

**Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas**

**Facultad de Ingeniería Eléctrica**

**Departamento de Automática y Sistemas Computacionales**



# **TESIS DE MAESTRÍA**

**“Control de trayectoria en espacio de tareas para un simulador paralelo  
de 3 grados de libertad”**

**Autor: Ing. Orlando Urquijo Pascual**

**Tutor: Dr.C. Luis Hernández Santana**

**Santa Clara**

**2014**

**"Año 56 de la Revolución"**

**Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas**

**Facultad de Ingeniería Eléctrica**

**Departamento de Automática y Sistemas Computacionales**



## **TESIS DE MAESTRÍA**

**“Control de trayectoria en espacio de tareas para un simulador paralelo  
de 3 grados de libertad”**

**Autor: Ing. Orlando Urquijo Pascual**

[orlandop@uclv.edu.cu](mailto:orlandop@uclv.edu.cu)

**Tutor:** Dr.C. Luis Hernández Santana, Prof. Titular

Dpto. Automática, Fac. Ingeniería Eléctrica, UCLV.

Email: [luishs@uclv.edu.cu](mailto:luishs@uclv.edu.cu)

**Consultante:** Dr.C. Eduardo Izaguirre Castellanos

Dpto. Automática, Fac. Ingeniería Eléctrica, UCLV.

Email: [izaguirre@uclv.edu.cu](mailto:izaguirre@uclv.edu.cu)

**Santa Clara**

**2014**

**"Año 56 de la Revolución"**



Hago constar que la presente Tesis de Maestría fue realizada en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la maestría en Automática y Sistemas Informáticos, 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.

---

Ing. Orlando Urquijo Pascual

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

## **DEDICATORIA**

A la gente que me quiere,

A mis amigos,

A ella. Siempre hay una.

A mi mamá,

En especial, a la vieja.

## AGRADECIMIENTOS

En este momento uno espera no olvidarse de nadie antes de que la impresión se haga, pero los imprescindibles de seguro no van a faltar, de esos uno nunca se olvida. El orden no significa nada, solo fue como fueron apareciendo en mi mente.

Quiero empezar con un estudiante que paradójicamente se convirtió en mi profesor, por todo lo que me enseñó en el tiempo que estuve trabajando con él, a Arian, sin su ayuda seguramente el camino a la maestría hubiera sido más difícil.

Sin dudas, a Pablillo y el Valerio, mis más queridos y viejos amigos del departamento, su aliento y empuje puede decirse que fueron definitivos en que se me hiciera máster. Cuando no encontraba el propósito en ello, ellos me hicieron ver.

A Lesyani, mi más nueva y mejor amiga.

A Luis por supuesto, por la idea y los regaños en público, creo que también me sirvieron.

A Izaguirre por su trabajo previo que de mucho me sirvió y por su guía cuando la necesité.

Y en esta oración se van todos aquellos de que de una forma u otra formaron parte de esta investigación y que me impulsaron a que concluyera, a todos gracias.

## RESUMEN

El uso de estructuras robóticas paralelas ha sido extendido en múltiples aplicaciones, tanto industriales, médicas, como para ocio y entretenimiento. Esto es debido principalmente a las ventajas que presentan sobre los robots serie para realizar cierto tipo de actividades. El control de estos equipos, se ha convertido en un reto para la comunidad científica internacional, debido al alto acoplamiento existente entre sus articulaciones actuadas, las incertidumbres mecánicas del sistema y el efecto de las no linealidades y perturbaciones externas. El control de trayectoria en el espacio de tareas, ha sido tratado específicamente por una gran cantidad de autores, proponiéndose estrategias tanto lineales como no lineales con el objetivo de mejorar el desempeño de estructuras paralelas en aplicaciones donde el seguimiento de trayectoria es deseado.

El trabajo que se presenta consiste en proponer una estrategia de control en el espacio de tareas para mejorar el rendimiento en seguimiento de trayectoria de un robot paralelo de tres grados de libertad. El principal aporte de este trabajo viene dado en la simplicidad de la estrategia utilizada, además de obtener buenos resultados sin la necesidad de realimentar la velocidad y aceleración del sistema.

Para validar la propuesta se realizan experimentos utilizando *softwares* de simulación y pruebas experimentales con el robot caso de estudio, las cuales demuestran la efectividad de la estrategia de control planteada.

## TABLA DE CONTENIDOS

DEDICATORIA .....	i
AGRADECIMIENTOS .....	ii
RESUMEN .....	iii
INTRODUCCIÓN .....	1
Organización del informe .....	7
CAPÍTULO 1.    MODELADO Y CONTROL DE ROBOTS PARALELOS .....	9
1.1    Robótica paralela.....	9
1.1.1    Configuraciones estructurales de los robots paralelos .....	10
1.1.2    Aplicaciones de la robótica paralela .....	11
1.2    Actuadores en la robótica paralela .....	12
1.2.1    Modelado, identificación y control de los actuadores neumáticos .....	14
1.2.2    Modelado de los actuadores neumáticos .....	14
1.2.3    Modelado de las válvulas de flujo .....	16
1.2.4    Identificación experimental de los sistemas electro-neumáticos .....	17
1.3    Modelado de los robots paralelos.....	18
1.3.1    Cinemática de los robots paralelos .....	19
1.3.2    Modelo cinemático inverso.....	19
1.3.3    Modelo cinemático directo .....	21

1.3.4	Modelo dinámico de los robots paralelos .....	23
1.4	Estrategias de control de trayectoria .....	23
	Conclusiones parciales.....	29
<b>CAPÍTULO 2. MODELADO DEL ROBOT PARALELO DE 3 GDL .....</b>		<b>31</b>
2.1	Descripción de la plataforma de tres grados de libertad .....	31
2.2	Modelado Cinemático de la plataforma de tres grados de libertad.....	33
2.3	Modelo no lineal de los actuadores neumáticos.....	37
2.4	Software de simulación de sistemas mecánicos.....	39
2.5	Obtención del modelo electro-neumático a través de identificación experimental	41
	Conclusiones parciales.....	44
<b>CAPÍTULO 3. CONTROL DE TRAYECTORIA DE LA PLATAFORMA DE 3 GDL</b>		<b>45</b>
3.1	Problema de control .....	46
3.2	Control cinemático en el espacio de tareas .....	47
3.2.1	Control desacoplado en el espacio articular .....	47
3.2.2	Lazo de control articular .....	48
3.3	Lazo de Control cartesiano.....	50
3.3.1	Controlador digital.....	51
3.3.2	Diseño del controlador y análisis de estabilidad.....	52
3.4	Sistema sensorial para la medición de las variables.....	55
3.5	Resultados experimentales de esquema de control cartesiano en espacio de tareas ante seguimiento de trayectoria .....	57
3.6	Control de trayectoria en el espacio de tareas.....	58
3.6.1	Simulación utilizando ADAMS/Matlab. ....	59
3.6.2	Resultados experimentales con la plataforma de 3 GDL.....	61
	Conclusiones parciales.....	64

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	65
Conclusiones .....	65
Recomendaciones .....	66
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	67
ANEXOS .....	81
Anexo I Diagrama del esquema de Control de Trayectoria en Simulink-ADAMS .....	81
Anexo II Comportamiento de la razón de cambio de las variables cartesianas del robot de 3 GDL .....	81
Anexo III Modelo no lineal implementado en Simulink/ADAMS.....	82

## INTRODUCCIÓN

La robótica paralela es la rama de la ciencia que se encarga del estudio de robots cuya estructura mecánica, que enlaza la base fija con el elemento terminal, está compuesta por dos o más cadenas cinemáticas cerradas (Merlet, 2008). Estos sistemas son empleados en aplicaciones tales como son: simuladores de movimiento (Pi, 2011; Davliakos y Papadopoulos, 2008), para el posicionamiento de dispositivos pesados, como antenas, radares y telescopios (Zabalza y Ros, 2007), máquinas herramientas (Jun y otros, 2008; Silva y otros, 2009), aplicaciones navales (Yeh y otros, 2009), simuladores de vuelo (Campos y otros, 2008; Wang y Xie, 2009), cirugía médica y rehabilitación (Dutta, 2012), entre otras.

Entre las ventajas que presentan este tipo de estructura robótica, se encuentran la alta exactitud de posicionamiento, mayor rigidez en su estructura mecánica dado que comparten la carga entre todas sus extremidades, así como alta relación peso-carga, gran velocidad de movimiento y buena repetitividad (Pi & Wang, 2011; Davliakos y Papadopoulos, 2008; Pierrot y otros, 2009).

No obstante, el estudio de estos sistemas trae consigo complicaciones en cuanto a: las limitaciones en el espacio de trabajo, la presencia de singularidades de su estructura mecánica, que dificulta la obtención de los modelos cinemáticos y dinámicos (Muller, 2008; Wang, 2008), y por ende aumenta la complejidad para el diseño de los controladores.

El uso de los robots paralelos data del año 1931, cuando James E. Gwinnett patentó el primer mecanismo paralelo del que se tenga conocimiento. Se trataba de una plataforma de movimiento destinada a la industria del entretenimiento diseñada como plataforma de movimiento rotacional para los teatros (Gwinnett, 1931). Una década más tarde, Willard L.V. Pollard inventó el que se conoce comúnmente como el primer robot industrial y fue

precisamente un robot paralelo destinado a pintura con *spray* (Bonev 2003; Aracil, Saltarén et al. 2006).

En 1947, V.E. Gough ideó un robot paralelo con seis actuadores lineales formando una estructura de octaedro. Este robot con 6 GDL fue utilizado en la empresa *Dunlop* para el ensayo de neumáticos de aviación. La estructura fue presentada en un congreso de La Federación Internacional de Sociedades de Ingenieros y Técnicos del Automóvil (FISITA) en 1962 y es la que ha tenido mayor éxito. En la actualidad, existen multitud de plataformas basadas en este diseño en numerosas empresas (Bonev, 2003; Zabalza y Ros, 2007).

En 1965 D. Stewart presentó en un artículo una plataforma de 6 GDL para ser utilizada como simulador de vuelo. El artículo de Stewart tuvo y tiene una gran influencia en el mundo académico y se considera como uno de los primeros trabajos de análisis de plataformas paralelas (Bonev, 2003; Zabalza y Ros, 2007).

En 1967, Klaus L. Cappel desarrolla un simulador de movimiento según la configuración Gough-Stewart, que fue empleado como simulador de helicópteros (Cappel, 1967), siendo los simuladores de movimiento, el campo de aplicación donde mayor éxito han cosechado los robots paralelos (Ahmad, 2006; Chaffin y otros, 2008; Lombaerts y otros, 2011). En tal sentido, se destacan novedosos simuladores de vuelo para entrenamiento de pilotos, los simuladores de vuelo de la NASA (Slob, 2008), el simulador NADS de la Universidad de Iowa (Ahmad y Papelis, 2006), y el TACOM (Reid, 1992).

En 1978, K.H. Hunt sugirió que se usaran los mecanismos actuados de forma paralela en los simuladores de vuelo como robots manipuladores, y destacó que los manipuladores paralelos requerían de un estudio más detallado en el contexto de las aplicaciones robóticas a la vista de las ventajas en cuanto a rigidez y precisión respecto a los robots serie convencionales (Aracil y Saltarén, 2006). En 1983 presentó un manipulador paralelo de 6 GDL accionado por actuadores giratorios.

Al trabajar con estructuras paralelas accionadas por cilindros neumáticos, los diseñadores se enfrentan al desafío de diseñar sistemas de control para procesos multivariables, de arquitecturas cinemáticas complejas, complicados modelos dinámicos altamente no lineales y de alta interacción, gran integración sensorial y exigentes especificaciones para los lazos

de control (Nalluri y Mallikarjuna, 2009), por lo que el control de trayectoria de estos sistemas se convierte en un reto para la comunidad científica internacional.

Un exacto control de la trayectoria en los robots paralelos manipuladores es clave para cumplir con los requerimientos del sistema, en donde, muy a menudo, estos dispositivos requieren el seguimiento de una trayectoria deseada para desempeñar su labor. El control de trayectoria en robots paralelos, ha sido implementado utilizando tanto estrategias no lineales como lineales (Pi y Wang, 2011).

La trayectoria deseada en la robótica se puede describir como la pose deseada de las coordenadas cartesianas del efector final del robot respecto a la base fija (Hu y otros, 2012). El movimiento del robot puede ser controlado realimentando la posición y velocidad ya sea en el espacio articular como en el espacio de tareas. El control de trayectoria en el espacio articular requiere la solución de la cinemática inversa para convertir la trayectoria deseada del robot en el espacio de tareas en las elongaciones correspondientes de cada articulación actuada, y presenta algunas limitaciones en cuanto a la compensación de las incertidumbres del sistema (Xian y otros, 2004). Por su parte, el control de trayectoria en el espacio de tareas, tiene la capacidad de compensar estas incertidumbres, aunque necesita la medición directa de las variables cartesianas del robot (Stefanovic, 2012, Izaguirre y otros, 2011), lo cual resulta muy costoso limitando el uso de estas estrategias en robots manipuladores industriales (Nazari y otros, 2014).

Muchas soluciones para resolver este problema en robots paralelos han sido propuestas. Kim propone (Kim, y otros, 2005) un control de trayectoria aplicado a un robot paralelo de 6 GDL, el cual tiene como desventaja el cálculo de la cinemática directa para la estimación de las variables espaciales. (Qi y otros ,2007), presenta una estrategia basada en la combinación del modo deslizante y técnicas borrosas, pero el sistema solamente es comprobado por simulación. Otra solución es basada en compensación por modelo dinámico, pero debido a las no linealidades que introducen el alto nivel de acoplamiento entre las extremidades de las estructuras robóticas paralelas, las incertidumbres del sistema y perturbaciones, el modelo dinámico de los robots paralelos resulta muy complejo y casi siempre inexacto (Wang y otros, 2008; Nazari y otros, 2014). En (Dumulu, 2014), se presentan dos diferentes enfoques de control utilizando controladores PID, para mejorar el

desempeño de un robot paralelo de tres grados de libertad en seguimiento de trayectoria. El rendimiento de ambos reguladores es comprobado mediante simulación. En una gran cantidad de aplicaciones de simuladores de conducción, el control de la trayectoria deseada en el espacio de tareas es de vital importancia para el desempeño del sistema. (Zhao y otros, 2010).

En Cuba, particularmente 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”, se ha mostrado gran interés por el desarrollo de la robótica debido a los grandes beneficios que esta rama puede aportar a la industria en nuestro país. Los estudios realizados, en el marco de dicho convenio, inicialmente se centraron en manipuladores paralelos de 2 GDL, 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 2 GDL construida en el CIDSIM (Rubio, 2007). Los trabajos de investigación con dicha plataforma se centraron en la obtención del modelo de la misma, estableciendo una estrategia de control robusta desacoplada para el posicionamiento del sistema en su conjunto, que fue validada en la práctica (Rubio, 2007), así como la implementación de dichos algoritmos en sistemas empotrados (Machado, 2007).

Dando continuidad a este trabajo, Izaguirre propone una estrategia de control en espacio de tareas para un robot paralelo de tres grados de libertad accionado por actuadores neumáticos con medición directa de las variables de posicionamiento cartesianas. Esta solución evitaba el cálculo de la cinemática directa y el modelo dinámico del robot. Demuestra mejoras en el desempeño del sistema en relación al posicionamiento de la plataforma móvil y el comportamiento del sistema es superior al caso del control desacoplado articular. No obstante este esquema no cumplía especificaciones de seguimiento de trayectoria, pero sus características de arquitectura abierta, permite la inclusión de una compensación lineal de realimentación directa para mejorar el comportamiento del sistema en este sentido y así garantizar un buen seguimiento a señales de referencia de mayores exigencias dinámicas logrando cumplir con las especificaciones de desempeño.

De esta forma podemos plantear el siguiente problema científico:

### **Problema científico**

Debido a que el esquema de control cinemático en espacio de tareas implementado en la plataforma de tres grados de libertad SIMPRO, no cumple con las especificaciones para seguimiento de camino, además de la dificultad de medir la velocidad y la aceleración de las variables espaciales, no se cuenta con una estrategia de control que garantice el seguimiento de trayectoria de la plataforma móvil en el espacio cartesiano así como de sus respectivas derivadas.

### **Hipótesis**

*Un esquema de control de trayectoria en el espacio de tareas que prescindiera del modelo dinámico del robot y de la resolución del problema cinemático directo y sin la necesidad de realimentación de las velocidades y las aceleraciones de las variables en el espacio cartesiano, y con la utilización de un sistema sensorial para la estimación de las posiciones cartesianas, garantiza el desempeño en aplicaciones de seguimiento de trayectoria del simulador de movimiento de tres grados de libertad SIMPRO, a pesar de las incertidumbres del modelo, el carácter acoplado y las no linealidades del sistema.*

### **Objetivo General**

Proponer un esquema de control de trayectoria en el espacio de tareas para un robot paralelo de tres grados de libertad accionado por actuadores neumáticos con medición directa de las variables de posicionamiento cartesianas, y sin el modelo dinámico del robot, para garantizar un seguimiento de trayectoria de la plataforma móvil, cumpliendo con los índices de desempeño del sistema, en una aplicación de simulador de movimiento.

### **Objetivos Específicos**

1. Analizar los fundamentos teóricos relacionados con los procesos de modelado de robots paralelos en la bibliografía especializada dentro del objeto de investigación.
2. Analizar estrategias de control en espacio de tareas implementadas para seguimiento de trayectoria en robots paralelos en la bibliografía especializada definiendo la solución que garantice los índices de funcionamiento de la aplicación.

3. Implementar un esquema de control de trayectoria en espacio de tareas para la plataforma neumática paralela de tres grados de libertad basado en el esquema de control cinemático en cascada en el espacio de tareas.
4. Validar el cumplimiento de los requisitos del esquema de control, mediante pruebas experimentales a través de simulación y en una aplicación de simulador de movimiento.

Para dar cumplimiento a los objetivos del trabajo se definen las siguientes tareas investigativas:

#### **Tareas investigativas**

- Conceptualización de los principales aspectos relacionados con los robots paralelos y los actuadores neumáticos en aplicaciones de simuladores de conducción.
- Análisis en la bibliografía especializada, identificación y selección de las técnicas de modelado de los robots paralelos y de los actuadores electro- neumáticos.
- Análisis de las estrategias de control en espacio de tareas para seguimiento de trayectoria implementadas en robots paralelos.
- Descripción de la estrategia de control cinemático en espacio de tareas.
- Análisis del desempeño en aplicaciones de seguimiento de trayectoria de la estrategia de control cinemático en espacio de tareas de la plataforma de tres grados de libertad mediante simulación y experimentos reales.
- Descripción de la estructura de control para el control de trayectoria en espacio de tareas en el simulador de tres grados de libertad.
- Ajuste de los controladores lineales correspondientes.
- Evaluación del desempeño del sistema robótico mediante simulación ADAMS/MATLAB y por experimentos con el robot paralelo de tres grados de libertad.

#### **Novedad Científica**

La novedad científica del trabajo consiste en la implementación de una estrategia de control de trayectoria en espacio de tareas para una estructura robótica paralela de tres grados de libertad actuada por cilindros neumáticos, utilizando técnicas *feedforward* muy simples, que prescinde del modelo dinámico de la planta y de la realimentación de la velocidad y aceleración del sistema, lo cual garantiza el cumplimiento de los índices de desempeño del sistema en seguimiento de trayectoria.

### **Contribuciones Teóricas**

- Solución de control de trayectoria en el espacio de tareas para un robot paralelo de tres grados de libertad accionado por actuadores neumáticos utilizando la medición directa de las variables de posicionamiento cartesianas, sin la necesidad del modelo dinámico del robot, garantizando seguimiento de trayectoria de la plataforma móvil.
- Control por adelanto de señal muy simple que permite el seguimiento de trayectoria de la plataforma móvil del robot paralelo de tres grados de libertad SIMPRO, sin realimentación de la velocidad y aceleración, que cumple con las especificaciones de seguimiento de trayectoria.

### **Contribuciones prácticas**

- Control por adelanto de señal con factibilidad de implementación desde el punto de vista práctico en microcontroladores empotrados de bajo costo, con mejoras en las prestaciones funcionales del robot en aplicación de simulador de movimiento industrial para seguimiento de trayectoria.

### **Organización del informe**

El informe está conformado por una introducción, el desarrollo organizado en tres capítulos, seguido de las conclusiones, recomendaciones y las referencias bibliográficas.

**Capítulo 1:** se exponen los principales aspectos teóricos relacionados con la robótica paralela y actuadores neumáticos. Se abordan además las principales técnicas de modelado de los sistemas electroneumáticos y las estructuras robóticas paralelas. Por último se hace un análisis crítico de las principales estrategias de control de trayectoria utilizadas aplicadas a sistemas robóticos en general.

**Capítulo 2:** se exponen las principales características constructivas y de funcionamiento del robot paralelo de tres grados de libertad SIMPRO utilizado como caso de estudio. Se realiza una descripción del modelo cinemático inverso del robot además del modelo no lineal del sistema electro-neumático. Se hace una descripción del paquete de simulación ADAMS, utilizado para realizar las simulaciones. Por último se describe el proceso de identificación experimental realizado para la obtención del modelo dinámico del sistema electro-neumático del robot.

---

**Capítulo 3:** Se hace una descripción del esquema de control de trayectoria en espacio de tareas planteado. Se muestran los resultados obtenidos a través de simulación utilizando Matlab/ADAMS, además de los resultados de las pruebas experimentales con el robot paralelo de tres grados de libertad.

## **CAPÍTULO 1. MODELADO Y CONTROL DE ROBOTS PARALELOS**

En este capítulo se abordan los principales conceptos acerca de los robots paralelos y se incursiona en aspectos de modelado y control de los sistemas electro-neumáticos utilizados para el accionamiento de estas estructuras. También se incluyen aspectos de las técnicas de modelado para los robots paralelos y se reflejan algunas estrategias de control más utilizadas para el control de trayectoria en estos dispositivos mecánicos, que servirán de apoyo para tomar decisiones en cuanto al camino a seguir para nuestra investigación.

### **1.1 Robótica paralela**

Aunque en la actualidad se encuentra muy extendido el uso de robots serie en muchas ramas de la industria, no se puede negar el rápido ascenso de los robots paralelos en varias aplicaciones, esto es debido fundamentalmente a las ventajas que estos ofrecen: alta rigidez y precisión, elevada velocidad de operación, manipulan cargas muy superiores a su propio peso y los actuadores pueden estar instalados en la plataforma fija.

Las cadenas cinemáticas simples son aquellas en las cuales cada miembro posee un grado de conexión (para cada elemento de enlace de un manipulador, el grado de conexión es el número de cuerpos rígidos conectados a dicho elemento de enlace a través de una articulación) que es menor o igual que dos; mientras que las cadenas cinemáticas cerradas se obtienen cuando cualquiera de los elementos de enlace, excepto la base, posee un grado de conexión mayor o igual que tres (Merlet, 2006).

Según (Barrientos y Penin,1997), cada uno de los movimientos que puede realizar cada articulación con respecto a la anterior, se denomina grado de libertad (GDL). El número de

grados de libertad del robot viene dado por la suma de los grados de libertad de las articulaciones que lo componen.

*Se puede definir a un manipulador paralelo genérico como un mecanismo de cadena cinemática cerrada en el que su efector final está unido a la base por varias cadenas cinemáticas independientes* (Merlet, 2006). Hay un caso particular de manipulador paralelo genérico que reúne las siguientes características:

1. Posee un mínimo de dos cadenas cinemáticas que permiten una adecuada distribución de la carga.
2. El número de actuadores es mínimo.
3. El número de sensores necesarios para el control del mecanismo en lazo cerrado es también mínimo.
4. Cuando los actuadores están bloqueados el manipulador permanece en la posición anterior al bloqueo.

