

UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

POSGRADO

FACULTAD DE INGENIERÍA

“FABRICACIÓN DE UN MANIPULADOR PARALELO”

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO  
DE:**

**MAESTRO EN INGENIERÍA**

**( M E C Á N I C A )**

**P R E S E N T A :**

**JOSÉ GERARDO ALVAREZ SÁNCHEZ**



**DIRECTORA DE TESIS:**

**DRA. GRACIELA VELASCO HERRERA**

**CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO D. F.**

**2005**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

El presente trabajo fue desarrollado en el Laboratorio de Mecatrónica y Micromecánica del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico de la UNAM, bajo la tutoría de la Dra. Graciela Velasco Herrera y con la Asesoría del Dr. Ernst Kussul.

Este proyecto se realizó gracias al financiamiento del proyecto **PAPIIT IN103903-2**

# Contenido

<b>Introducción</b>	
<b>Antecedentes</b>	i
<b>Objetivo</b>	iv
<b>Capítulo 1</b>	
<b>Historia de los mecanismos paralelos</b>	1
1.1 Los robots paralelos a lo largo de la historia	2
1.2 Tendencias de los manipuladores paralelos	13
<b>Capítulo 2</b>	
<b>Arquitecturas</b>	18
2.1 Arquitectura de los manipuladores paralelos	19
2.2 Manipuladores paralelos	19
2.3 Manipuladores paralelos planos	21
2.4 Manipuladores paralelos esféricos	22
2.5 Manipuladores paralelos espaciales	23
2.6 Descripción de arquitecturas de robots paralelos de seis grados de libertad	25
<b>Capítulo 3</b>	
<b>Diseño del micromanipulador</b>	28
3.1 Micromáquinas	29
3.2 Microingeniería	31
3.3 Microensamble	31
3.4 Micromaquinado	34
3.5 Micromanipulador paralelo	38
3.6 Diseño conceptual y preeliminar del manipulador paralelo	38
3.7 Teoría del tornillo sinfín	45
3.7.1 Cinemática del tornillo	46
3.8 Diseño	47
3.9 Descripción de los elementos del micromanipulador paralelo	51
3.10 Construcción y ensamble	55

<b>Conclusiones</b>	59
<b>Trabajo a futuro</b>	59
<b>Apéndice</b>	
<b>Términos</b>	60
<b>Índice de figuras y tablas</b>	62
<b>Referencias</b>	65

# Introducción

## Antecedentes

A pesar de que los robots industriales tienen pocas décadas, sus antecedentes son mecanismos que tienen siglos de historia. Actualmente, mecanismos como grúas y otros dispositivos de levantamiento están entre las máquinas más viejas usadas por el hombre.

Tales máquinas consisten de eslabones rígidos conectados por articulaciones. La inspiración en estos dispositivos quizá haya venido de los esqueletos de los animales. El lento pero sostenido desarrollo e innovación de dichos mecanismos ha continuado a través de la historia y en todo el mundo. Sin embargo, la revolución industrial en Europa a finales del siglo 18 creó una gran demanda de estos dispositivos.

Uno de los más apremiantes problemas fue el movimiento recíproco generado por un pistón. Mucha gente incluido el ingeniero escocés James Watt, propusieron eslabones en línea recta. Sin embargo, no fue hasta 1864 que el oficial naval francés llamado Peaucellier inventó un mecanismo de ocho barras que hacía este trabajo. Por esa época, los métodos de maquinado llegaron a ser más precisos y la tecnología de lubricación fue mejorada, así que la importancia práctica del descubrimiento desapareció. Sin embargo los matemáticos estaban intrigados por la máquina desde que el diseño fue fácilmente adaptado a curvas invertidas mecánicamente. Por lo tanto, esto pudo ser usado para estudiar geometría inversa. Esto también formuló una pregunta, ¿cuáles curvas pueden ser trazadas por un eslabonamiento?

En 1876, Kempe, el candidato londinense y matemático, probó que todas las curvas algebraicas pueden ser trazadas por mecanismos. Más tarde, Koenigs probó un teorema similar para curvas en el espacio. Alrededor de esta época, varios matemáticos se interesaron en la teoría de mecanismos, Chebyshev, Schönflies y Darboux, por nombrar algunos. Por mucho la máquina más estudiada fue el mecanismo de 4 barras.

El dispositivo es omnipresente en la ingeniería mecánica, así como un extraordinario elemento de diseño. Este ha sido usado para todo desde bisagras para las puertas hasta el mecanismo basculante para los trenes de alta velocidad. Aunque, permanecen aun algunas preguntas sin contestar concernientes a las capacidades geométricas de este mecanismo.

Los matemáticos también estuvieron interesados en problemas generales. Clifford desarrolló el álgebra geométrica, modelada en los cuaterniones de Hamilton; llegó a incluir traslaciones como rotaciones.

Alrededor del siglo 20, Ball desarrolló la teoría del tornillo, la cual trata con los movimientos infinitesimales del cuerpo rígido y fue principalmente usado para problemas concernientes a la estática y la dinámica.

Después de la primera guerra mundial, se creyó que los matemáticos se alejaban del estudio de mecanismos. Pero hubo notables excepciones; por ejemplo, Thurston y Weeks [1]. Los

ingenieros mecánicos descuidaron los mecanismos durante este periodo. Aunque las maquinas permanecieron con gran importancia práctica, los ingenieros académicos estuvieron más interesados en otras áreas. La excepción más notable fue la escuela de Moscú, dirigida por Artobolevskii. En particular, Dimentberg uso la teoría del tornillo para analizar cadenas cinemáticas cerradas en 1948.

En los cincuentas, Freudenstein, en la universidad de Columbia, comenzó a revivir el tema. Más o menos simultáneamente Hunt y Phillips, en Monash y Sydney respectivamente, abogaron por la teoría del tornillo para analizar mecanismos espaciales.

Quizás la diferencia principal entre los robots y los mecanismos, es que los mecanismos están usualmente diseñados para funciones particulares y por lo tanto generalmente tienen solo un grado de libertad. Los robots son supuestamente maquinas para propósitos generales, con varios grados de libertad. El análisis geométrico de mecanismos y robots es el mismo. Aquí la geometría se refiere en ambos casos a la cinemática y a la dinámica. La cinemática estudia los movimientos posibles que la maquina puede hacer, sin tomar en cuenta fuerzas e inercias, mientras la dinámica estudia como se puede mover la maquina, tomando en cuenta fuerzas e inercias.

En 1954, Devol patenta lo que el llamo “dispositivo programado articulado de transferencia”. De esta maquina derivo el telechirs usado en la industria nuclear para manipular materiales radioactivos y maquinas de control numérico. Engleberger, un estudiante de la universidad de Columbia, se dio cuenta que la maquina de Devol esencialmente era un robot. En 1956, compro la patente y creo Unimation. El primer robot industrial fue instalado por General Motors en 1961. En 1968, Kawasaki compro una licencia de Unimation para manufacturar robots en Japón. En 1978, Unimation presenta el PUMA, un acrónimo de “maquina universal programable para ensamble”. Este robot fue el resultado de un estudio para General Motors en tareas de ensamble automático. En 1979, es presentado en Japón el SCARA (brazo robot para ensamble selectivo) para ensamble de tarjetas con circuitos impresos.

En 1980, la materia de robots atrajo muchos fondos y por lo tanto, la atención de otros investigadores. En particular ingenieros eléctricos, se interesaron en el problema del control de robots. Científicos de la computación vieron a los robots como vehículos para probar sus ideas sobre inteligencia artificial. La recesion de finales de 1980 significo un declive en los fondos para la robótica. Sin embargo, permaneció un substancial interés en la materia en varias disciplinas. No obstante su tremendo éxito, siguieron problemas substanciales en la robótica [2].

Desde la revolución industrial, ha habido un gran interés en mejorar la calidad del producto y reducir el costo de manufactura. Al principio, la mayoría de los productos eran manufacturados por un artesano. La calidad del producto dependía del nivel artesanal así como de la destreza del artesano, por lo cual se volvía prohibitiva su adquisición.

En los comienzos del siglo veinte (1905) la Ford Motor Company introduce el concepto de producción en masa. En un ambiente de producción en masa, la mayoría de los procesos son llevados a cabo por máquinas especializadas para ciertos propósitos. Este método de

producción redujo drásticamente los costos de manufactura e hizo al automóvil y otros productos industriales accesibles al público en general. Desde que cada máquina es diseñada para desempeñar una determinada tarea, y cada vez un nuevo modelo es introducido, toda la línea de producción tiene que ser parada para cambiar la herramienta. El cambiar de herramienta en una línea de producción, durante cada cambio de modelo, puede ser muy caro. A este tipo de automatización se le llama automatización fija (*hard automation*).

La poca flexibilidad y costo relativamente alto de la automatización fija nos ha llevado por un nuevo camino. Recientemente, los robots manipuladores han sido introducidos por las industrias manufactureras para mejorar ciertas tareas de producción, tales como el manejo de materiales, soldadura, pintura, y ensamble. Debido a que los robots manipuladores son controlados por computadoras o microprocesadores, ellos pueden fácilmente ser reprogramados para diferentes tareas. No es necesario reemplazar dichas máquinas durante un cambio de modelo. A este tipo de automatización le llamamos automatización flexible (*flexible automation*).

En general, la producción manual tiende a ser lenta y dificulta la calidad del producto. Aunque la automatización fija es rápida y más precisa que los otros dos métodos de producción, el costo de cambiar herramientas por cada cambio de modelo es alto. Con la automatización flexible, se requiere mucho menos tiempo para acondicionar la línea de producción. Cuando el volumen de producción es muy bajo, la producción manual es más económica. Cuando el volumen de producción se incrementa, la automatización flexible será más efectiva en costo. Cuando el volumen de producción aumenta más aún, la automatización fija viene a ser el método de producción más efectivo [3].

La tendencia que existe hoy día hacia el uso de máquinas de alta velocidad hace imprescindible el desarrollo de máquinas con una elevada dinámica, es decir, construcciones robustas con pequeñas masas móviles [35].

Un paso adelante en este sentido es el uso de mecanismos paralelos. Los ejes de un mecanismo paralelo no están dispuestos en serie, sino que todos los ejes tienen un vínculo directo entre la plataforma o base móvil y la base fija de la máquina surgiendo de esta forma las arquitecturas de hexápodos que son actualmente objeto de numerosos proyectos de investigación. Su estructura ligera permite diseñar máquinas de gran precisión y gran velocidad [4].

## Objetivos

El objetivo de este trabajo es el de diseñar un prototipo de micromanipulador paralelo [32], basado en la idea original del Doctor Ernst Kussul, la cual consiste en la investigación de procesos de microensamble y procesos de micromanufactura de alta precisión, usando el principio de palancas dentro del micromanipulador, el cual afirma que la fuerza multiplicada por su distancia al punto de apoyo es igual a la multiplicación de la resistencia por el recorrido al punto de apoyo (fulcro) [27].

En nuestro caso se diseño en base a una palanca de segundo género, en esta clase de palancas, el punto de apoyo se encuentra en el extremo y la resistencia se localiza entre la fuerza y el punto de apoyo.

En este diseño la fuerza será ejercida por el tornillo sinfín situado en el extremo de la palanca, el cual nos dará la precisión deseada, con este principio lograremos convertir un movimiento grande en uno pequeño y una fuerza pequeña en una grande, con lo que obtendremos:

Movimientos controlados y precisos  
Manejo de grandes cargas

Otro de los objetivos será modelar y simular los distintos elementos mecánicos que componen el micromanipulador paralelo. Para tal efecto utilizaremos un programa de diseño llamado **UNIGRAPHICS** que es un programa de diseño en 3 dimensiones en el que modelaremos y simularemos dichos elementos mecánicos con el fin de determinar si el diseño es adecuado o tendremos la necesidad de rediseñar algunos de estos, al simularlos en el programa determinaremos si existe alguna interferencia entre los diferentes elementos, provocando o limitando movimientos que hagan que el micromanipulador paralelo no se desempeñe adecuadamente.

Y por último fabricar cada uno de los distintos elementos mecánicos en máquinas herramienta convencionales y de control numérico (CNC).

Dentro del Laboratorio de Mecatrónica y Micromecánica del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico de la UNAM, se cuenta con las instalaciones, el equipo de cómputo, máquinas herramienta y materiales necesarios para esta tesis.

Este trabajo surge de la necesidad de complementar las micromáquinas herramienta ya fabricadas dentro del mismo laboratorio, y que en un futuro ayudará en las tareas de microensamble y micromanufactura de alta precisión, formando una microcelda de manufactura.

# Capítulo 1

## Historia de los mecanismos paralelos

En este capítulo se describe brevemente el desarrollo histórico de los mecanismos paralelos, que datan desde el siglo XIX hasta nuestros días, y el desarrollo tecnológico que han sufrido a través de la historia.

## 1.1 Los Robots paralelos a lo largo de la historia

Los trabajos teóricos relacionados con los mecanismos paralelos, y particularmente con las plataformas compuestas por 6 barras, datan de varios siglos atrás, cuando matemáticos ingleses y franceses, estaban obsesionados en el estudio del poliedro. Alrededor de 1800 el francés Agustín Louis Cauchy (1789-1857), ya estudiaba la rigidez del llamado “octaedro articulado”.

Quien quiera que pensara primero en una plataforma de movimiento para la industria del entretenimiento fue un visionario. Uno de los primeros dispositivos para el entretenimiento fue diseñado por James E. Gwinnett quien pidió la patente en 1928. Ver figura 1. Este dispositivo esta basado en un mecanismo esférico paralelo. No se sabe si este dispositivo fue el primer diseño de un sistema cinemático paralelo de múltiples grados de libertad, o si fue construido; una cosa si es segura, James Gwinnett estuvo adelantado en su tiempo y la industria no estaba lista para la complejidad de su invento.

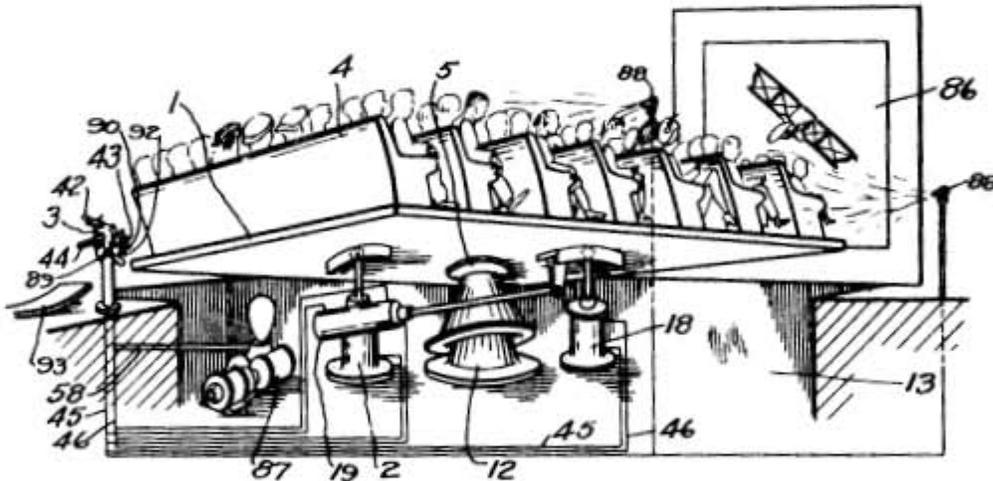


Fig.1 Posiblemente el primer mecanismo paralelo espacial, patentado en 1931 (US patent No.1,789,680)

Una década más tarde y solo 17 años después de que se acuñara el término “Robot”, un nuevo robot paralelo fue inventado por Willard L.V. Pollard para automatizar el proceso de pintura en spray, fue considerado como el primer robot industrial, figura 2. El primer robot que diseño Pollard, no fue el que se construyó. El ingeniero que co-diseño el primer robot industrial, fue el hijo de Pollard, la patente fue expedida el 16 de junio de 1942.

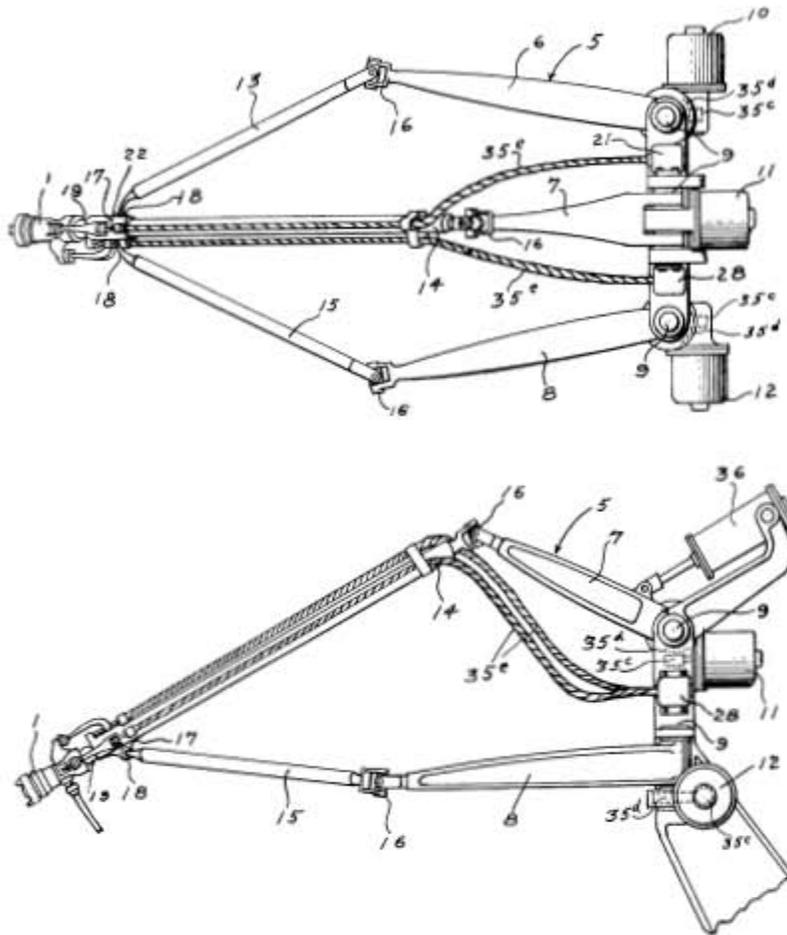
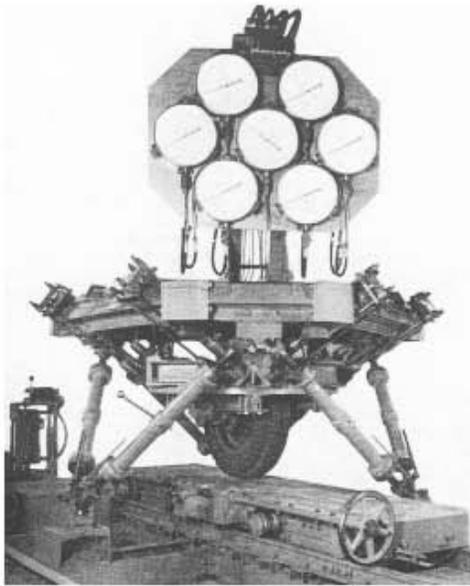


Fig.2 Primer robot industrial paralelo, patentado en 1942  
(US patent No. 2, 286,571)

Un par de años más tarde, en 1947, del otro lado del atlántico, un nuevo mecanismo paralelo fue inventado, el “hexápodo octaédrico de barras de longitud variable”, el más popular y el que cambió la industria, ver figura 3.

El Dr. Eric Gough, quien construyó el dispositivo octaédrico, fue un distinguido ingeniero automotriz de la Dunlop Rubber Co., en Birmingham, Inglaterra. Se unió a Dunlop a la edad de 20 años. La máquina para pruebas de llantas o “Universal Rig”, como él llama a su invento, fue creada para resolver problemas de cargas en los neumáticos al aterrizar los aviones, una máquina universal debía determinar las propiedades de los neumáticos bajo cargas combinadas. Desafortunadamente Eric Gough falleció en 1973 cuando los hexápodos octaédricos incrementaron su popularidad [5].

