

# ESQUEMAS DE CONTROL EN ESPACIO DE TAREA PARA SIMULADORES DE MOVIMIENTO DE 2 Y 3 GDL

## TASK SPACE CONTROL SCHEMES FOR TWO AND THREE DEGREE OF FREEDOM MOTION SIMULATORS

Orlando Urquijo Pascual<sup>1</sup>, Eduardo Izaguirre Castellanos<sup>1</sup>, Pablo J. Prieto Entenza<sup>1</sup>

1 Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, Cuba, [orlandop@uclv.edu.cu](mailto:orlandop@uclv.edu.cu), Carretera a Camajuaní, Km 5 ½, Santa Clara, VC, CP 54830

**RESUMEN:** En este artículo se presenta un esquema de control en el espacio de tarea para simuladores neumáticos de movimiento de dos y tres grados de libertad (GDL). El esquema de control está basado en la medición de las coordenadas del robot en el espacio de tarea. Consiste en una estrategia de control de doble lazo en cascada donde el lazo interno ejecuta el control articular y en el externo el control cartesiano. Se presentan los resultados experimentales obtenidos del comportamiento deseado del sistema, aplicados en plataformas neumáticas de dos y tres GDL. El esquema presentado abre un campo de investigación en el área del control en el espacio de tarea para la solución de control de trayectoria en robots paralelos de un mayor número de grados de libertad.

**Palabras Clave:** Robot paralelo, control en el espacio de tarea, modelo cinemático inverso.

**ABSTRACT:** This article presents a task space control scheme for pneumatic driven motion simulators of two and three degrees of freedom (DOF). The proposed control scheme is based on the measure of the task space robot coordinates. It consists of cascade control strategy with two loops; the inner loop executes the joint control, whereas the outer loop is the cartesian control. The experimental results shown the desired performance of the system, applied in pneumatic driven platforms of two and three DOF. The proposed scheme opens new researches in the area of task space control for trajectory following applications of the parallel robots with more degree of freedom.

**KeyWords:** Parallel robots, task space control, inverse kinematics model.

### 1. INTRODUCCIÓN

La robótica paralela ha sido un paradigma para la ciencia en las últimas décadas [19]. En los inicios los esfuerzos de los científicos se consagraron a la solución del problema de controlar el movimiento de robots, con soluciones de control en el espacio articular [1]. Estas soluciones se basan en retroalimentar las señales brindadas por sensores acoplados a cada actuador articular. En muchos casos estas estructuras de control resultan en sistemas desacoplados, generalmente, con una

pobre respuesta ante incertidumbres dinámicas. En otra dirección, los esquemas de control basados en el espacio de tarea [9] tienen capacidad de una respuesta superior ante incertidumbres del sistema, inercia, errores de modelado, fricción, no linealidades, etc. No obstante, en este caso se necesita la estimación de las coordenadas del robot en el espacio de tarea; o la medición directa de las mismas, lo que implica el uso de sensores exteroceptivos [10]-[13].

El objetivo de este trabajo es mejorar el compor-

tamiento de plataformas industriales neumáticas de movimiento en aplicaciones de simulador de movimiento. La solución propuesta, se basa en un esquema de control cinemático en el espacio de tarea con medición directa de la pose que alcanza la plataforma móvil en el espacio cartesiano [2]. El sistema de control consta de dos lazos en cascada, en el lazo interno se ejecuta el control articular y en el lazo externo es implementado el control en el espacio de tarea. La estrategia de control parte del principio de diseñar la respuesta dinámica del lazo interno más rápida que el lazo externo, de forma tal que su efecto pueda ser despreciado [3] o aproximado a uno o dos retardos de instantes de muestreo del lazo externo [4], para el caso de una implementación digital.

En este trabajo se evalúa el comportamiento del esquema en dos robots paralelos con actuadores neumáticos, uno de 2 GDL y otro de 3 GDL utilizados como simuladores de conducción.

Para la medición de las coordenadas del robot en el espacio de tarea, del robot paralelo de 3 GDL se utilizan diversos sensores de posición: potenciómetros, encoders [15]. Mientras que para mediciones angulares se usa una Unidad de Medición Inercial (IMU) del tipo MTi [7].

En el caso del simulador de 2 GDL se da solución a la cinemática directa ya que resulta necesario conocer la pose que adquiere la plataforma móvil a partir de conocidas las variables articulares actuadas y se utilizan encoders para la medición directa de las variables articulares.

El artículo se encuentra dividido en 6 secciones, empezando por la introducción y luego se procede a exponer la estrategia de control que se propone en el trabajo, luego se da una descripción de las plataformas objeto de estudio presentando los principales datos mecánicos de los robots y la definición de las notaciones en el caso de la plataforma de 2 GDL y se obtienen los modelos cinemáticos inverso y directo del robot de dos grados de libertad y el inverso para el de tres grados. En el epígrafe cuarto se plantea el control cinemático en el espacio de tareas empezando por el diseño del regulador del lazo interno, para posteriormente proceder a mostrar los resultados de las pruebas experimentales y finalmente terminar con las conclusiones del trabajo.