Al manipulador paralelo genérico que reúne las características anteriores, Merlet, en (Merlet, 2006), lo denomina robot paralelo y lo define como aquel manipulador que está constituido por un efector final con  $n$  grados de libertad y una base fija, unidos por al menos dos cadenas cinemáticas independientes, en el que el movimiento se produce a través de  $n$  actuadores independientes.

### **1.1.1 Configuraciones estructurales de los robots paralelos**

Dependiendo de las prestaciones requeridas en los distintos campos de aplicación, existen muchas estructuras mecánicas en las que se basa el funcionamiento de los robots paralelos.

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 (Merlet, 2006).

Debido a que las configuraciones estructurales que existen para los robots paralelos dependen del número de combinaciones de las cadenas cinemáticas que lo componen, el tipo y la cantidad de las mismas y de las restricciones en el movimiento de las articulaciones, etc., es muy difícil generalizar su análisis. No obstante Merlet, siendo uno

de los autores que más ha profundizado en el estudio del tema, las divide en dos grupos según el movimiento que realizan: *los robots planares y los espaciales* (Merlet, 2006).

**Robots planares:** Un robot planar posee un efector final con dos o tres grados de libertad, dos traslaciones en el plano y una rotación, en caso de tener tres grados de libertad, sobre un eje perpendicular a dicho plano. En los robots planares de tres grados de libertad, tres cadenas soportan el efector final; las cadenas se conectan al efector final en tres puntos: generalmente el efector final es un triángulo (Merlet, 2006).

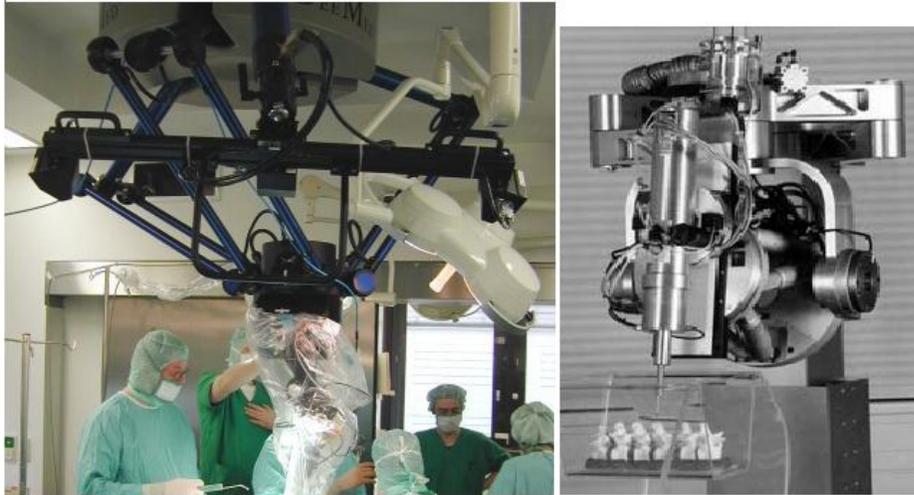
**Robots espaciales:** Los robots espaciales son aquellos que experimentan el movimiento en todo el espacio tridimensional y no en un plano, es decir; se pueden trasladar (posición en el espacio) y girar (orientación en el espacio) en los tres ejes de coordenadas; esto le confiere 3, 4, 5 y 6 grados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

### 1.1.2 Aplicaciones de la robótica paralela

Debido a la profundización en el estudio del funcionamiento de los robots paralelos, y al aumento de la capacidad de cómputo de los nuevos procesadores, se ha extendido el uso de los mismos en una gran cantidad de aplicaciones. Entre las principales podemos mencionar las aplicaciones industriales como máquinas herramientas y en centros de ensamblaje.

En aplicaciones médicas en los que se requiere alta precisión para operaciones en el campo de la oftalmología y neurocirugía, es también extendido su uso aprovechando la exactitud de posicionamiento del elemento terminal. Esta característica también es aprovechada en la industria de componentes electrónicos en la fabricación de circuitos integrados y placas electrónicas debido a la precisión que requiere realizar la soldadura de estos componentes.

Por último, pero no menos importante, esta su uso como simuladores de vuelo y de conducción para el adiestramiento de personal y como medio de recreación. En este trabajo se presenta una estructura de tres grados de libertad utilizada como simulador de avión en el adiestramiento de personal de las instalaciones académicas de las FAR (Fuerzas Armadas Revolucionarias).



**Figura 1.1** Aplicaciones de la robótica paralela

## **1.2 Actuadores en la robótica paralela**

Los actuadores son los dispositivos que se encargan de producir las fuerzas y/o torques en las estructuras mecánicas para generar el movimiento. En robótica, dichos dispositivos se clasifican de acuerdo a dos criterios fundamentales:

Según el tipo de movimiento generado: existen los actuadores lineales, los cuales generan el movimiento de traslación en la misma dirección que la de la estructura a la cual están conectados, y los de rotación, los cuales generan el movimiento de rotación respecto al eje del torque.

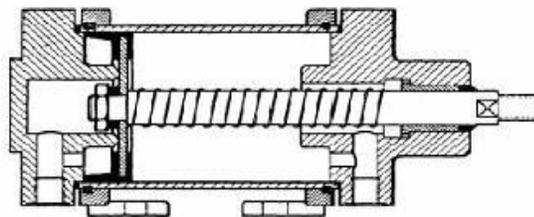
Según la naturaleza de la fuente primaria de energía: se dispone de actuadores neumáticos, que desarrollan su potencia a partir del fluido del aire comprimido; se clasifican en: cilindros neumáticos, de simple efecto y doble efecto; motores neumáticos, de aletas rotativas y pistones axiales. Actuadores hidráulicos, que su potencia se basa en el fluido hidráulico presurizado; se clasifican en cilindro hidráulico y motor hidráulico. Los actuadores eléctricos, en los que la potencia se genera a partir de la energía eléctrica; se clasifican en: actuadores eléctricos, motores de corriente continua (DC), controlados por inducido y controlados por excitación; motores de corriente alterna (AC), sincrónicos y asíncrónicos y motores paso a paso (Barrientos y Penin, 1997).

En los últimos años se está haciendo extensivo el uso de los actuadores electro-neumáticos en aplicaciones de plataformas de simulación para el posicionamiento continuo de estructuras mecánicas paralelas, principalmente porque constituyen una opción de bajo

costo, de respuesta rápida, elevada relación potencia-peso y fácil mantenimiento (Chillari y otros 2001).

No obstante, los actuadores neumáticos presentan características que dificultan considerablemente el control de su posición en aplicaciones donde se requiera el posicionamiento de la carga en cualquier parte de la carrera posible del cilindro. Esto es debido a que la dinámica de los actuadores neumáticos es altamente no lineal, por la compresibilidad del aire, el comportamiento no lineal del flujo de aire a través de las válvulas y la existencia de fuerzas de fricción estáticas y dinámicas entre el cilindro y el pistón que provocan serias perturbaciones al sistema. Además, la incertidumbre en los parámetros del sistema hace que el diseño de los controladores sea problemático (Song y Liu, 2006).

En los cilindros neumáticos se consigue el desplazamiento del émbolo encerrado en un cilindro, como consecuencia de la diferencia de presión en las cámaras. Los cilindros neumáticos pueden ser de simple o doble efecto. En los primeros, el émbolo se desplaza en un sentido como resultado del empuje ejercido por el aire a presión, mientras que en el otro sentido se desplaza como resultado de la acción de un muelle que lo devuelve a su posición de equilibrio.



**Figura 1.2. Cilindro de simple efecto**

En los de doble efecto el aire comprimido es el que provoca el movimiento en ambos sentidos al poder ser introducido arbitrariamente en cualquiera de las dos cámaras, esto se puede conseguir con una válvula de distribución accionada eléctricamente que conduce el flujo de aire hacia ambas cámaras del cilindro alternativamente (Barrientos y Penin, 1997).

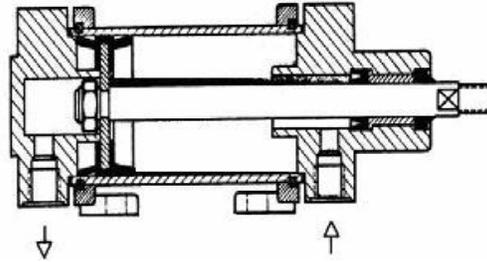


Figura 1.3 Cilindro de doble efecto

### 1.2.1 Modelado, identificación y control de los actuadores neumáticos

Los actuadores electro-neumáticos incorporan algunas de las ventajas propias de los eléctricos y los hidráulicos, lo que los hace una alternativa viable para una amplia gama de aplicaciones. Como los eléctricos, los neumáticos son limpios y seguros; se acoplan directamente a la carga en el sentido de su movimiento, al igual que los hidráulicos; y, además, los neumáticos son de bajo costo, respuesta rápida, elevada relación potencia-  
peso y fácil mantenimiento (FESTO, 2006).

Desarrollar estrategias para el control en este tipo de actuadores ha resultado ser bastante difícil, debido fundamentalmente a que la dinámica de los actuadores electro-neumáticos es altamente no lineal (Pearce, 2005).

A pesar de su dificultad, con el propósito de aprovechar las ventajas de esta tecnología, los actuadores electro-neumáticos se han ido introduciendo en aplicaciones de la robótica paralela donde es necesario el posicionamiento continuo de la carga, tal es el caso de la plataforma de 3 GDL para el simulador de conducción de SIMPRO.

### 1.2.2 Modelado de los actuadores neumáticos

Muchos autores han dedicado sus esfuerzos a desarrollar modelos analíticos de los actuadores neumáticos haciendo varias consideraciones. Burrows en (Burrows, 1972), obtiene un modelo dinámico lineal considerando que el gas es ideal, los cambios de estados son adiabáticos; los cambios de temperatura en las cámaras del cilindro son despreciables, sólo existe fricción viscosa y es constante y, además, considera el flujo másico a través de la válvula como función lineal de la posición del carrete de la válvula y la presión en el cilindro; finalmente, obtiene el modelo dinámico de la posición de la carga en función de la acción de control, que resulta de tercer orden tipo uno y sin ceros. Sin embargo, las no linealidades en los actuadores electro-neumáticos tienen gran influencia en

su desempeño dinámico, particularmente las relacionadas con la variación del volumen en las cámaras del cilindro en función de la posición de la carga. Estas no linealidades se tienen en cuenta en los modelos no lineales.

Un modelo muy completo que considera, además de la dinámica del flujo de aire, la de las presiones en el cilindro y la del movimiento de la carga, las fugas de aire entre las cámaras, la diferencia entre las áreas efectivas debido a la barra del pistón, la dinámica de la válvula y las no linealidades del flujo a través del orificio, así como también el retardo de transporte y la atenuación de la amplitud del flujo en los tubos que conectan la válvula y el cilindro, es el desarrollado por Richer en (Richer y Hurmuzlu, 2000). En este trabajo se diseñaron experimentos especiales que permitieron determinar el coeficiente de descarga de la válvula así como el de fricción viscosa del carrete, reflejando de este modo la dinámica de la válvula para tenerla en cuenta en el diseño del controlador. Este modelo posteriormente queda validado experimentalmente.

Con el objetivo de facilitar el trabajo a la hora de sintetizar estrategias de control, es necesario linealizar el modelo de los actuadores electro-neumáticos, sin que esto signifique la pérdida de los efectos de las no linealidades del mismo. Brun en (Brun y Belgharbi, 2000), obtiene un modelo linealizado en espacio de estados a partir de una aproximación polinomial multivariable del modelo no lineal determinado analíticamente por Belgharbi en (Belgharbi y Thomasset, 1999), el cual reduce a tercer orden promediando las constantes de tiempo de las cámaras del cilindro, con el objetivo de usar la realimentación de posición, velocidad y aceleración; variables que son usadas convencionalmente en el control de posición. En este modelo, la dinámica de la válvula queda despreciada ya que tiene un ancho de banda de 170 Hz, mientras el actuador sólo responde a 2,4 Hz.

En el trabajo de Karpenko puede verse la linealización del modelo sin promediar ninguno de sus parámetros. Como resultado obtiene un modelo de quinto orden (teniendo en cuenta la dinámica de la válvula) con un cero (Karpenko y Sepehri, 2004)). Aquí Karpenko también refleja la dinámica de la válvula; en este caso en la forma de una constante de tiempo con incertidumbre.

Rubio en (Rubio, 2007) desarrolla el modelo lineal del sistema considerando que el punto de operación del cilindro puede estar en cualquier posición. Trabajando con las funciones

que caracterizan el flujo de aire por la válvula, las presiones en las cámaras del cilindro y el movimiento de la carga, se obtiene un modelo lineal de cuarto orden, tipo uno, con un cero similar al de Karpenko. Este nuevo modelo, a diferencia del resto de los analizados, se tiene en cuenta el subdimensionamiento de la válvula y la diferencia entre las constantes de tiempo asociadas a las cámaras del cilindro. Luego, el modelo es reducido a uno de tercer orden tipo uno, sin ceros, obteniéndose así un modelo similar al reducido de Brun. El nuevo modelo describe con mayor precisión la dinámica del sistema. Aquí Rubio también desprecia la dinámica de la válvula, puesto que el ancho de banda de la misma es de 100 Hz, pero sí analiza los efectos de su subdimensionamiento.

### 1.2.3 Modelado de las válvulas de flujo

Las válvulas neumáticas comerciales de carrete no son construidas perfectamente ajustadas, dado que el aire no es un buen lubricante y la sensibilidad a la suciedad sería muy grande. Es por ello que, alrededor de la posición central del carrete, se tendrán fugas de aire hacia ambas cámaras del cilindro, y de estas hacia el exterior. En estas condiciones, las válvulas se consideran subdimensionadas (*underlapped valves*) (Burrows, 1972).

En general, el modelo de las válvulas electro-neumáticas se divide en dos partes: una primera, correspondiente a la dinámica del posicionamiento de su carrete, que depende fundamentalmente del sistema electromecánico que emplee; y una segunda, que corresponde al modelo de la característica estática del flujo de aire a través del orificio. Dicho flujo de aire depende de la temperatura del aire, el área efectiva del orificio y las presiones antes y después del mismo.

La dinámica de las válvulas empleadas en la actualidad es mucho más rápida que la dinámica de las cargas que se mueven con ellas, de ahí que muchos autores la desprecien (Brun y col., 2000; Janiszowski, 2004b). Por ejemplo, la válvula que emplea Brun tiene un ancho de banda de 170 Hz, mientras el actuador sólo responde a 2,4 Hz.

Rubio en su trabajo considera los efectos del subdimensionamiento de la válvula y demuestra la importancia de este criterio a partir de la comparación del modelo analítico con el modelo experimental. Sin embargo, desprecia la dinámica de la válvula, pues son empleadas válvulas MPYE de FESTO que tienen un ancho de banda de 100 Hz. Finalmente, al igual que hacen Kawashima y Janiszowski en sus trabajos, como función

para la característica estática del flujo de aire a través de la válvula, se toma la aproximación que se hace en la norma internacional ISO-6358 por ser un modelo mucho más sencillo, que describe perfectamente el fenómeno que se quiere (Rubio, 2007).

#### **1.2.4 Identificación experimental de los sistemas electro-neumáticos**

También se ha extendido el uso de técnicas de identificación experimental para la obtención de los parámetros de los modelos, con el objetivo de su utilización para el diseño de reguladores. Varseveld, por ejemplo, identifica el sistema en lazo abierto con una señal PRBS “*Pseudo Random Binary Signal*” de diferentes amplitudes y obtiene los modelos para las posiciones centro y extremos del cilindro. Para el diseño de la estrategia de control se queda con el modelo de la posición central (Varseveld and Bone, 1997).

Schulte y Hahn en (Schulte y Hahn, 2001), identifica el sistema en lazo cerrado con una señal sinusoidal de frecuencia variable centrada en cinco posiciones diferentes. Los modelos obtenidos para cada posición y frecuencia se combinan en una única estructura mediante un modelo borroso.

Zorlu y Özsoy en (Zorlu, Özsoy et al. 2003), identifica el sistema en lazo abierto con una señal PRBS, midiendo además de la posición de la carga, las presiones en las cámaras del cilindro. En este trabajo Zorlu obtiene un modelo que combina tres modelos lineales de primer orden que interactúan entre ellos, dos de ellos para la dinámica de las presiones dentro de la cámara, y uno para el movimiento del pistón, en lugar de un sólo modelo simple.

Rubio por su parte, obtiene un modelo lineal, de tercer orden tipo uno, a través de una identificación en lazo cerrado por tramos, dividiendo la carrera del cilindro en tramos y se identifica alrededor de cada uno de ellos cerrando un lazo de control de posición. De esta forma, obtiene una familia de modelos paramétricos que pueden ser combinados en una estructura de espacio de estado con coeficientes variables, para representar el sistema de forma continua. Este proceso debe hacerse en lazo cerrado porque de otra forma no podrían lograrse variaciones estables alrededor de cada tramo que se defina. El modelo obtenido para la posición central del cilindro, es el que tiene los polos complejos más próximo al origen del plano del lugar de las raíces; por lo que, representa la dinámica más exigente.

### 1.3 Modelado de los robots paralelos

Una de las desventajas reconocidas de los robots paralelos radica en la dificultad de la resolución de los modelos cinemático y dinámico (Wu y otros, 2008). No obstante, resulta imprescindible su obtención para implementar estrategias de control que dependen de la solución de estos modelos (Chen y otros, 2009).

Las expresiones cinemáticas estudian el movimiento del robot con respecto a un sistema de referencia, sin tener en cuenta las fuerzas o pares que lo producen, estableciéndose una relación analítica entre las funciones que representan el movimiento articular y las que describen la pose del elemento terminal en el espacio de trabajo. Cuando es necesario determinar la posición y orientación del elemento terminal con respecto a un sistema de coordenadas, siendo conocidas las variables articulares y los parámetros geométricos del robot, se está en presencia del problema cinemático directo; sin embargo, cuando se quiere determinar el valor de las coordenadas articulares para una configuración conocida que debe adoptar el robot, se define el problema cinemático inverso (Chalbat y Staicu, 2009).

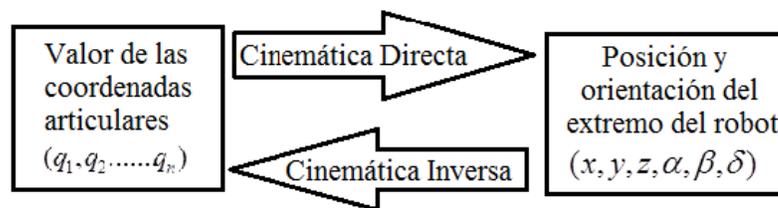


Figura 1.4 Relaciones de la cinemática inversa y directa

El modelo dinámico establece relaciones matemáticas entre las coordenadas cartesianas del elemento terminal, sus derivadas (velocidad y aceleración), las fuerzas y/o pares aplicados a las articulaciones y los parámetros del robot, tales como: masas de los eslabones, inercias, fricción, etc. (Kroneis y otros, 2008; Yen y Lai, 2009), estableciéndose de manera directa o inversa la interrelación entre las fuerzas y/o torques que actúan sobre el mecanismo y el movimiento que en él se origina.

La obtención de las expresiones dinámicas en los robots paralelos constituye un procedimiento muy laborioso, siendo difícil obtener muchos de los parámetros involucrados en dichas ecuaciones, aún mediante estimación en línea (Shurong y Shihuan, 2008).

### 1.3.1 Cinemática de los robots paralelos

Un robot paralelo, se caracteriza por los parámetros de su configuración mecánica y las variables que definen la pose del mismo. Los parámetros de configuración expresados en forma matricial definidos por los vectores  $\overrightarrow{OA_i}|_{R_f}$  y  $\overrightarrow{PB_i}|_{R_m}$  están constituidos por las coordenadas de los puntos de unión con la base en el sistema de referencia fijo ( $R_f$ ) y los puntos de unión con la plataforma móvil en el sistema de referencia móvil ( $R_m$ ) respectivamente (Rolland, 2007). Las variables del modelo cinemático la conforman las coordenadas articulares ( $q$ ) lineales o angulares, y las coordenadas generalizadas del elemento terminal ( $x$ ) que representan la posición de la plataforma móvil del robot en el espacio cartesiano.

Luego, el modelo cinemático es una relación implícita entre los parámetros de configuración y las variables de la pose, según la expresión general:

$$\Gamma(x, q \overrightarrow{OA_i}|_{R_f}, \overrightarrow{PB_i}|_{R_m}) \quad (1.1)$$

### 1.3.2 Modelo cinemático inverso

La cinemática inversa permite determinar las variables que definen las coordenadas articulares del robot a partir de conocidas la posición y orientación del elemento terminal en el espacio cartesiano. En el caso de los robots paralelos, dichas expresiones incluyen ecuaciones altamente acopladas, no lineales, cuya solución se complejiza notablemente con el aumento del número de grados de libertad (Cherfia y otros, 2007).

Existen dos procedimientos para el planteamiento del problema cinemático inverso en robots paralelos: el método analítico (basado en formulación vectorial) y el método geométrico (basado en formulación algebraica) (Merlet, 2006b).

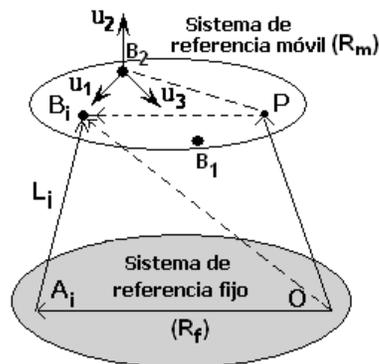


Figura 1.5 Representación de la formulación vectorial

Para cada cadena cinemática se puede establecer una función vectorial entre los puntos  $A_i$  y  $B_i$  expresada en las coordenadas generalizadas ( $x$ ), tal que  $\overline{A_i B_i} = U(x)$ . Entonces, de acuerdo a la figura 1.5, estableciendo  $\mathcal{R}$  como la matriz de rotación que define la orientación relativa del sistema de referencia móvil respecto al fijo, se plantea para un robot de  $n$  grados de libertad:

$$\overline{A_i B_i} = \overline{OP} + \mathcal{R}\overline{PB_i} - \overline{OA_i} \quad ; \quad i = 1 \dots n \quad (1.2)$$

Donde se cumple:

$$\overline{OA_i} \rightarrow OA|_{Rf} = [\overline{OA_1}, \dots, \overline{OA_n}] \quad y \quad \overline{PB_i} \rightarrow PB|_{Rm} = [\overline{PB_1}, \dots, \overline{PB_n}] \quad (1.3)$$

Cualquier pose de la plataforma móvil que satisface las restricciones cinemáticas impuestas por la estructura del robot, es determinada por el vector  $\overline{OB_i|_{Rf}}$ , por lo que se puede plantear la ecuación:

$$\overline{OB_i|_{Rf}} = \overline{OP|_{Rf}} + \mathcal{R}\overline{PB_i|_{Rm}} \quad ; \quad i = 1 \dots n \quad (1.4)$$

El desplazamiento lineal que experimenta cada cadena cinemática, puede ser expresado como la dimensión del vector  $\overline{A_i B_i}$ , donde:  $L_i = \|\overline{A_i B_i}\|_2$  expresión que se incorpora a (1.4) para llegar a la ecuación:

$$L_i^2 = \left[ \|\overline{OP|_{Rf}} + \mathcal{R}\overline{PB_i|_{Rm}} - \overline{OA_i|_{Rf}}\|_2 \right]^2 \quad ; \quad i = 1 \dots n \quad (1.5)$$

Luego, a partir de (1.5), los cuadrados de las longitudes de las cadenas articuladas, se pueden definir por la siguiente expresión matricial general:

$$L_i^2 = \|\overline{OA_i|_{Rf}}\|_2^2 + \|\overline{PB_i|_{Rm}}\|_2^2 + 2(OA|_{Rf} + \mathcal{R}(PB)|_{Rm})OP|_{Rf} + 2OA|_{Rf}\mathcal{R}(PB)|_{Rm} + \|\overline{OP|_{Rf}}\|_2^2 \quad (1.6)$$

La expresión anterior contiene términos lineales en las coordenadas del punto P, donde los términos cuadráticos, pueden desaparecer mediante manipulaciones matemáticas, quedando solamente un sistema de tres ecuaciones lineales de las coordenadas del punto P, al cual se incorpora la matriz de rotación para obtener la solución del mismo, cuando el robot presenta movimientos rotacionales (Merlet, 2006b). De esta manera a partir de

conocidas las coordenadas generalizadas del robot, se calcula el vector de coordenadas articulares.

