



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MÉXICO**

---

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

MODELADO MECÁNICO DE UN SISTEMA PARALELO

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

**INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO**

P R E S E N T A

**ELIZARETH HERNÁNDEZ SÁNCHEZ**



DIRECTORA DE TESIS:

DRA. GRACIELA VELASCO HERRERA

CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO D.F. 2007

**El presente trabajo fue desarrollado por el Laboratorio de Computación Neuronal del Centro de. Ciencias Aplicadas y desarrollo Tecnológico de la UNAM, bajo la tutoría de la Dra. Graciela Velasco Herrera y ha sido apoyado por los proyectos: PAPIITIN114007, PFAMU PI100606 PAPIIT IN108606-3**

*Le agradezco profundamente a la Universidad Nacional Autónoma de México, mi alma mater por haberme abierto sus puertas permitiéndome ser parte de su grandeza y de su historia. Por que en ella pude crecer intelectual y personalmente. Aquí conocí a personas que son mi ejemplo, mis amigos y mis maestros, gracias UNAM por confiar en mí.*

*A la grandiosa Facultad de Ingeniería, por dejarme vivir en sus salones, en sus pasillos y en sus bibliotecas 5 años de mi vida, por prepararme para ser una buena Ingeniera, un buen ser humano y alguien útil para este mundo. Por regalarme amigos y maestros. Sus enseñanzas no se pagan con nada.*

*Quiero dar un agradecimiento muy especial al Ingeniero Juan Francisco Flores por su apoyo, paciencia y consejos, por que es un amigo y un gran maestro, que siempre me motivo a salir adelante. Siempre sabia cuando no entendía algo y se preocupaba por hacérmelo entender. Por su consejo de no dejar las cosas a medias, por el tiempo que dedicó a asesorarme en esta tesis. Gracias Ingeniero Flores sus enseñanzas las llevaré siempre presentes.*

*Al Dr. Ernst Kussul, por su diseño del manipulador paralelo, el cual inspiro este trabajo.*

*A la Dr. Graciela Velasco por su apoyo incondicional para la realización de esta tesis y por la paciencia que me tuvo.*

*Le agradezco a Dios permitirme estar aquí y ahora, por dejarme llegar a este día que siempre imagine de niña.*

*A mis padre Javier Hernández que siempre me apoyo, que confió ciegamente en mi. El siempre mostró interés en mi trabajo y por muy cansado que llegara me saludaba con una sonrisa y me preguntaba ¿cómo te fue? Por enseñarme a no rendirme nunca y ser un gran ejemplo en mi vida. Gracias papá te prometo no defraudarte.*

*A mi madre Rosa Sánchez por sus desvelos, por su paciencia y por todo lo que me aguantó, por sus consejos que siempre me ayudaron a tomar las mejores decisiones. Gracias mamá sin ti esto no sería posible.*

*A mis hermanos Javier y Linda ustedes son mis grandes compañeros de vida, mis primeros amigos y aunque a veces no estamos de acuerdo en algunas cosas ustedes son muy importantes para mi, les agradezco sus consejos y su apoyo.*

*A Juan Francisco le agradezco todo lo que ha sido para mi, mi amigo, mi maestro y alguien a quien admiro profundamente, por ser un pilar fundamental en la realización de este trabajo y en mi vida.*

*A la Ing. Bertha Franco Rosas por ser la mejor maestra que he tenido y por se una gran amiga. Por darme muchas lecciones de vida las cuales atesoraré por siempre. La dinámica no es igual sin usted.*

*Al Ing. Ayala Pérez, al Ing. Sosa Fuentes, al Ing. Macias, al Ing. Hernández Quintero, al Dr. Velasco Herrera y todos aquellos que me dieron clases en la Facultad y con ello parte de su sabiduría, gracias a todos.*

*A mis amigos Eugenio, Zaragoza, Elizabeth, Talía, Tony, Claudia, Luis y todos aquellos con los que tuve la oportunidad de coincidir en un momento.*

# ÍNDICE

Introducción.....	I
Objetivo.....	IV

## Capítulo 1

1 Aspectos generales de un manipulador	
1.1 Robot.....	1
1.1.1 Robots experimentales.....	1
1.1.2 Manipuladores.....	2
1.1.2.1 Manipuladores seriales.....	5
1.1.2.2 Manipuladores paralelos.....	6
1.1.2.3 Ventajas y desventajas de los manipuladores paralelos y seriales.....	11
1.1.2.4 Aplicaciones.....	12
1.1.3 Estructura de un robot.....	12
1.1.3.2 Cinemática y dinámica de un manipulador.....	13
1.2 Cinemática de un manipulador paralelo.....	13
1.3 Sistemas de referencia de un manipulador	
1.3.1 Rotación del sistema de referencia.....	16
1.4 Actuadores.....	22
1.4.1 Actuadores Eléctricos.....	22
1.4.1.1 Motores a pasos unipolares.....	25
1.4.1.2 Motores a pasos bipolares.....	26
1.4.3 Clasificación de los Motores a pasos.....	27
1.5.1 Sistemas de transmisión.....	30

## Capítulo 2

### Modelado mecánico del sistema paralelo

2.1 Diseño conceptual y preliminar del micromanipulador.....	39
2.2 Descripción del manipulador.....	40
2.2.1 Diseño de detalle.....	41
2.3 Ubicación de las articulaciones en la plataforma.....	48
2.4 Matrices de rotación con respecto a un sistema de coordenadas fijo.....	49
2.5 Análisis de las articulaciones.....	50

### Capítulo 3

Evaluación y resultados.....	57
Resultados.....	61
Conclusiones.....	62
Referencias.....	64
Apéndice A Foros Académicos	
Apéndice B Planos	
Apéndice C Programas	

# Introducción

El desarrollo de estructuras micromecánicas basadas en mecánica convencional resulta una alternativa para la producción de pequeños dispositivos del orden de  $10^{-3}\text{m}$ , reduciendo el consumo de recursos, tales como energía, materiales y espacio de trabajo [46]. Alrededor del mundo se han desarrollado distintos modelos, diseños y prototipos de estructuras entre las cuales resaltan las micromaquinas herramienta, el desarrollo de microcentro de maquinado y microfábricas [47-48]. En estos últimos años el desarrollo científico en esta área ha crecido y cada vez más países están incursionando en el desarrollo de esta tecnología, dentro de los cuales se encuentra México.

Durante el desarrollo de esta área, la mayoría de los prototipos construidos han sufrido diferentes etapas de modificación en su diseño, con el fin de optimizar su desempeño, trayendo como consecuencia cambios económicos y altos consumos en el tiempo de desarrollo. A partir del 2000 se han presentado propuestas para el desempeño de estos dispositivos empleando técnicas de diseño en su etapa de revisión [50].

Actualmente, en el Laboratorio de Computación Neuronal (LCN) del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET) de la UNAM, una de sus líneas de investigación, está relacionada con estudio y desarrollo de microdispositivos de bajo costo, considerando que el desarrollo de estos dispositivos se realiza como una serie de generaciones. La primera generación tiene un tamaño específico y la segunda generación será producida por la primera generación y debe tener dimensiones menores comparada con la primera. La tercera generación tendrá dimensiones menores con respecto a la segunda generación, y así sucesivamente. En el LCN se han realizado varios prototipos pertenecientes a la primera generación y se ha identificado la necesidad de contar con modelos, diseños y herramientas de análisis matemático, con el fin de obtener soluciones apropiadas para los requerimientos de resolución, precisión, velocidad de producción y facilidad de interrelacionarse con otros dispositivos, lo cual llevara a la creación de estructuras micromecánicas, microdispositivos y micromáquinas herramienta.

En 1999, el Laboratorio de Ingeniería Mecánica del Centro de Instrumentos (ahora CCADET), definió que las micromáquinas deben su nombre no solo a su tamaño, sino al tamaño de sus componentes y al tamaño de las piezas fabricadas con estas [51]. A partir de 2001 el Laboratorio de Micromecánica y Mecatrónica del Centro de Instrumentos,

también definió que una micromáquina es un sistema de unos milímetros, con elementos altamente sofisticados y funcionales que les permite realizar tareas complicadas y delicadas. Cualquier dispositivo producido mediante el ensamble de piezas funcionales de tamaño entre un rango  $10^{-3} \leq x \leq 10^{-6}$ , es llamado micromáquina [47]. En el Laboratorio de Computación Neuronal se retoma la definición que surgió en los laboratorios antes mencionados y se puede definir que una estructura micromecánica, consiste en una estructura abierta o cerrada con múltiples cadenas cinemáticas, refiriendo su nombre, no solo a su tamaño, sino al tamaño de los componentes que manipula y procesos de tareas que son asignadas a este sistema [48].

En este trabajo de tesis, la estructura mecánica que se estudió y desarrolló, es de tipo paralelo ó cerrado. Los mecanismos paralelos son aquellos que tienen eslabones unidos entre la base y su plataforma o pieza externa, las cuales son controladas por varias juntas prismáticas o piernas actuando en paralelo [50]. Este tipo de estructura es conocida desde hace tiempo. Alrededor de 1800 el matemático Cauchy estudio la rigidez del llamado “octaedro articulado”. En 1949, Gough uso un mecanismo similar para la prueba de neumáticos. Posteriormente en 1965 estos mecanismos son redescubiertos y usados extensamente en el simulador de vuelo por el ingeniero Stewart [10], desde entonces, cualquier mecanismo enlazado paralelamente es nombrado “plataforma de stewart”.

Dadas las definiciones anteriores, podemos definir que la estructura mecánica desarrollada en este trabajo de tesis se puede se puede llamar de distintas formas: estructura micromecanica paralela, microplataforma se stewart, microplataforma mecánica o micromaquinado paralelo.

El desarrollo de este trabajo de tesis tiene como objetivo principal modelar estructuras paralelas que realicen tareas específicas de microensamble y micromaquinado de alta precisión.

En este trabajo de tesis, se presenta una simulación por computadora de un micromanipulador paralelo, con dimensiones y características específicas en cada uno de los componentes, éste prototipo virtual fue generado a través del modelo geométrico de cada uno de los componentes integrándolos en un ensamble final. Concluyendo una vez el montaje virtual del manipulador, se generó la simulación del movimiento del micromanipulador, mostrando de esta forma diversos esquemas de movimiento. Estas simulaciones permiten observar el comportamiento que el prototipo mecánico tendrá cuando sea fabricado, con las proporciones geométricas adecuadas, el cual permitirá encontrar diseños óptimos destinados a tareas específicas de micromecanica.

Este trabajo se divide en tres capitulos centrales, una sección de conclusiones, otra de referencias y en la última se anexan trabajos presentados en foros académicos y planos de diseño.

En el primer capítulo se introducen los fundamentos y antecedentes de: el desarrollo de manipuladores paralelos, el desarrollo de la teoría de movimiento de estos sistemas, la teoría de control para la automatización de manipuladores, los actuadores y sistemas de transmisión y finalmente la presentación del prototipo ya existente en el LCN.

El segundo capítulo describe el modelado de un sistema paralelo: micromanipulador.

En el tercer capítulo se simula, analiza y evalúa el sistema, dando los resultados esperados. Además en el trabajo se anexa la bibliografía y 3 apéndices.

# Objetivo

El objetivo principal de este trabajo es diseñar un micromanipulador paralelo con dimensiones y características específicas en cada uno de sus componentes, dando de esta forma alternativas de análisis visual que cumpla con determinadas especificaciones de diseño previamente definidas, además de dar énfasis a la influencia de los parámetros del diseño en el comportamiento del sistema y modificar éstos hasta dar con un sistema cuyo comportamiento permita encontrar diseños óptimos destinados a tareas específicas de micromecánica.

Los objetivos de este trabajo de tesis son:

- Simular un micromanipulador paralelo y comparar el sistema con los ya existentes en el Laboratorio de Computo Neuronal del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo de Tecnología de la UNAM.
- incorporar restricciones en el sistema, lo que en un futuro permitirá controlar simultáneamente los parámetros cinemáticos y dinámicos desde las fases más tempranas del modelo.

# Capítulo 1

## Antecedentes

### 1. Aspectos generales de un manipulador

#### 1.1 Robot

La palabra robot viene del checo robot (trabajo forzado) y robota (servidumbre), la popularizó el narrador y dramaturgo checo Karel Capel (1890-1938) en su obra Rossumovi Univerzálni Roboti (Los Robots Universales de Rossum) escrita en 1920 y en la cuál apareció por primera vez la palabra robot.

Un robot es un manipulador multifuncional y reprogramable, diseñado para mover materiales, piezas, herramientas o dispositivos especiales, mediante movimientos dispositivos especiales, mediante movimientos programados variables que permiten llevar a cabo diversas tareas; con la variedad de robots es muy difícil concretar elementos comunes a todos, lo cierto es que la mayoría dispone de un esqueleto o chasis, que puede ser interno o externo, motores piezas que permiten su movilidad, sistemas de agarre de manipulación y una fuente de alimentación normalmente eléctrica.

La robótica es la ciencia y la tecnología de robots, de su diseño, de la fabricación y del uso. Aunque el aspecto y las capacidades de los robots varían demasiado, todos comparten las características de una estructura mecánica, movable bajo cierta forma de control.

Existen dos grandes familias de robots:

- Robots experimentales.
- Robots manipuladores.

#### 1.1.1 Robots experimentales

Los robots experimentales son desarrollados por universidades, empresas e instituciones, con el propósito de investigar campos concretos de la robótica.

### 1.1.2 Manipuladores

Se define como manipulador a todo aquel robot que suelda, pinta, trabaja con productos peligrosos, que por lo general se controlan o manejan a través de control remoto. Estos robots en la practica se utilizan para localizar gente sepultada, desactivar explosivos [12] ó minas, tender cables en el fondo del mar, tomar muestras de minerales en la Luna. Existen manipuladores terrestres, submarinos, aéreos y espaciales.

Un manipulador es una estructura mecánica poliarticulada formada por eslabones o ejes, pares cinemáticos o articulaciones, tiene el fin de sujetar objetos (materiales o herramientas). Estas estructuras poseen varios grados de libertad. Y pueden ser controladas por un operador, un regulador electrónico programable, o cualquier sistema lógico (Fig.1).

Su estructura puede estar basada en diversos elementos como son:

- Brazo: posicionamiento de muñeca
- Muñeca: orientación definitiva de la herramienta.
- Órgano terminal: según la aplicación.

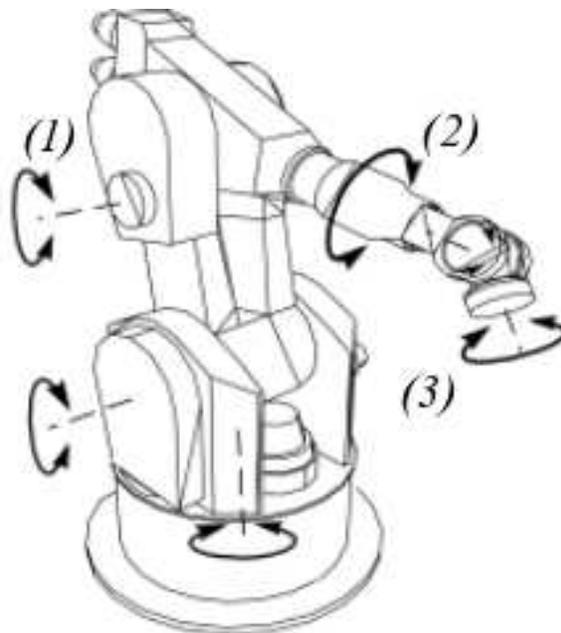


Figura 1. 1)Brazo, 2)Muñeca, 3)Órgano terminal

Para cada manipulador dado, cada combinación de sus articulaciones que unen los eslabones, constituye una configuración geométrica del mismo. Los pares cinemáticos pueden ser traslacionales o rotacionales, la naturaleza de los pares cinemáticos determina

diversas estructuras mecánicas. Cada manipulador, exhibe diversas características en sus elementos:

- Número de articulaciones: es el número de parámetros independientes necesarios para situar arbitrariamente un órgano terminal. Si el número de articulaciones es mayor a 6 entonces se dice que el manipulador es redundante, y si el número de articulaciones es igual a 6 entonces se puede concluir que se pueden adoptar configuraciones en las que una o más articulaciones no aportan grados de libertad.
- Dimensiones y características mecánicas de los eslabones.
- Rigidez estructural: relación entre el esfuerzo aplicado a un extremo, y el desplazamiento con respecto a la posición original. Depende de la rigidez de los eslabones y de los elementos de transmisión, así como de las dimensiones de los eslabones.
- Emplazamiento de accionamientos.
- Frecuencia de resonancia.
- Rango de movimiento angular.
- Volumen de trabajo: espacio engendrado por el extremo del manipulador al moverse en todo rango articular, depende de las dimensiones de los eslabones y de rango articular.
- Accesibilidad: depende del número de articulaciones.

Dentro de las características requeridas para el uso del manipulador se encuentran:

- Velocidad y aceleración máxima: potencia de los accionamientos e inercia visible de cada articulación.
- Precisión estática: error medio cometido desde la posición final deseada a la final obtenida.
- Precisión dinámica: Capacidad de seguimiento de trayectoria.
- Repetibilidad: Dispersión del error cuando se vuelve a la posición programada. Repetidamente.
- Resolución: Desplazamiento incremental mas pequeño realizable. Por su topología suelen clasificarse en dos grupos: los manipuladores seriales y los paralelos, a continuación se mencionan las características de cada uno de ellos.

### 1.1.2.1 Manipuladores Seriales

El manipulador serial es una estructura que consiste en varios acoplamientos conectados en serie, de ahí su nombre. El brazo humano es un buen ejemplo de un manipulador serial. Actualmente, todos los manipuladores seriales tienen la misma forma de un brazo, como lo presentó por vez primera la empresa Mitsubishi[3].

Entre los manipuladores seriales destacan las siguientes configuraciones, de acuerdo a sus características geométricas :

- Antropomorfos, en el sentido que tienen un **hombro**, un **codo**, y una **muñeca**, teniendo seis grados de libertad, los cuales necesita para poner un objeto en una posición y con una orientación arbitraria.
- La mayoría de los manipuladores seriales comerciales tienen solo empalmes de revolución. Comparado a los empalmes prismáticos, los empalmes de revolución son más baratos y dan un espacio de trabajo diestro más grande para el mismo volumen de la robustez.
- Las robustezas seriales son muy pesadas, comparado a la carga que pueden moverse sin perder su exactitud. Solo pueden soportar una carga de un décimo de su propio peso. Esto se debe a que los acoplamientos deben ser rígidos: los acoplamientos flexibles causan deformaciones, y por lo tanto errores en la posición y de la orientación en el límite.
- La simplicidad de la cinemática de la posición y de la velocidad del actuador final, ha sido siempre uno de los criterios principales del diseño de los brazos industriales.

Existen 5 clases de configuraciones de manipuladores seriales:

- **Cilíndrica**: el robot tiene un movimiento de rotación sobre una base, una articulación prismática para la altura, y una prismática para el radio. Este robot ajusta bien a los espacios de trabajo redondos. Puede realizar dos movimientos lineales y uno rotacional, o sea, que presenta tres grados de libertad. Fig. 2

Este robot está diseñado para ejecutar los movimientos conocidos como interpolación lineal e interpolación por articulación. La interpolación por articulación se lleva a cabo por medio de la primera articulación, ya que ésta puede realizar un movimiento rotacional.

- **Polar**: dos juntas de rotación y una prismática permiten al robot apuntar en muchas direcciones, y extender la mano a un poco de distancia radial. Los movimientos son: rotacional, angular y lineal. Este robot utiliza la interpolación por articulación para moverse en sus dos primeras articulaciones y la interpolación lineal para la extensión y retracción. Fig.2

- **Cartesiana:** el posicionando se hace en el espacio de trabajo con las articulaciones prismáticas. Esta configuración se usa bien cuando un espacio de trabajo es grande y debe cubrirse, o cuando la exactitud consiste en la espera del robot. Posee tres movimientos lineales, es decir, tiene tres grados de libertad, los cuales corresponden a los movimientos localizados en los ejes X, Y y Z.

Los movimientos que realiza este robot entre un punto y otro son con base en interpolaciones lineales. Interpolación, en este caso, significa el tipo de trayectoria que realiza el manipulador cuando se desplaza entre un punto y otro. A la trayectoria realizada en línea recta se le conoce como interpolación lineal y a la trayectoria hecha de acuerdo con el tipo de movimientos que tienen sus articulaciones se le llama interpolación por articulación. Fig.2.1

- **Scara (Selective Compliance Assembly Robot Arm):** 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. Las combinaciones más frecuentes son con tres articulaciones, que son las más importantes a la hora de posicionar su extremo en un punto en el espacio. Fig 2.1
- **Angular:** el robot usa 3 juntas de rotación para posicionarse. Generalmente, el volumen de trabajo es esférico. Estos tipos de robot se parecen al brazo humano, con una cintura, el hombro, el codo, la muñeca. Presenta una articulación con movimiento rotacional y dos angulares. Aunque el brazo articulado puede realizar el movimiento llamado interpolación lineal (para lo cual requiere mover simultáneamente dos o tres de sus articulaciones), el movimiento natural es el de interpolación por articulación, tanto rotacional como angular. Fig 2.1

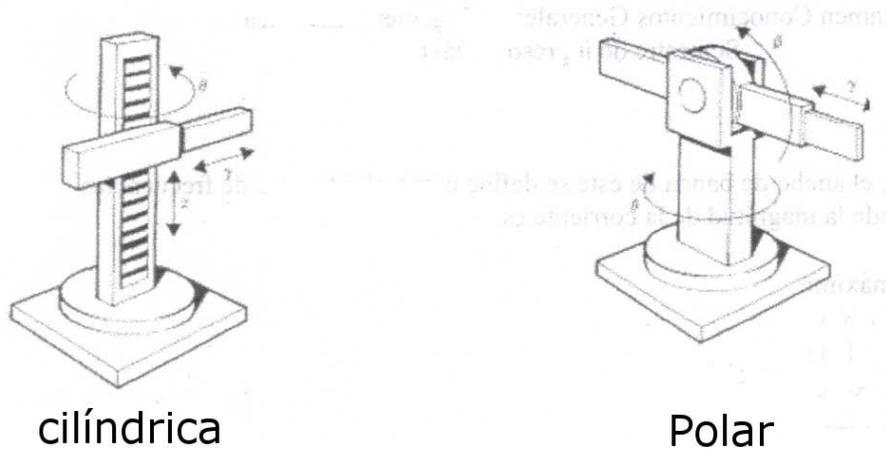
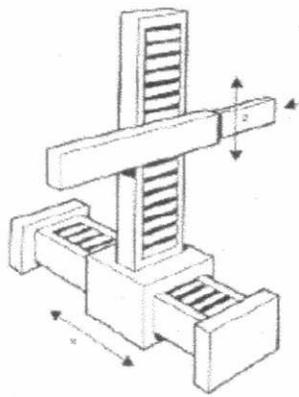
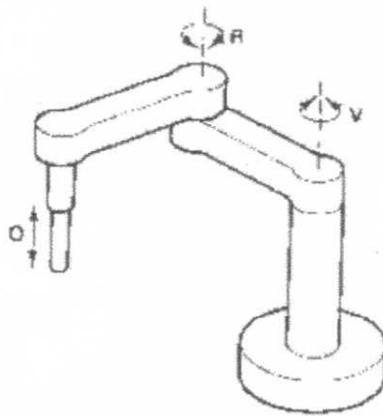


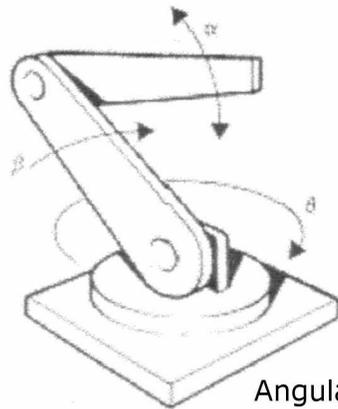
Figura 2. Configuraciones



Cartesiana



Scara



Angular

Figura 2.1. Configuraciones

### 1.1.2.2 Manipuladores Paralelos

Los primeros trabajos teóricos relacionados con las estructuras mecánicas paralelas aparecieron ya hace siglos, antes de que se empezara a hablar de robots, cuando los primeros geómetras franceses e ingleses realizaron estudios acerca de los poliedros y aplicaciones de estos. El primer mecanismo paralelo fue patentado en el año de 1931 (US Patent N° 1,789,698). Se trataba de una plataforma de movimiento destinada a la industria del entretenimiento, diseñada por James E. Gwinnett. Invento el cual nunca fue construido (figura 3).

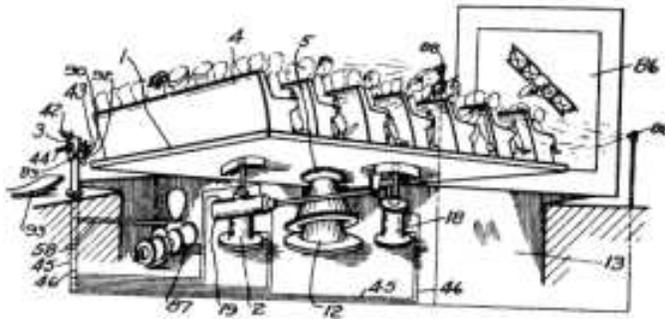


Figura 3. Boceto del primer mecanismo paralelo

En 1940, diecinueve años más tarde de que Karel Kapek acuñara el término “robot”, Willard L.V. Pollard presentaba un ingenioso robot de 5 grados de libertad destinado a operaciones de pintura con spray. El robot consistía en tres brazos de dos eslabones cada uno (figura 4). Los eslabones estaban unidos mediante juntas universales. Los tres actuadores de la base comandaban la posición de la herramienta, mientras que la orientación era proporcionada por otros dos actuadores situados en la base y que transmitían el movimiento a la herramienta mediante la rotación proporcionada a unos cables flexibles. Sin embargo, han sido otros mecanismos paralelos los que han logrado un mayor reconocimiento y han contribuido a la aparición de un mayor número de publicaciones sobre la robótica paralela. Como Eric Gough en 1947 inventó la plataforma paralela más popular de todas (figura 5), este diseño un octaedro hexápodo con lados de longitud variable, como plataforma para la comprobación del comportamiento de los neumáticos de la casa Dunlop [4] bajo cargas aplicadas en diferentes ejes, de esta forma intentaba simular el proceso de aterrizaje de un avión.

