

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Automática y Sistemas Computacionales



TRABAJO DE DIPLOMA

Modelo Cinemático para Robot Paralelo de tres grados de libertad

Autor: Yusniel Ricardo López

Tutor: M. Sc Eduardo Izaguirre Castellanos

Santa Clara

2008

“Año 50 de la Revolución”



Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería en Automática, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Firma del Autor

Firma del Jefe de
Departamento donde se
defiende el trabajo

Firma del Responsable de
Información Científico-Técnica

Tarea Técnica

1. Revisión bibliográfica del tema relacionado con el modelado cinemático de estructuras robóticas paralelas, haciendo énfasis en las de tres grados de libertad.
2. Estudio de las características y análisis de la plataforma de tres grados de libertad desarrollada por SIMPRO.
3. Desarrollo del modelo geométrico de la plataforma y definición de las variables necesarias para implementar la modelación de dicho sistema.
4. Implementación de las ecuaciones que responden al modelo cinemático tanto directo como inverso de la estructura robótica.
5. Programación de las ecuaciones y simulación de los resultados.
6. Redacción del informe final.

Firma del Autor

Firma del Tutor

Resumen

El interés por los robots paralelos ha aumentado considerablemente en los últimos años, hoy día estos mecanismos cumplen disímiles aplicaciones, entre ellas una de las más extendidas es su uso en plataformas de simulación, que permiten desde el entrenamiento de personal calificado para operar naves espaciales, aéreas, marítimas o terrestres y hasta la experimentación de sensaciones inimaginables a través de distintos medios de entretenimiento. En este trabajo se desarrollaron los modelos cinemáticos inverso y directo aplicados a un robot paralelo de tres grados de libertad, que serán empleados con fines de entretenimiento, de gran aplicación en el sector turístico de nuestro país.

Se elaboró el modelo geométrico del sistema y se establecieron las variables para implementar el modelado cinemático. Paralelamente se diseñó el fichero geométrico en VRS como base para el desarrollo de las ecuaciones del modelo cinemático sobre este paquete de software.

Basándonos en el modelado geométrico se procedió a la obtención de las ecuaciones de la cinemática inversa y directa, las cuales fueron programadas en el Matlab y validadas a partir de la simulación efectuada en este mismo software.

Principales Notaciones Empleadas

- Pa : paralelogramo.
- S : articulación esférica.
- U : articulación universal.
- R : articulación rotacional.
- P : articulación prismática.
- EF : efector final.
- La : largo de la base de la plataforma en mm.
- Wa : ancho de la base de la plataforma en mm.
- Lb : largo del efector final en mm.
- Wb : ancho del efector final en mm.
- (O, x, y, z) : sistema de referencia fijo.
- (O', x', y', z') : sistema de referencia móvil.
- P : punto situado en el centro del sistema de referencia móvil.
- $\overline{A_1C_1}$: vector que representa el pistón 1.
- $\overline{A_2B_2}$: vector que representa el pistón 2.
- $\overline{A_3B_3}$: vector que representa el pistón 3.
- $A_1A_2A_3$: puntos que conforman el plano la base de la plataforma.
- $B_1B_2B_3$: puntos que conforman el plano del efector final.
- A_1C_1 : extremidad articulada actuada que contiene el pistón No.1.
- A_2B_2 : extremidad articulada actuada que contiene el pistón No.2.
- A_3B_3 : extremidad articulada actuada que contiene el pistón No.3.

- $R_{x y z}^{x' y' z'}$: Matriz de rotación de los ángulos de Euler (Convención X-Y-Z)
- L_i : Distancia entre los extremos de la cadena articulada i-esima
- $Desp\ 1$: elongación del cilindro 1 en mm.
- $Desp\ 2$: elongación del cilindro 2 en mm.
- $Desp\ 3$: elongación del cilindro 3 en mm.
- θ : ángulo de alabeo del efector final. (Rotación alrededor del eje x)
- φ : ángulo de cabeceo del efector final. (Rotación alrededor del eje y)
- ψ : ángulo de guiñada del efector final. (Rotación alrededor del eje z)

Índice

Introducción.....	1
Capítulo I Estado del Arte de la Robótica Paralela	4
1.1 Antecedentes.....	4
1.2 La robótica paralela en Cuba.....	8
1.3 Configuraciones estructurales de los robots paralelos.....	10
1.3.1 Robots planares.....	10
1.3.2 Robots espaciales.....	12
1.4 Actuadores en la robótica paralela.....	14
1.4.1 Actuadores neumáticos.....	16
1.5 Algunas aplicaciones de los robots paralelos	21
1.6 Problemas abiertos en la robótica paralela	22
Capítulo II Modelo Cinemático de la Plataforma.....	25
2.1 Modelado de robots paralelos.....	25
2.1.1 Modelo cinemático	26
2.1.2 Modelo dinámico	27
2.2 Descripción de la plataforma	28
2.3 Descripción geométrica	31
2.3.1 Definición de los puntos de la base	32
2.3.2 Definición de los puntos del efector final.....	35
2.4 Modelo Cinemático Inverso.....	37
2.5 Modelo Cinemático Directo.....	46
Capítulo III Simulación de la Plataforma	49
3.1 Importancia de la simulación.....	49

3.2	Simulación mediante <i>VirtualRobot</i>	50
3.3	Programación del modelo cinemático.....	54
3.3.1	Empleo de la Interfaz Gráfica del Matlab.....	55
3.4	Simulación del modelo de la plataforma	58
3.4.1	Definición de los cuerpos rígidos	59
3.5	Análisis de los resultados.....	61
3.6	Análisis económico.....	62
	Conclusiones	63
	Recomendaciones	64
	Referencias Bibliográficas.....	65
	Anexos	69
Anexo I	Código de programación para la cinemática de la plataforma.....	69
Anexo II	Descripción de los objetos y primitivas que conforman la Plataforma	73
Anexo III	Principales piezas de la plataforma	77
Anexo IV	Subsistemas que representan la plataforma en el <i>SimMechanics</i>	80

Introducción

La robótica es una ciencia aplicada que data de los años sesenta; la podemos definir como el conjunto de conocimientos teóricos y prácticos que permiten concebir, realizar y automatizar sistemas basados en estructuras mecánicas poli articuladas, dotados de un determinado grado de "inteligencia" y destinados a la producción industrial o a la sustitución del hombre en diversas tareas (Barrientos et al., 1997, Yáñez Valdez, 2007).

Se define como robot al mecanismo articulado multifuncional diseñado para mover materiales, piezas, herramientas o dispositivos especiales, mediante movimientos variados, programados para la ejecución de distintas tareas. De acuerdo a la estructura cinemática del mecanismo los robots se dividen en tres grandes categorías: robots seriales, paralelos e híbridos (Domínguez Velazco, 2007).

Se dice que un robot es serie si su cadena cinemática es abierta; es decir, sus elementos se encuentran conectados uno a uno. Un robot paralelo, por su parte, posee una estructura mecánica formada por un mecanismo de cadena cinemática cerrada, en el que el efector final se une a la base por al menos dos cadenas cinemáticas independientes (Domínguez Velazco, 2007). Si aparecen ambos tipos de cadenas cinemáticas en un mismo robot se dice que éste es de estructura híbrida.

Ventajas de los robots paralelos

La mayor parte de los robots o manipuladores industriales, que en la actualidad se utilizan, se basan esencialmente en brazos articulados con estructura serie. Sin embargo, en los últimos años ha aumentado el uso de mecanismos con

estructuras paralelas debido a las ventajas que ofrecen, las cuales fundamentalmente son:

- Alta rigidez y precisión.
- Elevadas velocidades de operación.
- Manipulan cargas muy superiores a su propio peso, que de por sí es bajo.
- Los actuadores pueden estar instalados en la plataforma fija.

También poseen características, que pueden representar desventajas, por ejemplo:

- Su análisis cinemático es más complicado.
- El espacio de trabajo suele ser pequeño y no es sencillo su cálculo.
- Debe resolverse para cada topología el problema de las configuraciones singulares.

Modelado de los robots paralelos

El modelo del comportamiento de un mecanismo, ya sea serie o paralelo está determinado por el comportamiento cinemático y dinámico del mismo. Estos modelos pueden ser directos o inversos en dependencia de cuales sean los datos y las incógnitas a resolver.

El desarrollo de los modelos cinemáticos de robots paralelos no tiene las mismas características que la de los robots serie. En estos existe una metodología, la de Denavit-Hartenberg, que permite la obtención del modelo cinemático directo de una manera sistemática y relativamente sencilla a partir de su configuración física.

La obtención del modelo cinemático inverso es más complejo, y requiere utilizar consideraciones geométricas específicas para cada configuración (Aracil et al., 2006, Barrientos et al., 1997).

En los robots paralelos el modelo cinemático inverso se puede plantear relativamente fácil a partir de consideraciones geométricas de carácter general, mientras que la obtención de la cinemática directa es más complicada y en numerosos casos no tiene una única solución analítica. Dada la complejidad que pueden alcanzar estos modelos se han desarrollado varios software de simulación que permiten analizar el comportamiento cinemático y dinámico de los mecanismos de una manera eficiente (Cisneros Limón, 2006).

Teniendo en cuenta las características de los robots paralelos, este trabajo se traza como **objetivos**:

1. Desarrollar el modelo cinemático, tanto directo como inverso de la plataforma desarrollada por SIMPRO.
2. Realizar la simulación del modelo obtenido.

El informe final consta de tres capítulos; en el primero se presenta un estudio referente a la evolución de la robótica paralela, sus principales estructuras y aplicaciones. En el capítulo dos se plantean las ecuaciones que definen el modelo cinemático del mecanismo, el cual es simulado en el capítulo tres.

Capítulo I Estado del Arte de la Robótica Paralela

1.1 Antecedentes

Los primeros trabajos teóricos relacionados con las estructuras mecánicas paralelas aparecieron cuando los geómetras franceses e ingleses realizaron sus estudios sobre los poliedros y sus aplicaciones.

El primer robot paralelo del que se tiene conocimiento es una plataforma sobre la que estaban colocados los asientos de un teatro con el fin de introducir un movimiento que brindase una apariencia más real del espectáculo. Esta plataforma denominada “*Amusement Device*”, fue patentada en 1931 por J.E. Gwinnett (Gwinnett, 1931). Según la información existente, esta plataforma no llegó nunca a construirse (Zabalza and Ros, 2007).

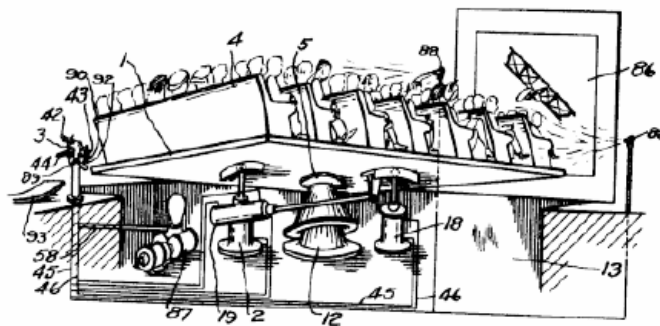


Figura 1.1 Plataforma de movimiento espacial patentada por J.E. Gwinnett.

En 1942 W.L.V. Pollard patentó un robot paralelo llamado “*Position-Controlling Apparatus*”; este mecanismo estaba destinado a pintar automóviles (Pollard, 1942). El robot consistía en tres brazos de dos eslabones cada uno, unidos mediante juntas universales. Los tres actuadores de la base comandaban la posición de la herramienta, mientras que la orientación era proporcionada por otros dos actuadores situados en la base que transmitían el movimiento a la

herramienta mediante la rotación proporcionada a unos cables flexibles (Bonev et al., 2003).

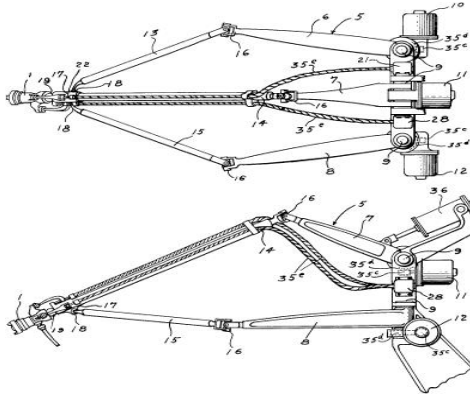


Figura 1.2 Robot paralelo patentado por W.L.V. Pollard.

Han sido otros mecanismos paralelos los que han logrado un mayor reconocimiento general y han contribuido a la aparición de un mayor número de publicaciones relacionadas con la robótica paralela. En 1947 V.E. Gough ideó un robot paralelo con seis actuadores lineales formando una estructura de octaedro (Merlet, 2006, Aracil et al., 2006). Este robot de seis grados de libertad fue utilizado en la empresa Dunlop para el ensayo de neumáticos de aviación y se presentó en un Congreso de La Federación Internacional de Sociedades de Ingenieros y Técnicos del Automóvil (FISITA) en 1962 (Zabalza and Ros, 2007).

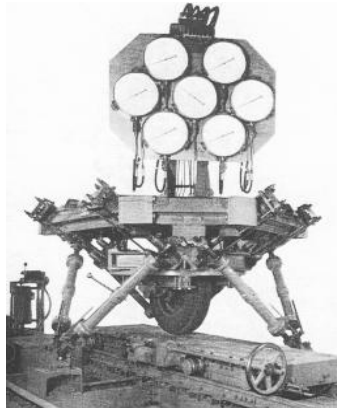


Figura 1.3 La plataforma de Gough.

En 1965 Stewart, presentó un artículo en el que describía una plataforma de movimiento de 6 grados de libertad destinada a trabajar como simulador de vuelo.

Contrario a la creencia general, el mecanismo de Stewart es diferente al presentado por Gough. El artículo de Stewart tuvo y tiene gran influencia en el mundo académico, considerándose como uno de los primeros trabajos de análisis de plataformas paralelas (Aracil et al., 2006, Merlet, 2006).

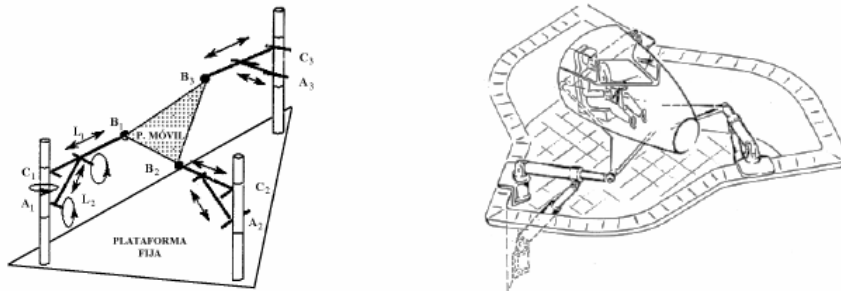


Figura 1.4 Plataforma de Stewart.

En 1967 el ingeniero Klaus Cappel realizó en el “Franklin Institute Research Laboratory” numerosas investigaciones con plataformas paralelas de 6 gdl. En ese año Cappel patentó un simulador de movimiento basado en un hexápodo (Cappel, 1967).

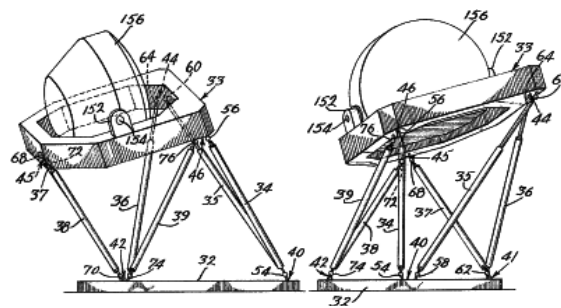


Figura 1.5 Simulador de vuelo patentado por K.L. Cappel.

En realidad todos los autores enumerados en este apartado se pueden considerar los iniciadores en este campo de la ciencia, quienes desarrollaron sus inventos sin conocimiento previo de los anteriores.

Como otro de los dispositivos pioneros en las estructuras robóticas paralelas, también se puede considerar el manipulador paralelo 6-RUS con seis grados de

libertad, accionado por actuadores giratorios presentado por K.H. Hunt en 1967 (Zabalza and Ros, 2007).

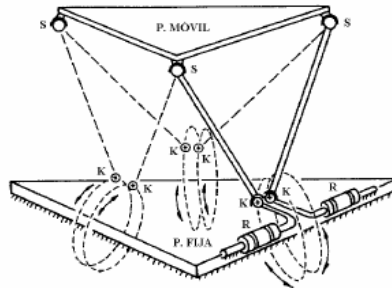


Figura 1.6 Manipulador paralelo 6-RUS propuesto por K.H. Hunt.

A partir de 1970 la necesidad de proporcionar un entrenamiento más económico para los pilotos de aviación que la realización de vuelos reales, hizo que se desarrollaran gran cantidad de simuladores de vuelo. La mayoría de estos simuladores estaban basados en la estructura de Gough (Zabalza and Ros, 2007). K.H. Hunt sugirió el empleo de los mecanismos actuados de arquitectura paralela, como robots manipuladores, destacando que los mismos requerían de un estudio más detallado a la vista de las ventajas que en cuanto a rigidez y precisión presentaban respecto a los robots serie convencionales. En 1979 McCallion y Pham fueron los primeros que propusieron usar la plataforma de Stewart como un mecanismo paralelo para una célula de ensamblaje robotizada, básicamente porque la posición del efector final es mucho menos sensible a los errores que los sensores articulares que caracterizan a los robots serie (Yáñez Valdez, 2007).

En la década de los ochenta se presentaron trabajos con enfoques más generales, que analizaban la cinemática, dinámica, el espacio de trabajo y el control de distintos tipos de configuraciones. También se realizaron estudios completos sobre las relaciones de velocidad y posición así como algoritmos para la obtención de los modelos cinemáticos y dinámicos (Aracil et al., 2006, Yáñez Valdez, 2007).

Los estudios sobre robots paralelos aún no han terminado. Teniendo en cuenta la recopilación de publicaciones más relevantes sobre robots paralelos realizada por

J.P. Merlet hasta 1970 existían solo 24 publicaciones; en la década de 1980 el número aumentó hasta 125; en la década de 1990 se registraron 879 publicaciones y entre el año 2000 y la actualidad aparecen 1023 trabajos relacionados con el tema (Merlet, 2007).

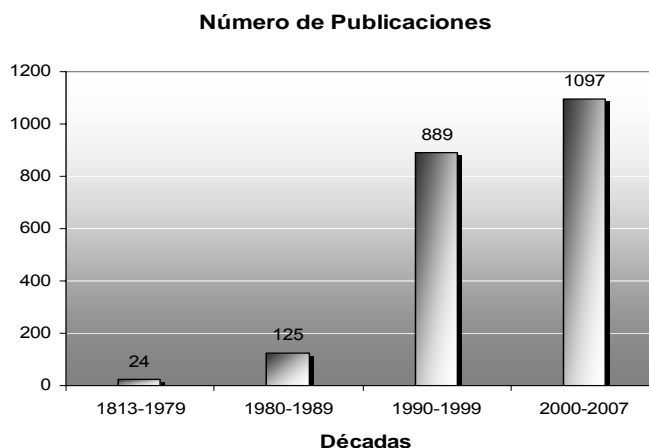


Figura 1.7. Evolución de las publicaciones científicas sobre robots paralelos.