### 1.3.3 Modelo cinemático directo

El modelo cinemático directo obtiene la posición del elemento terminal a partir de las variables articulares (Lu y otros, 2007). El procedimiento consiste en plantear la expresión (1.6) de manera inversa, obteniéndose de forma genérica un sistema de ecuaciones algebraicas no lineales donde se involucran funciones de las variables espaciales y articulares del robot (Rolland, 2005). Considerando la figura 1.5 se tiene que  $\overrightarrow{OA_i}|_{Rf}$  y  $\overrightarrow{PB_l}|_{Rm}$  describen la geometría de la base y de la plataforma móvil respectivamente, por lo que la magnitud del vector  $L_i = \|\overrightarrow{A_i B_i}\|_2$ , que indica las longitudes de las cadenas cinemáticas, se puede expresar como:

$$L_i = \|\overrightarrow{OB_i}|_{Rf} - \overrightarrow{OA_i}|_{Rf}\|_2 = \|\overrightarrow{OP}|_{Rf} + \mathcal{R}(\overrightarrow{PB_l})|_{Rm} - \overrightarrow{OA_i}|_{Rf}\|_2 \quad (1.7)$$

Definiendo tres puntos distintos ( $B_1, B_2, B_3$ ) para ubicar la localización de la plataforma móvil, se cumplirá que  $\overrightarrow{OB_i}|_{Rf} = [x_i, y_i, z_i]$  para  $i = 1 \dots 3$ . Estableciendo  $u_1, u_2, u_3$  como ejes coordenados del lugar donde articulan dichos puntos, se tiene:

$$u_1 = \frac{\overrightarrow{B_1 B_2}}{\|\overrightarrow{B_1 B_2}\|} \quad ; \quad u_2 = \frac{\overrightarrow{B_1 B_3}}{\|\overrightarrow{B_1 B_3}\|} \quad ; \quad u_3 = u_1 \wedge u_2 \quad (1.8)$$

Dado que la plataforma móvil se considera como un cuerpo rígido que no sufre deformación durante su movimiento, entonces para cualquier punto  $B_i$  que forme parte de la misma, se puede plantear:

$$\overrightarrow{B_1 B_i}|_{Rb1} = a_{B_i} u_1 + b_{B_i} u_2 + c_{B_i} u_3 \quad ; \quad i = 1 \dots n \quad (1.9)$$

Donde  $a_{B_i}; b_{B_i}; c_{B_i}$  ; ( $i = 1 \dots n$ ) son parámetros que solamente dependen de la geometría de la plataforma, siendo explícitamente deducidos a partir de  $\overrightarrow{PB_l}|_{Rm}$ , por lo tanto:

$$L_i^2 = (x_i - OA_{ix})^2 + (y_i - OA_{iy})^2 \quad ; \quad i = 1 \dots 3 \quad (1.10)$$

$$L_i^2 = \left\| \overrightarrow{B_k} \Big|_{R_{b_1}} - \overrightarrow{OA_k} \Big|_{R_f} \right\|_2 ; \quad i = 4 \dots 6 \quad (1.11)$$

Con ello se obtiene un sistema de ecuaciones algebraico que considera tres ecuaciones para las extremidades activas del robot y otras tres en términos de las variables  $x_i, y_i$ , es decir:

$$F_i = (x_i - OA_{ix})^2 + (y_i - OA_{iy})^2 - L_i^2 ; \quad i = 1 \dots 3 \quad (1.12)$$

$$C_i = \left\| \overrightarrow{B_k} \Big|_{R_{b_1}} - \overrightarrow{OA_k} \Big|_{R_f} \right\|_2 - L_i^2 ; \quad i = 4 \dots 6 \quad (1.13)$$

Para solucionar (1.12) y (1.13) es necesario disponer de al menos igual cantidad de ecuaciones que de incógnitas. Para ello, se derivan tres expresiones adicionales de restricción a partir del sistema de ecuaciones (1.15), que se obtienen de plantear dos ecuaciones que emplean la norma de los vectores que definen la localización de la plataforma (puntos  $B_i$ ) y una tercera a partir de multiplicaciones entre dichos vectores, por lo que se establece:

$$\begin{aligned} C_7 &= \left( \left\| \overrightarrow{B_2 B_1} \Big|_{R_f} \right\|_2 \right)^2 - (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2 = \left( \left\| \overrightarrow{B_2 B_1} \Big|_{R_f} \right\|_2 \right)^2 \\ C_8 &= \left( \left\| \overrightarrow{B_3 B_1} \Big|_{R_f} \right\|_2 \right)^2 - (x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2 + (z_3 - z_1)^2 = \left( \left\| \overrightarrow{B_3 B_1} \Big|_{R_f} \right\|_2 \right)^2 \\ C_9 &= (x_3 - x_1)(x_2 - x_1) + (y_3 - y_1)(y_2 - y_1) + (z_3 - z_1)(z_2 - z_1) \\ &= \left\| \overrightarrow{B_1 B_2} \Big|_{R_m} \right\| \wedge \left\| \overrightarrow{B_1 B_3} \Big|_{R_m} \right\| \end{aligned} \quad (1.15)$$

El último sistema de ecuaciones se desarrolla a partir de las siguientes combinaciones de funciones:

$$F_7 = -C_7 + F_1 + F_2 \quad (1.16)$$

$$F_8 = -C_8 + F_1 + F_3 \quad (1.17)$$

$$F_9 = 2C_9 + F_7 + F_8 - 2F_1 \quad (1.18)$$

Para el caso analizado, donde se ha definido la localización de la plataforma móvil por los puntos  $B_1, B_2, B_3$  (modelo de tres puntos), se obtiene un sistema de nueve ecuaciones con nueve incógnitas, formado por seis ecuaciones cuadráticas y tres cuárticas (Rolland, 2007; Faugere y otros, 2006).

La cinemática directa en robots paralelos se enfoca a la obtención de un sistema complejo de ecuaciones polinómicas, difícil de manipular de manera analítica, por lo que requiere procedimientos numéricos para su solución, donde desafortunadamente no existe una solución única cerrada (Sung-Hua y otros, 2008).

### 1.3.4 Modelo dinámico de los robots paralelos

Una forma muy general para representar el modelo dinámico de un robot de  $n$  grados de libertad (Zhao y Gao, 2009) en el espacio articular es:

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) \quad (1.20)$$

Dónde:

$M(q)$ : Matriz inercia ( $n \times n$ )

$C(q, \dot{q})$ : Matriz de fuerzas de Coriolis y Centrífugas ( $n \times 1$ )

$G(q)$ : Vector de fuerzas gravitacionales ( $n \times 1$ )

$q$ : Vector de coordenadas articulares ( $n \times 1$ )

$\tau$ : Vector de fuerzas o pares articulares aplicados ( $n \times 1$ )

Entre las formulaciones más empleadas para la obtención de estos modelos se encuentran el método de Newton-Euler, la Formulación Lagrangiana, las Ecuaciones de Gibbs – Appell y el Principio del Trabajo Virtual. Todos estos métodos implican desarrollos muy laboriosos para la obtención de estos modelos, además que los mismos requieren un elevado tiempo de cómputo, característica que se convierte en desventaja para la implementación de estrategias de control que requieran su uso en tiempo real (Izaguirre, 2012).

Por este motivo es recomendable evitar el desarrollo analítico de estas expresiones dinámicas, y en su lugar, se recomienda el uso de paquetes de software que faciliten la descripción del comportamiento dinámico del sistema en su conjunto (Li y otros, 2009; Fumagalli y Masarati, 2009).

## 1.4 Estrategias de control de trayectoria

En aplicaciones de seguimiento de trayectoria, el manipulador se mueve a través de un camino trazado en el espacio para realizar una tarea determinada según la aplicación. Este

camino es generalmente especificado en el espacio cartesiano en términos de trayectoria deseada del efector final, mientras que las acciones de control son realizadas en el espacio articular. Esto conlleva a dos tipos de esquemas de control de trayectoria, uno en el espacio cartesiano y otros en el espacio articular (Siciliano y Khatib, 2008).

El problema del control de trayectoria, ya sea en el espacio de tareas como en el articular, consiste en seguir una trayectoria dada en el tiempo  $\mathbf{q}_d(t)$  o  $\mathbf{x}_d(t)$  y sus sucesivas derivadas  $\dot{\mathbf{q}}_d(t)$  o  $\dot{\mathbf{x}}_d(t)$  y  $\ddot{\mathbf{q}}_d(t)$  o  $\ddot{\mathbf{x}}_d(t)$ , las cuales describen la velocidad y aceleración deseadas respectivamente (Siciliano y Khatib, 2008). Una gran cantidad de estrategias de control, lineales y no lineales, han sido reportadas en la literatura en los últimos años, con el uso de modelo dinámico inverso, técnicas de linealización de la realimentación, entre otras.

La combinación de los controladores borrosos con las bondades del control por modo deslizante ha ganado gran interés en los últimos años en la comunidad científica internacional y numerosos trabajos se han realizado en aplicaciones de robots paralelos. En el artículo, (Qi y otros, 2007), se propone un esquema de control de trayectoria basado en modo deslizante para una plataforma paralela de 4 grados de libertad. En este caso un controlador supervisor borroso adaptativo (FASC), es combinado con un controlador borroso en modo deslizante (FSMC) para reducir el *chattering*. Esta estrategia tiene como característica que el diseño es simple y son necesarias menos reglas borrosas. En simulación se demuestra que se logra reducir el *chattering* y se obtienen buenos desempeños en seguimiento de trayectoria con buena robustez ante incertidumbres en los parámetros y disturbios del sistema.

En sus trabajos, el francés Flavien Paccot demuestra las ventajas del control en el espacio de tareas respecto al articular en robots paralelos, y evalúa estrategias de control PID simples y por par calculado, considerando siempre disponible la información de la pose de la plataforma móvil, por lo que no propone variantes de sistema sensorial, aun reconociendo la dificultad que implica la medida directa de la ubicación del elemento terminal del robot (Paccot y otros, 2009). En este control se podrían esperar buenos resultados si se contara con un buen modelo dinámico y una buena identificación dinámica,

además de un buen algoritmo para las transformaciones numéricas restantes (Paccot y otros, 2009).

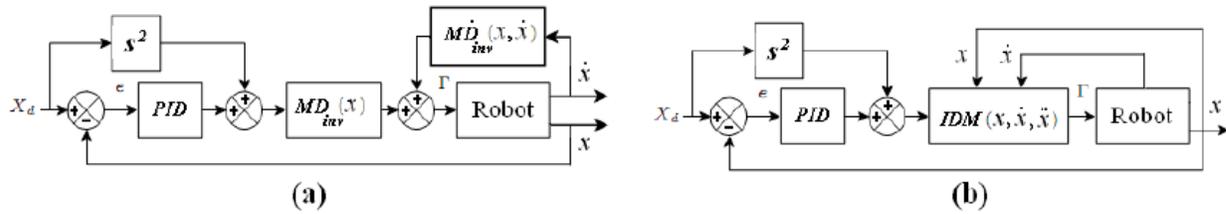


Figura 1.6. a) Control PID en el espacio de tareas con la dinámica del efector final. b) Control por par calculado en el espacio de tareas.

En este caso se presenta una estrategia de control de posición de trayectoria en espacio de tareas en cascada con un lazo de control de seguimiento de fuerza basado en modelo, que es ampliada con una acción PD que es la encargada de que el error de seguimiento de trayectoria converja a cero de manera exponencial (Davliakos y Papadopoulos, 2007). Esta estrategia tiene como característica que el lazo interno de fuerza es más rápido que el lazo externo de posición. Tiene como ventaja que no es necesario la estimación de la aceleración de la derivada de la fuerza deseada, lo cual constituye un problema por la aparición de ruido en el sistema de control. Esta estrategia utiliza la solución del modelo dinámico inverso del sistema para describir el movimiento de la plataforma móvil y la acción del sistema hidráulico. Además las variables de  $q$  y  $\dot{q}$  son obtenidas a partir de la solución de la cinemática directa. El esquema de control se muestra en la figura 1.7. Las simulaciones arrojaron buenos resultados ante seguimiento de trayectoria en las variables del espacio de tareas.

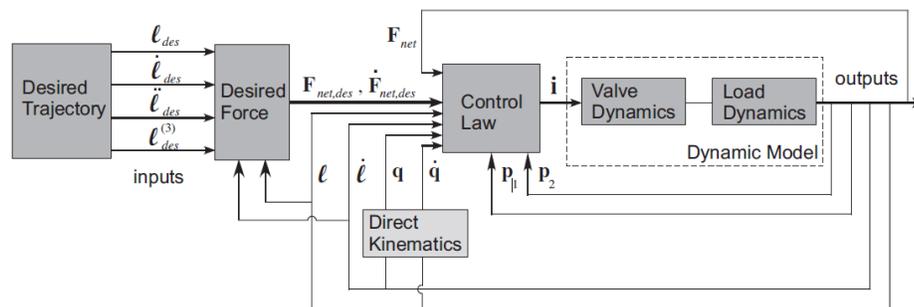


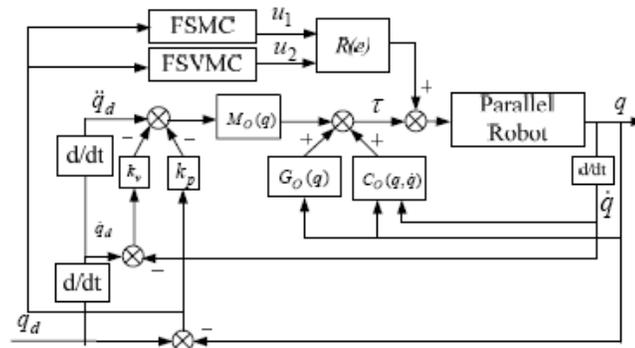
Figura 1.7 Estrategia de control de posición de trayectoria en espacio de tareas en cascada con un lazo de control de seguimiento de fuerza basado en modelo

En este trabajo se implementa un control de trayectoria para un robot paralelo de seis grados de libertad, accionado por seis electromotores. Debido a las no linealidades presentes en el sistema, incertidumbres y disturbios externos, es introducida en el sistema de control la teoría del modo deslizante. Un FSVMC (*fuzzy support vector machines control*) basado en modo deslizante es diseñado para reducir las oscilaciones que genera el controlador por modo deslizante (Dequan y otros, 2011).

El controlador diseñado consiste en un FSMC (*fuzzy sliding mode controller*) y un FSVMC (*fuzzy support vector machines control*), en donde la acción de control es seleccionada a través de una función que compara las señales de mando de cada controlador y escoge la acción a ejecutar según los valores que tome la función de conmutación.

La estructura del esquema de control es mostrada en la figura 1.8 en donde  $q$  denota la trayectoria real del robot y  $q_d$  la trayectoria deseada,  $e$  el error de trayectoria, FSVMC denota controlador de mecanismo de conjunto borroso (*fuzzy support machines controller*); FSMC denota el controlador borroso en modo deslizante;  $R(e)$  denota la función de conmutación cuyas entradas son  $e$  y  $\dot{e}$ .

Se utilizan algoritmos de optimización para los parámetros de los reguladores para de esta manera obtener un mejor sistema de control. Se comprueba que en el sistema son compensados los disturbios externos y las incertidumbres del sistema. El método de control diseñado garantiza un buen seguimiento de trayectoria con alta precisión y velocidad y reduce el *chattering* (Dequan y otros, 2011).



**Figura 1.8** Estrategia de control basada en un FSMC (*fuzzy sliding mode controller*) y un FSVMC (*fuzzy support vector machines control*).

Los errores de modelado causados por las aproximaciones realizadas en los modelos de los robots paralelos, causan el deterioro de los controladores basados en modelos dinámicos inversos afectando el desempeño en trayectoria. En este trabajo los errores causados por las aproximaciones realizadas son tratados como perturbaciones y un control  $H_\infty$  es utilizado para lidiar con este problema, ya que las aproximaciones realizadas en el modelo son necesarias para reducir el costo computacional. Finalmente se combina con un IDC (Controlador por dinámica inversa) con aproximaciones dinámicas.

Un controlador PID para seguimiento de trayectoria de manera *feedforward* y un controlador  $H_\infty$  para compensar los errores de modelado, son utilizados como se muestra en la figura 1.9 (S.-H. Lee, 2003). El esquema demuestra buenos resultados de desempeño en seguimiento de trayectoria a altas frecuencias de señales de referencia en comparación con un simple controlador PID. Para esto es necesario la obtención de las ecuaciones dinámicas del sistema (S.-H. Lee, 2003).

Los IDC (Controlador por dinámica inversa) ofrecen buen desempeño con modelos dinámicos precisos aunque cuando el modelado no es lo suficientemente bueno no ofrece buenos resultados (S.-H. Lee, 2003).

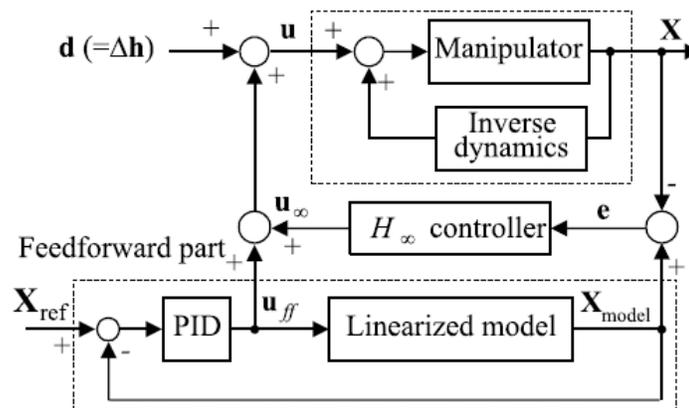


Figura 1.9 Control  $H_\infty$  para seguimiento de trayectoria

La teoría del control robusto no lineal es muy utilizada ya que garantiza la estabilidad general de los sistemas de control (Barmish y otros, 1996). En este trabajo el autor presenta una estrategia de control robusta no lineal con un estimador de fricciones en el espacio cartesiano para un manipulador paralelo de 6 grados de libertad diseñado en el espacio cartesiano (Kim, H. y otros, 2005). Esta estrategia presenta el problema que las aproximaciones de las incertidumbres del sistema se pueden definir como algo inciertas además que no hacen un buen tratamiento del fenómeno del *stick-slip*, lo cual causa el degradamiento del comportamiento del sistema en aplicaciones de tiempo real. En aplicaciones de seguimiento de trayectoria mostró mejor desempeño que otras estrategias no lineales que utilizaban estimadores de fricción también (Kim, H. y otros, 2005).

La técnica de control *feedforward* es muy utilizada para compensar el efecto de las perturbaciones conocidas y para proveer acciones de control anticipatorias para seguimiento de trayectorias deseadas. En muchas ocasiones es imposible controlar un sistema no lineal sin la incorporación de un lazo de control *feedforward* (Slotine and Li, 1989). Es importante decir que para esto es necesario contar con el modelo de la planta además que este sea lo más exacto posible. Los problemas de control de trayectoria siempre necesitan la acción de control *feedforward*, convirtiendo la acción del regulador en una combinación *feedback-feedforward*. Esta combinación ha demostrado tener mejores resultados que los sistemas de control por realimentación simple por sí solos.

$$u = \textit{feedback} + \textit{feedforward}$$

Jean Jacques Slotine (Slotine and Li, 1989) en su libro “*Applied Nonlinear Control*” presenta una estrategia de control (figura 1.10) donde la parte *feedforward* es usada para cancelar el efecto de las perturbaciones conocidas proveyendo una acción anticipativa por lo que resulta de gran ayuda para controlar la trayectoria en un robot paralelo dado su alto carácter no lineal. Nótese que para realizar una compensación *feedforward* siempre se requiere el modelo de la planta, aunque en muchos casos no necesita ser un modelo tan exacto. La calidad del desempeño del sistema de control, dependerá en gran medida de la exactitud del modelo estimado. Luego el término *feedforward* se calcula invirtiendo el modelo de la planta y será responsable de reducir y eliminar el error de seguimiento. El problema de implementar este control radica en el hecho de que en la mayoría de los casos

el modelo inverso de la planta será un sistema con más ceros que polos, o sea, un sistema irrealizable físicamente.

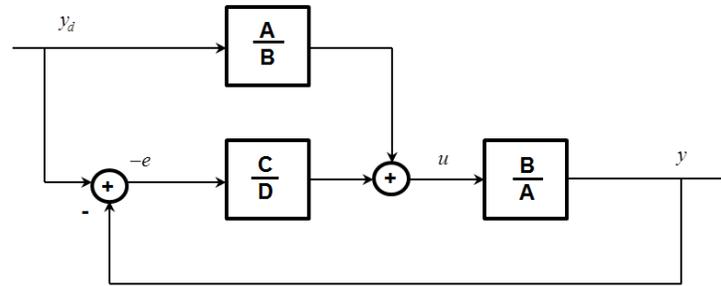


Figura 1.10 Estrategia de control de trayectoria generalizada

A partir del diagrama en bloques de la figura se pueden obtener las señales de  $e$ ,  $u$  y  $y$ , dadas por:

$$e = y_d - y \quad (1.21)$$

$$u = y_d \frac{A}{B} + e \frac{C}{D} \quad (1.22)$$

$$y = u \frac{B}{A} \quad (1.23)$$

Sustituyendo (1.21) en (1.22) y (1.22) en (1.23), se demuestra que la configuración propuesta por Slotine, permite un seguimiento perfecto la salida respecto a la referencia,  $y_d = y$ . Esta configuración presenta la desventaja de que no puede ser utilizada directamente para resolver problemas de trayectoria en sistemas de fase no mínima, que presentan ceros positivos, ya que el inverso del modelo sería inestable.

### Conclusiones parciales

El uso de los robots paralelos en disímiles aplicaciones gracias a las ventajas que estos ofrecen, trae consigo múltiples retos para su control, debido al carácter no lineal y acoplado de su estructura y la existencia de diferentes tipos de singularidades en el sistema.

A pesar de las ventajas que trae el uso de los actuadores neumáticos, por sus características de tecnología limpia y de respuesta rápida, etc., su control se dificulta por ser un sistema

---

con altas no linealidades debido a la compresibilidad del aire, siendo esto un reto para los diseñadores de sistemas de control.

El modelado cinemático directo así como el dinámico de las estructuras paralelas constituyen procedimientos muy laboriosos y que requieren gran potencia de cálculo para su implementación en aplicaciones de tiempo real, por lo que se recomienda evitar el uso de estrategias de control que impliquen el cálculo de estos modelos.

Las diferentes estrategias de control en espacio de tareas puestas a consideración resultan eficientes para el control de trayectoria en aplicaciones de robots paralelos de diferentes grados de libertad, aunque en su mayoría es un requerimiento la obtención del modelo del sistema.

