

# ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE UN ROBOT PARALELO TREPADOR PARA LABORES DE SUPERVISION

Rafael Aracil S.\*

Roque Saltaren

Maria A. Scarano R.

Raúl Bermejo S.

Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales.  
Departamento de Automática, Electrónica e Informática Industrial (DISAM),  
José Gutiérrez Abascal 2. 28006. Madrid, Spain  
\*email: aracil@etsii.upm.es

## RESUMEN

Este trabajo propone el uso de una plataforma tipo Gough-Stewart (G-S) como robot trepador para labores de supervisión. La idea de utilizar esta plataforma como un tipo de Robot trepador es la solución al problema de llevar a cabo tareas que impliquen un alto riesgo para trabajadores que tienen que trepar a través de altas y a veces inseguras estructuras. Algunas adaptaciones de tipo mecánico se han llevado a cabo con el fin de convertir la estructura de G-S, en un autónomo y teleoperado robot trepador, capaz de moverse autónomamente a través de estructuras (postes, estructuras de acero de puentes, troncos de palmeras, tuberías, etc.) o dentro de conductos de fluidos (tuberías de transporte). Con el fin de mostrar las capacidades de utilizar este tipo de estructura G-S, como robot trepador se propone un diseño mecánico capaz de moverse a través de estructuras. Tomando en cuenta el diseño y la funcionalidad que se desea, se presentan los modelos de la cinemática directa e inversa (en coordenadas reducidas 49 en lugar de 91) y las simulaciones dinámicas para este tipo de robot. Finalmente muchos de los experimentos realizados muestran las capacidades de este robot para trepar a través de las estructuras. El robot fue desarrollado por completo en la Universidad Politécnica de Madrid, España. Los modelos fueron validados a través de los paquetes de cálculo y simulación Matlab® y Adams 11.0®.

## 1 Introducción

Los manipuladores paralelos son estructuras robóticas que tradicionalmente difieren de lo que se considera un robot manipulador en su estructura cinemática, los manipuladores paralelos consisten en múltiples cadenas cinemáticas cerradas, mientras que los robots seriales son cadenas cinemáticas abiertas. Como regla general, los robots paralelos constan de una plataforma móvil conectada a través de enlaces a una plataforma base fija por juntas (universales y esféricas). Las plataformas de tipo paralelo presentan múltiples ventajas que hacen de ellas especialmente útiles para ser utilizadas como robots trepadores, a diferencia de otros tipos de robots trepadores con patas. La disponibilidad de un gran número de grados de libertad redundantes para los robots trepadores con patas, no necesariamente incrementa la habilidad de la máquina para realizar labores en complicados espacios de trabajo [20, 6, 8]. Los

robots trepadores utilizan sus patas para mantener y mover el cuerpo del robot [12]. Los mecanismos con patas tienen una configuración secuencial que origina una limitación en el movimiento y un gran torque en los actuadores localizado en la base de las patas del robot. Una arquitectura serial en las patas, da lugar a una limitación en la capacidad de carga. Esto es una característica típica de los mecanismos seriales articulados influenciados por la fuerza y el efecto de torque presente en las juntas [25]. Según el procedimiento, es bien conocido el efecto de la relación fuerza/potencia es alta en los robots trepadores; mientras que la capacidad de carga y la velocidad de los mecanismos seriales es limitada. En contraste con las limitaciones de los robots con patas trepadores, el uso de la plataforma G-S como robot trepador [16], soluciona muchos de estas limitaciones e introduce una nueva línea de aplicaciones para este tipo de mecanismos. En el orden de enfatizar el excelente funcionamiento de la G-S como robot paralelo trepado, es pertinente el recordar que este tipo de robot paralelo está basado en un concepto mecánico muy simple el cual consiste en dos anillos (plataformas) unidas a través de seis actuadores lineales a través de juntas universales, prismáticas y esféricas (este tipo de estructura también es llamada 6-UPS (Universal-Prismatic-Spherical: por sus siglas en inglés)[15]. Estas características le permiten obtener a esta estructura mecánica un bajo peso y alta resistencia, con la cual es capaz de alcanzar altas velocidades y de desarrollar grandes fuerzas lo que le confiere grandes ventajas [14,26]: a través un bajo costo de producción y mantenimiento [10]. La cinemática directa de la plataforma de G-S ha sido previamente estudiada y analizada por muchos autores [1, 15, 18,27]. En la sección II del presente trabajo, tipos de robots paralelos capaces de trepar dentro o fuera de estructuras tubulares es el propuesto. Con el fin de mostrar las posibilidades de utilizar la plataforma de G-S como robot trepador, se han estudiado las configuraciones que este robot trepador puede adoptar en su movimiento a lo largo de estructuras, sean internas o externas. Frecuentemente, durante el proceso de trepado, el robot paralelo puede adoptar algunas configuraciones muy cercanas a las singulares. Por esta razón es necesario, realizar un análisis cinemático y dinámico de estas especiales y muy críticas configuraciones, para probar que las fuerzas generadas en los actuadores lineales son tolerables. En la sección III, se proporcionan las ecuaciones cinemáticas para el robot paralelo de 6 GDL. El complejo problema