1.2 La robótica paralela en Cuba

El estudio de los mecanismos paralelos y sus aplicaciones no es exclusivo de los países industrializados, sino que también se ha extendido a otros países. En Cuba el interés por aportar nuevos conocimientos sobre este tema se ha venido incrementado en los últimos años, específicamente en la Universidad Central de las Villas, donde en diciembre de 2005 se firma el primer convenio de colaboración con el Centro de Investigación y Desarrollo de Simuladores “CIDSIM” a partir de identificarse entre ambos centros objetivos de trabajo de beneficio e interés mutuo. Este convenio fomentó en Cuba el desarrollo en las investigaciones y aplicaciones de estructuras robóticas paralelas, siendo en estos momentos el Grupo de Investigaciones de Robótica y Percepción del Departamento de Automática y Sistemas Computacionales de nuestro centro uno de los que mayor número de investigaciones tiene reportadas sobre el tema.

Los estudios en sus inicios se centraron en manipuladores paralelos de 2 grados de libertad, entre estos trabajos podemos citar el realizado a partir de un estudio del estado del arte de los algoritmos empleados en el control de accionamientos neumáticos, para desarrollar un controlador empotrado aplicado a la plataforma neumática de dos grados de libertad construida en el CIDSIM, la cual es mostrada en la Figura 1.8.

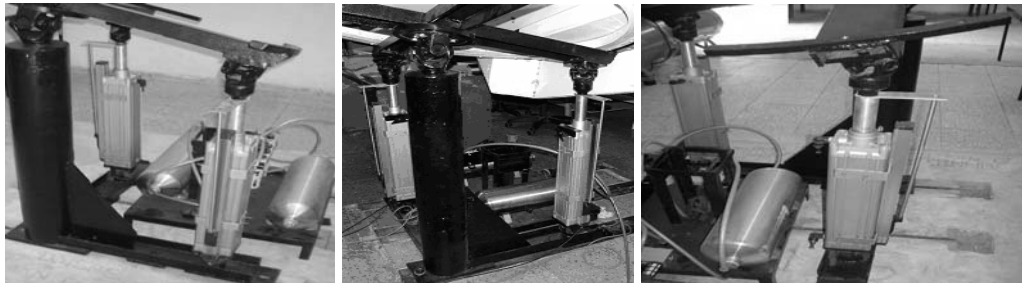


Figura 1.8 Simulador de Conducción de 2 gdl.

Los trabajos de investigación con dicha plataforma se centraron en la obtención del modelo de la misma (Domínguez Velazco, 2007), estableciendo una estrategia de control robusta desacoplada para el posicionamiento del sistema en su conjunto, que fue validada en la práctica (Rubio Rodríguez et al., 2007), así como la implementación de dichos algoritmos en sistema empotrado (Machado Sosa et al., 2007).

Hoy día se está trabajando con simuladores de tres grados de libertad específicamente en las ecuaciones cinemáticas que permitan diseñar el sistema de control del mecanismo. Estos simuladores presentan un mayor número de prestaciones que los de dos grados de libertad y se están desarrollando con fines comerciales para ser utilizados en nuestros hoteles como medios de entretenimiento, elevando así las prestaciones de servicios al cliente en este tipo de instalaciones.

1.3 Configuraciones estructurales de los robots paralelos

Debido a algunas de las desventajas de los manipuladores series, muchos investigadores han intentado desarrollar nuevas estructuras robóticas, partiendo de que la configuración mecánica de un robot condiciona su funcionamiento, sus prestaciones y el campo de aplicación, entre otros aspectos.

La *topología* o arquitectura de un mecanismo paralelo se establece como las articulaciones, conexiones, acoplamientos y actuadores que están estructurados para lograr un determinado movimiento (Domínguez Velazco, 2007).

Existen innumerables configuraciones estructurales para los robots paralelos. Las combinaciones de número de cadenas cinemáticas, tipo de las mismas, restricciones en el movimiento de las articulaciones, etc., hacen prácticamente imposible un análisis generalizado de las estructuras de los robots paralelos. El investigador francés Jean Pierre Merlet ha sido el autor que más profundamente ha estudiado dichas configuraciones. En principio, y según el tipo de movimientos que son capaces de realizar se pueden distinguir dos grupos: los robots planares y los espaciales (Aracil et al., 2006).

1.3.1 Robots planares

En este epígrafe profundizaremos en lo relacionado con los mecanismos planares de tres grados de libertad, los cuales son ampliamente usados. Los mecanismos planares son aquellos en los que su movimiento se reduce al plano por lo que pueden tener de 2 a 3 grados de libertad, correspondientes a dos traslaciones en el plano y una rotación sobre un eje perpendicular a dicho plano (Bonev et al., 2003).

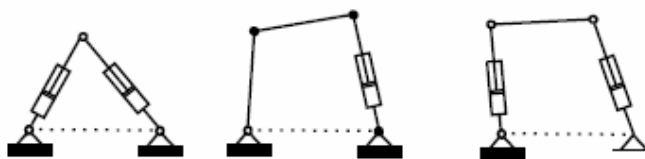


Figura 1.9. Ejemplos de robots planares de dos grados de libertad.

Estos mecanismos presentan tres cadenas cinemáticas independientes que se encuentran unidas a la plataforma móvil y a la tierra mediante tres puntos; por consiguiente se pueden considerar de manera general como plataformas móviles triangulares. Los mecanismos planares paralelos se caracterizan por tener tres cadenas cinemáticas conectadas con articulaciones pasivas y una activa. Las cadenas se pueden representar con las sucesiones siguientes: *RRR*, *RPR*, *RRP*, *RPP*, *PRR*, *PPR*, *PRP*, *PPP* (Merlet, 2006).

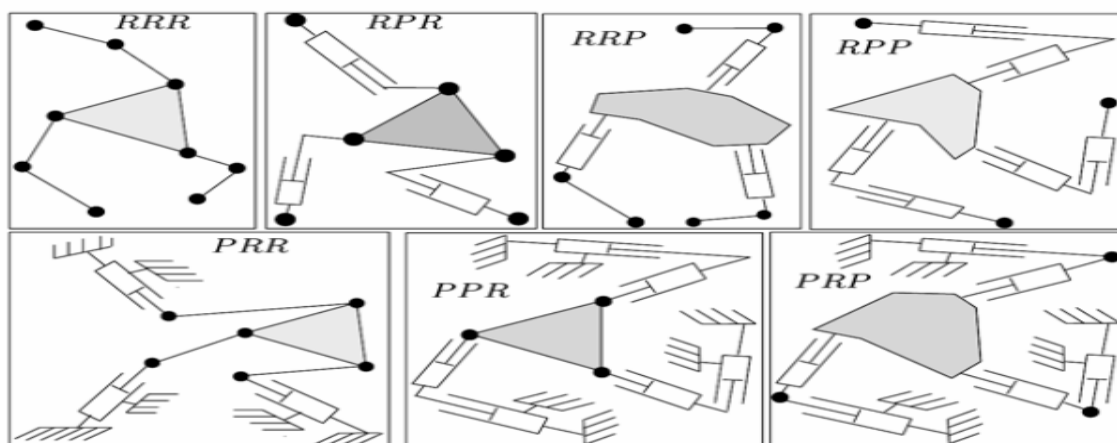


Figura 1.10 Ejemplos de diferentes tipos de manipuladores planos con actuadores prismáticos y rotacionales.

Es notable que con simples cambios en la base y la plataforma móvil los robots de tipo *RRP* se vuelvan equivalentes a los *PRR*, y los *RPP* equivalentes a los *PRP*. No se especifica cual de las articulaciones es la actuada, ya que puede ser cualquiera de las tres. Se debe evitar colocar el actuador delante del efector final

para aligerar el peso de los movimientos del mecanismo. También es posible la construcción de robots con cadenas cinemáticas distintas a estas (Merlet, 2006).

En los últimos años se han desarrollado trabajos con diversas aplicaciones relacionados con el diseño, construcción y control de mecanismos planares paralelos. Por ejemplo en la Universidad de Ohio, USA; se diseñó un mecanismo paralelo 3 $R\underline{P}R$ para evaluar el control de éste, usando cilindros neumáticos como articulaciones prismáticas activas. A su vez, las articulaciones de revolución fueron todas pasivas. En el Instituto de Manufactura Tecnológica de Singapur se construyó un mecanismo paralelo planar del tipo 3 $\underline{R}RR$ con el objetivo de desarrollar un método geométrico para el análisis de configuraciones singulares con diferentes esquemas de actuación (Yáñez Valdez, 2007).

1.3.2 Robots espaciales

Los robots espaciales son aquellos que experimentan su movimiento en todo el espacio tridimensional y no en un plano, es decir; se pueden trasladar (posición en el espacio) y girar (orientación en el espacio) en los tres ejes de coordenadas; esto le confiere 3, 4, 5 y 6 grados de libertad, aunque existen algunos casos particulares que solo poseen dos grados de libertad (Bonev, 2002).

Los robots paralelos espaciales en los últimos años han presentando un incremento en el número de grados de libertad usados para las distintas aplicaciones. Es imposible abordar todas las configuraciones existentes hoy día de estos mecanismos, por lo que hemos seleccionado una representación de las estructuras más importantes desarrolladas hasta el momento.

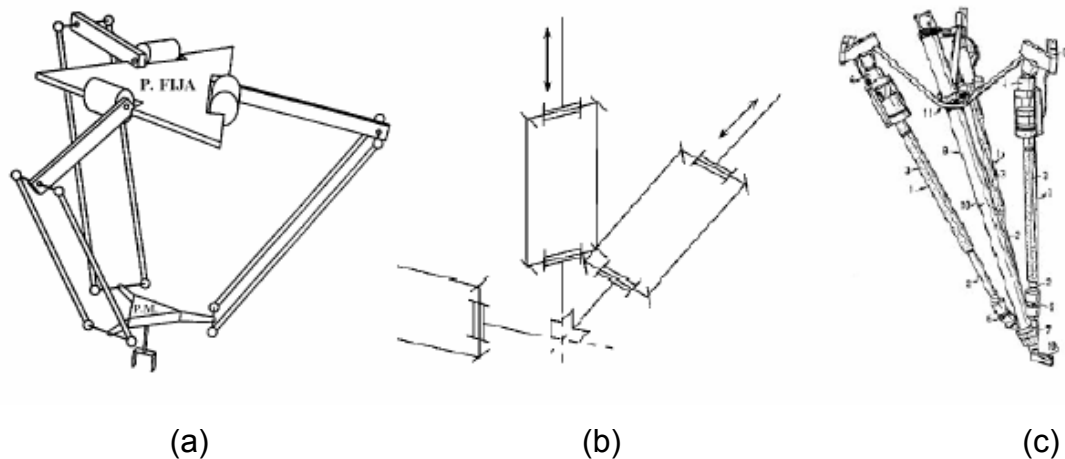


Figura 1.11 Ejemplos de robots paralelos espaciales:

(a) *Delta*, (b) *Orthoglide*, (c) *Tricept*.

Un ejemplo interesante dentro de este grupo de robots espaciales es el “*Orthoglide*” (Figura 1.11b); robot desacoplado, propuesto por P. Wenger y D. Chablat, que fue desarrollado para aplicaciones en máquinas de herramientas. El principal interés en este equipo es que presenta relativa similitud entre su cinemática y su espacio de trabajo (Merlet, 2006).

Otro robot representativo es el “*Tricept*”, de tres grados de libertad, que fue patentado por K.E. Neumann. El mecanismo posee una prolongación que se traslada libremente a lo largo de su eje. Esta prolongación se une a la base con articulaciones universales U , que le impiden rotar. Tres cadenas del tipo $RRPS$ sostienen al efector final (Neumann, 1988).

Los manipuladores que realizan rotaciones alrededor de un centro, son ampliamente usados en la vida diaria. En la Figura 1.12 (a) se presenta un mecanismo con un mástil central, que es acoplado a la plataforma móvil a través de una articulación esférica. Las cadenas cinemáticas actuadas son del tipo $RRPS$. Esta arquitectura generalmente se aplica en simuladores de vuelo y de conducción (Merlet, 2006).

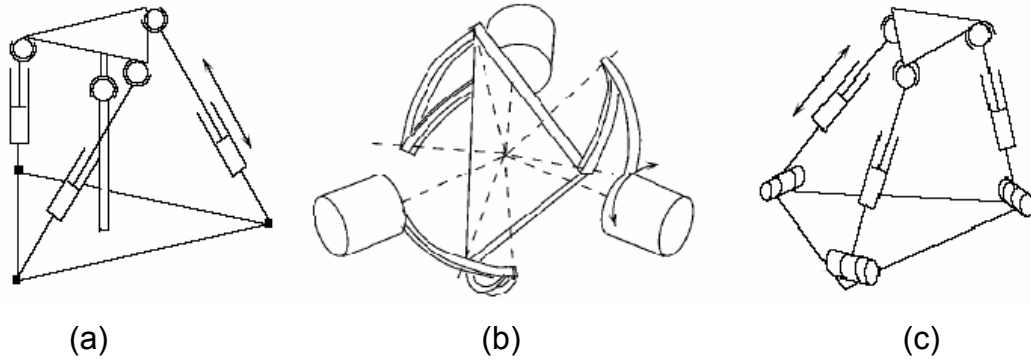


Figura 1.12 Robots paralelos: (a) Manipulador de tres grados de libertad, (b) “*Agile Eye*”, (c) “*Orión*”.

Gosselin y su equipo después de un intenso estudio desarrollaron un mecanismo al cual denominaron “*Agile Eye*”. Este manipulador usa tres cadenas esféricas con actuadores rotacionales que convergen en un punto, siendo este el centro de rotación. El manipulador de la Figura 1.12 (c) tratado por Hunt en 1983 ha sido estudiado por varios autores bajo el nombre de “*Orión*”. El efector final se sostiene mediante tres cadenas cinemáticas del tipo RPS . Los grados de libertad son, de traslación en el eje vertical y de rotación en los dos restantes (Merlet, 2006).

1.4 Actuadores en la robótica paralela

Un mecanismo puede ser operado manualmente, o por medio de un dispositivo impulsor para generar el movimiento deseado. A estos dispositivos que se encargan de producir las fuerzas y/o torques para mover las estructuras mecánicas, se les denomina actuadores. En la robótica, los más usados son clasificados de acuerdo a los siguientes criterios (Yáñez Valdez, 2007):

- **Según el tipo de movimiento generado.** Hoy día, es posible usar actuadores lineales, los cuales desarrollan una fuerza y generan un movimiento de traslación en una misma dirección. También se usan los actuadores de rotación; estos desarrollan un par y generan un movimiento de rotación respecto al eje de torque.

- **Según la naturaleza de la fuente primaria de energía.** Se dispone de: Actuadores neumáticos; que desarrollan su potencia a partir del fluido del aire comprimido. Actuadores hidráulicos; que su potencia se basa en el fluido hidráulico presurizado y, los más modernos, actuadores eléctricos.

Una clasificación de los diferentes tipos de actuadores anteriormente mencionados se muestra a continuación:

Actuadores neumáticos:

- Cilindros neumáticos
 - Simple efecto
 - Doble efecto
- Motores neumáticos
 - Aletas rotativas
 - Pistones axiales

Actuadores hidráulicos

- Cilindro hidráulico
- Motor hidráulico

Actuadores eléctricos:

- Motores de corriente continua (DC)
 - Controlados por inducido
 - Controlados por excitación
- Motores de corriente alterna (AC)
 - Síncrónicos
 - Asíncrónicos
- Motores paso a paso

Los actuadores hidráulicos permiten el manejo de una fuerza considerable, sus aplicaciones se centran en el manejo de cientos de Newton-metros y la potencia de salida es de algunos Kilowatt (Krivts and Krejnin, 2006).

Los actuadores eléctricos generalmente se emplean cuando el movimiento requiere de un número de posiciones intermedias que se deben cambiar fácilmente, se caracterizan por la facilidad de control, sencillez y precisión.

Los actuadores neumáticos constituyen una tecnología que se ha venido introduciendo en los robots paralelos que requieren de un posicionamiento continuo, demostrando ser una tecnología barata, de respuesta rápida, elevada relación potencia-peso y fácil mantenimiento. Estos actuadores forman parte del sistema a analizar dentro de nuestro trabajo por lo que profundizaremos acerca de los mismos en el siguiente epígrafe.

1.4.1 Actuadores neumáticos

A los mecanismos que convierten la energía del aire comprimido en trabajo mecánico se les denomina actuadores neumáticos. La energía neumática que emplea aire comprimido como fuente de potencia tiene cualidades excelentes, propias del elemento de base (Modesti, 2002, Krivts and Krejnin, 2006), entre estas cualidades podemos destacar:

- El aire es abundante y barato.

- Se transporta y almacena fácilmente.

- Es limpio (no produce contaminación) y carece de peligro de combustión o alteración con la temperatura.

No obstante estas ventajas, es digno destacar que siendo el aire un fluido comprimible presenta algunas desventajas, como pueden ser los movimientos no uniformes de los pistones cuando se realizan avances lentos con carga aplicada.

El aire es una composición de varios elementos, y a título indicativo se puede considerar tal mezcla compuesta por un 75% de N₂ (nitrógeno), 23% de O₂ (oxígeno), 1% de argón y un 1% de otros gases como anhídrido carbónico, xenón, helio y neón; esta mezcla gaseosa antes de ser distribuida a los actuadores necesita de determinados procedimientos que se realizan por medio de compresores y de estaciones de regulación y tratamiento del aire comprimido. (Modesti, 2002).

La generación de aire comprimido se lleva a cabo por lo general admitiendo aire exterior en un recinto hermético, reduciendo el volumen hasta alcanzar la presión deseada, y permitiendo entonces su suministro. La presión de distribución generalmente se mantiene entre 5 y 10 Bar para las aplicaciones industriales más comunes, el compresor más usado es el de pistón. El proceso de uso de aire comprimido consta de una serie de transformaciones de energía, primero eléctrica en mecánica, cuando por medio de un motor eléctrico se hace girar el eje del compresor, luego mecánica en fluídica, cuando el giro mecánico del compresor produce la absorción, compresión y almacenamiento de aire, y por último nuevamente mecánica cuando utilizamos el aire comprimido para accionar un actuador (Yáñez Valdez, 2007).

El posicionamiento continuo de las cargas, con actuadores lineales electro neumáticos, ha resultado ser un problema de control complejo. Esto se debe fundamentalmente a que la dinámica de los actuadores lineales electro neumáticos es altamente no lineal debido a la compresibilidad del aire, el comportamiento no lineal del flujo de aire a través de las válvulas y la existencia de elevadas fuerzas de fricción estáticas y dinámicas entre el cilindro y el pistón (Rubio Rodríguez, 2007).

Al tratar los actuadores neumáticos aplicados en robots, se hará hincapié en aquellos actuadores especialmente diseñados para el posicionamiento continuo, dado que el aire es compresible; el posicionamiento dependerá de la carga de trabajo. Por ello la precisión en trayectoria continua que podrá obtenerse con este tipo de elementos será menor a la obtenida por otros tipos de actuadores, a menos que se utilicen sensores de posicionamiento (Meza, 2004).