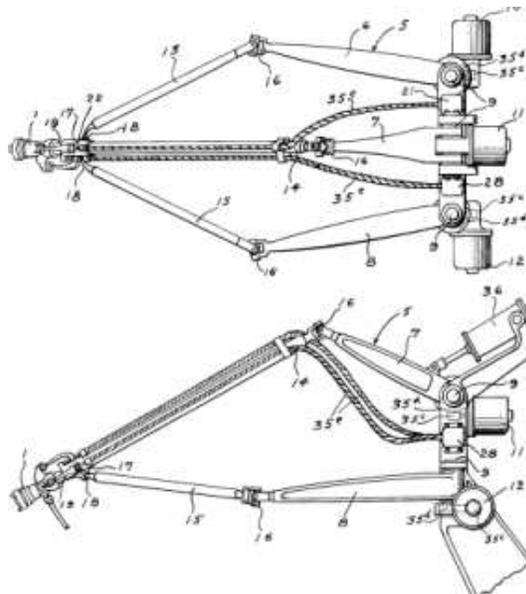


Figura 4. Primer robot industrial paralelo

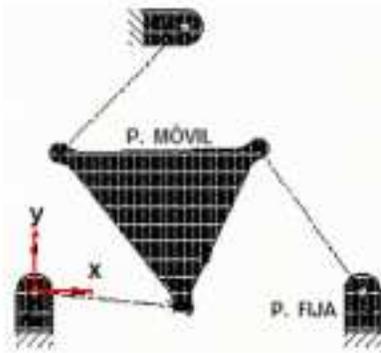
En 1965, el Ing. Stewart presento un artículo en el que describía una plataforma de movimiento de 6 grados de libertad destinada a trabajar como simulador de vuelo. Este artículo tuvo y tiene una gran influencia del mundo académico y se considera como uno de los primeros trabajos de análisis de plataformas paralelas. Paralelamente, el ingeniero Klaus Cappel realizaba en el Franklin Institute Reseach Laboratory numerosas investigaciones con plataformas paralelas de 6 grados de libertad. En 1967 Cappel patenta un simulador de movimiento basado en un hexápodo, y construyó varias de sus invenciones, más tarde en 1978, Hunt, sugirió que se usaran los mecanismos actuados en forma paralela de los simuladores de vuelo, como robots manipuladores y destacó que los manipuladores paralelos requerían de un estudio más detallado en el contexto de las aplicaciones robóticas a la vista de las ventajas en cuanto a rigidez y precisión respecto a los robots serie convencionales. En 1979, McCallion y Pham fueron los primeros que propusieron utilizar la plataforma de Stewart como un manipulador paralelo para una célula de ensamblaje robotizada, fundamentalmente porque la posición del actuador final es mucho menos sensible a los errores que los sensores articulares de los robots serie.



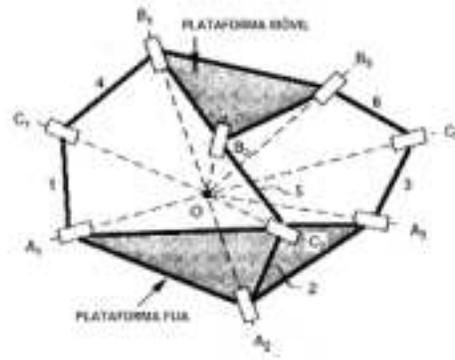
Figura 5. Primer plataforma de Gough

Un robot paralelo es una estructura mecánica formada por un mecanismo de cadena cerrada en el que el actuador final se une a la base por al menos dos cadenas cinemáticas independientes.

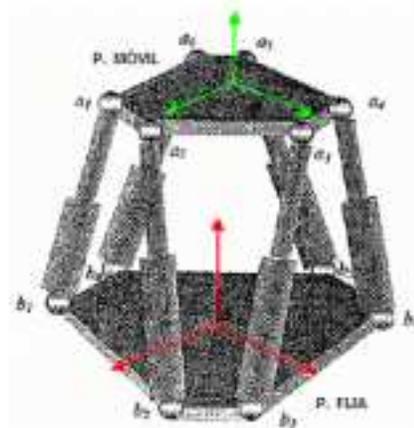
Los manipuladores paralelos son clasificados como: planares esféricos y espaciales, de acuerdo con sus características de movimiento. Se puede distinguir esta clasificación en la figura 6.



*Manipulador planar*



*Manipulador esférico*



*Manipulador espacial*

Figura 6.

Los manipuladores paralelos se pueden clasificar de acuerdo a sus características estructurales como:

**simétricos** y **asimétricos**.

Un manipulador paralelo es llamado simétrico si cumple las siguientes condiciones:

- El número de eslabonamientos debe ser igual al número de grados de libertad de la plataforma móvil.
- El tipo y número de articulaciones en todos los eslabonamientos deben estar arreglados en un modelo idéntico.
- El número y localización de las articulaciones actuadoras deben ser los mismos.

Cuando las condiciones antes mencionadas no llegan a cumplirse, entonces el manipulador es llamado asimétrico. Podemos observar entonces, que en los robots paralelos simétricos el número de eslabones  $m$ , es igual al número de grados de libertad  $F$ , el cual es igual al número total de cadenas cinemáticas,  $L$ . Esto puede expresarse como  $m = F = L$ . Los robots paralelos planares pueden ser de dos o tres grados de libertad. Una plataforma planar de tres eslabones con tres grados de libertad, consiste en una plataforma de movimiento conectada a una base fija por tres cadenas cinemáticas simples. Usando articulaciones prismáticas y rotacionales como pares cinemáticos, se obtienen siete posibles arreglos en manipuladores paralelos planares, como se muestra en la figura 6.

- Prismática (P): junta en la que el eslabón se apoya en un deslizador lineal. Actúa linealmente mediante los tornillos sinfín de los motores, o los cilindros.
- Rotacional (R): junta giratoria a menudo manejada por los motores eléctricos y las transmisiones, o por los cilindros hidráulicos y palancas.

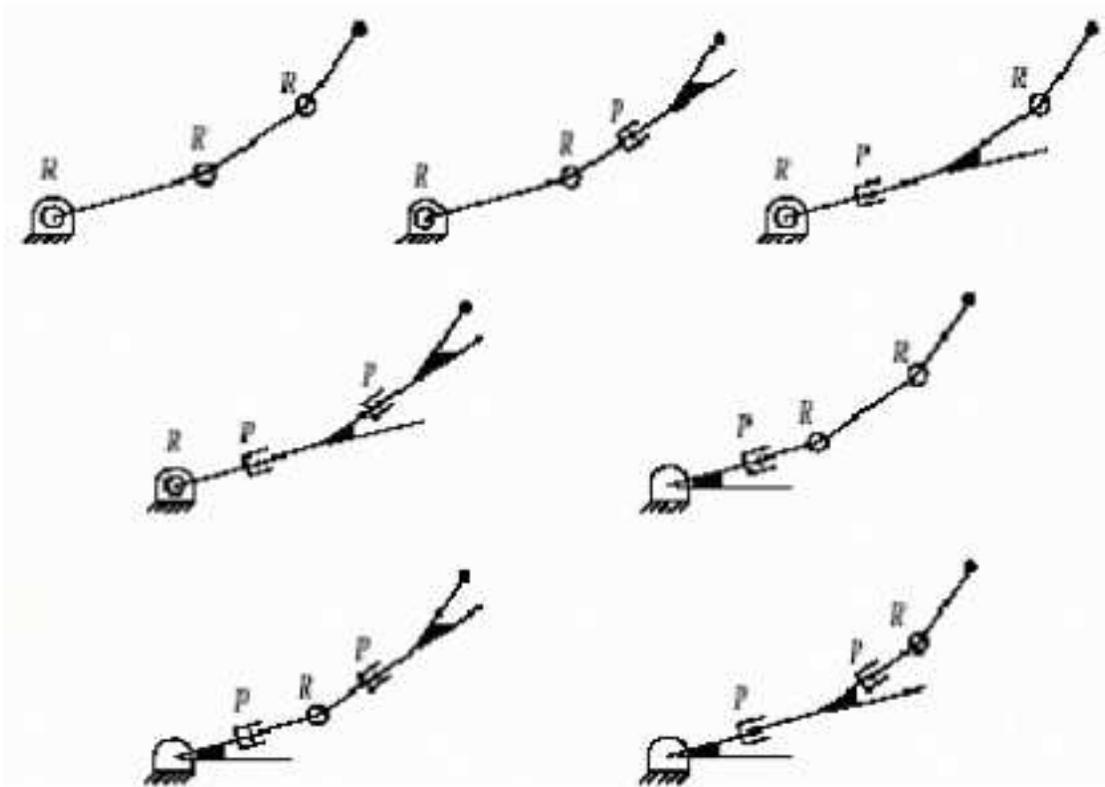


Figura 7. Siete cadenas seriales básicas que pueden utilizarse para formar manipulador paralelos planares

En la figura 6 se muestran diferentes acoplamientos que se pueden formar con la combinación de articulaciones prismáticas y rotacionales.

### 1.1.2.3 Ventajas y desventajas de los manipuladores paralelos y seriales

La desventaja principal de un diseño serial es su rigidez intrínseca baja, para obtener una rigidez adecuada en el punto final de sus articulaciones, debe utilizar acoplamiento y empalmes pesados. Estas características resultan ser las contrarias en los manipuladores paralelos. Los diseños completamente paralelos tienen todos los actuadores adentro o cerca de la base, que da lugar a una inercia muy baja de la pieza del manipulador que tiene que moverse. Por lo tanto, una anchura de banda más alta se puede alcanzar con la misma energía de la impulsión. Esta es la razón por la cual las estructuras paralelas se utilizan, como simuladores de vuelo y para sistemas que necesitan reacciones rápidas. En general, las plataformas paralelas presentan las siguientes ventajas:

- Los accionamientos de potencia conectan directamente la base del robot en su actuador final. Debido a esto, los accionamientos de potencia sirven de elementos estructurales y actúan de manera simultánea, lo que les da la capacidad de manipular cargas muy superiores a su propio peso. Por tanto, la relación entre la carga y potencia de estos mecanismos proporciona una alta eficiencia energética.
- Las estructuras paralelas son mecanismos que ofrecen una alta rigidez y muy bajo peso. Esto hace que presenten unas características en cuanto a precisión claramente superiores a las de los robots serie.
- Presentan elevadas velocidades de operación, en comparación con cualquier otro tipo de estructura robótica.

Sin embargo, también presentan otras características que, según para que aplicación, pueden considerarse “desventajas”:

- La cinemática de los mecanismos paralelos es más complicada. en ocasiones esto obliga a recurrir a sensores redundantes para poder establecer un lazo de control.
- El espacio de trabajo suele ser pequeño comparativamente hablando. Además, no es sencillo su cálculo, pues la posición y orientación están muy fuertemente acopladas.

- El problema de las configuraciones singulares es más complejo, y debe resolverse específicamente para cada topología.
- No existe, como ocurre en los robots serie, un modelo dinámico general para los mismos. Esto dificulta el desarrollo de algoritmos de control de carácter general y hace que los robots existentes en la actualidad se controlen de forma desacoplada.

La ventaja principal de los manipuladores seriales es su espacio de trabajo el cual es grande con respecto a su propio volumen y a su espacio ocupado. Sus desventajas principales son:

- La inflexibilidad ante una estructura cinemática abierta.
- Los errores se acumulan y amplifican de acoplamiento a acoplamiento.
- Todos sus actuadores se ven afectados por las grandes cargas que transporta.
- La carga eficaz que puede manipular es relativamente baja.

#### 1.1.2.4 Aplicaciones

Existen robots paralelos de 2,3,4,5,6 o más grados de libertad, por lo que, realizar una clasificación de las aplicaciones que han dado lugar tal número de dispositivos no es sencillo. Los campos de aplicación de estos robots son muy diversos, y abarcan desde microrobots posicionadores hasta grandes plataformas de gran capacidad de carga; las aplicaciones médicas, simuladores de vuelo, dispositivos hápticos a robots manipuladores, robots experimentales máquinas herramientas de control numérico, son algunos ejemplos de aplicaciones.

#### 1.1.3 Estructura de un robot

La estructura de un robot es en su mayor parte mecánica, denominada cadena cinemática (su funcionalidad es relacionada con el esqueleto de un cuerpo). De la cadena se forma de los acoplamientos, de los actuadores (sus músculos) y de los empalmes, es decir sus uniones, se obtiene uno o más grados de libertad. La mayoría de las cadenas son seriales abiertas y se encargan de conectar cada acoplamiento que se encuentra anterior a ellas.

Estas cadenas se llaman robustezas seriales y se asemejan a menudo al brazo humano. Algunas robustezas tales como la plataforma de Stewart [10] usa cadenas cinemáticas cerradas.

### **1.1.3.2 Cinemática y dinámica de un manipulador**

El estudio de movimiento de un manipulador se puede dividir en cinemática y dinámica.

La cinemática a su vez se divide en cinemática directa e inversa. La cinemática directa refiere al cálculo de la posición del actuador final, la orientación, la velocidad y la aceleración cuando se saben los valores comunes correspondientes.

La cinemática inversa refiere al caso opuesto, en el cual se requieren valores comunes se calculan para el extremo dado los valores del actuador, según lo hecho en el planeamiento de la trayectoria.

Algunos aspectos especiales de la cinemática incluyen la dirección de la redundancia (diversas posibilidades de realizar el mismo movimiento), de la evitación de la colisión y de la evitación de la singularidad.

La dinámica estudia el efecto de las fuerzas sobre estos movimientos. La dinámica directa refiere al cálculo de aceleraciones en el mecanismo, una vez que se sepan las fuerzas aplicadas.

### **1.1.3.3 Sistemas de Control para la automatización de un manipulador**

La estructura mecánica de un robot se debe controlar para realizar tareas. El control de un robot implica tres fases distintas, opinión, proceso y acción. Los sensores dan la información sobre el ambiente o el robot por sí mismo por ejemplo la posición de sus empalmes o de su actuador extremo. Usando estrategias del campo de la teoría de control, esta información se procesa para calcular las señales apropiadas a los actuadores (motores) que mueven la estructura mecánica. El control de un robot implica varios aspectos tales como el planeamiento de la trayectoria, el reconocimiento de patrón y la evitación del obstáculo, etc. Estrategias más complejas y más adaptables del control se pueden referir como inteligencia artificial.

## **1.2 Cinemática del manipulador paralelo**

La construcción de los modelos cinemáticos de robots paralelos no tienen las mismas características que las de los robots serie. En estos existe una metodología como la de Denavit-Hartenberg [2], que permite la obtención del modelo cinemático directo de una manera sistemática e independiente de su configuración física.

En los robots paralelos modelo cinemático inverso es fácilmente planteable por consideraciones geométricas de carácter general, mientras que la obtención del directo es más complejo y en numerosos casos no tienen una única solución analítica. Figura 8.

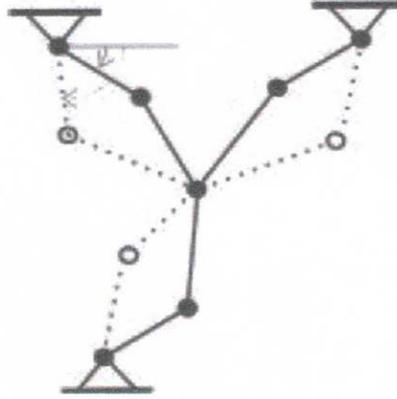


Figura 8. Cinemática inversa de un robot 3(RRR)-Rotacional Rotacional Rotacional

Una serie de estudios pioneros sobre modelos cinemáticos Fitcher en 1986 y Merlet en 1990 [2], los primeros de que forma rigurosa estudiaron la cinemática de los robots paralelos. Fitcher derivó las ecuaciones cinemáticas de la plataforma de Stewart general, y formuló las ecuaciones dinámicas de una forma rudimentaria (despreciando la masa de los actuadores y la fricción de las articulaciones), también enumeró algunas configuraciones articulares singulares. Realizó varias recomendaciones para la construcción práctica de la plataforma de Stewart, describiendo la construcción del robot de la Universidad de Oregon en el cual utilizó la plataforma triangular y una base hexagonal semiregular.

Merlet consideró los aspectos de diseño de la plataforma de Stewart tratando las diferentes arquitecturas de los manipuladores y presentó una descripción del prototipo de plataforma de Stewart construida en INRIA, Sophia-Antipolis, Francia,[] dando las directrices para solucionar las ecuaciones cinemáticas, desarrollar el Jacobiano, derivar las ecuaciones dinámicas en condiciones más generales que las propuestas por Fitcher y determinar el espacio de trabajo. También mencionó el potencial de la plataforma de Stewart como sensor de fuerza y como dispositivo de acoplamiento pasivo.

El modelo geométrico inverso de una plataforma paralela se puede definir por el conjunto de ecuaciones que establecen los valores de las variables articulares de la cadena cinemática en función del actuador final. El planteamiento de las mismas se puede realizar en forma vectorial, tomando como referencia el sistema de la figura 9 que representa un robot paralelo de 6 grados de libertad con cadenas cinemáticas del tipo UPS, para cada cadena se puede escribir una ecuación de la forma

$$\begin{aligned} \vec{r}^i &= \vec{r}_1 + A_1 \vec{s}_1^i - \vec{s}_0^i \\ i &= 1, \dots, 6 \end{aligned}$$

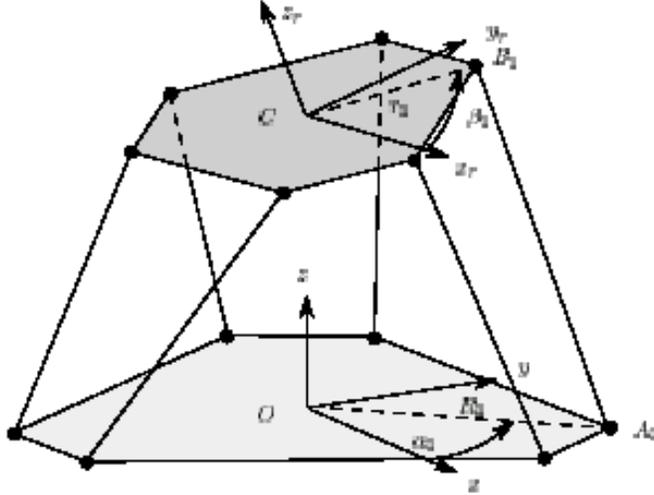


Figura 9. Estructura de un manipulador paralelo de 6 grados de libertad

Donde  $A_1$  es la matriz de rotación que representa la orientación de la base móvil  $\bar{s}_1^i$  y  $\bar{s}_0^i$  son los vectores que localizan las articulaciones universales y esférica expresados en los sistemas de referencia asociados a cada una de las bases,  $\bar{r}_1$  es el vector de posición de la base móvil expresado en el sistema inercial de la base fija y  $\bar{r}^i$  es el vector de longitud de cada uno de los actuadores lineales. Estas seis ecuaciones constituyen el modelo cinemático en el que las longitudes de los accionamientos son los módulos de los vectores  $\bar{r}^i$ . Como puede observarse, esta metodología produce, salvo configuraciones singulares, una solución única, cerrada y de fácil implementación. En algunos casos particulares y debido a la cadena cinemática de las patas constitutivas de las plataformas paralelas, la solución inversa, puede tener varias soluciones, sin que ello implique una mayor dificultad que la equivalente a los robots de arquitectura serial.

El problema de obtener el modelo cinemático directo, es decir, calcular la posición y orientación de la base móvil a partir de las longitudes de los accionamientos es mucho más complejo. Desde el punto de vista analítico consistiría en obtener el vector  $\bar{r}_1$  y la matriz  $A_1$  compatibles con las seis ecuaciones (ecuación 1), planteadas para cada cadena cinemática. Soluciones de tipo analítico, a este problema solo se han encontrado en algunas configuraciones estructurales sencillas, haciendo uso de la formulación de Denavit-Hartenberg o consideraciones de tipo geométrico. La solución en configuraciones más complejas exige el uso de métodos numéricos, y dan soluciones de tipo polinómico de elevado grado que tiene soluciones múltiples. Algunos autores proponen una solución práctica al problema consistente en utilizar una arquitectura de sensores redundantes para solucionar el problema directo. Estos sensores extra permiten determinar la pose del robot (y también pueden usarse para la calibración del mismo). Sin embargo, esta solución lleva consigo otros problemas adicionales como son: determinar el número y tipo adecuado de sensores o el estudiar la influencia de los errores de medida de dichos sensores en la solución del problema.

Una formulación mejor para encontrar la posible solución física al problema de la multiplicidad de las soluciones en estructuras complejas es la que incluye el modelo todos los objetos móviles, especialmente las articulaciones del tipo que sean, modelando sus restricciones de movimiento. La herramienta más adecuada para hacer esto es la formulación multicuerpo. La cual básicamente se trata de construir para cada articulación que conecta los cuerpos del robot una serie de ecuaciones que definan las restricciones que tiene en su movimiento de forma que las variables articulares estén también incluidas en estas ecuaciones.

### 1.3 Sistemas de Referencia de un manipulador

#### 1.3.1 Rotación del sistema de referencia

Para poder analizar el movimiento de un manipulador, es necesario conocer las ecuaciones que describen su movimiento, por lo que se definen los siguientes sistemas de referencia (fig. 10)

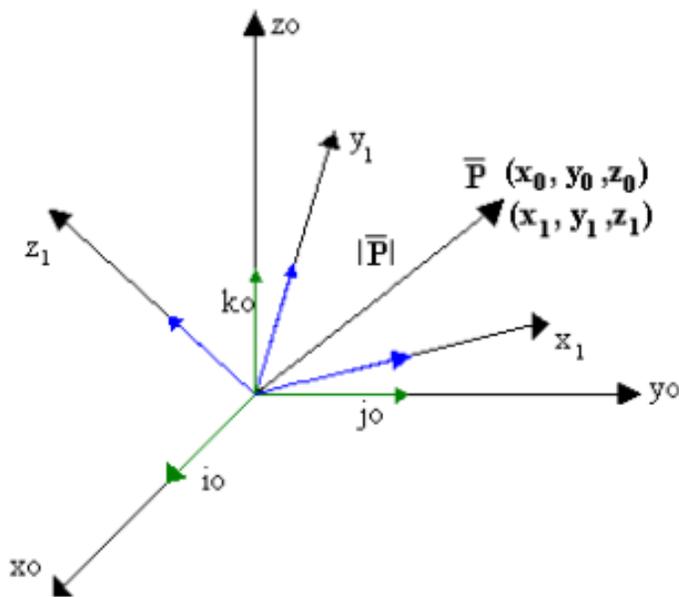


Figura 10. Sistema de referencia

donde  $x_0, y_0, z_0$  es un sistema de referencia inicial fijo y  $x_1, y_1, z_1$  es el sistema ligado al manipulador, los vectores  $\hat{i}_0, \hat{j}_0, \hat{k}_0$  y  $\hat{i}_1, \hat{j}_1, \hat{k}_1$  son los vectores unitarios correspondientes al sistema de referencia. Dado un punto P, proyectado en  $Ox_0y_0z_0$  en donde el punto p puede ser representado por el vector  $\bar{P}$ , en donde  $\hat{i}_0, \hat{j}_0, \hat{k}_0$  son los vectores de referencia,  $p_{0x}, p_{0y}, p_{0z}$  son los argumentos de proyección del vector  $\bar{P}_0$  en sus respectivos ejes.

$$\bar{P}_o = p_{ox}\hat{i}_o + p_{oy}\hat{j}_o + p_{oz}\hat{k}_o$$

y en  $OX_1Y_1Z_1$

$$\sum \bar{P}_1 = p_{1x}\hat{i}_1 + p_{1y}\hat{j}_1 + p_{1z}\hat{k}_1$$

dado que podemos representar a en  $\hat{i}_0, \hat{j}_0, \hat{k}_0$  y en  $\hat{i}_1, \hat{j}_1, \hat{k}_1$ . afirmamos

$$\bar{P}_0 = \bar{P}_1$$

y se tiene:

$$\hat{i}_0 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\hat{j}_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\hat{k}_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

podemos afirmar la siguiente relación:

$$\bar{P}_0 \cdot \hat{i}_0 = (p_{0x}\hat{i}_0 + p_{0y}\hat{j}_0 + p_{0z}\hat{k}_0) \cdot \hat{i}_0 = p_{0x},$$

$$\bar{P}_0 \cdot \hat{j}_0 = (p_{0x}\hat{i}_0 + p_{0y}\hat{j}_0 + p_{0z}\hat{k}_0) \cdot \hat{j}_0 = p_{0y},$$

$$\bar{P}_0 \cdot \hat{k}_0 = (p_{0x}\hat{i}_0 + p_{0y}\hat{j}_0 + p_{0z}\hat{k}_0) \cdot \hat{k}_0 = p_{0z},$$

$$\bar{P}_1 \cdot \hat{i}_0 = (p_{1x}\hat{i}_0 + p_{1y}\hat{j}_0 + p_{1z}\hat{k}_0) \cdot \hat{i}_0 = p_{1x},$$

$$\bar{P}_1 \cdot \hat{j}_0 = (p_{1x}\hat{i}_0 + p_{1y}\hat{j}_0 + p_{1z}\hat{k}_0) \cdot \hat{j}_0 = p_{1y},$$

$$\bar{P}_1 \cdot \hat{k}_0 = (p_{1x}\hat{i}_0 + p_{1y}\hat{j}_0 + p_{1z}\hat{k}_0) \cdot \hat{k}_0 = p_{1z},$$

de las ecuaciones anteriores se obtiene:

$$P_0i_0 = P_1i_0 = P_{1x}i_1i_0 + P_{1y}j_1i_0 + P_{1z}k_1i_0$$

Se expresa el punto inicial del eje x en función de los otros sistemas de referencia mostrados en la figura 8. Por ello se hace la misma operación con los demás ejes.

$$P_0j_0 = P_1j_0 = P_{1x}i_1j_0 + P_{1y}j_1j_0 + P_{1z}k_1j_0$$

$$P_0k_0 = P_1k_0 = P_{1x}i_1k_0 + P_{1y}j_1k_0 + P_{1z}k_1k_0$$

Expresando las ecuaciones anteriores en forma matricial:

$$p_{0x} = \begin{bmatrix} \hat{i}_1 \cdot \hat{i}_0 & \hat{j}_1 \cdot \hat{i}_0 & \hat{k}_1 \cdot \hat{i}_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{1x} \\ p_{1y} \\ p_{1z} \end{bmatrix}$$

$$p_{0y} = \begin{bmatrix} \hat{i}_1 \cdot \hat{j}_0 & \hat{j}_1 \cdot \hat{j}_0 & \hat{k}_1 \cdot \hat{j}_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{1x} \\ p_{1y} \\ p_{1z} \end{bmatrix}$$

$$p_{0z} = \begin{bmatrix} \hat{i}_1 \cdot \hat{k}_0 & \hat{j}_1 \cdot \hat{k}_0 & \hat{k}_1 \cdot \hat{k}_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{1x} \\ p_{1y} \\ p_{1z} \end{bmatrix}$$

Agrupando las matrices se tiene:

$$\begin{bmatrix} p_{0x} \\ p_{0y} \\ p_{0z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{i}_1 \cdot \hat{i}_0 & \hat{j}_1 \cdot \hat{i}_0 & \hat{k}_1 \cdot \hat{i}_0 \\ \hat{i}_1 \cdot \hat{j}_0 & \hat{j}_1 \cdot \hat{j}_0 & \hat{k}_1 \cdot \hat{j}_0 \\ \hat{i}_1 \cdot \hat{k}_0 & \hat{j}_1 \cdot \hat{k}_0 & \hat{k}_1 \cdot \hat{k}_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{1x} \\ p_{1y} \\ p_{1z} \end{bmatrix}$$

De donde el primer término representa la magnitud de  $\bar{P}_0$ , sobre cada uno de los ejes en  $x_0, y_0, z_0$ , el segundo término representa la matriz de rotación del sistema  $x_1, y_1, z_1$  y el tercero representa la proyección de  $\bar{P}$  en el sistema  $x_1, y_1, z_1$ .

