

# Robots trepadores de estructura paralela:

## *Aplicación al Mantenimiento de palmeras*

R. Aracil, Dr. Ing. Industrial.  
Catedrático de la U.P.M.

R. Saltarén, Dr. Ing. Industrial. Prof. Asociado.  
U. P. de Cartagena

J. M. Sabater, Ing. Industrial. Univ.  
Miguel Hernández. Elche

O. Reinoso, Dr. Ing. Industrial. Prof. Titular.  
Univ. Miguel Hernández. Elche

**Resumen.** Se presenta un avance de las investigaciones y herramientas matemáticas desarrolladas para la concepción de un sistema robotizado dedicado a las labores de Mantenimiento de palmeras. Se propone la aplicación de plataformas paralelas como robots trepadores considerando la gran capacidad de carga que poseen este tipo de es-

tructuras mecánicas y su habilidad para evolucionar en el espacio de trabajo. En la primera parte, se muestran las herramientas computacionales basadas en la dinámica multicuerpo desarrolladas en esta investigación para estudiar el comportamiento dinámico de este tipo de estructuras robótica, y sus aplicaciones como robots trepa-

dores. El robot investigado tiene una estructura cinemática novedosa para este tipo de aplicaciones, basada en una plataforma de Stewart 6-6, y un brazo articulado para realizar tareas de podado y fumigación. El sistema operativo se basa en una arquitectura de control por teleoperación, formada por microcontroladores, cámaras de

TV, e interfaces computacionales interactivas. A través de este sistema, un operario podrá realizar las tareas de Mantenimiento de manera remota evitando entrar en contacto con las sustancias químicas de los productos de fumigación y se elimina totalmente la posibilidad de accidentes mortales por caídas desde grandes alturas.

### Introducción

Típicamente los robots trepadores y caminantes basan su desplazamiento en el movimiento de sus apéndices. En gran parte de los mencionados robots, las patas están formadas por barras articuladas conectadas en serie. Es notable cómo el uso de patas en los robots trepadores da lugar al empleo de numerosos grados de libertad (con motores y sensores para cada uno de ellos) lo cual aumenta enormemente la complejidad del control, el peso de la máquina y los costos.

En los robots trepadores, la disponibilidad de numerosos grados de libertad redundantes no incrementa necesariamente la habilidad de la máquina para evolucionar en el espacio de la tarea. Una parte importante de los grados de libertad de un robot trepador permanecen bloqueados pa-

ra servir como soporte al cuerpo y de referencia a las patas que en ese momento funcionan como mecanismos de avance. Una arquitectura con patas plantea, además, limitaciones en cuanto a la capacidad de carga, un efecto típico de los mecanismos articulados de tipo serie influenciados por los efectos de las fuerzas y pares que se reflejan en las articulaciones y por lo tanto en la capacidad de los accionamientos de potencia. Además, cabe destacar que las relaciones peso/potencia de los robots trepadores son elevadas lo que limita la capacidad de carga útil de estos mecanismos así como su velocidad.

En resumen, las siguientes características técnicas de los robots trepadores con patas, plantean limitaciones que son susceptibles de mejora:

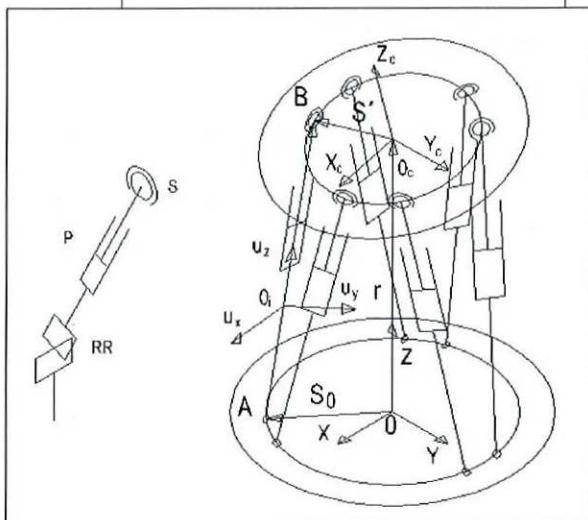


Figura 1- Estructura general de un manipulador paralelo de seis grados de libertad

- Empleo de numerosos grados de libertad, pocos de ellos de movimiento y actuados de manera coordinada.

- Uso limitado de los grados de libertad y de la potencia total disponible.

- Peso elevado, que limita la relación peso/potencia del robot y su velocidad.

- Limitada capacidad para el manejo de cargas útiles pesadas.

- Ningún uso de los accionamientos de potencia como elementos estructurales.

Para resolver algunos de los anteriores problemas, en este artículo se proponen algunas arquitecturas mecánicas basadas en plataformas paralelas, de seis grados de libertad. Las plataformas paralelas presentan las siguientes ventajas, que las hacen especialmente aptas para operar como robots paralelos:

- Los accionamientos de potencia conectan directamente la base del robot, al efector final. Por este motivo, los accionamientos de potencia sirven de elementos estructurales y actúan de manera simultánea, lo que les da la capacidad de manipular cargas muy superiores a su propio peso.