- **Motores neumáticos**

Los motores neumáticos son dispositivos que trabajan con aire comprimido, son ligeros y compactos. El arranque es rápido; pueden trabajar con velocidades variables sin necesidad de un control complejo; soportan temperatura de hasta 120 °C y son capaces de asumir sobrecargas sin consecuencias posteriores. Se pueden arrancar y parar de forma ilimitada, el arranque, el paro y el cambio de sentido de giro son instantáneos, incluso cuando el motor esté trabajando a plena carga. Los motores neumáticos rotativos suelen ser adecuados para su empleo en robótica, en general se usan como elemento reductor de velocidad, existiendo dos tipos: los de pistón radial y axial.

- **Motores de aletas rotativas**

Los motores de aletas rotativas son relativamente simples y su utilización está muy extendida. Se encuentran disponibles dentro de la gama de 0.075 a 15 Kw (0,1 a 20 CV), con una presión de trabajo inferior a los 10 Bar. Estos motores neumáticos consisten en varias aletas, generalmente de plástico a base de resinas fenólicas montadas en unas hendiduras distribuidas sobre un motor cilíndrico. El rotor se coloca excéntricamente en el cuerpo del motor, proporcionado la estanqueidad necesaria para que el mismo pueda girar en uno u otro sentido.

Es normal la utilización de estos motores acoplados a un dispositivo reductor, lo que permite multiplicar el par y que el motor pueda trabajar a velocidades mayores, en las que se consigue una mayor eficiencia y un mejor control de la velocidad frente a variaciones de carga. El control de la velocidad se efectúa fácilmente ajustando el caudal de alimentación.

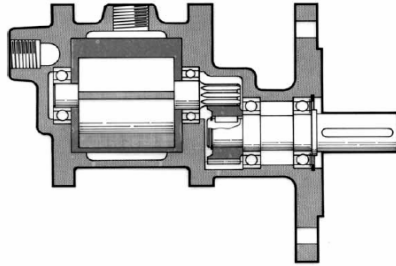


Figura 1.13 Motor de aletas rotativas.

- **Motor de pistones**

Los motores de pistones trabajan a velocidades inferiores que los de aletas, debido al mayor peso de sus elementos rotatorios. Una característica importante es el bajo nivel de vibración a cualquier velocidad, siendo esto especialmente destacable a bajas velocidades en las que se obtiene el par máximo. Su empleo se limita principalmente a sistemas que precisan de una potencia elevada.

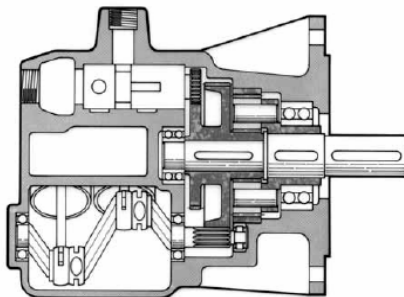


Figura 1.14 Motor de pistón.

- **Cilindros neumáticos**

Los cilindros neumáticos de simple efecto tienen una sola conexión de aire comprimido. No pueden realizar trabajos más que en un sentido. Se necesita aire sólo para un movimiento de traslación; el vástago retorna por el efecto de un muelle incorporado o de una fuerza externa; el resorte incorporado se calcula de modo que haga regresar el émbolo a su posición inicial a una velocidad suficientemente grande. En los cilindros de simple efecto con muelle incorporado, la longitud de éste limita la carrera (Escalona Moreno, 2002). Generalmente, con estos cilindros se persigue un posicionamiento en los extremos del mismo y no un posicionamiento continuo (Dominguez Velazco, 2007).

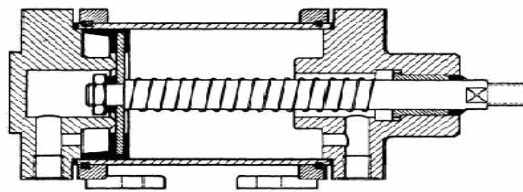


Figura 1.15 Cilindro de simple efecto.

En los cilindros de doble efecto la fuerza ejercida por el aire comprimido en ambas cámaras obliga al émbolo a realizar un movimiento de traslación en los dos sentidos; se dispone de una fuerza útil tanto en un sentido como en el otro. Estos cilindros se emplean especialmente en los casos en que el émbolo tiene que realizar también una función en su movimiento de retorno a la posición inicial. En principio, la carrera de los cilindros no está limitada, pero hay que tener en cuenta el pandeo o deformación que puede experimentar el vástago cuando sale del cuerpo del cilindro. También en este caso, sirven de empaquetadura los labios y émbolos de las membranas (Escalona Moreno, 2002).

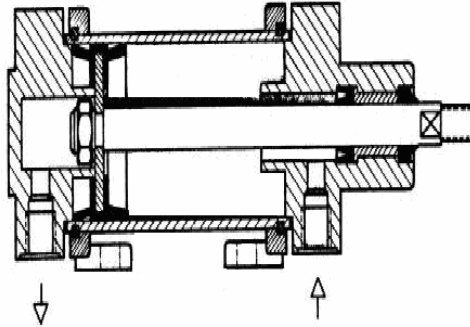


Figura 1.16 Cilindro de simple efecto.

1.5 Algunas aplicaciones de los robots paralelos

El número de aplicaciones en que las estructuras paralelas han jugado un papel protagónico es tan amplio, que resulta imposible mencionarlas todas. Nos limitaremos a mencionar los campos donde más se usan; haciendo énfasis en los mecanismos aplicados a simuladores de conducción.

La exactitud que es posible lograr con los robots paralelos en el posicionamiento del elemento final es utilizada en el campo de la medicina específicamente en la cirugía (oftalmología, neurocirugía, etc) para lograr suturas precisas. Ésta característica también es aprovechada en la industria de componentes electrónicos debido a la necesidad de una alta precisión en la soldadura por puntos de los componentes electrónicos (Domínguez Velazco, 2007).

En el campo de las comunicaciones la utilidad de estas estructuras es visible donde se requiera de manejo de pesos que genéricamente se extiende desde decenas de kilogramos hasta toneladas, como es el caso de la orientación de radares y grandes antenas. El sector industrial por su parte utiliza estas estructuras, en máquinas de herramientas, taladros, fresadoras, etc. (Domínguez Velazco, 2007).

El propósito inicial de estas estructuras fue la simulación de dispositivos aéreos. Hoy día muchas compañías están construyendo simuladores de realidad virtual

para el entrenamiento de personal en la conducción de automóviles, aviones, trenes, naves espaciales, y también como vía de entretenimiento; donde se puede afirmar que las estructuras paralelas han sido las más exitosas. En la Figura 1.17 mostramos varios tipos de plataformas diseñadas como simuladores de vuelos.

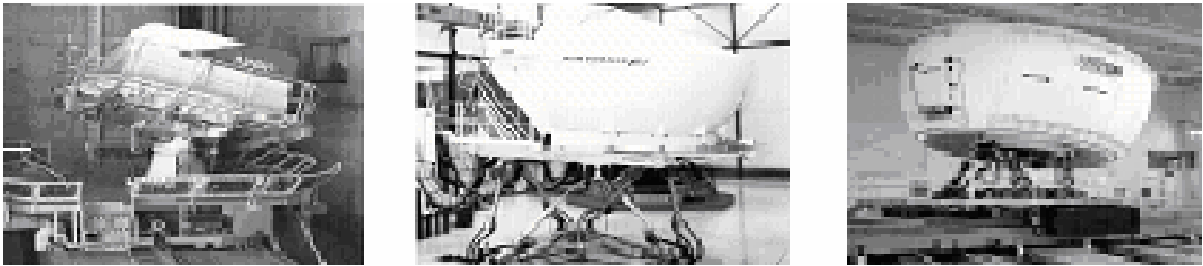


Figura 1.17 Ejemplos de simuladores de vuelos.

1.6 Problemas abiertos en la robótica paralela

En los últimos años se ha incrementado el interés de la comunidad científica por los robots paralelos, ejemplo de ello es el incremento de publicaciones sobre el tema (ver Figura 1.7). También se han incrementado notablemente las aplicaciones donde aparecen estos mecanismos. Sin embargo en muchos casos las dificultades inesperadas en el diseño y control de tales sistemas han llevado a resultados mejores que las arquitecturas mecánicas convencionales, pero no han sido exactamente lo que se esperaba. En las siguientes secciones identificaremos los problemas abiertos existentes en este campo.

En cuanto al diseño mecánico la mayoría de los mecanismos propuestos presentan de 2 a 6 grados de libertad (gdl). Se han realizado algunos estudios con el objetivo de encontrar todas las posibles combinaciones de actuadores y articulaciones para lograr arquitecturas de un determinado grado de libertad; sin embargo un examen de 82 arquitecturas mecánicas propuestas en la literatura demuestra que el 40% presentan 6 gdl, el 3.5% son de 5 gdl, el 6% de 4 gdl, el 40% de 3 gdl, y el resto presentan 2 gdl (Merlet, 1999). Se debe seguir

investigando en mecanismos paralelos haciendo énfasis en robots de 4 y 5 grados de libertad. También sería interesante utilizar nuevos actuadores como por ejemplo los del tipo eléctrico que permitan disminuir las dimensiones del manipulador.

Un aspecto importante en el estudio de robots paralelos es el análisis de las posiciones no alcanzables por el efector final, las denominadas *singularidades*. El análisis de configuraciones singulares se realiza por medio de una matriz que relaciona las velocidades de las coordenadas articulares y las del extremo del mecanismo, que corresponden a las coordenadas de posición y orientación. Esta matriz de transformación es conocida como la matriz Jacobiana y para el análisis de mecanismos de cadena cinemática cerrada se separa dicha matriz en dos matrices; una asociada con la cinemática inversa y otra asociada con la cinemática directa (Yáñez Valdez, 2007).

Matemáticamente las singularidades son las configuraciones del robot en las cuales el determinante de la matriz Jacobiana es nulo. Al anularse el Jacobiano, un incremento infinitesimal de las coordenadas cartesianas del efector final supondría un incremento infinito de las coordenadas articulares, lo cual no sería posible de lograr con los actuadores de robot (Domínguez Velazco, 2007).

La problemática de las singularidades es muy común y abunda en manipuladores paralelos, en una singularidad el manipulador puede verse afectado en su flexibilidad dinámica, es decir, su capacidad de resistir fuerzas externas en ciertas direcciones. Este problema debe resolverse específicamente para cada topología ya que no existe (como en los manipuladores serie) un modelo dinámico general y ello obliga que se controlen en la actualidad de forma desacoplada. La presencia de cadenas cinemáticas cerradas impone restricciones en los posibles movimientos de las articulaciones y complica el proceso de diseño y de análisis.

El modelado de la cinemática directa resulta ser más complejo que el de la cinemática inversa la cual se plantea a partir de consideraciones geométricas generales. Para resolver la cinemática directa existen varios métodos por ejemplo mediante el algoritmo de Newton- Raphson Métodos de Euler, Liebman y Gröebner (Domínguez Velazco, 2007).

Esto es claramente un área donde un trabajo cooperativo con los matemáticos ha producido en los últimos 10 años varios métodos numéricos iterativos que permiten obtener las soluciones de sistemas de ecuaciones complejos. A pesar de los avances que presentan estos algoritmos no podemos decir que los mismos garantizan la solución completa del problema de la cinemática directa. Los procedimientos algorítmicos proporcionan todas las soluciones y por lo tanto resulta necesario precisar las soluciones para determinadas posiciones del efector final (Merlet, 1999).

Por lo tanto, el verdadero problema sin solucionar de la cinemática directa radica en implementar los métodos numéricos actuales para encontrar un algoritmo que rechace las singularidades del conjunto total de soluciones. Aún no está claro si este criterio podrá ser suficiente para eliminar no todas, sino una no posible solución. También se deben mejorar los tiempos de cómputo de estos pues la complejidad de encontrar todas las soluciones aumenta con el número de grados de libertad.

Para facilitar el control de estos mecanismos, se puede considerar disponer de sensores redundantes, es decir colocar un mayor número de sensores que de dispositivos actuadores, o bien la variante de considerar un número mínimo de sensores, definiendo un solo elemento sensor por cada articulación actuada que exista.

Capítulo II Modelo Cinemático de la Plataforma

2.1 Modelado de robots paralelos

Un robot para ser útil tiene que ser controlado es decir, debe presentar un comportamiento acorde a una respuesta deseada. Para ello es necesario previamente disponer de un modelo matemático del comportamiento del sistema, que permita generar adecuadamente las acciones de control requeridas. El modelo matemático del robot implica el análisis del mecanismo: su estructura, geometría y mecánica, así como la obtención de ecuaciones que representen la cinemática y dinámica del sistema con precisión (Lizcano Gómez et al., 2005).

La mecánica es la rama de la física que se ocupa del estado de reposo o movimiento de cuerpos sometidos a la acción de fuerzas. La mecánica vectorial de cuerpos rígidos se divide en dos áreas: estática y dinámica. La estática tiene que ver con el equilibrio de un cuerpo que permanece en reposo o que se mueve con velocidad constante. La dinámica se ocupa del movimiento acelerado de un cuerpo y se divide en dos partes: cinemática y cinética (Cisneros Limón, 2006):

- La cinemática se ocupa de los aspectos geométricos y temporales del movimiento sin atender a las fuerzas y/o torques que lo producen. Entre dichos aspectos se encuentran la posición, velocidad y aceleración. En un robot las variables de las articulaciones están relacionadas con la posición y orientación del elemento terminal, mediante las limitantes impuestas por ellas mismas. Estas relaciones cinemáticas son el principal interés en el estudio de la cinemática de los robots.
- La cinética se ocupa de las fuerzas y/o torques requeridos para causar el movimiento de un sistema de cuerpos. En un robot el elemento terminal debe ser guiado a través de una determinada trayectoria, tomando en

cuenta ciertas características de movimiento deseadas. Un conjunto de funciones de fuerza y/o torque deben ser aplicadas en las articulaciones activas para producir tal movimiento. Sin embargo, estas relaciones no sólo dependen de atributos espaciales y temporales, sino también de la masa e inercia de los eslabones, la carga soportada por el robot y otras fuerzas externas, como por ejemplo la fricción.

En robótica, la mecánica es empleada como herramienta para obtener el modelo matemático de un sistema, en forma de ecuaciones que permitan controlarlo. Según la terminología manejada en dicho ámbito el término dinámica corresponde al concepto denotado como cinética en la mecánica vectorial. De esta forma, el modelo de un sistema considera tanto su cinemática como su dinámica (Cisneros Limón, 2006). En este trabajo solo se analizará el comportamiento cinemático de la plataforma.

2.1.1 Modelo cinemático

En particular la cinemática estudia la relación entre las variables espaciales ligadas a las articulaciones (coordenadas articulares), y las variables que proporcionan la posición y orientación del extremo del manipulador (coordenadas operacionales). La cinemática tiene dos problemas a resolver:

- **Problema cinemático directo:** Para un manipulador dado, conocidos los parámetros geométricos de cada eslabón, y las coordenadas articulares, ¿Cuál será la situación del elemento terminal?

- **Problema cinemático inverso:** Para un manipulador dado, conocida la situación deseada del elemento terminal, ¿Es posible alcanzarla?, y si es así: ¿Cuales serán las coordenadas articulares?, ¿Representan una configuración única?

El modelo cinemático inverso se puede obtener mediante un Método Analítico o un Método Geométrico (Merlet, 2006). A diferencia de la robótica serie, en la robótica paralela la cinemática directa resulta ser muy compleja; ya que para un mismo conjunto de longitudes de los actuadores puede haber hasta 40 soluciones diferentes. Existen en la literatura varios métodos para el cálculo geométrico de la cinemática directa; algunos de ellos permiten hallar las soluciones posibles a través del uso de polinomios que resultan del modelado geométrico de las cadenas cinemáticas de la plataforma. Generalmente estos cálculos se realizan mediante la utilización de métodos numéricos, por ejemplo el algoritmo de Newton-Raphson, Métodos de Euler, Liebman, etc (Domínguez Velazco, 2007).

2.1.2 Modelo dinámico

El modelo dinámico relaciona las fuerzas y pares aplicados en las articulaciones; los parámetros dimensionales del robot: longitud, masas e inercias de sus elementos; así como la localización del manipulador, definida por las variables articulares o por las coordenadas de localización del extremo, con sus derivadas: velocidad y aceleración.

La dinámica inversa relaciona la trayectoria a seguir por el efector final, la velocidad y la aceleración, permitiendo determinar la fuerza de las articulaciones actuadas. El modelo dinámico inverso expresa las fuerzas o pares que intervienen en función de la evolución de las coordenadas articulares y sus derivadas (Domínguez Velazco, 2007).

Por su parte la dinámica directa permite, conociendo las fuerzas o torques de las articulaciones actuadas determinar la trayectoria a seguir por el efector final. El modelo dinámico directo expresa la evolución temporal de las coordenadas articulares del robot en función de las fuerzas y pares que intervienen (Domínguez Velazco, 2007).

Al igual que en los manipuladores series, diversos principios de la dinámica han sido empleados por los investigadores para hallar las ecuaciones que modelan el comportamiento de los robots paralelos. Generalmente se utilizan las ecuaciones de Newton-Euler y las de Lagrange-Euler; estas conllevan a la resolución principalmente de dos tipos de modelos.

El primero de ellos se trata de un sistema aumentado, en el cual las ecuaciones de restricción, debido a la configuración cerrada del mecanismo, son incluidas a través de los Multiplicadores de Lagrange. En la obtención de dicho sistema de ecuaciones, pueden ser empleados algoritmos recursivos eficientes, desarrollados originalmente para cadenas abiertas. Sin embargo, es bien conocido que la solución de un sistema diferencial es laboriosa desde el punto de vista numérico, presentándose la posibilidad de incumplir con las restricciones cinemáticas (Díaz et al., 2007).

El segundo modelo matemático que se podría conformar, consiste en un sistema reducido, donde las ecuaciones de movimiento están constituidas por un número de ecuaciones ordinarias, igual a los grados de libertad del sistema.

Aunque este procedimiento presenta la ventaja de obtener un número mínimo de ecuaciones y que, adicionalmente las ecuaciones obtenidas son ecuaciones diferenciales ordinarias, ésta metodología dificulta la utilización de algoritmos recursivos que permitan determinar sistemáticamente el modelo. Adicionalmente, obliga a la construcción de un modelo diferente para cada manipulador, haciendo aún más complicada su obtención (Díaz et al., 2007).

2.2 Descripción de la plataforma

La plataforma de simulación de sello *SIMPRO* es producida por CIDSIM, siendo el propósito inicial su utilización en hoteles y parques de diversiones, con fines recreativos. La misma consta de una plataforma fija, la cual está conectada al

efector final por tres cadenas cinemáticas independientes, actuadas por cilindros neumáticos lineales, según se muestra en la Figura 2.1.

Sobre la parte superior del efector final se ubica una cabina con un monitor, mediante este se representa la simulación de un determinado entorno virtual, que a su vez servirá para definir los movimientos y sensaciones a experimentar por el personal que se encuentra en el interior de la cabina. En la misma se pueden simular vehículos aéreos, marítimos y terrestres; ligeros o pesados, montañas rusas, etc., en dependencia del entorno virtual seleccionado por el usuario.



Figura 2.1 Plataforma de 3 gdl producida por CIDSIM.