La estrategia de control planteada por Slotine para seguimiento de trayectoria, constituye una solución de fácil implementación que logra alcanzar excelentes resultados, y que se solapa con la estrategia de control cinemático en espacio de tareas, logrando aprovechar las ventajas de este esquema de arquitectura abierta para nuestra propuesta.

## CAPÍTULO 2. MODELADO DEL ROBOT PARALELO DE 3 GDL

En este capítulo se realiza primeramente una descripción de la plataforma de simulación objeto de estudio. Seguido a esto, se desarrolla el modelo cinemático inverso obtenido de la plataforma de tres grados de libertad para estimar las elongaciones de los pistones a partir de las variables espaciales de orientación. También se describe el método de identificación experimental para la obtención del modelo electro-neumático y se muestran los resultados obtenidos de estos modelos.

### 2.1 Descripción de la plataforma de tres grados de libertad

El simulador de movimiento objeto de estudio es un robot paralelo de tres grados de libertad, en la figura 2.1 se muestra la estructura robótica. El mismo está compuesto por una base fija que se une a la plataforma móvil mediante tres cadenas cinemáticas independientes formando una arquitectura del tipo RPSU-2SPS.



Figura 2.1 Plataforma de tres grados de libertad SIMPRO

Cada extremidad posee un pistón neumático FESTO DNC-125-500 de doble efecto de desplazamiento lineal, los cuales producen los movimientos espaciales de la cabina. Las elongaciones de los vástagos de los cilindros son sensadas por potenciómetros lineales, tipo MLO-POT-500-TLF, de  $\pm 0,01$  mm de precisión, cuyas señales de salida sirven como retroalimentación a los lazos de control, para lograr desplazamientos precisos de los vástagos, garantizando la correcta orientación de la plataforma móvil en cada instante de tiempo. Los pistones son accionados por válvulas MPYE 5-3/8-010-B, este accionamiento proporciona al sistema los tres grados de libertad con que se mueve en el espacio de tareas, denominados: ladeo, cabeceo y elevación; representados por las variables  $\theta$ ,  $\varphi$  y  $h$  respectivamente.

De esta forma, se logra la orientación deseada del elemento terminal en el espacio cartesiano, y gracias a ello, simular escenarios virtuales que son visualizados en un monitor ubicado en el interior de una cabina que con capacidad para dos personas, descansa soportada sobre la plataforma móvil. El robot está diseñado para soportar una carga de 2.18 su peso total, por lo que posee una excelente relación carga útil-peso, y además, posee un relativamente pequeño espacio de trabajo, ambas características esenciales en los robots paralelos.

Los grados de libertad de la plataforma móvil varían para el cabeceo en  $\pm 17$  grados y para el ladeo en  $\pm 18$  grados aproximadamente, mientras que la altura experimenta variaciones de  $\pm 215$  mm a partir de la altura media de la plataforma (1285 mm). Los movimientos son ilustrados en las figura 2.2.

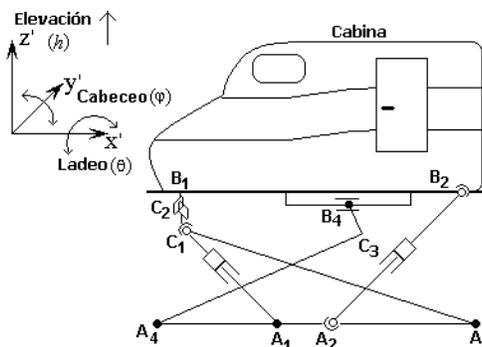


Figura 2.2 Orientación en el espacio de la plataforma móvil

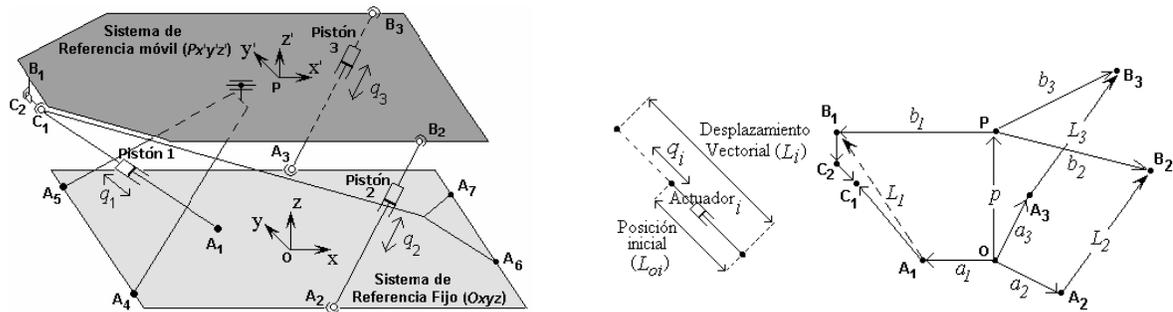
En la Tabla 2.1 se muestran de manera resumida los datos técnicos y principales especificaciones del simulador.

**Tabla 2.1 Datos técnicos de la plataforma de tres grados de libertad**

Descripción del Parámetro	Valor
Máxima elevación de la plataforma móvil	430 mm
Altura inicial de la plataforma móvil	1070 mm
Ángulo de ladeo de la plataforma móvil	$\pm 18^\circ$
Ángulo de cabeceo de la plataforma móvil	$\pm 17^\circ$
Máxima elongación de los actuadores	500 mm
Aceleración máxima de los actuadores	$980 \text{ mm/s}^2$
Masa total del robot	1034 kg
Relación carga útil-peso	2.18

### 2.2 Modelado Cinemático de la plataforma de tres grados de libertad

Para el desarrollo del modelo cinemático inverso se emplea la formulación vectorial, método analítico muy intuitivo, que permite mediante procedimiento geométrico desarrollar un sistema de ecuaciones cinemáticas con igual cantidad de ecuaciones que de incógnitas (Tsai, 2000). En este sentido se emplean las variables y nomenclatura de la figura 2.3.



**Figura 2.3 Nomenclatura utilizada para el desarrollo del modelo cinemático inverso**

Para conocer la orientación del elemento terminal se hace uso de los ángulos de Euler empleando el convenio *ZYX* conocido también como "*roll-pitch-yaw*" (Izaguirre, 2011); planteándose la expresión para la matriz de rotación ( ${}^A R_B$ ) como:

$${}^A R_B = \begin{bmatrix} c\psi & -s\psi & 0 \\ s\psi & c\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\varphi & 0 & s\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\varphi & 0 & c\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\theta & -s\theta \\ 0 & s\theta & c\theta \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Como no existe rotación alrededor del eje  $z'$ , el ángulo de guiñada ( $\psi$ ) es cero, y la matriz de rotación queda como:

$${}^A R_B = \begin{bmatrix} c(\varphi) & s(\varphi)s(\theta) & s(\varphi)c(\theta) \\ 0 & c(\theta) & -s(\theta) \\ s(\varphi) & c(\varphi)s(\theta) & c(\varphi)c(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Donde:  $s(var) = \sin(var)$ ;  $c(var) = \cos(var)$

Inicialmente, se parte de formular las expresiones matemáticas correspondientes a los vectores de cierre para cada una de las cadenas cinemáticas que unen los puntos  $A_i$  de la base fija (cuyas coordenadas son conocidas) con los puntos  $B_i$  de la plataforma móvil (cuyas coordenadas dependen de la orientación y posición de la plataforma móvil); según se indica en la figura 2.3.

En tal sentido se obtienen las expresiones vectoriales cerradas para las extremidades actuadas definidas por las ecuaciones de la 2.3 a la 2.5. Conociendo los desplazamientos iniciales de las articulaciones  $L_{oi}$  y el vector  $L_i = \|A_i B_i\|_2$  el cual corresponde a la solución de la cinemática inversa, las variables articulares pueden ser encontradas evaluando  $qi = \pm L_i - L_{oi}$ . Entonces, para cada cadena cinemática, una función vectorial puede ser formulada para expresar las coordenadas articulares en función de las coordenadas cartesianas ( $x$ ), las cuales definen la pose del elemento terminal de la plataforma.

$$\overrightarrow{A_1 B_1} = \overrightarrow{OP} + {}^A R_B \overrightarrow{PB_1} - \overrightarrow{OA_1} \quad (2.3)$$

$$\overrightarrow{A_2 B_2} = \overrightarrow{OP} + {}^A R_B \overrightarrow{PB_2} - \overrightarrow{OA_2} \quad (2.4)$$

$$\overrightarrow{A_3 B_3} = \overrightarrow{OP} + {}^A R_B \overrightarrow{PB_3} - \overrightarrow{OA_3} \quad (2.5)$$

Debido a la configuración estructural del robot, la plataforma móvil experimenta un movimiento de traslación curvilínea cuando se eleva, dicho desplazamiento ocurre en el plano  $x - z$  según se muestra en la figura 2.4\_a) (Izaguirre y otros, 2011e).

Para conocer el desplazamiento adicional que sufre la plataforma móvil al elevarse, se desarrollan las ecuaciones de la línea recta  $PP'$  en el plano  $z - x$ , y del círculo de radio  $r$  en coordenadas cartesianas, según el esquema de la figura 2.4\_b) (Izaguirre y otros, 2011e). Las ecuaciones son enunciadas respectivamente en 2.6 y 2.7.

$$z = mx + b \quad (2.6)$$

$$(x - x_c)^2 + (z - z_c)^2 = r^2 \quad (2.7)$$

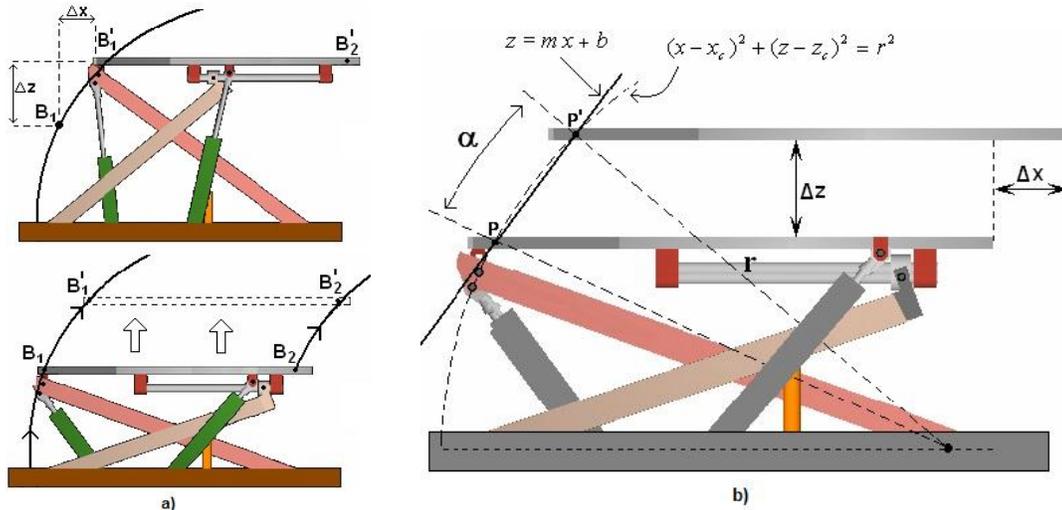


Figura 2.4 \_a) Traslación curvilínea de la plataforma móvil: Altura mínima y altura máxima. b) Intersección del segmento de arco de radio  $r$  y la línea recta  $PP'$  durante el movimiento de elevación de la plataforma móvil.

Para encontrar la intersección de la recta  $PP'$  con la circunferencia de radio  $r$ , se sustituye 2.6 en 2.7:

$$(x - x_c)^2 + (mx + b - z_c)^2 - r^2 = 0 \quad (2.8)$$

Desarrollando 2.8 y expresando la misma en forma polinómica obtenemos:

$$k_1 x^2 + k_2 x + k_3 = 0 \quad (2.9)$$

Dónde:

$$k_1 = 1 + m^2 \quad (2.10)$$

$$k_2 = 2m(b - z_c) - 2x_c \quad (2.11)$$

$$k_3 = x_c^2 + z_c^2 + b(b - 2z_c) - r^2 \quad (2.12)$$

Las raíces de 2.9 son:

$$x_{1,2} = \frac{-k_2 \pm \sqrt{k_2^2 - 4k_1 k_3}}{2k_1} \quad (2.13)$$

El desplazamiento en el eje  $z$  ( $\Delta z$ ) en función del desplazamiento en el eje  $x$  ( $\Delta x$ ) se obtiene:

$$\Delta z = (mx_2 + b) - (mx_1 + b) = m(x_2 - x_1) \quad (2.14)$$

Sustituyendo (2.13) en (2.14), ordenando y reagrupando llegamos a:

$$\Delta z = m \left[ \left( \frac{k_2}{k_1} \right)^2 - \frac{4k_3}{k_1} \right] \quad (2.15)$$

La ecuación (2.15) es incorporada al sistema de ecuaciones de la cinemática inversa, permitiendo corregir los valores de las coordenadas de los puntos  $B_i$  de la plataforma móvil para cualquier valor de altura de la misma y viceversa, en dependencia de la necesidad que exista de solucionar el problema cinemático inverso o directo. Considerando como valor inicial la altura media de la plataforma; quedan definidos los puntos de la base fija y del elemento terminal (en mm) según las coordenadas siguientes:

$$\mathbf{A1} = [-180; 0; 0]^T$$

$$\mathbf{A2} = [180; -500; 0]^T$$

$$\mathbf{A3} = [180; 500; 0]^T$$

$$\mathbf{B1} = [-840; 0; h]^T$$

$$\mathbf{B2} = [896; -500; h]^T$$

$$\mathbf{B3} = [896; 500; h]^T$$

$$\mathbf{C1} = [-760; 0; h-210]^T$$

$$\mathbf{C2} = [-840; 0; h-150]^T$$

De acuerdo con la expresión  $[q_1, q_2, \dots, q_i]^T = \mathbf{q} = f(x, y, z, \theta, \varphi, \psi)$ , es posible encontrar la relación  $A_i B_i$  para encontrar la cinemática inversa del robot en donde  $i = 1 \dots 3$ .

$$\overrightarrow{A_i B_i} \Big|_{R_A} = \overrightarrow{OP} \Big|_{R_A} + {}^A R_B \overrightarrow{PB_i} \Big|_{R_B} - \overrightarrow{OA_i} \Big|_{R_A} \quad (2.16)$$

A partir de la formulación vectorial (2.16) y considerando la matriz de rotación y utilizando la convención “Roll-Pitch-Yaw” se pueden encontrar las siguientes ecuaciones del desplazamiento de las articulaciones:

$$q_1 = \pm \sqrt{(2076 - \lambda_0 - 940c(\varphi))^2 + (740 + h + 940s(\varphi))^2} - L_{01} \quad (2.17)$$

$$q_2 = \pm \sqrt{(1397 - \lambda_0 + 720c(\varphi) + \lambda_1)^2 + \lambda_2^2 + (\lambda_3 - \lambda_4)^2} - L_{02} \quad (2.18)$$

$$q_3 = \pm \sqrt{(1397 - \lambda_0 + 720c - \lambda_1)^2 + \lambda_2^2 + (-\lambda_3 - \lambda_4)^2} - L_{03} \quad (2.19)$$

$$\cos(.) = c(.); \sin(.) = s(.)$$

Donde:

$$\lambda_0 = \sqrt{1672^2 - 1720h - h^2} \quad (2.20)$$

$$\lambda_1 = 500s(\theta)s(\varphi); \lambda_2 = 500c(\theta) - 500 \quad (2.21)$$

$$\lambda_3 = 500s(\theta)c(\varphi); \lambda_4 = 720s(\theta) + 945 + h \quad (2.22)$$

El sistema de ecuaciones de la (2.17) a la (2.19) permite calcular el vector de coordenadas articulares  $[q_1 \ q_2 \ q_3]^T$  del robot a partir de las variables que definen la posición/orientación de la plataforma móvil  $[h \ \theta \ \varphi]^T$ .

### 2.3 Modelo no lineal de los actuadores neumáticos.

El modelo no lineal del sistema se obtiene a partir del modelo de la válvula, la dinámica de las presiones y el modelo de la masa móvil, donde se tiene en cuenta el dimensionamiento característico presente en el carrete de las válvulas proporcionales neumáticas. El fluido gaseoso a través de ellas es mal lubricante y siempre va a existir un flujo constante en su punto de equilibrio que provoca una no linealidad en el sistema (Burrows, 1972).

El modelo de un actuador requiere analizarse en tres sub-sistemas:

**Modelo de la válvula:** Contempla la dinámica del flujo de aire a través de la válvula en función de la acción de control y las presiones en sus extremos.

**Modelo del actuador:** Contempla la dinámica de las presiones en las cámaras del cilindro en función del flujo de aire y los volúmenes de las cámaras del cilindro, así como sus variaciones. Estos dos últimos parámetros quedan definidos por la posición y velocidad del émbolo (y, por tanto, de la carga) si se conoce el área de sus dos caras.

**Modelo de la carga:** Contempla la dinámica del movimiento de la carga en función de las presiones aplicadas a cada lado del émbolo y las fuerzas externas y de fricción que estén presentes en la estructura mecánica.

Las válvulas FESTO MPYE-5-3/8-010-B, presentan un ancho de banda aproximadamente de 100 Hz, por lo que su dinámica frente a la dinámica de la carga es despreciable (Rubio, 2007); como resultado, el modelo de la válvula sólo incluye la característica estática del flujo de aire. Mediante experimentos, (Prieto, 2013) demuestra de la presencia de una no

linealidad del tipo *backslash*, característica propia de las válvulas neumáticas (Karpenko y Sepehri, 2004).

También se realiza el análisis de la dinámica de las presiones de las cámaras del cilindro electro-neumático de doble efecto y el balance de fuerzas del cilindro dando como resultado que la dinámica de un sistema neumático puede ser resumido en:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{P}_1 = \frac{RT}{V_1(y)} \left( Q_{m1} - \frac{P_1 A_1 \dot{y}}{RT} \right) \\ \dot{P}_2 = \frac{RT}{V_2(y)} \left( Q_{m2} - \frac{P_2 A_2 \dot{y}}{RT} \right) \\ \ddot{y} = (P_1 A_1 - P_2 A_2 - P_a A_v - F_f) / M \\ \frac{\partial v}{\partial t} = \dot{y} \end{array} \right. \quad (2.23)$$

$$V_1 = A_1 y$$

$$V_2 = A_2 (y_{mx} - y) = A_2 y_{mx} - A_2 y$$

Donde  $y_{mx}$  es la posición máxima del cilindro y  $y$  es posición del cilindro.

Donde:

**R:** Constante ideal de los gases ( $R = 287,2 \text{ J/kgK}$ )

**m:** Masa del aire ( $kg$ )

**$P_1, P_2$ :** Presión de las cámaras superior e inferior ( $Pa$ )

**$A_1, A_2$ :** Área de las cámaras inferior y superior ( $m^2$ )

**$y$ :** Posición del pistón ( $m$ )

**$V_1(y), V_2(y)$ :** Volumen de la cámara inferior y superior del pistón ( $m^3$ )

**M:** Carga ( $kg$ )

**$A_v$ :** Área de la sección transversal del vástago ( $m^2$ )

**v:** Velocidad del pistón ( $m/s$ )

**$F_f$ :** Fuerza de fricción ( $N$ ).

**$Q_{m1}$  y  $Q_{m2}$ :** flujos máxicos hacia el cilindro

La fricción entre el émbolo y el cilindro es uno de los fenómenos que más incide en la no linealidad de los actuadores electro-neumáticos, es una fuerza que se opone al movimiento y provoca el deterioro del desempeño de los sistemas de control. A ella están asociados efectos tales como error en estado estable, movimientos a saltos (*Stick-Slip*) y oscilaciones (por la combinación del *stick-slip* con acciones de control integral) (Rubio, 2007).

#### **2.4 Software de simulación de sistemas mecánicos**

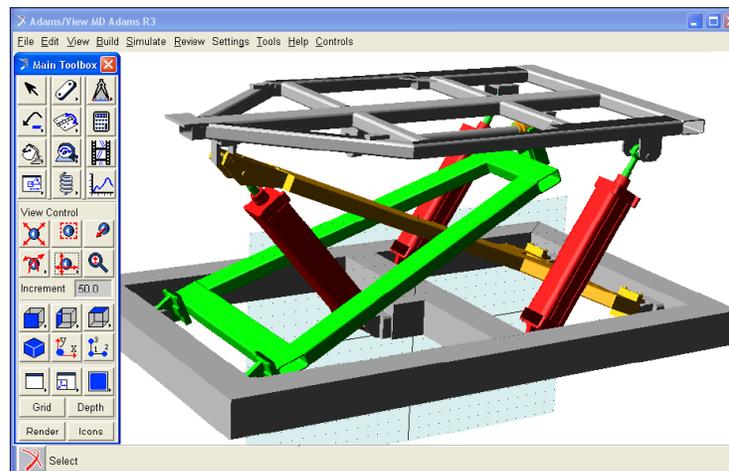
Para obtener un diseño fiable de los reguladores que controlen el desempeño de las estructuras robóticas, es necesario obtener previamente un modelo que describa lo más fielmente posible el comportamiento del sistema. De esta manera, utilizando herramientas de software, se puede realizar el análisis del comportamiento dinámico de un producto con el objetivo de aplicar modificaciones en su diseño mecánico y cambios en la sintonía de los reguladores diseñados.

Los robots paralelos de múltiples articulaciones actuadas constituyen mecanismos de una alta complejidad de modelado. No obstante, el desarrollo de herramientas de software para el análisis y simulación, ha hecho posible que este proceso se desarrolle de una manera más simple y eficiente. Los programas de propósito general para el modelado y la simulación de los sistemas mecánicos de múltiples cuerpos han llamado poderosamente la atención durante esta última década. Un programa CAD para la dinámica de los sistemas multicuerpos, minimiza la posibilidad del error humano en el manejo de modelos complejos (Mbomba, 2010).

*ADAMS (Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems)*: Análisis Dinámico Automático de Sistemas Mecánicos, es un software para simulación dinámica de sistemas mecánicos que por medio de la implementación de herramientas numéricas ofrece una gran variedad de elementos que sirven para modelar cualquier sistema mecánico (Selvakumar y otros, 2009). Gracias a este programa, se pueden desarrollar y poner a prueba prototipos virtuales, realizar simulaciones realistas por el ordenador de manera visual y matemática del comportamiento real de los sistemas mecánicos multicuerpos. Además, se puede explorar una multitud de variables de diseño de manera rápida y visualizar los resultados mediante gráficos, animaciones y cámara rápida.

ADAMS es capaz de exportar el modelo CAD del robot como bloque hacia el Simulink del Matlab, incrementando notablemente la funcionalidad a la hora de efectuar los procesos de simulación, diseño y análisis, dado que se pueden integrar en simulación conjunta las potencialidades y herramientas de ambos softwares (Xu y Li, 2009; Li, 2009).

El modelo virtual de la estructura paralela confeccionado en ADAMS se muestra en la figura 2.5. Se prestó especial atención al modelado geométrico de los elementos integrantes del robot, considerando las dimensiones físicas, articulaciones, cuerpos rígidos y el tipo de material constructivo del robot. Se tuvo en cuenta las coordenadas de localización de todos y cada uno de los puntos en que el sistema se encuentra en posición estática. El sistema en su conjunto se simula mediante el empleo del modelo virtual de la plataforma, modelado en ADAMS.



**Figura 2.5** Modelo virtual confeccionado en ADAMS de la plataforma de 3 GDL

La estrategia de simulación consiste en modelar la estructura mecánica en el paquete de simulación ADAMS y la dinámica los actuadores de manera desacoplada, en Simulink. La figura 2.6 muestra la interfaz de comunicación entre ambos paquetes de software.

En (Prieto, 2013), se realiza el modelado en Simulink de las válvulas y los actuadores electro-neumáticos, mostrando como salidas las presiones de la cámaras en función de la acción de mando, lo cual provoca un desplazamiento del sistema hasta la posición deseada.