## 2. CONTROL CINEMÁTICO EN EL ESPACIO DE TAREA

El problema de control es formulado como el diseño de un controlador que genere un mando  $\Delta$  que provoque un movimiento del robot de forma

tal que la posición deseada en el espacio de tarea sea alcanzada, siguiendo un índice de funcionamiento deseado. La posición deseada de las articulaciones  $q_d$  no está disponible, no obstante, dicho valor se puede obtener como resultado de la señal de mando  $\Delta$  y la solución del problema cinemático. Este se define como la relación entre las variables articulares,  $q = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T$  para una estructura de n-articulaciones; y la posición  $(x; y; z)$  y orientación  $(\theta, \phi, \psi)$  del elemento terminal, siguiendo la formulación general (2) para la cinemática directa y la (3), para la cinemática inversa [16].

$$[x, y, z, \theta, \phi, \psi]^T = X = g(q_1, q_2, \dots, q_n) \quad (1)$$

$$[q_1, q_2, \dots, q_n]^T = q = f(x, y, z, \theta, \phi, \psi) \quad (2)$$

El esquema de control es presentado en la Figura 1. El mismo consiste en dos lazos en cascada, el lazo interno resuelve el control articular del robot, mientras que en el externo se implementa el control cinemático en el espacio de tarea.

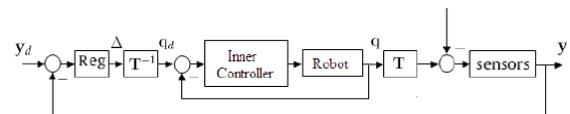


Figura.1: Esquema de control en espacio de tarea

En [4] se demuestra que en la implementación digital del sistema de control la dinámica del lazo interno se puede aproximar a uno o dos retardos de muestreo del lazo externo, teniendo como principio que la velocidad del lazo externo es menor que la del interno. Sobre esa base se puede expresar que:

$$q(k) = q_d(k-1) \quad \square k > 0 \quad (3)$$

## 3. PLATAFORMAS DE SIMULACIÓN DE DOS Y TRES GRADOS DE LIBERTAD

Las plataformas de simulación de dos y tres grados de libertad que se muestran respectivamente en las Figuras 2 y 3, son fabricadas por la empresa SIMPRO que se dedica a la producción de simuladores industriales de movimiento para disímiles aplicaciones, aunque su diseño está fundamentalmente dirigida a simulador de conducción y entretenimiento. Estas son ampliamente utilizadas para el adiestramiento de personal en diferentes aplicaciones en el país.

### 3.1 Descripción de la plataforma de dos grados de libertad.

Este simulador de conducción consta de una cabina con todos los mandos reales a los que se enfrenta un conductor en un vehículo y un monitor a través del cual se puede ver el mundo virtual por el que se mueve. La cabina pivotea sobre una columna central mediante una articulación universal (tipo cardan) y se estabiliza en un plano mediante la acción de dos cilindros neumáticos que ubicados en sus extremos perpendiculares, le imprimen al conductor las sensaciones de ladeo y cabeceo, simulando con ello las pendientes del mundo virtual en que se mueve, en la Figura 3 se muestra dicho simulador.



Figura. 2: Plataforma neumática de simulación de 2 GDL

Los datos mecánicos más importantes de la plataforma se muestran en la tabla número 1. El origen de las coordenadas cartesianas para las medidas de longitud y ubicación del centro de masa (CM) se establece en el pivote central como se muestra en la Figura 2.

Tabla I Características de la plataforma de 2 GDL

Descripción	Valor
Masa total de la cabina	500 kg
Posición del centro (x,y,z)	[0,0,700] mm
Ángulo de cabeceo	-13° a 19°
Ángulo de ladeo	13° a -19°
Distancia del origen a cada cilindro	560 mm
Elongación de los cilindros	320 mm

En este robot, cada articulación electro-neumática está formada por un cilindro FESTO DNC-100-320, gobernado por una válvula proporcional de flujo FESTO MPYE-5-3/8, cuya elongación se mide con encoders lineales.

### 3.2 Descripción de la plataforma de tres grados de libertad.

La estructura robótica de esta plataforma se muestra en la Figura 3, emplea como actuadores, cilindros neumáticos FESTO de desplazamiento lineal que convierten la energía del aire comprimido en trabajo mecánico, tecnología que se ha venido aplicando en los robots paralelos que requieren de un posicionamiento continuo.

La plataforma de movimiento es capaz de simular escenarios virtuales que son visualizados en un monitor ubicado en el interior de una cabina que con capacidad para dos personas, descansa debidamente soportada sobre la plataforma móvil.



Figura. 3: Plataforma neumática de simulación de 3 GDL

El robot está diseñado para soportar una carga de 2.18 su peso total, por lo que posee una excelente relación carga útil-peso, elemento típico de los robots de estructura paralela.