La estructura mecánica está diseñada de manera tal que los movimientos experimentados en la plataforma se logran mediante la acción de los tres cilindros neumáticos que constituyen las articulaciones actuadas prismáticas. El desplazamiento lineal de los actuadores le imprimen al efector final un movimiento de elevación (traslación a lo largo del eje z'), y dos rotaciones alrededor de los ejes perpendiculares entre si x' , y' (denominados movimientos de alabeo y cabeceo respectivamente), lográndose de ésta forma los tres grados de libertad del sistema. Estos movimientos permiten una representación lo suficientemente real de las distintas situaciones implementadas en el mundo virtual.

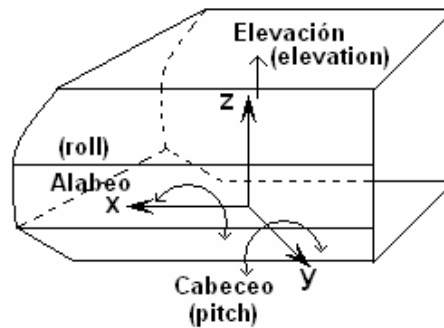


Figura 2.2 Representación del movimiento de la cabina indicando las rotaciones sobre dos ejes (ejes x' , y') y el desplazamiento a lo largo del eje z' .

Adicionalmente a las tres cadenas cinemáticas actuadas, dicho mecanismo posee dos cuerpos rígidos que unen la base fija mediante articulaciones pasivas del tipo rotacional, y al efector final mediante articulaciones pasivas del tipo cilíndrica y universal respectivamente, los mismos se encargan de proporcionar al sistema la estabilidad y fortaleza mecánica necesarias, pero a su vez restringen la movilidad, es decir imposibilitan la rotación alrededor del eje z (guiñada) y el desplazamiento en los ejes x , y . Dichas limitaciones las hemos considerado en este trabajo como restricciones del sistema. Los cuerpos rígidos mencionados anteriormente se indican en la Figura 2.5 por los puntos $A6-A7-C3-C1$ y $A4-A5-C4-C5-B4$ respectivamente.

En la unión del efector final con la base fija intervienen dos cadenas cinemáticas idénticas del tipo RPS (correspondiente a los pistones 2 y 3) y una del tipo $RPSU$ (correspondiente al pistón 1) como se aprecia en la arquitectura de la Figura 2.3.

La plataforma de simulación *SIMPRO* constituye un robot paralelo de tres grados de libertad donde los movimientos de alabeo y cabeceo se pueden lograr con la acción de uno o varios actuadores, mientras que el desplazamiento lineal por el eje z sólo es posible alcanzarlo con la acción en conjunto de los tres actuadores, por lo que podemos decir que este mecanismo se comporta de forma acoplada.

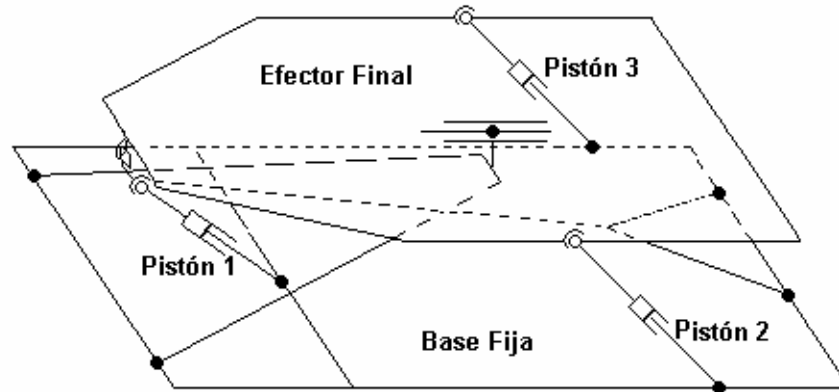


Figura 2.3 Arquitectura de la Plataforma de 3 gdl desarrollada por CIDSIM.

2.3 Descripción geométrica

Antes de aplicar algún método computacional para la solución cinemática de un mecanismo es necesario hacer un análisis previo de la geometría del sistema, donde se defina la ubicación espacial de sus articulaciones en relación a un sistema de coordenada previamente establecido (Bonev, 2002).

En geometría analítica del espacio se emplean varios sistemas de coordenadas, el más usado es el rectangular, que considera tres planos mutuamente paralelos que se cortan en el punto común O , tal como se indica en la Figura 2.4. Como el punto en el espacio va a localizarse con referencia a estos elementos, los planos se llaman *planos coordenados*, las rectas de intersección de estos planos *ejes coordenados* y el punto O , *origen del sistema de coordenadas rectangulares* (Lehmann, 1966).

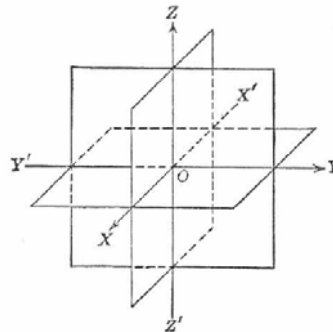


Figura 2.4 Sistema de coordenadas rectangulares.

Teniendo en cuenta lo anterior estamos en libertad de designar los ejes coordenados como queramos. Un convenio es el indicado en la Figura 2.4; se dice entonces que el sistema de coordenada es de *mano derecha*. Otro convenio muy extendido es el que utilizaremos en este trabajo, que se diferencia del anterior en que los ejes XX' y YY' están intercambiados; en este caso se dice que el sistema de coordenadas es un sistema de *mano izquierda* (Lehmann, 1966).

El diagrama esquemático del robot paralelo analizado se muestra en la Figura 2.5, donde también se aprecia el sistema de coordenadas fijo (x y z) situado en el centro de la base y el sistema de referencia móvil (x' y' z') ubicado en el efector final de forma tal que el eje z y z' están orientados en el mismo sentido. El punto P se hace coincidir con el centro O' .

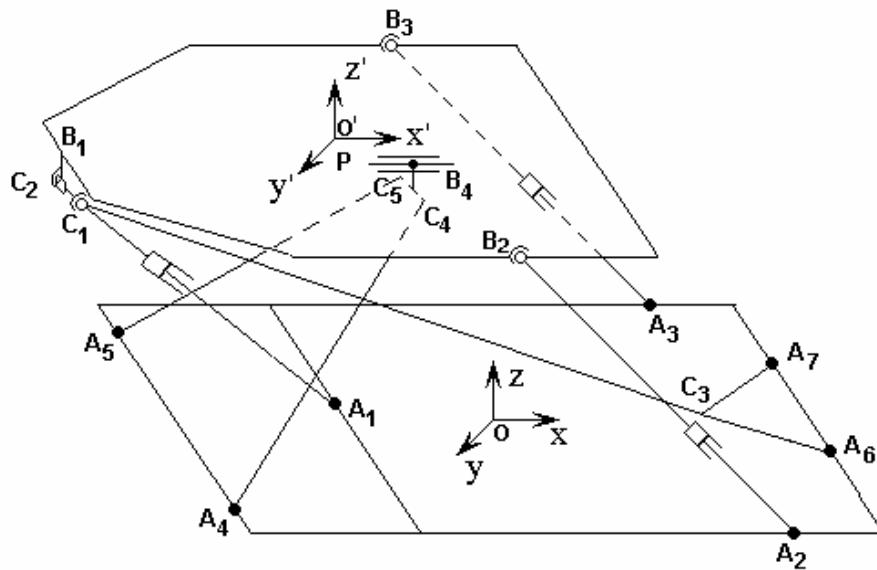


Figura 2.5 Representación de los ejes de coordenadas fijo y móvil y nomenclatura de la plataforma de 3 gdl.

2.3.1 Definición de los puntos de la base

En nuestra plataforma el plano de la base está definido por los puntos $A1$, $A2$ y $A3$. El resto de los puntos ($A4$, $A5$, $A6$, $A7$, $A45$, y $A67$) forman parte de este plano. Para facilitar el análisis cinemático hemos decidido agrupar todos los

puntos que pertenecen al plano de la base fija, formando un rectángulo en cuyo centro ubicamos el sistema de coordenadas fijo (x,y,z).

Los rectángulos que caracterizan tanto a la base como el efector final, se pueden definir completamente mediante dos magnitudes: largo y ancho; para este análisis consideramos el largo de la base y el ancho como L_A y W_A respectivamente. Para obtener la ubicación exacta de los puntos es necesario definir un conjunto de longitudes que son conocidas, siendo las mismas: distancia del lateral derecho del rectángulo al punto A_2 (variable: d); la distancia del lateral izquierdo a la barra transversal (variable: d_1), distancia del lateral del rectángulo al punto A_6 (variable: e) y la distancia del lateral al punto A_4 (variable: e_1), según se observa en la Figura 2.6.

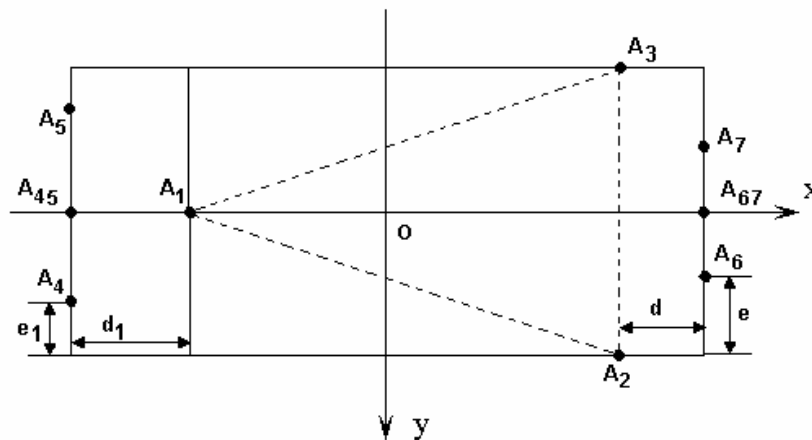


Figura 2.6 Definición de los puntos en la base fija (plano x y z).

De esta forma, y considerando la simetría de la figura con respecto al eje x, se define la ubicación de todos y cada uno de estos puntos respecto a las coordenadas x, y, z que define cada ubicación particular en el espacio de cada punto. Ello queda establecido en el conjunto de ecuaciones de la (2.2) a la (2.10) según se enuncian a continuación.

$$A_1 = \begin{bmatrix} A_{1x} & ; & A_{1y} & ; & A_{1z} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} A_{2x} & ; & A_{2y} & ; & A_{2z} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} A_{3x} & ; & A_{3y} & ; & A_{3z} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} A_{4x} & ; & A_{4y} & ; & A_{4z} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$A_5 = \begin{bmatrix} A_{5x} & ; & A_{5y} & ; & A_{5z} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$A_6 = \begin{bmatrix} A_{6x} & ; & A_{6y} & ; & A_{6z} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$A_7 = \begin{bmatrix} A_{7x} & ; & A_{7y} & ; & A_{7z} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$$A_{67} = \begin{bmatrix} A_{67x} & ; & A_{67y} & ; & A_{67z} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$A_{45} = \begin{bmatrix} A_{45x} & ; & A_{45y} & ; & A_{45z} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Sustituyendo las variables de nuestra plataforma en particular en el conjunto de ecuaciones anteriores, tenemos:

$$A_1 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}(L_a - d_1) & ; & 0 & ; & 0 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}L_a - d & ; & \frac{1}{2}W_a & ; & 0 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}L_a - d & ; & -\frac{1}{2}W_a & ; & 0 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}L_a & ; & \frac{1}{2}W_a - e_1 & ; & 0 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

$$A_5 = \left[-\frac{1}{2}L_a ; -\frac{1}{2}(W_a - e_1) ; 0 \right] \quad (2.15)$$

$$A_6 = \left[\frac{1}{2}L_a ; \frac{1}{2}W_a - e ; 0 \right] \quad (2.16)$$

$$A_7 = \left[\frac{1}{2}L_a ; -\frac{1}{2}(W_a - e) ; 0 \right] \quad (2.17)$$

$$A_{45} = \left[-\frac{1}{2}L_a ; 0 ; 0 \right] \quad (2.18)$$

$$A_{67} = \left[\frac{1}{2}L_a ; 0 ; 0 \right] \quad (2.19)$$

2.3.2 Definición de los puntos del efector final

Para definir los puntos del efector final realizaremos un análisis similar al efectuado en el epígrafe anterior. Definimos las variables L_B y W_B como el largo y el ancho del efector final respectivamente. Las longitudes conocidas de la plataforma móvil que nos interesan son: la distancia del lateral al punto B_4 denotada como s y la distancia del lateral al punto B_2 la cual denominamos s_1 .

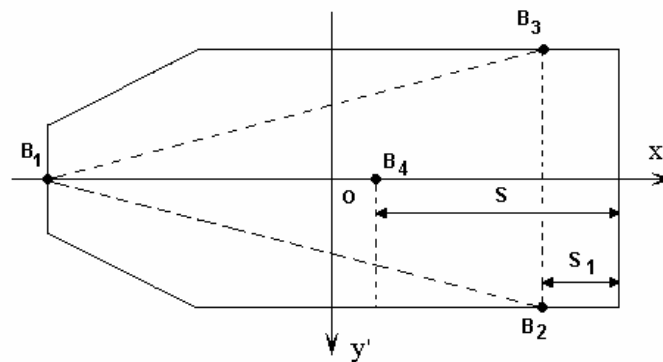


Figura 2.7 Definición de los puntos en el efector final (plano x' y' z').

De esta forma, y considerando la simetría de la figura con respecto al eje x, se pueden definir las coordenadas para cada uno de los puntos en función de las variables conocidas como sigue:

$$B_1 = [B_{1x}' ; B_{1y}' ; B_{1z}'] \quad (2.20)$$

$$B_2 = [B_{2x}' ; B_{2y}' ; B_{2z}'] \quad (2.21)$$

$$B_3 = [B_{3x}' ; B_{3y}' ; B_{3z}'] \quad (2.22)$$

$$B_4 = [B_{4x}' ; B_{4y}' ; B_{4z}'] \quad (2.23)$$

Sustituyendo las variables de nuestra plataforma en particular en el conjunto de ecuaciones anteriores, tenemos:

$$B_1 = \left[-\frac{1}{2}L_b ; 0 ; 0 \right] \quad (2.24)$$

$$B_2 = \left[\frac{1}{2}L_b^{-s_1} ; \frac{1}{2}W_b ; 0 \right] \quad (2.25)$$

$$B_3 = \left[\frac{1}{2}L_b^{-s_1} ; -\frac{1}{2}W_b ; 0 \right] \quad (2.26)$$

$$B_4 = \left[\frac{1}{2}L_b^{-s} ; 0 ; 0 \right] \quad (2.27)$$

Es válido aclarar que la componente en z de los puntos B1, B2, B3 y B4 es nula, ya que los mismos forman parte del plano del efector final. No obstante de ser necesario podemos adecuar el conjunto de ecuaciones anteriores, para referir la ubicación de dichos puntos respecto al plano de la base, para ello solo tenemos que ajustar las coordenadas *Biz*.

Es necesario definir también las coordenadas de los puntos C_1 y C_2 como se muestra en la Figura 2.8 donde d_2 y d_3 son la distancia del lateral a la intersección de la proyección de estos puntos con la base y h_1 , h_2 son las longitudes desde la base hasta cada uno de los puntos respectivamente.

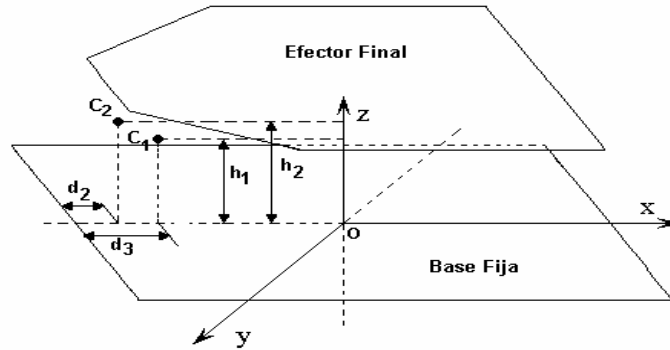


Figura 2.8 Definición de los puntos entre el efector final y la base para la posición inicial de la plataforma.

$$C_1 = \begin{bmatrix} C_{1x} ; C_{1y} ; C_{1z} \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} C_{2x} ; C_{2y} ; C_{2z} \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

Sustituyendo las variables de nuestra plataforma en particular en el conjunto anterior de ecuaciones, tenemos:

$$C_1 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}L_A - d_3 ; 0 ; h_1 \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}L_A - d_2 ; 0 ; h_2 \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

2.4 Modelo Cinemático Inverso

La orientación de la plataforma móvil se representa mediante el uso de los ángulos de Euler en su convenio de ejes X-Y-Z, y sus ángulos de alabeo (θ), cabeceo (φ) y guiñada (ψ) (García Sanz and Motilva Casado, 2005, Bonev et al., 2003, Staicu

La ecuación para este vector es:

$$\overline{A_1 C_1} = \overline{A_1 O} + \overline{PB_1} + R_{x' y' z'}^{x' y' z'} \left(\overline{OP} + \overline{B_1 C_2} + \overline{C_2 C_1} \right) \quad (2.34)$$

Conociendo que:

$$\overline{OP} = \begin{bmatrix} P_x' & P_y' & P_z' \end{bmatrix}^T \quad (2.35)$$

$$\overline{A_1 O} = \begin{bmatrix} A_{1x} & A_{1y} & A_{1z} \end{bmatrix}^T \quad (2.36)$$

$$\overline{PB_1} = \begin{bmatrix} B_{1x}' & B_{1y}' & B_{1z}' \end{bmatrix}^T \quad (2.37)$$

$$\overline{B_1 C_2} = \begin{bmatrix} \overline{B_1 C_2}|_x & \overline{B_1 C_2}|_y & \overline{B_1 C_2}|_z \end{bmatrix}^T \quad (2.38)$$

$$\overline{C_2 C_1} = \begin{bmatrix} \overline{C_2 C_1}|_x & \overline{C_2 C_1}|_y & \overline{C_2 C_1}|_z \end{bmatrix}^T \quad (2.39)$$

Antes de continuar con el análisis es necesario para un mejor entendimiento del mismo enunciar algunos de los teoremas matemáticos que hemos de aplicar.

Teorema 1:

En un sistema coordenado lineal, la longitud del segmento dirigido que une dos puntos dados se obtiene, en magnitud y signo, restando la coordenada del extremo de la coordenada del origen (Lehmann, 1966).