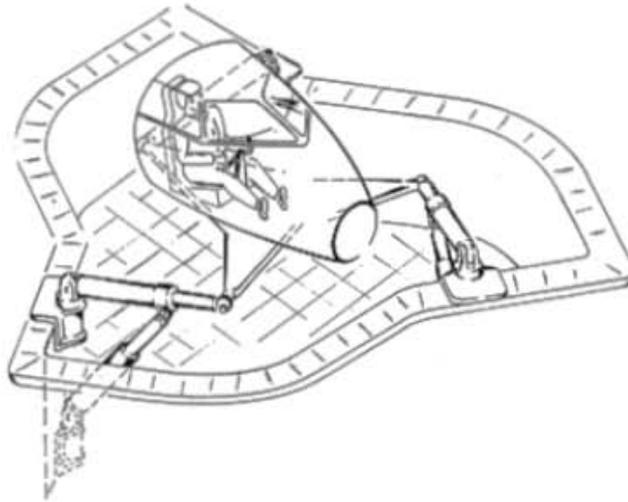


**Fig.3 Primer hexápodo octaédrico (Plataforma original de Gough 1954 (Proc. IMechE, 1965-66)**

En 1965 aparece el artículo de D. Stewart en las memorias del British ImechE [6]. En este artículo, Stewart propone un nuevo diseño de mecanismo paralelo, el cual fue usado como simulador de vuelo, se considera que por su particular arreglo, este mecanismo puede formar un elegante diseño para simular vuelos en el entrenamiento de pilotos. Contrario a la mayoría de los simuladores, este no tiene ejes fijos relativos a la tierra, por lo tanto dentro de los límites de diseño este puede verdaderamente simular las condiciones de vuelo. Este diseño fue llamado plataforma de Stewart o mecanismo paralelo de Stewart (SPM).

La plataforma de Stewart en general consiste de una base y un plato móvil, los cuales están conectados por seis piernas extensibles y unidas por juntas esféricas en ambos extremos (o juntas esféricas en un lado y juntas universales en el otro). El mecanismo es un mecanismo espacial con seis grados de libertad, y el plato móvil puede alcanzar cualquier configuración (posición y orientación) en el espacio de trabajo controlando la longitud de las seis piernas [6].

El mecanismo propuesto, sin embargo, es diferente del hexápodo octaédrico, paradójicamente, a menudo mencionado como “plataforma de Stewart”. En la figura 4 se observa un bosquejo de la plataforma diseñada por Stewart.

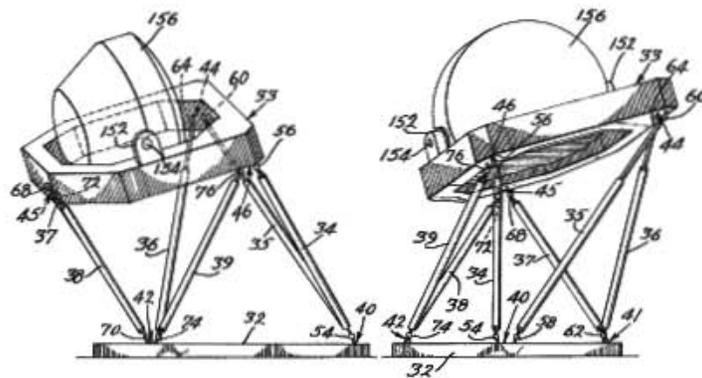


**Fig.4 Único esquema de la "plataforma de Stewart"**  
(Proc. IMechE, 1965-66)

En las mismas memorias, el artículo de Stewart es seguido de acaloradas discusiones de científicos e ingenieros, uno de los cuales era el Dr. Gough quien hace notar la existencia de su máquina para probar neumáticos. No hay duda de que el excelente artículo de Stewart, tuvo un gran impacto en el posterior desarrollo en el campo cinemático paralelo.

Varias sugerencias para el uso del hexápodo fueron hechas, muchas de las cuales fueron predicciones exactas del futuro. Desafortunadamente no se conoce nada más sobre D. Stewart.

En América el ingeniero Klaus Cappel se enfrenta a un problema, se le pide que mejore un sistema convencional de 6 grados de libertad ya existente basado en un hexápodo. En 1971, la oficina de patente y marcas registradas de los Estados Unidos concede a Klaus Cappel la patente por su invento y su uso como simulador de movimiento, ver figura 5. La patente fue solicitada el 7 de diciembre de 1964, en ese tiempo Cappel ignoraba el invento de Gough y el artículo de Stewart [5].

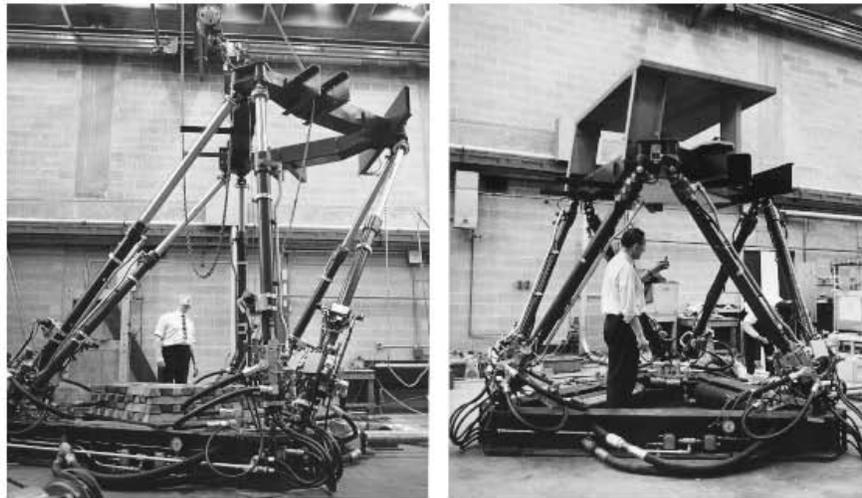


**Fig.5 Extracto de la primera patente de un hexápodo octaédrico editada en 1967 (US patent No. 3,295,224)**

Después de comenzar la era espacial, en los principios de los sesenta, se hizo imperativa la simulación de condiciones reales experimentadas por pilotos de aviones y de transbordadores espaciales para darles un entrenamiento adecuado, el objetivo de dichos simuladores es emular la interacción hombre-vehículo a través de la medición del desempeño en maniobras. El simulador es una cabina real montada sobre un hexápodo. El hexápodo es del tipo "posicionador de seis ejes" con seis gatos hidráulicos y doce juntas universales, distribuidas en la base y plataforma móvil, que en este caso es la cabina. Este tipo de simulador puede ser modificado fácilmente para simular un amplio rango de vehículos de vuelo. Desde el punto de vista médico, la presencia del cuerpo humano en un sistema de seis grados de libertad producirá una simulación precisa en sus sensores visuales y táctiles, en otras palabras los efectos biológicos en el oído interno, en órganos kinésicos, músculos y tejido cutáneo, que son usados por el hombre para sentir movimiento en todas direcciones.

De acuerdo con una compañía especializada en este tipo de simuladores, los beneficios de un simulador con un sistema de seis grados de libertad son: incrementar la experiencia, incrementar la adaptación del piloto con el equipo, virtualmente elimina el mareo, mejora la sincronización sobre información de señales visuales con señales de movimiento, permite desplegar pantallas más reales y panorámicas. Ver figura 6.

En la última década Klaus Cappel trabaja como ingeniero consultor para un fabricante de equipo de vibración y co-inventa el "CUBE", dispositivo cinemático paralelo. Cappel con una larga experiencia en hexápodos esta aún activo en este campo.

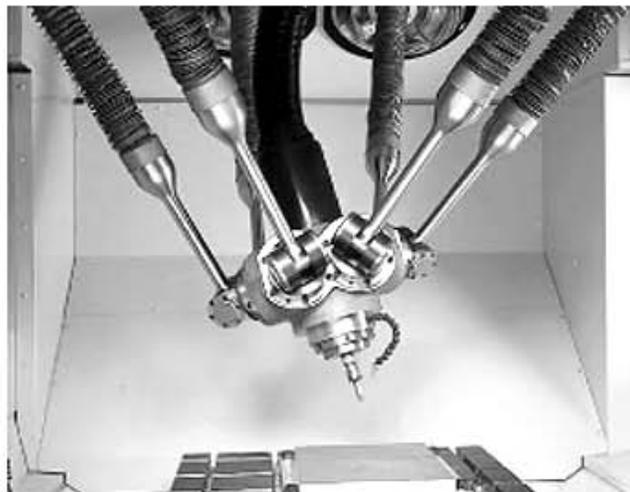


**Fig.6 Primer simulador de vuelo basado en un hexápodo octaédrico (Cortesía de Klaus Cappel)**

Un primer dispositivo paralelo fue usado dentro de una celda de ensamble en 1979 por McCallion. Desde entonces los manipuladores paralelos han incrementado su desarrollo, considerados como una alternativa atractiva en comparación con los dispositivos de eslabonamiento serial.

En 1987 un nuevo tipo de robot, fue diseñado y construido por Kart-Erik Neumann, “el robot cinemático paralelo **PKR** (parallel kinematic robot)”. Este tipo robot tiene 3 o más ejes lineales, 3 actuadores prismáticos los cuales controlan 2 grados de libertad rotacionales y un grado de libertad de traslación en la plataforma móvil. Una muñeca convencional está montada en la plataforma móvil. Esto se parece a otro dispositivo, “la máquina cinemática paralela **PKM** (parallel kinematic machine)”, la cual es una máquina herramienta con un husillo. El reto inicial para este sistema, fue que requería sistemas de cómputo más avanzados, los cuales no estaban disponibles en esa época. Kart-Erik Neumann explica: “No hubo sistema de control para correr la máquina hasta 1992 cuando Comau Pico lanzo el primer control multiprocesador”. Estos robots han sido parte de la historia, pero ahora en nuestros tiempos han visto un gran desarrollo.

Con el creciente interés de producir partes de calidad, una nueva generación de máquinas que combinan alta velocidad, precisión, rigidez y capacidades multi-axiales empiezan a aparecer. El diseño básico de estas estructuras está basado en la plataforma de D. Stewart convencional. En este caso, la máquina herramienta es montada en la plataforma móvil, teniendo seis grados de libertad. Hay dos posibles diseños. El primero es uno que utiliza gatos hidráulicos telescópicos, teniendo juntas universales al final del gato hidráulico. El segundo diseño es con la junta esférica al final del gato hidráulico. Estos diseños tienen las siguientes ventajas: permiten el libre acceso a la zona de trabajo, no hay nada que impida el movimiento de la herramienta de maquinado en la pieza de trabajo. A diferencia de la mayoría de los robots industriales, el diseño de hexápodo provee una gran rigidez. Ver figura 7.



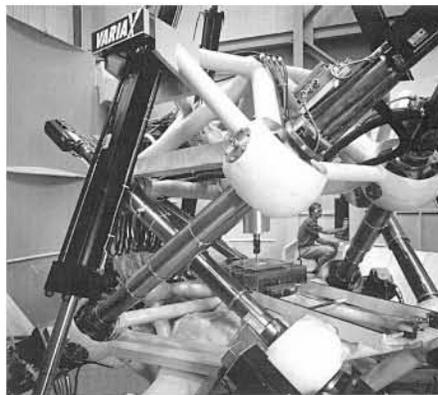
**Fig. 7 Hexápodo**

Las fresadoras convencionales están generalmente basadas en una estructura en serie (hay tantos ejes como grados de movimiento, los ejes están colocados en serie). Esto da como resultado una única cadena cinemática. Los ejes suelen estar dispuestos de acuerdo a los ejes cartesianos, lo que significa que hay un eje X, un eje Y y un eje Z, además de los ejes rotacionales, en el caso de que fueran necesarios.

Este tipo de máquinas son simples de operar porque cada eje controla directamente un grado cartesiano de movimiento y no se producen acoplamientos entre ellos. La desventaja de estos mecanismos en serie es que cada eje debe transportar cargas en todas las direcciones y soportar el peso del resto de los ejes. Esto tiene como resultado la movilización de grandes masas con una escasa dinámica, especialmente en máquinas de grandes dimensiones. Como se dijo anteriormente la tendencia existente hoy día hacia el uso de máquinas de alta velocidad hace imprescindible el desarrollo de máquinas con una elevada dinámica, es decir, construcciones robustas con pequeñas masas móviles.

Un paso adelante en este sentido es el uso de mecanismos paralelos. Los ejes de un mecanismo paralelo no están dispuestos en serie, sino que todos los ejes tienen un vínculo directo entre la plataforma móvil y la base fija de la máquina.

A principios de 1998 se instaló en Europa el primer hexápodo “Variax Hexacenter”, diseñado y desarrollado por el constructor Giddings and Lewis (Wisconsin, E.U.). La máquina instalada en la Universidad de Nottingham, constituye la base de un programa de investigación denominado RAMM “*rapid response aerospace manufacturing*” (respuesta rápida a la producción aeroespacial). Un proyecto cuyo presupuesto alcanza los 4 668 600 dólares y que está destinado fundamentalmente al sector de la aeronáutica. Ver figura 8 [4].



**Fig. 8 Máquina Giddings Variax**

El primer objetivo del equipo de investigación de la Universidad de Nottingham es la optimización del comportamiento de los hexápodos. Observaron que para obtener el mayor rendimiento de este tipo de arquitectura es necesario definir parámetros diferentes a los que

se utilizan en las máquinas-herramienta tradicionales. El husillo portaherramientas se soporta en seis brazos que se extienden o retraen según la forma de la pieza a maquinar.

Esta geometría permite contar con una mayor rigidez, precisión y velocidad en el proceso ver figura 8. Se trata, sin duda, de una concepción muy distinta a las máquinas convencionales de arquitecturas ortogonales con bancadas de hierro apoyadas en grandes estructuras.

La estructura del hexápodo no lleva piezas susceptibles de vibrar, de hecho, los brazos están en extensión o compresión, por lo que se obtiene una rigidez muy elevada. Las piezas son, además, muy ligeras. Esta combinación, rigidez/ligereza, permite que las velocidades de corte sean muy elevadas, así como rápidas aceleraciones y desaceleraciones.

Sin embargo, no todo son ventajas para esta nueva concepción de maquinaria. Uno de los mayores frenos con los que se enfrentó su desarrollo fue la potencia del cálculo. Los algoritmos matemáticos y los programas de mando que calculan la retracción o la extensión de los brazos para repositionar constantemente al husillo dentro del espacio, requieren una potencia de cálculo enorme. Para obtener la velocidad de cálculo necesario para realizar el control se requirió el equivalente a varias computadoras trabajando en paralelo. Las coordenadas del accionador no se pueden expresar en coordenadas cartesianas, por lo que es necesaria su transformación. Además, para obtener un control exhaustivo, hay que calcular la dinámica de la máquina y todos los acoplamientos.

Con la última generación de los procesadores RISC, como el PC 604/300, esto fue posible. De hecho, se requieren prestaciones de cómputo similares a las de los robots avanzados.

Ha sido necesario, por tanto, esperar a que la potencia de cálculo requerida fuera asequible en términos físicos y económicos para continuar con el desarrollo de este tipo de arquitectura. La sofisticación informática, sin embargo, no afecta al usuario, ya que estas máquinas se programan exactamente como si se tratase de un centro de fresado tradicional. La interfase con el operador es exactamente la misma.

Otro inconveniente que presentan los mecanismos paralelos es que el área de trabajo es menor que el de las máquinas convencionales, además ofrecen menos posibilidades para diseñar un área con una forma específica. El hexápodo debe construirse con dimensiones similares, si se quisiera realizar el mecanizado de una pieza que presenta una geometría asimétrica, sería necesario diseñar una máquina de grandes dimensiones.

Otra de las máquinas de mecanismo paralelo instaladas en Europa es la fabricada a mediados de los años 90 por Ingersoll Milling. En este caso no se trata de un hexápodo, sino de un octaedro. Esta máquina fue presentada en la EMO de Hanover, y fue suministrada al laboratorio de ensayos de máquinas-herramienta de la Universidad de Aix - La-Chapelle. Según sus constructores, esta máquina permite obtener velocidades de avance cinco veces superiores a las obtenidas por las máquinas de cinco ejes tradicionales. Otra de las máquinas fabricadas por Ingersoll Milling se encuentra en el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología de Estados Unidos. En la figura 9 mostramos una máquina fabricada por Ingersoll Milling.



**Fig. 9 Máquina fabricada por Ingersoll**

Geodetic en Gran Bretaña, Hexel en Estados Unidos y Toyota en Japón son otros fabricantes que han debutado en el campo de la fabricación de este tipo de herramientas, cada uno con sus propias adaptaciones. Por ejemplo, en la máquina desarrollada por Ingersoll Milling, el accionamiento del hexápodo está situado en el interior de un chasis de forma octaédrica, basado como la estructura hexápoda, en triángulos, lo que supone una rigidez superior. Según sus fabricantes, el resultado de la combinación de la agilidad de movimiento de la estructura hexápoda y la rigidez de un chasis octaédrico es una máquina cinco veces más veloz que una máquina clásica.

En el modelo Variax de Giddings and Lewis, la rigidez se obtiene organizando los seis brazos como tres juegos de elevadores cruzados. Además, un sistema de control láser, desarrollado en colaboración con la firma Renishaw e instalado sobre cada brazo, permite realizar la medida y compensar las variaciones térmicas para obtener mayor precisión.

Ingersoll Milling propone una variante basada en este mismo principio, la HOH 600, pero con un husillo de eje horizontal. La americana Hexel también ha suministrado varios modelos de máquinas de esta arquitectura destinadas a la realización de ensayos de mecanizado. Según expertos de la Universidad de Nottingham, los hexápodos constituyen hoy en día una herramienta muy costosa que todavía hay que poner a prueba.

Algunos fabricantes, son más optimistas en sus afirmaciones y creen que el mercado de los hexápodos va a alcanzar cifras muy considerables en los próximos diez años, consideran que la industria de máquinas-herramienta no ha desarrollado ningún concepto innovador desde hace una década y que las nuevas arquitecturas suponen un paso muy importante respecto a la tecnología disponible hoy en día. En la figura 10a y 10b podemos ver algunas máquinas herramienta fabricadas actualmente.



10a



10b

Fig. 10a y 10b Una muestra de máquinas fabricadas en la actualidad

El sector aeronáutico, el de fabricación de moldes y de matrices son los que más posibilidades tienen de adoptar las nuevas arquitecturas ya que éstas permiten una mayor adaptación al maquinado de piezas complejas, de pequeño volumen y de materiales muy duros. Ingersoll Milling tiene grandes esperanzas puestas en que los fabricantes de moldes sustituyan las fresadoras de tres ejes por las nuevas estructuras hexápodos octaédricas. Y a largo plazo, que se sustituyan también la mayor parte de las máquinas de cinco ejes, ver un ejemplo en la figura 11.



Fig. 11 Mecanizado de piezas complejas

Pero no todas las opiniones coinciden en este punto, algunos expertos consideran que más que sustituir a las máquinas-herramienta, los hexápodos van a crear nuevas áreas de mercado, fundamentalmente en aquellas tareas en las que sea necesaria la actuación de personal muy calificado, como puede ser el área de ensamble. Un ejemplo son las máquinas fabricadas por Excel, son estructuras hexápodos de 300 mm de altura que posicionan un componente con gran precisión para realizar operaciones de soldadura muy delicada. Así mismo, esta empresa está desarrollando una estructura hexápoda de grandes dimensiones para retirar la pintura de las superficies exteriores de aviones y otra para el remache de piezas aeronáuticas.

Ahora que los hexápodos están disponibles en el mercado, queda sin embargo una gran barrera por atravesar, la de los usuarios de máquinas-herramienta convencionales. Geodetic, empresa pionera en la construcción de este tipo de estructuras en el Reino Unido y que presentó su primera máquina G500 durante la pasada edición de la EMO, parece tener una solución al respecto. A pesar de que la máquina presenta un equipamiento de cinco ejes, en un principio se propone una versión de tres ejes, posteriormente, mediante una simple modificación del programa, podrá convertirse en cinco ejes. El objetivo de esta propuesta es disminuir la inquietud de los usuarios y reducir la inversión [4].

La mayoría de las disciplinas médicas, especialmente el campo de la cirugía, requiere de gran precisión con fuerzas controlables cuando se trabaja en órganos humanos, se introdujeron en este campo controladores de precisión, las investigaciones se han hecho por parte de Siemens Médica.