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).

### 3.3 Modelado cinemático de la estructura paralela de 2 GDL

Las relaciones cinemáticas son de gran interés para el estudio de muchas importantes propiedades de las estructuras robóticas como la singularidad, dexteridad, espacio de trabajo, etc, así como también resultan de gran utilidad en la con-

cepción de esquemas de control de posición y seguimiento de trayectorias [17], [16], [18].

Para el caso particular de la plataforma de 2 GDL, tenemos que la base fija está compuesta por el triángulo formado por los puntos  $A_1OA_2$  dependiendo solamente de las longitudes  $a_1$  y  $a_2$ .

La plataforma móvil está conformada por el plano que forman los puntos  $B_1PB_2$ , siendo única su geometría y solamente dependiente y definida por la longitud de sus bordes  $b_1$  y  $b_2$  como se muestra en la Figura 4.

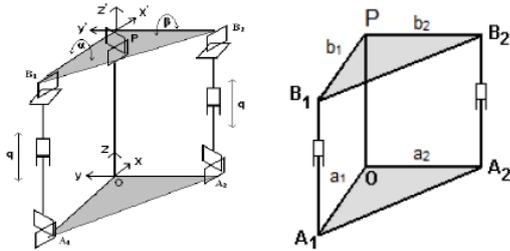


Figura. 4 Notación de la plataforma de 2 GDL

La definición de los orígenes de coordenadas cartesianas en los sistemas de referencia fijo y móvil se realiza de acuerdo a [6]. En tal sentido se considera ubicar el sistema de referencia móvil coincidente con el centro del triángulo que conforma la plataforma superior (elemento terminal) la cual es la responsable de soportar la cabina de conducción. El sistema de referencia fijo se coloca en el centro de la base fija ubicada en la parte inferior de la base metálica que soporta toda la estructura de la plataforma, la cual va anclada al suelo (ver Figura 4).

La orientación en el espacio de la plataforma móvil estará determinada por los ángulos de rotación  $\alpha$  y  $\beta$ . El ángulo  $\alpha$  es el ángulo de rotación alrededor del eje  $x'$  del sistema  $(x' y' z')$  de coordenadas móviles, el cual da la sensación de cabeceo, mientras que  $\beta$  es el de rotación alrededor del eje  $y'$ , brindando la sensación de alabeo.

Las relaciones correspondientes a la cinemática inversa permiten calcular las coordenadas articulares a partir de conocer las variables espaciales del robot. En este caso, el modelo cinemático inverso adquiere la forma:

$$q_1 = f_1(\alpha, \beta) \quad (4)$$

$$q_2 = f_2(\alpha, \beta) \quad (5)$$

Para obtener las expresiones cinemáticas anteriores se procede a ubicar convenientemente el sistema de coordenadas fijo  $O_{xyz}$  y móvil  $P_{x'y'z'}$ , como

se muestra en la Figura 4.

El cálculo del modelo cinemático directo consiste en calcular la posición y orientación de la base móvil a partir del conocimiento de las variables actuadas articulares del robot. Resulta ser más complejo en este tipo de arquitecturas ya que permite obtener analíticamente el vector de coordenadas de la base móvil y la matriz de rotación compatibles con las ecuaciones planteadas para cada cadena cinemática activa.

Así, si se han escogido coordenadas cartesianas y ángulos de Euler para representar la posición del elemento terminal del robot de 2 GDL, la solución al problema cinemático directo vendrá dada por las relaciones:

$$\alpha = f_3(q_1, q_2) \quad (6)$$

$$\beta = f_4(q_1, q_2) \quad (7)$$

En la plataforma de conducción SIMPRO la solución de la cinemática tanto directa como inversa depende de la longitud del brazo articulado de cada cadena cinemática cerrada.

En el caso de la cinemática directa la longitud del brazo articulado es la variable conocida y las incógnitas son el ángulo  $\alpha$  (rotación en el eje  $x'$ ) y el ángulo  $\beta$  (rotación en el eje  $y'$ ) que definen la orientación del elemento terminal, Figura 5.

En el caso de la cinemática inversa, la incógnita es el valor de la longitud del brazo actuado, quedando en función de los ángulos en que se quiere orientar el elemento terminal.

Tomando para el análisis una rotación en el eje  $y'$  como se muestra en la Figura 4 el segmento  $PB_2$  describe una circunferencia de centro  $P$ .