Teorema 2:

La distancia d entre los dos puntos $P1 (X_1, Y_1, Z_1)$ y $P2 (X_2, Y_2, Z_2)$ está dada por la fórmula siguiente (Lehmann, 1966):

$$d = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2 + (Z_2 - Z_1)^2} \quad (2.40)$$

Aplicando el Teorema 1 para el vector $\overline{A_2B_2}$ podemos decir que:

$$\overline{B_1C_2}|_x = C_{2x} - B_{1x} \quad (2.41)$$

$$\overline{B_1C_2}|_y = C_{2y} - B_{1y} \quad (2.42)$$

$$\overline{B_1C_2}|_z = C_{2z} - B_{1z} \quad (2.43)$$

$$\overline{C_2C_1}|_x = C_{1x} - C_{2x} \quad (2.44)$$

$$\overline{C_2C_1}|_y = C_{1y} - C_{2y} \quad (2.45)$$

$$\overline{C_2C_1}|_z = C_{1z} - C_{2z} \quad (2.46)$$

Las cadenas cinemáticas pasivas no permiten que nuestro mecanismo realice movimientos de guiñada ni desplazamiento en los ejes x',y' por lo que se consideran las siguientes restricciones:

$$P_x = 0 \quad \text{Desplazamiento cero en el eje } x \quad (2.47)$$

$$P_y = 0 \quad \text{Desplazamiento cero en el eje } y \quad (2.48)$$

$$\psi = 0 \quad \text{Rotación nula alrededor del eje } z \quad (2.49)$$

Sustituyendo en la ecuación 2.34 la localización de los puntos descrita anteriormente en las ecuaciones de la (2.35) a la (2.39), así como las restricciones (2.47) a la (2.49) obtenemos:

$$\overline{A_1 C_1} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}L_a + d_1 - \frac{1}{2}L_b + C(\varphi)\left(-\frac{1}{2}L_a + \frac{1}{2}L_b + d_3\right) + S(\varphi)\left(P_{z'} - h + h_1\right) \\ S(\theta)S(\varphi)\left(-\frac{1}{2}L_a + \frac{1}{2}L_b + d_3\right) - S(\theta)C(\varphi)\left(P_{z'} - h + h_1\right) \\ -C(\theta)S(\varphi)\left(-\frac{1}{2}L_a + \frac{1}{2}L_b + d_3\right) + C(\theta)S(\varphi)\left(P_{z'} - h + h_1\right) \end{bmatrix} \quad (2.50)$$

Las proyecciones ortogonales de $\overline{A_1 C_1}$ sobre cada uno de los ejes coordenados, quedan definidas como:

$$\overline{A_1 C_1} \Big|_x = -\frac{1}{2}L_a + d_1 - \frac{1}{2}L_b + C(\varphi)\left(-\frac{1}{2}L_a + \frac{1}{2}L_b + d_3\right) + S(\varphi)\left(P_{z'} - h + h_1\right) \quad (2.51)$$

$$\overline{A_1 C_1} \Big|_y = S(\theta)S(\varphi)\left(-\frac{1}{2}L_a + \frac{1}{2}L_b + d_3\right) - S(\theta)C(\varphi)\left(P_{z'} - h + h_1\right) \quad (2.52)$$

$$\overline{A_1 C_1} \Big|_z = -C(\theta)S(\varphi)\left(-\frac{1}{2}L_a + \frac{1}{2}L_b + d_3\right) + C(\theta)S(\varphi)\left(P_{z'} - h + h_1\right) \quad (2.53)$$

Aplicando el Teorema 2 al vector $\overline{A_1 C_1}$ podemos plantear que el desplazamiento de dicho vector es:

$$L_1^2 = \overline{A_1 C_1} \Big|_x^2 + \overline{A_1 C_1} \Big|_y^2 + \overline{A_1 C_1} \Big|_z^2 \quad (2.54)$$

Por simplicidad definimos las variables intermedias q_1 y q_2 :

$$q_1 = -\frac{1}{2}L_a + \frac{1}{2}L_b + d_3 \quad q_2 = P_{z'} - h + h_1$$

La solución de la expresión (2.54) da lugar a la ecuación que se muestra a continuación:

$$L_1 = \sqrt{\left(-\frac{1}{2}L_a + d_1 - \frac{1}{2}L_b + C(\varphi)q_1 + S(\varphi)q_2\right)^2 + \left(S(\theta)S(\varphi)q_1 - S(\theta)C(\varphi)q_2\right)^2} + \sqrt{\left(-C(\theta)S(\varphi)q_1 + C(\theta)S(\varphi)q_2\right)^2} \quad (2.55)$$

De esta forma queda definido el desplazamiento del vector $\overline{A_1C_1}$ en función de la orientación del efector final, expresión mediante la cual se puede determinar la elongación del pistón No.1.

Para establecer la ecuación que relaciona el desplazamiento del pistón 2 con la orientación del efector final se define el vector de cierre siguiente:

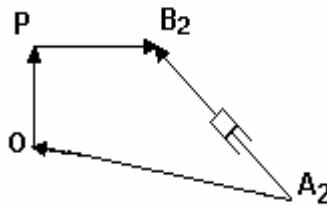


Figura 2.10 Representación del vector de cierre correspondiente a la cadena cinemática del pistón 2.

La ecuación para este caso se expresa como:

$$\overline{A_2B_2} = \overline{A_2O} + R_{x' y' z'}^{x' y' z'} \overline{OP} + \overline{PB_2} \quad (2.56)$$

Donde:

$$\overline{A_2O} = \begin{bmatrix} A_{2x} & A_{2y} & A_{2z} \end{bmatrix}^T \quad (2.57)$$

$$\overline{PB_2} = \begin{bmatrix} B_{2x'} & B_{2y'} & B_{2z'} \end{bmatrix}^T \quad (2.58)$$

Solucionado la ecuación (2.56) obtenemos:

$$\overline{A_2 B_2} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}L_a - d + S(\varphi)P_{z'} + \frac{1}{2}L_b - s_1 \\ \frac{1}{2}W_a - S(\theta)C(\varphi)P_{z'} + \frac{1}{2}W_b \\ C(\theta)S(\varphi)P_{z'} \end{bmatrix} \quad (2.59)$$

De igual manera las proyecciones ortogonales de $\overline{A_2 B_2}$ son:

$$\overline{A_2 B_2} \Big|_x = \frac{1}{2}L_a - d + S(\varphi)P_{z'} + \frac{1}{2}L_b - s_1 \quad (2.60)$$

$$\overline{A_2 B_2} \Big|_y = \frac{1}{2}W_a - S(\theta)C(\varphi)P_{z'} + \frac{1}{2}W_b \quad (2.61)$$

$$\overline{A_2 B_2} \Big|_z = C(\theta)S(\varphi)P_{z'} \quad (2.62)$$

Aplicando el Teorema 2 al vector $\overline{A_2 B_2}$ tenemos:

$$L_2^2 = \overline{A_2 B_2} \Big|_x^2 + \overline{A_2 B_2} \Big|_y^2 + \overline{A_2 B_2} \Big|_z^2 \quad (2.63)$$

$$L_2 = \sqrt{\left(\frac{1}{2}L_a - d + S(\varphi)P_{z'} + \frac{1}{2}L_b - s_1 \right)^2 + \left(\frac{1}{2}W_a - S(\theta)C(\varphi)P_{z'} + \frac{1}{2}W_b \right)^2 + \left(C(\theta)S(\varphi)P_{z'} \right)^2} \quad (2.64)$$

De esta forma queda definido el desplazamiento del vector $\overline{A_2B_2}$ en función de la orientación del efector final, expresión mediante la cual se puede calcular la elongación del pistón No.2.

Por último para el pistón 3 se define el vector de cierre mostrado a continuación.

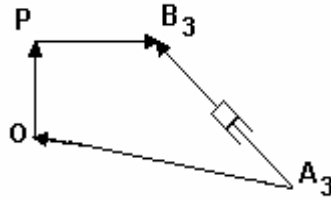


Figura 2.11 Representación del vector de cierre correspondiente a la cadena cinemática del pistón 3.

De igual manera queda definido el mismo como:

$$\overline{A_3B_3} = \overline{A_3O} + R_{x' y' z'}^{x y z} \overline{OP'} + \overline{PB_3} \quad (2.65)$$

Siendo:

$$\overline{A_3O} = \begin{bmatrix} A_{3x} & A_{3y} & A_{3z} \end{bmatrix}^T \quad (2.66)$$

$$\overline{PB_3} = \begin{bmatrix} B_{3x'} & B_{3y'} & B_{3z'} \end{bmatrix}^T \quad (2.67)$$

Sustituyendo en la ecuación 2.65 la localización de los puntos tenemos que:

$$\overline{A_3B_3} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}L_a - d + S(\varphi)P_{z'} + \frac{1}{2}L_b - s_1 \\ -\frac{1}{2}W_a - S(\theta)C(\varphi)P_{z'} - \frac{1}{2}W_b \\ C(\theta)S(\varphi)P_{z'} \end{bmatrix} \quad (2.68)$$

Por tanto:

$$\overline{A_3B_3}|_x = \frac{1}{2}L_a - d + S(\varphi)P_{z'} + \frac{1}{2}L_b - s_1 \quad (2.69)$$

$$\overline{A_3B_3}|_y = -\frac{1}{2}W_a - S(\theta)C(\varphi)P_{z'} - \frac{1}{2}W_b \quad (2.70)$$

$$\overline{A_3B_3}|_z = C(\theta)S(\varphi)P_{z'} \quad (2.71)$$

Entonces:

$$L_3^2 = \overline{A_3B_3}|_x^2 + \overline{A_3B_3}|_y^2 + \overline{A_3B_3}|_z^2 \quad (2.72)$$

Resolviendo la ecuación (2.72) llegamos a la definición del desplazamiento del vector $\overline{A_3B_3}$ en función de la orientación del efector final, la cual es mostrada a continuación y nos permite obtener la elongación del pistón No.3.

$$L_3 = \sqrt{\left(\frac{1}{2}L_a - d + S(\varphi)P_{z'} + \frac{1}{2}L_b - s_1\right)^2 + \left(-\frac{1}{2}W_a - S(\theta)C(\varphi)P_{z'} - \frac{1}{2}W_b\right)^2 + \left(C(\theta)S(\varphi)P_{z'}\right)^2} \quad (2.73)$$

Las ecuaciones (2.55), (2.64) y (2.73) expresan los desplazamientos absolutos que experimentan los vectores $\overline{A_1C_1}$, $\overline{A_2B_2}$ y $\overline{A_3B_3}$ respectivamente para una determinada orientación de la plataforma móvil. En la Figura 2.12 se puede apreciar que para determinar el desplazamiento real del vástago de los cilindros es necesario sustraer a la longitud obtenida, el valor de la posición inicial del pistón.

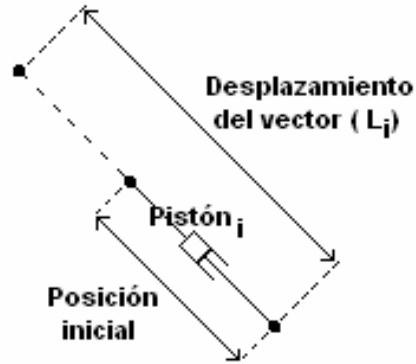


Figura 2.12 Desplazamiento de lo pistones.

Teniendo en cuenta lo antes planteado y aplicando el Teorema 2 para los vectores $A_1C_1|xyz$, $A_2B_2|xyz$ y $A_3B_3|xyz$ en su posición inicial calculamos el desplazamiento del vástago de los cilindros a partir de las expresiones matemáticas siguientes:

$$Desp1 = L_1 - \sqrt{(A_{1x} - C_{1x})^2 + (A_{1y} - C_{1y})^2 + (A_{1z} - C_{1z})^2} \quad (2.74)$$

$$Desp2 = L_2 - \sqrt{(A_{2x} - B_{2x})^2 + (A_{2y} - B_{2y})^2 + (A_{2z} - B_{2z})^2} \quad (2.75)$$

$$Desp3 = L_3 - \sqrt{(A_{3x} - B_{3x})^2 + (A_{3y} - B_{3y})^2 + (A_{3z} - B_{3z})^2} \quad (2.76)$$

2.5 Modelo Cinemático Directo

La determinación cinemática inversa de un robot paralelo es relativamente más simple que la cinemática directa (Aracil et al., 2006, Merlet, 2006, Staicu et al., 2006). Las ecuaciones a resolver en la cinemática directa son no lineales y en ocasiones suelen tener soluciones múltiples.

Para solucionar la cinemática directa de nuestra plataforma partiremos del análisis realizado en el epígrafe anterior.

Replanteando las ecuaciones (2.34), (2.56) y (2.65) tenemos que:

$$R_{x y z}^{x' y' z'} \left(\overline{OP} + \overline{B_1 C_2} + \overline{C_2 C_1} \right) = \overline{A_1 O} + \overline{PB_1} - \overline{A_1 C_1} \quad (2.77)$$

$$R_{x y z}^{x' y' z'} \overline{OP} = \overline{A_2 O} + \overline{PB_2} - \overline{A_2 B_2} \quad (2.78)$$

$$R_{x y z}^{x' y' z'} \overline{OP} = \overline{A_3 O} + \overline{PB_3} - \overline{A_3 B_3} \quad (2.79)$$

Despejamos de las expresiones (2.74), (2.75) y (2.76) las variables $L1$, $L2$, $L3$ y sustituimos convenientemente en (2.77), (2.78) y (2.79) para obtener:

$$R_{x y z}^{x' y' z'} \left(\overline{OP} + \overline{B_1 C_2} + \overline{C_2 C_1} \right) = \overline{A_1 O} + \overline{PB_1} - \left(\text{Desp1} + \sqrt{(A_{1x} - C_{1x})^2 + (A_{1y} - C_{1y})^2 + (A_{1z} - C_{1z})^2} \right) \quad (2.80)$$

$$R_{x y z}^{x' y' z'} \overline{OP} = \overline{A_2 O} + \overline{PB_2} - \left(\text{Desp2} + \sqrt{(A_{2x} - B_{2x})^2 + (A_{2y} - B_{2y})^2 + (A_{2z} - B_{2z})^2} \right) \quad (2.81)$$

$$R_{x y z}^{x' y' z'} \overline{OP} = \overline{A_3 O} + \overline{PB_3} - \left(\text{Desp3} + \sqrt{(A_{3x} - B_{3x})^2 + (A_{3y} - B_{3y})^2 + (A_{3z} - B_{3z})^2} \right) \quad (2.82)$$

El conjunto de ecuaciones de (2.80) a la (2.82) conforman un sistema de ecuaciones de tres variables independientes (Desp1 , Desp2 , Desp3) que representan los desplazamientos lineales de los actuadores y tres incógnitas (φ , θ , Pz') que identifican a la orientación de la plataforma móvil.

La solución de dicho sistema de ecuaciones no es única y su procedimiento de cálculo suele ser complejo, siendo necesario emplear métodos numéricos para su

resolución (Domínguez Velazco, 2007, Bonev, 2002, Aguirre et al., 2005). En nuestro caso particular utilizamos el Matlab para desarrollar los algoritmos computacionales, que son mostrados en el Anexo I.

Hasta aquí hemos dejado desarrolladas las ecuaciones que describen el comportamiento del cinemático de nuestra plataforma, por lo que resta comprobar la validez de las mismas procediendo a efectuar la correspondiente simulación del sistema y análisis de los resultados, todo lo cual será expuesto en el siguiente capítulo.

Capítulo III Simulación de la Plataforma

3.1 Importancia de la simulación

Actualmente el diseño y desarrollo de nuevos productos o la modificación de los existentes se ha convertido en un elemento clave y fundamental para mejorar la capacidad de innovación y competitividad de las empresas industriales que mediante la simulación analizan el comportamiento de los nuevos diseños invirtiendo en ello un bajo presupuesto.

La simulación es una de las grandes herramientas de la ingeniería, la misma es utilizada para representar un proceso o fenómeno físico mediante otro más simple que permita evaluar su comportamiento y características ante una situación determinada. Hoy día la simulación se aplica en la mayoría de los sectores sociales, abarca desde el posible comportamiento que debe tener una persona ante un hecho específico hasta el entrenamiento virtual de los pilotos de aviación.

En la robótica la simulación juega un papel importante ya que permite analizar el comportamiento cinemático y dinámico del mecanismo sin necesidad de someterlo a procesos de identificación experimental que pueden dañar la estructura; también permite corregir errores en el diseño mecánico del robot y en el sistema de control que pudieran provocar accidentes y pérdidas económicas considerables.

En el mercado existe gran variedad de software de simulación para estructuras mecánicas entre los cuales se encuentran: *Abaqus*, *Adams*, *Autodesk Inventor*, *Cosmos*, *Dassault Systemes*, *Matlab*, *Solid Edge* y *Solid Work*, los cuales se caracterizan por tener la capacidad de resolver problemas relacionados con la distribución de esfuerzos, transferencia de calor, vibración, electromagnetismo, entre otros, para lo cual emplean diversos modelos matemáticos que tienen en consideración el tipo de material, estructuras, etc. Cada uno cubre una necesidad determinada por ello se debe analizar primeramente los requisitos exigidos, para

luego seleccionar el software de simulación que más se ajuste a dichos requisitos. El punto de partida siempre será el conocimiento de los elementos esenciales del modelo de simulación: interfaz gráfica, variables, objetivos, recursos, repertorio de acciones, entre otros (Navarrete Álvarez, 2007).

3.2 Simulación mediante *VirtualRobot*

VirtualRobot es un paquete de software orientado a la robótica serie desarrollado según líneas de investigación en Telerrobótica del Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática (DISA) de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) el mismo está siendo aplicado en aspectos muy variados de la investigación en campos de la robótica, pero además, es utilizado en los últimos años para la docencia en asignaturas relacionadas con la robótica, tanto en la rama informática como en la industrial. *VirtualRobot* está compuesto fundamentalmente por dos módulos de software: el *Virtual Robot Simulator (VRS)* y el *Virtual Robot Modeller (VRM)*.

El *Virtual Robot Modeller (VRM)* es un programa de modelado gráfico orientado a aplicaciones de robótica para su uso en *VRS* que permite editar objetos, piezas y entornos. La diferencia entre objetos y piezas es que mientras los objetos son elementos meramente decorativos, es decir, con información sólo gráfica para mejorar el aspecto visual de una simulación, las piezas contienen asociados sistemas de coordenadas que se utilizan para que los robots puedan interactuar con ellos, tanto mediante movimientos relativos como para realizar agarre y manipulación de las piezas. Los entornos están compuestos de objetos y piezas (Mellado Arteché, 2003).

La herramienta fundamental de este modelador es el *VRM Editor*, el cual permite modelar objetos y piezas mediante figuras geométricas prediseñadas (primitivas) a las que se le definen sus parámetros, entre los que podemos mencionar: las dimensiones, ubicación en el espacio, color, etc. Para modelar un robot es

necesario crear un objeto que contenga la definición de todas las primitivas que conforman el mecanismo; luego se conforma el fichero geométrico y el cinemático en los cuales se especifican las uniones y movimientos relativos entre las primitivas y las características cinemáticas de la estructura respectivamente.

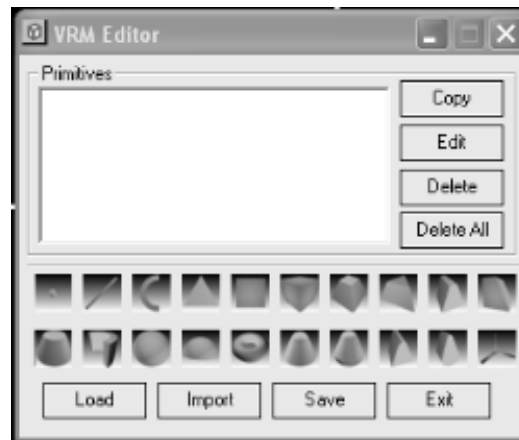


Figura 3.1 Herramienta *VRM Editor*.

El *Virtual Robot Simulator (VRS)* es básicamente una aplicación de modelado gráfico con prestaciones específicas para la simulación de robots con un conjunto de herramientas que hacen posible la simulación de robots en escenarios diseñados por el usuario, además brinda la posibilidad de programar las acciones de robots virtuales con códigos desarrollados en lenguaje C, los cuales posteriormente se pueden implementar en mecanismos que se encuentren en aplicaciones de cualquier índole (Mellado Arteché, 2003).