El objetivo de estos robots es ayudar al cirujano a obtener una precisión de micras, aumentar la seguridad en las cirugías y poder realizar cirugías más complicadas.

El uso de un robot con brazos hexápodos permite gran precisión y gran fuerza para alcanzar zonas muy complicadas, sobre todo en el cerebro, ya que los modelos se han desarrollado para neuro-cirugía. Se puede apreciar al SurgiScope en acción en el laboratorio de robots quirúrgicos en la universidad Humboldt en Berlín ver figura 12.

Por otro lado el cirujano se podrá sentar en la cabina de operación, esto es descrito como el espacio de trabajo del futuro cirujano. La cabina estará montada en la plataforma móvil del hexápodo de tal manera que la imagen es transmitida al cirujano por el endoscopio dentro del paciente. Esto ayuda al cirujano a controlar la herramienta y darle una sensación de orientación espacial del escálapo.



Fig. 12

Como ellos dicen, quieren que el cirujano *"vuele a través del paciente"*, dicha tecnología está controlada por computadora para evitar errores.

## 1.2 Tendencias de los manipuladores paralelos

Los manipuladores seriales aparecen por primera vez como sistemas mecánicos constituidos por una estructura compuesta de varios eslabones acoplados por juntas o uniones rotacionales y traslacionales, las primeras llamadas de revolución y las segundas prismáticas. Estas estructuras son uniones de eslabones, por esa razón forman una cadena cinemática abierta, con cada eslabón acoplado a un predecesor y un sucesor, excepto por los dos eslabones finales, los cuales están acoplados solo a un predecesor o a un sucesor, pero no a ambos. La naturaleza de este tipo de manipuladores seriales es que su capacidad de carga y su rigidez es menor cuando los comparamos con propiedades similares a las de maquinas multiaxiales, tales como maquinas herramienta de control numérico.

Obviamente, una baja rigidez implica una baja precisión en el posicionamiento. Para remediar esta desventaja, los manipuladores paralelos han sido propuestos; ya que soportan altas cargas con eslabones más ligeros. En un manipulador paralelo, podemos distinguir una plataforma base, una plataforma móvil, y varias piernas. Cada pierna es una cadena cinemática de tipo serial, cuyos eslabones finales son las dos plataformas. Contrario a los manipuladores seriales, cuyas juntas son actuadas, los manipuladores paralelos tienen juntas no actuadas, las cuales nos dan una diferencia substancial entre los dos tipos de manipuladores. La presencia de juntas no actuadas hace que el análisis de los manipuladores paralelos, sea más complejo en general, que el de los manipuladores seriales [20].

Aparte de los simuladores de movimiento, las PKM's (parallel kinematic machines) son la segunda aplicación más popular de los mecanismos paralelos. Contrario a las compañías de simuladores, los fabricantes de PKM's están estrechando sus relaciones con la academia. Por ejemplo, el hexápodo de la compañía francesa CMW es un resultado de una colaboración muy cercana con los investigadores de INRIA (Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique). La mayor tendencia en PKM's es el desarrollo de estructuras híbridas o máquinas herramienta de menos de seis ejes. En efecto, la única PKM con éxito comercial es el robot "Tricept", máquina herramienta desarrollada por SMT Tricept (formalmente Neos Robotics) con más de 200 unidades vendidas [21]. Ver figura 13.



Fig.13 Tricept 600 en la línea de Volvo en Olfström

El Tricept es un robot máquina herramienta de 3 ejes, con tres barras telescópicas, y cuenta con una muñeca convencional de 2 ejes.

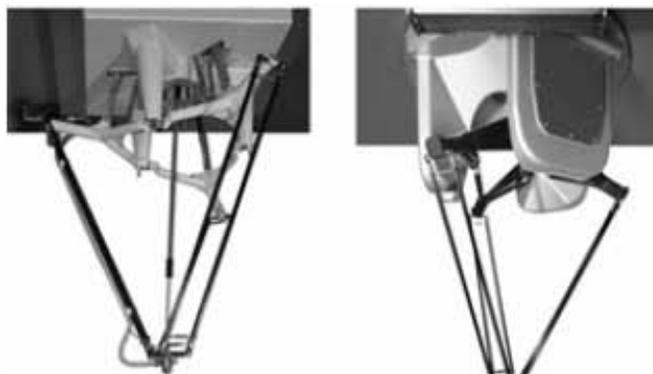
Otro, relativamente prometedor es el “Sprint Z3” por DS Technologie. Mostrado en la figura 14. La máquina es una herramienta cinemática paralela de 3 ejes que puede avanzar en el eje z y se inclina en todas direcciones, y puede ser montada en una plataforma XY.



**Fig. 14 Robot Sprint Z3**

Las arquitecturas paralelas no escapan de la atención de la industria de los robots, desde que pueden ser utilizadas para muchas de las actuales aplicaciones monopolizadas por los robots seriales.

El robot industrial paralelo de mayor éxito es el robot “Delta”, inventado y patentado por el profesor Reymond Clavel (EPFL, Suiza). Figura 15. El robot Delta ha sido comercializado bajo licencia para las aplicaciones más comunes de manipulación, por un buen número de compañías.



**Fig. 15 Variantes del robot Delta**

Cientos de unidades han sido vendidas alrededor del mundo en competencia directa con los robots SCARA. FANUC Robotics, además de un par de compañías están ofreciendo estas unidades para varias aplicaciones de manufactura [21]. En sectores de nano y micro

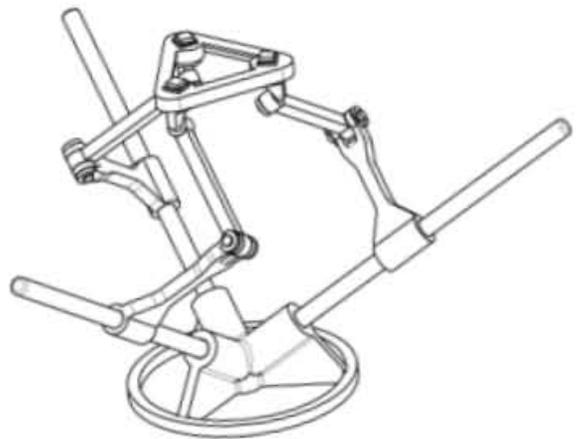
posición, Physik Instrumente (Pi) ha sido la industria líder con más de una década de experiencia. La compañía no solo ha vendido un número considerable de estos hexápodos, sino también ha desarrollado un conjunto de productos basados en arquitecturas originales y tecnologías de manufactura. Mostrado en la figura 16.



**Fig. 16 El Nanopod**

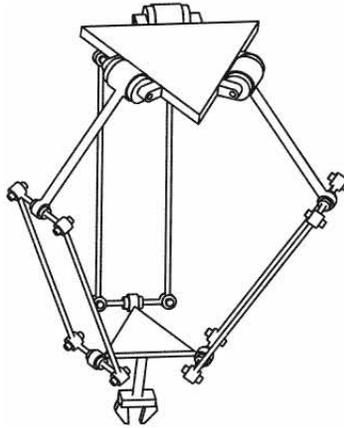
Otra empresa es ALIO Industries quien ofrece no solo el hexápodo convencional sino también un trípedo. Debe mencionarse que Adept Automation recientemente lanzó su primer robot de seis ejes para nano posición. La dualidad de los robots paralelos y seriales es bien conocida. El gran alcance, linealidad y simplicidad de las estructuras seriales esta siendo considerada contra la alta rigidez, agilidad, y precisión de los paralelos. Solo ahora, después de que los robots paralelos de seis grados de libertad han probado ser menos exitosos para muchas aplicaciones, todo mundo está buscando arquitecturas simples que son fáciles de controlar y de operar.

Un espectacular ejemplo de esta tendencia es un aparato translacional que fue recientemente mostrado en la conferencia de robots cerca de Barcelona, España. El “Tripteron”, figura 17, es justo lo que se conoce como robot serial cartesiano. Fue inventado en la Universidad Laval (Québec, Canadá) aunque los investigadores de la Universidad de California en Riverside también presentaron un diseño muy similar. La patente pendiente de este robot consiste de tres cadenas seriales, cada una compuesta de un actuador prismático fijado a la base y tres juntas pivote paralelas a la dirección del actuador prismático.



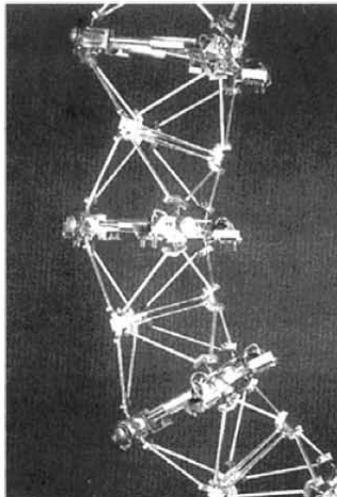
**Fig. 17 Robot paralelo translacional “Tripteron”**

Nuevos diseños de robots paralelos se han diseñado enfocados en el desarrollo de operaciones para ensamble rápido, algunos ejemplos son el robot Delta [22], desarrollado en Lausanne Federal Polytechnic Institute, mostrado en la figura 18.



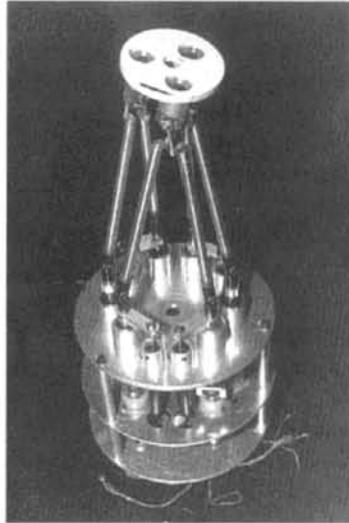
**Fig.18 El robot Delta Clavel**

El robot hexa [23], desarrollado en la universidad de Montpellier; y el robot estrella [24], desarrollado en la Ecole Centrale de Paris. Otro ejemplo más de manipulador paralelo es el Trussarm, desarrollado en la universidad de Toronto instituto de estudios aeroespaciales (UTIAS), mostrado en la figura 19 [25].



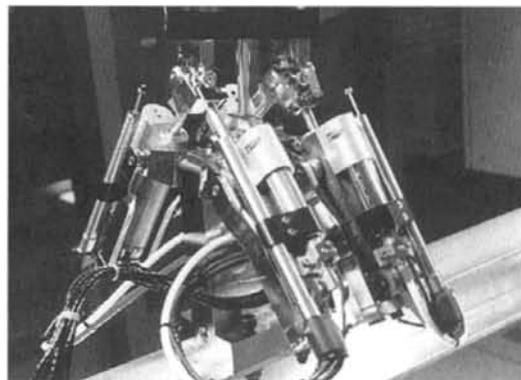
**Fig. 19 El Trussarm UTIAS**

Merlet en 1990, del Institut National de Recherche en Informatique et en automatique, de Sophia-Antipolis, Francia, desarrollo un robot paralelo de seis ejes llamado en francés un main gauche (mano izquierda), figura 20, usado como ayuda para otro robot, posiblemente de tipo serial, para mejorar su destreza.



**Fig. 20 La mano izquierda de Merlet**

Hayward, de la universidad de McGill, diseñó y construyó un manipulador paralelo para ser usado como un hombro modular para tareas de orientación [26]; el modulo consta de movimientos de tres grados de libertad pero esta provisto de cuatro actuadores hidráulicos, figura 21.



**Fig. 21 Hombro modular de Hayward**

# Capítulo 2

## Arquitecturas

.

En este capítulo se da una breve descripción de algunas arquitecturas de manipuladores paralelos.

## 2.1 Arquitecturas de los manipuladores paralelos

La configuración más común que comprende un manipulador paralelo la conforman seis piernas, las cuales son actuadores lineales, así como cilindros hidráulicos.

Se ha incrementado el interés en los robots paralelos, debido a sus cualidades, las cuales no han sido explotadas en su totalidad [34].

Enlistamos las ventajas de los robots paralelos:

- Alta relación carga-peso, debido a que la carga es distribuida en varios eslabones.
- Alta precisión, debido a que no hay errores acumulados.
- Alta rigidez estructural, ya que la carga es soportada por varios eslabones en paralelo y algunas estructuras trabajan a tracción-compresión solamente.
- Ubicación de los motores cerca de la base.

Contrariamente, las desventajas más relevantes [34]:

- Volumen de trabajo limitado.
- Modelos geométricos son difíciles de establecer.
- Singularidades dentro del volumen de trabajo.

Algunas de sus características son [34]:

- El elemento terminal se encuentra conectado a la base por, al menos, dos cadenas cinemáticas independientes.
- La rigidez de los eslabones asegura mayor precisión de posicionamiento.
- Costo relativamente bajo

## 2.2 Manipuladores paralelos

Se dice que un manipulador paralelo es simétrico si satisface las siguientes condiciones:

- 1.- El número de miembros es igual al número de grados de libertad de la plataforma móvil.
- 2.- El tipo y número de juntas en todos los miembros esta arreglado en un patrón idéntico.
- 3.- El número y ubicación de las juntas accionadas en todos los miembros es el mismo.

Cuando las condiciones arriba mencionadas no son satisfechas, el manipulador es llamado asimétrico [3]. Podemos observar que en los manipuladores simétricos el número de miembros  $m$ , es igual al número de grados de libertad  $F$ , el cual también es igual al número de cadenas  $L+1$  (incluyendo la cadena externa) esto es

$$m = F = L + 1. \quad (3.1)$$

La conectividad  $C_k$ , de un miembro son los grados de libertad asociados con todas las juntas en el miembro. Esto es

$$\sum_{k=1}^m C_k = \sum_{i=1}^j f_i, \quad (3.2)$$

Donde  $j$  es el número de juntas en un mecanismo. Substituyendo la siguiente ecuación

$$\sum f_i = F + \lambda L$$

donde:

$F$ : grados de libertad de un mecanismo

$f_i$ : grados de movimiento relativo permitido por la junta  $i$

$\lambda$ : grados de libertad del espacio en el cual un mecanismo trabajara

$L$ : número de cadenas independientes en un mecanismo

en la ecuación. (3.2), y eliminando  $L$  obtenemos

$$\sum_{k=1}^m C_k = (\lambda + 1)F - \lambda \quad (3.3)$$

Además, la conectividad  $C_k$  de cada miembro no debe ser más grande que el parámetro de movimiento y menor que los grados de libertad de la plataforma móvil esto es,

$$\lambda \geq C_k \geq F \quad (3.4)$$

Las ecuaciones (3.3) y (3.4) son útiles para la enumeración y clasificación de los manipuladores paralelos. Los mecanismos paralelos en general pueden ser clasificados como planos, esféricos o mecanismos espaciales.

## 2.3 Manipuladores paralelos planos

Para un manipulador de 3 grados de libertad, paralelo de 3 miembros, tenemos  $\lambda = 3$  y  $m = F = 3$ . Substituyendo  $\lambda = 3$  y  $F = 3$  en la ecuación (3.3), tenemos

$$C_1 + C_2 + C_3 = 4F - 3 = 9.$$

Al mismo tiempo la ecuación (3.4) se reduce a

$$3 \geq C_k \geq 3 \quad (3.6)$$

Por lo tanto la conectividad de cada miembro debe ser igual a 3, esto es, cada miembro debe tener 3 grados de libertad en sus juntas. Asumiendo que cada miembro consista de 2 eslabones y 3 juntas, cada junta, debe ser una junta de 1 grado de libertad. Usando juntas de revolución (R) y prismáticas (P) como los pares cinemáticos, obtenemos siete posibles configuraciones de miembros: *RRR*, *RRP*, *RPR*, *PRR*, *RPP*, *PRP*, y *PPR*. Además, si no limitamos a manipuladores con 3 miembros de estructuras idénticas, solo 7 manipuladores paralelos de 3 grados de libertad serán posibles.

La figura 22 muestra un manipulador paralelo plano de 3 grados de libertad usando la estructura *3RRR* [7].

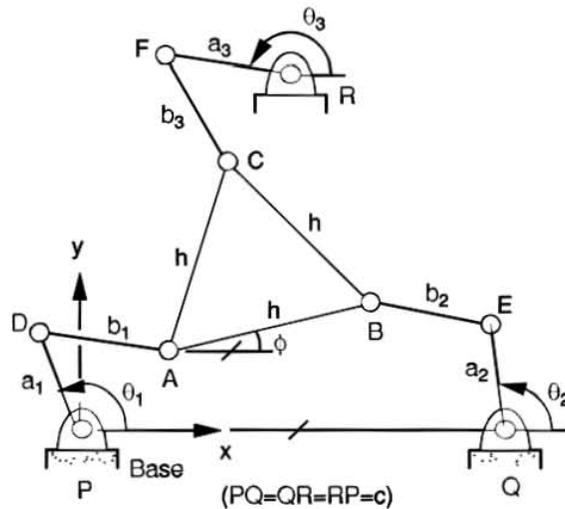


Fig. 22 Robot paralelo plano de 3 grados de libertad con estructura *3RRR*

La figura 23 muestra un manipulador paralelo plano usando la estructura *3PRP*, donde tres juntas de revolución son perpendiculares al plano de movimiento mientras la junta prismática está sobre el plano de movimiento [8].

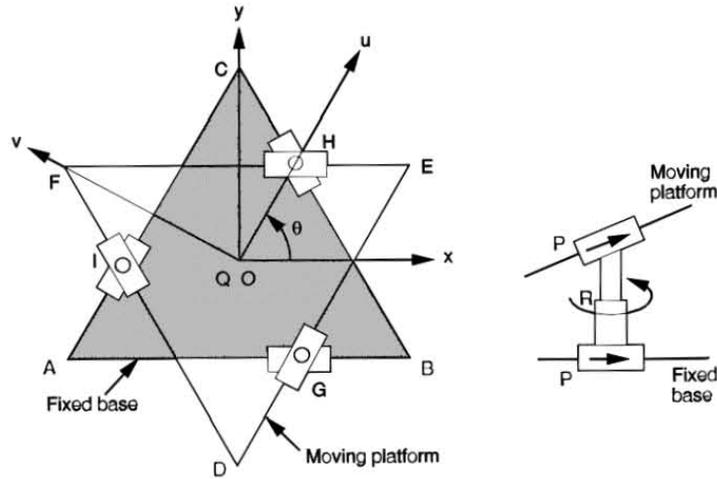


Fig. 23 Manipulador paralelo plano de 3 grados de libertad con estructura 3PRP

## 2.4 Manipuladores paralelos esféricos

El parámetro de movimiento para mecanismos esféricos es también igual a 3. Por lo tanto el requerimiento de conectividad para los manipuladores paralelos esféricos es idéntico al de los manipuladores paralelos planos. Para manipuladores de unión esférica, la única junta aceptable es la junta de revolución, y todos los ejes de las juntas deben intersectarse en un punto común, llamado el *centro esférico*. Por lo tanto la única estructura posible es la *RRR*. El manipulador que se muestra en la figura 24 es un manipulador paralelo esférico de 3 grados de libertad. Observamos que una junta esférica puede ser instalada en el centro de un manipulador paralelo esférico.

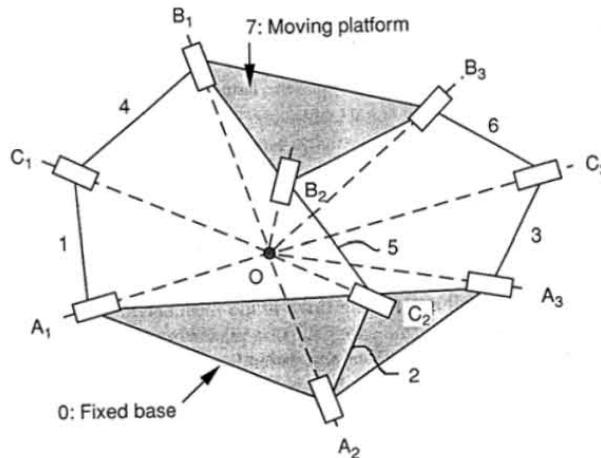


Fig. 24 Manipulador esférico con estructura 3RRR

Sin embargo, dicha junta esférica puede ser usada únicamente como una junta pasiva, puesto que esta no puede ser accionada por existir actuadores. Por lo tanto, si una junta esférica es usada, serán necesarios tres miembros adicionales para el accionamiento paralelo de la plataforma móvil. En este caso, el número de miembros, incluyendo el miembro con una junta esférica de longitud cero, no es mayor o igual al número de grados de libertad [9], [10], [11], [12].