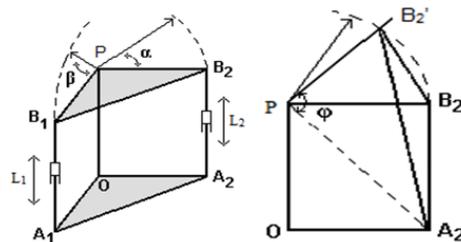


Figura. 5: Representación de alabeo y cabeceo y geometría de las rotaciones de la plataforma de 2 GDL

Considerando el triángulo formado por los vértices  $A_2PB_2$ , donde  $PB_2' = PB_2$  por ser brazo de la plataforma que no va varía en longitud, entonces se plantea la fórmula de los cosenos referida al

ángulo  $\varphi$ , la cual queda:

$$L_2 = \overline{A_2B'_2}^2 = \overline{PA_2}^2 + \overline{PB'_2}^2 - 2\cos\varphi\overline{PA_2PB'_2} \quad (8)$$

La ecuación (8) representa la expresión de la cinemática inversa ya que permite conocer la longitud de la articulación  $A_2B'_2$  en función de la orientación del elemento terminal, en este caso, el ángulo de ladeo o cabeceo.

Del lado derecho de la igualdad todos los términos pueden ser conocidos con relativa facilidad como se muestra:

$$\overline{PB'_2}^2 = b_2 \quad (9)$$

$$\overline{PA_2} = \sqrt{\overline{OP}^2 + \overline{OA_2}^2} \quad (10)$$

El ángulo  $\varphi$  puede ser obtenido en la ecuación:

$$\varphi = \varphi_0 + \alpha \quad (11)$$

Donde  $\varphi_0$  es el ángulo inicial comprendido entre  $PA_2$  y  $PB_2$ , y se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$\varphi_0 = \tan^{-1}\left(\frac{\overline{OP}}{\overline{OA_2}}\right) \quad (12)$$

Para obtener la cinemática directa, se puede despejar de la ecuación (8) el término  $\varphi$  de la siguiente forma:

$$\varphi = \cos^{-1}\left(\frac{\overline{PA_2}^2 + \overline{PB'_2}^2 - \overline{A_2B'_2}^2}{2\overline{PA_2PB'_2}}\right) \quad (13)$$

Luego  $\alpha$  puede ser obtenida mediante la ecuación:

$$\varphi = \varphi_0 + \alpha \quad (14)$$

El análisis correspondiente al movimiento de ladeo se realiza de la misma forma, sólo que el ángulo  $\alpha$  se cambia por  $\beta$ ,  $\varphi$  por  $\theta$  y el punto  $B'_2$  se sustituye por  $B'_1$  como se muestra en las siguientes ecuaciones:

$$L_1 = \overline{A_1B'_1}^2 = \overline{PA_1}^2 + \overline{PB'_1}^2 - 2\cos\theta\overline{PA_1PB'_1} \quad (15)$$

$$\overline{PB'_1}^2 = b_1 \quad (16)$$

$$\overline{PA_1} = \sqrt{\overline{OP}^2 + \overline{OA_1}^2} \quad (17)$$

$$\theta = \theta_0 + \beta \quad (18)$$

Dónde:

$\theta_0$ : Ángulo inicial formado por  $PA_1$  y  $PB_1$ .

$$\theta_0 = \tan^{-1}\left(\frac{\overline{OP}}{\overline{OA_1}}\right) \quad (19)$$

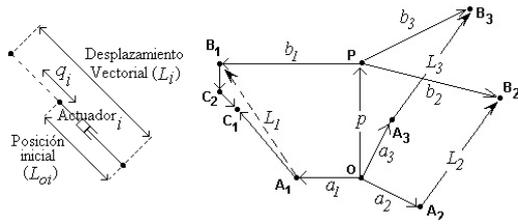
$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{\overline{PA_1}^2 + \overline{PB'_1}^2 - \overline{A_1B'_1}^2}{2\overline{PA_1PB'_1}}\right) \quad (20)$$

### 3.4 Modelado cinemático de la plataforma de 3GDL

Para desarrollar el 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 [11].

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 6.

En tal sentido se obtienen las expresiones vectoriales cerradas para las extremidades actuadas definidas por las ecuaciones de la (21) a la (23). Conociendo los desplazamientos iniciales de las articulaciones  $L_{oi}$  y el vector  $L_i = \|A_iB_i\|_2$  el cual corresponde a la solución de la cinemática inversa, las variables articulares pueden ser encontradas evaluando  $q_i = \pm L_i - L_{oi}$ . 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.



**Figura. 6: Elongación articular y vectores cerrados asociados a cada cadena cinemática activa**

$$\overrightarrow{A_1B_1} = \overrightarrow{OP} + {}^A R_B \overrightarrow{PB_1} - \overrightarrow{OA_1} \quad (21)$$

$$\overrightarrow{A_2B_2} = \overrightarrow{OP} + {}^A R_B \overrightarrow{PB_2} - \overrightarrow{OA_2} \quad (22)$$

$$\overrightarrow{A_3B_3} = \overrightarrow{OP} + {}^A R_B \overrightarrow{PB_3} - \overrightarrow{OA_3} \quad (23)$$

Un estudio más completo de la cinemática inversa de la plataforma de tres grados de libertad y la validación de las ecuaciones cinemáticas puede ser consultado en [12] incluyendo análisis de singularidades.