La herramienta fundamental de este simulador es el *VRS TeachPendant* mediante la cual se ejerce directamente el control sobre el robot con que se está trabajando, la misma permite orientar o posicionar el mecanismo introduciendo el valor deseado para cada articulación o mover cada articulación hasta lograr la orientación o posición deseada, también brinda la posibilidad de apreciar como se comporta el robot en un determinado espacio de trabajo previamente diseñado por el usuario, donde el mecanismo puede interactuar con los objetos del entorno; entre otras facilidades permite la grabación de videos y el dibujo de las trazas del

movimiento del robot en el espacio.

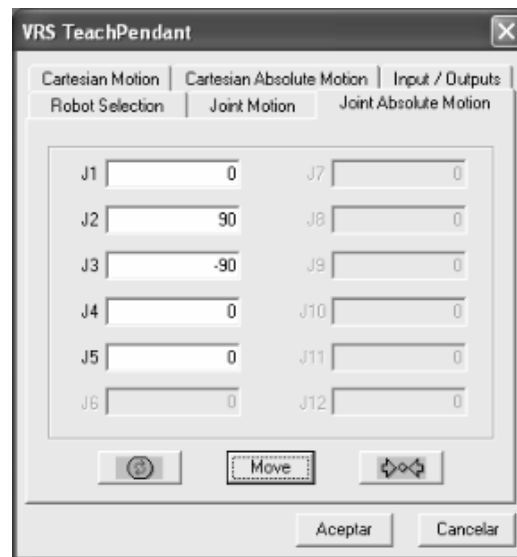


Figura 3.2 Herramienta *VRS TeachPendant*.

Entre las principales ventajas que presenta *VirtualRobot* se destaca su interfaz gráfica, la cual permite obtener imágenes nítidas desde diversos ángulos; la simplicidad y claridad con que se crean los objetos de un determinado diseño así como su ubicación en el espacio, hacen de este paquete de software un sistema interactivo y ameno que se puede utilizar para facilitar el estudio de la robótica. Como desventaja del mismo podemos decir que no tiene implementado el análisis dinámico de los mecanismos y no permite el modelado de estructuras paralelas.

A pesar de las desventajas antes expuestas nos dimos a la tarea de modelar nuestra plataforma en *Virtual Robot* iniciando de esta forma un trabajo en conjunto con el Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad Politécnica de Valencia, en pos de implementar en el mismo el tratamiento de robots compuestos por cadenas cinemáticas cerradas para poder simular estructuras paralelas, todo ello motivado a partir de identificar intereses conjuntos de colaboración en este sentido y como continuación de los trabajos que en *Virtual Robot* ha venido desarrollando nuestro centro con la UPV desde hace varios años.

De esta manera se introduciría una mejora en la utilidad de éste software al ampliar su campo de aplicación al área de la robótica paralela, representando un aporte de mejora al mismo, que también nos serviría de ayuda al desarrollo de nuestras investigaciones en esta esfera.

En tal sentido nos dimos a la tarea de realizar el modelo completo de la plataforma en *VRM* lo más detalladamente posible, para ello fue necesario analizar minuciosamente toda la estructura mecánica de la plataforma real, diseñándose el modelo que se muestra en la Figura 3.3, el cual está compuesto por 131 primitivas. En el Anexo II se describen los principales objetos y primitivas que se emplearon en la realización de las piezas que conforman la plataforma, donde se le asignó un número consecutivo a cada una. En las tablas de éste anexo aparecen los nombres asignados a cada pieza y las dimensiones (largo, ancho y alto) en milímetros de las mismas. En la última columna de cada tabla se indica el tipo de primitiva utilizado para la pieza o parte en cuestión.

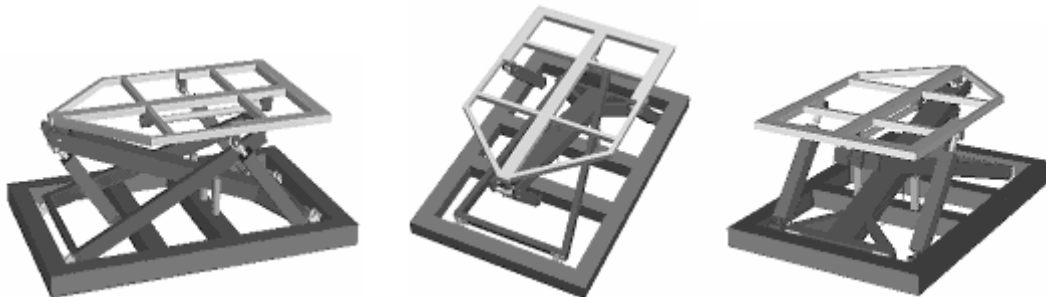


Figura 3.3 Modelo de la plataforma en *VirtualRobot*.

Gran cantidad de datos de cada una de las partes y piezas que componen la plataforma se tomaron de los ficheros disponibles del software *Autodesk Inventor*, ya que mediante el mismo estaban realizando los diseños por parte de los especialistas de *CIDSIM* del mecanismo objeto de estudio. En el Anexo III se muestran las piezas que conforman la plataforma y sus respectivas dimensiones.

El software *Autodesk Inventor* es un paquete específicamente concebido para el diseño de mecanismos articulados y estructuras mecánicas, fundamentalmente

para ser utilizado por especialistas de ingeniería mecánica y campos afines. El mismo proporciona una excelente interfaz gráfica, que propicia el trabajo en un entorno tridimensional desde donde se encuentran disponibles todas las herramientas para el modelado de cuerpos en el espacio, permitiendo el desarrollo de proyectos de diseño de elevada calidad, donde se esboza en forma de estructura desde la pieza más simple hasta todo el mecanismo en su conjunto (AutoDesk Inventor Tutorial, 2005).

3.3 Programación del modelo cinemático

El *Matlab* es un software interactivo donde los usuarios pueden crear sus propias aplicaciones, ya sea a nivel industrial para resolver algún problema práctico o en centros de estudios y/o investigaciones donde se requiera la simulación de procesos, análisis y diseño de sistemas de control, procesamiento de señales, imágenes, etc. En la robótica el *Matlab* es ampliamente usado para la simulación cinemática y dinámica de mecanismos, además es de gran ayuda a la hora de solucionar las ecuaciones que describen el comportamiento de los robots, siendo además empleado como software por excelencia para el control y simulación de robots paralelos según se reporta en la bibliografía consultada (Prattichizzo and Bicchi, 1998, Koekebakker, 2001, César Álvarez et al., 2003)

Para resolver el modelo cinemático se implementó en el *Matlab* el algoritmo que se muestra en la Figura 3.4; el mismo comienza definiendo las dimensiones físicas y parámetros de la plataforma, así como las condiciones iniciales de orientación de la misma y la ubicación en el espacio de todos y cada uno de los puntos establecidos para la conformación de las ecuaciones. Posteriormente a través de una interfaz gráfica, especialmente diseñada para dicha aplicación, le permite seleccionar al usuario, si desea proceder con el análisis cinemático inverso o directo. Esta acción invoca a que se ejecuten las líneas de códigos correspondientes al análisis seleccionado, mostrando los correspondientes resultados; los cuales son posteriormente simulados, permitiendo evaluar el

comportamiento del sistema, ya sea para visualizar una determinada posición del efector final alcanzada o una elongación específica de los pistones en dependencia del tipo de modelo cinemático escogido.

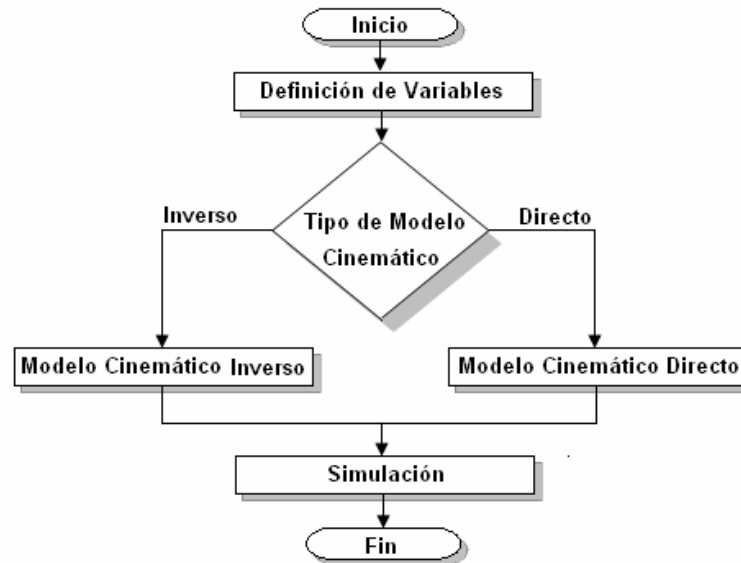


Figura 3.4 Algoritmo para realizar el análisis cinemático.

3.3.1 Empleo de la Interfaz Gráfica del Matlab

El *Matlab* cuenta entre sus ventajas con un conjunto de herramientas denominadas Interfaz Gráfica de Usuarios (Graphical User Interface -GUI-), las mismas permiten mejorar el ambiente en el que se ejecuta una determinada aplicación programada en *Matlab*. Cuando se realiza un diseño con el editor de la GUI este crea un fichero con extensión *fig* (Figura) y otro con extensión *m* (*Matlab*). En el primero se guarda la interfaz gráfica diseñada y en el segundo el programa donde están implementadas las funciones asociadas a cada uno de los elementos y objetos gráficos que contiene la interfaz.

Para implementar el algoritmo propuesto anteriormente fue necesario realizar un estudio profundo de todas las herramientas con que cuenta el editor de interfaz del

Matlab, así como las funciones que puede realizar cada uno de estos elementos en un determinado diseño. La interfaz creada para nuestro programa principal se muestra en la Figura 3.5, la misma presenta dos botones mediante los cuales el usuario selecciona el tipo de análisis cinemático que desea realizar.



Figura 3.5 Interfaz del programa principal.

La selección del análisis cinemático inverso invoca a la ventana que se muestra en la Figura 3.6, en la misma aparecen tres diálogos de texto donde se deben introducir los valores de alabeo, elevación y cabeceo respectivamente, que serán en definitiva las variables que se emplean para calcular la cinemática inversa. Dicho cálculo se efectúa al pulsar el botón *CALCULAR* el cual invoca la ejecución del algoritmo que resuelve la cinemática inversa de la plataforma, mostrando el desplazamiento de los pistones en las cajas de diálogos que aparecen en la parte inferior de la ventana; si se desea simular el resultado se debe pulsar el botón *SIMULAR* ubicado en la parte inferior de dicha ventana.

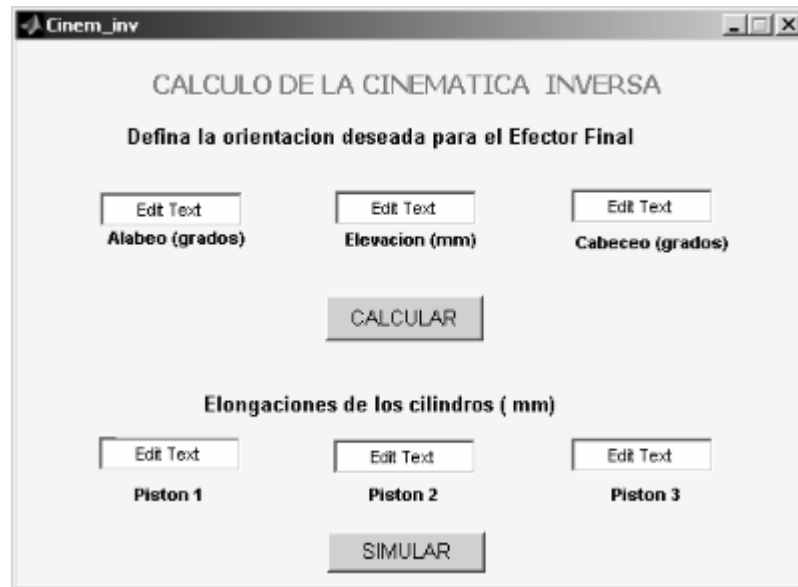


Figura 3.6 Interfaz gráfica para el cálculo de la cinemática inversa.

De manera análoga, si es seleccionado el análisis cinemático directo aparecerá la ventana de la Figura 3.7, en la cual se encuentran tres diálogos de texto donde se deben introducir el desplazamiento de cada uno de los cilindros, al pulsar el botón *CALCULAR* se ejecuta el algoritmo que resuelve la cinemática directa de la plataforma mostrando los valores de alabeo, cabeceo y elevación en los diálogos que aparece en la parte inferior de la ventana; el resultado se simula igualmente que en el caso anterior con solo pulsar el botón *SIMULAR* situado al final de la ventana.

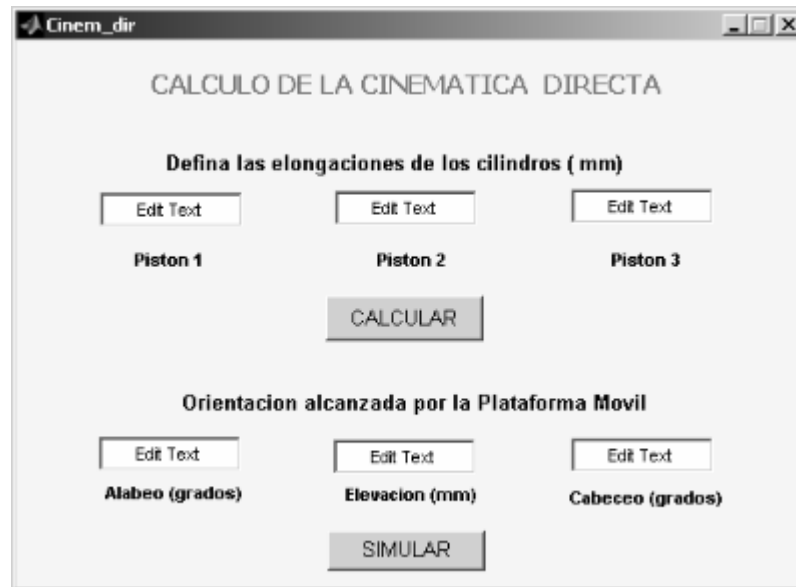


Figura 3.7 Interfaz gráfica para el cálculo de la cinemática directa.

En el Anexo I se muestra el código de programación que resuelve la cinemática inversa y directa de la plataforma y que fue confeccionado a partir del análisis presentado en el capítulo II. Es válido aclarar que para simplicidad en la comprensión del mismo, se decidió no incluir su enlace con los códigos de programa que se generan al editar la Interfaz Gráfica de Usuario, la cual de por sí genera más de 400 líneas de códigos.

3.4 Simulación del modelo de la plataforma

La simulación del modelo obtenido se realiza empleando el toolbox *SimMechanics* del Matlab, que permite modelar y simular en un ambiente apropiado estructuras mecánicas, el mismo está formado por un conjunto de bloques que representan componentes físicos como eslabones, articulaciones, fuerzas, sensores y actuadores, siendo estos dos últimos un tipo especial de bloques que posibilitan interactuar con los demás del *Simulink*, permitiendo así manipular sus variables.

Las herramientas de visualización de este software muestran y animan las representaciones simplificadas de los mecanismos en tres dimensiones, antes y durante de la simulación, usando el sistema gráfico del *Matlab*, el cual entre otras cosas permite observar el modelo geométrico del sistema desde varios ángulos, así como almacenar ficheros en formato de video donde se recoge el resultado de la simulación.

Para modelar un sistema se utilizan cuerpos rígidos y articulaciones, a los primeros entre otros parámetros se le debe especificar la ubicación exacta de cada uno de los puntos de uniones que presenta y la del centro de gravedad, dicha ubicación puede ser referida respecto al sistema de coordenadas del *Matlab*, o referente a los puntos de unión de la articulación con la que se acopla. Nótese que cada cuerpo puede tener tantos enlaces como necesite. A las articulaciones solamente se les especifica el eje o los ejes de coordenadas sobre los cuales realizarán sus movimientos.

En la simulación se tomó como referencia el sistema de coordenadas propio del *Matlab* (denominado *Machine Enviroment*) para ello se tuvo en cuenta que el mismo tiene intercambiado la posición de los ejes de guiñada y cabeceo respecto al sistema de referencia utilizado en el epígrafe 2.3 para definir la ubicación de los puntos de la plataforma.

3.4.1 Definición de los cuerpos rígidos

Para modelar la plataforma fue necesario definir nueve cuerpos rígidos de los cuales seis corresponden al émbolo y el vástago de cada uno de los pistones que conforman los mecanismos articulados, los tres restantes son las cadenas cinemáticas pasivas y el efector final. La base no se considera como un cuerpo rígido porque mecánicamente se tiene en cuenta al considerar que las articulaciones unidas a ella están ancladas a tierra, en nuestro caso definimos también como cuerpos rígidos los eslabones intermedios de las articulaciones

universal y cilíndrica para lograr así una mejor interfaz gráfica del mecanismo.

En el bloque de parametrización de cada cuerpo se especificó la masa en kilogramos, dicha información se extrajo del software *Autodesk Inventor*. No se realizó el cálculo de los tensores de inercia ya que el mismo forma parte del procedimiento para realizar el análisis dinámico, el cual no es objetivo de este trabajo, ya que solo nos interesa el comportamiento del movimiento de la plataforma sin atender a las fuerzas que influyen sobre él.

En el Anexo IV se muestran los subsistemas que representan la plataforma en el *SimMechanics*, cada subsistema está anclado a tierra, la misma no es más que el punto de unión A_i de los distintos cuerpos con la base. En este anexo también se puede apreciar la estructura funcional de los cuerpos rígidos y de uno de los pistones ya que estas cadenas cinemáticas son idénticas.

El conjunto de bloques que definen las cadenas cinemáticas actuadas se puede apreciar en la Figura 3.8 mientras que el resto de los subsistemas que representan la plataforma en el *SimMechanics* son mostrados en el Anexo IV, es válido aclarar que cada subsistema está anclado a tierra lo que representa el punto de unión A_i de los distintos cuerpos con la base.

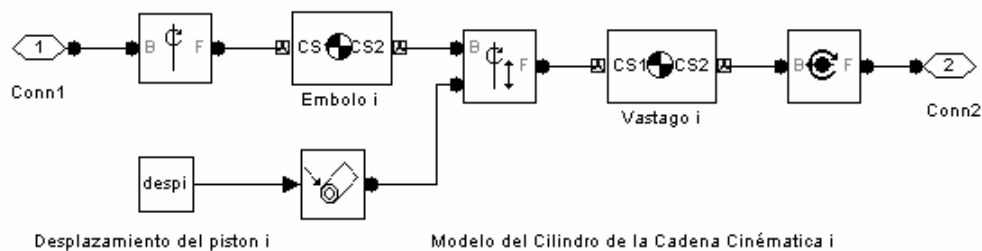


Figura 3.8 Ejemplo del modelo en *Simmechanics* de las cadenas cinemáticas actuadas.

3.5 Análisis de los resultados

El modelo cinemático obtenido permite realizar una correcta simulación del mecanismo, facilitando a su vez el análisis de la cinemática diferencial y el modelado dinámico de la plataforma, aspectos que posteriormente servirán para desarrollar una adecuada estrategia de control para el sistema.