## 2.5 Manipuladores paralelos espaciales

Substituyendo  $\lambda = 6$  en las ecuaciones (3.3) y (3.4) para mecanismos espaciales, obtenemos

$$\sum_k^m C_k = 7F - 6 \quad (3.7)$$

$$6 \geq C_k \geq F \quad (3.8)$$

Resolviendo las ecuaciones (3.7) y (3.8) simultáneamente para enteros positivos de  $C_k, k = 1, 2, 3, \dots$ , podemos clasificar a los manipuladores paralelos espaciales de acuerdo a sus grados de libertad y conectividad enlistadas en la tabla 1 [13].

El número de eslabones incorporados a cada miembro puede ser tan grande como la suma de los grados de libertad de las juntas e igual al requerimiento de conectividad. El máximo número de eslabones ocurre cuando todas las juntas tienen un solo grado de libertad. En la práctica, esto es deseable para emplear justo dos eslabones principales conectando la plataforma móvil a la base por tres juntas.

Grados de libertad F	Número de cadenas L	Suma de los grados de libertad de las juntas $\sum_i f_i$	Lista de conectividad $C_k, k = 1, 2, 3, \dots$
2	1	8	4,4 5,3 6,2
3	2	15	5,5,5 6,5,4 6,6,3
4	3	22	6,6,5,5 6,6,6,4
5	4	29	6,6,6,6,5
6	5	36	6,6,6,6,6,6

Tabla 1. Clasificación de los manipuladores paralelos espaciales

Las figuras que a continuación se muestran, ilustran algunas configuraciones de miembros. La figura 25a es un miembro de 4 grados de libertad, las figuras 25b, 25c, 25d, 25e, son miembros de 5 grados de libertad, y las figuras 25f, 25g, 25h son miembros de 6 grados de libertad. Observemos que los miembros 25c, 25f, y 25h, contienen 1 grado pasivo de libertad, mientras que el mostrado en 25g contiene 2 grados pasivos de libertad.

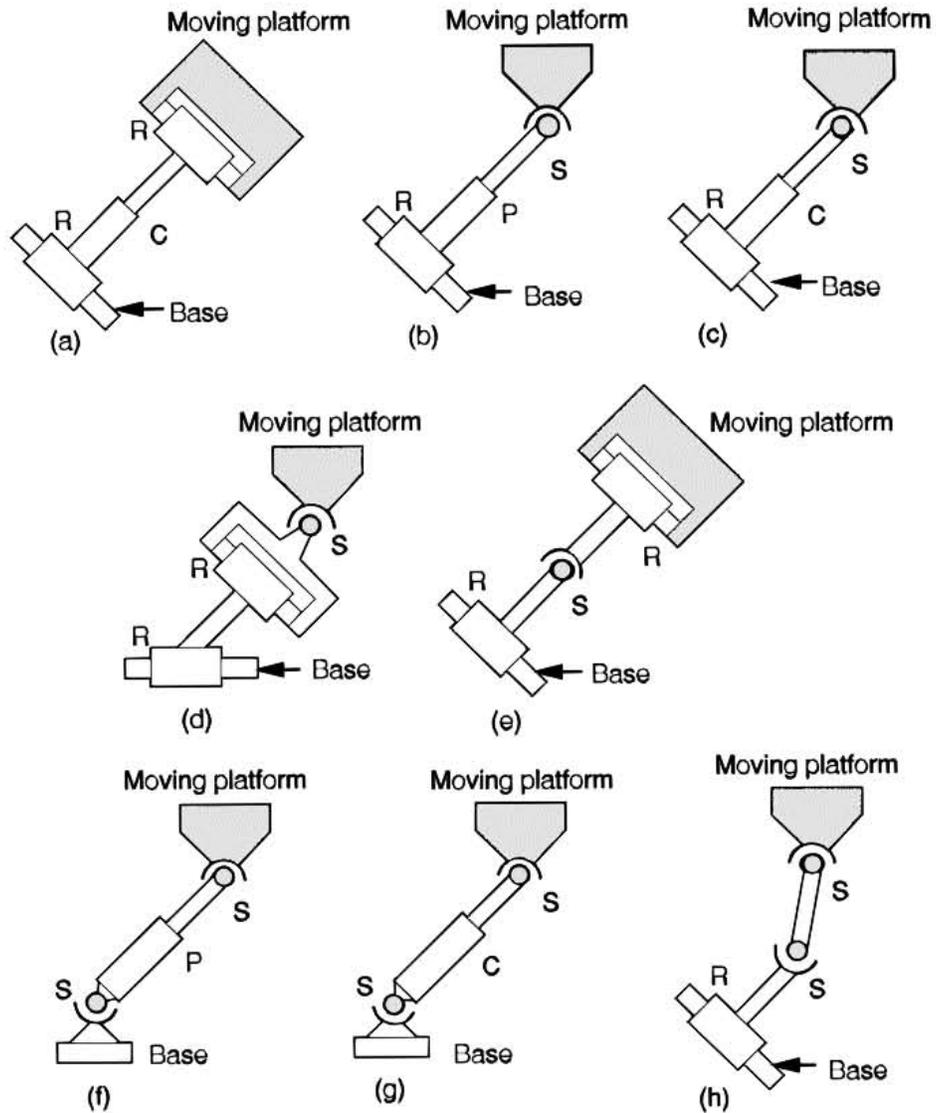


Fig.25 Ocho posibles configuraciones de miembros.

## 2.6 Descripción de arquitecturas de robots paralelos de seis grados de libertad

La arquitectura que se muestra en la figura 26 es la comúnmente llamada plataforma de Stewart [6], [14]. Esta arquitectura es la más prevaleciente debido a su extenso uso como base de simuladores de vuelo [15]. Esta consiste de una plataforma móvil conectada a una base fija por seis piernas. Cada una de las piernas consiste en: 1.-una junta de Hooke no actuada fija, 2.-una junta prismática actuada, y 3.-una junta esférica no actuada, todo lo anterior conectado a 4.-una plataforma móvil. La geometría de la arquitectura de esta plataforma esta descrita completamente en el trabajo de Grant sobre características de movimiento en un simulador de vuelo [16], y será nombrada como plataforma de Stewart (SP).

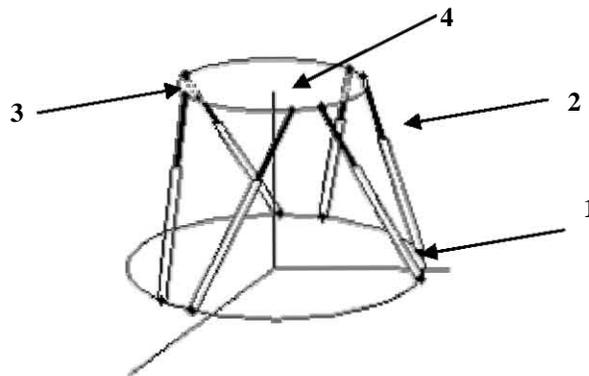


Fig. 26 La llamada plataforma de Stewart (SP)  
1.- Junta de Hooke, 2.- Junta prismática, 3.- Junta esférica, 4.- Plataforma móvil

La segunda arquitectura representada en la figura 27, es similar a la anterior con excepción que la localización de los puntos de conexión en la base y en la plataforma móvil no está dentro de un plano y tampoco son simétricos. Nos referiremos a ella como plataforma de Stewart modificada (MSP).

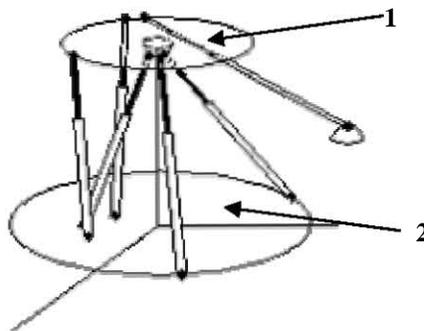
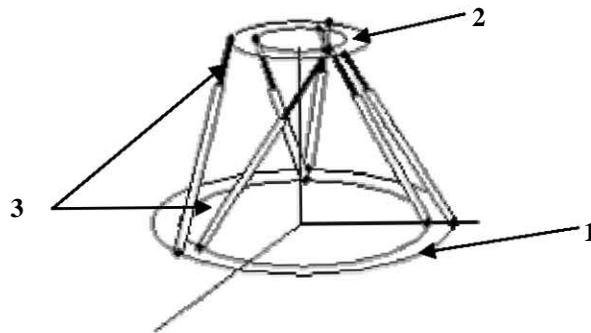


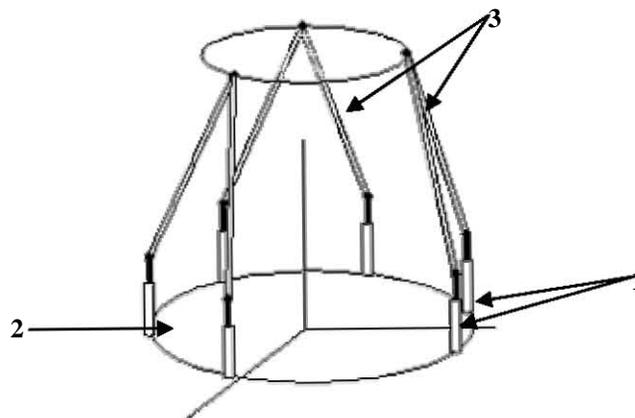
Fig. 27 La plataforma de Stewart modificada (MSP)  
1.- Plataforma móvil, 2.- Base

Se representa esquemáticamente en la figura 28 la tercera arquitectura, fue originalmente propuesta en el trabajo de Stoughton sobre una plataforma de Stewart modificada con mayor destreza [17]. Este diseño fue motivado por el deseo de mejorar la rigidez en la plataforma tradicional de Stewart. Con este fin se diseñó un nuevo arreglo para los puntos de conexión en la base y en la plataforma móvil, dando, como resultado un mecanismo de piernas cruzadas (CL).



**Fig. 28 El mecanismo con piernas cruzadas (CL).**  
1.- Base, 2.- Plataforma móvil, 3.- Piernas cruzadas

Otra de las arquitecturas que se conocen, difiere de las tres primeras en que los actuadores prismáticos están fijados a la base. Ciertamente, las seis cadenas cinemáticas conectando la base con la plataforma móvil son del tipo PHS o HPS donde H, P y S denotan uniones de Hooke, Prismáticas y Esféricas. Esta arquitectura está representada en la figura 29, su geometría está completamente descrita en el trabajo de Merlet donde proponen una nueva arquitectura para un manipulador paralelo de seis grados de libertad [18]. Este mecanismo es conocido con el nombre mecanismo con actuadores fijos (FA).



**Fig. 29 El mecanismo con actuadores prismáticos fijos.**  
1.- Actuadores prismáticos, 2.- Base, 3.- Cadenas cinemáticas

Para cada una de las arquitecturas definidas anteriormente, tenemos un marco de referencia fijo  $R$  de coordenadas  $Oxyz$  que está definido en la base del mecanismo y un marco móvil  $R'$  de coordenadas  $O'x'y'z'$  conectado a la plataforma móvil, como se muestra en la figura 30. El centro de la junta de Hooke que conecta la  $i$ -enésima pierna a la base está indicado como  $A_i$ ; el centro de la junta esférica que conecta la  $i$ -enésima pierna a la plataforma móvil está indicado como  $B_i$ . Los ejes Cartesianos de la plataforma móvil están dados por la posición  $O'$  y la orientación del marco por  $R'$ . La matriz  $Q$  está definida como la matriz de rotación que representa la orientación del marco  $R'$  conectada a la plataforma móvil con respecto al marco fijo  $R$ . El vector  $[r] R = [xr, yr, zr]^T$  está definido como la posición del punto  $O'$  con respecto a  $O$ , en el origen del marco  $R$ . La orientación de la plataforma móvil se representa usando los ángulos de Euler  $(\phi, \theta, \varphi)$  es decir:

$$Q = \begin{bmatrix} c\varphi c\phi - s\varphi c\theta s\phi & -s\varphi c\theta c\phi & s\varphi s\theta \\ s\varphi c\phi + c\varphi c\theta s\phi & c\varphi c\theta c\phi & -c\varphi s\theta \\ s\theta s\phi & s\theta c\phi & c\theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

Donde  $c\varphi, c\phi, c\theta, s\varphi, s\phi, s\theta$  representan las funciones  $\cos\varphi, \cos\phi, \cos\theta, \sin\varphi, \sin\phi, \sin\theta$ , con sus respectivos argumentos. Las uniones están definidas por  $P_i$  para  $i=1, \dots, 6$  que corresponde a la extensión de las juntas prismáticas ver figura 30 [19].

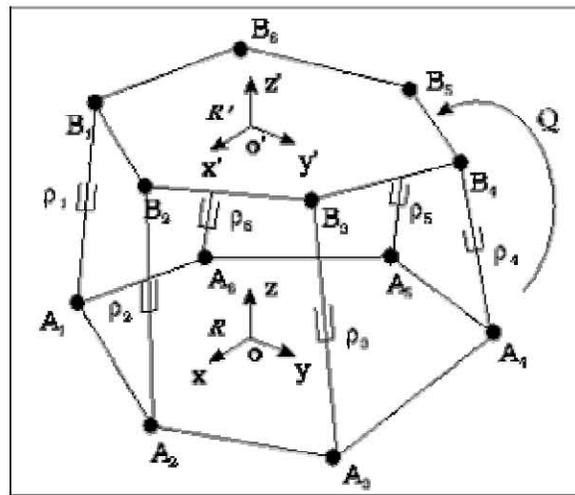


Fig. 30 Referencia de los marcos y notación

# Capítulo 3

## Diseño del micromanipulador

En este capítulo se dará una breve revisión de los conceptos de microingeniería, micromáquina, micromaquinado, microensamble, micromanipulador paralelo y se presenta el diseño mecánico del micromanipulador.

### 3.1 Micromáquinas

La palabra micromáquina aparece por primera vez en 1988. La palabra no está aún definida estrictamente. En general significa “máquina con pequeñas piezas de tamaño micrométrico”, a los ingenieros electrónicos y mecánicos no les gusta la palabra y usan expresiones tales como: sistemas micro electro mecánicos, sistemas micro mecánicos y micromaquinado [42].

No tenemos aún máquinas con partes mecánicas convencionales de tamaño menor a 1 mm. Al desarrollar un prototipo de máquina con partes mecánicas comercialmente disponibles, vamos a la tienda de partes mecánicas o electrónicas para encontrar los elementos requeridos. Algunos tipos de tornillos y tuercas, no pueden ser miniaturizados a dimensiones menores de 1mm, y por supuesto no podemos fabricar máquinas más pequeñas al del tamaño de sus partes.

Recientemente algunas máquinas electrónicas y relojes pueden contener muchas partes de tamaño submilimétrico, pero estas partes no pueden ser compradas por nosotros. Muchas de las partes son hechas especialmente para una máquina en particular en la misma fábrica. Podemos pensar que hay pequeñas máquinas de menos de 1 mm, pero tales máquinas son producto de la manufactura artesanal.

No hay forma de producir complicadas máquinas tridimensionales de micropartes; esta es una de las mayores dificultades permanentes en la forma de manufacturar micromáquinas.

Para construir una micromáquina debemos desarrollar algunas herramientas para el ensamble.

Si definimos una micromáquina como máquina capaz de ensamblar partes de tamaño micrométrico, encontramos difícil de visualizar dicha máquina.

Se diseña una micromáquina con la meta de producir algún producto industrial aplicable en el futuro cercano. Los productos finales serán engranes, motores, turbinas, etc. de tamaño aproximado a 10  $\mu\text{m}$  [42].

El desarrollo de sistemas micromecánicos más elaborados como MicroMachine Tools (MMT), micromanipuladores y microrobots requieren de estructuras mecánicas con las siguientes características [35]:

- Tres dimensiones reales
- Formas complejas
- Posibilidades de ensamble y movimiento
- Uso de diferentes materiales

A continuación mencionamos otras definiciones de micromáquinas:

Una micromáquina es un sistema extremadamente pequeño (de escasos milímetros o menor), con elementos altamente sofisticados y funcionales que le permiten realizar tareas complicadas y delicadas [36].

Cualquier dispositivo producido mediante el ensamble de piezas funcionales extremadamente pequeñas en un rango de tamaño de 15mm o menor, es llamado micromáquina [32].

En 1999 el *laboratorio de ingeniería mecánica del centro de instrumentos, UNAM*, partiendo de estas definiciones y sus líneas de trabajo, define a la micromáquina herramienta de la siguiente forma: Las micromáquinas deben su nombre no solo a su tamaño sino al tamaño de sus componentes y ampliando la definición, al tamaño de las piezas fabricadas con estas [32].

En la figura 31 se muestra la diferencia entre minimáquinas, micromáquinas y nanomáquinas.

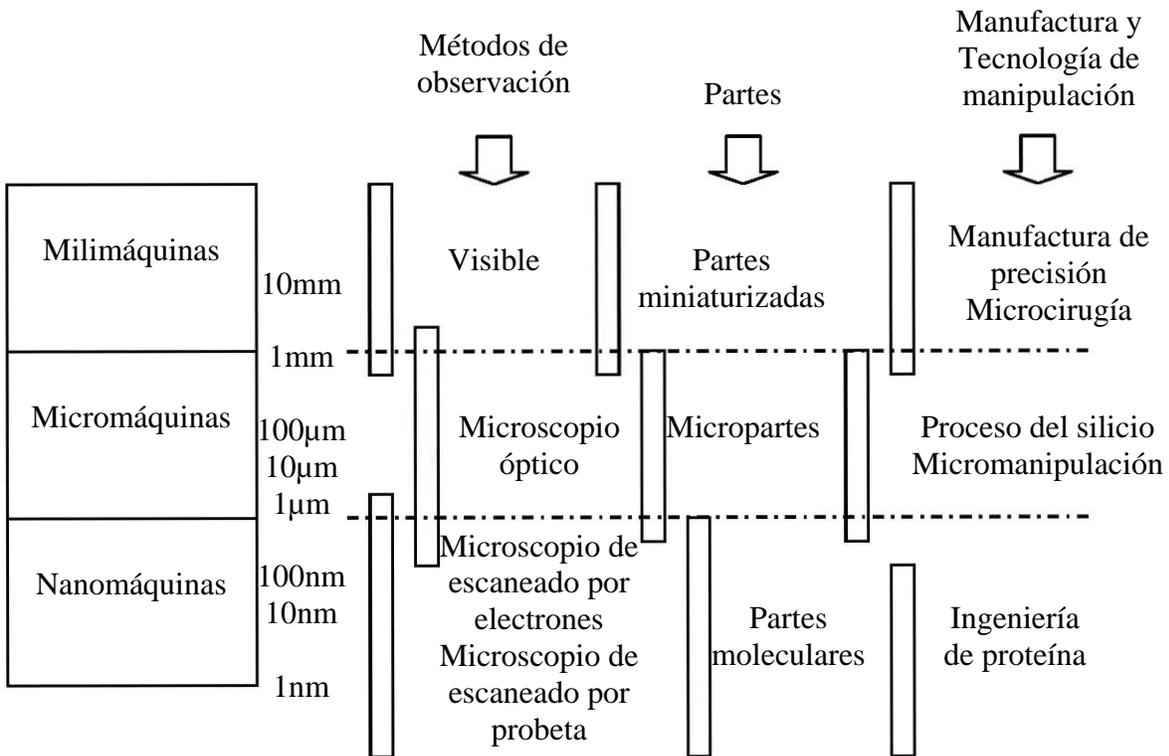


Fig. 31 Dispositivos mili, micro y nanométricos

## 3.2 Microingeniería

La microingeniería se refiere a la tecnología y práctica de fabricar estructuras tridimensionales y dispositivos con dimensiones del orden de micrómetros.

Algunas de las tecnologías de construcción de la microingeniería son la microelectrónica, el micromaquinado y el microensamble.