cinemático directo y la dinámica [18, 13] es numéricamente resuelto en coordenadas reducidas a través de la dinámica multicuerpo, basado en las restricciones de los multiplicadores de Lagrange, y la aplicación del principio de trabajo virtual. [10, 14], las simulaciones fueron realizadas en MatLab® [22, 23, 24]. En la sección IV, y basados en los resultados dinámicos (teóricos) obtenidos a través de las simulaciones realizadas con Adams 11.0®, son desarrollados para un prototipo de robot capaz de trepar por las estructuras.

En la sección V: muchas arquitecturas mecánicas para el propósito de trepar en diferentes superficies son discutidas (inspección en el sector de la construcción, por ejemplo). Finalmente, la Sección VI presenta las conclusiones y los trabajos futuros.

## 2 Diseño Mecánico

### 2.1 Geometría del robot paralelo trepador

La morfología básica propuesta para el robot paralelo trepado basado en la plataforma de G-S es mostrado en las Fig. 1a y 1b. La plataforma G-S esta conformada por dos anillos unidos a través de juntas a seis actuadores lineales conformando una cadena cinemática del tipo UPS (Universal-Prismatic- Spherical) [1]. El sistema completo esta basado en una serie de anillos y garras; estas garras servirán de agarre al efector final, mientras el anillo base avanza libremente, soltándose de la estructura y posteriormente volviéndose a sujetar según le indique el sistema de control. La Fig. 3, muestra el robot trepador en la labor de trepar, fuera de una tubería. En este caso la plataforma Fig. 2a es modificada añadiéndole un par de garras, cada una en los extremos de los anillos del robot. El anillo exterior puede rotar, incrementado el espacio de trabajo del robot. Para el presente trabajo, la cinemática y la dinámica es discutida para la labor de trepar. La Fig. 3 muestra el prototipo construido en esta Universidad.

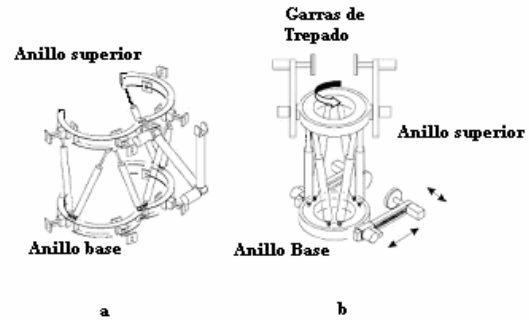
### 2.2 Configuraciones Críticas

Con el fin de mostrar la viabilidad de la plataforma de G-S, como robot trepador es necesario estudiar el comportamiento de esta plataforma en algunas configuraciones críticas para moverse a lo largo de diferentes estructuras sean tubulares o cuadradas. La Fig. 2(a) muestra al robot paralelo trepando a través de estructuras tubulares, el cual se muestra con sus anillos (que se pueden abrir para conectarse a la estructura) y garras para trabajos.

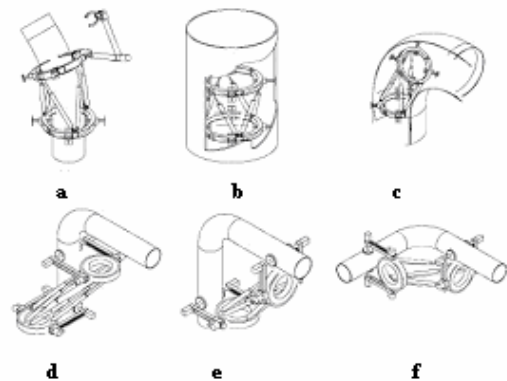
Este tipo de robots esta limitado a tareas en estructuras tubulares de poca curvatura, ya que los actuadores lineales podrían colisionar entre sí o con la estructura de trepado. También se han evaluado configuraciones críticas cuando el robot paralelo se mueve a través de estructuras en generales tales como vigas de edificaciones. En Fig. 2(d) y 2(f) se muestra al robot evadiendo obstáculos. En cada caso, el robot es capaz de trepar con autonomía basado en información sensorial (el robot trepador de estructuras tubulares).

En algunas aplicaciones, el sistema de control de movimiento consiste en un algoritmo

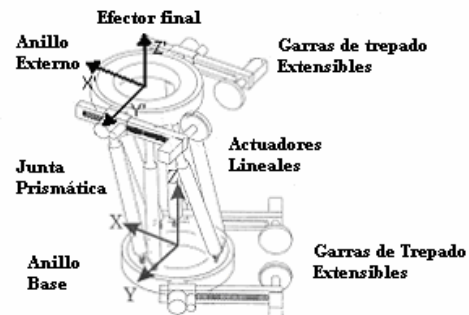
numérico de planificación de trayectorias el cual está basado en la solución cinemática directa e inversa.