De acuerdo con la expresión (2) es posible encontrar la relación  $A_iB_i$  para encontrar la cinemática inversa del robot en donde  $i = 1 \dots 3$ .

$$\overrightarrow{A_iB_i}|_{R_A} = \overrightarrow{OP}|_{R_A} + {}^A R_B \overrightarrow{PB_i}|_{R_B} - \overrightarrow{OA_i}|_{R_A} \quad (24)$$

A partir de la formulación vectorial (24) y considerando la matriz de rotación y utilizando la convención "Roll-Pitch-Yaw" se pueden encontrar las siguientes ecuaciones del desplazamiento de las articulaciones:

$$q_1 = \pm \sqrt{\frac{(2076 - \lambda_0 - 940c(\varphi))^2 + (740 + h + 940s(\varphi))^2}{-L_{01}}} \quad (25)$$

$$q_2 = \pm \sqrt{\frac{(1397 - \lambda_0 + 720c(\varphi) + \lambda_1)^2 + \lambda_2^2 + (\lambda_3 - \lambda_4)^2}{-L_{02}}} \quad (26)$$

$$q_3 = \pm \sqrt{\frac{(1397 - \lambda_0 + 720c - \lambda_1)^2 + \lambda_2^2 + (-\lambda_3 - \lambda_4)^2}{-L_{01}}} \quad (27)$$

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

Donde:

$$\lambda_0 = \sqrt{1672^2 - 1720h - h^2} \quad (28)$$

$$\lambda_1 = 500s(\theta)s(\varphi); \lambda_2 = 500c(\theta) - 500 \quad (29)$$

$$\lambda_3 = 500s(\theta)c(\varphi); \lambda_4 = 720s(\theta) + 945 + h \quad (30)$$

Las señales de control son ejecutadas en el espacio articular mientras que los movimientos son especificados en el espacio de tarea, esta es la razón por la cual es necesaria la utilización de la cinemática inversa en el esquema de control para poder obtener las variables articulares a partir de la posición deseada del efector final.

#### 4. IMPLEMENTACIÓN DEL ESQUEMA DE CONTROL EN LOS ROBOTS PARALELOS DE 2 Y 3 GDL.

La implementación del esquema de control de la Figura 1 requiere encontrar primero la solución para los lazos articulares, que al estar formado por sistemas neumáticos, altamente no lineales, demanda de una solución compleja. Rubio demuestra que el modelo  $G_{yu}(s)$  y el regulador  $S(s)/R(s)$  para cada actuador neumático tienen respectivamente la forma [5]:

$$G_{yu}(s) = \frac{b}{s(s^2 + a_1s + a_0)} \quad (31)$$

$$\frac{S(s)}{R(s)} = \frac{k_p(s + k_i)(s^2 + a_1s + a_0)}{s(s + \omega_a)^2} \quad (32)$$

El regulador del lazo interno se diseña por el método de asignación de polos, donde los parámetros  $k_p$ ,  $k_i$  y  $\omega_a$ , se escogen para obtener un par de polos dominantes de lazo cerrado con  $\omega_n = 10 \text{ rad/s}$  y  $\varphi = 0.7$ .

A través del método de identificación experimental se obtienen los modelos de los sistemas electro neumáticos de ambos robots y sus respectivos controladores [14]. Para el caso de la plataforma de 2GDL el modelo y el controlador resultan respectivamente:

$$G(s) = \frac{4928}{s(s^2 + 1.186s + 88.22)} \quad (33)$$

$$\frac{S(s)}{R(s)} = \frac{0.00442(s + 1.8182)(s^2 + 2087s + 4276000)}{s(s + 133.3s + 8896)} \quad (34)$$

En el caso del robot paralelo de 3GDL:

$$G(s) = \frac{246}{s(s^2 + 7.7s + 253)} \quad (35)$$

$$G(s) = \frac{2008}{s(s^2 + 7.3s + 1349)} \quad (36)$$

En donde el primero corresponde al modelo del actuador de la parte delantera del simulador y el otro al par de pistones en la parte posterior, los cuales se supone que la dinámica es la misma.

Los controladores en este caso son:

$$\frac{S(s)}{q_d(s)} = \frac{265(s+3)(s^2+8s+253)}{s(s^2+147s+6267)} \quad (37)$$

$$\frac{S(s)}{q_d(s)} = \frac{265(s+3)(s^2+8s+1349)}{s(s^2+147s+6267)} \quad (38)$$

En el lazo externo se lleva a cabo el control de posición en el espacio de tarea y para garantizar la estabilidad se propone un controlador integral.

El esquema de control será implementado digitalmente, [8] sugiere que la razón de muestreo de un sistema de control digital debe estar entre 10 y 30 veces el ancho de banda deseada de lazo cerrado. Para el caso de un simulador de conducción, el ancho de banda de lazo cerrado se encuentra alrededor de 0.1 Hz [2]. Por lo que una razón de muestreo para el lazo externo entre 100 y 30 ms sería suficiente para satisfacer las necesidades del sistema. En este caso se selecciona para el diseño del regulador de ambos sistemas un tiempo de muestreo de 60 ms lo cual permite el cumplimiento de la condición (3).