El programa realizado en Matlab brinda la posibilidad de calcular la cinemática inversa y directa de cualquier plataforma con estructura similar al objeto de estudio ya que es posible redefinir todos los puntos de la base y el efector final cambiando las distancias que se muestran en las Figuras 2.6, 2.7 y 2.8.

Mediante la simulación se pudo comprobar el funcionamiento de la estructura mecánica de nuestra plataforma y validar las ecuaciones del modelo cinemático obtenido en el Capítulo II.

En la Figura 3.4 se puede apreciar el modelo geométrico de la plataforma, visto desde distintos ángulos, así como los centros de masas de los diferentes cuerpos, todo ello a partir de la simulación efectuada en el *SimMechanics*.

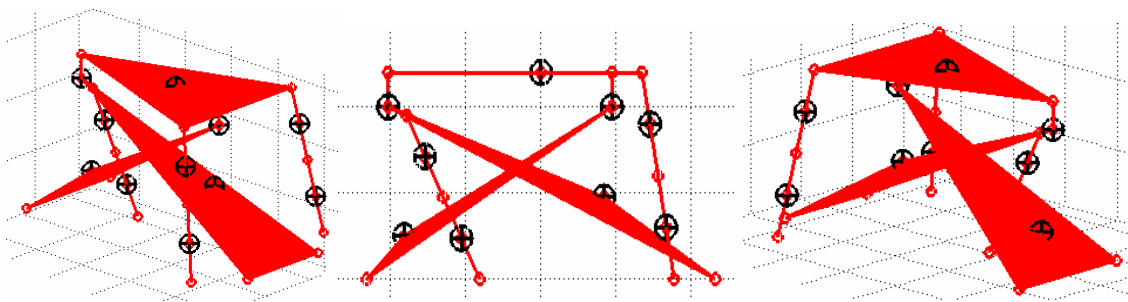


Figura 3.9 Modelo de la plataforma en el *SimMechanics*.

3.6 Análisis económico

El precio de la plataforma objeto de estudio es de aproximadamente 18 000 USD y con la cabina del simulador completo incluyendo el sistema de visualización y mandos oscila entre 40 000 a 50 000 USD.

El costo de producción es menor que los valores mencionados anteriormente ya que las piezas que la conforman son relativamente baratas por ejemplo el metro cuadrado de lámina de acero de 3 mm cuesta 13.00 USD, las articulaciones universales tienen un valor en el mercado que oscila al rededor de 2.5 USD y un cilindro neumático de doble efecto está por los 50 USD.

El modelo y la simulación desarrollados en este trabajo brinda la posibilidad de realizar un análisis previo del comportamiento cinemático de algunos mecanismos antes de llegar a materializarlos, lo que posibilita corregir a tiempo cualquier dificultad que pudiera detectarse en su comportamiento logrando así un considerable ahorro de recursos humanos y materiales. El modelo permite también apreciar el comportamiento de los robots ante distintas estrategias de control sin tener que implementar las mismas en una plataforma verdadera lo cual también constituye una ventaja desde el punto de vista económico.

Por último queremos decir que el empleo de estas plataformas en la simulación de conducción permite el adiestramiento del personal a la hora de conducir un vehículo lo que representa un ahorro de combustible, gomas, rodamientos y piezas de automóviles pues al llevar la conducción a un ambiente virtual se evitan desgastes de las piezas de los vehículos y se logra el perfeccionamiento de la técnica de conducción evitando accidentes de tránsito.

Conclusiones

- ✓ *VirtualRobot* es un paquete de software con múltiples aplicaciones y ventajas pero en el mismo aún no es posible simular estructuras mecánicas formadas por cadenas cinemáticas cerradas.
- ✓ Se demuestra que el modelo cinemático se puede obtener a partir de las consideraciones geométricas y definición de los vectores de cierre para cada cadena cinemática actuada.
- ✓ Las cadenas cinemáticas activas definen la movilidad de la plataforma, mientras las cadenas cinemáticas pasivas solo restringen el movimiento del efector final, pero aportan rigidez y estabilidad mecánica al sistema.
- ✓ El modelo cinemático inverso no presenta múltiples soluciones, mientras que el modelo cinemático directo dado la complejidad de la estructura paralela y por tanto de las ecuaciones, es necesario resolverlo utilizando métodos numéricos los cuales arrojan múltiples soluciones.
- ✓ El programa realizado brinda la flexibilidad de calcular el modelo cinemático de otras plataformas con estructuras similares a la estudiada, ya que el diseño genérico del mismo permite adecuar las variables a la topología particular de una determinada configuración mecánica.
- ✓ Gracias al modelo cinemático obtenido se facilita el análisis de la cinemática diferencial, y se sientan las bases para el modelado dinámico de la plataforma.

Recomendaciones

- ✓ Continuar las investigaciones de mecanismos paralelos, haciendo énfasis en robots de un mayor número de grados de libertad.
- ✓ Realizar estudios empleando otros tipos de actuadores como por ejemplo los eléctricos, los cuales se han venido aplicando últimamente con prestaciones muy factibles.
- ✓ Continuar con la investigación para desarrollar la simulación de estructuras con cadenas cinemáticas cerradas en *VirtualRobot*.
- ✓ Realizar la simulación del modelo obtenido empleando el *Virtual Reality* del *Matlab* el cual mejora la interfaz gráfica del software.
- ✓ Implementar un algoritmo capaz de depurar las múltiples soluciones de la cinemática directa.
- ✓ Basándose en el análisis cinemático expuesto en este trabajo, realizar el estudio de la cinemática diferencial y de la dinámica de la plataforma que permita desarrollar posteriormente una adecuada estrategia de control para el sistema.
- ✓ Emplear el modelo obtenido para el desarrollo e implementación de estrategias de control para el sistema.

Referencias Bibliográficas

- Aguirre, G., Acevedo, M., Carbone, G. & Ottaviano, E., (2005) Kinematic and Dynamic analyses of 3 dof Parallel Manipulator by symbolic formulation.
- Aracil, R., Saltarén, R., Sabater, J. M. & Reinoso, O., (2006) "Robots Paralelos : Máquinas con un pasado para una robótica del futuro" en *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* [Artículo en Línea] No. 3 enero 2006, disponible en: <http://isa.umh.es/arvc/documentos/articulos/RIA1%202006.pdf> [accedido el 27 de febrero del 2008].
- Barrientos, A., Peñin, L. F., Balaguer, C. & Arancil, R., (1997) *Fundamentos de robótica*. Madrid, Mcgra W-Hill.
- Bonev, I., (2002) *Geometric analysis of parallel mechanisms*. Tesis de Doctorado. Québec, Departamento de Ingeniería Mecánica Universidad de Laval.
- Bonev, I., Cappel, K., Beeson, M. & Evans, S., (2003) "The true origins of parallel robots" [Internet] disponible en <http://www.parallemic.org/Reviews/Review007.-html> accedido el 10 de febrero del 2008.
- Cappell, K. L., (1967) Motion simulator US Patent No 3295224.
- César Álvarez, A., Yime Rodríguez, E., Roque Saltarén, P. & Rafael Aracil, S., (2003) "Control teleoperado del robot submarino de estructura paralela remo" [Internet] disponible en <http://www.aurova.ua.es:8080/ja2005/comu/3521Arquitectura%20de%20Control%20del%20Robot%20Submarino%20REMO.pdf> accedido el 26 de febrero del 2008.
- Cisneros Limón, R., (2006) *Modelo matemático de un robot paralelo de seis grados de libertad*. Tesis de Ingeniería .Santa Catarina, Departamento de Computación, Electrónica, Física e Innovación Universidad de las Américas Puebla.

- Díaz, M. A., Provenzano, S. E., Vergara, M. J. & Chacón, R. D., (2007) "Dinámica directa de robots paralelos utilizando las ecuaciones de Gibbs-Appell" en *Información Tecnológica* [Artículo en Línea] No. 18 abril 2007, disponible en: http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S07187642007000400011&script=sci_arttext [accedido el 6 de febrero del 2008].
- Domínguez Velazco, S. E., (2007) *Modelo cinemático y dinámico para plataforma de dos grados de libertad*. Tesis de Ingeniería. Santa Clara, Departamento de Automática y Sistemas Computacionales, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- Escalona Moreno, I., (2002) "Neumática. Actuadores neumáticos y sus aplicaciones en la ingeniería industrial" [Internet] disponible en <http://www.monografias.com/trabajos13/actoneu/actoneu.shtml> accedido el 12 de febrero del 2008.
- García Sanz, M. & Motilva Casado, M., (2005) "Herramientas para el estudio de robots de cinemática paralela: simulador y prototipo experimental" en *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* [Artículo en Línea] No. 2 abril 2005, disponible en: <http://www.riai.isa.upv.es> [accedido el 15 de abril del 2008].
- Gwinnett, J. E., (1931) Amusement device US Patent No 1,789,680.
- Koekebakker, S. H., (2001) *Model based control of a flight simulator motion system*. Tesis de Maestría. Universidad de Toronto.
- Krivts, I. L. & Krejnin, G. V., (2006) *Pneumatic actuating systems for automatic equipment*.
- Lehmann, C. H., (1966) *Geometría analítica* La Habana, Edición Revolución.
- Lizcano Gómez, R., Fuentes Gómez, J. C. & Valenzuela Zanogal, C. A., (2005) *Control para un robot articulado con tres grados de libertad que simule el movimiento de pata*. Tesis de Ingeniería. Bogotá D.C, Facultad de Ingeniería Pontificia Universidad Javeriana.

- Machado Sosa, A., Hernández Santana, L. & Rubio Rodríguez, A. E., (2007) Controlador empotrado para plataforma neumática de simulador de conducción.
- Mellado Arteché, M., (2003) *Simulación en robótica mediante VirtualRobot*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Merlet, J.-P., (1999) "Parallel robots: open problems" [Internet] disponible en <http://www-sop.inria.fr/coprin/equipe/merlet/Problemes/isrr99-html.html> accedido el 22 de abril del 2008.
- Merlet, J.-P., (2006) *Parallel robots*. Second Edition. Waterloo, Springer.
- Merlet, J.-P., (2007) *Jean-Pierre MERLET*, [Internet] disponible en: <http://www-sop.inria.fr/coprin/equipe/merlet/merlet.html> [accedido el 3 febrero del 2008.]
- Meza, G. R., (2004) *Diseño de esquemas de control difuso para la posición y velocidad de un manipulador paralelo tipo Delta*. Tesis de Ingeniería. Monterrey, División de Ingeniería y Arquitectura Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Monterrey.
- Modesti, M. R., (2002) "Actuadores. Dispositivos neumáticos" [Internet] disponible en <http://www.profesores.frc.utn.edu.ar/industrial/sistemasinteligentes.html> accedido el 24 de febrero del 2008.
- Navarrete Álvarez, C. D. L. V., (2007) *Implementación de una plataforma de simulación mecánica mediante ADAMS*. Tesis de Ingeniería. Santa Clara, Departamento de Automática y Sistemas Computacionales, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- Neumann, K. E., (1988) Robots, US Patent No 4,732,525.
- Pollard, W. L. V., (1942) Position-controlling apparatus, US Patent No 2,286,571.
- Prattichizzo, D. & Bicchi, A., (1998) Dynamic analysis of mobility and graspability of general manipulation systems.

- Rubio Rodríguez, A. E., (2007) *Modelación, identificación y control de actuadores lineales electro neumáticos para aplicaciones industriales*. Tesis de Doctorado. Santa Clara, Departamento de Automática y Sistemas Computacionales, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- Rubio Rodríguez, E., Hernández S, L., Aracil, R., Saltarén, R. & Moreno, R., (2007) "Modelado identificación y control de actuadores lineales electro-neumáticos. Aplicación en plataformas de dos grados de libertad" en *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* [Artículo en Línea] No. 4. octubre 2007, disponible en: <http://www.revista-riai.org/Vol4Num4Abs.htm> [accedido el 26 de febrero del 2008].
- Staicu, S., Zhang, D. & Rugescu, R., (2006) Dynamic modelling of a 3-DOF parallel manipulator using recursive matrix relations.
- Voronin, B. & Moya Rodríguez, J. L., (2004) *Principios de la teoría de mecanismos y máquinas*. México, Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingeniería.
- Yáñez Valdez, R., (2007) *Resolución de mecanismo paralelo planar 3RRR impulsado por actuadores eléctricos*. Tesis de Maestría. Querétaro, Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, Instituto Politécnico Nacional.
- Zabalza, I. & Ros, J., (2007) "Aplicaciones actuales de los robots paralelos" [Internet] disponible en www.pucp.edu.pe/congreso/cibim8/pdf/19/19-02.pdf accedido el 26 de febrero del 2008.

Anexos

Anexo I Código de programación para la cinemática de la plataforma

```
% Programa para el Cálculo de la Cinemática Inversa y Directa
% Plataforma de 3 gdl
clear
clc
format short
% Definición de las variables principales
Wa=1500; % ancho de la base en mm
La=2320; % largo de la base en mm
Wb=1220; % ancho del efector final en mm
Lb=2035; % largo del efector final en mm
d=275; % distancia desde el lateral derecho hasta la base de los pistones 2 y
3 - ver Cap II, Figura 2.5 -
d1=752; % distancia del lateral izquierdo hasta la base del pistón 1 - ver Cap
II, Figura 2.5 -
d2=730; % distancia para calcular la proyección en x del punto C2 - ver Cap
II, Figura 2.7 -
d3=265; % distancia para calcular la proyección en x del punto C1- ver Cap II,
Figura 2.7 -
s=546; % distancia para calcular la posición del puntos B4 - ver Cap II,
Figura 2.7 -
s1=346; % distancia desde el lateral derecho del efector hasta el tope de los
pistones 2 y 3 - ver Cap II, Figura 2.7 -
e=352; % distancia para calcular la posición de los puntos A6 y A7 - ver Cap II,
Figura 2.6 -
e1=275; % distancia para calcular la posición de los puntos A4 y A5 - ver Cap II,
Figura 2.6 -
% Variables que establecen la posición inicial del EF.
h=835.192; % altura del efector final en su posición inicial
h1=h-251; % distancia para calcular la proyección en z del punto C2 - ver Cap II,
Figura 2.7 -
h2=h-214; % distancia para calcular la proyección en z del punto C2 - ver Cap II,
Figura 2.7 -
% Definición de los vértices del plano de la Base
% Punto A1 (Base del Pistón 1)
A1x=-(0.5*La-d1);A1y=0;A1z=0;
A1=[A1x;A1y;A1z];
%Punto A2 (Base del Pistón 2)
A2x=0.5*La-d; A2y=0.5*Wa; A2z=0;
A2=[A2x;A2y;A2z];
%Punto A3 (Base del Pistón 3)
A3x=0.5*La-d;A3y=-(0.5*Wa);A3z=0;
A3=[A3x;A3y;A3z];
%Punto A4 (Base del cuerpo rígido 1)
```

```

A4x=-0.5*La;A4y=0.5*Wa-e1;A4z=0;
A4=[A4x;A4y;A4z];
%Punto A5 (Base del cuerpo rígido 1)
A5x=-0.5*La;A5y=-(0.5*Wa-e1);A5z=0;
A5=[A5x;A5y;A5z];
%Punto A45 (punto medio entre A4 y A5)
A45x=-0.5*La;A45y=0;A45z=0;
A45=[A45x;A45y;A45z];
%Punto A6 (Base del cuerpo rígido 2)
A6x=0.5*La;A6y=0.5*Wa-e;A6z=0;
A6=[A6x;A6y;A6z];
%Punto A6 (Base del cuerpo rígido 2)
A7x=0.5*La;A7y=-(0.5*Wa-e);A7z=0;
A7=[A7x;A7y;A7z];
%Punto A67 (punto medio entre A6 y A7)
A67x=0.5*La;A67y=0;A67z=0;
A67=[A67x;A67y;A67z];
% Definición de los vértices del plano del Eector Final
%Punto B1 de la plataforma móvil
B1x=-0.5*Lb; B1y =0; B1z=0;
B1=[B1x;B1y;B1z]; % Realmente entiéndase [B1x';B1y';B1z']
%Punto B2 de la plataforma móvil
B2x=0.5*Lb-s1; B2y=0.5*Wb;B2z=0;
B2=[B2x;B2y;B2z]; % Realmente entiéndase [B2x';B2y';B2z']
%Punto B3 de la plataforma móvil
B3x=0.5*Lb-s1; B3y=-(0.5*Wb);B3z=0;
B3=[B3x;B3y;B3z]; % Realmente entiéndase [B3x';B3y';B3z]
%Punto B4 de la plataforma móvil
B4x=0.5*Lb-s; B4y=0;B4z=0;
B4=[B4x;B4y;B4z]; % Realmente entiéndase [B3x';B3y';B3z]
%Punto de pivoteo C1
C1x=-(0.5*La-d3);C1y=0;C1z=h1;
C1=[C1x;C1y;C1z];
% Punto de pivoteo C2
C2x=-(0.5*La-d2);C2y=0;C2z=h2;
C2=[C2x;C2y;C2z];%Vector C2C1 (distancia entre los centros de las artic.
                    universal y esférica)
C2C1x=C1x-C2x;C2C1y=C1y-C2y;C2C1z=C1z-C2z;
C2C1=[C2C1x;C2C1y;C2C1z];% Cálculo del vector B1C2 (radio de la articulación
                    universal)
B1za=h; %Definición de la altura del punto B1 referido ahora al sist. ref. xyz de la
                    base
B1C2x=C2x-B1x;B1C2y=C2y-B1y;B1C2z=C2z-B1za;
B1C2=[B1C2x;B1C2y;B1C2z]; % Cálculo de las longitudes iniciales de las
                    extremidades actuadas.
Long_inicial1=norm([A1x;A1y;A1z]+[C1x;C1y;C1z]); % Longitud inicial del
                    extremidad actuada 1

```

```

Long_inicial2=norm([A2x;A2y;A2z]+[B2x;B2y;h]); % Longitud inicial del
    extremidad actuada 2
Long_inicial3=norm([A3x;A3y;A3z]+[B3x;B3y;h]); % Longitud inicial del
    extremidad actuada 3
% ***** CALCULO DE LA CINEMATICA INVERSA *****
disp(' **** CINEMATICA INVERSA ****')
Pz=input('Introduzca el valor de la altura (mayor de 1200 mm) del efector final \n
    Altura = ');
phi1=input('Introduzca el valor (en grados) del ángulo cabeceo del efector final \n
    Cabeceo = ');
cita1=input('Introduzca el valor (en grados) del ángulo alabeo del efector final \n
    Alabeo = ');
phi=phi1/57.3;cita=cita1/57.3; % Conversión de grados a radianes.
% Restricciones del movimiento del efector final
Px=0;Py=0; % Desplazamiento cero en ejes x,y
chi=0; % Angulo de Guiñada cero
% Cálculo de la Matriz de Rotación para la nueva orientación del efector
MRz=[cos(chi) -sin(chi) 0 ; sin(chi) cos(chi) 0; 0 0 1 ];
MRx=[1 0 0;0 cos(cita) -sin(cita);0 sin(cita) cos(cita)];
MRy=[cos(phi) 0 sin(phi);0 1 0;-sin(phi) 0 cos(phi)];
Mrotxyz=MRx*MRy*MRz; % Matriz de rotación según el convenio X-Y-Z (roll-
    pitch-yaw)
OP=[Px;Py;Pz]; % Punto P situado en el origen del sist refe
    móvil(centro del E.F)
% Definición de los vectores de cierre para cada cadena cinemática.
% Cadena Cinemática Activa 1
A1O=[A1x;A1y;A1z]; %definición del vector(longitud del segmento en las
    proyecciones)
PB1=[B1x;B1y;B1z];
A1C1=A1O+PB1+Mrotxyz*(OP+B1C2+C2C1); % vector de cierre 3-
    A1,O,P,B1,C2,C1
L1=norm(A1C1); % Desplazamiento del pistón 1
% Cadena Cinemática Activa 2
PB2=[B2x;B2y;B2z];
A2O=[A2x;A2y;A2z];
A2B2=A2O+Mrotxyz*OP+PB2; % vector de cierre 1-->A2,O,P,B2
L2=norm(A2B2); % Desplazamiento del pistón 2.
% Cadena Cinemática Activa 3
PB3=[B3x ; B3y ; B3z]; % definición del vector(longitud del segmento en las
    proyecciones)
A3O=[A3x ; A3y ; A3z];
A3B3=A3O+Mrotxyz*OP+PB3; % vector de cierre 2-->A3,O,P,B3
L3=norm(A3B3); % Desplazamiento del pistón 3.
% Cálculo de los desplazamientos en los vástagos de los cilindros.
desp1=L1-Long_inicial1;
desp2=L2-Long_inicial2;
desp3=L3-Long_inicial3;