**Figura 1.** Concepto funcional: a) Diseño mecánico del robot para estructuras tubulares; b) Diseño mecánico del robot para estructuras con los complementos de sujeción.



**Figura 2.** Robot paralelo para tuberías: a) Robot para trabajar en cables y tuberías exteriores; b) y c) Robot para trabajar en cables y tuberías interiores; d),e),f) Algunas configuraciones críticas para el robot



**Figura 3.** Robot paralelo trepador para labores de supervisión

## 3 Modelado Cinemático

En esta sección se proporciona el análisis cinemático del RPT. Primero, el problema cinemático inverso el cual es fácil de resolver para cadenas cinemáticas cerradas, y luego; el problema cinemático directo, el cual se presenta mas complejo resolver [24, 4, 5]. Para el robot paralelo para supervisión, la cinemática está propuesta en coordenadas reducidas, en lugar de las 91 coordenadas generalizadas usualmente necesarias. Fig.4a, y que resultan en un trabajo verdaderamente lento y laborioso, se propone un modelo equivalente planteado en 49 coordenadas generalizadas. Fig.4b.

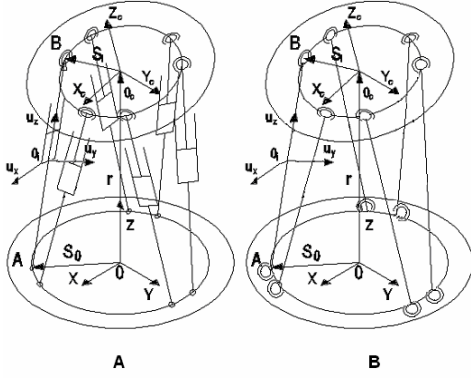


Figura 4. Referencia para el sistema de coordenadas

Cuerpos	
7	Nb=7x7=49
Restricciones	
Esféricasl (efector final - )	6x3=18
Spherical (piston-base)	6x3=18
Euler parameters normalization constraint	7x1=7
	Nh=43
<b>DOF= 49-43= 6</b>	

Tabla I. Modelo en coordenadas reducidas

### 3.1 Modelo Cinemático Inverso

La solución cinemática inversa del RPT, es calculada utilizando la posición y orientación del efector final, impuesto por la planificación de trayectoria. El modelo geométrico inverso del robot 6-UPS da como resultado el valor de las coordenadas de las juntas para la cadena cinemática, para una configuración en particular del efector final. La solución puede ser obtenida a través del vector de coordenadas generalizadas:

$$r_{ABn} = r_1 + A_1 S_1^{Bi} - S_0^{Ai} \quad \text{ec. (1)}$$

Donde  $S_0^{Ai}$  y  $S_1^{Bi}$  es el vector de posición que localiza  $A_i$ ,  $B_i$ , las cuales corresponden a la posición de las juntas esféricas de la cadena cinemática  $i$ , con respecto al sistema de referencia base y al sistema de referencia del efector final,  $r_i$  y  $A_i$  es la posición y la matriz de rotación del efector final.

El vector  $r_{ABi}$  representa las variables de las juntas calculadas para la solución inversa, cuya magnitud proporcional a la configuración requerida para los actuadores lineales.

Basados en la norma del vector  $r_{ABi}$ , es posible determinar los ángulos  $\psi_i, \alpha_i, \phi_i$  para el vector de coordenadas generalizadas  $q_i = [r_i, \psi_i, \alpha_i, \phi_i]^T$ . Para este propósito el sistema de referencia  $0_i$  es fijo, con el eje  $U_z$  alineado a lo largo de un vector unitario al vector  $r_{ABi}$ .

$$U_z = r_{ABi} / \|r_{ABi}\| \quad \text{ec. (2)}$$

$$U_x = (U_z \times S_0^{Ai}) / \|U_z \times S_0^{Ai}\| \quad \text{ec. (3)}$$

$$U_y = (U_z \times U_x) \quad \text{ec. (4)}$$

para estos vectores unitarios, la matriz de cosenos directores puede ser obtenida  $A_i = [U_x, U_y, U_z]$  y los ángulos  $\psi_i, \alpha_i, \phi_i$  o parámetros de Euler:

$P = [e_0^i, e_1^i, e_2^i, e_3^i]^T$  y la matriz de rotación  $A_i = (2e_0^2 - 1)I + 2(ee^T + e_0\tilde{e})$  también puede ser determinada.