Por ello simplificamos la expresión anterior por:

$$\bar{P}_0 = {}^1R_1 \bar{P}_1$$

Siguiendo el mismo análisis, se observa que la matriz de rotación del sistema  $x_1, y_1, z_1$ , resulta la transpuesta de la matriz de rotación para el sistema  $x_0, y_0, z_0$ .

$${}^1R_1 = \begin{bmatrix} i_1i_0 & j_1i_0 & k_1i_0 \\ i_1j_0 & j_1j_0 & k_1j_0 \\ i_1k_0 & j_1k_0 & k_1k_0 \end{bmatrix}$$

$${}^1R_0 = \begin{bmatrix} i_0i_1 & j_0i_1 & k_0i_1 \\ i_0j_1 & j_0j_1 & k_0j_1 \\ i_0k_1 & j_0k_1 & k_0k_1 \end{bmatrix}$$

$${}^0R_1 = {}^1R_0^T$$

Se observa que  ${}^1R_1 = {}^1R_0^T$ , pero por otro considerando el sistema  $x_0, y_0, z_0$  se tiene:

$$\bar{P}_1 = ({}^0R_1)^{-1} \bar{P}_0 = {}^1R_0 \bar{P}_0 = {}^0R_1^T \bar{P}_0$$

$${}^1R_0 = {}^0R_1^T$$

Como la inversa  ${}^0R_1$  es igual a su transpuesta, entonces se trata de una matriz ortogonal. Suponga ahora que:

$${}^0R_1 = [ r_1 \quad r_2 \quad r_3 ]$$

Donde  $r_1, r_2$  y  $r_3$ , representan cada una de las columnas de la matriz rotacional. Entonces, si  $\bar{P}_1 = \hat{i}_1$  se tiene

$$P_0 = [ r_1 \quad r_2 \quad r_3 ] \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = r_1$$

Esto significa que la primera columna de  ${}^0R_1$  representa la orientación del eje x, con respecto a  $Ox_0y_0z_0$ . Lo mismo vale para  $r_2$  y  $r_3$  que representan la orientación de los ejes  $y_1$  y  $z_1$  con respecto a  $Ox_0y_0z_0$ , respectivamente. Notese que

$$\det({}^0R_1) = r_1^T(r_{23}) = r_1^T = 1$$

Como el determinante es siempre +1 se dice que  ${}^0R_1$  pertenece al conjunto  $SO(3)$  [Special Orthogonal]. A este tipo de matrices se les conoce como ortogonales.

### 1.3.2 Rotaciones con respecto a sistemas de coordenadas fijos

Considerando las siguientes figuras:

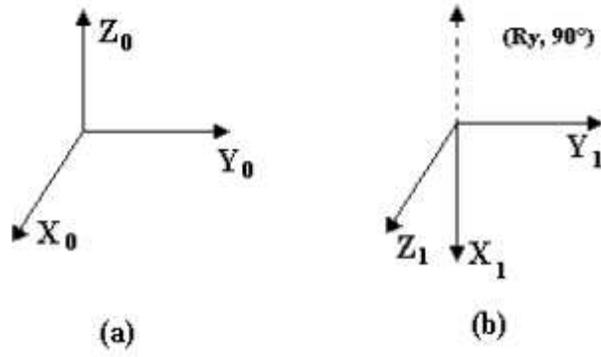


Figura 11. (a) Sistema inicial  $Ox_0y_0z_0$  (b) Rotación  $90^\circ$  alrededor de  $y_0$

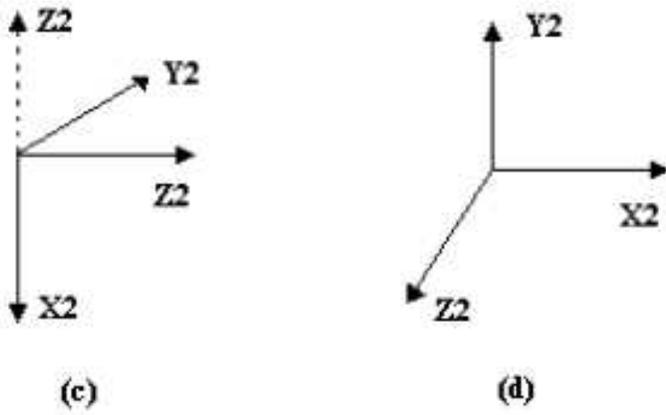


Figura 12. (c) Rot  $90^\circ$  alrededor de  $Z_0$  (d) Rot. de  $90^\circ$  alrededor de  $Z_1$

Donde deseamos conocer nuestro eje de inicio con respecto a una posición diferente. Observando las figuras 11 y 12, obtenemos las siguientes matrices de rotación.

$${}^0R_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$${}^1R_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

$${}^0R_2 = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Como se desea llegar a (c) partiendo de (a) con rotaciones básicas.

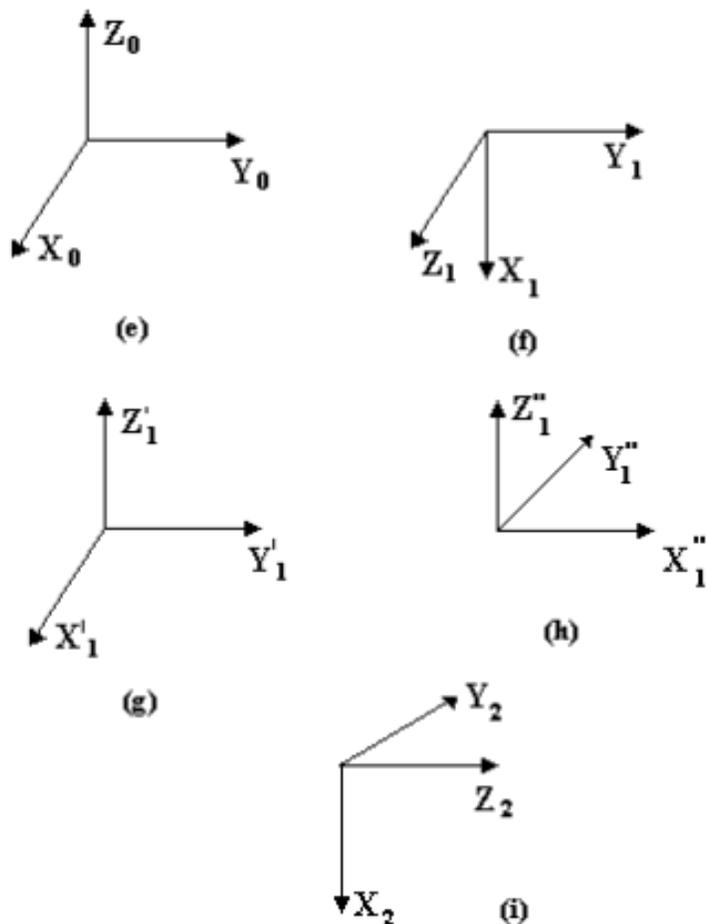


Figura 13. de (e) queremos llegar a (i), para ello pasos por todas las rotaciones que tuvieron lugar antes de llegar a esta posición

Entonces

$${}^0R_2 = R_{y,90^\circ} R_{y,-90^\circ} R_{z,90^\circ} R_{y,90^\circ} {}^0R_2 = R_{z,90^\circ} R_{y,90^\circ}$$

En general cuando se realizan rotaciones alrededor de los ejes de un sistema fijo, se puede obtener  ${}^0R_n$  como el producto de rotaciones básicas alrededor de los ejes de giro deseados, pero en orden inverso al que en realidad tienen lugar las rotaciones.

## 1.4 Actuadores

Los actuadores son dispositivos capaces de generar una fuerza mecánica a partir de fluidos, energía eléctrica o gaseosa. El actuador recibe el orden de un regulador o controlador de procesos que mediante una señal de salida activa un elemento final de control como son motores o válvulas.

Existen varios tipos de actuadores, según la energía que utilizan; los más comunes son:

- Neumáticos.
- Hidráulicos.
- Eléctricos.

Los actuadores neumáticos, hidráulicos son usados en la automatización de procesos. Los actuadores hidráulicos (motores hidráulicos) se emplean cuando lo que se necesita es potencia. Los actuadores neumáticos utilizan aire comprimido como fuente de energía y son recomendados para el control de movimientos rápidos, pero de precisión limitada. Los motores eléctricos son los más utilizados, por su sencillez y control preciso, así como otras propiedades en su funcionamiento, como consecuencia del empleo de la energía eléctrica. Las características de control, sencillez y precisión de los accionamientos eléctricos han hecho que sean los más usados en aplicaciones de robótica y máquinas herramientas en la actualidad.

Dentro de los actuadores eléctricos podemos distinguir tres tipos:

- Motores de Corriente Continua (DC).
- Servomotores.
- Motores de Pasos.

### 1.4.1 Actuadores Eléctricos

#### Motores a pasos

La patente de UK en 1919, se atribuye la invención de la estructura de los motores a pasos que pueden moverse con pasos pequeños a C.L Walker [37] un ingeniero civil de Alberdeen Escocia. En la patente se muestra la estructura interna que cuenta con 3 fases, cada uno de los polos salientes del estator poseían un grupo de dientes pequeños, el número de dientes del rotor eran en ésta patente especificaciones en un plano donde se describe la construcción, del motor conocido como el motor a pasos de reluctancia variable (figura 11).

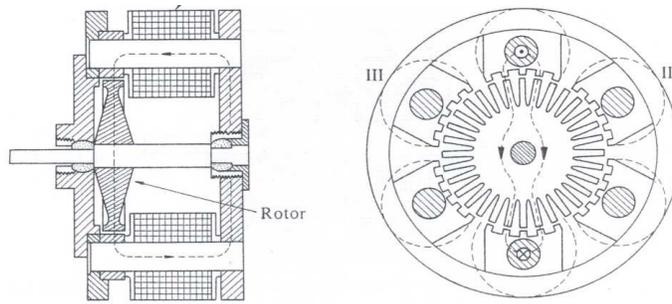


Figura 14. Motor a pasos de 3 fases

En 1927 se publicó el artículo titulado **“La aplicación de la electricidad en los buques de guerra”** en el se realiza la descripción de un motor a pasos de reluctancia variable de tres fases, el cual era utilizado para indicar la dirección mediante control remoto de los torpedos y las armas de los buques de guerra británicos.

Su mecánica rotatoria actuaba como un interruptor para el suministro de corriente eléctrica. El movimiento del rotor en pasos de  $15^\circ$  se debía a un engrane que tenía debajo, que le permitía una mayor exactitud requerida por los buques. En este artículo se hace un diseño simple del motor a pasos, muchos factores fueron considerados y se tomaron las precauciones necesarias para que la operación del motor fuera satisfactoria □.

En los años sesenta, surgieron diversos tipos de motores:

- Motor de 2 fases con pasos de  $1.8^\circ$
- Motor híbrido de dos fases con pasos de  $2^\circ$ ,  $2.5^\circ$  y  $5^\circ$
- Motor de magneto permanente con pasos de  $7.5^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $90^\circ$
- Motor de reluctancia variable con 128 o 132 pasos por revolución.

Los cuales estaban desarrollados para aplicaciones periféricas de las computadoras de diseño de esa década.

También en esta década se desarrolló la tecnología de semiconductores y de los circuitos integrados, los motores a pasos sufrieron una miniaturización, garantizando el incremento de confiabilidad en el funcionamiento óptico del motor, bajando su costo de producción, provocando su uso para un sin fin de aplicaciones.

En 1983 había motores de precisión comenzaron a tener un tamaño significativamente pequeño muy atractivos para las industrias.

En los noventa, los motores a pasos también ofrecían información sobre cada tipo de motor y sus características.

Los motores a pasos son dispositivos electromagnéticos, rotativos e incrementales que se encargan de convertir pulsos digitales en rotación mecánica. Su característica es el de poder mover un paso a la vez, por cada pulso que se le aplique su velocidad de rotación es relativa a la frecuencia de dichos pulsos.

Los motores a pasos presentan:

- un diseño efectivo,
- bajo costo en construcción,
- al no poseer escobillas no requiere mantenimiento,
- para su funcionamiento no requiere de dispositivos de realimentación, es decir que se trabaja en lazo abierto para su control.
- un límite conocido en el error de dinámico de posición.

El motor paso a paso está constituido esencialmente por dos partes: Una fija llamada “estator”, construida a base de cavidades en las que van depositadas las bobinas que excitadas convenientemente formarán los polos norte-sur de forma que se cree un campo magnético giratorio, y una móvil, llamada rotor construida mediante un imán permanente, con el mismo número de pares de polos, que el contenido en una sección de la bobina del estator; este conjunto va montado sobre un eje soportado por dos cojinetes que le permiten girar libremente.

El principio de funcionamiento de un motor a pasos es el siguiente:

El estator consta de dos electroimanes con  $n$  pares de polos cada uno. La interacción entre los polos del estator y los del rotor hace que al aplicarse dos ondas cuadradas desfasadas un cuarto de período entre sí a las dos bobinas de los electroimanes el rotor gire un cuarto de paso polar por cada cambio de polaridad en la tensión aplicadas a las bobinas (Ver figura 15).

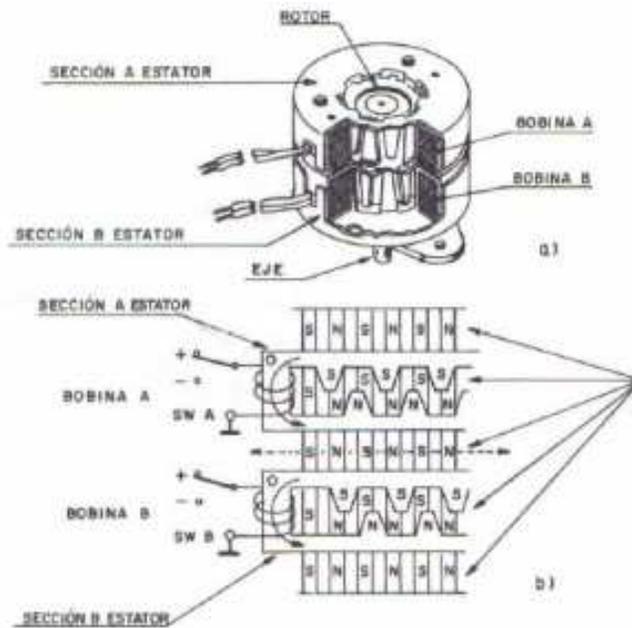


Figura 15. Principio de funcionamiento

Los motores pasos se pueden clasificar en motores unipolares y bipolares.

#### 1.4.1.1 Motores a Pasos Unipolares

Los motores a pasos unipolares tienen 6 o 5 cables de salida, dependiendo de su conexión interna. Este tipo de motores se caracteriza por ser simple de controlar.

Se conocen tres secuencias posibles para los motores a pasos unipolares, cada una de estas secuencias empiezan con el paso uno después de haber completado todos sus pasos y si se desea cambiar el sentido del movimiento del motor solo se debe programar sus secuencia de manera inversa.

Las características de estos motores son:

- Secuencia normal.

La secuencia que generalmente es recomendada por el fabricante es la secuencia normal, que permite al motor avanzar un paso por vez y debido a que siempre hay al menos dos bobinas activadas, se obtiene un alto torque de paso y de retención.

La siguiente tabla muestra la programación de secuencia:

<b>PASOS</b>	1	2	3	4
<b>Bobina A</b>	+	-	-	+
<b>Bobina B</b>	-	+	+	-
<b>Bobina C</b>	-	-	+	+
<b>Bobina D</b>	+	-	-	+

Tabla 1. Secuencia Normal

- Secuencia de tipo wave drive.

En esta secuencia se activa solo una bobina a la vez. En algunos motores esto brinda un funcionamiento más suave, al estar solo una bobina activada, el torque de paso y retención es menor.

Pasos	1	2	3	4
<b>Bobina A</b>	+	-	-	-
<b>Bobina B</b>	-	+	-	-
<b>Bobina C</b>	-	-	+	-
<b>Bobina D</b>	-	-	-	+

Tabla 2. Secuencia de tipo wave drive

- Secuencia del tipo medio paso

En esta secuencia las bobinas se activan de manera que puedan brindar un movimiento igual a la mitad del paso real, para conseguirlo primero se activa un par de bobinas y después se activa solo una y así sucesivamente. En la tabla 3 se observa la secuencia, con 8 movimientos existentes.

<b>Pasos</b>	1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Bobina A</b>	+	+	-	-	-	-	-	+
<b>Bobina B</b>	-	+	+	+	-	-	-	-
<b>Bobina C</b>	-	-	-	+	+	+	-	-
<b>Bobina D</b>	-	-	-	-	-	+	+	+

Tabla 3. Secuencia del tipo medio paso

## Motores a Pasos Bipolares

Los motores a pasos bipolares tienen generalmente 4 cables de salida, para estos se necesita controlar de forma adecuada el cambio de dirección del flujo de corriente a través de las bobinas en la secuencia apropiada para realizar un movimiento. Para que estos motores se muevan se necesita la inversión de la corriente que circula por sus bobinas en una secuencia definida. Cada inversión de la polaridad provoca el movimiento del eje en un paso, cuyo sentido de giro está determinado por la secuencia. La secuencia necesaria para controlar motores paso a paso de este tipo se muestra en la siguiente tabla:

Pasos	1	2	3	4
<b>Bobina A</b>	+	+	-	-
<b>Bobina B</b>	-	-	+	+
<b>Bobina C</b>	+	-	-	+
<b>Bobina D</b>	-	+	+	-

Tabla 4. Secuencia del motor Bipolar

Las diferencias físicas entre un motor bipolar y un unipolar se muestran en la figura 16.

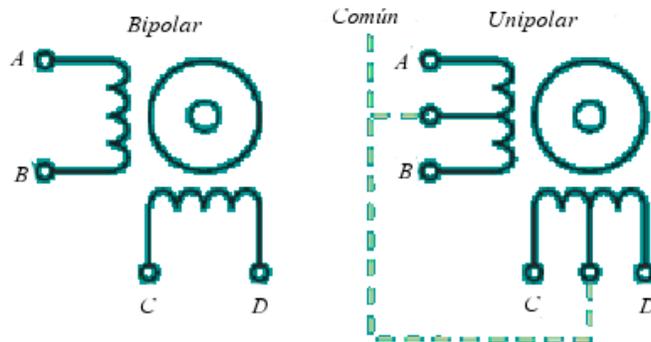


Figura 16.

#### 1.4.2 Motores a pasos unifilar y bifilar

Los motores a pasos unifilares, como el nombre implica, tienen solamente una bobina por poste del estator. Los motores de pasos con una bobina unifilar tendrán 4 alambres del plomo.

Los motores bifilares significan que hay dos sistemas idénticos de bobinas en cada poste del estator. Este tipo de configuración de la bobina simplifica la operación en la corriente de transferencia a partir de una bobina otra, en la dirección opuesta, invertirá la rotación del eje del motor. Mientras que, en un uso unifilar, cambiar la dirección requiere invertir la corriente en la misma bobina.

#### 1.4.3 Clasificación de los motores a pasos

Los motores a pasos pueden clasificarse en motores a pasos de reluctancia variable (VR), motor a pasos de magneto permanente (PM), motor a paso híbrido, motor de magneto con diente de agarre y motor a pasos Lineal.

##### 1.4.3.1 Motor a pasos de reluctancia variable (VR)

El motor a pasos de reluctancia variable, se considera el más básico, este tipo de motor consiste en un rotor y un estator que poseen un número de dientes diferentes entre sí; el rotor carece de un magneto permanente lo cual provoca que este rotor gire libremente

sin tener torque de detención, presenta una buena inercia, además presenta una buena inercia. (figura 17)

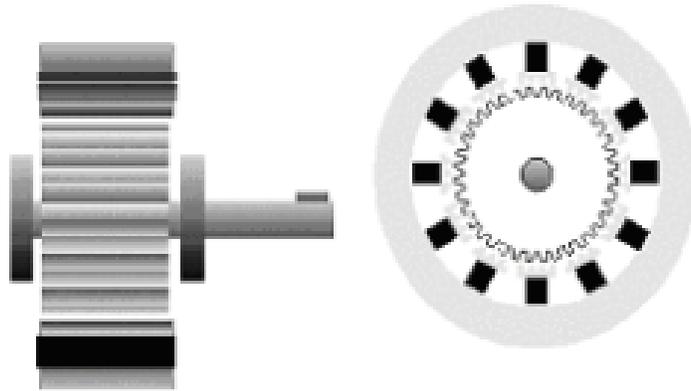


Figura 17. Vista de un motor a pasos de Reluctancia Variable

#### 1.4.3.2 Motor a pasos de magneto permanente (PM)

El motor a pasos de magneto permanente es el modelo donde el rotor es un imán permanente que mecaniza un número de dientes limitado por su estructura física. La principal ventaja de su posicionamiento es que no varía aún sin excitación y en régimen de carga. El motor de magneto permanente (PM) o tipo enlatado es el motor mas ampliamente usado para aplicaciones no industriales; el motor consiste en un rotor magneto permanentemente magnetizado radial y en un estator similar al motor V.R.

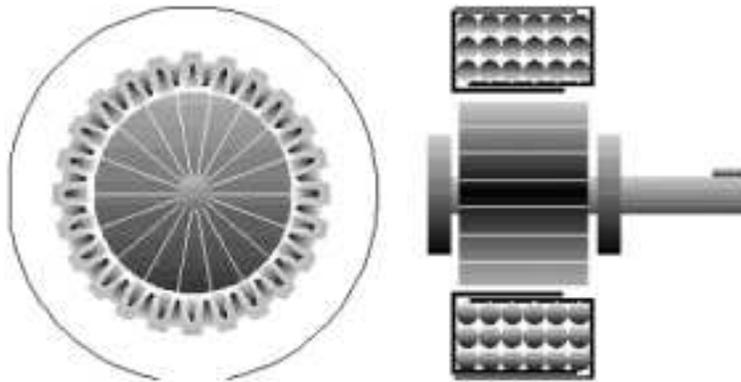


Figura 18. Vista en sección de un magneto permanente

#### 1.4.3.3 Motor a pasos híbrido

Este motor a pasos híbrido fue originalmente desarrollado como un motor de magneto permanente sincrónico de baja velocidad, su construcción es una combinación de los motores pasos de reluctancia variable y de magneto permanente. Este esta conformado

por un estator dentado y por un rotor de tres partes conocido como apilado simple (Figura 19). El motor ofrece diversas características de acuerdo a sus fases: El tipo 2 de 4 fases, el de 5 fases y el de 3 fases. Por ejemplo el motor a pasos de 5 fases presentaban las siguientes ventajas:

- Mayor resolución.
- Menor ruido acústico.
- Menor resonancia operacional.
- Menor torque de frenado.

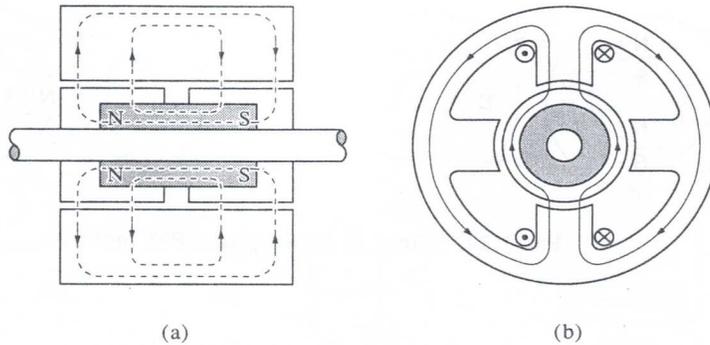


Figura 19. Motor híbrido (a) Flujo magnético en el rotor producido por el campo unipolar (b) Distribución del flujo de corriente en el estator

#### 1.4.3.4 Motor de magneto permanente con diente de agarre.

El motor de magneto permanente de dientes de agarre es otro tipo de motor, que consta de un estator. La característica del apilamiento del motor es que los dientes del estator producen un campo heteropolar proveniente de la corriente liberada por el anillo principal del estator. Este motor presenta un bajo costo en su manufactura.

#### 1.4.3.5 Motor a pasos lineal

El motor a pasos lineal está diseñado para que el rotor pueda girar en las direcciones CW y CCW teniendo como referencia al estator, actuando con movimiento lineal. Estos motores pueden ser clasificados en:

- Motor lineal de reluctancia variable
- Motor lineal de magneto permanente.

### 1.4.3.6 Aplicaciones

Las aplicaciones de los motores a pasos son debidas a su alta precisión y simplicidad de funcionamiento. Los motores a pasos se utilizan actualmente en: taxímetros, disk-drive, impresoras, plotters, brazos y robots completos, patrón mecánico de velocidad angular, registradores XY, relojes eléctricos, casetes digitales, control remoto, máquinas de escribir electrónicas, manipuladores, posicionamiento de válvulas en controles industriales, posicionamiento de piezas en general, bombas impelentes y en aplicaciones de electromedicina.

## 1.5.1 Sistemas de transmisión

### 1.5.1.1 Engranés

Los engranes son utilizados para transmitir potencia y movimiento angular proveniente de un eje a otro. Estos se clasifican en cuatro grupos:

- por las características físicas de sus dientes,
- por la posición en la que se encuentren situados los dientes,
- por su orientación,
- por su utilidad,

### 1.5.2 Tipos de engranes que operan en ejes paralelos

#### 1.5.2.1 Engranés de estímulo

Los engranes de estímulo tienen forma cilíndrica y sus dientes presentan un acomodo en espiral, estos dientes se encuentran en la superficie del engrane y son todos paralelos al eje del engrane. (Figura 20)

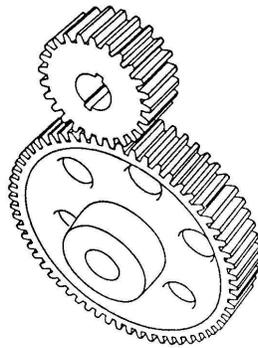


Figura 20. Engrane de estímulo

### 1.5.2.2 Engranés helicoidales

Los engranes helicoidales tienen forma cilíndrica, sus dientes suelen estar acomodados en espiral, pueden estar repartidos en una o dos bandas alrededor del engrane (Figura 21).

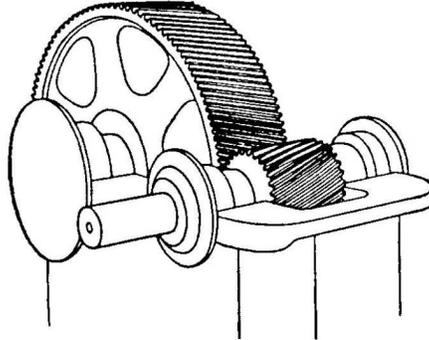


Figura 21. Engrane helicoidal

### 1.5.2.4 Engranés de helicoidal simple

Los engranes de helicoidal simple se definen como aquellos cuyos dientes se encuentran en una sola banda (Figura 22).