La microelectrónica produce circuitos electrónicos en chips de silicio, y es una tecnología muy bien desarrollada.

Uno de los principales éxitos de la microingeniería es la capacidad de integrar circuitos en estructuras micromaquinadas, para producir sistemas completamente integrados (microsistemas). Estos sistemas tienen la ventaja de tener un bajo costo, fiabilidad y tamaño pequeño; como los chips de silicio que se producen en la industria de la microelectrónica.

Al considerar dispositivos de pequeño tamaño, algunos efectos físicos tienen un significado diferente a escala micrométrica respecto a la escala macroscópica. El interés en la microingeniería ha producido un nuevo interés en diversas áreas que tratan con el estudio de estos efectos a escala microscópica. Esto incluye áreas como la micromecánica, la cual analiza las partes móviles de los dispositivos microconstruidos [38].

## 3.3 Microensamble

Como lo mencionamos anteriormente necesitamos ensamblar partes mecánicas para las micromáquinas.

El microensamble trata con objetos de escala micrométrica y milimétrica donde los requerimientos de tolerancia están en el rango de los micrones [5].

Las aplicaciones típicas incluyen componentes electrónicos (circuitos fabricados con silicio), componentes optoelectrónicos (foto detectores, emisores, amplificadores, fibra óptica, microlentes, etc.) y MEMS (Sistemas Micro Electro Mecánicos).

El proceso de ensamble generalmente requiere no solo alta precisión, sino también alta producción a un bajo costo de manufactura.

Los métodos de ensamble convencionales a macroescala han sido utilizados en escalas menores para aplicaciones de microensamble, estas presentan limitaciones en la producción y costo, debido al inherente proceso en serie.

El proceso de ensamble depende principalmente del desempeño de manipulación. Un método eficiente de manipulación para partes pequeñas tendrá un impacto significativo en la manufactura de productos miniaturizados.

El método más común de manipulación es “Pick & Place” (tomar y colocar) usando un robot. Otros métodos de manipulación tales como “Pushing” (empujando) y “Tapping” (roscando) han sido introducidos también.

Como el objeto manipulado llega a ser pequeño y más pequeño, estos métodos muestran algunas limitaciones, incluso siendo difícil para tomar o hacer contacto en la posición correcta.

En los últimos años la demanda de productos de ultra precisión se ha incrementado rápidamente. La revolución en la tecnología de los MEMS MicroElectroMechanical Systems y en las tecnologías de comunicación ha derivado en una gran variedad de objetos pequeños que tienen que ser ensamblados y/o pegados con nanoprecisión. En los sistemas de manejo y ensamble se deben cumplir un conjunto de tareas como [36]:

- 1 Resolución de los posicionadores mejor a  $1\mu\text{m}$
- 2 Ajuste en la orientación de micropartes mejor a  $20\mu\text{m}$
- 3 Varios grados de libertad en volúmenes pequeños
- 4 Sistemas con módulos compatibles
- 5 Pasar de la aproximación burda al microensamble
- 6 Protección de micropartes y grippers (limitación de fuerzas)
- 7 Transporte sin gravedad
- 8 Sensores integrados
- 9 Control de calidad con adecuada resolución
- 10 Tecnología de micro unión adhesiva

1.-Resolución: La línea de ensamble para producción de teléfonos móviles tiene un movimiento típico con una resolución de  $20\mu\text{m}$ . Las líneas de ensamble especiales son ofrecidas con una resolución garantizada de  $10\mu\text{m}$ . Estos sistemas pueden ser ajustados a una capacidad de resolución de cerca de  $5\mu\text{m}$  usando platos de granito a temperaturas constantes. Por el momento la demanda para el ensamble de fibras de vidrio es de  $3\mu\text{m}$  de resolución, un valor que puede ser alcanzable. Las siguientes generaciones necesitarán  $1\mu\text{m}$  y un sistema futuro permitirá tener una capacidad de resolución menor a  $1\mu\text{m}$ . Hoy la expansión térmica en el diseño de robots y actuadores evita un posicionamiento preciso.

2.- Orientación de micropartes: Una buena capacidad de resolución es solo el primer paso. En el momento en que la microparte será fijada, frecuentemente es necesario ajustar su orientación con una resolución menor a  $1\mu\text{m}$ . Algunas veces las fibras ópticas tienen que ser alineadas con una precisión mayor a  $10\mu\text{m}$ .

3.- Varios grados de libertad en volúmenes pequeños: Cuando el tamaño de un sistema de posicionamiento es grande, un factor de 16% de ruido acústico será adicionado a este. Un tamaño pequeño es esencial para lograr una buena resolución sin sistemas caros de amortiguamiento. Para muchas tareas de ensamble y manipulación es necesario, que un conjunto de diferentes sensores y actuadores puedan moverse a un punto preciso. Si estos elementos cuentan con varios grados de libertad así como con un volumen pequeño, podrán moverse a estos puntos precisos con gran facilidad.

4.- Sistemas con módulos compatibles: Para las líneas de ensamble, el fácil intercambio de posicionadores compatibles es muy necesario para reducir tiempo. La flexibilidad también es necesaria, a la hora que nuevos productos MEMS son desarrollados. Durante el desarrollo de estos, la etapa de ensamble puede variar en número de actuadores y grados de libertad. Posicionadores, minigrippers, dispensadores de adhesivo o por ejemplo indentadores, deberán ser atornillados o fijados unos dentro de otros en pocos minutos, además de ser controlados con la misma red y software compatible.

5.- Pasar de la aproximación burda al nanoensamble: Una fibra de vidrio es un objeto típico que ha sido ensamblado con una resolución de submicrones, pero esta fibra viene desde un gran tambor de cable, el robot que suministra la fibra de vidrio, por sus movimientos burdos, no podrá poner la fibra de vidrio en la posición cero del microgripper. Los sistemas de reconocimiento de imágenes o patrones pueden ayudar, pero suelen ser muy caros. Si los grippers cuentan con tecnología de nanomotores, se puede resolver el problema de una manipulación burda a una buena precisión. La estructura del gripper puede tomar una fibra siempre y cuando esta esté fuera del centro de las dos mordazas del gripper. Ambas mordazas cierran hasta que una de ellas es detenida por la fibra; entonces la segunda mordaza sigue su movimiento hasta que el gripper cierra por completo, siendo la fibra tomada de esta manera.

6.- Protección de micropartes y grippers: La combinación de etapas de microensamble con tecnología de CNC clásica tiene diversos riesgos para ambas partes. Es posible fijar un microgripper en un robot CNC, ¿pero que pasaría si este robot lleva al microgripper unos pocos mm dentro de la mesa? Esto pasa en la práctica, por ejemplo en la etapa de puesta a punto. Las etapas de microensamble, hechas con módulos de nanorobótica están intrínsecamente protegidas contra choques. Cada eje posee una fuerza limitada y el microgripper es diseñado para ser compatible con este límite de fuerza.

7.- Transporte sin gravedad: Cuando el tamaño de las micropartes es más pequeño que el borde de las mordazas del microgripper, otro método de transporte deberá ser utilizado. La influencia de la gravedad en los objetos que serán manipulados puede ser más débil que otras fuerzas, por lo tanto, estas fuerzas pueden ser explotadas para su transporte.

8.- Sensores integrados: Sensores adicionales pueden ayudar durante el ensamble. Adicionalmente a los sistemas de visión, los sensores de fuerza son muy importantes. Un sensor de fuerza entre el gripper y el objeto manipulado, permite medir aplicar o medir fuerzas en un rango de mN. Valores como fuerzas de fricción, rigidez adhesiva, límites de rotura o constantes elásticas de micropartes, pueden ser determinados.

9.- Control de calidad adecuado: Los instrumentos para medir la precisión de las micropartes y los alineamientos de estas deberán tener resoluciones de nanómetros. Algunos instrumentos de control de calidad enfrentan un problema adicional: una impresión para medir la dureza de una muestra deberá ser mucho más pequeña que la microparte que será analizada. Cuando dicha impresión es hecha en la superficie de la muestra y esta es transferida al instrumento de análisis que medirá la profundidad de la impresión, ¿dónde está?. Si el microensamble y el control de calidad son hechos en un sistema de posicionamiento absoluto, muchos problemas serán resueltos a la vez.

10.- Tecnología de micro unión adhesiva: En muchos casos la unión adhesiva es la única tecnología posible en el micro mundo. Esto es debido al pequeño tamaño de las partes que son unidas y a la gran variedad de materiales muy especializados. La tecnología adhesiva tiene requerimientos específicos para cada uno de esos materiales. Afortunadamente la tecnología adhesiva puede ofrecer un para de ventajas:

- Unión de varios materiales disímiles
- Bajo calor (unión fría)
- Distribución de tensión
- Aislamiento Galvanico de las partes (no hay corrosión por contacto)
- Libertad para diseñar
- Innovación en soluciones técnicas

Se pretende que el modelo preeliminar de un micromanipulador como el que se esta diseñando y construyendo en el Laboratorio de Micromecánica y Mecatrónica del CCADET y del que se hará una descripción de sus partes mecánicas, realizará este tipo de tareas con las características arriba mencionadas.

### **3.4 Micromaquinado**

El micromaquinado es el nombre de las técnicas usadas para producir las estructuras y partes móviles de los dispositivos microconstruidos [38].

El término Micromaquinado es generalmente usado para definir la práctica de remoción de material para la producción de partes teniendo dimensiones que están entre 1 y 999  $\mu\text{m}$ , aunque un límite superior de 500  $\mu\text{m}$  ha sido recientemente considerado para estar en la frontera entre micro y macro maquinado [39].

Los años 90 fueron testigos de nuevas tendencias con un incremento en la demanda de componentes de dimensiones del orden de micrómetros. Mucho de este interés ha sido por parte de las industrias de la microelectrónica y la óptica, en la cual los componentes tienen que ser producidos a escalas más pequeñas cada vez y con precisiones más altas [40].

Los requerimientos para productos de microingeniería son también usados para otras aplicaciones. Por ejemplo un pequeño rodamiento en un reloj sostiene una pequeña flecha de un micro engrane, y el tamaño del hueco del rodamiento debe ser más pequeño que el tamaño de la micro flecha.

Taniguchi [3], Mc Keown [4] y colaboradores han considerado fabricar equipo para lograr estas formas tan finas, con una alta precisión.

Ellos clasifican el maquinado en tres divisiones:

- Normal
- Precisión
- Ultra precisión

El termino “Micromaquinado” es asociado con las cualidades de precisión y Ultra precisión.

En los años 90 Masuzawa [5] puso atención a la necesidad de caracterizar el micromaquinado, y en particular a los medios para determinar directamente la forma de estos productos. El define algunos grupos básicos de procesos de maquinado. El primero usa herramientas fijas y controladas, las cuales pueden crear los perfiles tridimensionales, por medio de una herramienta bien definida. Estos métodos remueven materia en cantidades de décimas de nm, lo cual es aceptable para muchas aplicaciones de micromaquinado. Para una precisión más alta y especialmente a nivel de átomos, el segundo grupo de procesos de micromaquinado emplea procesos basados en mascarar para dar forma al producto. Formas bidimensionales son el principal producto en este proceso. Cuando se intenta con productos tridimensionales existen grandes limitaciones.

Hasta ahora los principales materiales considerados en el micromaquinado han sido metales y silicio, para respectivamente ser procesados por herramientas y por procesos basados en mascarar.

Los requerimientos de la industria para el micromaquinado siguen creciendo y otras substancias tales como cerámicas, plásticos, vidrios y materiales biológicos están siendo analizadas.

Algunas técnicas de Micromaquinado son:

- Micromaquinado por abrasión
- Micropulido
- Micromaquinado con diamante
- Micromaquinado ultrasónico
- Micromaquinado por microdescarga
- Micromaquinado por láser
- Micromaquinado por disolución electroquímica
- Maquinado por rayo de iones
- Maquinado por rayo de electrones
- Litografía de alta resolución

Micromaquinado por técnicas de acabado:

- Microlapeado
- Microafilado
- Súper acabado
- Súper pulido
- Pulido mecánico asistido químicamente (CMP)
- ELID-grinding (Electrolytic in Process Dressing) (Electrolítico en el proceso de acabado)

Existe una técnica teórica llamada Simulación dinámica molecular la cual ofrece una oportunidad para tratamientos teóricos, los cuales pueden dar nueva luz en técnicas de Micromaquinado.

Un ejemplo de partes mecánicas micromaquinadas son actuadores micromaquinados que pueden ser encontrados en las cabezas de impresoras de inyección de tinta. En esta aplicación un volumen preciso de tinta es transportado a una pieza de papel. Otro ejemplo de actuadores micromaquinados es una micro-bomba, la cual es parte de un dispositivo implantable que es usado para entregar volúmenes precisos de drogas a un paciente. Otro ejemplo de actuador micromaquinado es el chip DMD, que fue desarrollado por Texas Instruments; en este chip miles de micro-espejos modulan un rayo de luz para formar una pantalla de proyección a color [41].

En la siguiente tabla podemos ver algunas de las técnicas de micromaquinado y sus métodos para su medición. Ver tabla 2.

Tabla 2. Técnicas de micromaqueinado y medición

Tamaño límite de fabricación	Máquinas herramienta convencional	Fabricación por rayo de energía	Grabado y deposición de vapor	Pruebas moleculares	Técnicas de medición
> 10 $\mu\text{m}$	Máquinas herramienta convencionales Máquinas de esmerilado por vibración	Fresadoras por descarga eléctrica	Moldura de película resistente Grabado convencional y húmedo		Comparadores mecánicos y neumáticos Microscopios ópticos
10 $\mu\text{m}$ - 1 $\mu\text{m}$	Máquinas de pulido fino Máquinas de taladrado fino	Fresadoras por descarga eléctrica Grabado asistido por láser	Revestido por giro LPCVD, RIE, dado, ligadura		Comparadores mecánicos finos Comparadores ópticos y eléctricos Resonancia de electrones
1 $\mu\text{m}$ - 100 nm	Fresadora y pulidora ultrafina Prensas de forja ultrafina Microforja		Revestido por giro LPCVD, RIE, Mascara		Comparador electromagnético y electroestático Interferómetro óptico
100nm-10nm	Máquinas para pulido de lentes		Exposición por rayo de electrones		Interferómetro láser Microscopio fluorescente
10 nm - 1 nm			Proceso LIGA Inyección de iones	Fabricación por rayo de iones	Microscopio láser Microanalizador de rayos x
1nm - 0.1nm				Sistema de procesamiento de proteína Sistema de fabricación de membrana LB	Microscopio de escaneo por electrones Difracción de rayos x y electrones

### 3.5 Micromanipulador paralelo

Retomando las definiciones del Laboratorio de Micromecánica y Mecatrónica, podemos definir que un micromanipulador paralelo consiste en una estructura cerrada con múltiples cadenas cinemáticas cerradas, las cuales son controladas por varias juntas prismáticas o piernas actuando en paralelo y que debe su nombre no solo a su tamaño, sino al tamaño de los componentes que manipula y procesos de microensamble [35].

El presente trabajo tiene como objetivo presentar un diseño mecánico innovador paralelo, enfocado a realizar tareas de micromecánica en particular microensamble y micromaquinado de alta precisión.

### 3.6 Diseño conceptual y preliminar del manipulador paralelo

La idea de este diseño se muestra en la figura 32 en un plano; el esqueleto del diseño está conformado por barras que se conectan entre si por medio de uniones esféricas,  $l_3$  es un tornillo de avance que se conecta con  $l_2$  por una unión de cardan, análogamente  $l'_3$  es un tornillo de avance que se conecta con  $l'_2$  a través de un cardan, a este conjunto de barras y tornillos ( $l_3, l_2, l_4, l'_3, l'_2, l'_4$ ) los denominaremos brazos, los cuales conectan la plataforma fija con la plataforma móvil; cada uno de los elementos que forma los brazos esta unido uno a otro de tal forma, que el diseño es un sistema de palancas. Como se aprecia en el diagrama.

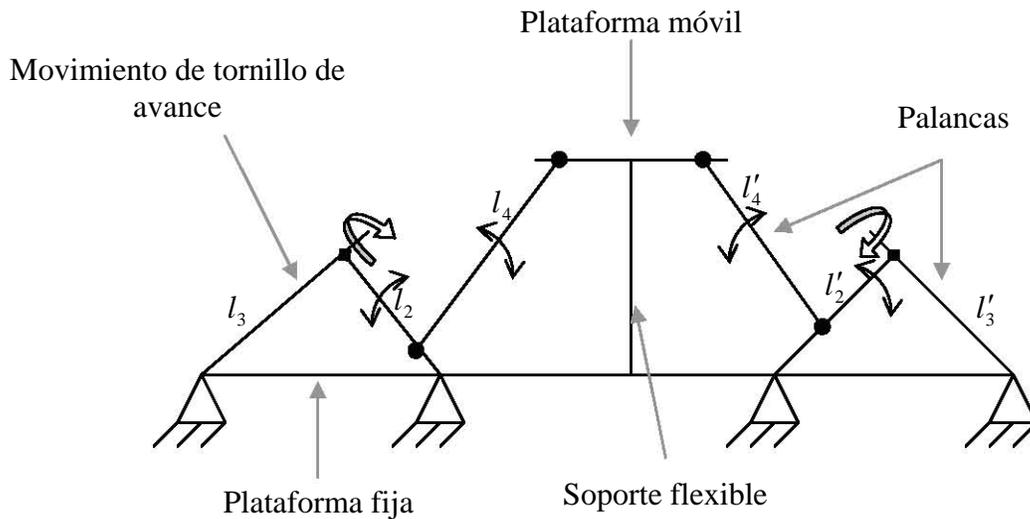


Fig. 32 Diagrama



$$\theta_1 \angle l_3, l_2; \quad \theta_2 \angle l_3, l_1; \quad \theta_3 \angle l_1, l_2; \quad \theta_4 \angle l_4, l_{12} \dots$$

del triángulo  $\Delta OAC$  que se forma del diseño, obtenemos las siguientes relaciones:

$$\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 = \pi ,$$

$$l_3^2 = l_2^2 + l_1^2 - 2l_1l_2 \cos \theta_3 ,$$

(2)

$$\frac{l_1}{\text{sen} \theta_1} = \frac{l_2}{\text{sen} \theta_2} ,$$

$$\frac{l_1}{\text{sen} \theta_1} = \frac{l_3}{\text{sen} \theta_3} .$$

Con ayuda de (1) y (2) obtenemos:

$$l_1 = l_3 \cos \theta_2 + l_2 \cos \theta_3 ,$$

$$l_{12} = l_{10} - l_5 \cos \theta_3 ,$$

$$l_{11} = l'_{10} - l_1 + l_5 \cos \theta_3 ,$$

$$x = l_4 \text{sen} \theta_4 + l_1 - l_5 \cos \theta_3 , \quad (3)$$

$$y = l_4 \cos \theta_4 + l_5 \text{sen} \theta_3$$

$l_3$  es la distancia de  $\overline{OA}$  que se conoce como dato inicial entonces:

$$\cos \theta_3 = \frac{-l_3^2 + l_2^2 + l_1^2}{2l_1 l_2},$$

(4)

$$\theta_3 = \arccos \frac{-l_3^2 + l_2^2 + l_1^2}{2l_1 l_2},$$

y

$$\text{sen} \theta_3 = (1 - \cos^2 \theta_3)^{\frac{1}{2}}.$$

(5)

$$l_{12}^2 + l_{11}^2 = l_4^2,$$

$$l_4 \cos \theta_4 = l_{12},$$

(6)

$$\cos \theta_4 = \frac{l_{12}}{l_4},$$

$$\theta_4 = \arccos \frac{l_{12}}{l_4},$$

y

$$\text{sen} \theta_4 = \frac{l_{11}}{l_4}.$$

(7)

Sustituyendo (4), (5) y (6) en (3) tenemos:

$$y = l_5 \cdot \left( 1 - \left( \frac{-l_3^2 + l_2^2 + l_1^2}{2l_1 l_2} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} + l_4 \cdot \frac{l_{12}}{l_4}$$

(8)

observamos que en (8), para la coordenada  $y$ , tenemos valores conocidos y que dependemos únicamente de una variable, en este caso  $l_3$ .