### 3.2 Modelo Cinemático Directo

La cinemática directa del robot paralelo tipo 6-UPS estudia las relaciones entre las variables de los actuadores lineales y la posición resultante del efector final. Como ya se mencionó el robot paralelo para la construcción tiene 6 GDL, y consiste de 12+1 eslabones, formados por acoples de 6 actuadores lineales, el efector final, y la base de referencia.

Tomando la base como referencia, las coordenadas generalizadas es un vector que se puede definir como:  $q = [q_1, q_2, \dots, q_7]^T_{49 \times 1}$  donde  $q_1$  es el vector de coordenadas generalizadas del efector final y  $q_2, q_3, \dots, q_7$  corresponde al vector de coordenadas asignadas al acople de eslabones que conforman los actuadores lineales. En general, cada eslabón es definido como un sistema de coordenadas generalizadas donde:  $q = [r_i, p_i]^T$  con  $r = [x_i, y_i, z_i]$  y los parámetros de Euler se definirían como:  $p_i = [e_0^i, e_1^i, e_2^i, e_3^i]$ . La descripción de la cadena UPS cinemática, esta basada en el siguiente vector de restricciones:

$$\phi(q, t) = \begin{bmatrix} \phi^K(q) \\ \phi^D(q, t) \\ \phi^P(q) \end{bmatrix}_{49 \times 1} = 0 \quad \text{ec. (5)}$$

Donde:

$\phi^K(q)_{36 \times 1} = 0$  Es el vector de 36 restricciones holonómicas impuesto por las juntas esféricas,  
 $\phi^D(q, t)_{6 \times 1} = 0$  Es el vector de 6 restricciones impuestas por los actuadores las cuales son función del planificador de trayectorias.

$\phi^P(q)_{7 \times 1} = 0$  Es el vector de las 7 constantes de restricción de los parámetros de Euler.

### 3.3 Cálculo Numérico de la Cinemática

La cinemática, y los parámetros de normalización de las restricciones de Euler ec.(5), pueden ser combinados para formar la matriz Jacobiana de las ecuaciones de restricción:

$$\phi_q = \begin{bmatrix} \phi_q^K \\ \phi_q^D \\ \phi_q^P \end{bmatrix} \quad \text{ec. (6)}$$

El análisis de la posición, la velocidad y la aceleración está basado en obtener un vector de restricciones  $\phi(q, t) = 0$  el cual se muestra en la ec.(5) y el Jacobiano  $\phi_q(q)_{49 \times 49}$  ec. (6). Para calcular la solución cinemática directa, se puede comenzar con un vector solución aproximado de las coordenadas generalizadas  $q_i$  y un valor de desplazamiento

$C_{ij}(t)$  (para el caso de la solución cinemática directa, la cual solamente depende del valor de desplazamiento de los actuadores que es conocido como la variable de control) debido a esto el método de Newton-Raphson es el comúnmente utilizado:

$$\phi_q \Delta q^j = -\phi(q^j, t) \quad \text{ec. (7)}$$

$$q^{j+1} = q^j + \Delta q^j \quad \text{ec.}(8)$$

Donde  $q_i$  es la matriz Jacobiana del vector de restricciones descrito en la ec.(6) y  $q^{(j+1)}$  es la solución cinemática directa cuando  $\Delta q^{(j)} \approx 0$ .

### 3.4 Análisis de los Resultados

La tabla II, muestra los tiempos de cálculo resultantes (segundos), obtenidos a través de la función de Matlab® CPU time, para la solución cinemática, diferentes configuraciones extremas fueron analizadas Fig. (4). Las simulaciones fueron llevadas a cabo en un computador Pentium III a 700 GHz. Para el caso de la cinemática inversa, que da como resultado la posición y orientación del efector final (obtenidos por los ángulos 313 de Euler) (primera columna de la tabla) y el tiempo es contado hasta obtener el valor de las coordenadas generalizadas. Es observable que el tiempo de cálculo es prácticamente constante, independientemente de la configuración del robot, debido a que es calculado a través del álgebra lineal con operaciones vectoriales relativamente sencillas. Para el caso de la cinemática directa, se observan diferencias significativas en función de la configuración del robot, en la mayoría de los casos para los tiempos de cálculo, la posición inicial junto con la de reposo del robot (actuadores lineales a mínima longitud) y con la data de las coordenadas generalizadas (la segunda columna de la tabla) el tiempo es medido hasta obtener las coordenadas cartesianas para la nueva configuración del robot (con un error de tolerancia de  $\epsilon_s \approx 1e-4$ ), en la última columna de la tabla, muestra las diferencias sobre el costo computacional para los desplazamientos del RPT para diferentes configuraciones, ver Fig. (4) Posiciones (a y b) ,Posiciones (c y d) donde el peor de los casos es mover el robot sobre su eje, manteniendo paralelas ambas plataformas.