En (Izaguirre, 2012), se utiliza el modelo para la validación de las ecuaciones cinemáticas de la plataforma de tres grados de libertad, demostrando la estrecha relación existente entre las curvas obtenidas de la solución de las expresiones analíticas y de la salida del modelo virtual en ADAMS.

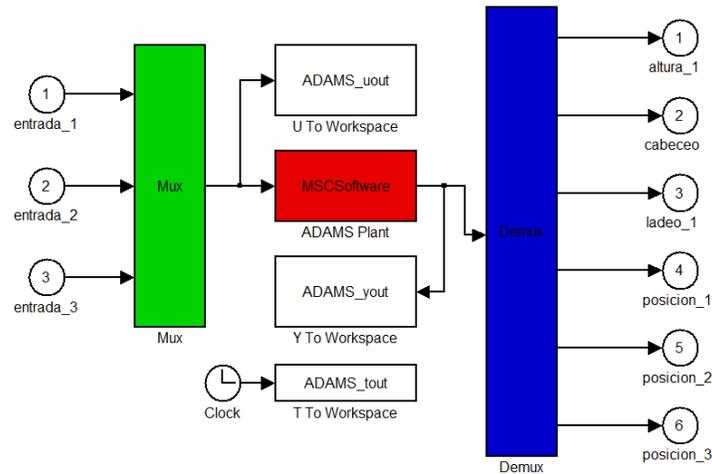


Figura 2.6: Interfaz de comunicación Simulink-ADAMS.

## 2.5 Obtención del modelo electro-neumático a través de identificación experimental

El modelo dinámico del sistema electro-neumático de los robots paralelos, que incluye válvula y pistón, se sustenta en que estos constituyen los elementos actuadores de estas estructuras robóticas, además del soporte de la plataforma móvil, el comportamiento de estos elementos determinan en gran medida el desempeño dinámico del robot (Kolbus y otros, 2008). Para el robot SIMPRO de tres grados de libertad, la posición que toman los actuadores lineales tienen gran incidencia en el posicionamiento continuo de la plataforma móvil, por lo que el modelo dinámico de los mismos será empleado para la síntesis de los controladores que mejoren el desempeño del mecanismo robótico.

Debido a que la dinámica de los actuadores electro-neumáticos es altamente no lineal, estas no linealidades influyen en el sistema en forma de perturbaciones y por tanto, se dificulta el control de los mismos (Hahn, 2005; Krejnin y Krivts, 2006).

En un estudio realizado por Rubio, este presenta un método para el modelado de actuadores electro-neumáticos basado en identificación experimental, aplicado a este tipo de sistemas (Rubio, 2007), y lo aplica a una plataforma neumática de dos grados de libertad. Esta

experiencia se aprovechó para el simulador de movimiento de tres grados de libertad de mayor complejidad y carácter acoplado.

El modelo analítico del actuador lineal electro-neumático, considera el subdimensionamiento de la válvula y las constantes de tiempo del cilindro, de modo que describe con mayor exactitud la dinámica real del sistema, definiéndose el modelo por la expresión:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{\frac{A_1 G_1 / C_1}{\tau_1 s + 1} + \frac{A_2 G_2 / C_2}{\tau_2 s + 1}}{s \left( Ms + F_v + \frac{A_1 K_{1y} / C_1}{\tau_1 s + 1} + \frac{A_2 K_{2y} / C_2}{\tau_1 s + 1} \right)} \quad (2.24)$$

Donde las constantes de tiempo se calculan como:

$$\tau_1 = \frac{K_{1p}}{C_1}; \quad \tau_2 = \frac{K_{2p}}{C_2}$$

**$P_1$ ;  $P_2$ :** Presiones aplicadas en las cámaras de los cilindros ( $Pa$ )

**$A_1$ ;  $A_2$ :** Área del pistón en cada cámara ( $m^2$ )

**$M$ :** Masa ( $kg$ )

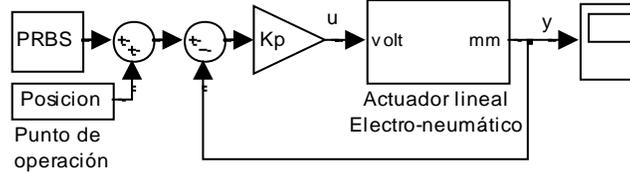
**$F_v$ :** Fricción viscosa ( $Ns/m$ )

**$Y$ :** Posición del vástago ( $m$ )

Las constantes  $G_1$ ,  $G_2$  en ( $kg/s m^2$ ) y  $C_1$ ,  $C_2$  en ( $kg/sPa$ ) se obtienen de las derivadas parciales de las ecuaciones que consideran el flujo másico de aire a través de la válvula proporcional de flujo:  $q_m = f(x; P_{ent}; P_{sal})$ . Por su parte, las constantes  $K_{1p}$ ,  $K_{2p}$  en ( $kg/Pa$ ) y  $K_{1y}$ ,  $K_{2y}$  en ( $kg/m$ ), son obtenidas mediante diferenciación de la ecuación de estado de los gases ideales respecto a la presión y el volumen de aire, dependientes de la posición del pistón (Rubio y otros, 2007).

Teniendo en cuenta lo antes expuesto, se identifica dinámicamente el sistema válvula-pistón de cada extremidad activa del robot de 3 GDL, para lo cual se emplea el esquema de identificación de lazo cerrado que se muestra en la figura 2.7 debido a que el sistema es inestable en lazo abierto, controlándose el lazo cerrado a un período de muestreo de un

milisegundo (*ms*). La identificación se realiza alrededor del valor de posición central de cada cilindro que es donde se demuestra que el modelo que se obtiene es el que tiene los polos complejos conjugados más próximos al origen del plano del lugar de las raíces, por lo que, sin dudas, es la dinámica más exigente (Varseveld y otros, 1997).



**Figura 2.7 Diagrama de identificación de lazo cerrado para el sistema electro neumático**

La frecuencia y amplitud de la señal binaria pseudoaleatoria (PRBS) de entrada, así como el valor de ganancia proporcional  $Kp$ , se escogen para garantizar que el sistema responda persistentemente excitado. La función transferencial del subsistema válvula-pistón que relaciona la posición del actuador  $Y(s)$  con el voltaje de entrada aplicado a la servoválvula  $U(s)$ , adquiere la forma de la ecuación de tercer orden tipo 1, (2.25), donde  $\omega_n$  y  $\varphi$  representan la frecuencia natural no amortiguada y razón de amortiguamiento del sistema respectivamente, mientras que  $Ke$  indica la ganancia.

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K_e}{s(s^2 + 2\varphi\omega_n s + \omega_n^2)} = G_D(s) \quad (2.25)$$

Los modelos resultantes para las tres articulaciones neumáticas son:

$$\text{Pistón 1:} \quad \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{245.94}{s(s^2 + 7.726s + 253)} \quad (2.26)$$

$$\text{Pistón 2 y 3:} \quad \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{2008,3}{s(s^2 + 7.726s + 1349)} \quad (2.27)$$

Los modelos obtenidos se emplean para el diseño de los controladores del lazo de control articular.

### **Conclusiones parciales**

Las ecuaciones de la cinemática inversa, estiman el comportamiento articular a partir de las variables espaciales del robot de manera suficientemente precisa, por lo que pueden ser utilizadas para la implementación de esquemas de control de trayectorias en el espacio de tareas.

La técnica de identificación experimental aplicada al sistema electro-neumático demuestra tener buenos resultados para la obtención de modelos, con el objetivo de su utilización en la síntesis de controladores del lazo de control articular.

La exactitud de los modelos estimados es de vital importancia para alcanzar buenas prestaciones en estrategias de control basadas en modelos dinámicos.

### **CAPÍTULO 3. CONTROL DE TRAYECTORIA DE LA PLATAFORMA DE 3 GDL**

En la robótica se puede definir como control de seguimiento de trayectoria, ya sea en el espacio articular o cartesiano, el seguimiento de una trayectoria variable en el tiempo dada  $q_d(t)$  o  $x_d(t)$  y sus sucesivas derivadas  $\dot{q}_d(t)$  y  $\dot{x}_d(t)$  y  $\ddot{q}_d(t)$  o  $\ddot{x}_d(t)$ , las cuales describen la velocidad y aceleración deseadas respectivamente (Siciliano and Khatib, 2008). Para esto se necesita retroalimentar la posición y velocidad de las variables articulares y cartesianas del robot.

El control en el espacio articular tiene como característica que es necesario la solución de la cinemática inversa para obtener la posición de cada articulación a partir de la trayectoria deseada en el espacio de tareas, además de no tener la capacidad de compensar las incertidumbres del sistema. Por otra parte, su variante en el espacio de tareas, compensa las incertidumbres existentes pero se hace necesario la estimación o medición de las variables espaciales del robot.

Resulta conveniente controlar la trayectoria de un robot en el espacio de tareas puesto que asegura un estado de control *feedback* que conduce a una mejor precisión con respecto al control en el espacio articular (Paccot y Andreff, 2009).

En este capítulo se propone un esquema de control de dos grados de libertad, que sin retroalimentación de la velocidad y aceleración, demuestra buenos resultados para una aplicación de seguimiento de trayectoria en el robot paralelo de tres grados de libertad SIMPRO.

### 3.1 Problema de control

El objetivo del esquema de control es que haya un seguimiento de trayectoria en el espacio de tareas  $X_d(t) = [h_d(t) \theta_d(t) \varphi_d(t)]^T$ , de las variables de altura, cabeceo y ladeo del centro de referencia móvil del elemento terminal, para controlar el estado deseado se define el error cartesiano  $e_x(t)$ , medido en el espacio de tareas.

$$e_x(t) = X_d(t) - X(t) = \begin{bmatrix} e_h \\ e_\theta \\ e_\varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_d(t) \\ \theta_d(t) \\ \varphi_d(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} h(t) \\ \theta(t) \\ \varphi(t) \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

La señal de mando generada en cada instante de tiempo, ubica la pose de la plataforma móvil en dirección tal, que el error  $e_x(t)$  tiende a cero, por consiguiente, la ley de control garantiza:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e_x(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} [e_h \ e_\theta \ e_\varphi]^T = 0 \quad (3.2)$$

En este caso en particular, se asume que para el problema de control de trayectoria, el error inicial se considera cero, o sea, lo suficientemente pequeño para que exista una configuración articular  $q_d$  para cada configuración en el espacio de tareas  $X_d = X(q_d)$ . Esta condición asegura que el problema de control pueda ser solucionado.

El esquema general consiste en un control por realimentación simple con compensación directa el cual es presentado en la figura 3.1 y fue analizado en el capítulo 1. Donde A/B representa el modelo de la planta y C/D corresponde a la función de transferencia del regulador.

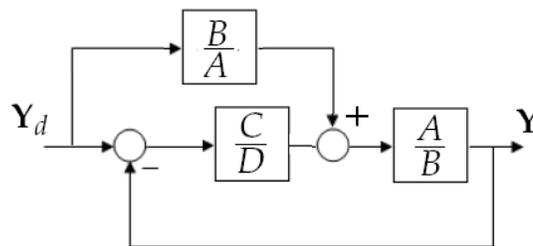


Figura 3.1 Esquema general para control de trayectoria

El esquema de control se desarrolla evaluando por separados el lazo de realimentación simple y el lazo por adelante de señal. El primero es el encargado de la estabilidad de todo

el sistema y la segunda que utiliza el inverso del modelo de la planta, se encarga de eliminar el error de seguimiento de trayectoria.

### 3.2 Control cinemático en el espacio de tareas

El control cinemático en el espacio de tareas consiste en la combinación de un lazo de control articular en cascada con un lazo de control para garantizar el posicionamiento perfecto de las variables cartesianas del efector final del robot paralelo de tres grados de libertad. El mismo constituye el lazo de realimentación simple del esquema propuesto en el epígrafe anterior. El esquema propuesto por Izaguirre (Izaguirre, 2012) es el mostrado en la figura 3.2.

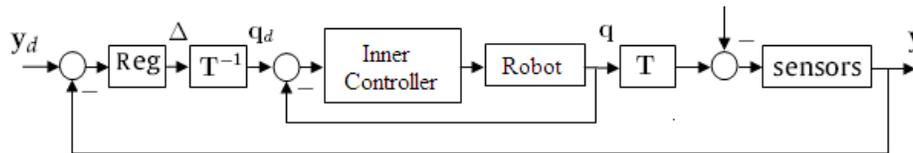


Figura 3.2 Esquema de control cinemático en espacio de tareas

#### 3.2.1 Control desacoplado en el espacio articular

Dado que el simulador está diseñado para que los valores deseados de la pose de la plataforma móvil sean en el espacio de tareas, la solución de control requiere de la obtención de la posición deseada de cada articulación, mediante el cálculo de la cinemática inversa del robot en cada instante de tiempo. Luego, se implementa el lazo de control desacoplado en el espacio articular, que garantiza el cumplimiento de las especificaciones de diseño, a pesar de los efectos de la interacción dinámica entre las diferentes cadenas articuladas del sistema.

En la figura 3.3 se muestra el esquema de control desacoplado, el cual consiste en un controlador PI y un filtro de segundo orden en cascada con el objetivo de compensar los polos complejos conjugados de la planta. Además, se incluye un filtro Butterworth con frecuencia de corte de 80 Hz que garantiza que la válvula de flujo no sea excitada con

señales por encima 60 Hz, valor que constituye su ancho de banda. De esta manera se brinda protección a las servoválvulas ante señales de alta frecuencia.

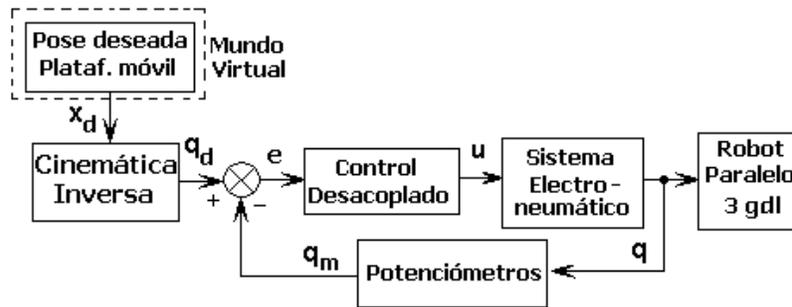


Figura 3.3 Control desacoplado en el espacio articular

Una de las ventajas de este algoritmo de control, es que no resulta necesario el modelo dinámico del robot, lo cual implicaría trabajar con un modelo fuertemente no lineal y multivariable; trayendo aparejado el cálculo de la dinámica inversa del robot dentro del lazo de control, procedimiento cuya solución resulta sensitiva a los errores numéricos de redondeo debido a la aritmética de punto flotante y que por demás requiere un alto número de operaciones matriciales a ejecutar, aspecto que se considera una limitante al trabajar con aplicaciones de tiempo real (Cheah y otros, 2006; Wang y otros, 2009).

### 3.2.2 Lazo de control articular

Rubio en (Rubio y otros, 2009), propone una solución para el control de los sistemas electro-neumáticos aplicada a un simulador de dos grados de libertad, que consiste en el modelado por identificación y la obtención del controlador a partir de los criterios de desempeño deseados, el cual generó buenos resultados en el desempeño de las variables articulares del robot.

Para el caso del simulador de movimiento de 3 GDL, hay que tener en cuenta la mayor complejidad estructural, donde para lograr cada uno de los grados de libertad, es necesario el accionamiento conjunto de sus extremidades actuadas así como la interacción dinámica entre los actuadores, debido al carácter acoplado del sistema.

El controlador debe garantizar en lazo cerrado un par de polos complejos conjugados dominantes de manera que satisfagan las especificaciones de tiempo de establecimiento menor o igual a 0,5 segundos para entrada escalón, con un mínimo de sobrecresta, rechazo

del sistema a perturbaciones y acción integral incorporada, de modo que el sistema sea tipo dos y garantice capacidad de seguimiento a referencias tipo rampa con cero error en estado estable (Rubio, 2007).

La función de transferencia propuesta para el controlador es de la forma:

$$\frac{u(s)}{e(s)} = \frac{K_p(s^2 + a_1s + a_0)(s + a)}{s(s^2 + b_1s + b_0)} = Gc(s) \quad (3.3)$$

La respuesta en lazo cerrado deseada requiere la dominancia de un par de polos complejos conjugados fijando la frecuencia natural no amortiguada del sistema en  $\omega_n = 10 \text{ rad/seg}$  y la razón de amortiguamiento  $\varphi = 0.7$ . Con dichos índices de comportamiento, se obtienen las siguientes funciones de transferencia correspondientes a los controladores para cada uno de los pistones.

$$\frac{u_1(s)}{e_1(s)} = \frac{72.3(s^2 + 7.726s + 253)(s + 2.78)}{s(s^2 + 80s + 2044)} = Gc(s) \quad (3.4)$$

$$\frac{u_{2,3}(s)}{e_{2,3}(s)} = \frac{8.85(s^2 + 7.726s + 1349)(s + 2.78)}{s(s^2 + 80s + 2044)} = Gc(s) \quad (3.5)$$

Izaguirre en (Izaguirre, 2012) realiza un análisis de la robustez de los lazos de control, ante la posible influencia de los efectos dinámicos de interacción entre los actuadores, mediante el cálculo del valor que adquiere la función sensibilidad de la salida del lazo debido a variaciones en la función transferencial  $Y(s) = U(s)$ , correspondiente al modelo del sistema electro-neumático obtenido.

Gracias a ello, se verifica que el controlador diseñado garantiza la robustez necesaria del sistema ante posibles cambios en los parámetros de la planta, brindando garantía del buen comportamiento del sistema en lazo cerrado en el rango de bajas frecuencias, cumpliendo los requisitos de diseño para la aplicación dada.

El control cinemático en el espacio articular ofrece varias ventajas, dado que consiste en un control del tipo desacoplado, la carga computacional de los controladores es reducida por lo que su implementación es viable en el hardware de control con aplicación práctica

industrial en tiempo real y a bajos períodos de muestreo. Debido a que los lazos de control son independientes, el diseño de los reguladores resulta más sencillo, con formulaciones muy similares. La escalabilidad y flexibilidad constituyen otros de sus atributos (Rubio, 2007).

No obstante, al evaluar la magnitud del error en la ubicación espacial de la plataforma móvil que provee este esquema de control, no se obtiene un correcto posicionamiento de las variables en el espacio de tareas, y dichos errores, no pueden ser corregidos por el esquema de control articular por lo que es necesario introducir un lazo de control en cascada con el lazo de control articular que minimice los errores de las variables cartesianas (Izaguirre, 2012).

### 3.3 Lazo de Control cartesiano

Para minimizar los errores de posicionamiento cartesiano de la plataforma de tres grados de libertad, que el lazo de control articular no garantiza, es necesario cerrar el lazo de control de la cascada propuesta en la figura 3.2 y sintonizar el controlador cuya señal de mando garantice que las coordenadas generalizadas que definen la pose del elemento terminal  $x(t)$  en el espacio de tareas, sigan lo más fielmente posible el valor deseado de posición espacial  $x_d(t)$ , cumpliendo además con los índices de desempeño fijados para el sistema, minimizando el error entre la pose deseada y la real en el espacio cartesiano (Hernández y otros, 2011).

Esta estrategia no utiliza el modelo dinámico del sistema robótico, empleando solamente el modelo dinámico de los actuadores, obtenido mediante identificación experimental.

En la formulación del problema de control, se considera conocido el vector de coordenadas espaciales del robot, gracias a la medición de la pose de la plataforma móvil en cada instante de tiempo. El valor deseado de la elongación articular  $q_d(t)$  de cada pistón se obtiene a partir del cálculo de la señal de mando  $u(t)$  y la solución de la cinemática inversa del robot.

El esquema de control propuesto, consiste en una cascada donde el lazo interior actúa directamente como control de posición articular, siendo diseñado para cumplir con las especificaciones de diseño y con la capacidad de atenuar los efectos indeseables de

interacción dinámica entre los actuadores. El lazo externo por su parte, tiene la función de compensar el error cartesiano que aparece debido a las imprecisiones del modelo, tolerancias y juego libre de las uniones, variaciones en la carga, minimizando el error de posicionamiento espacial del robot.

La medición directa de las variables cartesianas utilizando sensores, evita el inconveniente del cálculo de la cinemática directa del robot para estimar estas variables lo cual traería consigo aparejado problemas de implementación en tiempo real de la aplicación.

En este caso, el efecto dinámico del lazo externo es independiente del interno, para el cual se cumple que:  $q(t) = q_d(t) \quad \forall \quad t > 0$  (Hernández y otros, 2011). Ello implica, que desde el punto de vista práctico, se pueden efectuar las aproximaciones dinámicas para el diseño del controlador externo.

### 3.3.1 Controlador digital

El sistema de control será implementado en un controlador digital, y el diseño del regulador se efectúa en el dominio discreto (Izaguirre y otros, 2011c). En este caso, desde el punto de vista práctico, se procede con una simplificación dinámica del lazo interior, similar a las empleadas en control visual para seguimiento en un plano (Bonfe y otros, 2002), y control servo-visual 3D de brazo robótico serie (Hernández y otros, 2008), aunque en esta última aplicación, el esquema de control está concebido como tipo regulador, es decir, sigue disturbio, y no posee la capacidad de seguimiento de trayectoria.

En el esquema de la figura 3.2, el efecto dinámico del lazo interior es independiente del externo; donde en condición estable de operación, el control de posición en el espacio articular satisface la condición:

$$q(t) = q_d(t) \cong 0, \quad (n \times 1) \quad \forall \quad t > 0 \quad (3.6)$$

En tal caso, el diseño digital del controlador externo se efectúa considerando que la dinámica del lazo interior puede ser aproximada por uno o dos instantes de muestreo del lazo exterior (Hernández y otros, 2011), por lo que la igualdad 3.6 se modifica por 3.7. Bajo esta consideración, se plantea el sistema de control digital equivalente simplificado, que se muestra en la figura 3.6 (Izaguirre, 2012).

$$q(k) = q_d(k - 1) \quad ; \quad \forall \quad k > 0 \quad (3.7)$$

Åmström establece que un valor razonable para la frecuencia de muestreo se define entre 10 y 30 veces el valor del ancho de banda deseado del sistema en lazo cerrado (Åmström y Wittenmark, 1997). Para el simulador de movimiento, este valor se encuentra alrededor de 0,1 Hz, por lo que el período de muestreo puede quedar establecido en 300 ms como valor máximo aceptable.

En el esquema de la figura 3.6 (Izaguirre, 2012), el bloque  $K_M(z)$  representa el sistema de medición que provee información directa de la posición de la plataforma móvil en cada instante de tiempo, elemento de suma importancia a la hora de implementar el esquema de control cartesiano propuesto. Considerar el modelo digitalizado del lazo interior, resulta complejo (Takashi y otros, 2007), por lo que bajo las condiciones de aproximación dinámicas establecidas, el diseño del controlador digital resulta mucho más simple.