```

```

disp(' Los desplazamientos de los cilindros (en mm) son:')
disp(desp1)
disp(desp2)
disp(desp3)

% ***** CALCULO DE LA CINEMATICA DIRECTA *****
disp('Oprima una tecla para calcular la Cinemática directa')
pause
clc
clear phi cita Pz Mrotxyz L1 L2 L3 desp*
disp(' **** CINEMATICA DIRECTA ****')
desp1=input('Introduzca el desplazamiento del pistón 1 \n Desplazamiento = ');
desp2=input('Introduzca el valor el desplazamiento del pistón 2 \n Desplazamiento
= ');
desp3=input('Introduzca el valor el desplazamiento del pistón 3 \n Desplazamiento
= ');
syms phi cita Pz real
% Cálculo de la Matriz de Rotación para la nueva orientación del efector
MRz=[cos(chi) -sin(chi) 0 ; sin(chi) cos(chi) 0; 0 0 1 ];
MRx=[1 0 0;0 cos(cita) -sin(cita);0 sin(cita) cos(cita)];
MRy=[cos(phi) 0 sin(phi);0 1 0;-sin(phi) 0 cos(phi)];
Mrotxyz=MRx*MRy*MRz; % Matriz de rotación según el convenio X-Y-Z (roll-pich-
yaw)
OP=[Px;Py;Pz]; % Punto P situado en el origen del sist refe móvil(centro del
EF)

% DEFINICION DE LOS VECTORES DE CIERRE
% Cadena Cinemática Activa 1
A1C1=A1O+PB1+Mrotxyz*(OP+B1C2+C2C1); %vector de cierre 3-
>A1,O,P,B1,C2,C1
L1=sqrt(A1C1(1)^2+A1C1(2)^2+A1C1(3)^2);
q1=L1-Long_inicial1-desp1; % Ecuación de la cinemática directa 1.
% Cadena Cinemática Activa 2
A2B2=A2O+Mrotxyz*OP+PB2; %vector de cierre 1-->A2,O,P,B2
L2=sqrt(A2B2(1)^2+A2B2(2)^2+A2B2(3)^2);
q2=L2-Long_inicial2-desp2; % Ecuación de la cinemática directa 2.
% Cadena Cinemática Activa 3
A3B3=A3O+Mrotxyz*OP+PB3; % vector de cierre 2-->A3,O,P,B3
L3=sqrt(A3B3(1)^2+A3B3(2)^2+A3B3(3)^2);
q3=L3-Long_inicial3-desp3; % Ecuación de la cinemática directa 3.
% Solución del sistema de Ecuaciones para la Cinemática
[Pz,cita,phi]=solve(q1,q2,q3);
Altura=round(Pz(3))
Alabeo=round(cita(3)*57.3)
Cabeceo=round(phi(3)*57.3)

```

Anexo II Descripción de los objetos y primitivas que conforman la Plataforma

Elementos que componen la Base de la Plataforma

Nº	Parte	Dimensiones (mm)	Tipo de Primitiva
1	Lateral izquierdo	2320 x 140 x 140	Box
2	Lateral derecho	2320 x 140 x 140	Box
3	Frente delantero	1500 x 140 x 140	Box
4	Frente trasero	1500 x 140 x 140	Box
5	1 ^{ra} Barra transversal	1500 x 140 x 140	Box
6	2 ^{da} Barra transversal	1500 x 140 x 140	Box

Elementos que componen el Efecto Final

Nº	Parte	Dimensiones (mm)	Primitiva
7	Frente trasero	1240 x 100 x 40	Box
8	Barra central	1880 x 100 x 40	Box
9	Barra gruesa lateral izquierdo	580 x 100 x 40	Box
10	Barra gruesa lateral derecho	580 x 100 x 40	Box
11	Barra fina lateral izquierdo	677 x 40 x 50	Box
12	Barra fina lateral derecho	677 x 40 x 50	Box

13	Barra diagonal izquierda	722 x 40 x 50	Box
14	Barra diagonal derecha	722 x 40 x 50	Box
15	2 ^{ra} Barra transversal	1240 x 40 x 50	Box
16	1 ^{ra} Barra transversal	1240 x 40 x 50	Box

Elementos que componen cuerpo rígido 1 (unido a la articulación cilíndrica)

Nº	Parte	Dimensiones (mm)	Primitiva
17	Barra trasera	971x110x50	-Box
18	Barra lateral izq	1281x110x50	-Box
19	Barra lateral derecha	1281x110x50	-Box
20	Punta	60x14x190	-Box -Tent Cylinder

Elementos que componen cuerpo rígido 2 (unido a la articulación universal)

Nº	Parte	Dimensiones (mm)	Primitiva
21	Barra trasera	853x112x55	- Tent Cylinder
22	Barra central	1480x112x55	-Box
23	Barras diagonales	427 x112x55	-Box
24	Punta central	150x20x100	-Box - Tent Cylinder

Elementos que componen las Articulaciones Rotacionales

Nº	Parte	Dimensiones (mm)	Primitiva
25	Base fija	112 x 20 x 95	-Box -Tent Cylinder -Tent Cylinder
26	Eje central	70 x 12 x 12	-Cono
27	Base móvil	131 x 15x 131	- Box -Tent Cylinder

Elementos que componen las Articulaciones Prismáticas

Nº	Parte	Dimensiones (mm)	Primitivas
28	Émbolo	550x100x100	- Box
29	Cilindro	540x15x10	-Cone

Elementos que componen las Articulaciones Esféricas

Nº	Parte	Dimensiones (mm)	Primitivas
30	Rótula	25x25x25	- Sphere
31	Base	40x20x60	- Tent Two Cylinders

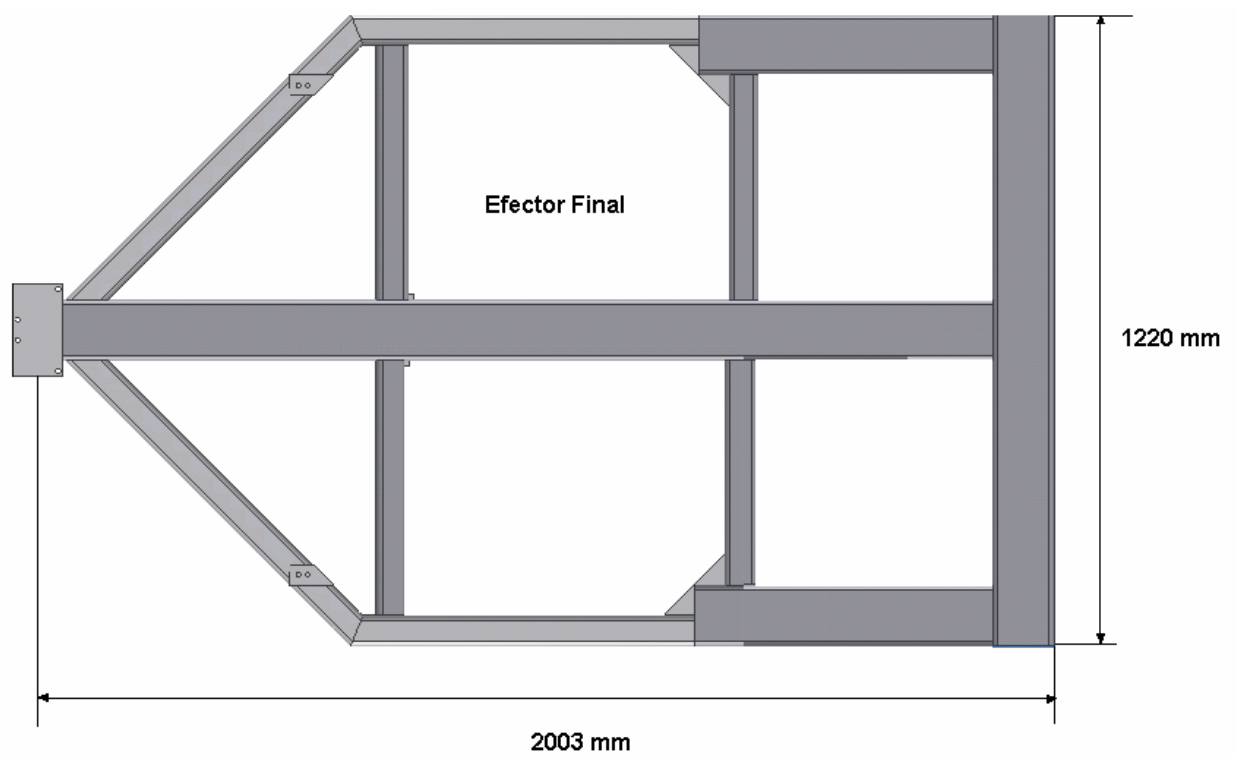
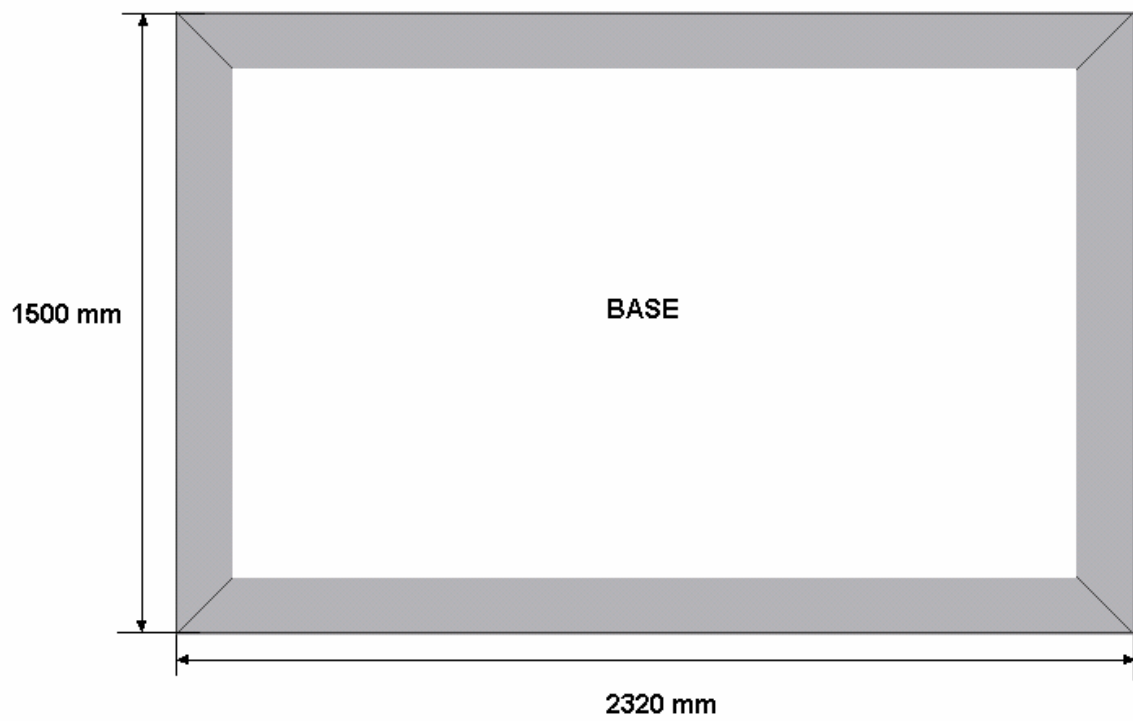
Elementos que componen la Articulación Cilíndrica

Nº	Parte	Dimensiones (mm)	Primitivas
32	Barra fija	1015x25x25	- Cone
33	Cuerpo rotacional	80x50x50	- Cone
34	Uniones con el E.F	150X80x40	-Box - Tent Two Cylinders

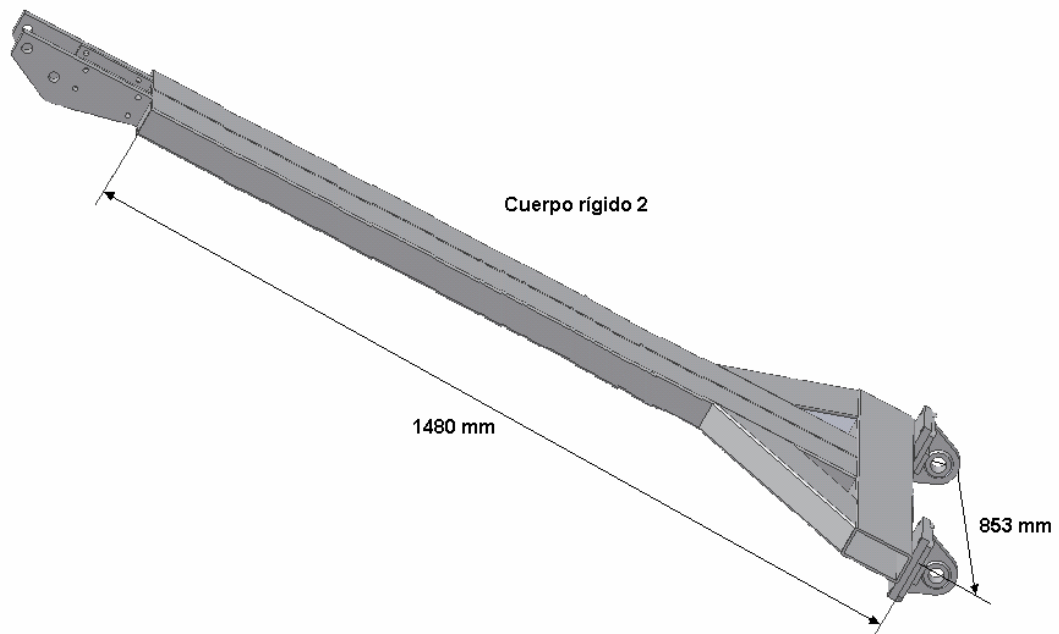
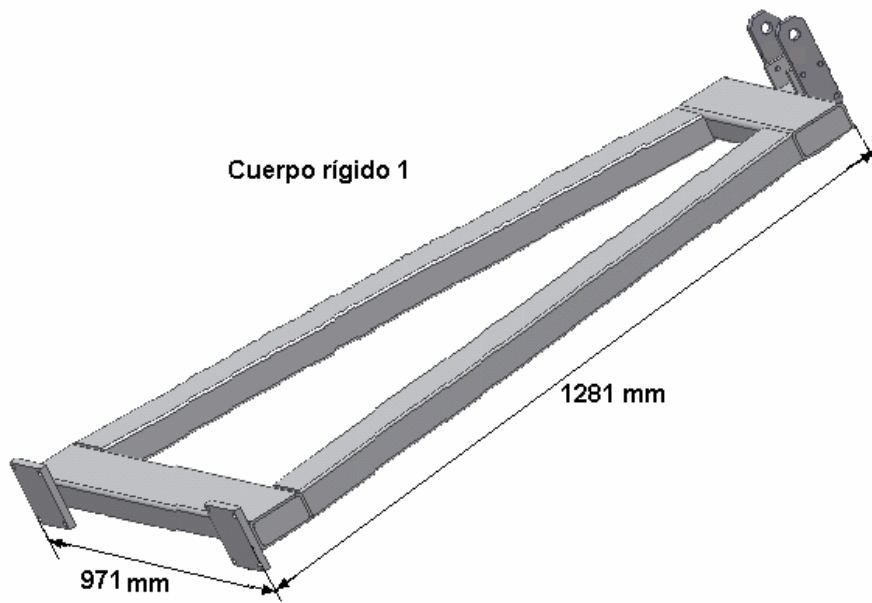
Elementos que componen la Articulación Universal

Nº	Parte	Dimensiones (mm)	Primitivas
35	Cuerpo rígido 1	85x15x45	-Box -Box
36	Cuerpo rígido 2	100x25x25	-Box
37	Ejes	150x10x10	-Cone

Anexo III Principales piezas de la plataforma



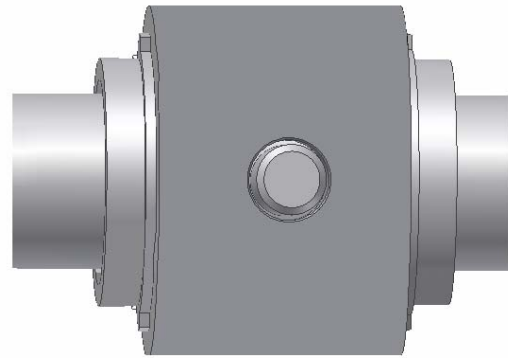
Cuerpos rígidos



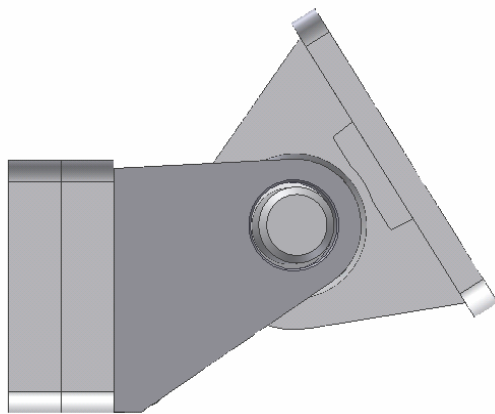
Articulaciones



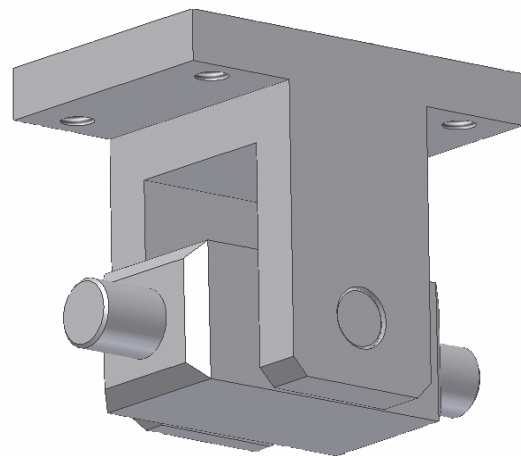
Esférica



Cilíndrica



Rotacional



Universal

Anexo IV Subsistemas que representan la plataforma en el *SimMechanics*