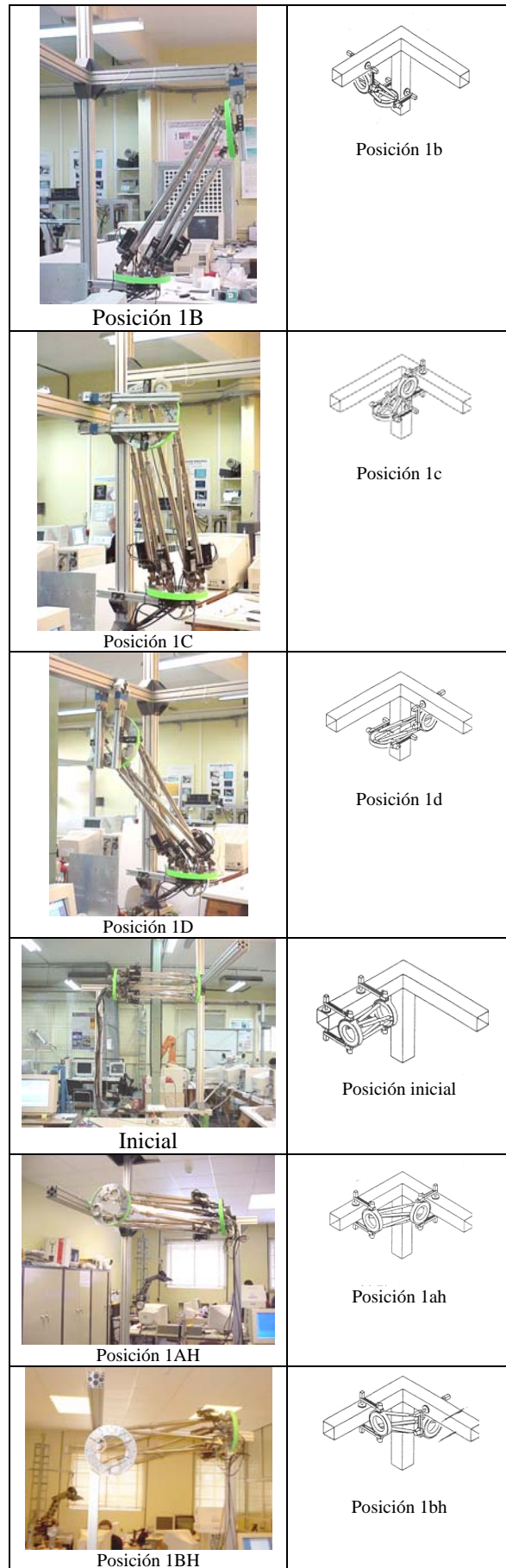
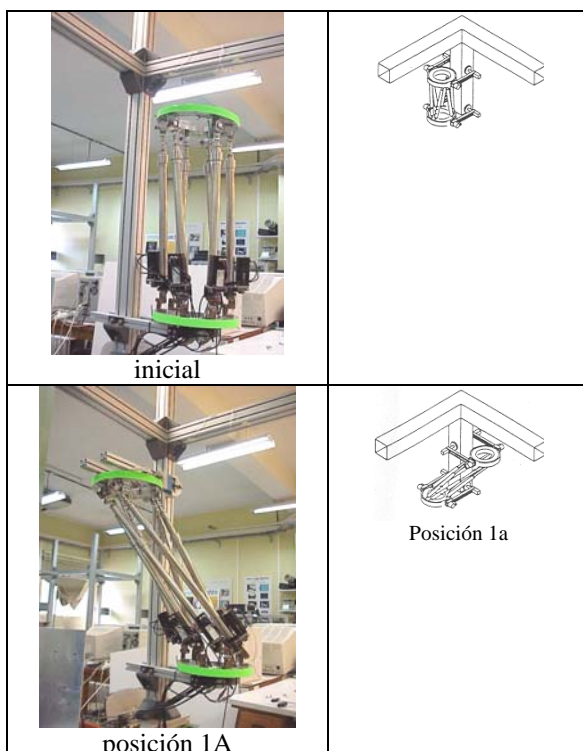


Figura 5. Diferentes configuraciones que puede adoptar el robot para evadir los nodos estructurales