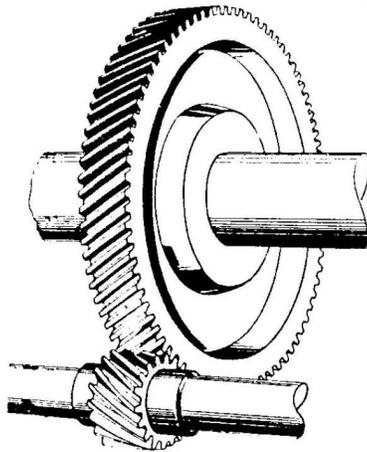


Figura 22. Engrane de helicoidal simple

### 1.5.2.4 Engranés de helicoidal doble

Los engranes de helicoidal doble se definen como aquellos que tienen los dientes en doble banda con una zona adjunta no dentada, y sus hélices se mueven en sentidos opuestos (Figura 23).

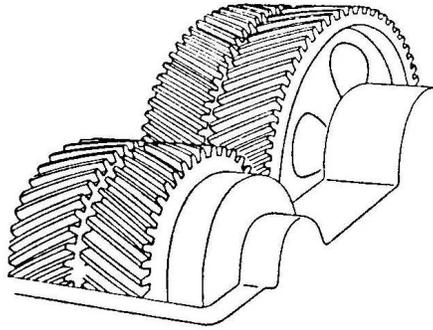


Figura 23. Engrane de helicoidal doble

#### 1.5.2.5 Engranés de raspa de arenque

Los engranes de raspa de arenque se definen así, si los dientes están en dos bandas las cuales se ensamblan, el engrane tiene una apariencia de raspa de arenque y por eso recibe dicho nombre (Figura 24).

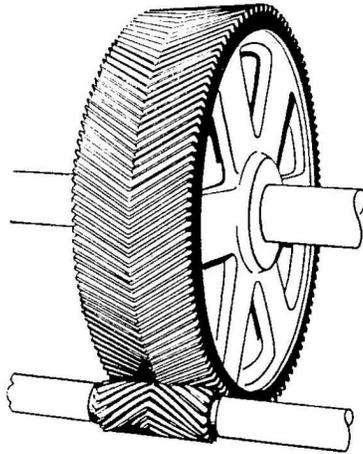


Figura 24. Engrane de raspa de arenque

#### 1.5.2.5 Engranés internos

Los engranes internos se definen como aquellos que cuentan con una forma cilíndrica y dientes helicoidales, un engranaje helicoidal interno hacia la izquierda posee acoplamiento con un piñón (Figura 25).

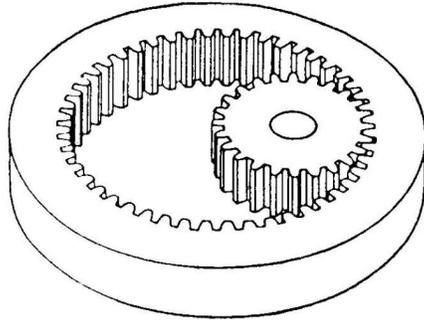


Figura 25. Engrane interno

### 1.5.1.3 Tipos de engranes que operan en intersección de ejes no paralelos

#### 1.5.1.3.1 Engranes cónicos

Los engranes cónicos como su nombre lo dice son de forma cónica. Esta forma cónica puede dividirse en: engrane cónico recto, engrane cónico en espiral, engrane de corona, engrane cónico oblicuo, engrane cónico de zerol, engrane de inglete y engrane de cara.

#### 1.5.1.3.2 Engranes cónicos rectos

El engrane cónico recto tiene dientes rectos (Figura 26).

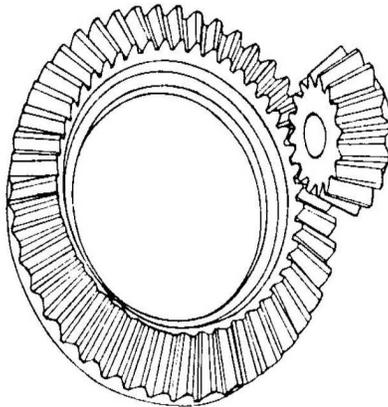


Figura 26. Engrane cónico recto

#### 1.5.1.3.3 Engranes cónicos en espiral

Los engranes cónicos en espiral tienen dintes curvados y oblicuos, simulando un espiral (Figura 27).

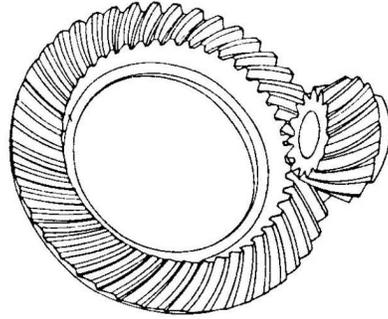


Figura 27. Engrane cónico en espiral

#### 1.5.3.4 Engranés de corona

Los engranes de corona tiene dientes que pueden ser rectos o curvados y estos pueden estar acomodados en la superficie del plano superior del engrane.

#### 1.5.3.5 Engranés cónicos oblicuos.

Los engranes cónicos oblicuos tienen dientes rectos y oblicuos.

#### 1.5.3.6 Engranés cónicos de zerol.

Los engranes cónicos de zerol tienen dientes curvos generalmente pero en algunos estos dientes son rectos (Figura 28).

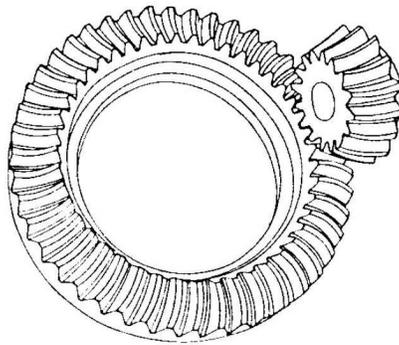


Figura 28. Engrane cónico de zerol

#### 1.5.3.7 Engranaje de inglete.

Los engranes cónicos de inglete son los que tienen igual número de dientes y sus ejes estan orientados al ángulo derecho (Figura 29).

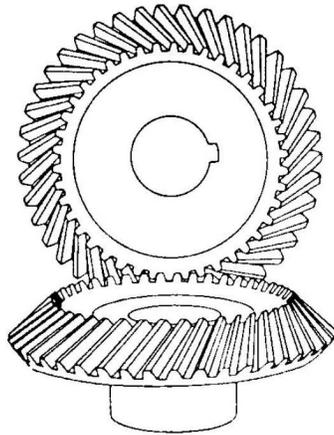


Figura 29. Engrane de inglete

### 1.5.3.8 Engranés de cara.

Los engranes de cara consisten en un estímulo o un piñón helicoidal en combinación con un engrane conjugado con forma de disco, los ejes usualmente miden los ángulos a la derecha.

Existen tipos de engranes que no operan en paralelo y no se intersectan con los ejes, como los siguientes:

### 1.5.4.1 Engranés hipoidales

Los engranes hipoidales son similares a los engranes cónicos, pero opera en no intersecciones entre ejes. Usualmente tiene dientes que son curvados y oblicuos.

### 1.5.4.2 Gusano cilíndrico

Los engranes de gusano cilíndrico son engranes con dientes en forma de tornillo, frecuentemente estos dientes poseen forma involuta o helicoidal (Figura 30).

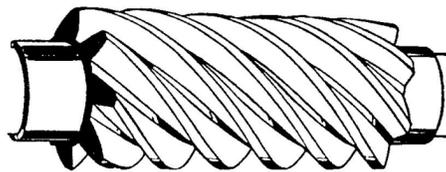


Figura 30. Gusano cilíndrico

### 1.5.4.3 Engrane de hélice cruzada

Los engranes de hélice cruzada trabajan con ejes cruzados y puede tener siete de igual o sentido opuesto (Figura 31).

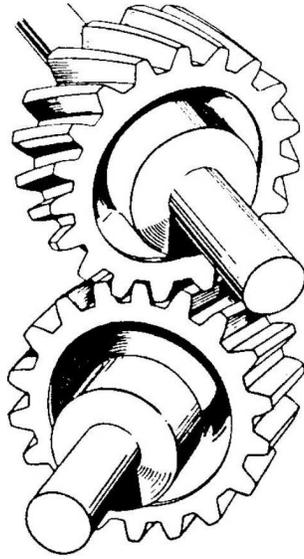


Figura 31. Engrane de hélice cruzada

## 1.5.5 Características de los dientes

### 1.5.5.1 Tamaño del diente: Paso y módulo

El tamaño del diente depende de dos elementos físicos característicos: el paso y el módulo. El paso se define como la distancia entre flancos homólogos de dientes consecutivos, medida sobre la circunferencia primitiva o axoide.

El paso se calcula a través de la siguiente fórmula.

$$p = \frac{2\pi r}{z} = \frac{\pi d}{z} \quad (1)$$

en donde el radio es  $r$  y el diámetro  $d$  de la circunferencia primitiva respectivamente y  $z$  el número de dientes.

El módulo se calcula a través de la siguiente fórmula:

$$m = \frac{p}{\pi} \quad (2)$$

de la fórmula (1) obtenemos:

$$m = \frac{2r}{z} \quad (3)$$

Por ejemplo, para que dos ruedas dentadas puedan engranar correctamente además de cumplir la ley engranaje; se debe tener el mismo paso, o lo que es equivalente, el mismo módulo, por lo tanto se cumplirá la siguiente fórmula:

$$m = \frac{2r_1}{z_1} = \frac{2r_2}{z_2} = \frac{d_1}{z_1} = \frac{d_2}{z_2} \quad (4)$$

La relación de transmisión  $\mu$ , será la relación entre los radios de la circunferencia primitiva, por lo que tenemos la siguiente formula:

$$\mu = \frac{r_1}{r_2} = \frac{z_1}{z_2} = \frac{d_1}{d_2} \quad (5)$$

### 1.5.5.2 Zona de engrane

El contacto entre las ruedas dentadas de un engranaje se produce entre los flancos de sus dientes.

En la figura 32 se pueden apreciar las circunferencias de fondo y cabeza que limitan al diente, la circunferencia axoide o primitiva, el paso  $p$ , la altura de cabeza  $h_a$  y la altura de fondo  $h_f$ .

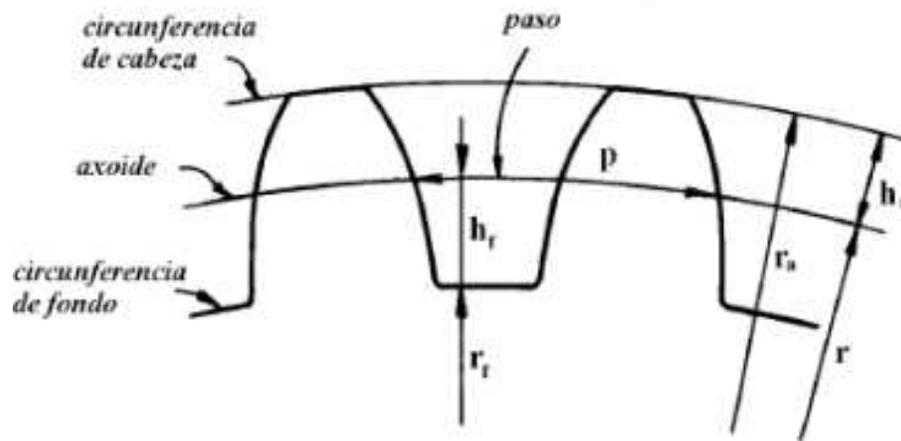


Figura 32. Dimensiones del diente de una rueda dentada

La zona de contacto (Figura 33) entre los dientes está limitada por las circunferencias de cabeza, por lo que las líneas de engrane quedan reducidas a la porción entre ellas.

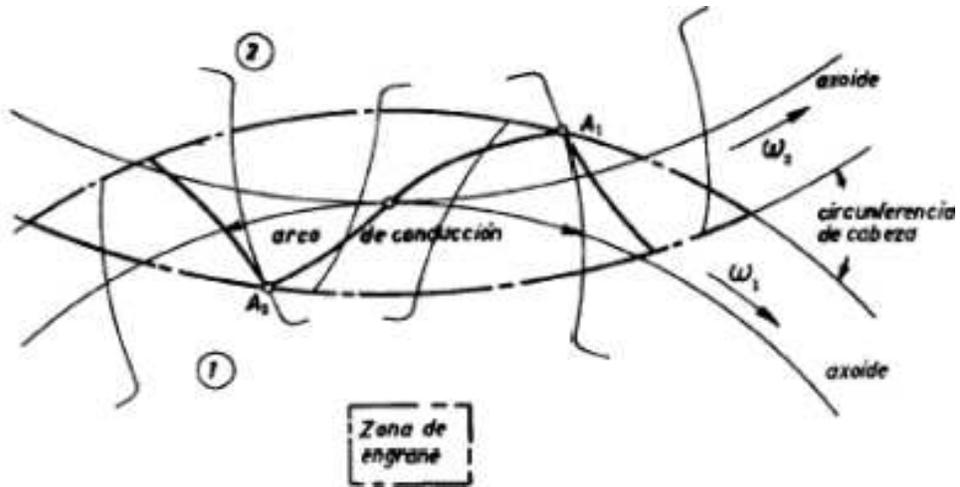


Figura 33. Zona de engrane entre dos ruedas dentadas

Quando el engrane se produce entre una rueda dentada y una cremallera, la zona de engrane queda limitada por la circunferencia de cabeza de la rueda y la recta de cabeza de la cremallera, tal como se ve en la figura 34.

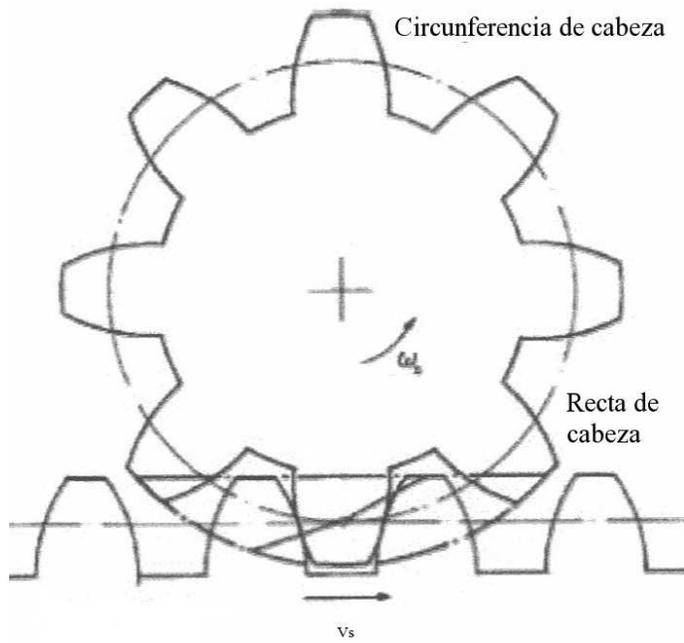


Figura 34. Zona de engrane entre rueda dentada y cremallera

## Capítulo 2

# Modelado mecánico del sistema paralelo

### Descripción

El presente trabajo presenta un diseño mecánico de un micromanipulador paralelo simétrico que pretende dar aportaciones originales enfocadas a tareas de microensamble y micromaquinado.

Una de las innovaciones de este diseño con respecto a otros sistemas mecánicos paralelos, es que el conjunto de piezas mecánicas que conforman los eslabones es un sistema de palancas que favorece el movimiento de la plataforma móvil de una forma fácil y precisa. En este capítulo nos enfocamos principalmente en la parte de diseño conceptual para finalmente abordar las etapas de simulación.

### 2.1 Diseño conceptual y preliminar del micromanipulador paralelo

En la figura 35 se muestra la idea de utilizar un sistema de palancas, que da como resultado movimientos simples y de alta precisión en un plano.

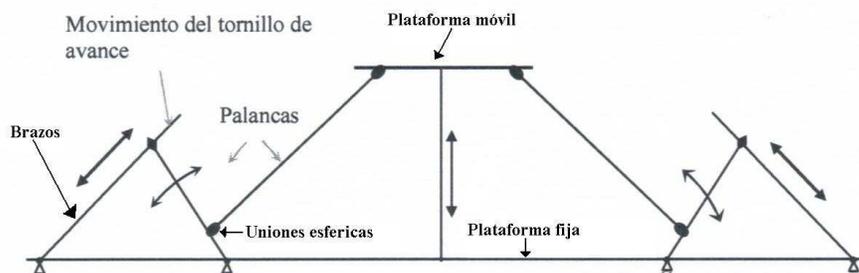


Figura 35. Diagrama

## 2.2 Descripción del manipulador

Siguiendo la descripción conceptual se diseña el siguiente micromanipulador (figura 36), esta compuesto por una plataforma fija (1), una plataforma móvil (5) y por tres cadenas cinemáticas cerradas e idénticas que denominaremos brazos. Los brazos están separados  $120^\circ$  uno del otro (figura 36); cada brazo lo conforman 3 eslabones  $S_i$  ( $i=1,2,3$ ).

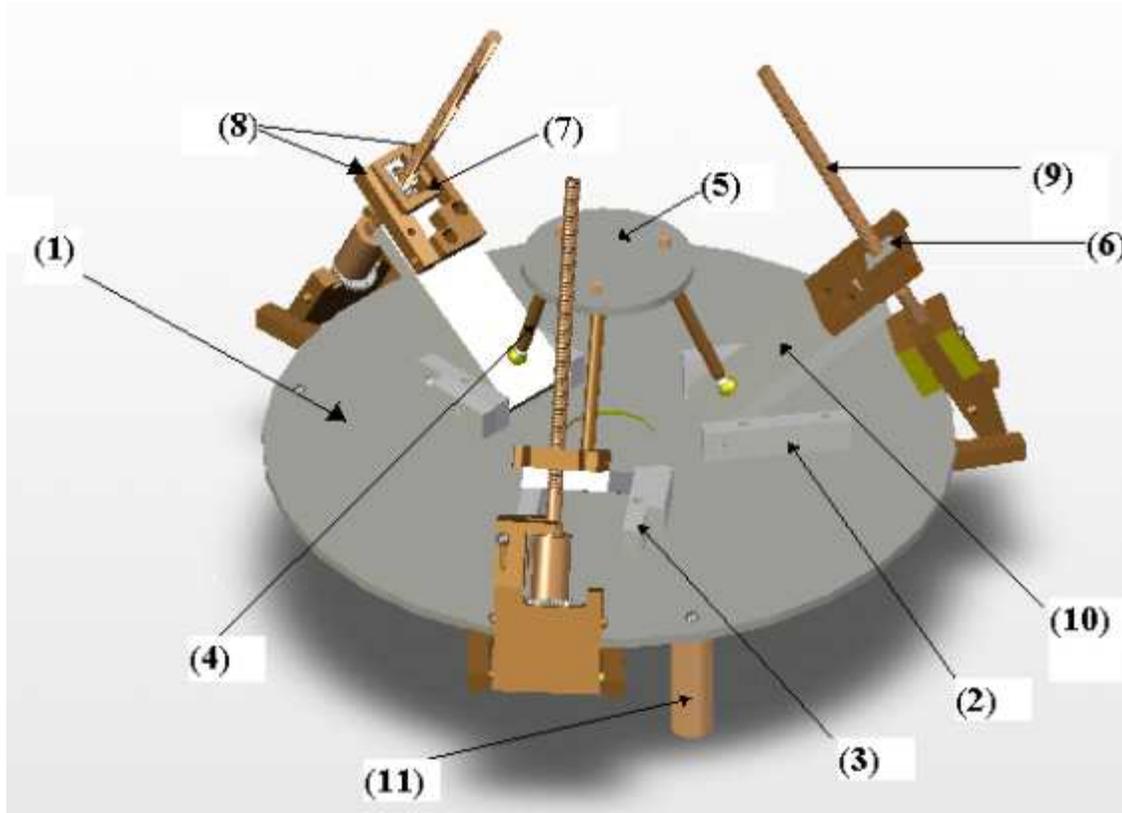


Figura 36. Micromanipulador paralelo 1- plataforma base; 2,3- soportes de unión; 4- barras; 5- plataforma móvil; 6,7- unión de cardán; 8- soportes de cardán; 9- tornillo sin fin; 10- barras base; 11- soportes fijos

El eslabón  $S_1$  superior lo compone una barra cilíndrica(4), este eslabón se conecta con el eslabón medio  $S_2$  a través de articulaciones esféricas. El eslabón  $S_2$  está compuesto de una barra (10); uno de sus extremos se fija con los soportes en la base fija.

El eslabón inferior  $S_3$  lo conforman un tornillo sin fin y sujetadores que se conectan con la plataforma fija y con el eslabón medio  $S_2$  la unión de  $S_3S_2$  es por medio de una unión de cardán. Los motores estarán sobre la plataforma inmóvil, que transfiere el movimiento mediante el tornillo sin fin transmitiendo un movimiento rotatorio en movimiento lineal.

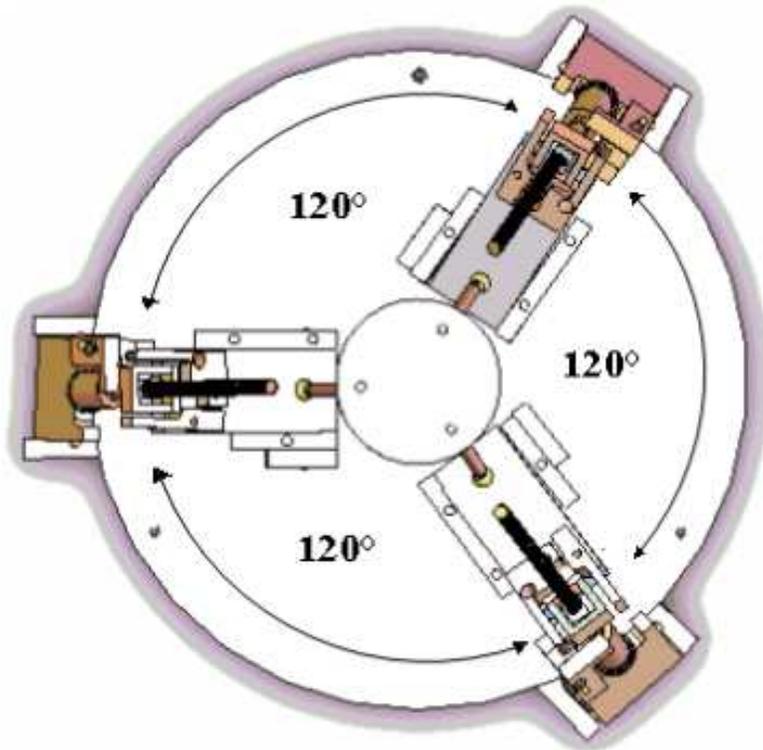
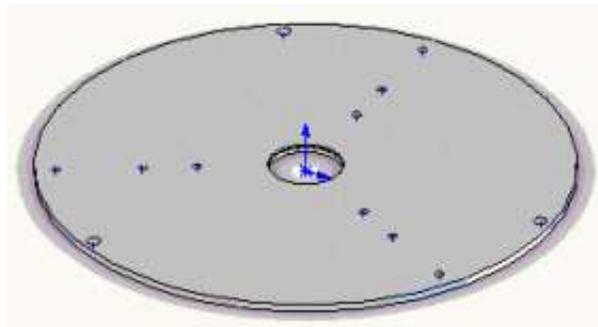


Figura 37. Micromanipulador paralelo

### 2.2.1 Diseño de detalle

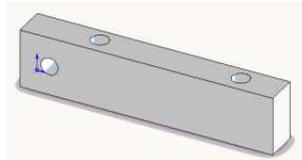
Para el diseño de dicho micromanipulador se expone una breve descripción de cada elemento que forma nuestro modelo de micromanipulador paralelo. Realizado en Solidworks y en el apéndice B se puede ver con más detalle sus dimensiones. Este diseño está realizado con el tipo de material que se utilizaría para su manufactura.

La **base** (1), sobre la cual se ensamblan y se colocan la mayoría de los demás componentes.

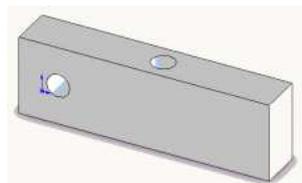


se diseñó en aluminio, se le agregaron barrenos para tornillos donde se fijaran los demás elementos.

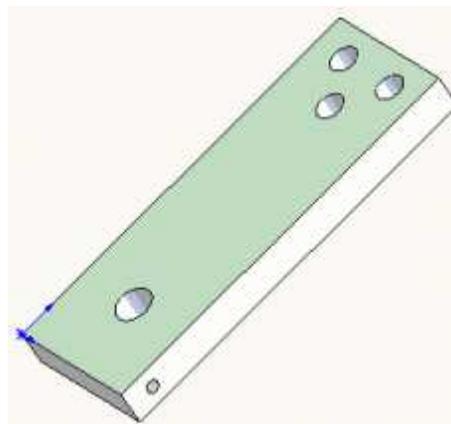
Los **soportes de unión izquierdos** (2), los cuales irán atornillados a la base, este soporte tiene la función de sostener la barra que comunicará el movimiento a nuestro elemento terminal a través de otros elementos. Estas barras diseñaron con barrenos



Los **soportes de unión derechos** (3), los cuales a diferencia de los anteriores, solo cuenta con un barreno en su parte media, para poder girar sobre este y así ajustar con ayuda de un tensor y del soporte izquierdo la barra.



La **barra base** (10) se monta y sujeta con la ayuda de balines que irán entre la barra y los soportes con la finalidad de dar movimiento a nuestra barra.



Para la **barra base** se hicieron barrenos en los cuales se colocaran los pivotes, sobre los cuales se montaran las barras redondas.

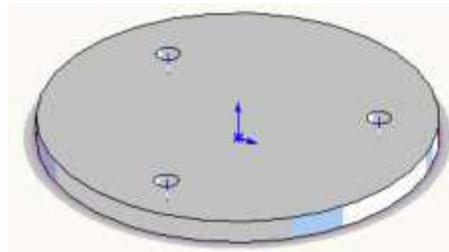
Los **pivotes** van montados en los barrenos de la barra base, pueden tener dos posiciones, las cuales varían en distancia, con el propósito de efectuar pruebas.

Estos pivotes se diseñaron en bronce, en el orificio superior se montara un balón y sobre este la barra cilíndricas.

La **barra cilíndricas** (4) también esta diseñada en bronce, que se coloca sobre los pivotes, entre ambos elementos hay un balón, el cual nos permite cierto rango de movimiento.

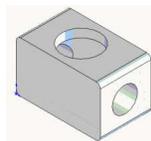


El **elemento terminal** (5) se diseñó en aluminio, este elemento es la base donde más tarde podremos colocar algún aditamento necesario para realizar tareas específicas.

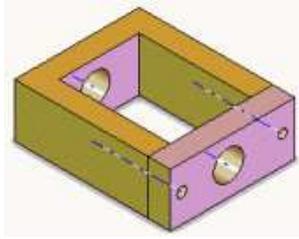


La transmisión del movimiento a nuestro elemento terminal, se logra a través de la barra cilíndrica que se encuentra entre los pivotes de la barra cuadrada y los pivotes del elemento terminal.

La parte que nos dará la posición y la precisión esta diseñada por medio de una tuerca por donde pasara el tornillo sin fin.