De esa forma se implementa un sistema de control para la plataforma de 3 GDL con ganancia del regulador  $K_I$  y de los sensores  $K_j$  en el espacio de tarea, con la estructura:

$$\xi = \frac{0.06K_I K}{(z^2 - z)} \xi \quad (39)$$

Donde:

$$K_I = \begin{bmatrix} K_{I_1} & 0 & 0 \\ 0 & K_{I_2} & 0 \\ 0 & 0 & K_{I_3} \end{bmatrix} \quad (40)$$

$$K_j = \begin{bmatrix} K_\theta & 0 & 0 \\ 0 & K_\varphi & 0 \\ 0 & 0 & K_h \end{bmatrix} \quad (41)$$

Luego se implementa el esquema de control

simplificado mostrado en la Figura 7, el cual es validado mediante simulación Matlab/Simulink-Adams [12].

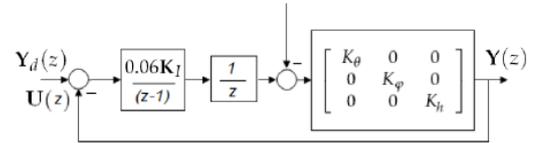


Figura. 7: Esquema de control para plataforma de 3 GDL

El esquema produce la respuesta, producto de una experimentación real, de las Figuras 11, 12 y 13. La entrada es una señal de onda cuadrada de posición a seguir para todas las coordenadas espaciales del robot en el espacio de tarea, con  $K_\theta K_{I1} = K_\varphi K_{I2} = K_h K_{I3} = 3$ .

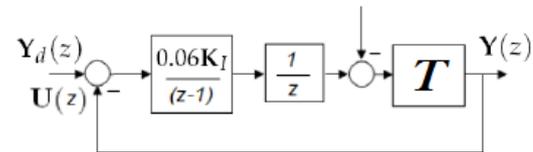


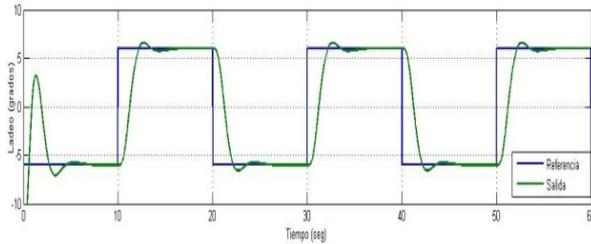
Figura. 8 Esquema de control para plataforma de 3 GDL

La implementación en el caso del robot paralelo de 2GDL se muestra en la Figura 8. El controlador se selecciona para una ganancia de  $K_I = 0.1$  ya que los valores de respuesta transitoria ante entrada paso son satisfactorios para esta ganancia, obteniéndose una respuesta sobreamortiguada. Las coordenadas en el espacio de tarea son obtenidas a través del cálculo de la cinemática directa.

Para llevar a cabo la simulación del sistema de control, se procede a programar en el Matlab-Simulink el bloque con las ecuaciones de la cinemática inversa y directa, las funciones transferenciales del sistema electroneumático y los controladores. El modelo utilizado para simulación es el obtenido a través de identificación experimental con la planta real.

En la simulación se somete el sistema a una entrada de señal de onda cuadrada de amplitud  $\pm 6^\circ$  en ambas referencias de ladeo y cabeceo. Estas variaciones en el espacio cartesiano luego de pasar por el bloque de cinemática inversa, producen elongaciones en los cilindros que constituyen los valores de referencia articulares ingresados al lazo de control de posición articular. Luego, el modelo ofrece la señal de posición articular del sistema la cual ingresa al bloque de cinemática directa ofreciendo los valores en el espacio de tarea que son realimentados para controlar las variables cartesianas. En la Figura 9 se muestra la simulación del comportamiento del sistema en

el lado.



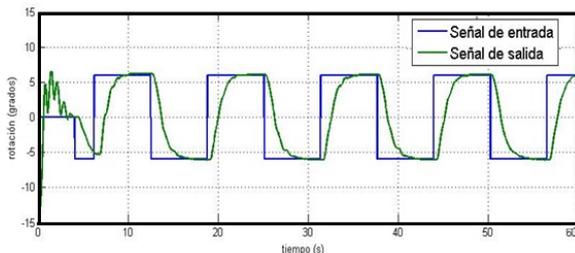
**Figura. 9 Simulación del lado para plataforma de 2 GDL**

## 5. PRUEBAS EXPERIMENTALES

Luego, con el propósito de evaluar el desempeño del sistema, y el comportamiento de las variables cartesianas de ambos sistemas robóticos, se realizan las pruebas experimentales. Para ello se emplea un ordenador Pentium D a 3 GHz, con tarjeta PCI Humusoft MF624 de 16 E/S analógicas para la adquisición de las mediciones articulares (sensada por encoders) y enviar las señales de mando hacia las válvulas proporcionales de flujo MPYE-5-3/8. La PC también se emplea para generar las curvas deseadas de altura, lado y cabeceo en el caso de la plataforma de tres grados de libertad y de lado y cabeceo solamente en la de dos grados.