Para la proyección en la coordenada  $x$ , sustituimos (4), (6) y (7) en (3) tenemos:

$$x = l_4 \cdot \left( \frac{l_{11}}{l_4} \right) + \left( l_1 - l_5 \cdot \left( -\frac{l_3^2 + l_2^2 + l_1^2}{2l_1 l_2} \right) \right) \quad (9)$$

el valor de  $l_3$  es la distancia  $\overline{OA}$ , en nuestro caso depende del ángulo con que gira el tornillo y es variable.

$$l_3 = \overline{OA} = S = K\varphi \quad (10)$$

donde  $S$  es el desplazamiento que se genera al girar el tornillo sinfín,  $\varphi$  es el movimiento angular y  $K$  es la constante que reúne las propiedades de nuestro tornillo.

$$k = \frac{S}{\varphi} \quad k = 0.25mm/rad \quad (11)$$

Utilizando la figura 34, en forma general se muestran los posibles movimientos de nuestro sistema mecánico en el plano; si cada triángulo que se genera en  $\overline{OAC}$  ó  $\overline{O'A'C'}$  a través de pequeños desplazamientos originados por la barra  $l_3$  ó  $l'_3$  se obtendrán nuevos ángulos.

$$\theta'_3 = \theta_3 + \Delta\theta_3, \quad (12)$$

$$\theta'_4 = \theta_4 + \Delta\theta_4$$

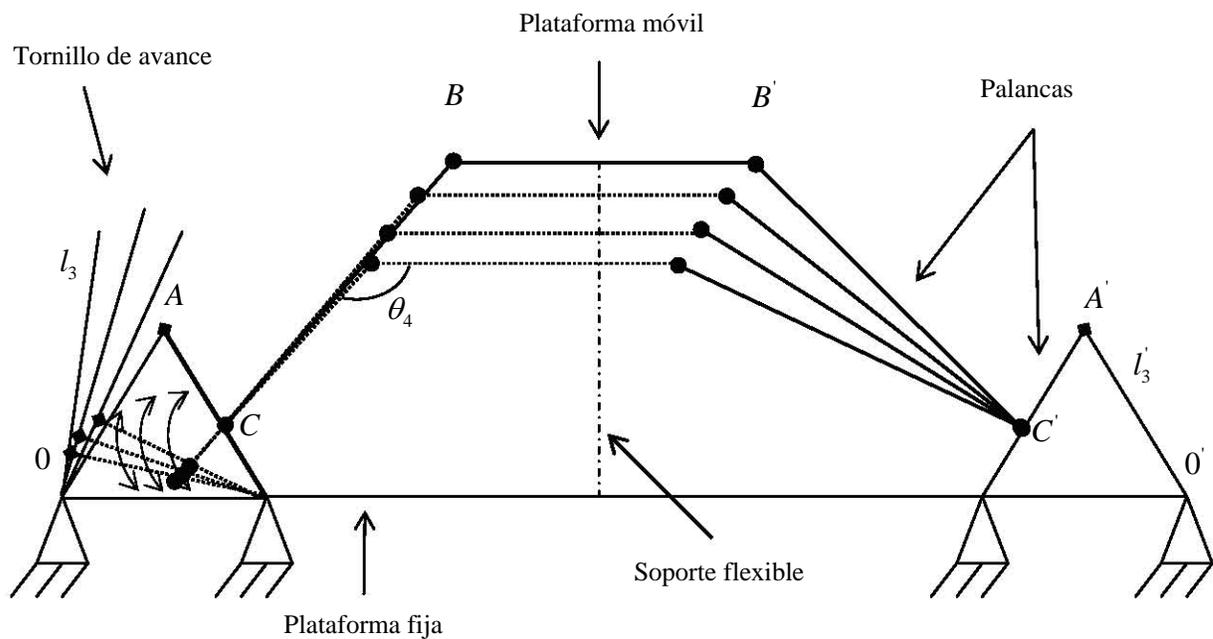


Fig. 34 Movimientos de la plataforma con un lado fijo y otro móvil

considerando que:

$$\Delta\theta_3 \ll 1$$

$$\Delta\theta_4 \ll 1$$

Cuando  $l_3$  varía y los ángulos son  $\ll 1$ , sistema de ecuaciones (8) y (9) tomará la siguiente forma:

$$y = l_3 \cdot (\Delta\theta_3 \cos \theta_3 + [1 - \frac{1}{2} \Delta\theta_3] \text{sen} \theta_3) + l_4 \cdot ([1 - \frac{1}{2} \Delta\theta_4] \cos \theta_4 - \Delta\theta_4 \text{sen} \theta_4)$$

(13)

$$x - (l_1 - l_5) \cdot \left( \left[ 1 - \frac{1}{2} \Delta\theta_3 \right] \cos \theta_3 - \Delta\theta_3 \sin \theta_3 \right) = l_4 \cdot (\Delta\theta_4 \cos \theta_4 + \left[ 1 - \frac{1}{2} \Delta\theta_4 \right] \sin \theta_4)$$

y sustituyendo los valores para  $\sin \theta$  y  $\cos \theta$  tenemos:

$$y = l_5 \cdot \left[ \Delta\theta \left( -\frac{l_3^2 + l_2^2 + l_1^2}{2l_1l_2} \right) + \left( 1 - \frac{1}{2} \Delta\theta_3 \right) \cdot \left( 1 - \left( -\frac{l_3^2 + l_2^2 + l_1^2}{2l_1l_2} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right] +$$

$$+ l_4 \cdot \left[ \left( 1 - \frac{1}{2} \Delta\theta_4 \right) \cdot \left( \frac{l_{12}}{l_4} \right) - \Delta\theta_4 \cdot \left( \frac{l_{11}}{l_4} \right) \right]$$

$$x = \left[ (l_1 - l_5) \cdot \left( 1 - \frac{1}{2} \Delta\theta_3 \right) \cdot \left( -\frac{l_3^2 + l_2^2 + l_1^2}{2l_1l_2} \right) - \Delta\theta_3 \cdot \left( 1 - \left( -\frac{l_3^2 + l_2^2 + l_1^2}{2l_1l_2} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right] +$$

$$+ l_4 \cdot \left[ \left( \Delta\theta_4 \left( \frac{l_{12}}{l_4} \right) \right) + \left( 1 - \frac{1}{2} \Delta\theta_4 \right) \cdot \left( \frac{l_{11}}{l_4} \right) \right]$$

Obtuvimos (x,y) la posición para un brazo, para los otros dos brazos tenemos sus correspondientes puntos (x,y), y con el análisis de paralelismo entre la plataforma móvil y la base podemos obtener con ayuda de un programa en computadora la posición de los puntos M en la plataforma móvil.

Dado que el sistema de ecuaciones muestra que únicamente depende de  $l_3$ , es decir del desplazamiento que se realice a través del tornillo sinfín, por lo cual, hablaremos en la siguiente sección del tornillo sinfín.

### 3.7 Teoría del tornillo sinfín

Podemos mencionar en forma general que los mecanismos de tornillos deben ser considerados como espaciales, puesto que cada uno de los puntos de sus eslabones describe una trayectoria en el espacio.

Se caracterizan por las limitaciones generales que vienen impuestas sobre sus eslabones, que son: imposibilidad de desplazarse a lo largo de dos ejes de coordenadas y de girar alrededor de estos ejes [43].

Según Kozhenikov [43] nos dice que la clasificación de I. I. Artobolevski, y de acuerdo con las anteriores limitaciones, el número de eslabones y de pares cinemáticas de los mecanismos de tornillos deben satisfacer la condición:

$$W = 2n - p$$

Donde

$W$  = número de grados de libertad  
 $n$  = número de eslabones móviles  
 $p$  = número de pares cinemáticas de tornillo

El mecanismo de tornillo más simple posee dos eslabones móviles:  $n = 2$ ,  $p = 3$  para  $W = 1$ . Para conseguir un mecanismo de tornillo más complejo se puede unir al mecanismo más simple un grupo con cero grados de libertad ( $n = 1$ ,  $p = 2$ ).

El tornillo sinfín es usado para transmitir potencia entre dos ejes que no se intersectan entre si y que el ángulo entre los mismos es de  $90^\circ$ . Comparativamente la proporción de altas velocidades pueden ser obtenidas satisfactoriamente en un espacio mínimo, sin embargo se sacrifica eficiencia al compararlo con otros engranes [44].

En cambio, los hilos en el gusano hacen contacto con los dientes del engrane, esta acción resulta en una operación silenciosa, si el diseño y la manufactura son adecuados.

El gran deslizamiento algunas veces provoca problemas de calor por fricción. Bajo condiciones de carga extrema ningún engrane debe causar sobrecalentamiento.

Los tornillos sinfín son usados para reducir velocidades con un incremento en torque. Los ángulos principales de los 2 engranes son descritos por  $\lambda$  (ángulo principal es de  $90^\circ$  menos que el ángulo de hélice). Como las flechas son perpendiculares,  $\lambda_1 + \lambda_2 = 90^\circ$ .

Si el ángulo principal del engrane 1 es suficientemente pequeño, el diente eventualmente lo envolverá completamente dándole la apariencia de tornillo. El miembro de unión o unido es llamado simplemente el “engrane”, algunas veces “rueda” [45].

El ángulo de hélice del engrane, es igual al ángulo principal del tornillo (para flechas de 90°). El tornillo siempre es el conductor en reductores de velocidad, ocasionalmente estas unidades son usadas en reversa para incrementar la velocidad.

El tornillo sinfín se autobloqueo cuando el engrane no puede conducir al tornillo. Esto ocurre cuando la tangente del ángulo principal es menor que el coeficiente de fricción. El uso de esta característica en lugar de un freno, no es recomendada, ya que bajo condiciones de trabajo un engrane no puede auto bloquearse a ángulos menores de 2 grados.

El número mínimo de dientes en el engrane y la proporción de reducción determinan el número de hilos (dientes) para el tornillo. Generalmente de 1 a 10 hilos son usados. En casos especiales un número mayor puede ser requerido.

El tornillo de potencia es un elemento muy importante en este diseño, en varias máquinas son incorporados para transmitir potencia o movimiento de una parte de la máquina a otra, son utilizados comúnmente por sus altas relaciones de transmisión (relación entre la velocidad de entrada y la de salida). Son de bajo costo y la posibilidad de ser autobloqueantes; es decir, que sea imposible mover el eje de entrada a través del eje de salida [29], esto es muy conveniente en este diseño, ya que al bloquear los motores, el mecanismo se quedará en esta posición, también nos ayudara a reducir el “backlash” o juego que se define como la holgura entre dientes engranantes medida sobre la circunferencia del círculo de paso [30]; además por la disposición en el sistema, el tornillo de potencia le dará mayor rigidez.

### 3.7.1 Cinemática del tornillo

Al especificar el paso en mecanismos de tornillo sinfín se acostumbra enunciar el paso axial  $p_x$  del tornillo y el paso circular transversal  $p_t$  (a veces llamado paso circular) del engrane conectado.

Estos pasos son iguales cuando el ángulo entre ejes es de 90°. El diámetro de paso del engrane es el diámetro medido sobre un plano que contiene al eje del gusano, es el mismo para engranes rectos [46]

$$d_G = \frac{N_G p_t}{\pi}$$

Puesto que no hay relación con el número de dientes, el tornillo sinfín puede tener cualquier diámetro de paso; sin embargo, éste debe ser igual al de paso del cortador para formar los dientes del engrane del gusano. Por lo general hay que seleccionar el diámetro de paso del sinfín de modo que quede dentro del intervalo [46]

$$\frac{C^{0.875}}{3} \leq d_w \leq \frac{C^{0.875}}{1.7}$$

donde  $C$  es la distancia entre centros. Estas proporciones dan como resultado la capacidad óptima de potencia del mecanismo.

El avance  $L$  y el ángulo de avance  $\lambda$  del sinfín tienen las siguientes relaciones

$$L = p_x N_w$$

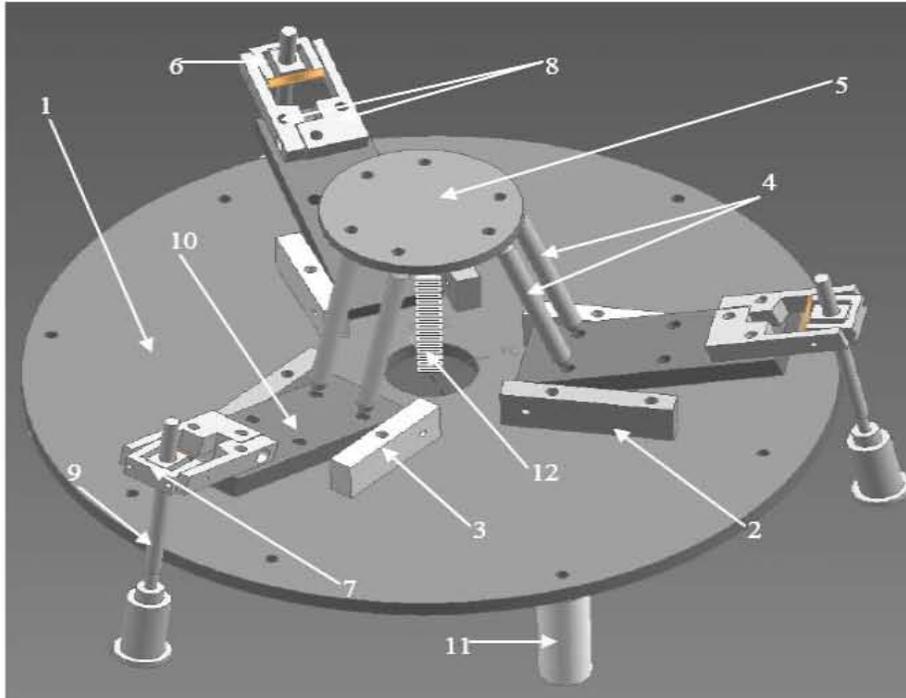
$$\tan \lambda = \frac{L}{\pi d_w}$$

El ancho de cara  $F_G$  de la rueda del sinfín debe ser igual a la longitud de una tangente a la circunferencia de paso del sinfín entre sus puntos de intersección con la circunferencia de adendo.

### 3.8 Diseño

El micromanipulador paralelo es una cadena cinemática cerrada, donde su efector final esta unido a la base por varias cadenas cinemáticas independientes [28].

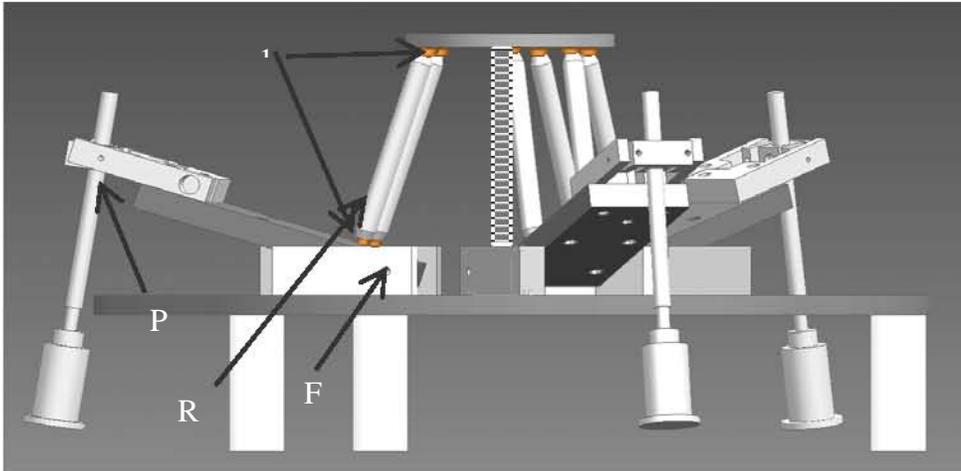
El micromanipulador paralelo consiste de dos plataformas paralelas unidas por brazos. La plataforma base tiene un diámetro de 200 mm, la segunda plataforma móvil o elemento terminal tiene un diámetro de 50 mm. Ver figura 35.



**Fig. 35 Micromanipulador paralelo**

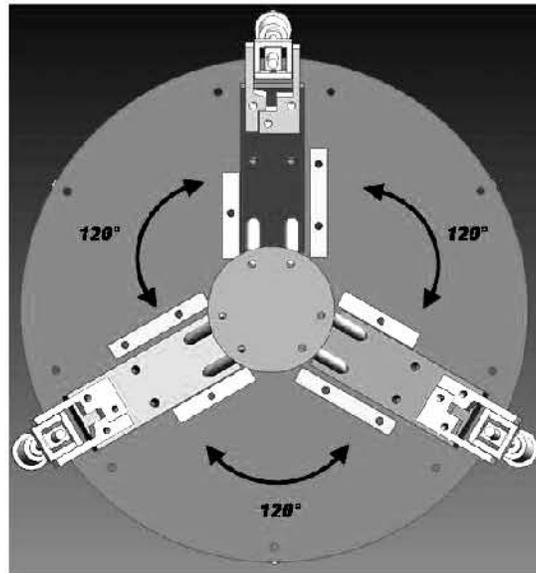
- 1. Plataforma base, 2 y 3. Soportes de unión, 4. Barras paralelas, 5. Plataforma móvil o elemento terminal, 6 y 7. Unión de cardan, 8. Soporte de cardan, 9. Tornillo de avance, 10 barras base, 11. soportes fijos, 12. soporte flexible.**

Sobre la plataforma base, se tienen acopladas tres cadenas cinemáticas idénticas e independientes, a las que denominaremos brazos, estas cadenas están distribuidas sobre la plataforma base de tal forma que existen 120 grados de separación entre ellas, como se aprecia en la figura 36, cada brazo lo conforman tres eslabones  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  Ver figura 33. El eslabón superior  $S_1$  lo componen un par de barras paralelas (4), este eslabón se conecta al eslabón medio  $S_2$  a través de articulaciones esféricas, el eslabón medio está compuesto por una barra base (10), esta barra se fija a la plataforma P1 fija (1) por medio de los soportes de unión cilíndrica (2) y (3), permitiendo el movimiento oscilatorio de la barra base (10). El eslabón inferior  $S_3$  lo forman, el tornillo de avance (9) que se conecta al eslabón medio  $S_2$  por medio de varios elementos, los cuales son: la unión de cardán (6) y (7) y los soportes de cardán (8). Los motores transmitirán movimiento por medio del tornillo de potencia (9), transformando un movimiento rotatorio en uno lineal. Estas cadenas cinemáticas cerradas cuentan con varios elementos mecánicos acoplados, estos elementos mecánicos ilustrados en la figura 34 son: soportes para unión cilíndrica (2) y (3), barras paralelas (4), unión de cardán (6) y (7), soportes de cardán (8), tornillo de avance (9).



**Fig. 36. Micromanipulador paralelo vista frontal**  
**1. Articulaciones esféricas, 2. Palanca (P-potencia R-resistencia F-punto de apoyo)**

Las tres cadenas cinemáticas son iguales, como se puede apreciar en la figura 37.

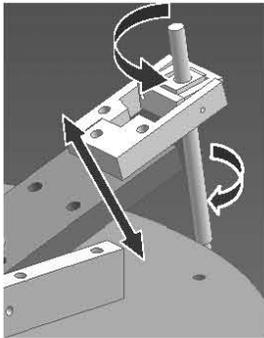


**Fig. 37 Vista superior**

**Cadenas cinemáticas**

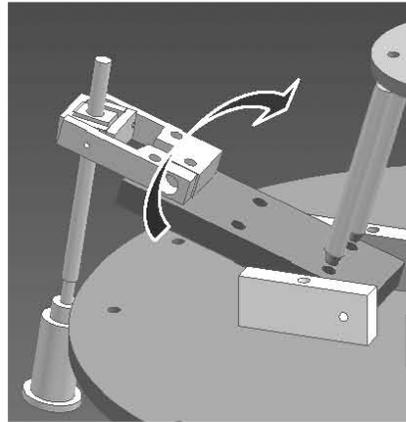
La descripción del movimiento mencionado anteriormente se ilustra con mayor detalle en la figura 38. La cadena cinemática cuenta con un tornillo sinfín, por medio del cual

convertirá el movimiento angular del motor acoplado al tornillo sinfín en un movimiento lineal, este movimiento lineal lo transmite a la barra base (10), figura 38a; la barra base lo transmitirá a las barras paralelas (4), figura 38b; y así tendremos una traslación en la base móvil (5), figura 38c.