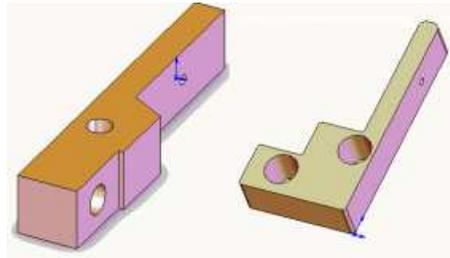


Esta **tuerca** está sujeta por los extremos a una **carcasa**, entre la tuerca y la carcasa



se colocan los balines para obtener movimiento.

La **carcasa** esta montada en el extremo de la barra cuadrada por medio de dos soportes de tuerca, se diseño en bronce.

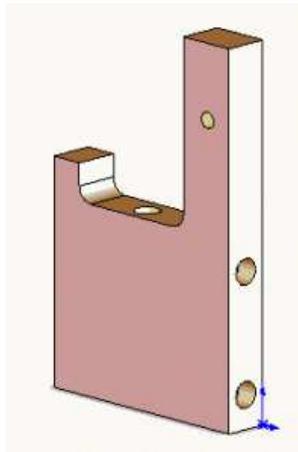


A su vez los soportes mantienen la tuerca sujeta al usar el soporte izquierdo como tensor, esto se logra por medio de un tornillo que atraviesa el soporte izquierdo y empuja al soporte derecho en el extremo, entre la tuerca y los soportes tendremos balines, para darle movimiento a esta.

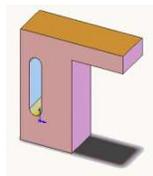
A través de la tuerca pasa el **tornillo sin fin** (9), el cual se fabricó en bronce con 56 hilos.



Este tornillo está montado sobre un **soporte del tornillo**, el cual se diseñó en bronce, el soporte del tornillo tiene un balín sobre el cual asienta el tornillo sinfín para poder rotar.



Sobre el soporte del tornillo sinfín, en el extremo, tendremos dos **sujetadores** los cuales evitarán que el tornillo se salga de su base, estos estarán uno a cada lado del soporte del tornillo sinfín.

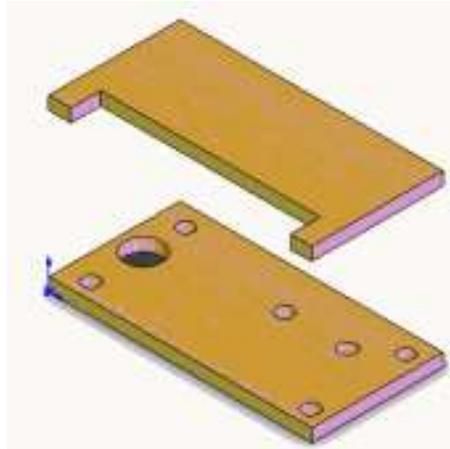


Nuestro soporte de tornillo, ya con el tornillo sinfín montado, estará a su vez sujetado por dos soportes mayores, los cuales están sujetos a la cara inferior de la base.

Uno de estos soportes mayores actúa también como tensor, ya que un tornillo lo atraviesa y empuja al otro soporte mayor, ajustando la tensión entre los soportes mayores y el soporte del tornillo, en este caso también utilizamos balines entre los soportes mayores y el soporte del tornillo para tener movimiento.

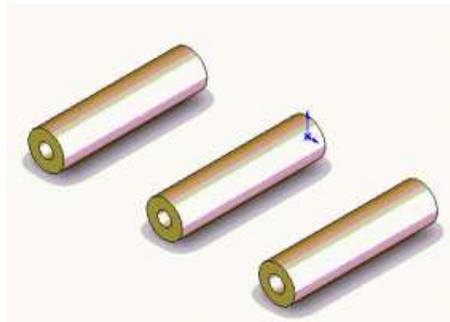
Ahora hablaremos sobre la parte de la transmisión, tendremos una **caja de reducción**, la cual nos dará junto con el tornillo sinfín la resolución que necesitamos, de esta forma también podremos controlar el desplazamiento y la velocidad.

La caja cuenta con dos tapas.

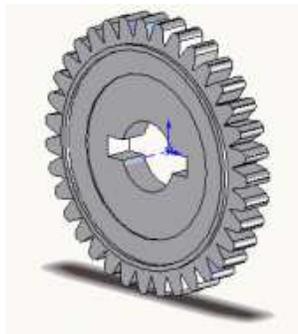


En la ilustración anterior podemos observar en la parte superior la tapa frontal la cual cuenta con un espacio para poder acoplar la caja al tornillo sinfín, en la parte inferior tenemos la tapa posterior en la que podemos ver un barreno de mayor dimensión, por el cual acoplaremos el motor a la caja de reducción.

Estas tapas están separadas por cuatro barras separadoras diseñadas en bronce.



Dentro del grupo de elementos de la caja de reducción tenemos las **flechas** y los **engranés**, para las flechas utilizaremos pedazos de alambre de 1.4 mm de espesor, los engranes están diseñados con nylon.



El engrane anterior consta de 35 dientes y es el de mayor diámetro este engrane estará acoplado con el tornillo sinfín.

La caja de reducción tiene la siguiente configuración, montados en la flecha derecha, tendremos el engrane de 35 dientes que irá acoplado con el tornillo sinfín, en seguida sobre esta misma flecha tendremos dos engranes dobles, estos engranes tienen 10 dientes el engrane menor y 20 dientes el engrane mayor.

Por otra parte en la flecha izquierda e intercalados, tendremos dos engranes dobles, el engrane doble posterior irá acoplado con el motor.



Teniendo acoplados los elementos de nuestra caja de reducción, montaremos esta sobre nuestro soporte de tornillo. La configuración del motor, en esta en proceso de realización que se acoplará a la tapa posterior de la caja de reducción.

Terminaremos atornillando tres patas a la cara inferior de la base, separadas por un ángulo de 120 grados entre ellas, las cuales darán soporte y estabilidad a nuestro mecanismo.



El prototipo de manipulador paralelo a analizar cuenta con una plataforma móvil, la cual está sujeta por 3 articulaciones separadas 120° entre sí a lo largo de la circunferencia de la plataforma fija.

El análisis que se va a realizar sobre la plataforma móvil, se hace considerando los siguientes puntos:

- Se analizará como si se tratara de un plano en el espacio.
- Inicialmente se encuentra en el plano  $z = 0$ .
- Poseen un punto fijo, en el centro de la plataforma, al cual consideramos el origen.
- Posee tres puntos de apoyo.
- Los puntos que describen la posición de cada articulación, poseen un movimiento ascendente y descendente, movimiento que realizan con tiempos defasados entre si (figura 38).

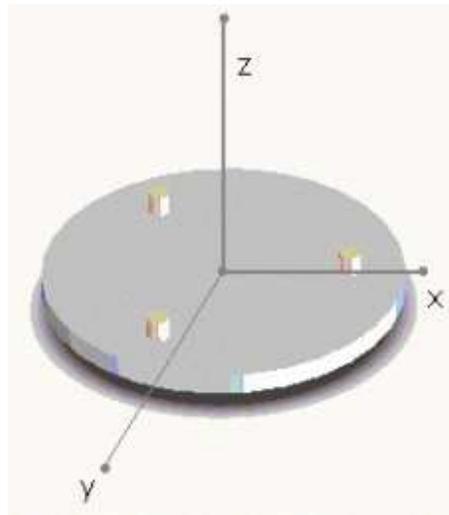


Figura 38. Plataforma en 3D

## 2.3 Ubicación de las articulaciones en la plataforma

Como se menciona la plataforma móvil se analiza como el plano  $z=0$ , en el cual encontramos los siguientes puntos:

$$V_1(r, 0, 0)$$

$$V_2(-r, r \sin 30^\circ, r \cos 30^\circ, 0)$$

$$V_3(-r \sin 30^\circ, -r \cos 30^\circ, 0)$$

Donde  $r$  es el radio de la plataforma móvil.

(ver figura 39)

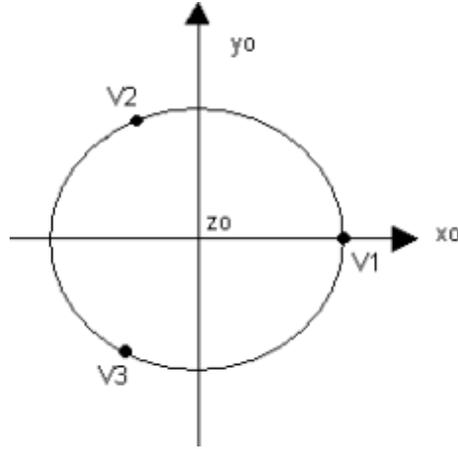


Figura 39

Los cuales describen la ubicación de las 3 articulaciones que soportan a nuestra plataforma móvil.

El sistema de referencia utilizado es aquel cuando  $z=0$ , que considera a la plataforma móvil totalmente horizontal. Y si esta dejara de ser horizontal, se utilizaría como sistema de referencia la posición anterior, con respecto a la actual para encontrar la nueva orientación de la plataforma.

## 2.4 Matrices de rotación con respecto a un sistema de coordenadas fijo.

Para poder lograr cualquier orientación se cuenta con 2 ángulos  $(\theta, \phi)$  en base a los cuales se puede determinar la ubicación en el espacio que deben tener los soportes de la plataforma.

$$R_{z,\theta} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_{y,\phi} = \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & \sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \phi & 0 & \cos \phi \end{bmatrix}$$

Donde  $\theta$  es el ángulo de inclinación de la plataforma con respecto al eje  $z$  y el ángulo  $\phi$  es el ángulo de movimiento con respecto al eje  $y$ .

Con estas matrices obtenemos la matriz de rotación total que nos indica la orientación de nuestra plataforma.

$$\text{Matriz de Rotación total} = (R_{y,\phi} R_{z,\theta})^T \quad (6)$$

## 2.5 Análisis de las articulaciones

Dada una orientación arbitraria (mecánicamente posible), se necesita realizar un análisis geométrico para determinar la ubicación de los puntos que sostienen la plataforma (Ver figura 40).

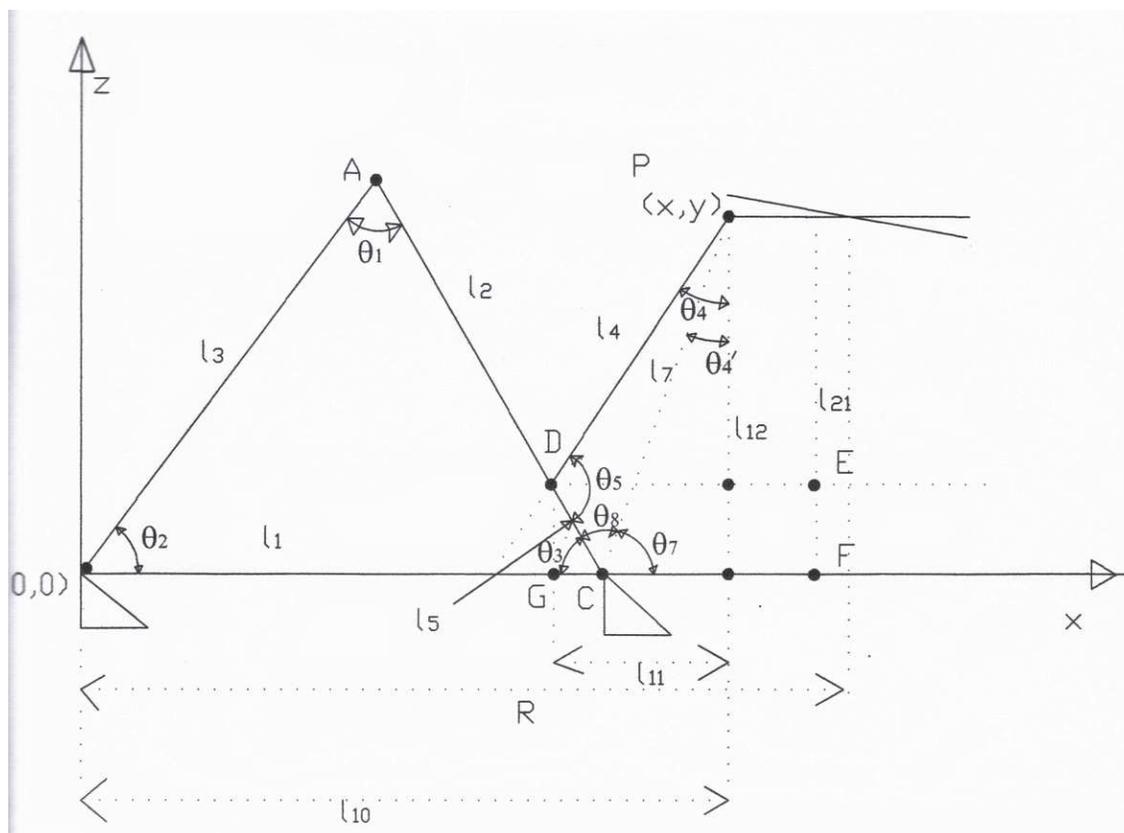


Figura 40. Plano en 2D

En esta figura podemos observar, que al obtener un movimiento oscilatorio de la plataforma móvil, algunas distancias que mantiene esta plataforma, se verán modificadas, como es el caso del segmento  $\ell_{11}$ , ya que la proyección del punto P cambiara de acuerdo a la orientación que tenga la plataforma.

Como se observa en la figura 40 se forma un triángulo con  $l_4, l_5, l_7$  por lo que sus ángulos respectivos nos dan la siguiente fórmula

$$\theta_3 + \theta_8 + \theta_7 = \pi$$

Conocemos tambien  $R_T$

Donde  $R_T$  es el radio total, considerando los soportes de la base.

$$x = R_T - r \cos \phi \quad (7)$$

En la ecuación anterior  $x$  es la distancia que la plataforma se mueve, con respecto al eje  $x$  considerado para el análisis de la plataforma móvil.

$$z = l_{20} + r \sin \phi \quad (8)$$

Donde  $z$  es la altura que tiene el punto que describe la inclinación y la orientación de la plataforma.

Mediante la figura 40 podemos describir matemáticamente a  $\theta_7$  en terminos de valores conocidos.

$$\tan \theta_7 = \frac{z}{x-l_1} \quad (9)$$

Despejando  $\theta_7$  de la ecuación 9 obtenemos:

$$\theta_7 = \tan^{-1} \frac{z}{x-l_1} \quad (10)$$

Al conocer varios factores que interviene en la obtención de  $\theta_7$ , podemos poner esta incognita en términos de distintos valores conocido, mediante el triangulo **CPz** obtenemos que:

$$\sin \theta_7 = \frac{z}{l_7} \quad (11)$$

Despejando  $l_7$  de la ecuación 11.

$$l_7 = \frac{z}{\sin \theta_7} \quad (12)$$

sustituyendo la ecuación 10 en la ecuación 12.

$$l_7 = \frac{z}{\sin(\tan^{-1} \frac{z}{x-l_1})} \quad (13)$$

Considerando el triángulo que forman  $l_4$ ,  $l_5$  y  $l_7$ , podemos utilizar la ley de los cosenos para encontrar  $\theta_8$ , en términos de las distancias.

$$l_4^2 = l_5^2 + l_7^2 - 2l_5l_7 \cos \theta_8 \quad (14)$$

$$\theta_8 = \cos^{-1} \frac{-l_4^2 + l_5^2 + l_7^2}{2l_5l_7} \quad (15)$$

Observando la figura 2.1, podemos determinar la siguiente ecuación:

$$\theta_3 = \pi - \theta_7 - \theta_8 \quad (16)$$

De la ecuación 16, conocemos el valor de  $\theta_3$ , pues lo obtenemos de el triángulo  $0\bar{A}C$ , formulando la ley de los cocenos para este triángulo obtenemos:

$$\text{de: } l_3^2 = l_1^2 + l_2^2 - 2l_1l_2 \cos \theta_3 \quad (17)$$

De la ecuación 17, el valor que necesitamos conocer es  $l_3$ , ya que este, es la distancia que se recorre de nuestro tornillo sin fin para lograr una posición deseada de la plataforma móvil.

despejando  $l_3$

$$l_3 = \sqrt{l_1^2 + l_2^2 - 2l_1l_2 \cos \theta_3} \quad (18)$$

Sustituyendo la ecuación 16 en la ecuación 18.

$$l_3 = \sqrt{l_1^2 + l_2^2 - 2l_1l_2 \cos(\pi - \theta_7 - \theta_8)} \quad (19)$$

Sustituyendo la ecuación 10 y 15 en la ecuación 19 tenemos :

$$l_3 = \sqrt{l_1^2 + l_2^2 - 2l_1l_2 \cos\left[\pi - \tan^{-1}\left(\frac{z}{x-l_1}\right) - \cos^{-1}\left[\frac{-l_4^2 + l_5^2 + \left(\frac{z}{\sin(\tan^{-1}\frac{z}{x-l_1})}\right)^2}{2l_5\left(\frac{z}{\sin(\tan^{-1}\frac{z}{x-l_1})}\right)}\right]\right]} \quad (20)$$

Donde podemos ver que el desplazamiento del tornillo sin fin queda en función del ángulo de inclinación de la plataforma móvil.

$$l_3 = f(\phi) \quad (21)$$

Considerando las siguientes longitudes (en cm):

$$l_1 = 8$$

$$l_2 = 8$$

$$l_3 = l_3$$

$$l_4 = 4.5$$

$$l_5 = 1.25$$

$$l_{20} = 5$$

$$R_T = 11$$

Utilizando las fórmulas (1)-(20) establecidos, se obtienen las condiciones nominales de la plataforma móvil):

$$x = 11 - 2.5 \cos(0^\circ) = 8.5$$

$$z = 5 + 2.5 \sin(0^\circ) = 5$$

Para poder obtener nuestra  $l_3$  nominal, es necesario obtener a  $\theta_3$  nominal y para ello realizamos el siguiente desarrollo:

Utilizando la formula (9).

$$\tan \theta_7 = \frac{5}{8.5 - 8} = 10$$

$$\theta_7 = \tan^{-1} 10 = 84.28^\circ$$

Sustituyendo el valor anterior en la ecuación (11).

$$\sin \theta_7 = 0.9965$$

Obtenemos  $l_7$  nominal susstituyendo el valor obtenido en la ecuación (12):

$$l_7 = \frac{5}{0.9965} = 5.025$$

Con este valor obtenemos a  $\theta_8$  de la ecuación (15)

$$\theta_8 = \cos^{-1}\left(\frac{-4.5^2 + 1.25^2 + 5.025^2}{2 \times 1.25 \times 5.025}\right) = 58.50^\circ$$

Entonces empleando la formula (16), obtenemos a  $\theta_3$  nominal.

$$\theta_3 = 180^\circ - 58.50^\circ - 84.28 = 37^\circ$$

Obteniendo todos los valores que necesita la ecuación 20, tenemos a nuestra  $l_3$  inicial.

$$l_3 = 5.104$$

Con los valores obtenidos conocemos el comportamiento inicial de la plataforma móvil. Y seguimos el mismo procedimiento para obtener los valores máximos que puede tener ésta ya en movimiento.

Para obtener sus valores limite consideramos a  $\theta_8 = 0$ , caso matematicamente posible, pero no mecánicamente.

Entonces utilizando la ecuación 15 se tiene:

$$\cos 0 = \frac{l_7^2 + 1.25^2 - 4,5^2}{2 \times 1.25_7}$$

$$1 = \frac{l_7^2 + 1.56 - 20.25}{2 \times 1.56_7}$$

$$l_7^2 + 1.56 - 20.25 - 2 \times 1.56_7 = 0$$

Utilizando la formula general y tomando el valor positivo tenemos el valor limite de  $l_7$ .

$$l_7 = \frac{2.5 \pm \sqrt{6.25 - 4(-18.69 \times 1)}}{2}$$

$$l_7 = \frac{2.5 + 9}{2} = 5.75$$

Con el resultado anterior obtenemos  $\theta_7$

$$\theta_7 = \sin^{-1}\left(\frac{5.75}{5.75}\right) = 90^\circ$$

Se considera a  $z=5.75$  ya que es el valor máximo necesario, para que el cociente fuera uno y así obtener  $\theta_7$  máxima.

Con el dato anterior podemos obtener a  $\phi_{MAX}$

$$\phi_{MAX} = \sin^{-1}\left(\frac{0.75}{2.25}\right) = 17.45$$

Que representa la máxima inclinación que puede tener la plataforma, como se mencionó anteriormente, este es un valor teórico, que matemáticamente es posible, pero físicamente no, pues el material del que esta hecha la plataforma móvil, así como sus soportes, están hechos de materiales ligeros, pero no maleables.

Con esta  $\phi_{MAX}$  se obtiene que:

$$z = 5.75$$

$$\Delta z = 0.75$$

$$x = 11 - 2.5 \cos 17.45 = 8.61$$

$$\Delta x = 0.11$$

Ahora se obtiene la  $\theta_{MAX}$  con la ecuación (16).

$$\theta_3 = 180^\circ - 90^\circ - 0^\circ = 90^\circ$$

Obtenemos a  $l_{3MAX}$ :

$$l_{3MAX} = \sqrt{8^2 \times 8^2 - 2 \times 8 \times 8 \times \cos 90^\circ} = 11.31$$

Como los valores máximos, no son reales, se propone una  $\phi$  máxima real, a la cual denotaremos como  $\phi_P$ , donde P significa posible.

Con este valor obtenemos a  $z_P$ ,  $x_P$ ,  $\theta_{3P}$  y  $l_{3P}$ , que van a ser las medidas e inclinaciones máximas posibles que puede tener nuestro modelo.

Se propone el valor de  $\phi_P=12.5^\circ$

Así, obtenemos:

$$z_P = 5 + 2.5 \sin 12.5^\circ = 5.54$$

$$\Delta z_P = 0.54$$

$$x_P = 11 - 2.5 \cos 12.5^\circ = 8.56$$

$$\Delta x = 0.06$$

Siguiendo los procedimientos anteriores obtenemos:

$$\theta_7 = \tan^{-1} \frac{5.54}{8.56 - 8} = 84,22^\circ$$

Ahora se obtiene  $l_7$ .

$$l_{7P} = \frac{5.54}{\sin 84.22^\circ} = 5.56$$

$$\theta_{8P} = 27.62^\circ$$

Obteniendo  $\theta_{3P}$

$$\theta_{3P} = 180^\circ - 27.62 - 84.22 = 68.1^\circ$$

$$l_{3P} = \sqrt{8^2 \times 8^2 - 2 \times 8 \times 8 \times \cos 68.1^\circ} = 8.96$$

Considerando nuestra  $l_3$  nominal, obtenemos un  $\Delta$  de  $l_3$ , obteniendo así el valor mínimo que se recorre en nuestro tornillo de avance.

$$\Delta l_3 = 8.96 - 5.10 = 3.86$$

Por ello nuestra  $l_{3MINIMA}$  es:

$$l_{3MINIMA} = 5.10 - 3.86 = 1.24$$

Estos valores denotados con el subíndice P, son los rangos de movimiento de nuestra plataforma móvil. Como el modelo posee 3 articulaciones, este análisis se debe hacer tres veces para ubicar en que posición esta nuestra plataforma y que orientación tiene en cada uno de sus puntos de apoyo. Como esta plataforma móvil tiene un movimiento oscilatorio (teóricamente) las alturas  $z$  alturas de cada una de las articulaciones serán diferentes.

En la figura 2.1 se observa la zona de trabajo en la cual puede tener movimiento la plataforma móvil.

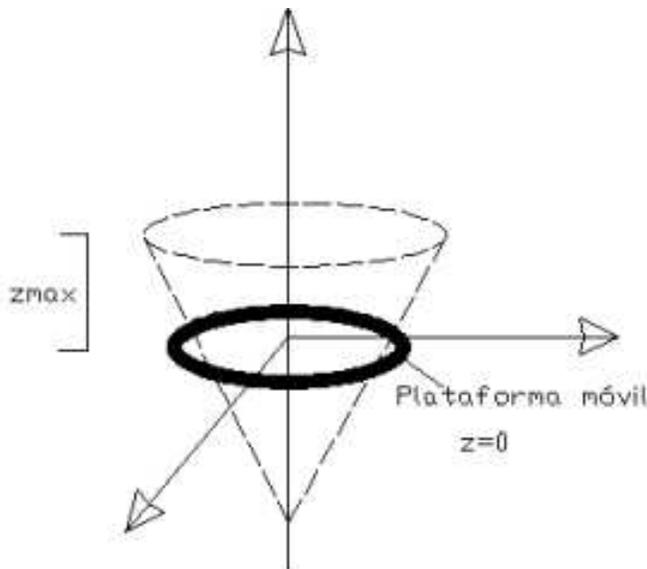


Figura 41. Área de Trabajo

## Capítulo 3

# Evaluación y Resultados

Para corroborar los resultados obtenidos por las ecuaciones citadas en el capítulo 2, se elaboró una simulación numérica en el software matlab (Apendice C), en el cual se programaron las matrices que proporcionan la orientación  $\phi$  de la plataforma móvil. En ésta simulación podemos observar la grafica que nos describe el comportamiento de la plataforma móvil al darle una orientación deseada y se muestran a continuación.

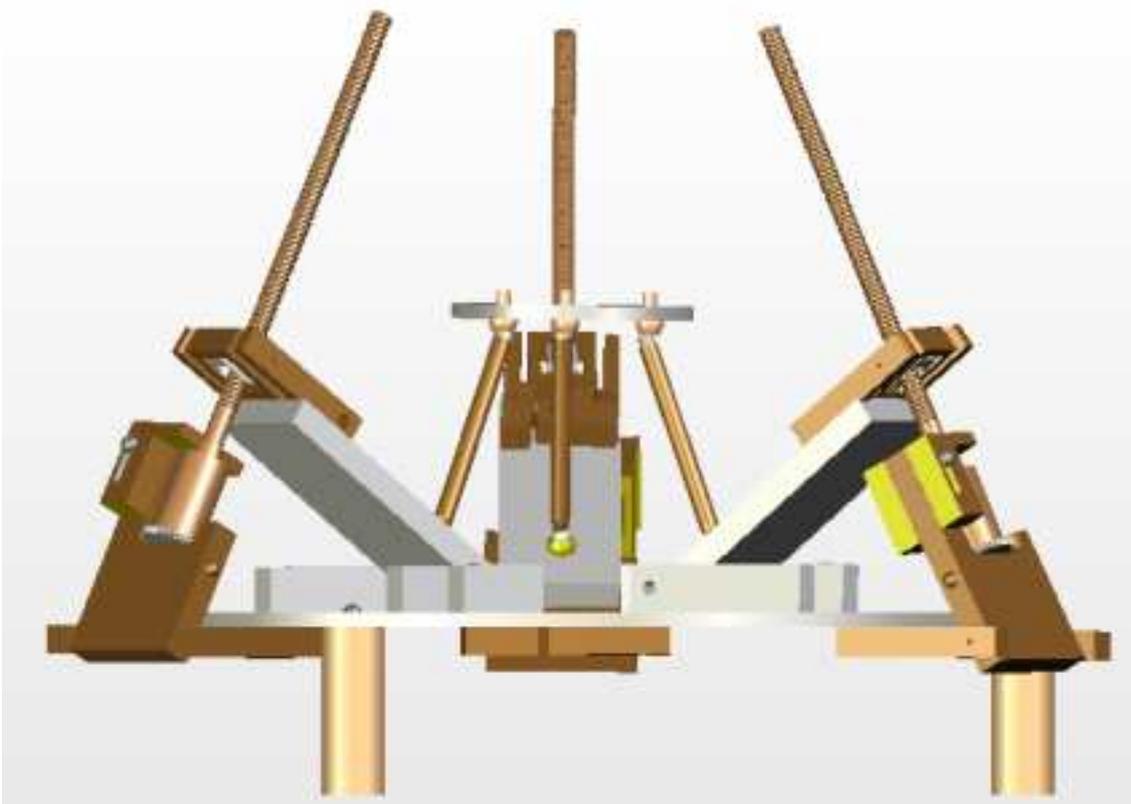


Figura 42. Posición inicial del sistema



Figura 43. Primer movimiento de la plataforma de derecha a izquierda

Para este movimiento dos de las articulaciones deben subir y la otra bajar, la sincronización que deben tener estas se deberá a los motores a pasos que estas tengan y la programación de estos, para que las articulaciones reaccionen al mismo tiempo, pero conservando su independencia en la dirección de movimiento y en la distancia que debe subir cada articulación.