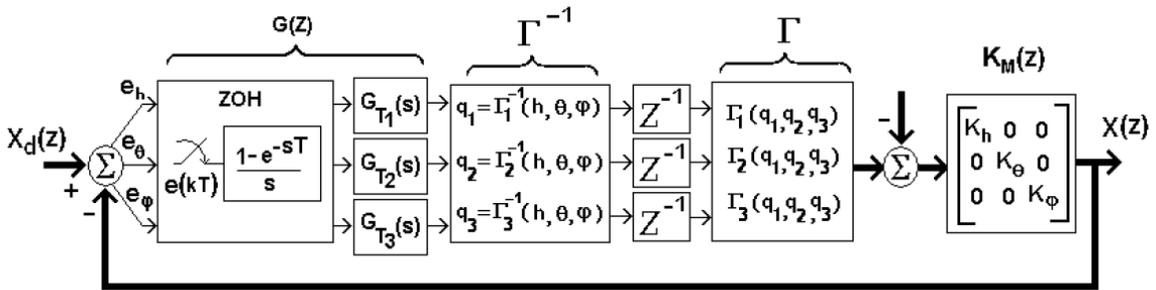


Figura 3.6: Esquema de control digital en el espacio cartesiano con aproximación del lazo interior

### 3.3.2 Diseño del controlador y análisis de estabilidad

Considerando que el error inicial  $e_x(0)$  es suficientemente pequeño, existe una configuración articular del robot para la cual se cumple la igualdad 3.6. Dado que, se busca que el error de posicionamiento espacial sea cero en estado estable, se define la ley de control.

$$U(z) = \mathcal{Z} \left[ \mathbf{K}_I \int e_x(t) \right] = \left[ \frac{\mathbf{X}_d(z) - \mathbf{X}(z)}{\mathbf{1} - z^{-1}} \right] \quad (3.8)$$

Donde  $\mathbf{K}_I \in \mathfrak{R}^{3 \times 3}$  es la matriz simétrica de ganancia integral:

$$\mathbf{K}_I = \begin{bmatrix} K_{I1} & 0 & 0 \\ 0 & K_{I2} & 0 \\ 0 & 0 & K_{I3} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

La señal que recibe el controlador del lazo exterior, considera el incremento a efectuar en las coordenadas cartesianas del robot, como resultado de la medición directa de la posición de la plataforma móvil. Luego, la condición inicial del integrador es la posición inicial del sistema, y en la medida que va integrando, se van obteniendo las coordenadas absolutas cartesianas, que ingresan al bloque de la cinemática inversa, para obtener los nuevos valores de las coordenadas absolutas articulares, que llevarán a cero el error cartesiano gracias al efecto de la acción integral.

Solucionando la cinemática inversa  $\Gamma^{-1}$  se obtiene  $q_d$ , mientras que las coordenadas espaciales se miden utilizando un arreglo sensorial entre sensores inerciales y encoders lineales. Dado que la relación entrada salida del sistema sensorial presenta comportamiento lineal, la matriz de medición queda definida como:

$$K_M = \begin{bmatrix} K_h & 0 & 0 \\ 0 & K_\theta & 0 \\ 0 & 0 & K_\varphi \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Para ilustrar el comportamiento de la estabilidad del sistema de control, se implementa un controlador integral, donde la función transferencial digital  $G(z)$  para un período de muestreo de 60 ms, adquiere la forma:

$$G(z) = A_0 \frac{0.06K_I Z^{-1}}{(1 - z^{-1})} \quad (3.11)$$

El término  $A_0$ , se emplea como factor de atenuación para reducir el efecto de posibles cambios bruscos a la entrada del sistema, debido a variaciones en la señal de referencia de posición  $X_d(z)$ .

Luego, basándonos en la figura 3.6, la función transferencial de lazo cerrado queda establecida como:

$$\frac{0.06K_I K_M Z^{-1}}{(1 - z^{-1})} [X_d(z) - X(z)] = X(z) \quad (3.12)$$

Solucionando y aplicando la transformada  $\mathcal{Z}$  inversa, se obtiene:

$$X((k+2)T) - X((k+1)T) = -0.06K_I K_M X(kT) + 0.06K_I K_M X_d(kT) \quad (3.13)$$

Representando (3.13) en el espacio de estado:

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} \\ -0.06K_I K_M_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} \end{bmatrix}}_G \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} \\ 0.06K_I K_M_{3 \times 3} \end{bmatrix}}_H u(k) \quad (3.14)$$

De acuerdo a la expresión (3.14), se establece que el sistema de control resulta desacoplado para cada coordenada cartesiana que define la pose de la plataforma móvil, cumpliéndose:

$$\begin{bmatrix} x_{1h}(k+1) \\ x_{2h}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0.06K_{I1}K_h & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1h}(k) \\ x_{2h}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0.06K_{I1}K_h \end{bmatrix} h_d(k) \quad (3.15)$$

$$\begin{bmatrix} x_{1\theta}(k+1) \\ x_{2\theta}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0.06K_{I2}K_h & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1\theta}(k) \\ x_{2\theta}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0.06K_{I2}K_\theta \end{bmatrix} \theta_d(k) \quad (3.16)$$

$$\begin{bmatrix} x_{1\varphi}(k+1) \\ x_{2\varphi}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0.06K_{I3}K_\varphi & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1\varphi}(k) \\ x_{2\varphi}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0.06K_{I3}K_\varphi \end{bmatrix} \varphi_d(k) \quad (3.17)$$

Considerando la ecuación (3.15) se obtiene el diagrama de las raíces para el lazo de altura mostrado en la figura 3.7-a). En este caso, los polos y ceros de lazo cerrado se ubican mediante la correcta selección de los valores de ganancia, siendo el sistema estable para  $K_{I1}K_h = 3$ , diseño que garantiza una respuesta ligeramente sobreamortiguada. Similares resultados se logran en términos de estabilidad para el ladeo y cabeceo.

Demostrada la estabilidad para el caso de un controlador integral, se añade un cero al regulador con el fin de mejorar el desempeño del sistema, por lo que la función transferencial  $G(z)$  adquiere la forma:

$$G(z) = A_0 \frac{0.06(1 + 0.2z^{-1})}{(1 - z^{-1})} \quad (3.18)$$

La estabilidad en este caso se logra para valores de  $K_{I1}K_h < 50$ , mostrándose en la figura 3.7-b) el diagrama de las raíces de lazo cerrado para  $K_{I1}K_h = 20$ .

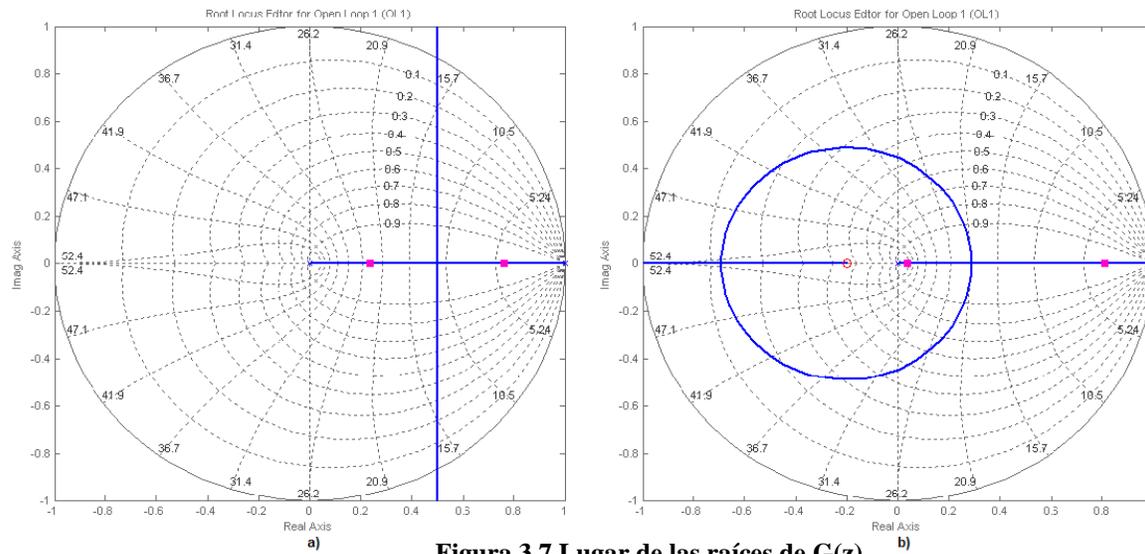


Figura 3.7 Lugar de las raíces de  $G(z)$

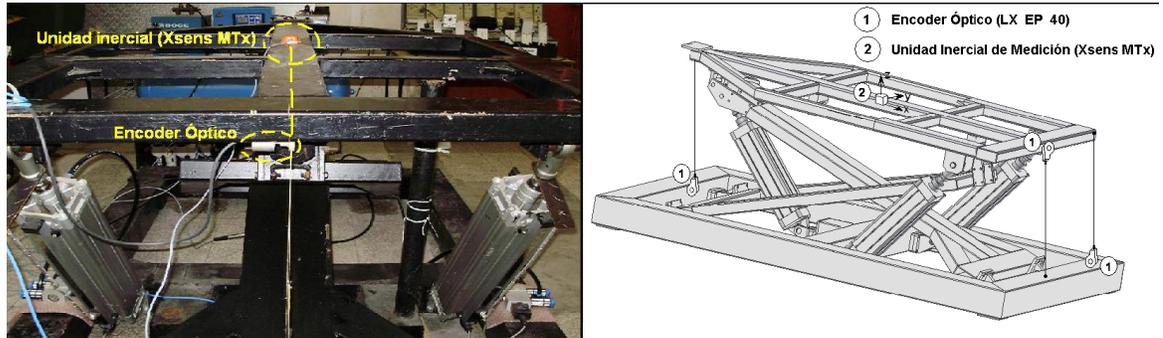
### 3.4 Sistema sensorial para la medición de las variables

Con el objetivo de evitar el uso de un modelo cinemático directo, para la estimación de las variables en el espacio de tareas, debido al alto costo computacional y de cálculo que exige este método, Izaguirre (Izaguirre, 2012) propone un sistema sensorial para realizar la medición directa de las variables cartesianas.

La propuesta consiste en la implementación de un sistema sensorial basado en una unidad inercial de medición (IMU), en combinación con encoders ópticos, para obtener la información en tiempo real de la pose de la plataforma móvil (Izaguirre y otros, 2011d,c).

Para ello se dispone de unidad de medición inercial MTi-9 Xsens, que mide la orientación de la plataforma móvil (Izaguirre, 2012), y un arreglo de encoders ópticos incrementales (tipo LX-EP-40) que proveen la información de la elevación absoluta de la plataforma móvil que es finalmente calculada mediante relaciones trigonométricas. Con ello se evade calcular la elevación mediante la sucesiva integración de los acelerómetros de la IMU, evitando el error acumulativo y el ruido característico de la medición (Izaguirre, 2012).

La figura 3.8 (Izaguirre y otros, 2011d,c) muestra la ubicación de los elementos del sistema sensorial, donde se presta atención en que los mismos no interfirieran en el movimiento espacial de la plataforma.



**Figura 3.8: Ubicación del sistema sensorial para la medición de la pose de la plataforma móvil**

Para minimizar los errores en la medición proveniente de la IMU, se realiza su instalación coincidentemente con el centro del sistema de referencia móvil y correctamente alineada, así como se calibran los giróscopos para minimizar los errores de orientación (Izaguirre, 2012). Además se diseña un filtro *Butterworth* paso bajo de segundo orden, para eliminar las señales ruidosas de la medición.

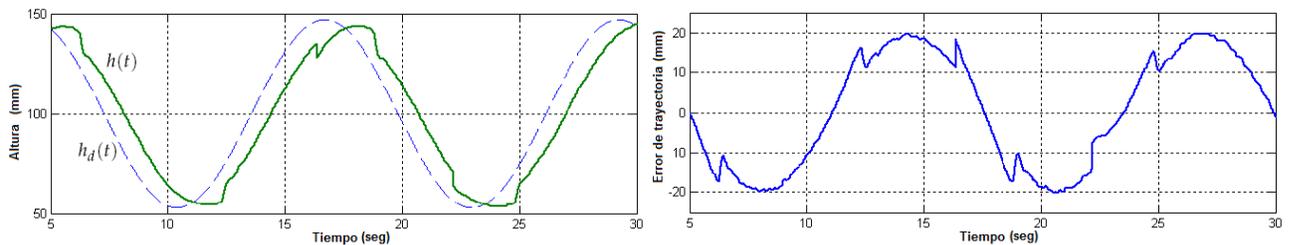
Los encoders ópticos se disponen en un arreglo de tres unidades, posibilitando la medición de la elevación absoluta de la plataforma y adicionalmente los ángulos de cabeceo y ladeo, para en caso de necesidad, corregir en integración con la IMU, la orientación alcanzada por la plataforma móvil. La información de los encoders ópticos, se procesa en un bloque que contiene las funciones trigonométricas que permiten calcular los referidos ángulos de orientación, a partir de las distancias sensadas por los mismos en el plano de medición (Izaguirre, 2012).

Gracias a la combinación de los encoders ópticos y el sistema inercial, se dispone de la medición dinámica de la posición de la plataforma móvil, lo cual hace posible la implementación de la estrategia de control en el espacio de tareas propuesta (Izaguirre, 2012).

### 3.5 Resultados experimentales de esquema de control cartesiano en espacio de tareas ante seguimiento de trayectoria

Con el propósito de valorar el desempeño del lazo de control en el espacio cartesiano en aplicaciones de seguimiento de trayectoria, se realizan pruebas experimentales al robot paralelo de tres grados de libertad.

Se desarrollaron algunos experimentos en la plataforma real, inicialmente excitando el sistema con una señal sinusoidal en la altura  $h_d(t)$  y evaluado el desempeño de la variable medida  $h(t)$  para el esquema de control cinemático en el espacio cartesiano, el comportamiento de la altura se puede ver en la figura 3.9 junto al error de trayectoria.



**Figura 3.9** Comportamiento de la altura utilizando el esquema de control cartesiano en espacio de tareas

En el lazo externo se resuelve el problema cinemático inverso obteniéndose de esta manera las coordenadas articulares de cada una de las extremidades actuadas del robot para una posición deseada en el espacio cartesiano, las cuales constituyen la referencia del lazo de control interno articular.

El esquema de control en cascada, mejora el desempeño del sistema en relación al posicionamiento de la plataforma móvil. El comportamiento del sistema es superior al caso del control desacoplado articular, el error se reduce considerablemente, lográndose una respuesta que cumple con las especificaciones de diseño. Además, provee flexibilidad de modificar el controlador del lazo exterior, buscando determinados objetivos de comportamiento global del sistema, como por ejemplo, control de fuerza, atenuación de disturbios externos, etc. (Izaguirre, 2012).

No obstante, el esquema de control es incapaz de cumplir con requerimientos en aplicaciones de seguimiento de trayectoria. Como se puede apreciar en la figura 3.9, el

error existente cuando se excita el sistema ante una entrada sinusoidal, demuestra que la estrategia de control en cascada, no garantiza buenos desempeños en seguimiento de camino.

Sin embargo, el esquema de control cinemático en espacio cartesiano planteado en (Izaguirre, 2012), permite la inclusión de una compensación lineal de realimentación directa (compensación *feedforward*) para mejorar el comportamiento del sistema en aplicaciones de seguimiento de trayectoria, y que garantice un buen seguimiento a señales de referencia de mayores exigencias dinámicas.

### 3.6 Control de trayectoria en el espacio de tareas

En el epígrafe anterior se demuestra como el esquema de control cinemático en espacio de tareas no es capaz de suprimir los errores en cuanto a seguimiento de trayectoria cuando el sistema es excitado con una señal sinusoidal.

Teniendo en cuenta la aproximación dinámica realizada del lazo interno de la cascada del esquema de control cartesiano en espacio de tareas, a un instante de muestreo del lazo externo, la función transferencial  $A/B$  de la planta correspondiente al esquema de control propuesto para eliminar los errores en seguimiento de trayectoria adquiere la forma:

$$\frac{A}{B} = \begin{bmatrix} \frac{K_h}{z} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_\theta}{z} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{K_\phi}{z} \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

El mando de la parte que asegura seguimiento de trayectoria se obtiene a partir del inverso de la planta como se muestra en la figura 3.1.

$$\frac{B}{A} = \begin{bmatrix} \frac{z}{K_h} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{z}{K_\theta} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{z}{K_\phi} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Luego, el esquema de control propuesto corresponde al que se muestra en figura 3.10\_a), en donde  $A/B$ ,  $B/A$  y  $C/D$  corresponden al modelo simplificado de la planta (ecuación 3.22), inverso del modelo (ecuación 3.23) y regulador del lazo de realimentación directa (ecuación 3.18), respectivamente.

El mando que proporciona la parte por adelante de señal del esquema de control propuesto necesita generar la señal dada por  $zY_d(z)$ , lo cual resulta físicamente imposible de obtener ya que corresponde a una señal de un instante de muestreo futuro. Por otra parte si la señal de referencia de entrada es retardada un instante de muestreo  $Z^{-1}$  y la señal de lazo por adelante de señal se toma antes del retardo como se muestra en la figura 3.10\_b), un efecto similar se obtiene y el esquema de control es totalmente realizable.

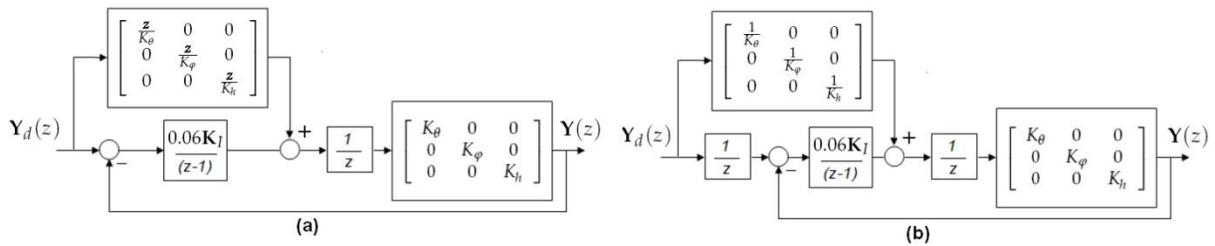


Figura 3.10 Esquema de control propuesto para seguimiento de trayectoria a). Esquema de control implementado b).

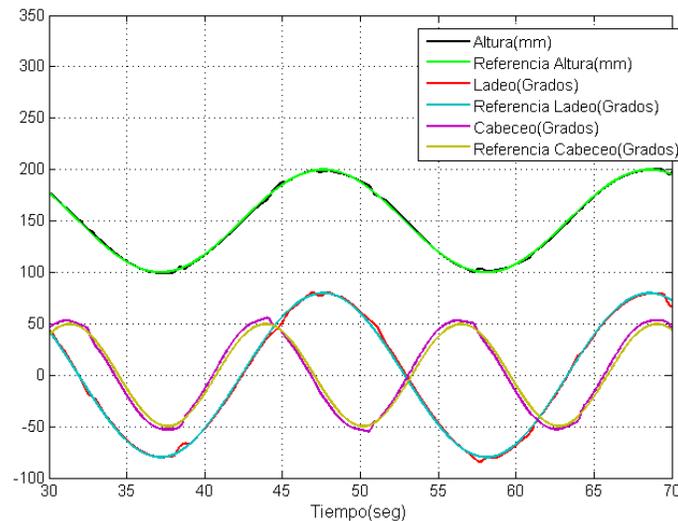
### 3.6.1 Simulación utilizando ADAMS/Matlab.

Para comprobar el desempeño de esquema de control propuesto para seguimiento de trayectoria en la figura 3.10\_b), se lleva a cabo la simulación de acuerdo al diagrama de bloques mostrado en el Anexo 1, donde se emplea el modelo CAD del robot desarrollado en ADAMS, que es exportado hacia el Matlab/Simulink, luego de definidos los correspondientes puertos de E/S. En el lazo exterior se implementa el control cinemático en espacio de tareas con  $K_h K_{I1} = K_\theta K_{I2} = K_\phi K_{I3} = 3$ , las relaciones de la cinemática inversa, en conjunto con la compensación por adelante de señal que garantizará el seguimiento de trayectoria, mientras que en el lazo interno, se encuentra implementado el modelo electro-neumático no lineal y los controladores lineales correspondientes desacoplados para cada articulación. Dado que se emplea un modelo no lineal de los

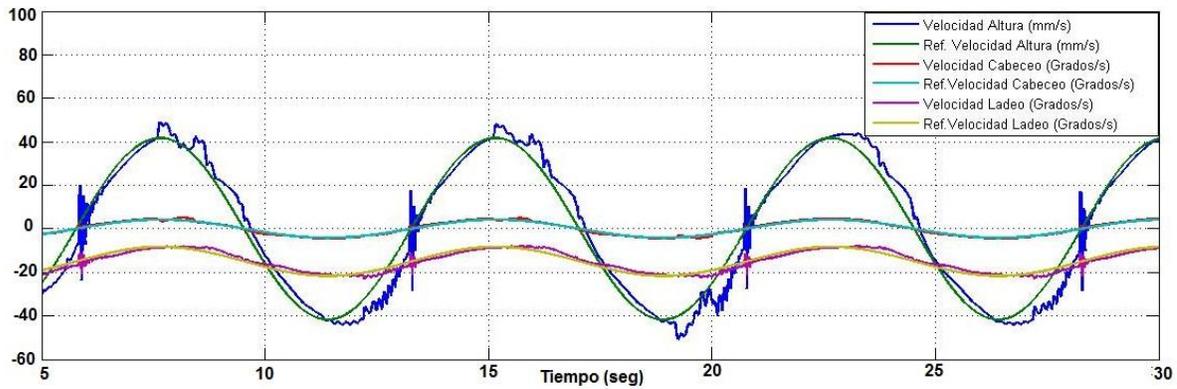
actuadores electro-neumáticos para realizar las simulaciones en ADAMS/Matlab, se pueden evidenciar el efecto de las fricciones de Coulomb en el momento de cambio de sentido de la velocidad del efector final de la plataforma, y de la zona muerta existente en las válvulas de flujo.

Los sensores virtuales del modelo geométrico del ADAMS proveen la información de la pose de la plataforma móvil, cuyas señales sirven de retroalimentación al lazo externo. Los resultados arrojados durante la simulación de seguimiento de trayectoria, de los lazos de altura, ladeo y cabeceo para entradas sinusoidales en la orientación de la plataforma móvil, se muestran en la figura 3.11, evidenciándose buenos resultados.

También se comprobó la razón de cambio de las posiciones en el espacio de tareas, ya que el seguimiento de trayectoria requiere que las velocidades tengan un comportamiento similar a la posición. La figura 3.12 muestra el comportamiento de las velocidades de la altura, ladeo y cabeceo, demostrando que no es necesaria la retroalimentación de estas variables para obtener un buen desempeño en este sentido. Estas variables se obtienen a partir de derivar las señales de la posición de  $h$ ,  $\theta$  y  $\varphi$ , por lo que este efecto derivativo introduce algunas variaciones violentas que se observan en la figura.



**Figura 3.11 Orientación de la plataforma móvil ante entradas sinusoidales mediante simulación Simulink/ADAMS**



**Figura 3.12 Velocidad de la plataforma móvil ante entradas sinusoidales mediante simulación Simulink/ADAMS**

### 3.6.2 Resultados experimentales con la plataforma de 3 GDL

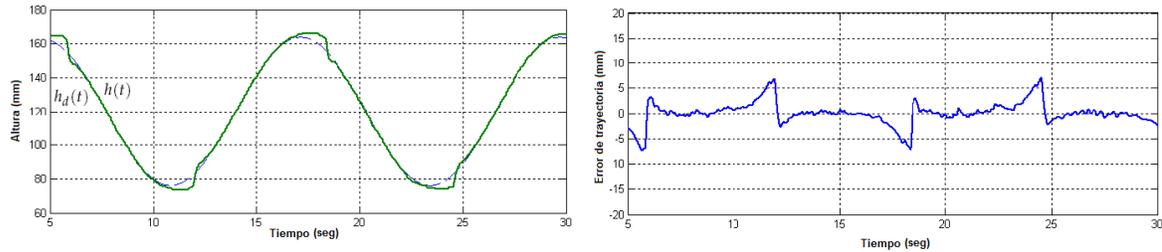
El esquema de control propuesto es implementado en la plataforma neumática de tres grados de libertad. Los lazos de control interno y externo, son implementados utilizando una computadora Pentium-D 3.00-GHz conectada al robot a través de una tarjeta de adquisición de datos Humusoft MF624.