Posición del Efector Final	Variables Articulares	Cinemática Inversa		Cinemática Directa	
[0,0,1.7,0,0,0] <sup>r</sup>	[1.2069,1.2069,1.2069,1.2069,1.2069,1.2069]	0.03	0.03 *	0.25	0.14 *
[0.4,0,1,0,0,0] <sup>r</sup>	[0.5593,0.5593,0.6428,0.5593,0.5593,0.6428]	0.03	0.02 *	0.17	0.05 *
[0,0,1.90,0,0,0] <sup>r</sup>	[0.5116,0.5661,0.5116,0.5661,0.5116,0.5661]	0.02	0.02 *	0.2	0.06 *
[0,0,1.3,0.90,0] <sup>r</sup>	[0.8090,0.8515,0.8090,0.8515,0.8090,0.8515]	0.06	0.02 *	6.31	1.15 *
[0.4,0,1,0,0,0] <sup>r</sup>	[0.0593,0.0593,0.1428,0.0593,0.0593,0.1428]	0.06	0.02 *	0.18	0.04 *
[0,1,0.81,0,0,0] <sup>r</sup>	[0.1893,0.3945,0.2960,0.1893,0.3945,0.2960]	0.03	0.02 *	0.53	0.04 *

\* En coordenadas reducidas

**Tabla II.** Costo computacional como resultado de la reducción de coordenadas

#### 4. Análisis Dinámico

Para entender la capacidad de utilizar robots de estructura paralela, como un robot trepador, es necesario el estudio de todas las configuraciones críticas que serán necesarias que el robot realice en la labor de y trepar y evadir nodos estructurales. En la

Número	Diámetro del anillo del Robot	Desplazamiento (mm)	Velocity (mm/s)	Tiempo de aceleración (s)	Peso del robot (Kgrs)	Carga (N)
1	150	200	200	0.1	10	50,75,100
2	350	400	400	0.1	30	100,150,200
3	550	600	400	0.1	50	150,200,250
4	750	800	400	0.1	70	200,250,300

**Tabla III.** Data empleada para las simulaciones dinámicas

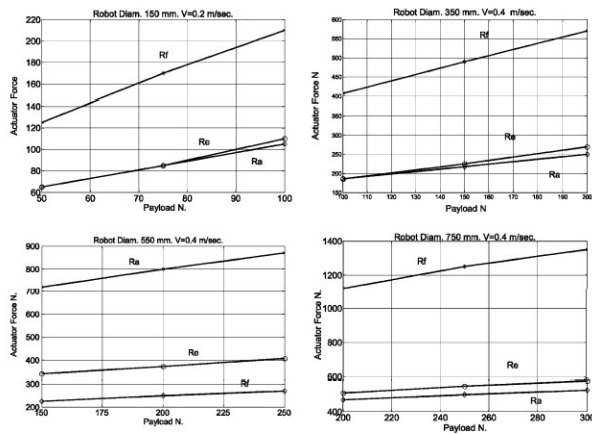
Para altas velocidades las fuerzas son diferentes de un actuador a otro. Esta consideración es verdaderamente importante para una óptima selección de dichos actuadores. La Fig. 6 ilustra los resultados obtenidos de la simulación dinámica para las configuraciones extremas analizadas en la Fig. 5. En la Fig. 6(a) la curva Ra, representa la máxima fuerza generada en el actuador lineal cuando el robot trepa a lo largo de una estructura con 30° de pendiente. La Fig. 6(b) La curva Re, representa la máxima fuerza generada en el actuador lineal cuando el robot trepa a lo largo de una estructura con 90° de pendiente Fig. 6(c). La curva Rf, representa la máxima fuerza generada en el actuador lineal cuando el robot se mueve a lo largo de una estructura con 90° de desviación; cada curva es obtenida tomando en consideración las cargas mostradas en la tabla III. También se han estudiado las configuraciones de la Fig. 5 (secuencias p1ah, p1bh) producen máximas fuerzas en los actuadores lineales que todas las demás configuraciones estudiadas. Tomando esto en

sección anterior, algunas de las configuraciones críticas fueron mostradas [3,22]. Una importante restricción en la labor de trepado es el tomar en cuenta la curvatura de las superficies. Grandes ángulos de curvatura, pueden dar a lugar a colisiones entre los actuadores lineales y la superficie de trepado. De acuerdo con el estudio cinemático del movimiento, es necesario el estudio y simulación dinámica del comportamiento del RPT en algunas configuraciones críticas. Fueron llevadas a cabo simulaciones dinámicas para las configuraciones mostradas en la Fig. 2, (e) y (f). Estas simulaciones fueron llevadas a cabo utilizando los programas ADAMS 11.0®. Para luego probadas en la realidad. Los parámetros del robot empleado en estas simulaciones son presentados en la Tabla III. Donde fueron simulados 4 posibles robots con diferentes diámetros de anillos (150, 350, 550, 750 mm.). Para cada uno de estos robots, una planificación de trayectoria basada en un perfil de 434, en el centro del efector final es el analizado. Considerando un tiempo de aceleración de 0.1 seg. (Para el robot con 150 mm de diámetro de anillo se consideró un tiempo de aceleración de 0.05s). Todas las posibles configuraciones para un robot que puede trepar por el exterior de estructuras fueron estudiadas: verticales, inclinadas y horizontales. Tomando en consideración las múltiples simulaciones dinámicas para las diferentes configuraciones del robot, se ha encontrado todas las fuerzas requeridas en los actuadores lineales actuadores para una velocidad de trepado de 0.4 m/s (excepto para el diámetro de anillo de 150 mm).

consideración están compuestos por husillos de bolas con un desplazamiento de 10mm por vuelta y un servomotor sin escobillas, La Tabla IV es obtenida para las configuraciones del robot de la Fig.5. y para los valores presentados en la Tabla III podemos obtener el torque y los requerimientos de potencia que hacen factible la idea del robo paralelo trepador.