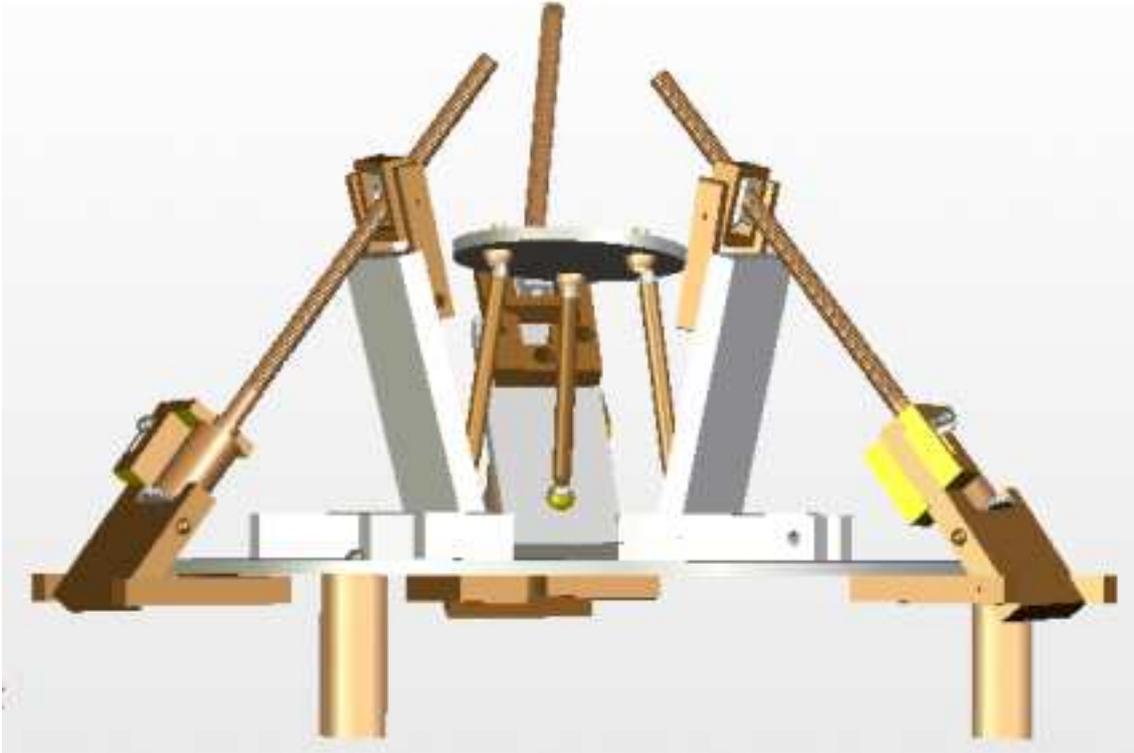


Figura 44. Segundo movimiento de la plataforma móvil

En este movimiento al igual que en el primero, las tres articulaciones deben moverse de manera independiente, con una altura diferente en cada caso, pero reaccionando las tres a la misma velocidad, al mismo tiempo y cumpliendo con la trayectoria deseada.

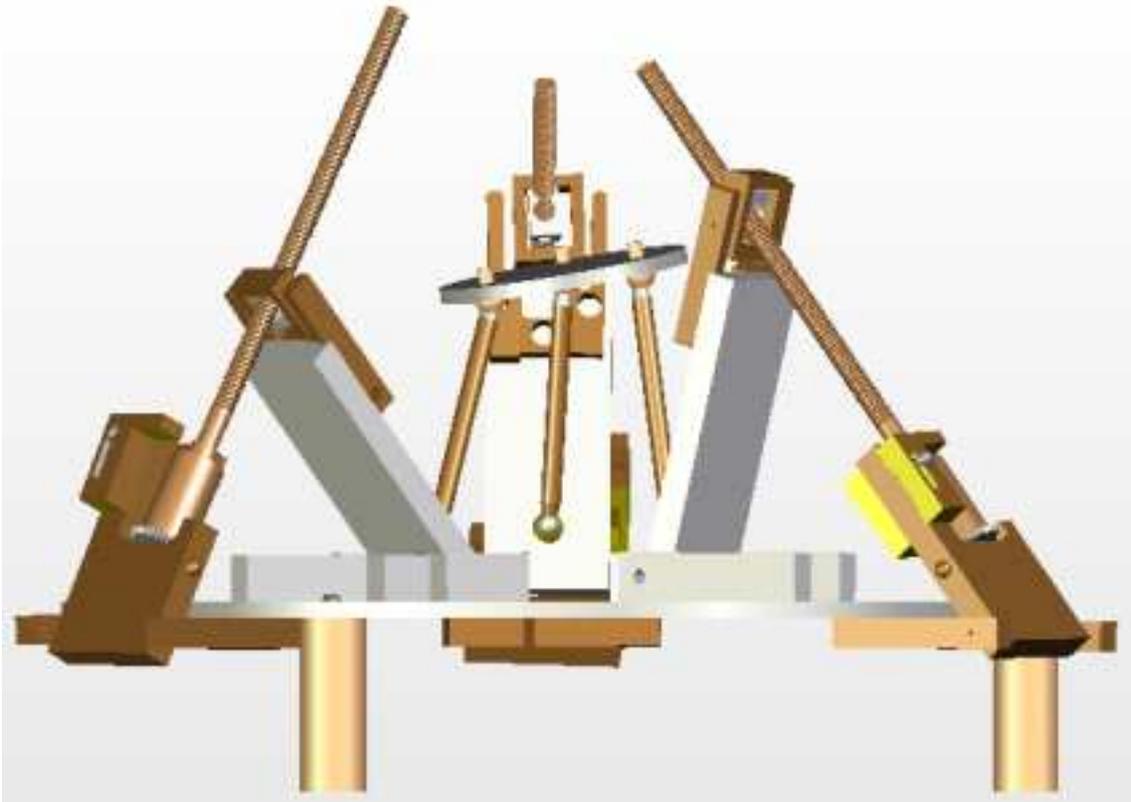


Figura 45. Tercer movimiento de la plataforma móvil

Con este tercer movimiento se completa la trayectoria oscilatoria de la plataforma móvil, esta misma puede ir en sentido contrario, dependiendo de la secuencia que se le haga a los motores a pasos.

Para observar el movimiento que puede tener el modelo, se desarrollaron las simulaciones mostradas en el software Solidworks, donde se trata de emular el movimiento que se tendría, si este se tuviera físicamente. En estas se aprecia, que estos movimientos en conjunto realizan el movimiento ondulatorio que se pretende dar a la plataforma móvil, con los cálculos realizados en los capítulos anteriores.

Con el programa “orientación”(apendice C)obtenemos como su nombre lo indica la orientación de la plataforma móvil, las nuevas coordenadas de cada articulación y el ángulo entre la nueva posición de la plataforma con respecto a su posición inicial, en cada una de las articulaciones. En el programa llamado “distancia”(apendice C), se

programaron las ecuaciones obtenidas en el capítulo 2, para así obtener la distancia  $l_3$  que se recorre del tornillo sin fin, solo especificando el ángulo de inclinación  $\phi$ .

Con los valores obtenidos en los anteriores programas, podemos obtener una gráfica, que describa el comportamiento de la distancia  $l_3$  en función del ángulo  $\phi$  dado.

Con la ayuda de este programa podemos también obtener los valores máximos de movimiento que puede tener la plataforma móvil, pues al darle un ángulo  $\phi$  que rebase el ángulo  $\phi_{MAX}$ , calculado en el capítulo 2, las orientaciones y coordenadas calculadas por el programa **orientación** serán imaginarias y la distancia calculada con el programa distancia rebasará las magnitudes físicas del tornillo sin fin utilizado.

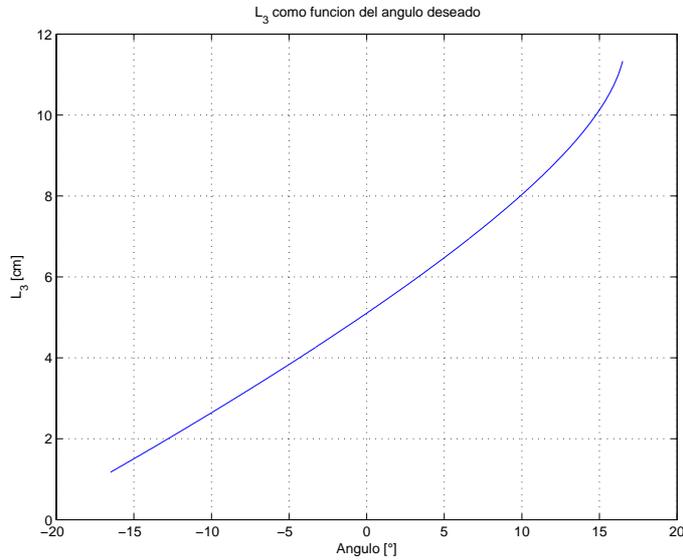


Figura 46. Distancia  $l_3$  como función del ángulo de inclinación

## Resultados

Mediante el análisis de movimiento del manipulador paralelo, aquí mencionado, se puede conocer el comportamiento que tendría este, descrito a través de matrices de rotación y con la relación existente entre sus ángulos y longitudes. El análisis realizado, eta echo

de acuerdo al movimiento que se pretenda que tenga, es decir, si sus magnitudes físicas y propiedades mecánicas nos permitieran otro movimiento, se realizaría otro tipo de análisis con el que el manipulador pudiera conseguir dicho movimiento. Como el movimiento

que se pretendía era oscilatorio se desarrollo un análisis que nos describiera el comportamiento que tendrían que tener las articulaciones que sostienen a la plataforma móvil en relación con esta. Aquí los motores son muy importantes, ya que estos tienen que

programarse para funcionar no al mismo tiempo, ya que si trabajaran al mismo tiempo solo se tendría un movimiento ascendente y descendente de toda la plataforma, teniendo siempre un ángulo de inclinación  $\phi=0$ . Por ello el programa se debe realizar un programa

en un microprocesador o en otra plataforma que nos permita controlar a los motores de manera independiente y de forma autónoma, pero que siempre guarden una relación entre si, ya que si un motor avanza, y los otros no, el tornillo de avance de los motores que no avanzaron se barrera, provocando errores de posición y de precisión que es lo que ofrece este modelo.

De la presente tesis se pueden concluir que de forma teórica, se ha propuesto un modelo derivado de un modelo ya existente físicamente, que realiza un movimiento más complejo que su antecesor, como es el movimiento oscilatorio que la plataforma móvil del modelo aquí planteado puede alcanzar.

De manera teórica, se evitan factores reales que modifican el modelo que se tiene, como son la rigidez del material, la fricción entre el tornillo de avance y la tuerca que lo recorre, por citar algunos ejemplos, pero lo que aquí se pretendía era un modelo capaz de realizar el movimiento oscilatorio, en condiciones ideales; movimiento que se puede considerar limitado, debido a los valores obtenidos en los capítulos anteriores, que en muchos casos no resulta ser algo determinante, ya que lo que ofrece este modelo, es precisión.

Y por sus magnitudes puede ser empleado para diversas aplicaciones, como puede ser un transmisor para fibra óptica; un terreno donde la precisión y exactitud es crucial, ya que el mas mínimo error podría ocasionar que el sistema de transmisión completo deje de transmitir información.

En la simulación se observa que la plataforma móvil del manipulador paralelo, realiza un movimiento oscilatorio, con una velocidad promedio, pero este factor **velocidad**,

es variable y adaptable, ya que depende del motor a pasos que se vaya a utilizar y las características de este, que por las dimensiones del manipulador, dicho motor a pasos, es más pequeños que los motores a pasos estándar.

## **Conclusiones**

Si se construyera el modelo aquí planteado en forma física, se utilizaría el modelo que describe el comportamiento de la plataforma móvil, agregando factores físicos, como los que se mencionaron con anterioridad. Lo cuál no afectaría severamente los calculos realizados, ya que los factores de fricción, rigidez del material, etc. no son valores de gran magnitud.

Como trabajo a futuro, se podría construir el modelo físicamente, ya que se cuenta con el modelo y los planos, pero para conseguir un movimiento único y más preciso sería necesario realizar el diseño de los motores que serían colocados en nuestro modelo físico y realizar un programa en alguna plataforma para que así tuvieramos un control total sobre el sistema aquí descrito. este trabajo fue presentado en dos foros académicos:

- VIII Conferencia Latinoamericana de Geofísica Espacial. Julio 11-17, 2007 Mérida, Yucatán, México.
- Annual WSEAS congress: CSCC (Circuits, Systems, Communications and Computers) Crete, Greece, July 22-28 2007.

# Apéndice A

## Simulation of the motion of a parallel micromanipulator

Velasco G. and Hernandez E.

This work shows a design and study of the movement of a micro-mechanical platform. The mechanical system gives original contribution guide to tasks of the micro-assemblies



Fig 1. Micro-platform

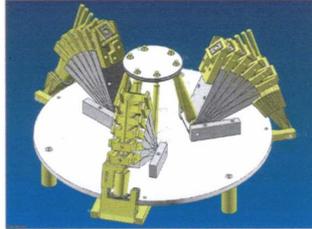


Fig 2. Micro-platform

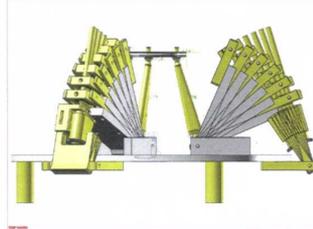


Fig. 3. Front View

### 1. Introduction

This work shows design of a micro-mechanic platform and study its movement (FIG.1) . It has a specific dimension and characteristics in each one of its components [1-6]. The micro-platform is symmetrical and is made up of three identical links which connect the platform bases with the mobile platform.

The system is a set of levers. These levers are connected through spherical joints. The motion screw is connected through cardan joint. Motion screw is one of these components. The motion screw introduces the mechanical movement to the system. The movement of the platform occurs in the same way. This happens when the screws turn simultaneously.

In our case, the screw is formed by 58 threads

The micromechanical platform gives original contributions guide to tasks of the microassemblies and micromachinmaking of high precision [6].

### 2. Design

The configuration designed for this micro-mechanical platform considers the integration of basic components for the conformation of the different subassemblies as well as for the final assembly. These components were designed with the purpose of being able to be made of simple way and by means of the conventional processes of manufacture from common structural members like wall-plates and plates of commercial

thicknesses. Similarly the assembly process of this mechanical platform is a simple task, because it requires the application of elements of standard union such as screws and small bullets.

The system is symmetrical, which allows us to predict the movement of the three levers from the analysis of anyone of them. In this work we show that each arm moves with its proper degree of freedom (DOF), associated to the drive of the motion screw, so in this way three degrees of freedom for this system are achieved (FIG.2).

### 3 COMPUTER SIMULATIONS

#### Computer Aided Design (CAD)

A virtual prototype of the micromanipulator was modelled in a parallel way for the development of this system.

The geometric model of each one of the components was generated and later all components of this model were integrated in the final assembly of the manipulator

The micromanipulator and platform was designed by *Unigraphics* (FIG.3).

#### Computer Aided Engineering (CAE)

Once concluded the virtual assembly of the micromanipulator simulation of the movement of the system was generated. In this simulation different schemes of movement of the motion screws were evaluated and repercussion in the displacement of the movable platform was observed. These simulations confirm that the model was developed with the correct geometric proportions.

### CONCLUSIONS

In this paper, we presented a model of a mechanical system. By developing a model with an application of CAD tools it is possible to save time at the moment of the integration of the entire system. Virtual models helps to have an excellent pre-visualization of the project to be developed so every mistake can be corrected before the beginning of the assembling processes.

**Acknowledgments** This work was supported by CCADET-UNAM, and PAPIIT UNAM projects: PAPIIT IN114007, PFAMU PI100606 PAPIIT IN108606-3.

#### References:

- [1] NISSE Norman S. Control System Engineering. Ed. John Wiley & Sons, 2000
- [2] KENJO Takashi and SUGAWARA Akira. Stepping Motors and Their Microprocessor Controls. Nagano Japan. June 2003.
- [3] DAMAREN J: Christopher. On de Dynamics and Control of Flexible Multibody Systems with Closed Loops. Universiti of Toronto Institute for Aerospace Studies 4925 Dufferin Street Toronto, Ontario M3H 5T6, Canada.
- [4] E.M. Kussul, D.A.Rachkovskij, T.N. Baidyk et al. Micromechanical engineering: a basis for the low cost manufacturing of mechanical microdevices using microequipment. J. Micromech. Microeng. 1996. - 6. - P. 410-425.
- [5] Graciela Velasco H, (2006). Vectorial equations of a closed mechanical system formed by n rigid bodies, WSEAS Trans. Math. ISSN 1109-2769.
- [6] Kussul E., Baydyk T., Ruiz-Huerta L., Caballero-Ruiz A., VELASCO G.(2006). Scaling down of microequipment parameters Precision Engineering, Vol. 30 pag. 211-222



**VIII Conferencia Latinoamericana  
de Geofísica Espacial**

**July 11 -17, 2007**

**Mérida, Yucatán, México**

**July 17th, 2007**

**This is to certify that**

**Elizareth HERNANDEZ**

**participated in the**

***VIII Conferencia Latinoamericana de  
Geofísica Espacial***

**Yours Sincerely,**

**Blanca Mendoza**

**Chair**

**Organizing Committee**

EDITORS: N. Mastorakis, S. Kartalopoulos, D. Simlan  
A. Varonides, V. Mladenov, Z. Bojkovic, E. Antonidakis

# **SYSTEMS THEORY and APPLICATIONS**

Published by WSEAS Press, [www.wseas.org](http://www.wseas.org)

**VOLUME 2 of the  
Proceedings of the 11<sup>th</sup> WSEAS  
International Multiconference  
CSCC  
(CIRCUITS, SYSTEMS,  
COMMUNICATIONS, COMPUTERS)**

*(Proceedings of the 11th WSEAS International Conference on SYSTEMS)*

*Agios Nikolaos, Crete Island, Greece, July 23-28, 2007.*



Electrical and Computer Engineering Series  
A Series of Reference Books and Textbooks

ISSN: 1790-5117

ISBN: 978-960-8457-90-4

# Study of the movement of a micro-mechanical platform

GRACIELA VELASCO-HERERA,  
VICTOR M. VELASCO,  
ELIZARETH HERNÁNDEZ-SÁNCHEZ,  
J. GUILLERMO SAAVEDRA-ROMÁN.  
Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico

Universidad Nacional Autónoma de México  
graciela.velasco@ccadet.unam.mx, <http://www.cinstrum.unam.mx>  
MEXICO

*Abstract:* This work shows a design and study of the movement of a micro-mechanical platform. The mechanical system gives original contribution guide to tasks of the micro-assemblies.

*Keywords:* Micro-mechanical system, Micro-mechanical platform, Closed system, Micromechanics, Microassembly, Micromachine-making

## 1. Introduction

This work shows design of a micro-mechanic platform and study its movement. It has a specific dimension and characteristics in each one of its components [1-11]. The micro-platform is symmetrical and is made up of three identical links which connect the platform bases with the mobile platform (Fig 1).

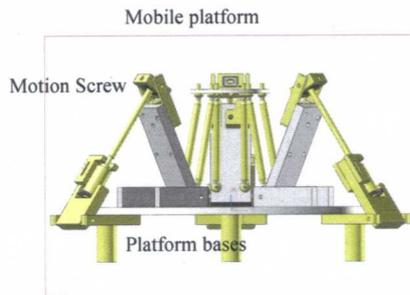


Fig 1. Micro-platform

The system is a set of levers. These levers are connected through spherical joints. The motion screw is connected through cardan joint. Motion screw is one of these components. The motion screw introduces the mechanical movement to the system. The movement of the platform occurs in the same way. This happens when the screws turn simultaneously (Fig 2).

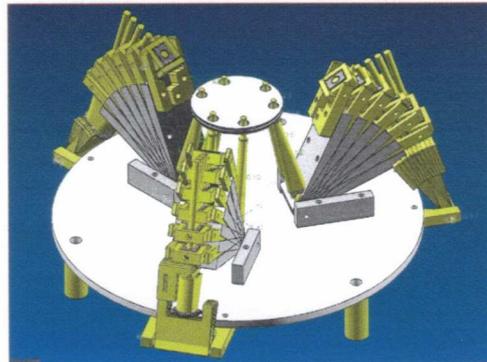


Fig 2. Micro-platform

In our case, the screw is formed by 58 threads (Fig. 3).

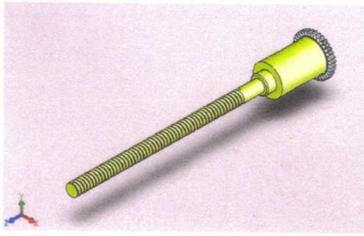


Fig. 3. Motion screw

The micromechanical platform gives original contributions guide to tasks of the microassemblies and micromachine-making of high precision [6].

## 2. Design

The configuration designed for this micromechanical platform considers the integration of basic components for the conformation of the different subassemblies as well as for the final assembly. These components were designed with the purpose of being able to be made of simple way and by means of the conventional processes of manufacture from common structural members like wall-plates and plates of commercial thicknesses. Similarly the assembly process of this mechanical platform is a simple task, because it requires the application of elements of standard union such as screws and small bullets.

The system is symmetrical, which allows us to predict the movement of the three levers from the analysis of anyone of them. In this work we show that each arm moves with its proper degree of freedom (DOF), associated to the drive of the motion screw, so in this

way three degrees of freedom for this system are achieved (Fig. 4).

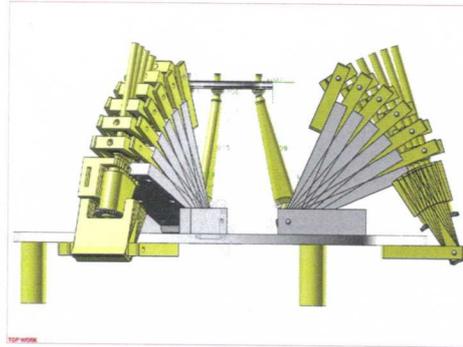


Fig. 4. Front View

## 3 COMPUTER SIMULATIONS

### Computer Aided Design (CAD)

A virtual prototype of the micromanipulator was modelled in a parallel way for the development of this system.

The geometric model of each one of the components was generated and later all components of this model were integrated in the final assembly of the manipulator. The micromanipulator and platform was designed by *Unigraphics*.

### Computer Aided Engineering (CAE)

Once concluded the virtual assembly of the micromanipulator simulation of the movement of the system was generated. In this simulation different schemes of movement of the motion screws were evaluated and repercussion in the displacement of the movable platform was observed. These simulations confirm that the model was developed with the correct geometric proportions [5].

## CONCLUSIONS

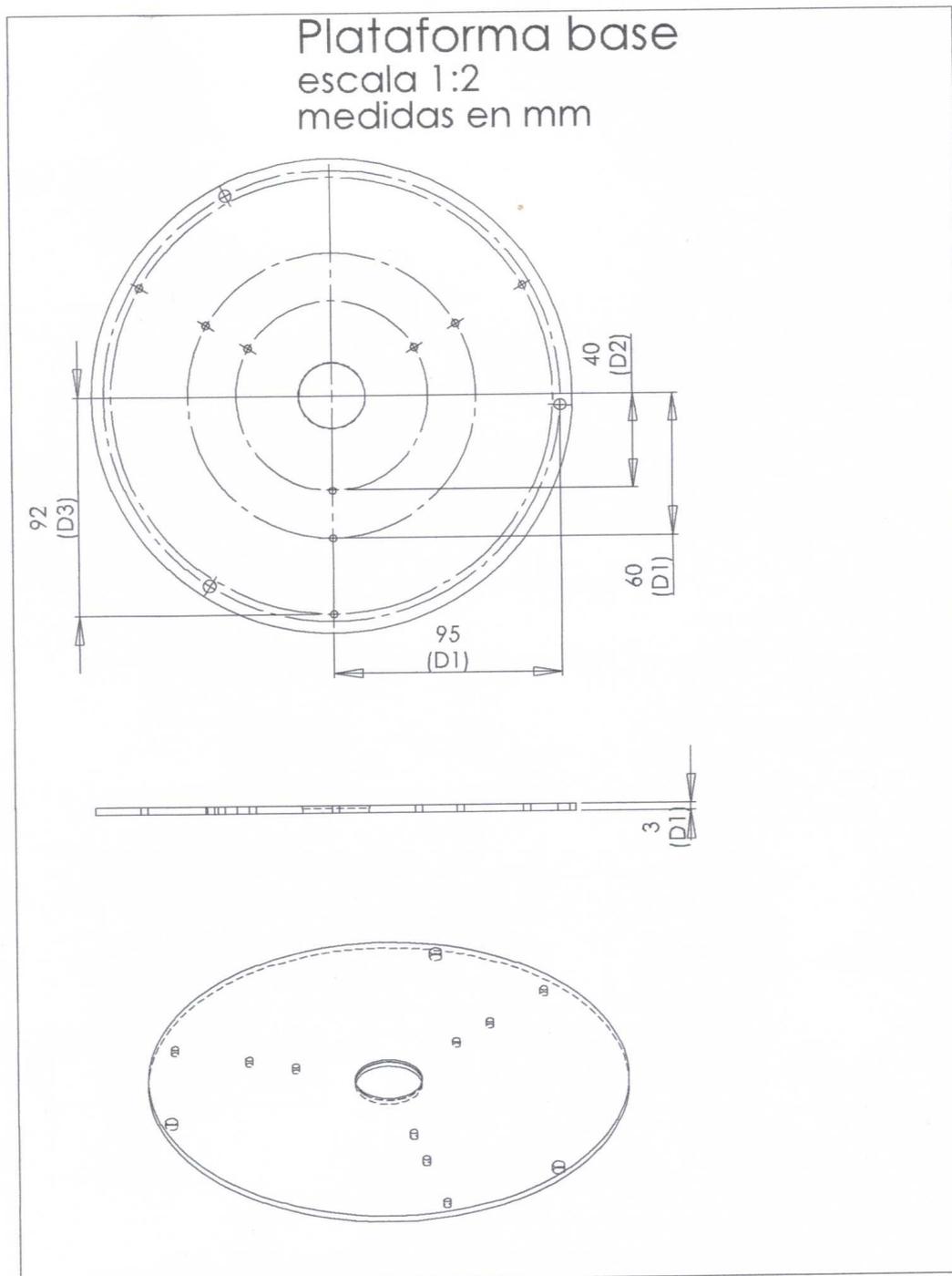
In this paper, we presented a model of a mechanical system. By developing a model with an application of CAD tools it is possible to save time at the moment of the integration of the entire system. Virtual models helps to have an excellent pre-visualization of the project to be developed so every mistake can be corrected before the beginning of the assembling processes.