La tarjeta se encarga de adquirir la lectura de los potenciómetros lineales, sensores encargados de transmitir la elongación de cada pistón, y a su vez, transmite a las electroválvulas del sistema neumático, con un período de muestreo de 1 ms, las señales de control que se generan en la PC. Las variables del espacio cartesiano son adquiridas a través de la misma tarjeta de adquisición, y son calculadas a partir del arreglo de encoders descrito anteriormente, en el caso de la altura, y en el caso de las variables de ladeo y cabeceo a través de la IMU. Los algoritmos de control son implementados utilizando MATLAB/Simulink con *Real-Time Windows Target*.

Como se muestra en la figura 3.2, el sistema de control está constituido por dos lazos, donde en el lazo externo se ejecuta el control de trayectoria en el espacio de tareas. La ecuación 3.7 se satisface mientras que la dinámica del lazo interno sea dominada por un par de polos complejos conjugados, con 60 ms de tiempo de muestreo para el lazo externo (Izaguirre, 2012).

En la figura 3.15 es presentado el mismo experimento expuesto en el epígrafe anterior, ahora con la implementación del esquema de control de trayectoria propuesto. Se muestra

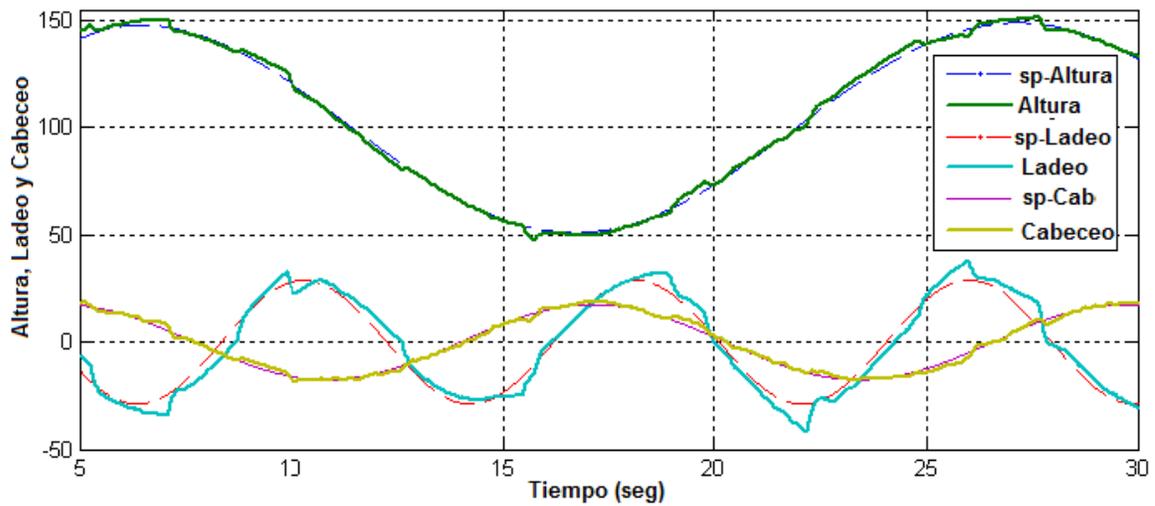
el cálculo de la altura a partir de la lectura del arreglo de encoders implementado. Se evidencia una considerable reducción del error de trayectoria en la variable de altura debido a la implementación de este esquema con respecto al esquema de control cinemático en espacio de tareas.



**Figura 3.13** Comportamiento de la altura utilizando el esquema de control de trayectoria en espacio de tareas

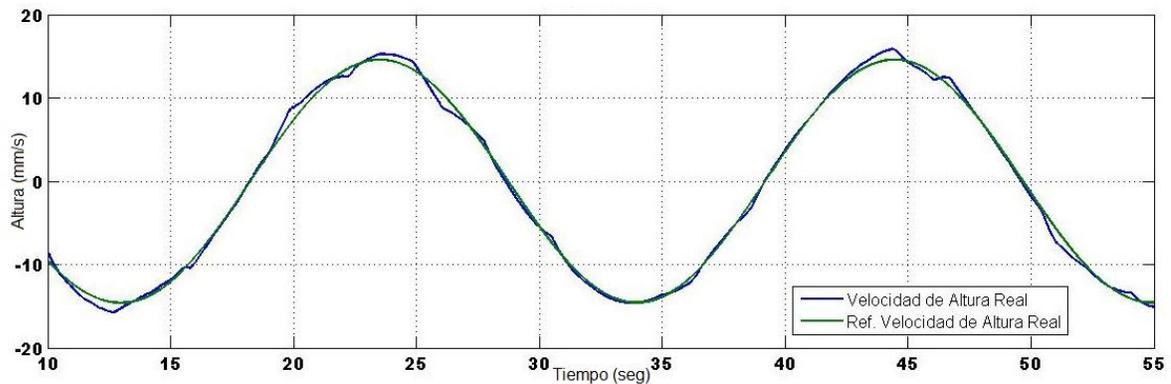
La principal fuente de error está relacionada con la fricción de Coulomb, en el momento en que la velocidad del robot es cero, antes de que su velocidad cambie de dirección, además del efecto de la zona muerta que experimentan las válvulas de control de flujo utilizadas en el sistema electro-neumático (Prieto, 2013).

En la figura 3.14 es presentado el seguimiento de trayectoria de la plataforma móvil ante entradas simultáneas en forma sinusoidal en las variables de altura, ladeo y cabeceo, demostrando un buen desempeño del esquema de control propuesto para aplicaciones de seguimiento de trayectoria en la plataforma de tres grados de libertad actuada por cilindros neumáticos.

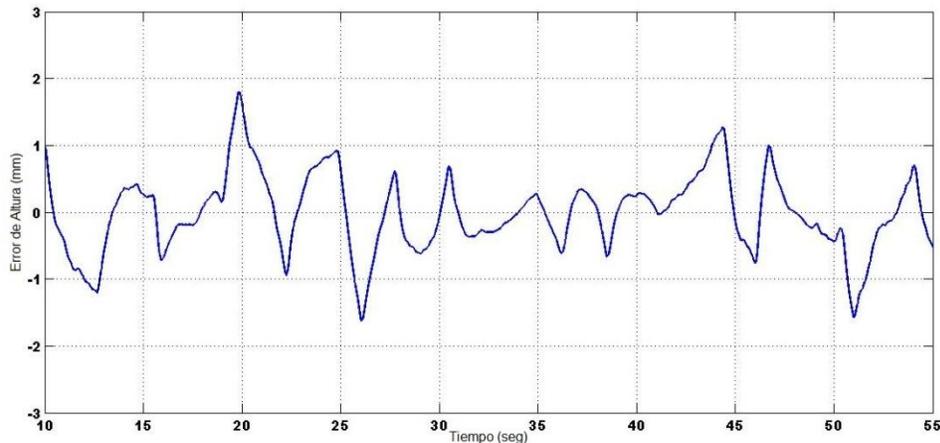


**Figura 3.14** Altura, Ladeo y cabeceo de la plataforma móvil ante entrada sinusoidal

De igual manera que se procedió con los experimentos de simulación, se obtuvo la velocidad del efector final de la plataforma móvil en la vertical derivando la señal de altura obtenida a partir de la medición de los encoders. El efecto derivativo aplicado a esta señal provocó que la señal de velocidad estimada fuera extremadamente ruidosa por lo que fue necesario filtrarla con un filtro de *Butterworth* de segundo orden. En la figura 3.15 se muestra que el comportamiento de la razón de cambio de la posición, demostrando buen seguimiento de trayectoria, se muestra además el error de velocidad en la figura 3.16, que aunque no llega a ser cero en ningún momento, oscila alrededor de los 2 mm/s, demostrando la eficacia del esquema de control propuesto.



**Figura 3.15** Comportamiento de la velocidad de altura utilizando el esquema de control de trayectoria en espacio de tareas



**Figura 3.16** Error de trayectoria de velocidad de altura utilizando el esquema de control de trayectoria en espacio de tareas

Los resultados presentados demuestran que el esquema de control propuesto para seguimiento de trayectoria para el robot paralelo de tres grados de libertad SIMPRO, mejora el comportamiento del sistema como simulador de movimiento en aplicaciones de

seguimiento de trayectoria, perfeccionando el esquema de control cartesiano que estaba implementado para esta estructura. La característica de utilizar aproximaciones de los modelos de la planta, y de presentar compensación *feedforward*, proporciona al sistema de control la robustez necesaria ante cambios en los parámetros del sistema y perturbaciones externas.

### **Conclusiones parciales**

La sintonía del control articular basado en el modelo obtenido a través de identificación experimental, demostró buen desempeño en el posicionamiento continuo del pistón aunque no cumplía con las especificaciones en el espacio de tareas.

El doble lazo propuesto minimiza los errores de posicionamiento de las variables de orientación en el espacio de tareas, a pesar de las incertidumbres, interacción dinámica y errores de modelado, y constituye una propuesta que brinda la flexibilidad de implementar varias estrategias de control, mediante la modificación del controlador del lazo cartesiano exterior, sin necesidad de cambiar el lazo interior de control articular.

La estrategia de control cartesiano en espacio de tareas no demuestra buenos resultados en aplicaciones de seguimiento de trayectoria.

El esquema de control de trayectoria en espacio de tareas, demostró tener buen desempeño en seguimiento de trayectoria sin la necesidad de la realimentación directa de la velocidad y aceleración de las variables de orientación.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

A partir del análisis realizado acerca del modelado de los robots paralelos, se puede establecer, que la obtención del modelo dinámico de estas estructuras constituye una solución con un alto grado de dificultad, y que de su exactitud depende en gran medida el desempeño de las estrategias de control basadas en modelos.

De igual manera, la solución de la cinemática directa, constituye una de las problemáticas más difíciles de resolver, ya que brinda como resultado múltiples soluciones e involucra un alto número de operaciones, su uso no es conveniente para aplicaciones de tiempo real, por lo que el uso un sistema de medición exteroceptivo para la medición del espacio de tareas en la plataforma móvil y su respectivo control cartesiano en el espacio de tarea, constituye una solución para la elevación de las prestaciones de los sistemas de control de robots paralelos.

La implementación de un esquema de control de trayectoria en espacio de tareas es una solución que incrementa el comportamiento del sistema ante exigencias de seguimiento de trayectorias, muy necesario para el caso de simuladores de conducción.

La estrategia de control planteada por Slotine para seguimiento de trayectoria, constituye una solución de fácil implementación que logra alcanzar excelentes resultados, y que se solapa con la estrategia de control cinemático en espacio de tareas, logrando aprovechar las ventajas de este esquema de arquitectura abierta para nuestra propuesta.

El esquema de control de trayectoria en espacio de tareas plateado para la plataforma neumática de tres grados de libertad, logra mejorar las prestaciones en seguimiento de

trayectoria de la estrategia de control cartesiano en espacio de tareas, cumpliendo con los índices de desempeño del sistema, en una aplicación de simulador de movimiento.

Los resultados alcanzados: primeramente con simulación ADAMS/Matlab, utilizando un modelo no lineal del sistema electro-neumático; y luego experimentales, con la plataforma de tres grados de libertad SIMPRO, sustentan la hipótesis propuesta en este trabajo, demostrando buenos desempeños de seguimiento de trayectoria, no solo en las variables de orientación de la plataforma móvil, sino también en sus respectivas derivadas, cumpliendo así con los requisitos que plantea el seguimiento de trayectoria, solo con la medición directa de las variables de posicionamiento cartesianas del robot.

### **Recomendaciones**

Implementar una estrategia de control de trayectoria en espacio de tareas con realimentación de la velocidad y aceleración con el objetivo de evaluar los resultados de desempeño de sistema en comparación con la estrategia planteada en este trabajo.

Dada la simplicidad de la estrategia, y que constituye una implementación viable para cualquier tipo de aplicación, emplear el esquema de control para aplicaciones de seguimiento de camino de vehículos autónomos no tripulados y evaluar su desempeño.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Abbasnejad, G., Zarkandi, S., Imani, M., (2010). "Forward Kinematics Analysis of a 3-PRS Parallel Manipulator". World Academy of Science, Engineering and Technology, 1 (61), 329–335.
2. Ahmad, O., January 22-26 (2006). Design of Simulator Scenarios to Study the Effectiveness of Electronic Stability Control Systems. En: 85th Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington, DC, pp. 79–86.
3. Ahmad, O., Papelis, Y. E., 2006. Comprehensive Management of Simulator Research Subjects. En: First Driving Simulation Conference of Asia and Pacific. Tsukuba, Japan, pp. 2–10.
4. Angeles, J., 2007. Fundamentals of Robotic Mechanical Systems Theory, Methods, and Algorithms, 3rd Edition. Springer. Arteaga, M. A., Castillo-Sánchez, A., Parra-Vega, V., 2006. Cartesian Control of Robots without Dynamic Model and Observer Design. Automatica, 42 (3), 473–480.
5. Astrom, K. J., Wittenmark, B., 1997. Computer-Controlled Systems: Theory and Design, 3rd Edition. Prentice Hall, ISBN: 7-303-05008.
6. Aracil, R., R. Salterén, et al. (2006). "Robots Paralelos: Máquinas con un pasado para una Robótica del Futuro." Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial 3: 16-28.
7. Barrientos, A., L. F. Penin, et al. (1997). Fundamentos de Robótica, McGraw-Hill.
8. Barmish, B., R., Corless, M. J., & Leitmann, G. (1983). "A new class of stabilizing controllers for uncertain dynamical systems". SIAM Journal of Control and Optimization, 21, 246–255.

9. Beer, F., Johnston, E. R., Clausen, W., 2008. *Vector Mechanics for Engineers: Dynamics*, 7th Edition. McGraw-Hill, New York, ISBN-13: 978-970-10-6102-2.
10. Bellakenal, S., Andreff, N., Mezouar, Y., Tadjine, M., 2011. Force/Position Control of Parallel Robots using Exteroceptive Pose Measurements. *Mecanica*, 46 (1), 195–205.
11. Belgharbi, M., Thomasset, D., Scavarda, S. y Sesmat, S., “Analytical model of the flow stage of a pneumatic servo-distributor for simulation and nonlinear control”, Scandinavian International Conference on Fluid Power, Tampere, Finland, 1999.
12. Ben, S., Romdhane, L., 2005. A Software Package for Parallel Mechanisms Modeling and Simulation. En: *International Workshop on Computational Kinematics*. Cassino, Italy.
13. Bonev, I. (2002). *Geometric analysis of parallel mechanisms*. Departamento de Ingeniería Mecánica. Québec, Universidad de Laval. Tesis de Doctorado.
14. Bonev, I. (2003). "The True Origins of Parallel Robots."
15. Bonfe, M., Mainardi, E., Fantuzzi, C., 2002. Variable Structure PID Based Visual Servoing for Robotic Tracking and Manipulation. En: *Proceedings of the IEEE Conference on Intelligent Robots and Systems*. Lausanne, Switzerland, pp. 396–401.
16. Brun, X., Belgharbi, M., Sesmat, S., Thomasset, D. y Scavarda, S., “Control of an electropneumatic actuator, comparison between some linear and nonlinear control laws”, *Journal of Systems and Control Engineering*, 2000.
17. Burrows, C. R., *Fluid Power Servomechanisms*, London, England, Van Nostrand, 1972.
18. Callegari, M., Palpacelli, M.-C., Principi, M., 2006. Dynamics Modelling and Control of the 3-RCC Translational Platform. *Mechatronics*, 16 (10), 589–605.
19. Callegari, M., Tarantini, M., 2003. Kinematic Analysis of a Novel Translational Platform. *Journal of Mechanical Design*, 125 (2), 308–315.
20. Campos, A., Quintero, J., Saltaren, R., Ferre, M., Aracil, R., Sept 22-26 2008. An Active Helideck Test bed for Floating Structures based on a Stewart-gough Platform. En: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Nice, France, pp. 3705–3710.
21. Cappel, K. L., January 26 1967. Motion Simulator. En: United States Patent No. 3,295,224. The Franklin Institute, Philadelphia, pp. 1–12.

22. Chaffin, W. P., Martin, D., Jonghwa Yoon, B., 2008. Memory-Based Human Motion Simulation for Computer-Aided Ergonomic Design. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 38 (3), 513–527.
23. Chalbat, D., Staicu, S., 2009. Kinematics of a 3-PRP Planar Parallel Robot. *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering*, 71 (1), 3–16.
24. Changfeng, L., Lining, S., Dongsheng, Q., Yanwu, L., May 23-25 2007. Error Analysis and Compensation of Precision Parallel Robot for Sensor Locating in ICF. En: 2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2007. China, pp. 1297–1306.
25. Cheah, C. C., Liu, C., Slotine, J. J. E., 2006. Adaptive Jacobian Tracking Control of Robots with Uncertainties in Kinematic, Dynamic and Actuator Models. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 51 (6), 1024–1029.
26. Chen, C.-K., Hwang, J., 2005. Iterative Learning Control for Position Tracking of Pneumatic Actuated X-Y Table. *Control Engineering Practice*, 13 (12), 1455–1461.
27. Chen, R., Lihong Ren, L., Ding, Y., Sept 10-11 2009. Neuroendocrine-based Intelligent Control of a 6-DOF Parallel Robot with Redundant Drivers. En: Control and Decision Conference, CCDC 2008. China, pp. 2152–2155.
28. Chen, Y., McInroy, J., 2004. Decoupled Control of Flexure-jointed Hexapods using Estimated Jointspace Mass-inertia Matrix. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 12 (3), 413–421.
29. Cherfia, A., Zaatri, A., Giordano, M., 2007. Kinematics Analysis of a Parallel Robot with a Passive Segment. *Engineering Journal of Chile*, 15 (2), 141–148.
30. Chillari S., Guccione S. y Muscato G. 2001. “An Experimental Comparison between Several Pneumatic Position Control Methods”. *Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control*, Orlando, Florida, USA, December 2001.
31. Chin J.-H., Suna, Y.-H., Cheng, Y.-M., 2008. Force Computation and Continuous Path Tracking for Hydraulic Parallel Manipulator. *Control Engineering Practice*, 16 (6), 697–709.
32. Cutti, A. G., Giovanardi, A., Rocchi, L., Davalli, A., Sacchetti, R., 2008. Ambulatory Measurement of Shoulder and Elbow Kinematics through Inertial and Magnetic Sensors. *Medical and Biological Engineering and Computing*, 46 (2), 169–178.

33. Davliakos, I., Papadopoulos, E., July 27-29 2007. Model-Based Position Tracking Control for a 6-dof Electrohydraulic Stewart Platform. En: 15th Mediterranean Conference on Control and Automation. Athens, Greece, pp. 31–37.
34. Davliakos, I., & Papadopoulos, E. 2008. Model-based control of a 6-dof electro-hydraulic Stewart Gough platform. *Mechanism and Machine Theory*, 43(11), 1385–1400.
35. Dequan Zhu, Tao Mei, Lei Sun, “Fuzzy Support Vector Machines Control for 6 DOF Parallel Robot”. *Journal of Computers*, vol. 6, N°. 9, September 2011, doi:10.4304/jcp.6.9.1926-1934.
36. Donovan, K. J., Kamnik, R., Keeffe, D. T., Lyons, G. M., 2007. An Inertial and Magnetic Sensor Based Technique for Joint Angle Measurement. *Journal of Biomechanics*, 40 (12), 2604–2611.
37. Dorf, R., Bishop, R., 2008. *Modern Control Systems*, 11th Edition. Prentice Hall, ISBN-13: 978-0-13-145-733-1.
38. Dumlu, A., (2014). “Trajectory Tracking Control for a 3-DOF Parallel Manipulator Using Fractional-Order PID Control”. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* (Vol.: 61, Issue: 7 ). Julio, 2014, 3417 – 3426.
39. Dutta A., (2012). *Robotic Systems - Applications, Control and Programming*. InTech, 2012. ISBN 978-953-307-941-7.
40. Faugere, J.-C., Merlet, J. P., Rouillier, F., 2006. On Solving the Direct Kinematics Problem for Parallel Robots. Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique, Research Report, No. 5923, INRIA, Sophia-Antipolis, 2 (1), 1–21.
41. FESTO, 2006. "Impulse for efficiency in the automotive industry", *Innovations 2006 Products & Services*, pp. 84-91, 2006a.
42. Fumagalli, A., Masarati, P., 2009. Real-time Inverse Dynamics Control of Parallel Manipulators using General-purpose Multibody Software. *Multibody System Dynamics*, 22 (1), 47–68.
43. Gallardo, J. A., Arroyo-Ramírez, B., Rojas-Garduño, H., 2009. Kinematics of a Five Degrees of Freedom Parallel Manipulator using Screw Theory. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 45 (7-8), 830–840.

44. Gao, J., Webb, P., Gindy, N., 2004. Investigation of an Inertial Sensor Based Dynamic Position Measurement System for a Parallel Kinematic Machine. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 26 (4), 293–310.
45. Gao, J., Webb, P., Gindy, N., 2008. Evaluation of a Low-cost Inertial Dynamic Measurement System. En: *IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics*. Chengdu, China, pp. 1–5.
46. García-Sanz, M., Casado, M. M., 2005. Herramientas para el Estudio de Robots de Cinemática: Simulador y Prototipo Experimental. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 2 (2), 73–81.
47. Garrido, R., Canul, E., Soria, A., Mayo 12-17 2009. Task Space Robot Control using an Inner PD Loop. En: *IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA '09*. Kobe, Japan, pp.1268–1272.
48. Gogu, G., 2010. *Structural Synthesis of Parallel Robots*, 1st Edition. Springer Dordrecht Heidelberg London, ISBN-13: 978-140-205-102-9.
49. González-Rodríguez, R., Hernández, L., Izaguirre, E., A., R., 2011. Estrategia de Control para Robots Manipuladores con Realimentación Visual y Plataforma Electro-neumática de 3 gdl. *Revista de Ingeniería Mecánica*, 14 (3), 245–257.
50. Gunthner, W., 2008. *Enhancing Cognitive Assistance Systems with Inertial Measurement Units*, 1st Edition. Springer Berlin / Heidelberg, ISBN-13: 978-354-0-769-965.
51. Gwinnett, J. E., January 20 1931. Amusement Device. En: *United States Patent No. 1,789,680*. Kent, Washington, pp. 1–7.
52. Hahn, H., 2005. Mathematical Modeling, Control, Computer Simulation and Laboratory Experiments of a Spatial Servopneumatic Parallel Robot. *Nonlinear Dynamics*, 40 (1), 387–417.
53. Hernández, L., Izaguirre, E., Rubio, E., Urquijo, O., 2011. Kinematic Task Space Control Scheme for 3-DOF Pneumatic Parallel Robot. En: *Intelligent Mechatronics: Chapter V*. 1st Edition, InTech Education and Publishing, Vienna, Austria, ISBN: 978-953-307-300-2, pp. 67–84.
54. Hernández, L., Rubio, E., J., G., Sahli, H., Gonzalez, R., 2008. A Decoupled Control for Visual Servoing of Camera-in-hand Robot with 2D Movement. En: *Proceedings of the*

- 2008 Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference. Cuernavaca, Mexico, pp. 304–309.
55. Hernández, L., Sahli, H., Gonzalez, R., 2010. Vision Based 2D and 3D Control of Robot Manipulators. En: Robot Manipulators Trends and Development. InTech Publisher, Vienna, Austria, pp. 441–462.
56. Hu, Q., Xu, L. and Zhang, A. (2012). “Adaptive Backstepping Trajectory Tracking Control of Robot Manipulator,” *Journal of the Franklin Institute*, vol. 349, no. 3, pp. 1087-1105, April 2012.
57. Izaguirre, E. “Control cinemático en el espacio de tareas de robot paralelo neumático en aplicación de simulador de movimiento,” Tesis Doctoral, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, 2012.
58. Izaguirre, E., Hernández, L., Moya, J. L., Guerra, J. A., Feb. 3-5 2010a. Kinematics and Dynamic Modeling of Motion Platform. En: Proceedings of the Cuba-Flanders Workshop on Machine Learning and Knowledge Discovery, CF-WML-KD2010. ISBN: 578-959-250-574-2, Santa Clara, Cuba, pp. 381–386.
59. Izaguirre, E., Hernández, L., Prieto, P. J., Guerra, J. A., Marzo 25-27 2010b. Modelo Dinámico Basado en el Principio del Trabajo Virtual para Robot Paralelo. En: Memorias del 1er Taller Universidad Alcalá Henares-CES, UAH-CES-2010. ISBN: 978-84-8138-878-7, Santiago de Cuba, Cuba, pp. 34– 40.
60. Izaguirre, E., Hernández, L., Rubio, E., Prieto, P. J., Hernández, A., 2011a. Control Desacoplado de Plataforma Neumática de 3-gdl utilizada como Simulador de Movimiento. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 8 (4), 345–356.
61. Izaguirre, E., Hernández, L., Rubio, E., Prieto, P. J., Urquijo, O., Guerra, J. A., 2011b. Análisis Cinemático y Control Articular Aplicado a Simulador de Movimiento de Estructura Paralela. *Revista Científica de Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, 32 (3), 1–12.
62. Izaguirre, E., Hernández, L., Rubio, E., Urquijo, O., 2011c. Cartesian Control of a 3-DOF Electro-pneumatic Actuated Motion Platform with Exteroceptive Pose Measurement. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 8 (4), 120–128.