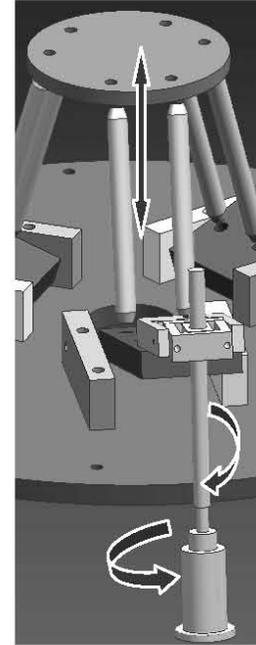
**Fig. 38a Cadena cinemática**

Movimiento del tornillo de potencia a la barra base



**Fig. 38b Cadena cinemática**

Movimiento de la barra base a las barras cilíndricas paralelas



**Fig. 38c Cadena cinemática**

Movimiento de la cadena cinemática completa

Las cadenas cinemáticas se construyeron usando pares cinemáticos; ver figura 39. En la unión de las barras paralelas con la barra base tenemos pares esféricos (S); La unión de las barras paralelas con la plataforma móvil es de la misma forma, mediante pares esféricos. La barra base describirá un movimiento semicircular, el cual se logra gracias a que la unión entre la barra base y los soportes de unión es por medio de un par de revolución (R), el cual permite rotación relativa sobre el eje par, tiene un grado de libertad ( $f = 1$ ). Dentro de la cadena cinemática tenemos otro tipo de unión, esta unión es la del tornillo de potencia con la barra base, esta unión es a través de una junta de Hooke (T) la cual tiene dos grados de libertad ( $f = 2$ ) y consiste en dos pares de revolución con ejes intersectados, no necesariamente perpendiculares [31].

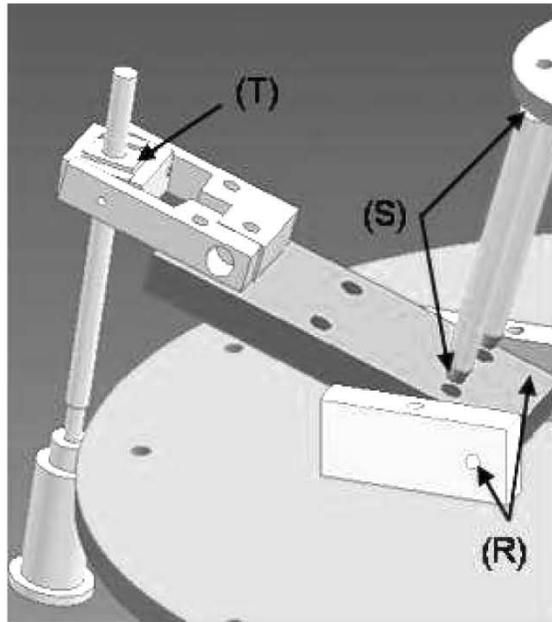
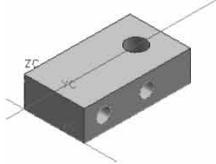
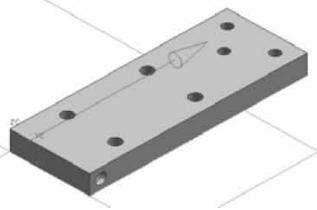
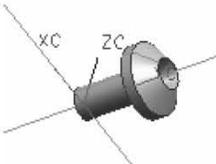
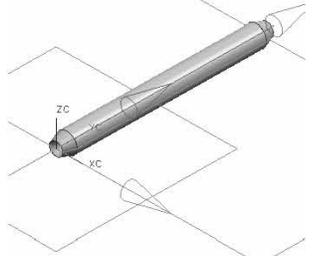
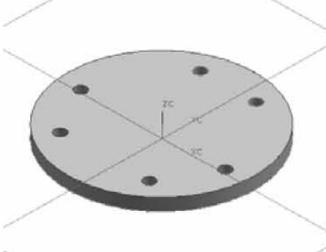


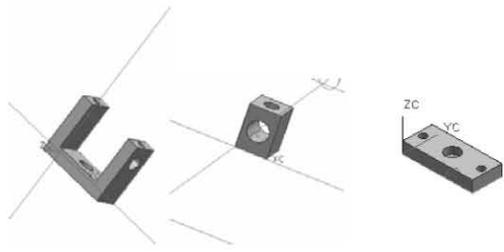
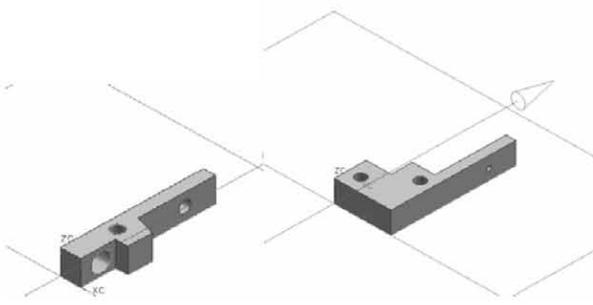
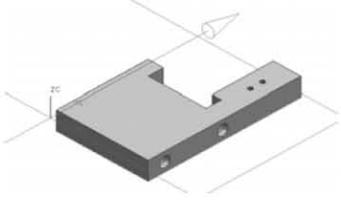
Fig. 39 Cadenas cinemáticas  
R Par de revolución, S Par esférico, T Junta de Hooke,

### 3.9 Descripción de los elementos del micromanipulador paralelo

En la tabla 3 se muestran las partes mecánicas que forman el micromanipulador paralelo, se hace una breve descripción de como se ensamblan y el material con que se fabricaron:

<p><b>Plataforma base (fija)</b>, sobre la cual se ensamblan y se colocan la mayoría de los componentes del diseño, está fabricada en aluminio; las dimensiones de la plataforma son de 200 mm de diámetro por 3.4 mm de espesor se utilizó un torno convencional; se le hicieron barrenos con un taladro de banco y se les hizo cuerda con un machuelo de 3.175 mm(1/8'') de diámetro.</p>	
<p>Los <b>soportes izquierdos</b>, están fabricados en cold rolled, estos soportes tienen la función de sostener la barra base, cuentan con dos barrenos, tienen una longitud de 43 mm por 12.5 mm de ancho, el espesor es de 6.3 mm. Los <b>soportes derechos</b>, solo cuentan con un barreno en la parte media, con la ayuda de los soportes izquierdos y un tensor se puede ajustar el movimiento de la barra base. Su</p>	

<p>longitud es de 33 mm por 12.55 de ancho y un espesor de 6.3 mm</p>	
<p><b>Tensor</b>, hecho en cold rolled, tiene dos barrenos en su parte superior para fijarlo a la plataforma base, y cuenta con un barreno en un costado, por donde pasara un tornillo para empujar al soporte derecho y así dar la tensión a la barra base. Sus dimensiones son 22 mm de longitud por 12.55 mm de ancho y espesor de 6.3 mm.</p>	
<p><b>Barra base</b>, fabricada en cold rolled, está sujeta por los soportes, izquierdo y derecho, a través de balines, obteniendo un movimiento circular, cuenta con varios barrenos donde montaremos algunos otros elementos mecánicos. Sus dimensiones son 67.8 mm de longitud por 25 mm de ancho y el espesor de 6.3 mm.</p>	
<p>Se tienen doce <b>pivotes</b>, los cuales están hechos de latón su función es la de alojar balines de 3.175 mm (1/8'') y así formar una unión cilíndrica fija entre la barra base y las barras paralelas, así como la unión de estas con la plataforma móvil. Las dimensiones son longitud de 9.68 mm por un diámetro mayor de 6.36 y un diámetro menor de 4.5 mm.</p>	
<p>Las <b>barras paralelas</b>, están fabricadas en latón, se tienen un total de seis, hay colocadas dos barras paralelamente en la barra base, su función es transmitir el movimiento de la barra base a la plataforma móvil, estas barras están unidas en su extremo superior e inferior por medio de un balín alojado en el pivote fijo a la plataforma móvil y la plataforma base. Tiene 4.76 mm de diámetro por 50 mm de longitud.</p>	
<p><b>Plataforma móvil</b>, está fabricada en aluminio, se hizo en torno convencional, cuenta con barrenos hechos en taladro de banco, en estos barrenos se colocan los pivotes que alojan los balines y conectan con las barras paralelas. Sus dimensiones son 50 mm de diámetro por 3.4 de espesor.</p>	

<p><b>Unión de cardán</b>, está formada por una tuerca fabricada en cold rolled de 10 mm de longitud por 5 mm de ancho y 5 mm de espesor, esta tuerca es la encargada de alojar el tornillo de avance, la tuerca esta contenida en una <b>carcasa</b> que mide 17 mm de longitud por 14.5 de ancho y un espesor de 2.5 mm, por medio de 2 balines, que le permitirán realizar movimientos circulares, con el fin de darle libertad de movimiento al tornillo de avance.</p>	
<p><b>Soportes de cardán</b>, realizados en latón, mantienen sujeta la carcasa donde está contenida la tuerca, estos soportes mantienen sujeta la carcasa por medio de 2 balines y permiten un movimiento circular, también con el fin de dar libertad de movimiento al tornillo de avance, contrarrestando posibles errores. Sus dimensiones son de 34.7 mm de longitud por 6.3 mm de espesor, el izquierdo, tiene en su parte más delgada 2.6 mm y en la más ancha 5 mm, por su parte el derecho tiene 15.9 mm en la parte más ancha y 2.6 mm en la más delgada.</p>	
<p><b>Tornillo de avance</b>, realizado en latón y maquinado en CNC, convertirá el movimiento angular en movimiento lineal a través de la tuerca contenida en el cardán. Este tornillo tiene las siguientes características, longitud de 87.5 mm por 3.175 mm (1/8'') de diámetro y un paso de 40 hilos por pulgada.</p>	
<p>Los tornillos de avance están montados sobre <b>soportes</b> fabricados en latón, su función es albergar la caja reductora, donde se acoplarán dichos tornillos. Las dimensiones son 49.8 mm de longitud por 29.8 mm de ancho por 6.3 mm de espesor.</p>	
<p>Para evitar que el tornillo de avance se salga de su base, contamos con <b>sujetadores</b>, uno a cada lado del tornillo y están hechos en latón. Sus dimensiones son 19.18 mm de largo por 17.35 de ancho y un espesor de 6.3 mm.</p>	

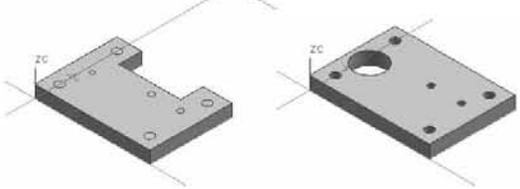
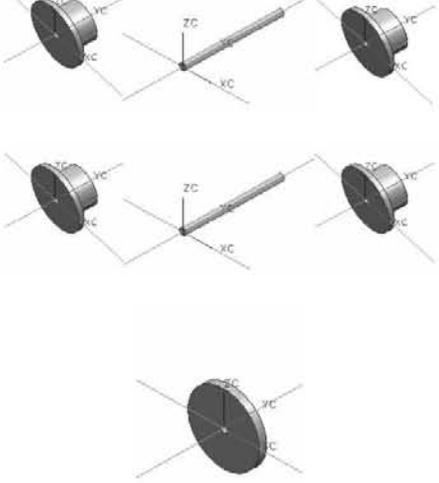
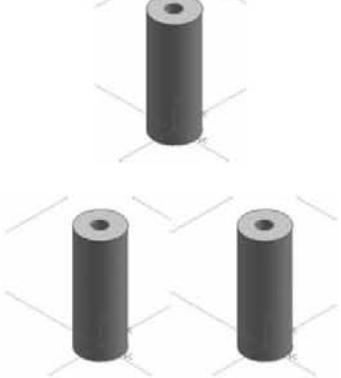
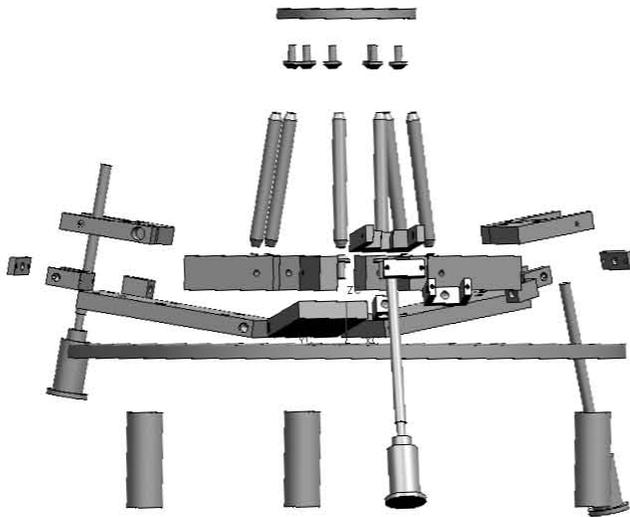
<p>La <b>caja reductora</b> cuenta con dos tapas, realizadas en CNC, están fabricadas en latón. Tienen 20 mm de ancho por 28.32 de largo el espesor es de 3.23 mm y cuenta con varios barrenos donde se alojan las flechas, cuenta con un barreno de 7.25 mm de diámetro a través del cual se acoplara el motor con la caja de reducción.</p>	
<p>Las tapas de la caja reductora están separadas por cuatro <b>barras separadoras</b>. Las cuales miden 14.75 mm de longitud por 3.175 mm (1/8") de diámetro.</p>	
<p>Dentro del grupo de elementos de la caja reductora, tenemos las <b>flechas</b> y los <b>engranes</b>, para las flechas se empleo alambre de 1.4 mm de espesor, los engranes son dobles de nylon, y son comerciales. La caja de reducción tiene la siguiente configuración: montado en la flecha derecha tenemos el engrane mayor de 35 dientes que irá acoplado al tornillo de avance, en seguida y sobre esta misma flecha tenemos dos engranes dobles, estos engranes tienen 10 dientes el de menor diámetro y 20 dientes el de mayor diámetro. Por otra parte la flecha izquierda e intercalados, tenemos dos engranes dobles, de iguales características a los de la flecha derecha, el engrane doble posterior irá acoplado al motor.</p>	
<p>Contamos con tres <b>soportes cilíndricos</b>, fabricados en latón, estos tienen un barreno en la parte central y sirven para dar soporte y estabilidad a todo el mecanismo, están separados 120 grados entre ellos. Miden 34.95 mm de longitud por 12.7 mm (1/2") de diámetro.</p>	

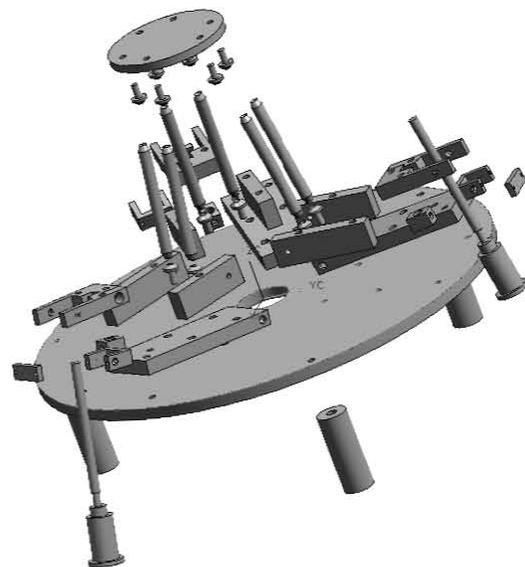
Tabla 3. Elementos mecánicos del manipulador paralelo

### 3.10 Construcción y ensamble

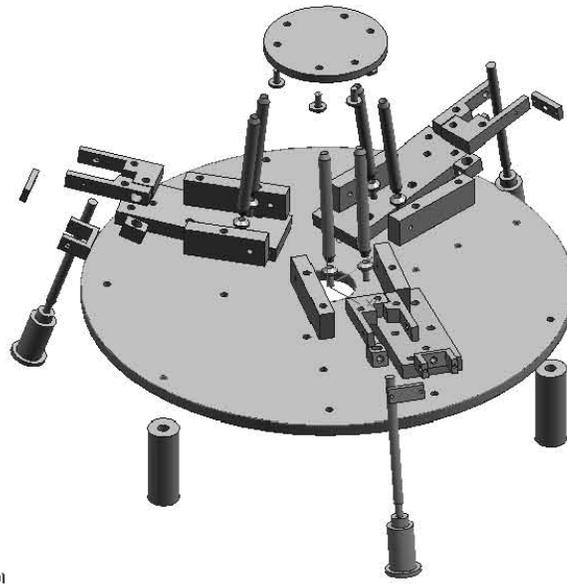
A continuación se tienen tres figuras del manipulador paralelo 40a, 40b y 40c, en estas podemos observar el modelo en 3 dimensiones.



**Fig.40a Micromanipulador paralelo**  
**Vista frontal**



**Fig. 40b Micromanipulador paralelo**  
**Vista lateral**



**Fig.40c Micromanipulador paralelo  
Vista superior**

Los tres dibujos anteriores que están en explosivo fueron hechos con el software para diseño Unigraphics.

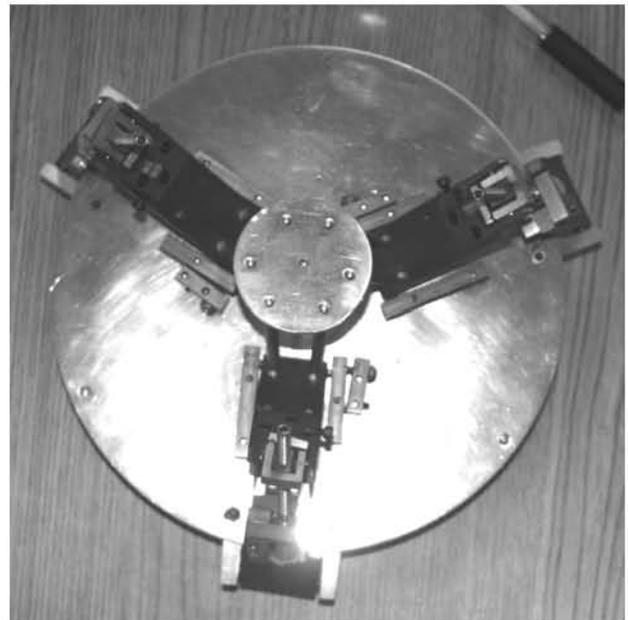
En ellos se puede ver con más detalle las partes mecánicas y su ensamble.