**Acknowledgments** This work was supported by CCADET-UNAM, and PAPIIT UNAM projects: PAPIIT IN114007, PFAMU PI100606 PAPIIT IN108606-3.

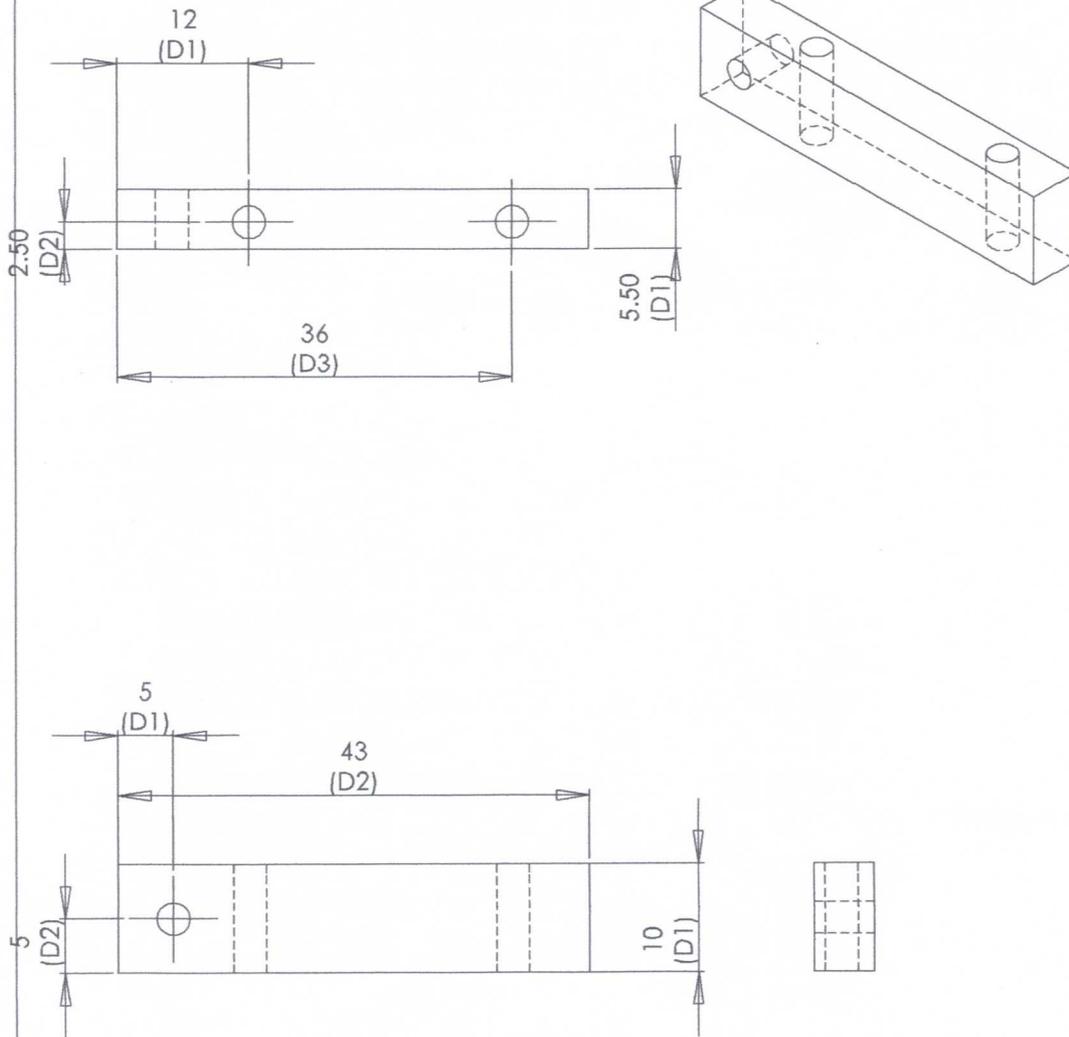
### References:

- [1] E.M. Kussul, D.A.Rachkovskij, T.N. Baidyk et al. Micromechanical engineering: a basis for the low cost manufacturing of mechanical microdevices using microequipment. *J. Micromech. Microeng.* 1996. – 6. – P. 410-425.
- [2] Graciela Velasco H., Vectorial equations of a closed mechanical system formed by n rigid bodies, *WSEAS Trans. Math.* Issue2, Vol. 6, February 2007 ISSN 1109-2769, pp.450-456
- [3] Kussul E., Baydyk T., Ruiz-Huerta L., Caballero-Ruiz A., VELASCO G., Scaling down of microequipment parameters. *Precision Engineering*, Vol. 30 pag. 211-222
- [4] VELASCO HERRERA GRACIELA, (2005) Parallel micromanipulator system with applications in microassemblies and micromachine-making, *WSEAS TRANSACTIONS on SYSTEMS*, Issue 7, Volumen 4, July 2005, ISSN 1109-2777, pag. 980-987
- [5] GRACIELA VELASCO-HERRERA, Victor M. Velasco-Herrera, Arístides Pérez-Zarate, Guillermo Saavedra Román (2005) Simulation the motion of a parallel micromanipulator, *WSEAS TRANSACTIONS on SYSTEMS*, Issue 12, Volumen 4, December 2005, ISSN 1109-2777, pag. 2307-2310
- [6] Kussul E., Baidyk T., Ruiz-Huerta L., Caballero A., Velasco G., Kasatkina L., 2002, Development of Micromachine Tool Prototypes for Microfactories, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 12, pp. 795-813,
- [7] Ben-Horin R., Shoham M. Construction of a six-degrees-of-freedom parallel manipulator with three planarly actuated links. *Proc. ASME Design engineering technical conferences and computers in engineering conference*, 18-22 August 1996.
- [8] Guilin Yang, I-Ming Chen, Wee Kiat Lim and Song Huat Yeo. Kinematic design of modular reconfigurable in-parallel robots. *Autonomous Robots*. 2001, 10, 83-89,
- [9] Stewart D. A platform with 6 degree of freedom. *Proc. Of the Institution of mechanical engineers*. 1965, 180 (part 1, 15): 371-386.
- [10] Merlet J.P. *Les Robots paralleles*. Ed. Hermes, 1997.
- [11] Merlet J.P. Parallel manipulators: state of the art and perspectives. *Adv. Robotics*. 1994.8: 287-308.

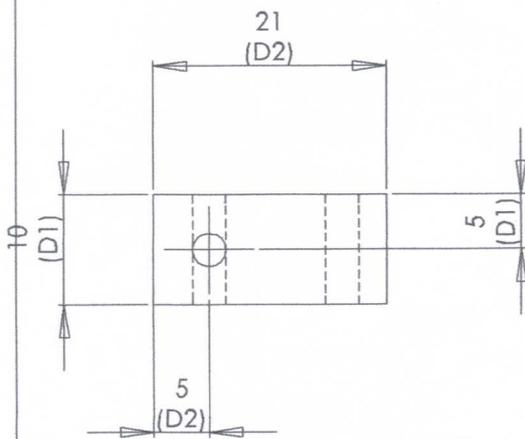
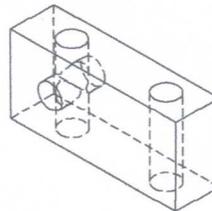
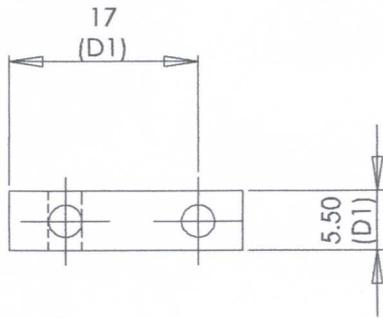
# Apéndice B



Soporte  
izquierdo  
escala 2:1  
medidas en mm

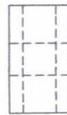
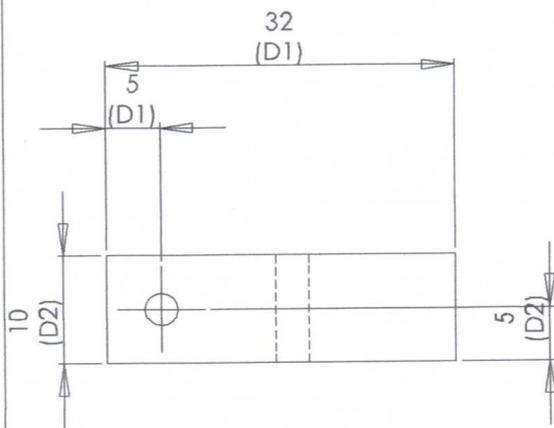
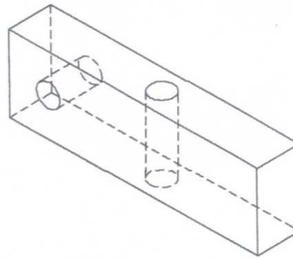
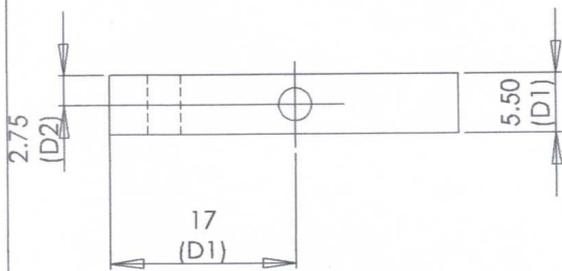


Tensor  
escala 2:1  
medidas en mm

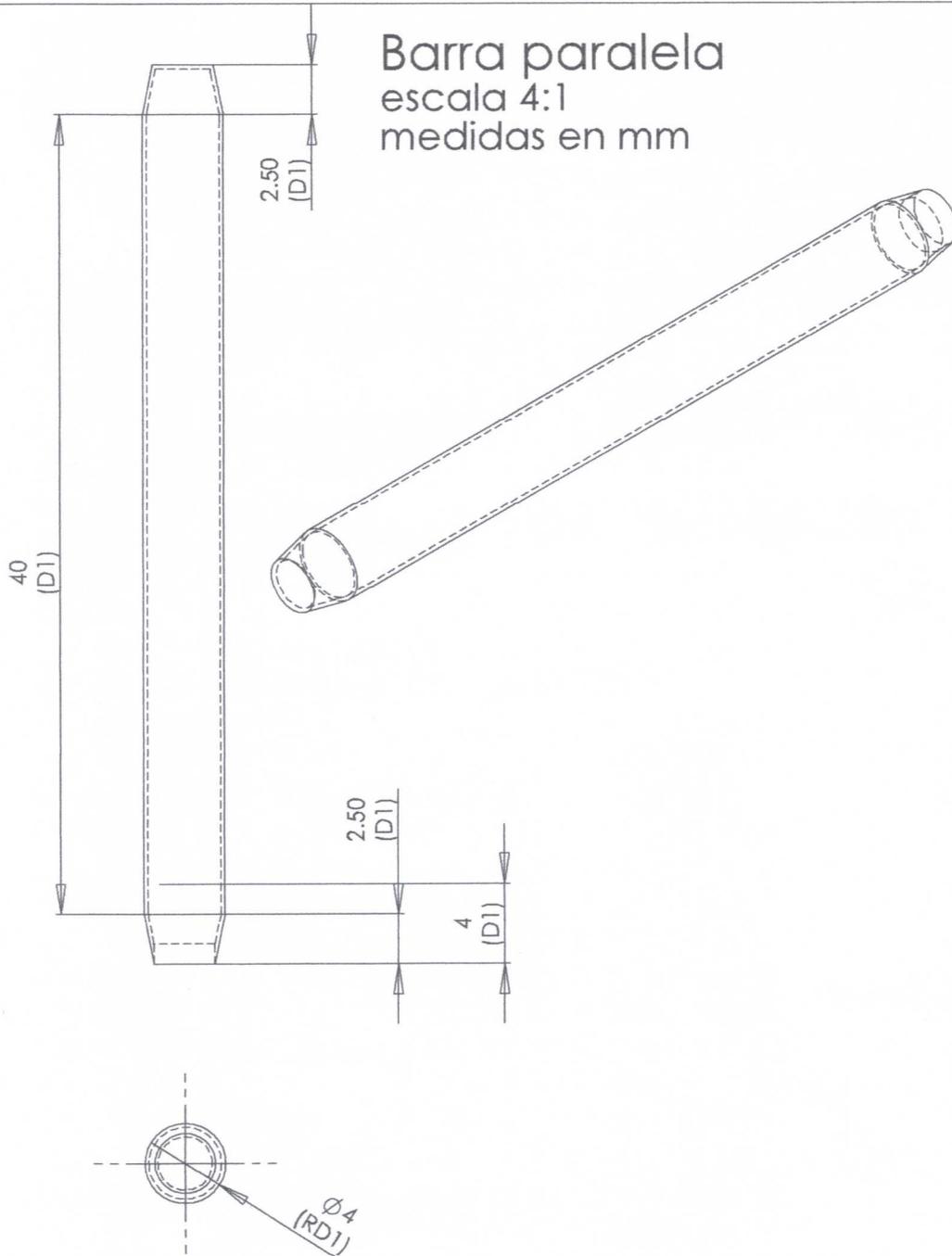


# Soportes derechos

escala 2:1  
medidas en mm

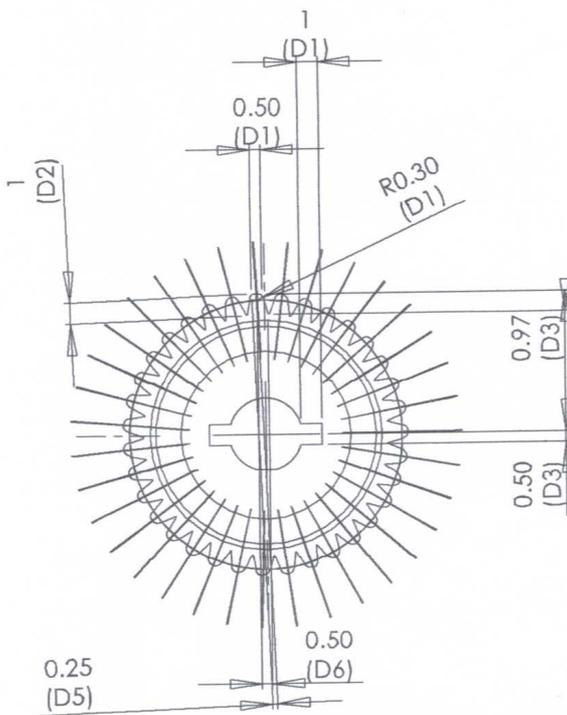
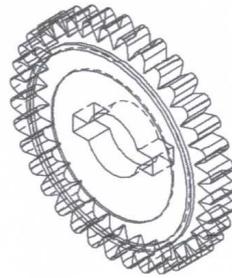
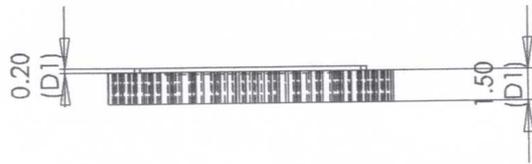


Barra paralela  
escala 4:1  
medidas en mm



# Engrane

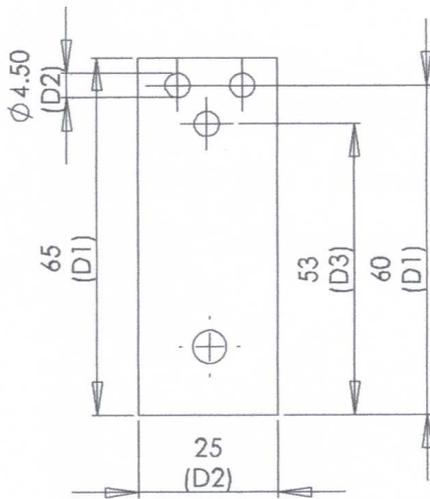
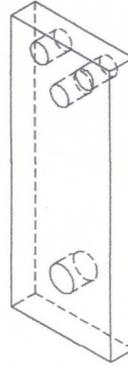
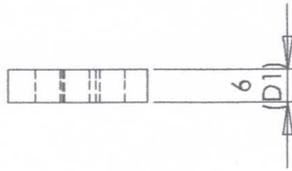
escala 4:1  
medidas en mm



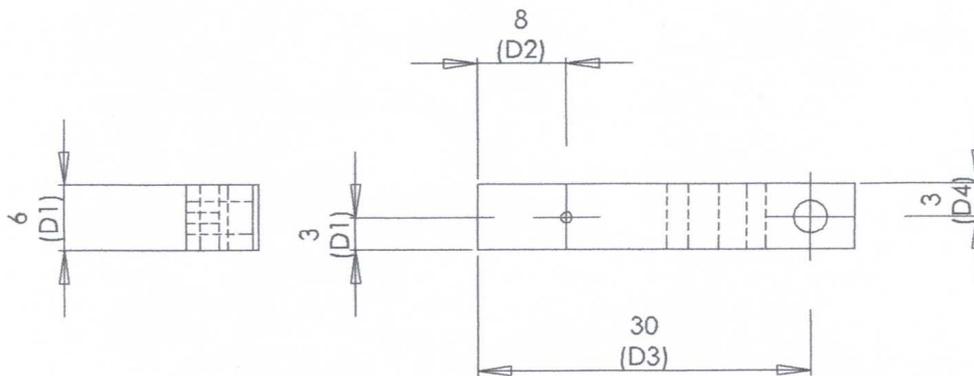
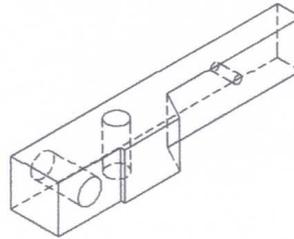
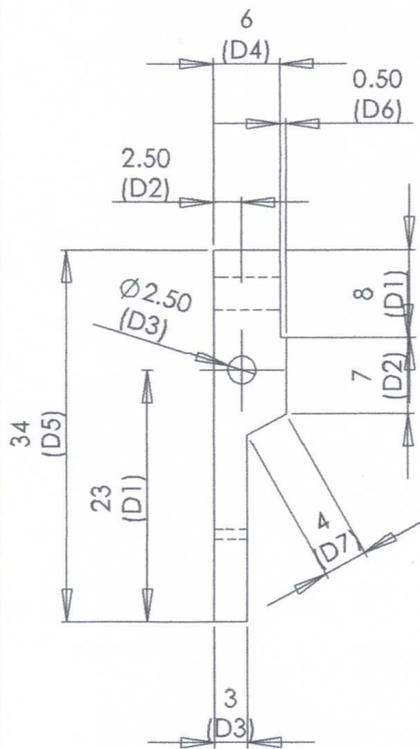
# Barra base

escala 1:1

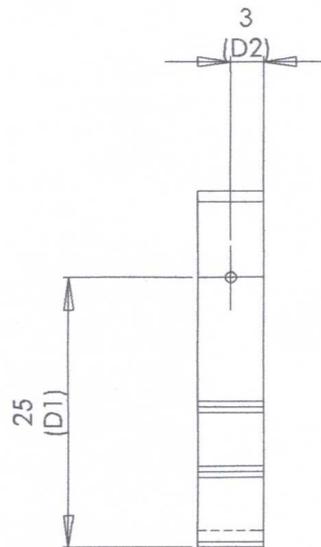
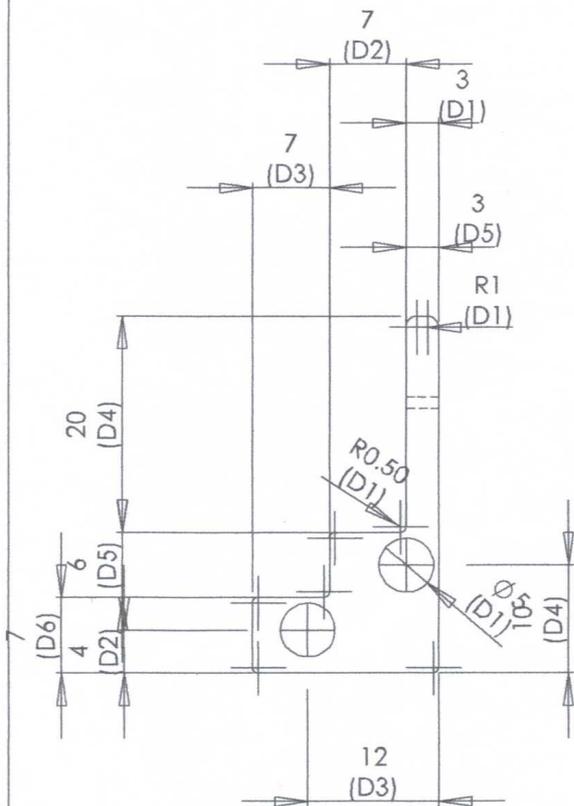
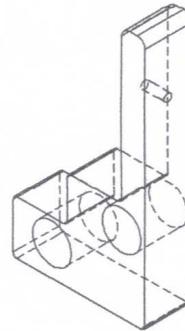
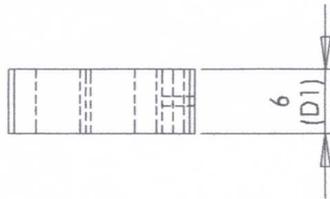
medidas en mm



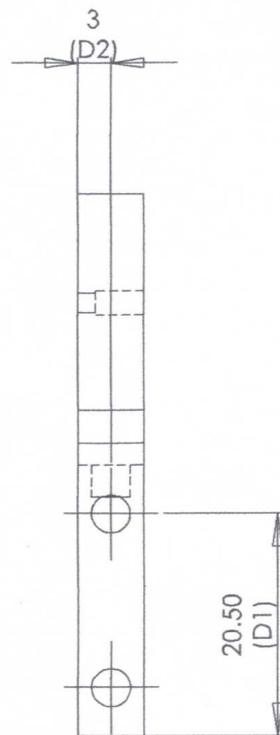
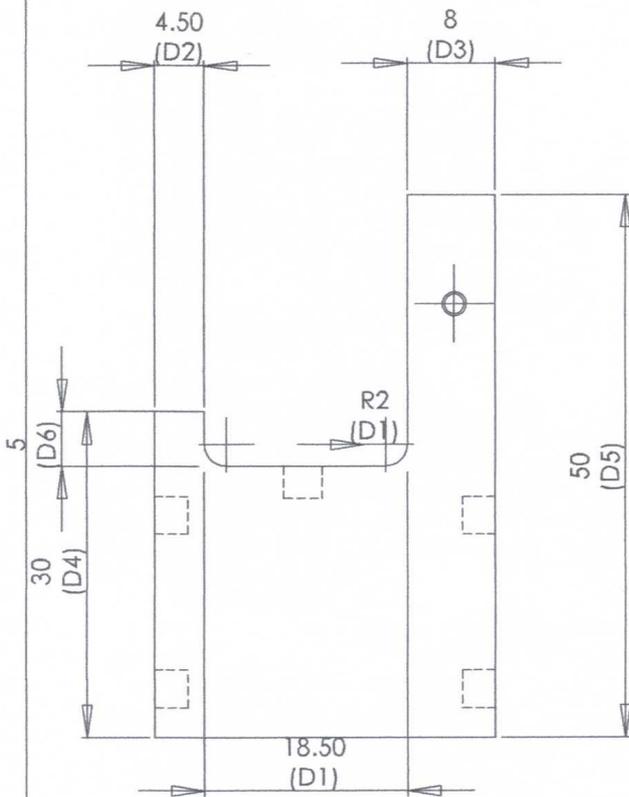
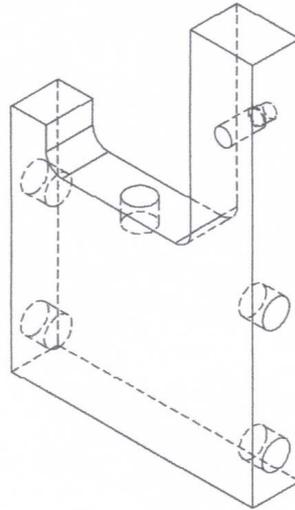
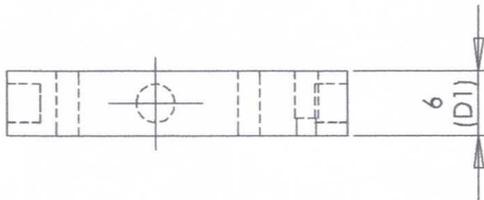
soporte de cardan 1  
escala 4:1  
medidas en mm



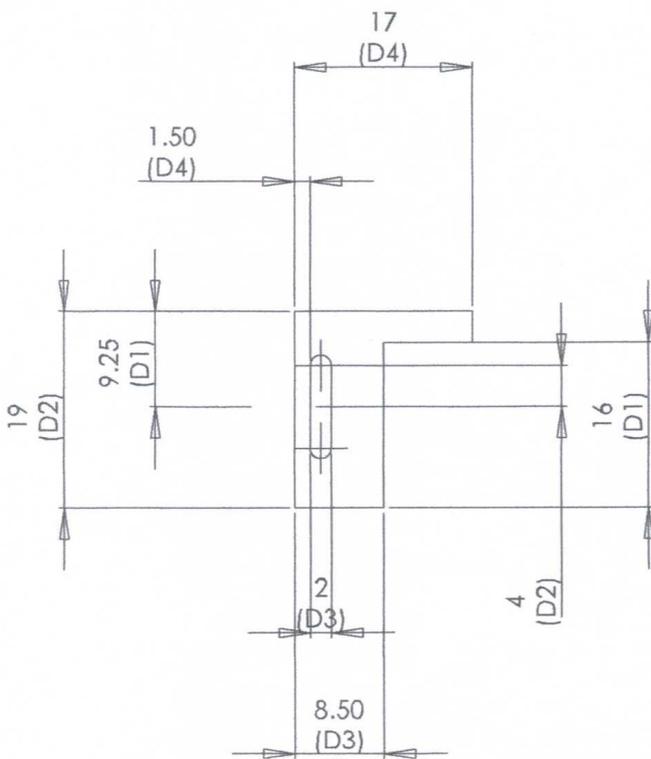
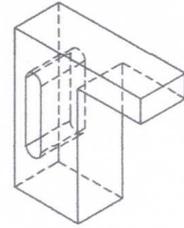
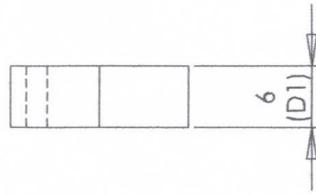
# Soporte de cardán 2 escala 2:1 medidas en mm