Número	Diámetro del robot	Potencia total (W)
1	150	360
2	350	900
3	550	1350
4	750	2250

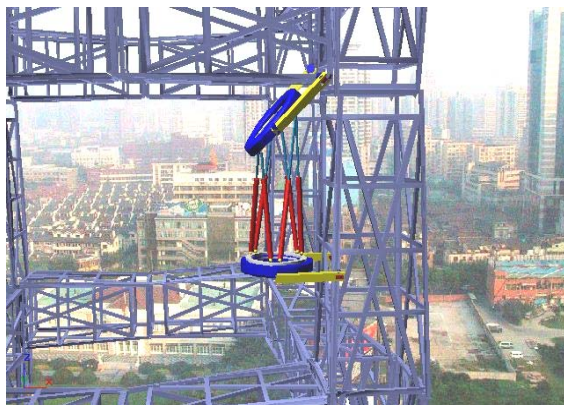
**Tabla IV.** Máxima potencia en los actuadores lineales del robot para las diferentes configuraciones



**Figura 6.** Fuerza Máxima RMS requerida por el actuador más demandante durante el trepado.

## 5. Análisis de la capacidad de trepado para el robot de estructura paralela

El uso de robot para llevar a cabo las tareas difíciles y peligrosas en el sector de la construcción es un concepto novedoso que ha disparado nuevas investigaciones últimamente. Esta investigación se enfoca en la robótica y la construcción y en las labores de restauración. Estudios han llevado análisis en la factibilidad de sistemas autónomos para ambientes en construcción, por otra parte el estudio de la robótica se ha concentrado históricamente en la comparación de sistemas operados por humanos con sistemas teleoperados y autónomos en aplicaciones ambientales para determinar la factibilidad de uso, de equipos automatizados en la construcción, minería y ambientes poco limpios.



**Figura 7.** Robot paralelo trepador para labores de supervisión

## 6. Agradecimientos

Esta investigación fue financiada por el Ministerio de Ciencia y Tecnología a través de la comisión Interministerial para la Ciencia y la Tecnología (CICYT) del Gobierno español (DPI 2000-1575-C02-01).

## 7. Conclusiones

Una aplicación de la plataforma de G-S de 6 GDL, como robot paralelo trepador ha sido presentada. Esta aplicación abre el camino a muchos otros trabajos, ya que combina una buena capacidad de funcionamiento con una alta velocidad, y buena capacidad de carga; con una extraordinaria capacidad

de maniobrar en ambientes intrincados y sumamente complejos tales como edificios en construcción, puentes, etc. El propósito del presente trabajo es la de presentar la novedosa forma de resolver la cinemática de mecanismos de cadena cerrada con 6 GDL tales como el robot paralelo trepador presentado. Primero, una breve descripción del diseño mecánico es presentada y discutida, posteriormente, el problema cinemático inverso y el directo del robot, es planteado y analizado en coordenadas reducidas a través de la dinámica multicuerpo.

Las simulaciones cinemáticas y dinámicas estudian las configuraciones críticas del robot planteado durante su labor de trepado. Tomando en consideración estas simulaciones, se puede concluir que las fuerzas generadas por los actuadores lineales para estas configuraciones críticas, están acordes con las esperadas. Basados en este esquema, muchos experimentos fueron realizados y el análisis de los resultados ha constatado la alta capacidad de los robot paralelos para las prestaciones de trepado a lo largo de estructuras tubulares con trayectorias desconocidas.

El Robot Paralelo Trepador, esta construido en la Universidad Politécnica de Madrid, España. Y en lugar de resolver como la mayoría de los investigadores propone el modelo cinemático, aquí se propone un modelo que involucra un conjunto de ecuaciones altamente no-lineales las cuales son resueltas por el método numérico de Newton-Raphson y por lo tanto una única solución es determinada.

