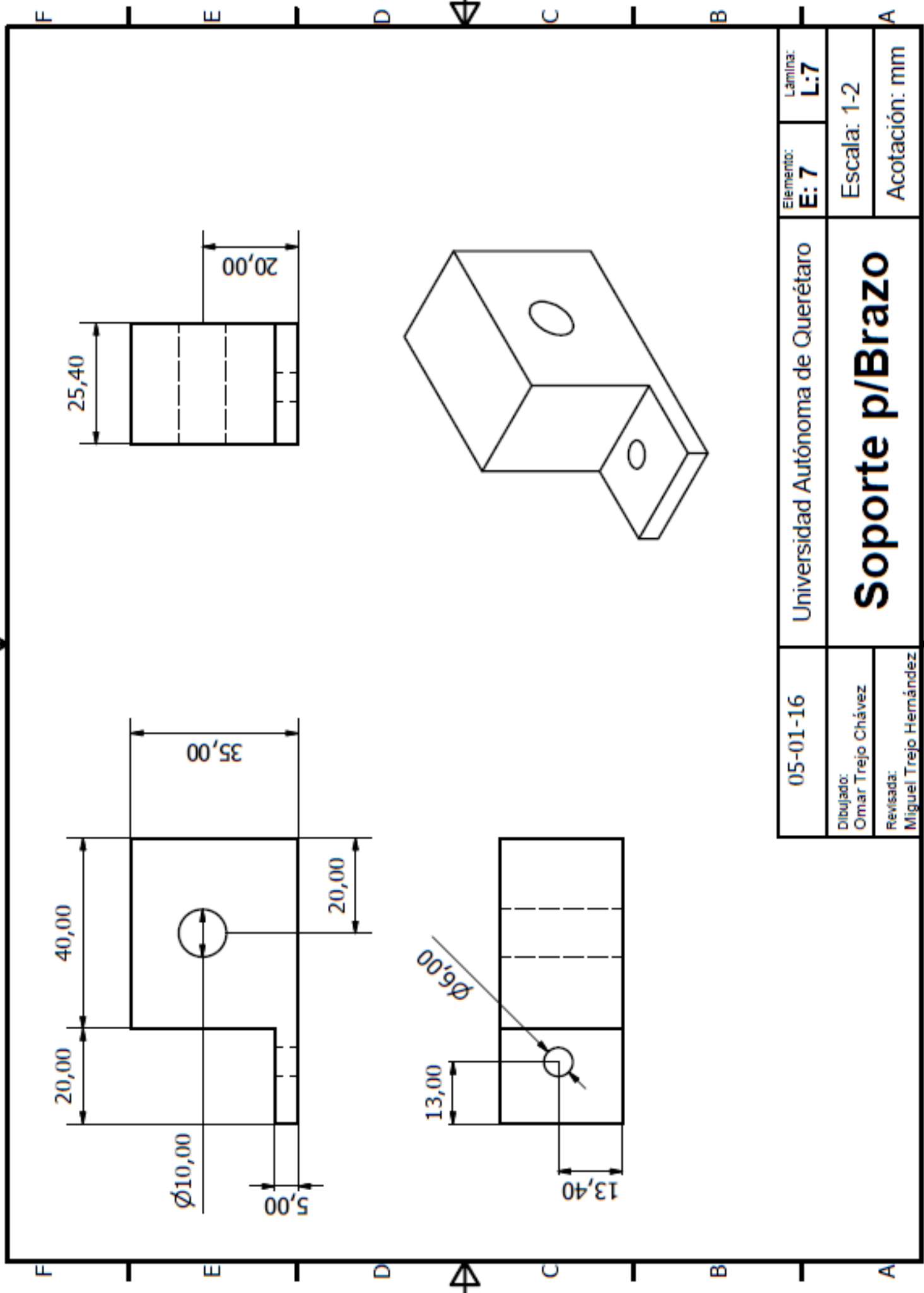
Lámina:
L:5

Escala: 1-4

Acotación: mm



05-01-16	Universidad Autónoma de Querétaro		Elemento: E: 6	Lámina: L: 6
Dibujado: Omar Trejo Chávez	Soporte P/Torno			
Revisada: Miguel Trejo Hernández				
Escala: 1-2		Acotación: mm		



05-01-16	Dibujado: Omar Trejo Chávez
	Revisada: Miguel Trejo Hernández

Universidad Autónoma de Querétaro	Elemento: E: 7	Lamina: L: 7
Soporte p/Brazo		
Escala: 1-2		
Acotación: mm		

A