63. Izaguirre, E., Hernández, L., Urquijo, O., Machado, A., García, D., 2011d. Sistema Sensorial para Medición de la Pose de Robot Paralelo en Control Cartesiano. En: XIV Convention of Electrical Engineering, CIE-2011. Santa Clara, Cuba, pp. 1–6.
64. Izaguirre, E., Hernández, L., Prieto, P., Urquijo, O. y Guerra J. 2011e. “Análisis Cinemático y Control Articular Aplicado a Simulador Neumático de 3GDL”, XIV Convención y Feria Internacional Informática 2011. X Convención de Automatización. Febrero 2011. ISBN 978-959-7213-01-7. Editorial CIMATEL, La Habana, Cuba, 2011.
65. Izaguirre, E., Mellado, M., Hernández, L., Valera, A., Guerra, J. A., 2009. Modeling and Simulation of Parallel Robot of 3 dof with Virtual Robot Simulator. En: 13th International Convention and Fair, SIA-2009. International Convention Center, Havana, Cuba.
66. Jain, A., Shiferaw, D., 2011. Comparison of Joint Space and Task Space Integral Sliding Mode Controller Implementations for a 6-DOF Parallel Robot. En: Recent Researches in Multimedia Systems, Signal Processing, Robotics, Control and Manufacturing Technology. Wisconsin, USA, pp. 163–169.
67. Janiszowski, K. B., “Adaptation, modeling of dynamic drives and controller design in servomechanism pneumatic systems”, IEE Proceedings - Control Theory and Applications, vol. 151, pp. 234-245, 2004b.
68. Jun, J., Kanaoka, K., Kawamura, S., 2010. Cascaded Feedback Control Scheme for Trajectory Tracking of Robot Manipulator Systems with Actuator Dynamics. *Advanced Robotics*, 24 (5-6), 879–902.
69. Jun, W., Jinsong, W., Tiemin, L., Liping, W., Liwen, G., 2008. Dynamic Dexterity of a Planar 2-DOF Parallel Manipulator in a Hybrid Machine Tool. *Robotica*, 26 (1), 93–98.
70. Karpenko, M. y Sepehri, N., “Design and Experimental Evaluation of a Nonlinear Position Controller for a Pneumatic Actuator with Friction”, IEEE American Control Conference, Boston, vol. 6, June 30 - July 2, 2004a.
71. Karpenko, M. y Sepehri, N., “QFT Design of a PI Controller with Dynamic Pressure Feedback for Positioning a Pneumatic Actuator”, IEEE American Control Conference, Boston, vol. 6, June 30 - July 2, 2004b.
72. Karpenko, M., Sepehri, N., 2006. Development and Experimental Evaluation of a Fixed-gain Nonlinear Control for a Low-cost Pneumatic Actuator. *IEEE Proceedings – Control Theory and Applications*, 143 (1), 629–640.

73. Kim, H. S., Cho, Y. M., Lee, K. "Robust Nonlinear Task Space Control for 6 DOF Parallel Manipulator," *Automatica*, vol. 41, pp. 1591-1600, June 2005.
74. Kolbus, M., Wobbe, F., Schumacher, W., 2008. Enhanced Motion Control Concepts on Parallel Robots, 11th Edition. InTech Education and Publishing (Eds.) Institute of Control Engineering, Germany, ISBN: 978-3-902613-41-7.
75. Krejcin, G. V., Krivts, I. L., 2006. Pneumatic Actuating Systems for Automatic Equipment, 2nd Edition. CRC Press Taylor and Francis Group, ISBN: 2964-0-8493-2964-7.
76. Kroneis, J., Muller, P. A., Liu, S., 2008. Dynamic Modeling and Identification of a Complex-structured Parallel Robot. En: 17th World Congress of the International Federation of Automatic Control. Seoul, Korea, pp. 4361–4366.
77. L., Y., Yong, W., Zhenghong, C., Sept 1-3 2008. Research on Trajectory Tracking of a Parallel Robot Based on Neural Network PID Control. En: IEEE International Conference on Automation and Logistics, ICAL 2008. Qingdao, China, pp. 504–508.
78. Li, C., Yang, B., Cai, G., May 23-24 2009. Optimization Design of 3-TPT Parallel Robot based on ADAMS Simulation Technology. En: International Workshop on Intelligent Systems and Applications. USA, pp. 71–86.
79. Li, Y., Xu, Q., 2006. Kinematic Analysis and Design of a New 3-DOF Translational Parallel Manipulator. *Journal of Mechanical Design*, 128 (3), 729–737.
80. Lombaerts, T., Chu, Q., Mulder, J., Joosten, D., 2011. Modular Flight Control Reconfiguration Design and Simulation. *Control Engineering Practice*, 19 (6), 540–554.
81. Lu, Y., Hu, B., Shi, Y., 2007. Kinematics Analysis and Statics of a 2SPS+UPR Parallel Manipulator. *Multibody System Dynamics*, 18 (4), 619–636.
82. Machado, A., Hernández, L. y Rubio, E., "Controlador empotrado para plataforma neumática de simulador de conducción", XIII Convención de Ingeniería Eléctrica, June, 2007.
83. Merlet, J. P., 2004. Solving the Forward Kinematics of a Gough-type Parallel Manipulator with Interval Analysis. *International Journal of Robotics Research*, 23 (3), 221–236.
84. Merlet, J. P., 2006a. Jacobian, Manipulability, Condition Number and Accuracy of Parallel Robots. *Journal of Mechanical Design*, 128 (1), 199–207.
85. Merlet, J.P. (2008). *Parallel Robots*, 2nd Edition. Springer. ISBN 978-1-4020-4132-7.

86. Muller, A., September 21-22 2008. Consequences of Kinematics Imperfections for the Control of Redundantly Actuated Parallel Manipulators. En: 2nd International Workshop on Fundamental Issues and Future Research Directions for Parallel Mechanisms and Manipulators. Montpellier, France, pp. 211–216.
87. Nalluri, M., Mallikarjuna, R., 2009. Dimensional Synthesis of a spatial 3-RPS Parallel Manipulator for a Prescribed Range of Motion of Spherical Joints. *Mechanism and Machine Theory*, 44 (1), 477–486.
88. Narayanan, M. S., Chakravarty, S., Shah, H., Krovi, N., August 15-18 2010. Kinematic, Static and Workspace Analysis of a 6-PUS Parallel Manipulator. En: International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. Montreal, Canada, pp. 1–8.
89. Nazari I., Hosainpour A., Piltan, F., Emamzadeh S., Mirzaie M., 2014. Design Sliding Mode Controller with Parallel Fuzzy Inference System Compensator to Control of Robot Manipulator. *.I.J. Intelligent Systems and Applications*, 2014, 04, 63-75
90. Paccot, F., Andreff, N., Martinet, P., 2009. A Review on the Dynamic Control of Parallel Kinematics Machines: Theory and Experiments. *International Journal of Robotics Research*, 28 (3), 395–416.
91. Parnian, N., Won, S. P., Golnaraghi, F., 2008. Position Sensing Using Integration of a Vision System and Inertial Sensors. En: 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, IECON 2008. Orlando, Florida, pp. 3011–3015.
92. Pearce, M., “Is there an alternative to fluid power?” *IEEE Journal of Computing & Control Engineering*, vol. 16, pp. 8-11, 2005.
93. Pi, Y., Wang X, (2011). Trajectory tracking control of a 6-DOF hydraulic parallel robot manipulator with uncertain load disturbances *Control Engineering Practice* 19 (2011) 185–193.
94. Pierrot, F., Baradat, C., Nabat, V., Company, O., Krut, S., Gouttefarde, M., 2009. Above 40g Acceleration for Pick-and-Place with a new 2-dof PKM. En: IEEE International Conference of Robotics and Automation (ICRA-09). Kobe, Japan, pp. 1794–1800.
95. Prieto, P. “Control por modo deslizante basado en proxy de una plataforma con tres grados de libertad.” Tesis de Maestría, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, 2013.

96. Qing, H. C., Li, F., 2010. Study on Control Algorithm of 3-DOF Parallel Robot. *Applied Mechanics and Materials Advances in Science and Engineering*, (40-41), 774–777.
97. Qi, Z., Mcinroy, J. E., Jafari, F. (2007). “Trajectory Tracking with Parallel Robots Using Low Chattering, Fuzzy Sliding Mode Controller,” *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, vol. 48, no. 3, pp. 333-356, March 2007.
98. Ramdani, N., Gouttefarde, M., Pierrot, F., Merlet, J. P., 2008. First Results on the Design of High Speed Parallel Robots in Presence of Uncertainty. En: *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems IROS-08*. Nice, France, pp. 2410–2415.
99. Reid, A. A., 1992. Safety Assessment of TACOM’s Crew Station/Turret Motion Base Simulator. Research, Development and Engineering Center, Technical Report No.13549, 1 (2), 1–63.
100. Richer, E. y Hurmuzlu, Y., “A High Performance Pneumatic Force Actuator System: Part I -Nonlinear Mathematical Model”, *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 122, pp. 416-425, 2000a.
101. Richer, E. y Hurmuzlu, Y., “A High Performance Pneumatic Force Actuator System: Part II - Nonlinear Controller Design”, *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 122, pp. 426-434, 2000b.
102. Rolland, L., 2005. Certified Solving of the Forward Kinematics Problem with an Exact Algebraic Method for the General Parallel Manipulator. *Advanced Robotics*, 19 (9), 995–1025.
103. Rolland, L., 2007. Synthesis of the Forward Kinematics Problem Algebraic Modeling for the General Parallel Manipulator Displacement-based Equations. *Advanced Robotics*, 21 (9), 1071–1092.
104. Rubio, E., 2007. Modelación, Identificación y Control de Actuadores Lineales electro-neumáticos para Aplicaciones Industriales. Tesis Doctoral, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.
105. Rubio, E., Hernández, L., Aracil, R., Saltaren, R., Guerra, J., 2009. Implementation of Decoupled Model-Based Controller in a 2-DOF Pneumatic Platform used in Low-Cost Driving Simulators. En: *Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference Cerma 2009-*. Morelos, Mexico, pp. 338–343.

106. Rubio, E., Hernández, L., Aracil, R., Saltarén, R., 2007. Modelado, Identificación y Control de Actuadores Lineales Electro-neumáticos. Aplicación en Plataforma de Dos Grados de Libertad. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 4 (4), 58–69.
107. Sebastian, J. M., Traslosheros, A., Angel, L., Roberti, F., Carelli, R., 2007. *Parallel Robot High Speed Object Tracking*, 1st Edition. Springer Berlin, Heidelberg, ISBN: 978-354-07-425-86.
108. Selvakumar, A. A., Anant, K. A., Narayanan, T. L., Sivaramakrishnan, R., 2009. Simulation and Kinematic Analysis of Tri-Glide Parallel Manipulator. *International Journal of Mechanics and Solids*, 4 (1), 127–135.
109. Se-Han Lee, Jae-Bok Song, Woo-Chun Choi, Daehie Hong, 2003. “Position control of a Stewart platform using inverse dynamics control with approximate dynamics” *Mechatronics* 13 (2003) 605–619.
110. Shang, W., Cong, S., 2009. Nonlinear Adaptive Task Space Control for a 2-DOF Redundantly Actuated Parallel Manipulator. *Nonlinear Dynamics*, 99 (1-2), 12–19.
111. Shurong, N., Shihuan, W., Sept 1-3 2008. The Performance Analysis of Parallel Mechanism 4-RPR (RR). En: *IEEE International Conference on Automation and Logistics, ICAL 2008*. Qingdao, China, pp. 1314–1318.
112. Siciliano, B., Khatib, O., 2008. *Handbook of Robotics*, 1st Edition. Springer, ISBN: 978-3-540-957-4.
113. Silva, M. M., Bruls, O., Swevers, J., Desmet, W., Brussel, H.-V., 2009. Computer-aided Integrated Design for Machines with Varying Dynamics. *Mechanism and Machine Theory*, 44 (9), 1733–1745.
114. Slob, J., August 2008. State of the Art Driving Simulators, a Literature Survey. En: *DCT report*, Control Systems Technology Group. Eindhoven University of Technology, pp. 1–19.
115. Slotine, J. J. E. and W. Li (1989). *Applied Nonlinear Control*. Englewood Cliffs, New Jersey.
116. Sánchez, S. P., Reyes, C. F., 2010. Chapter 8: Cartesian Control for Robot Manipulators. En: *Robot Manipulators Trends and Development*. InTech Publisher, Vienna, Austria, pp. 165–211.

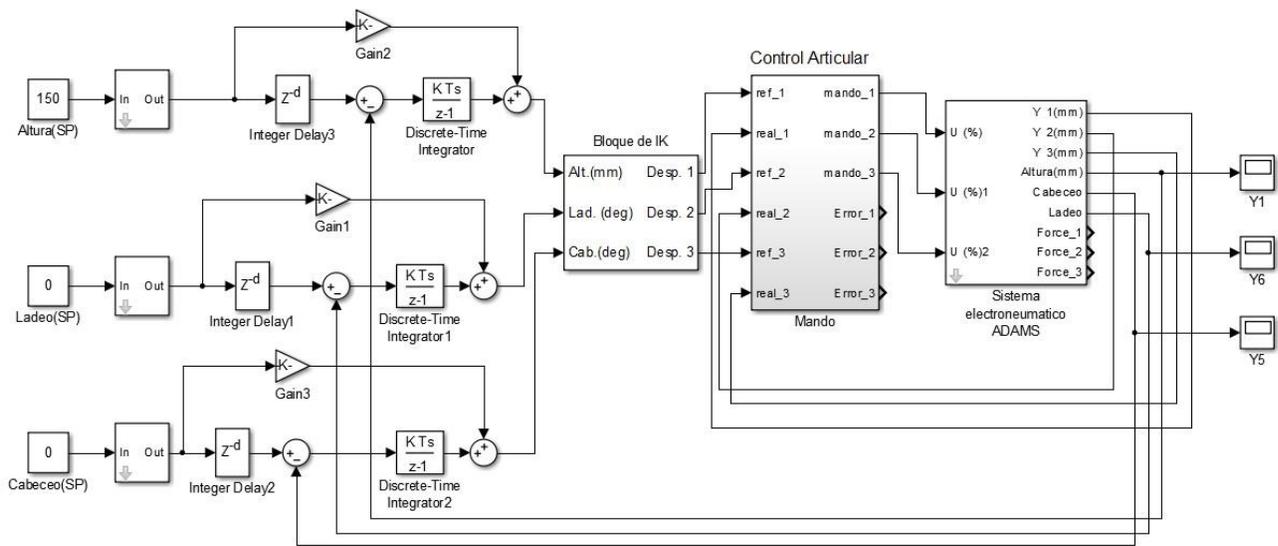
117. Schulte, H. y Hahn, H., "Identification with blended multi-model approach in the frequency domain, an application to a servo pneumatic actuator", IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics Proceedings, Como, Italy, July 8-12, 2001.
118. Song, Q., Liu, F. y Findlay, R. D., "Generalized Predictive Control for a Pneumatic System Based on an Optimized ARMAX Model with an Artificial Neural Network", International Conference on Computational Intelligence for Modeling, Control and Automation, 2006a.
119. Song, Q., Liu, F. y Findlay, R. D., "Improved Fuzzy Neural Network Control for a Pneumatic System Based on Extended Kalman Filter", International Conference on Computational Intelligence for Modeling, Control and Automation, 2006b.
120. Staicu, S., 2009. Recursive Modeling in Dynamics of Agile Wrist Spherical Parallel Robot. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 25 (2), 409–416.
121. Stefanovic, M., Zhang, H. (2012). "Results on the Robust Observer-based Position Controller for Parallel Kinematic Machines," *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, vol. 66, no. 4, pp. 417-428, June 2012.
122. Stewart, D., January 3 1965. A Platform with 6 Degrees of Freedom. En: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part 1*, 15, pp. 1–15.
123. Sung-Hua, C., Chin-I, H., F., L.-C., 2008. Applying a Nonlinear Observer to solve Forward Kinematics of a Stewart Platform. En: *IEEE International Conference on Control Applications*. San Antonio, Texas, pp. 1183–1188.
124. Takashi, M., Toshinori, F., Kazutoshi, S., Kenj, K., Toshiharu, K., 2007. Development of a Digital Control System for High-performance Pneumatic Servo Valve. *Precision Engineering*, 31 (2), 156–161.
125. Tsai, L. W., 2000. *Robot Analysis. The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators*, 1st Edition. John Wiley and Sons, Inc., ISBN:0-471-32593-7.
126. Varseveld, R. v. y Bone, G., "Accurate position control of a pneumatic actuator using on/off solenoid valves", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 2, 1997.
127. Vivas, A., Poignet, P., 2006. Control Predictivo de un Robot Paralelo. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 3 (4), 46–53.
128. Wang, H., Xie, Y., 2009. Adaptive Jacobian Position/force Tracking Control of Free-flying Manipulators. *Robotics and Autonomous Systems*, 57 (2), 173–181.

129. Wang, J., Wu, J., Wang, L., You, Z., 2009. Dynamic Feed-forward Control of a Parallel Kinematic Machine. *Mechatronics*, 19 (3), 313–324.
130. Wang J., Wu J., Wang L., You Z. (2008), Dynamic feed-forward control of a parallel kinematic machine, *Mechatronics*, doi:10.1016/j.mechatronics.2008.11.004.
131. Wobbe, F., Kolbus, M., Schumacher, W., 2008. *Automation and Robotics*. InTech Education and Publishing, ISBN: 978-3-902613-41-7, Germany.
132. Won, S., Golnaraghi, H. P. F., Melek, W. W., 2009. A Fastening Tool Tracking System using an IMU and a Position Sensor with Kalman Filters and a Fuzzy Expert System. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56 (5), 1782–1792.
133. Wu, J., Wang, J., Wang, L., Shao, H., 2008. Dimensional Synthesis and Dynamic Manipulability of a Planar 2-DOF Parallel Manipulator. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 222 (3), 1061–1069.
134. Xian, B., De Queiroz, M.S., Dawson, D., Walker, I. (2004) “Task-Space Tracking Control of Robot Manipulators via Quaternion Feedback,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol.20, no. 1, pp. 160-167, February 2004.
135. Xu, Q., Li, Y., 2009. Dynamic Modeling and Robust Control of a 3-PRC Translational Parallel Kinematic Machine. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 25 (3), 630–640.
136. Yang, C., Huang, Q., Han, J., 2011. Decoupling Control for Spatial six-degree-of-freedom Electrohydraulic Parallel Robot. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 28 (1), 14–23.
137. Yeh, T.-J., Su, C. Y., Wang, W.-J., 2009. Modelling and Control of a Hydraulically Actuated 2-dof Inertial Platform. *Journal of Systems and Control Engineering*, 219 (2), 405–417.
138. Yen, P. L., Lai, C. C., 2009. Dynamic Modeling and Control of a 3-DOF Cartesian Parallel Manipulator. *Mechatronics*, 19 (3), 390–398.
139. Zabalza, I., Ros, J., 2007. *Aplicaciones Actuales de los Robots Paralelos*. En: 8th Latin American Congress of Mechanical Engineering. Cusco, Perú.
140. Zhao, Y., Gao, F., 2009. Dynamic Formulation and Performance Evaluation of the Redundant Parallel Manipulator. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 25 (4-5), 770–781.

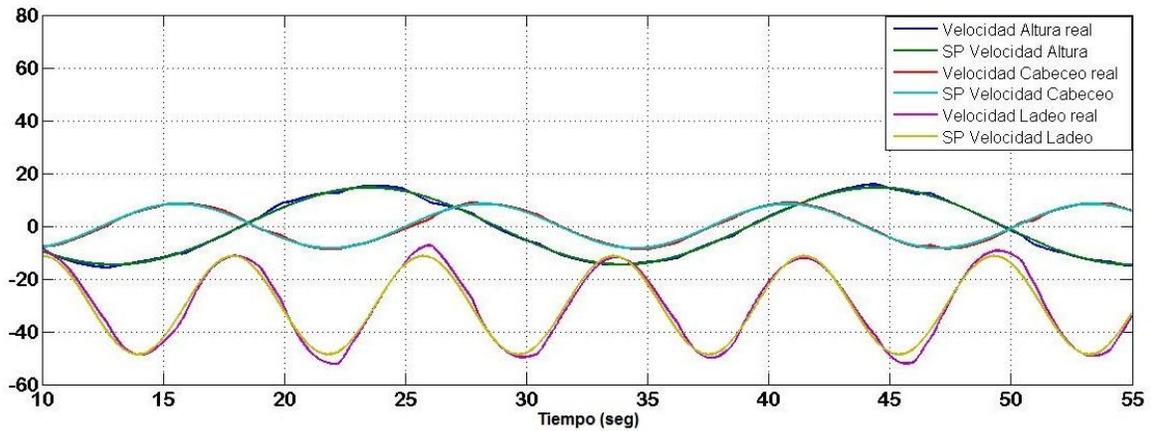
141. Zhao, D., Li, S., Zhu, Q. (2010). "A new TSMC prototype robust nonlinear task space control of a 6 DOF parallel robotic manipulator," *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 8, no. 6, pp. 1189-1197, December 2010.
142. Zhiyong, W., Ghorbel, F. H., 2006. Control of Closed Kinematic Chains using a Singularly Perturbed Dynamics Model. *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, 128 (1), 142–151.
143. Zorlu, A., Özsoy, C. y Kuzucu, A., "Experimental modeling of a pneumatic system", *IEEE Proceedings on Emerging Technologies and Factory Automation*, vol. 1, September 16-19, 2003.
144. Zubizarreta, A., Cabanes, I., Marga, M., Pinto, C., 2008. Control of Parallel Robots using Passive Sensor Data. En: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Nice, France, pp. 2398–2403.

ANEXOS

Anexo I Diagrama del esquema de Control de Trayectoria en Simulink-ADAMS



Anexo II Comportamiento de la razón de cambio de las variables cartesianas del robot de 3 GDL



**Anexo III Modelo no lineal implementado en Simulink/ADAMS**