## 8. REFERENCIAS

- [1] Agrawal S.K., "A Study of In-Parallel Manipulator Systems", Doctoral Dissertation., Stanford University, 1990.
- [2] Almonacid M., Saltarén R., Reinoso O., et. al., "Herramientas para la simulación de plataformas paralelas usadas como robots trepadores". *XX Jornadas de Automática. Salamanca*, 1999.
- [3] Almonacid M., Agrawal S.K., Aracil R., Saltaren R.J., "Multi-Body Dynamic Analysis of a 6-dof Parallel Robot", Proc. of the 2001 ASME Intern. Symposium on Advances in Robot Dynamics and Control, New York, Nov. 2001.
- [4] Aracil R., Almonacid M., Saltaren R., Sabater JM. and Azorin JM., "Kinematic control for navigation of mobile parallel robots applied to large structures". *Proceedings of the 17<sup>th</sup> IAARC/CIB/IEEE/IFR International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, p. 551-557, Taipei, Taiwan 2000.
- [5] Aracil R., Saltarén R., and Sabater J.M., "TREPA, Parallel Climbing Robot for Maintenance of Palm Trees and Large Structures", in *Proc. 2<sup>nd</sup> International Workshop*

- & Conference on CLIMBING & WALKING ROBOTS (CLAWAR), Sept. 1999, pp. 453-461.
- [6] Dasgupta B., Mruthyunjaya T.S., Closed-Form Dynamic equations of the general Stewart platform through the Newton-Euler approach. *Mech. Mach. Theory* Vol 33, N° 7, pp 993-1012, 1998.
- [7] Dasgupta B., Mruthyunjaya T.S., Singularity-free planning for the Stewart platform manipulator, *Mech. Mach. Theory* Vol. 33, N° 6, pp 711-725, 1998.
- [8] Gosselin C., "Parallel Computational Algorithms for the kinematics and Dynamics of Parallel Manipulators", *ASME J. Dyn. Syst., Meas. Contr.*, Vol. 118-1, pp. 22-28, 1996.
- [9] Gough V.E., S.G. Whitehall, Proc. 9<sup>th</sup> Int Tech. Cong. FISITA, Inst. Mech. 177, 1962.
- [10] Haug E. J., Computer Aided Kinematics and Dynamics Of Mechanical Systems, *Allyn and Bacon*, 1989.
- [11] Husty, M. L. An algorithm for solving the direct kinematics of Stewart-Gough type platforms, Rapport de Recherche TR-CIM-94-7, Univ. McGill, Montreal, June 1994.
- [12] Lazard, D. Stewart platform and Gröbner basis. In ARK, pages 136-142, Ferrara, 7-9 September 1992.
- [13] Lazard, D., Merlet, J. P., Stewart platform has 12 configurations. In IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation, pages 2160-2165, San Diego, May 8-13, 1994.
- [14] Liu M.J., C.X. Li, C.N. Li, "Dynamics Analysis of the Gough-Stewart Platform Manipulator" IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 16, N° 1, February 2000.
- [15] Merlet J. P., Les Robots Parallèles, Ed. Hermes, 1997.
- [16] Merlet, J. P. Direct kinematics and assembly modes of parallel manipulators. *International Journal of Robotics Research*, 11(2), 150-162, April 1992.
- [17] Merlet, J-P. "Determination of the presence of singularities in a workspace volume of a parallel manipulator". In *NATO-ASI, Computational methods in mechanisms*, Sts. Konstantin and Elena Resort, 16-28 June 1997.
- [18] Nair P. On the forward kinematics of parallel manipulators. *The Int. J. Of Robotics Research*, 13(2):171-188, April 1994.
- [19] Nenchev D.N. et Uchiyama M. "Singularity-consistent path planning and control of parallel robot motion through instantaneous-self-motion type". In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 1864-1870, Minneapolis, 24-26 April 1996.
- [20] Nikravesh P. E., *Computer-Aided Analysis of Mechanical Systems*, Prentice Hall, 1988.
- [21] Park, T., "A Hybrid Constraint Stabilization-Generalized Coordinate Partitioning Method for Machine Dynamics.", *Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*, Vol. 108, No. 2, pp. 211-216, 1986.
- [22] Saltarén R., "Tools for modelling and parametric design of robots based on Multibody dynamics", *PhD Thesis, Polytechnic University of Madrid*, 1996.
- [23] Saltarén R., Azorin JM., Almonacid M., Sabater JM., *Prácticas de Robótica con Matlab*, Ed. U. Miguel Hernández, 2000.
- [24] Saltarén R., R. Aracil, Reinoso O., Sabater J. M., and Almonacid M., "Parallel Climbing Robot for Construction, Inspection and Maintenance", *International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*, Madrid, 1999.
- [25] Stewart D., Proc. Inst. Mech. Eng. (Part I) 180(15), pp.371-386, 1965.
- [26] Tsai L.W. "Solving the inverse dynamics of a Stewart-Gough manipulator by the Principle of Virtual Work", *ASME Transaction, Journal of Mechanical Design*, March 2000, Vol. 122, pp. 3-9.
- [27] Tsai L-W. "*Robot Analysis: The mechanic of Serial and Parallel Manipulators*", John Wiley & Sons, Inc. 1999.