Soporte  
escala 2:1  
medidas en mm

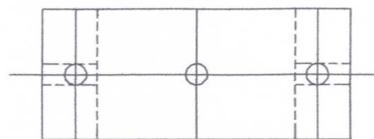
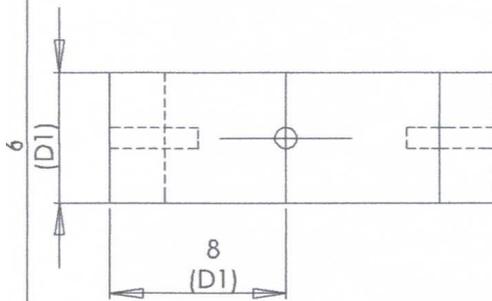
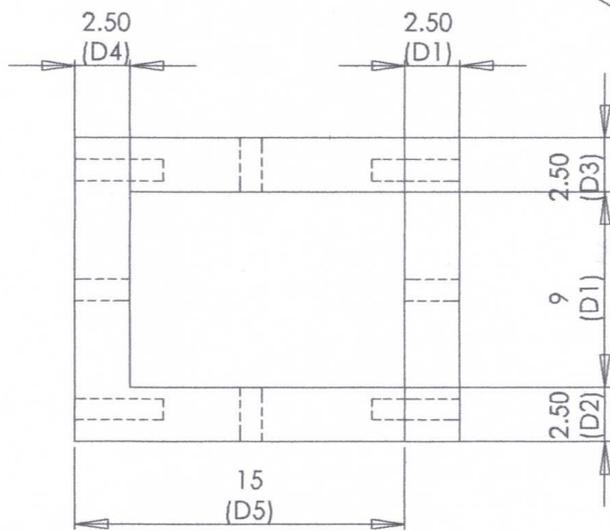
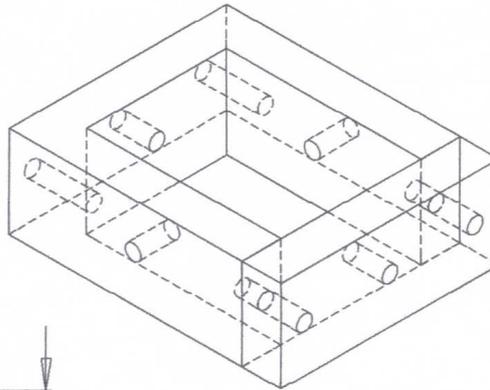


Sujetadores  
escala 2:1  
medidas en mm



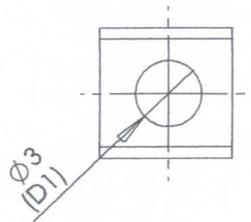
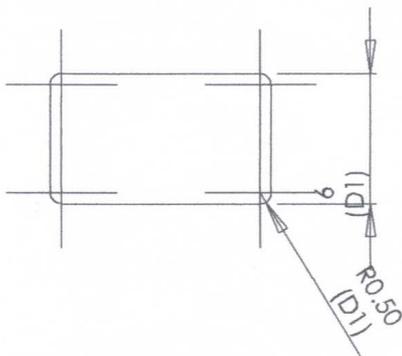
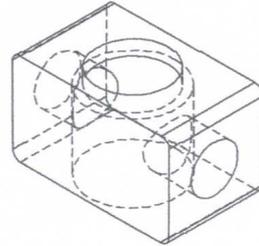
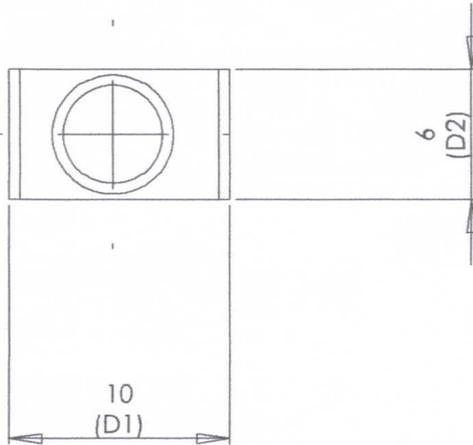
# Unión de cardán

escla 4:1 medidas en mm



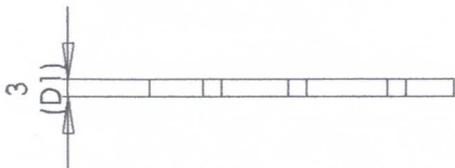
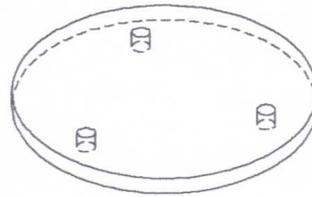
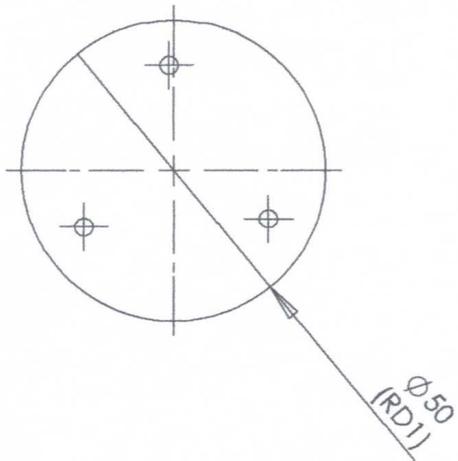
# Tuerca

escala 2:1  
medidas en mm

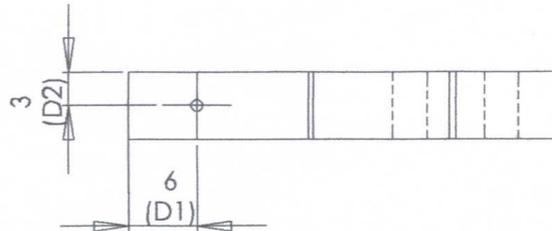
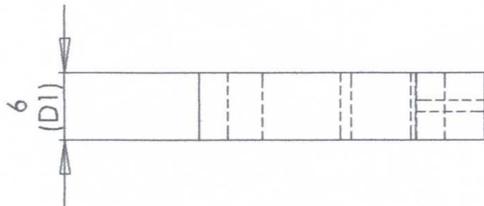
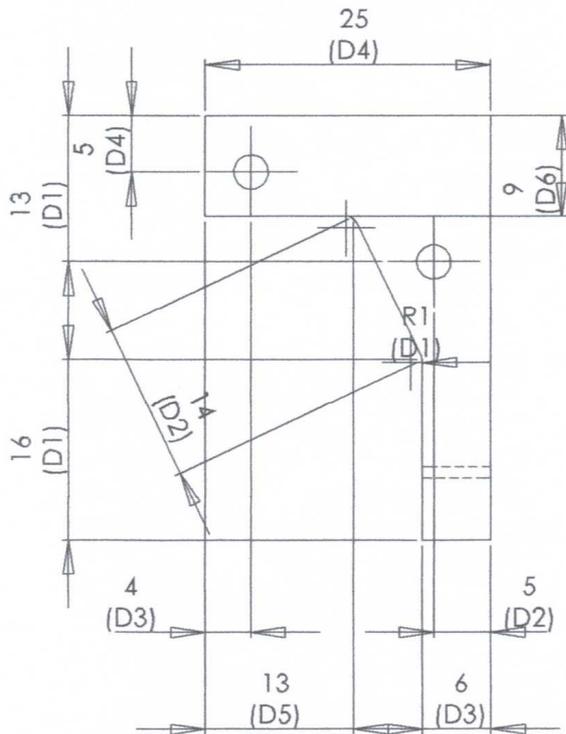
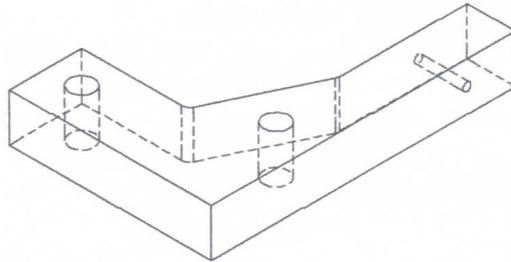


# Plataforma móvil

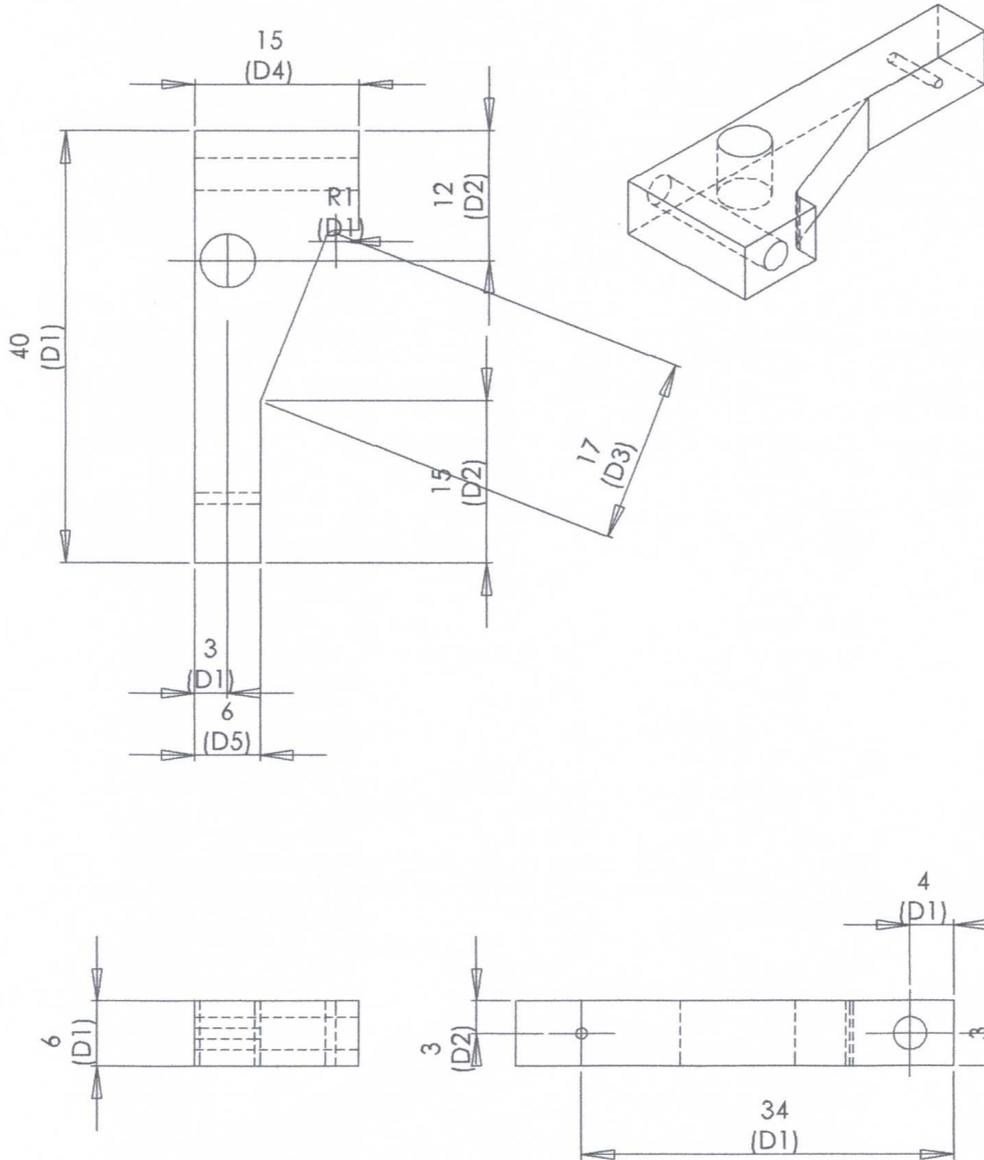
escla 1:1 medidas en mm



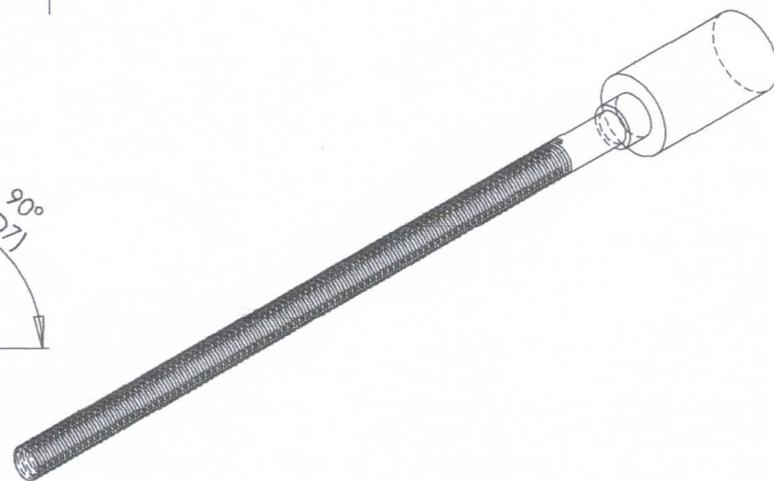
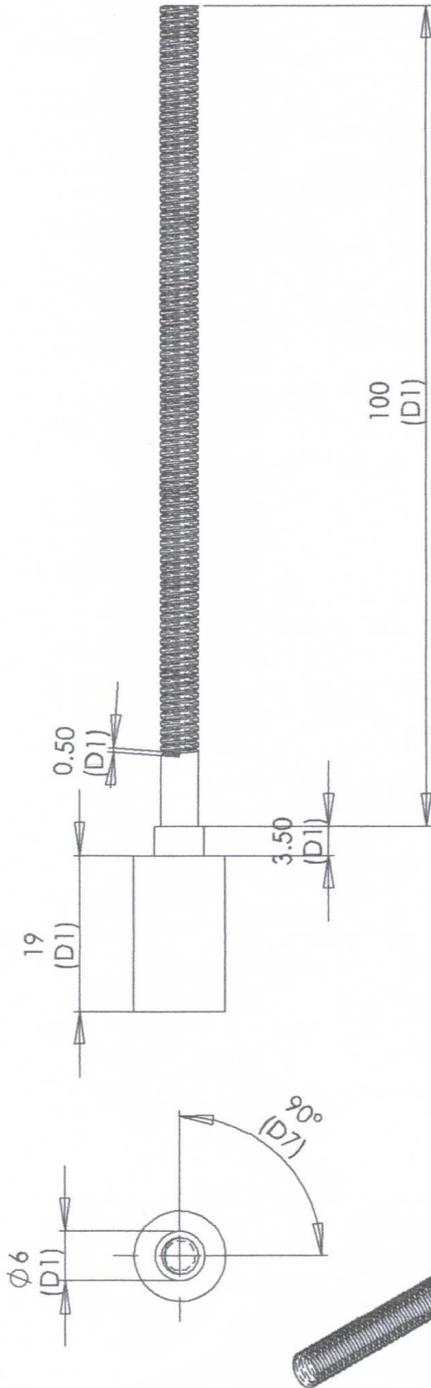
# Soporte de cardán posterior escala 2:1 medidas en mm



Soportes de cardán  
parte posterior  
escala 2:1 medidas en mm



Tornillo de avance  
escala 2:1  
medidas en mm



# Apéndice C

## Programa orientación

```
function Nuevo_phi = orientacion(theta, phi)
```

```
theta = (pi/180) * theta; phi = (pi/180) * phi;
```

```
Rz = [cos(-theta) - sin(-theta)0; sin(-theta)cos(-theta)0; 001];
```

```
Ry = [cos(-phi)0sin(-phi); 010; -sin(-phi)0cos(-phi)];
```

```
Rt = (Ry * Rz)';
```

Ubicacion de los soportes en el sistema universal OXYZ

```
r=2.5e-2; V1=[r 0 0]';
```

```
V2=[-r*sin(pi/6) r*cos(pi/6) 0]';
```

```
V3=[-r*sin(pi/6) -r*cos(pi/6) 0]';
```

```
V1n=Rt*V1;
```

```
V2n=Rt*V2;
```

```
V3n=Rt*V3;
```

```
z1=V1n(3);
```

```
z2=V2n(3);
```

```
z3=V3n(3);
```

```
alpha1=asin(z1/r);
```

```
alpha2=asin(z2/r);
```

```
alpha3=asin(z3/r);
```

```
Q1=[r*cos(alpha1) z1];
```

```
Q2=[r*cos(alpha2) z2];
```

Q3=[r\*cos(alpha3) z3];

phi1=atan(z1/Q1(1));

phi2=atan(z2/Q2(1));

phi3=atan(z3/Q3(1));

Nuevo\_phi = (180/pi) \* [phi1phi2phi3];

### Programa Distancia

function L3=distancia(phi)

Rt=11;

r=2.5;

L20=5;

L1=8;

L2=8;

L4=4.5;

L5=1.25;

x=Rt-r\*cos((pi/180)\*phi);

z=L20+r\*sin((pi/180)\*phi);

theta7=atan(z/(x-L1)); L7=(z/(sin(theta7)));

theta8=acos((L7<sup>2</sup> + L5<sup>2</sup> - L4<sup>2</sup>)/(2 \* L5 \* L7));

*theta3 = -theta7 - theta8 + pi;*

*L3 = sqrt(L1 \* L1 + L2 \* L2 - 2 \* L1 \* L2 \* cos(theta3));*

## Referencias

- [1] NISSE Norman S. *Control System Engineerin*. Ed. John Wiley Sons, 2000.
- [2] Arancil Rafael, Saltaren Roque J., Sabater José y Reinoso Oscar. Artículo *Robots paralelos: Maquinas con un pasado para una robótica del futuro*. Universidad Politecnica de Madrid, Universidad Miguel Hernández. ISSN:1697-7912, Vol. 3 Enero 2006,pp,16-28.
- [3] DAMAREN J. Christopher. *On de Dynamics and Control of Flexible Multibody Systems withClosed Loops*. Universiti of Toronto Institute for Aerospace Studies 4925 Dufferin Street Toronto,Ontario M3H 5T6, Canada.
- [4] Takashi Kenjo, Akira Sugawara. *Stepping Motors and Their Microprocessor Controls*. 2a edición. Editorial OXFORD University Press.Mayo 2003. Capitulo 1,2,3,4
- [5] E.M. Kussul, D.A.Rachkovskij, T.N. Baidyk et al. *Micromechanical engineering: a basis fot the low cost manufacturing of mechanical microdevices using microequipment*. J. Micromech. Microeng. 1996. - 6. - P. 410-425.
- [6] L. Ángel, R Saltarén, N. Raguenes, J.M. Sebastián R. Aracil. *Control visual de un robot paralelo: análisis y diseño de la plataforma "robotenis"*; pp. 6.
- [7] R. Verhoeven and M. Hiller. *Singularität und redundanz allgemeiner holonomer manipulatoren*. Juli 1999, pp 10.
- [8] VerhoevenBen-Horin R., Shoham M. *Construction of a six-degrees-of-freedom parallel manipulator with three planarly actuated links*. Proc. ASME Design engineering technical conferences and computers in engineering conference, 18-22 August 1996.
- [9] Guilin Yang, I-Ming Chen, Wee Kiat Lim and Song Huat Yeo. *Kinematic design of modular reconfigurable in-parallel robots*. Autonomous Robots. 2001, 10, 83-89
- [10] Stewart D. *A platform with 6 degree of freedom*. Proc. Of the Institucionof mechanical engineers. 1965, 180 (part 1, 15): 371-386.
- [11] Ronen Ben-Horin, Moshe Shoham, Shlomo Djerassi. *Kinematics, dynamics and construction of a planarly actuated parallel robot*. Robotics and computer-integrated manufacturing 14 (1998): 163-172.
- [12] Merlet J.P. *Les Robots paralleles*. Ed. Hermes, 1997.
- [13] Merlet J.P. *Parallel manipulators: state of the art and perspectives*. Adv. Robotics. 1994.8: 287-308.

- [14] Gosselin C.M. *Parallel computational algorithm for the kinematics and dynamics of planar and spatial parallel manipulators. AMSE J. Dyn. System, measurement and control, 1996, 118:22-8.*
- [15] Stoughton R.S., Arai T. *A modified Stewart platform manipulator with improved dexterity. IEEE Trans. Robotics Automat. 1993, 9 (2): 166-73.*
- [16] Fichter E. F. *A Stewart platform based manipulator: general theory and practical construction. International journal on robotic research. 5(2): 157-181. December 1986.*
- [17] Kennet W.Grace, J. Edward Colgate, Matthew R. Glucksberg, and John H. Chun. *A six Degree of freedom micromanipulator for ophthalmic surgery. Computer integrated surgery II paper review, by Jack C. Li. April 2003.*
- [18] Tsai L.W. Tahmasebi F. *Closed-form direct kinematics solution of a new parallel minimanipulator. ASME J. Mech. Des. 1994, 116: 1141-147.*
- [19] Isidro Zabalza, Jaavier Ros, José J. Gil, Jesús M. Pintor, and José M. Jiménez. *TRI-SCOTT. A new Kinematic structure for a 6-DOF Decoupled parallel manipulator. Proc. Of the workshop on fundamental Issues and future directions for parallel mechanisms and manipulators, October 3-4, 2002, Quebec, Canada Clément M. Grossellin and Immme Ebert-Uphoff, editors, pp. 12-15.*
- [20] L. Stocco and S.E. Salcudean. *A coarse approach to force-reflecting hand controller design. IEEE International conference on robotics and automation. April 22-28, 1996, Minneapolis, Minnesota.*
- [21] Yang Guillin, Chen Weihai, Chen I-Ming, Yeo Song Huat, Chen Guang. *Design and kinematic analysis of modular reconfigurable parallel robots. SIM tech Technical report (AT/01/010/AMS). Advanced Mechatronics Systems Group, Automation Technology Division, 2001, pp. 11.*
- [22] N. Simaan, M. Shoham. *Geometric interpretation of the derivatives of parallel robots' Jacobian matrix with application to stiffness control. Journal of mechanical design, ASME, march 2003, vol. 125, pp. 33-42.*
- [23] Dongseok Ryu, Changhyun Cho, Munsang Kim, Jae-Bok Song. *Design of a 6 DOF haptic master for teleoperation of a mobile manipulator. Pp 7.*
- [24] Massimo Callegari. *Considerazioni sulla progettazione delle machine a cinematica parallela. Luglio-Agosto 2001, Progettare (VNU), No. 247.*
- [25] Waldron K.J. Raghavan M. Roth B. *Kinematics of a hybrid series-parallel manipulation system. ASME J. Dyn. Measurement control 1989, 111(2):211-21.*
- [26] Wang J. Masory O. *Workspace evaluation of Stewart platforms. Adv. Robotics 1993, 9(4):443-61.*

- [27] McCallion H. and Pham D.T. *The analysis of a six degree of freedom work station for mechanized assembly. Proc. 5th World Congress on Theory of Machines and Mechanisms. Montreal, 1979, pp 611-616.*
- [28] Norton L. Robert . *Diseño de máquinas. Prentice Hall, 1999, pp. 1048.*
- [29] *SolidWorks. Mechanical design automation software, tutorial, 2006.*
- [30] Baránov G.G. *Curso de la teoría de mecanismos. MIR, 1998, pp. 524.*
- [31] Sandler Ben-Zion. *Robotics. Designing the mechanisms for automated machinery. Academic press, 1999, pp. 433.* [31] Shigley. *Análisis cinemático de mecanismos. McGraw-Hill, 1981, pp. 437.*
- [32] Popov E.P., Vereshagin A.F., Zehkeovich S.L. *Robot manipuladores. Dinámica y algoritmos. Nayka, 1978, pp.398.*
- [33] Wittenburg J. *Dynamics of systems of rigid bodies; B.G. Teubner Stuttgart 1977, pp.224.*
- [34] Vorobieva E.I. *Mécanica de robots industrial. Visshaya Schcola, 1988. Vol. 1, pp. 285.*
- [35] Hughes, A.and Lawrenson, P .J (1985). *Electromagnetic damping in stepping motor Proc.IEE 122, (8) 819-24*
- [36] Hughes, A. and Lawrenson, P.J.(1984). *UK Patent No.1,523,384.*
- [37] Kenjo, Takashi. And Nimura, Y.(1979). *Fundamentals and applications of stepping motors. p.111.Sogo Electronics Publishing Co., Tokyo.*
- [38] Hughes, and Lawrenson, P.J; and Davies,T.S(1976). *Factors determining high speed torque in hybrid motors. Proc. International Conference on Stepping Motors and Device. University of Leeds, pp.150-7.*
- [39] Lawrenson, P .J; Hughes, A; and Acarnley, P.P (1976). *Starting/stopping rates of stepping motors: Improvement and prediction. Proc. International Conference on Stepping Motors and Systems. University of Leend, pp.54-60.*
- [40] Lawrenson, P. J; and Kingham, I.E.(1977).*Resonance effects in stepping motors. Proc. IEE 124, (5), 445-8.*
- [41] Ward, P.A. and Lawrenson, P.J.(1977). *Backlash, resonance and instability in stepping motors. Proc. Sixth Annual Symposium on Incremental Motion Control System and Device. Department of Electrical Engineering, university of Illinois, pp73-83.*

- [42] *Singh, G; Leenhouts, A. C. and Mosel, E.F. (1976) Electromagnetic resonance in permanent-magnet step motor drive system. Proc. International Conference on Stepping Motors and System. University of Leeds, pp 115-24.*
- [43] *Leenhouts, A. C. and Singh, G. (1977). An active stabilization technique for open loop permanent-magnet step motor drive system. Proc. Sixth Annual Symposium on Incremental Motion Control Systems and Devices. Department of Electrical Engineering, University of Illinois, pp.19-24.*
- [44] *Hughes, A. and Lawrenson, P. J (1979). Simple theoretical stability criteria for 1.8 hybrid motors. Proc. International Conference on Stepping Motors and System. University of Leeds, pp. 127-35.*
- [45] *Lawrenson, P.J. and Kingham, I.E. (1975). Viscous coupled inertial damping of stepping motors. Proc. IEE 122, (10), 113-40*
- [46] *Kussul E., Baidyk T., Ruiz-Huerta L., Caballero-Ruiz A., Velasco G. Scaling down of microequipment parameters. Precision Engineering. V.30, ISSN: 0141-6359, 2006, pp. 211-22*
- [47] *Kussul E.m., Baidyk T.N., Rachkovskij D.A., Talayev S.A., Micromechanical engineering: a basis for the low-cost manufacturing of mechanical micro devices using microequipment Journal of Micromechanics and Microengineering, 6, V.6, pp.410-25.*
- [48] *Kussul E., Baidyk T., Ruiz-Huerta L., Caballero A., Velasco G., Kasatkina L., 2002, Development of Micromachine Tool Prototypes for Microfactories, Journal of Micromechanics and Microengineering, 12, pp.795-813.*
- [49] *Graciela Velasco H; Vectorial equations of a closed mechanical system formed by rigid bodies, WSEAS Trans. Math. Issue2, Vol. 6, February 2007 ISSN 1109-2769, pp.450-456*
- [50] *Velasco Herrera Graciela, (2005) Parallel micromanipulator system with applications in microassemblies and micromachine-making, WSEAS TRANSACTIONS on SYSTEMS, Issue 7, Volumen 4, July 2005, ISSN 1109-2777, pag. 980-987*
- [51] *Graciela Velasco- Herrera, Victor M. Velasco- Herrera, Aristides Pérez- Zarate, Guillermo Saavedra Román (2005) Simulation the motion of a parallel micromanipulator, WSEAS TRANSACTIONS on SYSTEMS, Issue 12, Volumen 4, December 2005, ISSN 11092777, pag. 2307-2310*