Se utiliza el ambiente de tiempo real del Matlab (Real-Time Windows Target) para ejecutar desde el Simulink las acciones de control en tiempo real del sistema, empleándose un período de muestreo de 1 ms.

Desde el punto de vista práctico, para evitar daños en el robot por excesiva amplitud en la señal de mando, se pasa por un prefiltro de 2do orden la señal de entrada de referencia de posición, garantizando con ello cambios suaves a la entrada del sistema.

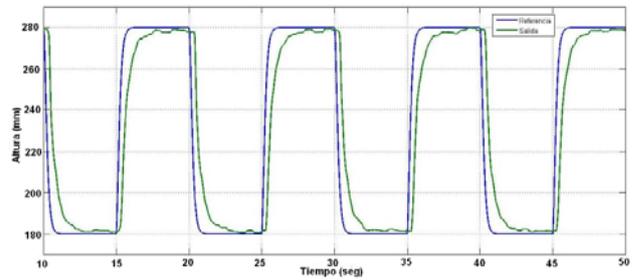


**Figura. 10: Respuesta del robot de 2 GDL en lado**

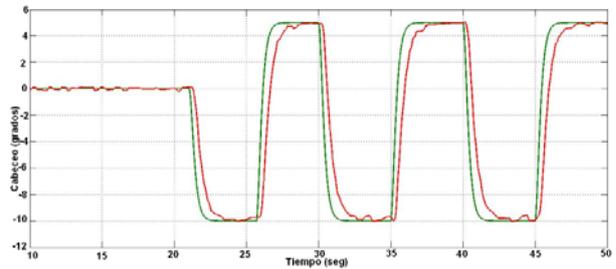
En la Figura 10 se observan los resultados de la implementación del control de posición en el robot paralelo de dos grados de libertad ante señal cuadrada para una amplitud de  $\pm 6^\circ$  a una frecuencia de 0.5 rad/s en la referencia del lado. Se

puede observar como el control corrige la posición obteniéndose una respuesta sobre-amortiguada tal y como se obtuvo en las simulaciones.

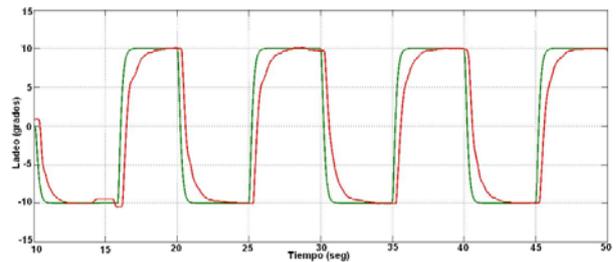
Para el caso de la plataforma de tres grados de libertad se realizan similares experimentos aplicando como señales de referencia espaciales para el robot, señales de onda cuadrada de 100 mm de amplitud. La Figura 11 indica el comportamiento de la altura, mientras que las Figuras 12 y 13 muestran respectivamente las coordenadas de cabeceo y lado. En todos los casos se puede notar el buen desempeño del esquema de control propuesto para lograr un el control en las variables espaciales de la estructura robótica, así como la efectividad de los sensores en la medición.



**Figura. 11: Señal de altura de plataforma de 3 GDL**



**Figura. 12: Señal de cabeceo de plataforma de 3 GDL**



**Figura. 13: Señal de lado de plataforma de 3 GDL**

## 6. CONCLUSIONES

Se demuestra la efectividad del esquema de control propuesto y de los modelos cinemáticos tanto inverso como directo para los casos de estudio de robots paralelos de dos y tres grados de libertad. Se observa una correspondencia entre las curvas

obtenidas a través de simulación y los resultados de las pruebas experimentales.

El diseño del controlador interno satisface los requerimientos de exactitud en el posicionamiento de las variables articulares del robot, mientras que el lazo externo minimiza los errores de las variables cartesianas. Como resultado, ésta estrategia provee al sistema de un mejor control ante interacciones dinámicas, errores de modelado e incertidumbres del sistema.

La arquitectura de doble lazo aporta flexibilidad para simular e implementar diferentes estrategias de control modificando el controlador externo y dejando intacto el control articular.

## 7. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el apoyo dado por el Centro de Investigaciones y Desarrollo de Simuladores "CID-SIM" gracias a apoyo brindado por sus especialistas, directivos, y personal técnico en general, así como a su disposición de facilitar los medios técnicos y de cómputo necesarios para el desarrollo de las investigaciones y experimentos que en este trabajo se exponen.

## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **F. Wobbe, M. Kolbus, and W. Schumacher**, "Enhanced Motion Control Concepts on Parallel Robots", in Automation and Robotics, InTech Education and Publishing (Ed.), Institute of Control Engineering, Germany, 2008, pp. 17-40.

2. **Hernández, L., Izaguirre, E., Rubio, E. and Urquijo, O.** Kinematic task space control scheme for 3DOF pneumatic parallel robot. IN-TECH, Ganesh Naik (Ed.), Intelligent Mechatronics. 2011, Vienna, Austria.

3. **Hernández, L., Sahli, H. and González, R.** Simple Solution for Visual Servoing of Camera-in-hand Robots in the 3D Cartesian Space. Proceedings in the Tenth International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV 2008). Pages 2020-2025. Hanoi, Viet Nam, Dec 2008.

4. **Hernández, L., Sahli, H. and González, R.,** Vision-based 2D and 3D Control of Robot Manipulators. Editor. Jimenez, A. Robot Manipulators Trends and Development. IN-TECH. Pages 441-462. 2010. Vienna, Austria.

5. **Rubio, Ernesto.** Modelación, identificación y control de actuadores electro-neumáticos para aplicaciones industriales. PhDthesis, Universidad

Central "Marta Abreu" de Las Villas. 2008.

6. **J. P. Merlet**, "Jacobian, Manipulability, Condition Number, and Accuracy of Parallel Robots," Journal of Mechanical Design vol. 128, (1), pp. 199-207, 2006.

7. **Izaguirre, E., Hernández, L., Rubio, E. and Urquijo, O.** Cartesian Control of a 3-DOF Electro-pneumatic Actuated Motion Platform with Exteroceptive Pose Measurement International Journal of Advanced Robotic Systems, ISSN:1729-8806, vol. 8, No.4, pp. 120-128, 2011.

8. **Astrom K. J. and Wittenmark, B.** (1990). Computer controlled systems: theory and design, Englewood Cliffs (NJ).

9. **J. Wang**, et al, "Dynamic Feed-forward Control of a Parallel Kinematic Machine", Mechatronics, vol. 19, no. 4, pp. 313-324, April 2009.

10. **M. Callegari, M. C. Palpacelli, and M. Principi**, "Dynamics Modeling and Control of the 3-RCC Translational Platform", Mechatronics, vol. 16, no.10, pp. 589-605, 2006.

11. **L. Rolland**, "Synthesis of the Forward Kinematics Problem Algebraic Modeling for the General Parallel Manipulator Displacement-based Equations," Advanced Robotics, vol. 21, (9), pp. 1071-1092, 2007.

12. **E. Izaguirre, L. Hernandez, E. Rubio, and P. J. Prieto**, "Decoupled Control of 3-DOF Pneumatic Platform used as Motion Simulator", Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, vol. 8, no.4, pp.1-12, 2011.

13. **F. Paccot, N. Andreff, and P. Martinet**, "A Review on the Dynamic Control of Parallel Kinematics Machines: Theory and Experiments", International Journal of Robotics Research, vol. 28, no. 3, pp.395-416, 2009.

14. **E. Rubio, L. Hernandez, R. Aracil, R. Saltaren, and R. Moreno**, "Modeling, Identification and Control of Linear Electro-pneumatic Actuators. Application in two degree of freedom platform", Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, vol. 4, no. 4, pp. 58-70, 2007.

15. **J. Gao, P. Webb, and N. Gindy**, "Research on an Inertial Positioning System for a Parallel Kinematic Machine", Mechatronics, vol. 15, no. 1, pp. 1-22, Feb.2005

**16. D. Chablat and S. Staicu**, "Kinematics of a 3-PRP Planar Parallel Robot," U.P.B. Sci. Bull., Series D, vol. 71, (2), pp. 3-15, 2009.

**17. D. Chablat, P. Wenger, F. Majou, and J. P. Merlet**, "An Interval Analysis Based Study for the Design and the Comparison of 3 d.o.f Parallel Kinematic Machines," The International Journal of Robotics Research, vol. 23, (6), pp. 615-624, 2004.

**18. E. Izaguirre, M. Mellado, L. Hernández, Á. Valera, and J. Guerra**, "Modeling and Simulation of Parallel Robot of Three Degree of Freedom with Virtual Robot Simulator," in 13th International Convention and Fair, SIA-2009, International Convention Center, Havana, Cuba, 2009.

**19. J. Lenarcic and B. Roth**, Advances in Robot Kinematics. Mechanisms and Motion. 1st ed. Netherlands: Springer, 2006.

## **9. SÍNTESIS CURRICULAR DEL AUTOR PRINCIPAL.**

Graduado de Ingeniería Automática desde el 2009 en la Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas. Su campo de investigación está concentrado especialmente en la robótica paralela. Su investigación se ha enfocado en el control en espacio de tareas y de trayectoria de estructuras paralelas de dos y tres y grados de libertad utilizados como simuladores de conducción.