*Aquí observamos el modelo terminado del manipulador paralelo, se pueden apreciar los tres brazos con los tres tornillos de avance, las plataforma base y la plataforma móvil, en la imagen se ve un lapicero para comparar el tamaño del modelo.*

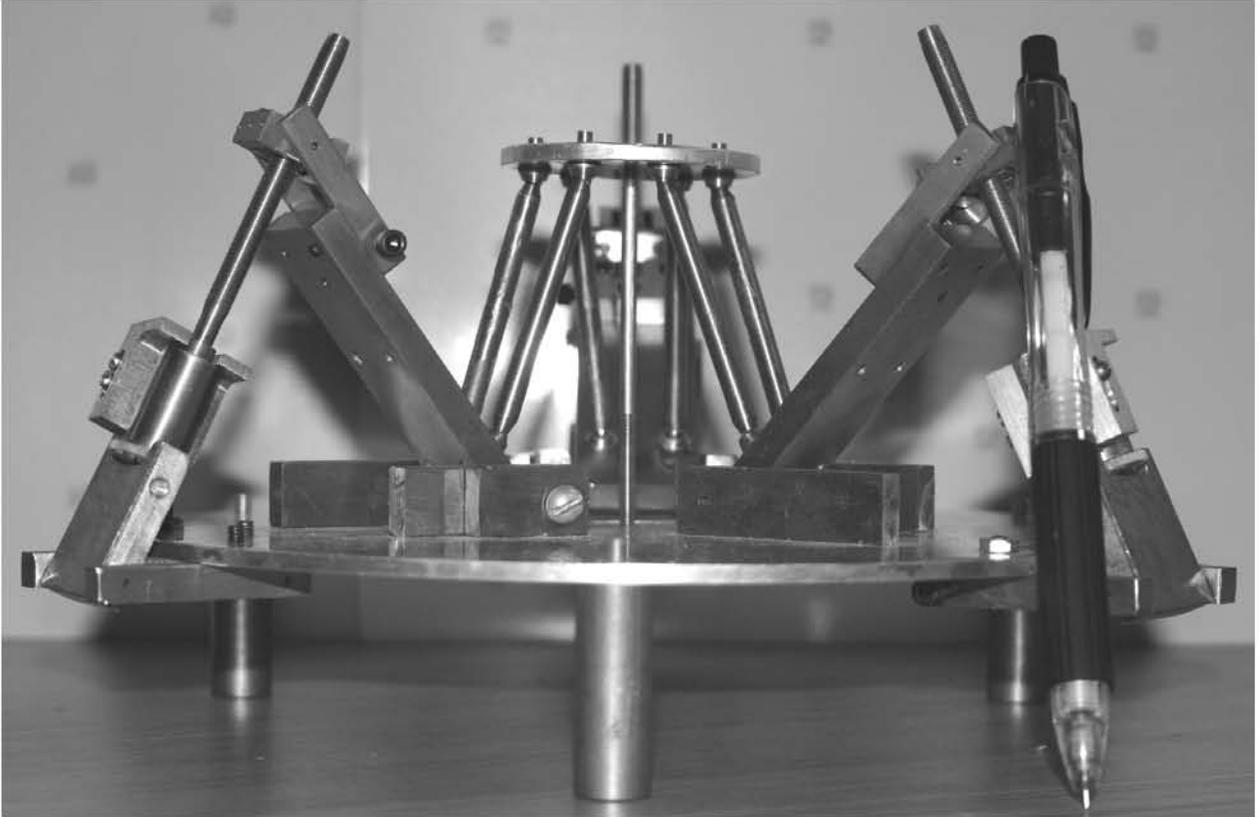
**Fig.41 Prototipo del micromanipulador paralelo fabricado en los talleres del CCADET**

*En esta imagen tenemos una vista desde arriba en la que vemos los tres brazos, los cuales son iguales y están separados por 120 grados entre si.*



**Fig.42 Prototipo del micromanipulador visto desde arriba**

*En la siguiente imagen tenemos una vista frontal del manipulador paralelo, se pueden apreciar los tornillos de avance y otras piezas mecánicas con mayor claridad.*



**Fig. 43** Micromanipulador paralelo

## Conclusiones

El micromanipulador paralelo se diseñó bajo la dirección del Dr. Ernst Kussul, se fabricaron las diferentes piezas mecánicas que conforman el micromanipulador, algunas de ellas fueron modificadas.

Se ensamblaron cada uno de los elementos mecánicos, conforme se iba armando el micromanipulador paralelo, se llevaron a cabo algunas modificaciones.

Finalmente se construyó el prototipo del micromanipulador paralelo, este prototipo se desarrolló para llevar a cabo tareas de microensamble y micromaquinado; [35] [47] [51] usando el principio de palancas.

Estas tareas son líneas de investigación que están siendo realizadas en el Laboratorio de Mecatrónica y Micromecánica del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico de la UNAM, bajo la dirección del Dr. Ernst Kussul.

Se hizo un análisis geométrico, de donde obtuvimos la posición para un brazo, para los otros dos brazos tenemos sus correspondientes coordenadas (x,y), ya que son idénticos al primero.

Se dedujo que el sistema de ecuaciones únicamente depende de  $l_3$ , es decir del desplazamiento que se realice a través del tornillo sinfín.

## Trabajo que se hará a futuro

- Por medio de un programa de computación deducir el volumen de trabajo del micromanipulador paralelo.
- Evaluar el desempeño del manipulador paralelo a través de pruebas diseñadas ex profeso.
- Seleccionar los motores que serán acoplados a las cajas de reducción del micromanipulador.
- Elaborar la etapa de control para los sensores y los motores.
- Acoplar los motores al manipulador para realizar pruebas.
- Seguir trabajando en nuevas generaciones de manipuladores paralelos.

## **Términos**

*Robot.*- Un robot es un manipulador reprogramable multifuncional, diseñado para mover materiales, partes, herramientas o dispositivos especializados, a través de movimientos programados para desempeñar diversas tareas [3].

*Manipulador mecánico.*- Esta formado por varios eslabones conectados por juntas. Un eslabón esta fijado a la tierra, mientras el otro es designado como eslabón de salida [3].

*Manipulador paralelo.*- Es una cadena cinemática cerrada donde su efector final esta unido a la base por varias cadenas cinemáticas independientes. Son clasificados en planos, esféricos y espaciales [3].

*Mecanismo.*- Cadena cinemática con un eslabón fijo a tierra [37].

*Mecanismo paralelo.*- Mecanismo de lazo cerrado en el cual el elemento terminal (plataforma móvil) es conectado a la base por al menos 2 cadenas cinemáticas independientes [33].

*Eslabones.*- Bloques contruidos [37].

*Eslabón.*- Son los cuerpos individuales que forman un mecanismo. En un mecanismo o manipulador mecánico están conectados en pares [3].

*Nodos.*- Puntos de unión [37].

*Junta.*- Conexión entre 2 o más eslabones (en sus nodos) lo cual permite movimiento [37].

*Junta.*- Es la conexión entre dos eslabones, además de dar algunas restricciones físicas en el movimiento relativo entre ellos [3].

*Cadena cinemática.*- Eslabones unidos para efectuar movimiento [37].

*Cadena cinemática.*- Es un ensamble de eslabones que están conectados por juntas [3].

*Cadena cinemática cerrada.*- Ocurre cuando en una cadena cinemática cada eslabón está conectado a otro eslabón por lo menos de dos diferentes formas [3].

*Grados de libertad.*- es el número de parámetros independientes que son necesarios para definir la posición en el espacio en cualquier instante de tiempo [37].

*Grados de libertad.*- Son el número de parámetros independientes o entradas necesarias para especificar la configuración del mecanismo completamente [3].

*Máquina.*- Mecanismo diseñado para hacer trabajo [37].

## Índice de figuras y tablas

Fig.1 Posiblemente el primer mecanismo paralelo espacial, patentado en 1931	2
Fig.2 Primer robot industrial paralelo, patentado en 1942	3
Fig.3 Primer hexápodo octaédrico	4
Fig.4 Único esquema de la “plataforma de Stewart”	5
Fig.5 Extracto de la primera patente de un hexápodo octaédrico	5
Fig.6 Primer simulador de vuelo basado en un hexápodo octaédrico	6
Fig. 7 Hexápodo	7
Fig. 8 Máquina Giddings Variax	8
Fig. 9 Máquina fabricada por Ingersoll	10
Fig. 10a y 10b Una muestra de máquinas fabricadas en la actualidad	11
Fig. 11 Mecanizado de piezas complejas	11
Fig. 12 SurgiScope en acción en el laboratorio de robots quirúrgicos	12
Fig.13 Tricept 600 en la línea de Volvo en Olfström	13
Fig. 14 Robot Sprint Z3	14
Fig. 15 Variantes del robot Delta	14
Fig. 16 El Nanopod	15
Fig. 17 Robot paralelo translacional “Tripteron”	15
Fig.18 El robot Delta Clavel	16
Fig. 19 El Trussarm UTIAS	16
Fig. 20 La mano izquierda de Merlet	17
Fig. 21 Hombro modular de Hayward	17
Fig. 22 Robot paralelo plano de 3 grados de libertad con estructura 3RRR	21

Fig. 23 Manipulador paralelo plano de 3 grados de libertad con estructura 3PRP	22
Fig. 24 Manipulador esférico con estructura 3RRR	22
Fig.25 Ocho posibles configuraciones de miembros	24
Fig. 26 La llamada plataforma de Stewart (SP)	25
Fig. 27 La plataforma de Stewart modificada (MSP)	25
Fig. 28 El mecanismo con piernas cruzadas (CL)	26
Fig. 29 El mecanismo con actuadores prismáticos fijos	26
Fig. 30 Referencia de los marcos y notación	27
Fig. 31 Dispositivos mili, micro y nonométricos	30
Fig. 32 Diagrama del micromanipulador paralelo	38
Fig. 33. Diagrama en el plano x, y	39
Fig. 34 Movimientos de la plataforma	43
Fig. 35 Micromanipulador paralelo	48
Fig. 36 Micromanipulador paralelo vista frontal	49
Fig. 37 Vista superior (cadenas cinemáticas)	49
Fig. 38a, 38b, 38c Cadena cinemática	50
Fig. 39 Cadenas cinemáticas	51
Fig. 40a Manipulador paralelo vista frontal	55
Fig. 40b Manipulador paralelo vista lateral	55
Fig. 40c Manipulador paralelo	56

## Tablas

Tabla 1. Clasificación de los manipuladores paralelos espaciales	23
------------------------------------------------------------------	----

Tabla 2 Técnicas de micromaquinado y medición	37
Tabla 3. Partes mecánicas del manipulador	54

*Máquina.*- Es un ensamble de uno o más mecanismos junto con otros componentes eléctricos y/o hidráulicos, usados para transformar energía externa en trabajo u otra forma de energía [3].

*Rotación pura.*- El cuerpo posee un centro de rotación que no tiene movimiento respecto al marco de referencia estacionario. Todos los demás puntos se mueven en arcos circulares [37].

*Traslación pura.*- Todos los puntos del cuerpo describen trayectorias paralelas (curvilíneas o rectilíneas) [37].

*Rotación compleja.*- Una combinación simultánea de rotación y traslación [37].

## Referencias

- [1] W.P. Thurston and J.R. Weeks. The mathematics of three dimensional manifolds. Scientific American, 251(1):94-106, 1984.
- [2] J.M. Selig. Geometrical Methods in Robotics. Springer, pp 1-2.
- [3] Tsai Lung-Wen. Robot Analysis. The mechanics of serial and parallel manipulators. Wiley-Interscience. Pp. 1-2, 118-123, 8-10, 17, 116.
- [4] <http://www.metalunivers.com/Tecnical/Hemeroteca/ArticuloCompleto.asp?ID=9064> (Producción Mecánica-0-Noviembre-Diciembre 1998-Panorama).
- [5] <http://www.parallemic.com/Reviews/Review007.html>
- [6] Stewart, D. A platform with six degrees of freedom, proceedings of the IMechE, vol.180, pt. 1, No. 15, pp. 371-385, 1965-66.
- [7] Gosselin, C. and Angeles, J., 1988, The optimum kinematic design of planar three-degree-of-freedom parallel manipulator, ASME J. Mech. Trans. Autom. Des., vol.110, pp.35-41.
- [8] Mohammadi, H.R., Damali, P.J., Zsombor-Murray, P.J. and Angeles, J., 1993, The Kinematics of 3-DOF Planar and Spherical Double-Triangular Parallel Manipulators, in computational kinematics, edited J. Angeles, G Hommel, and P. Kovacs, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 153-164.
- [9] Gosselin, C. and Angeles, J., 1989, The Optimum Kinematic Design of a Spherical Three-Degree-of-Freedom Parallel Manipulator, ASME J. Mech. Trans. Autom. Des., vol.111, pp. 202-207.
- [10] Gosselin, C. and Hamel, J., 1994, The Agile Eye: A High-Performance Three-Degree-of-Freedom Camera-Orienting-Device, Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 781-786.
- [11] Innocenti, C. and Parenti-Castelli, V., 1993b, Echelon Form Solution of Direct Kinematics for the General Fully Parallel Spherical Wrist, Mech. Mach. Theory, vol. 28, No. 4, pp. 553-561.
- [12] Wohlhart, K., 1994, Displacement Analysis of the General Spherical Stewart Platform, Mech. Mach. Theory, vol. 29, No. 4, pp. 581-589.
- [13] Hunt, K. H., 1983, Structural Kinematics of In-Parallel-Actuated Robot Arms, ASME J. Mech. Transm. Autom. Des., vol. 105, pp. 705-712.
- [14] Pittens, K. H. and Podhorodeski, R. P., 1993, A family of Stewart platforms with optimal dexterity, Journal of Robotic Systems, vol. 10, No. 4, pp. 463-479.
- [15] Reid, L.D. and Nahon, M. A., 1988, Response of airline pilots to variations in flight simulator motion algorithms, ALAA Journal of Aircraft, vol. 25, No.7, pp. 639-646.
- [16] Grant, P. R., 1986, Motion Characteristics of the UTIAS flight research simulator motion-base, UTIAS Technicl Note # 261, University of Toronto, Canada.
- [17] Stoughton, R. S. and Arai, T., 1993, A modified Stewart platform manipulator with improved dexterity, IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 9, No. 2, pp. 166-172.
- [18] Merlet, J. P., and Gosselin, C., 1991, Nouvelle architecture pour un manipulateur parallèle à six degrés de liberté, Mechanism and Machine Theory, vol. 26, No. 1, pp. 77-90.

- [19] Gosselin, C., and Ricard, R., A comparison of Architectures of Parallel Mechanisms for Workspace and Kinematic Properties, <http://wwwrobot.gmc.ulaval.ca/~ricard/Articles/Boston-asme-95/node1.html>
- [20] Angeles, J., Fundamentals of Robotic Mechanical Systems, Theory, Methods, and Algorithms, Springer, pp. 8-10.
- [21] <http://www.roboticonline.com/public/articles/archivedetail.cfm?id=798>
- [22] Clavel, R., 1988, Delta, a fast robot with parallel geometry, Proc.18<sup>th</sup> Int. Symposium on Industrial Robots, Lausanne, pp.91-100.
- [23] Pierrot, F., Fournier, A., and Dauchez, P., 1991, Towards a fully-parallel 6 dof robot for high-speed applications, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Sacramento, pp. 1288-1293.
- [24] Hervé, J. M. and Sparacino, F., 1992, Star, a new concept in Robotics, Proc. 3<sup>rd</sup> International workshop on Advances in Robot Kinematics, September 7-9, Ferrara, pp. 176-183.
- [25] Hughes, P. C., Sincarsin, W. G., and Carroll, K. A., 1991, Trussarm-A variable-geometry-truss manipulator, J. of Intell. Mater. Syst. And Struct. 2, pp. 148-160.
- [26] Hayward, V., 1994, Design of hydraulic robot shoulder based on combinatorial mechanism, in Yoshikaswa, T. and Miyazaki, F. (eds), Experimental Robotics 3, Lecture Notes in Control and Information Sciences 200, Springer-Verlang, pp. 297-310. The Int. J. Robotics Res. 10, No. 5, pp. 767-790.
- [27] <http://aula.el-mundo.es/aula/laminas/lamina1066755235.pdf>
- [28] Merlet, J. P., Solid Mechanics and its Applications, Parallel Robots, Kluwer Academic Publishers, pp. 9.
- [29] <http://www.scamecanica.com>
- [30] Norton, Robert. L., Diseño de maquinaria, McGraw Hill. Pp. 445.
- [31] Duffy, J, Análisis of Mechanisms and Robot Manipulators, Edward Arnold. Pp.123-133.
- [32] Ruiz Huerta Leopoldo, Diseño y construcción de un microcentro de bajo costo, Tesis de maestría, Facultad de Ingeniería, División de Estudios de Posgrado, 2000, pp. 84.
- [33] <http://www.parallelic.org/Terminology/General.html>
- [34] Ronen Ben-Horin, Moshe Shoham and Shlomo Dserassi, Kinematics, dynamics and construction of a planarly actuated parallel robot. Department of Mechanical Engineering, Technion-Israel Institute of Technology, Technion City, Haifa 3200, Israel.
- [35] 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. Micrmech. Microeng. 1996. 6. P. 410-425.
- [36] Klocke, Volker, Klocke Nanotechnik, Pascal str. 17, 52076 Aachen. Germany. T. Gesang, Fraunhofer-institut IFAM, Wiener str. 12, D-28359 Bremen.
- [37] [http://www.aucegypt.edu/faculty/hekman/MENG371/m371ch2\\_4.pdf-623KB-www](http://www.aucegypt.edu/faculty/hekman/MENG371/m371ch2_4.pdf-623KB-www)
- MENG37 Notes, Chapter 2 Dr. Keith Hekman, September 9, 2003.
- [38] [http://proton.ucting.udg.mx/tutorial/micro\\_ingenieria/sumintro.html](http://proton.ucting.udg.mx/tutorial/micro_ingenieria/sumintro.html)
- Banks, D., 1994, 1996. Spanish translation Sandoval-Ibarra, F.

- [39] Rai-Choudhury, P. (Editor). Handbook of Microlithography, Micromachining and Microfabrication: Micromachining and Microfabrication. Hardcover, Vol 002 (september 1997), SPIE Press, ISBN: 0819423793.
- [40] H.El-Hofy, A.B.M. Khairy, T. Masuzawa, and Joseph Mc Geough, 2002, Micromachining of Engineering Materials. The University of Edinburgh. Edinburgh, Scotland. Marcel Dekker, Inc. Pp 2-4.
- [41] Gennissen, Paul. 1999 Micromachining Techniques using Layer Grown in an Epitaxial Reactor. Delft University Press. Pp 2-3.
- [42] Jeongsik Sin and Harry Stephanou. A parallel micromanipulation method for microassembly. Center for Automation Technologies, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York, USA.
- [43] Kozhevnikov. Mecanismo. Editorial Gustavo Gili, S.A. Barcelona 1981. Pp. 156-157.
- [44] V.M.Faires, Design of Machine Elements, The McMillan Company 1964. Pp. 449-450.
- [45] J.E.Shigley, C.R.Mischke, Standar HandBook of Machine Design, McGraw-Hill 1986, Pp. 36.2-36.5.
- [46] J.E.Shigley, L.D.Mitchell, Diseño en Ingenieria Mecánica, McGraw-Hill 1985, Pp 686-688.
- [47] E.Kussul, L.Ruiz-Huerta, A.Caballero, A.Kasatkin, L.Kasatkina, T.Baidyk, G.Velasco, 2004, CNC Machine Tools for Low Cost Microdevices Manufacturing. Journal of Applied Research and Technology, Vol.2, No. 1, April 2004, Pp 76-91.
- [48] Baidyk T., Kussul E., Makeyev O., Caballero A., Ruiz L., Carrera G., Velasco G., 2004, Flat image recognition in the process of microdevice assembly. Pattern Recognition Letters. Vol.25/1, Pp. 107-118.
- [49] 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.
- [50] Lara-Rosano F., Kussul E., Baidyk T., Ruiz L., Caballero A., Velasco G., 2004, Artificial Intelligence Systems in Micromechanics. In: artificial Intelligence Applications and Innovations (IFIP 18<sup>th</sup> Computer Congress), Ed. By Max Bramer, Vladan Devedzic Boston/Dordrecht/London, Kluwer Academic Publishers, Pp.1-10.
- [51] Kussul E., Baidyk T., Ruiz-Huerta L., Caballero A., Velasco G., Makeyev o., 2004, Techniques in Development of Micromachine Tool Prototypes and their Applications in Microfactories. In: MEMS/NEMS Handbook: Techniques and Applications Ed. By Cornelius T. Leondes. Kluwer Academic Publishers, Vol. 4, Chapter 1, 2005. Pp. 81.
- [52] Kussul E., Baidyk T., Ruiz-Huerta L., Caballero A., Velasco G., 2002, CNC Micromachine Tool: Design & Metrology Problems, In: Advances in Systems Theory, Mathematical Methods and Applications, A. Zemliak, N. Mastorakis (ed.), Greece, ISBN: 960-8052-60-2, WSEAS Press, Pp. 93-97.
- [53] Kussul E., Ruiz L., Caballero A., Kasatkina L., Baidyk T., 2000, CNC Machine Tools for Low Cost Micro Devices Manufacturing. Proc. Of First Int. Conf. On Mechatronics and Robotics (M&R'2000), Saint-Petersburg, May 29-June 2, Vol.1, Pp. 98-103.
- [54] Kussul E., Ruiz L., Caballero A., Kasatkina L., Baidyk T., 2000, The Perspectives of Micro Mechanical Filters Application for Fine Filtration of Liquids and Gases. Proc.

Of First Int. Conf. On Mechatronics and Robotics (M&R'2000), Saint Petersburg, May 29-June 2, Vol.1. Pp. 103-108.