- Las estructuras paralelas son mecanismos que ofrecen alta rigidez, con bajo peso y elevadas velocidades de operación, en comparación con cualquier otro tipo de estructura robótica

- Para posicionarse y orientarse en el espacio de la tarea, las estructuras paralelas requieren seis grados de libertad. Al emplear todos los grados de libertad para su desplazamiento, los robots trepadores propuestos usan un mínimo número de accionamientos de potencia en comparación con otros tipos de robots trepadores

### Análisis de las plataformas paralelas RRPS

El tipo de robot que se propone está basado en una plataforma de paralela de seis grados de libertad, con

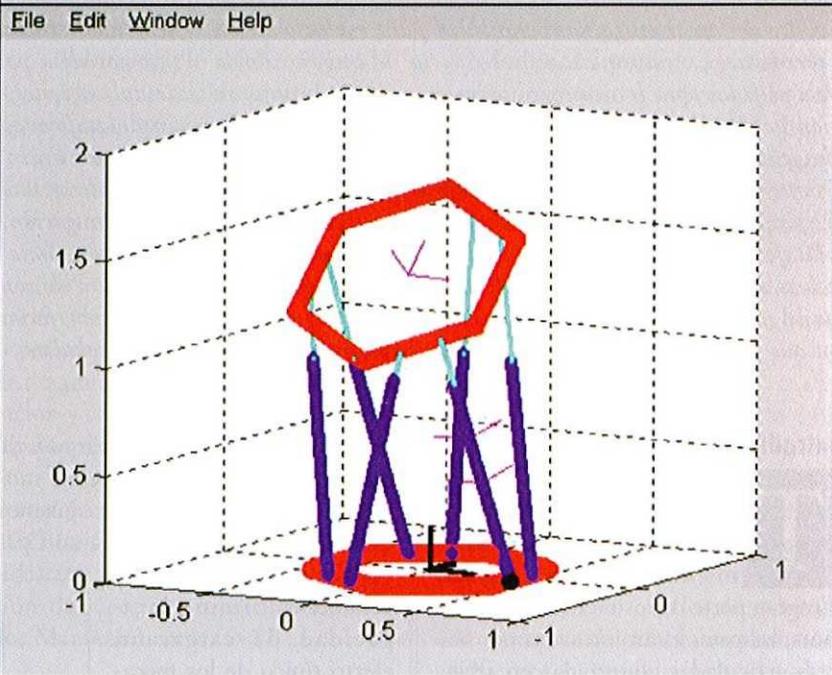
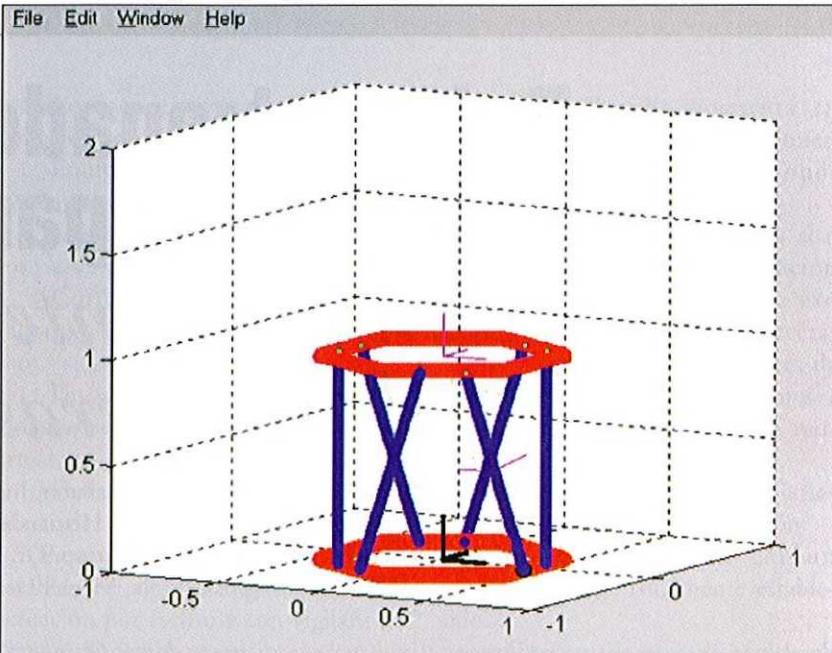


Figura 2- Cinemática directa de una plataforma paralela

cadena cinemática del tipo RRPS donde los grados de libertad RR corresponden a una articulación universal, P es un grado de libertad prismático que corresponde al accionamiento de potencia lineal y S, una junta esférica que une el actuador lineal con el efector final. (figura 1).

Basadas en la dinámica multicuerpo [1] y [2] y en los estudios de Merlet [3], se han desarrollado en MatLab una serie de herramientas computacionales que permiten el di-

seño y análisis de este tipo de estructuras.

La figura 2 muestra una representación en MatLab de la solución cinemática directa calculada con los métodos numéricos explicados en [4]. Para efectos de este estudio, la plataforma superior del robot parte de la posición indicada en la configuración inicial y se desplaza hasta un punto final como se indica (un desplazamiento de 400 mm y una rotación de 45° en x). Para ello se ha rea-

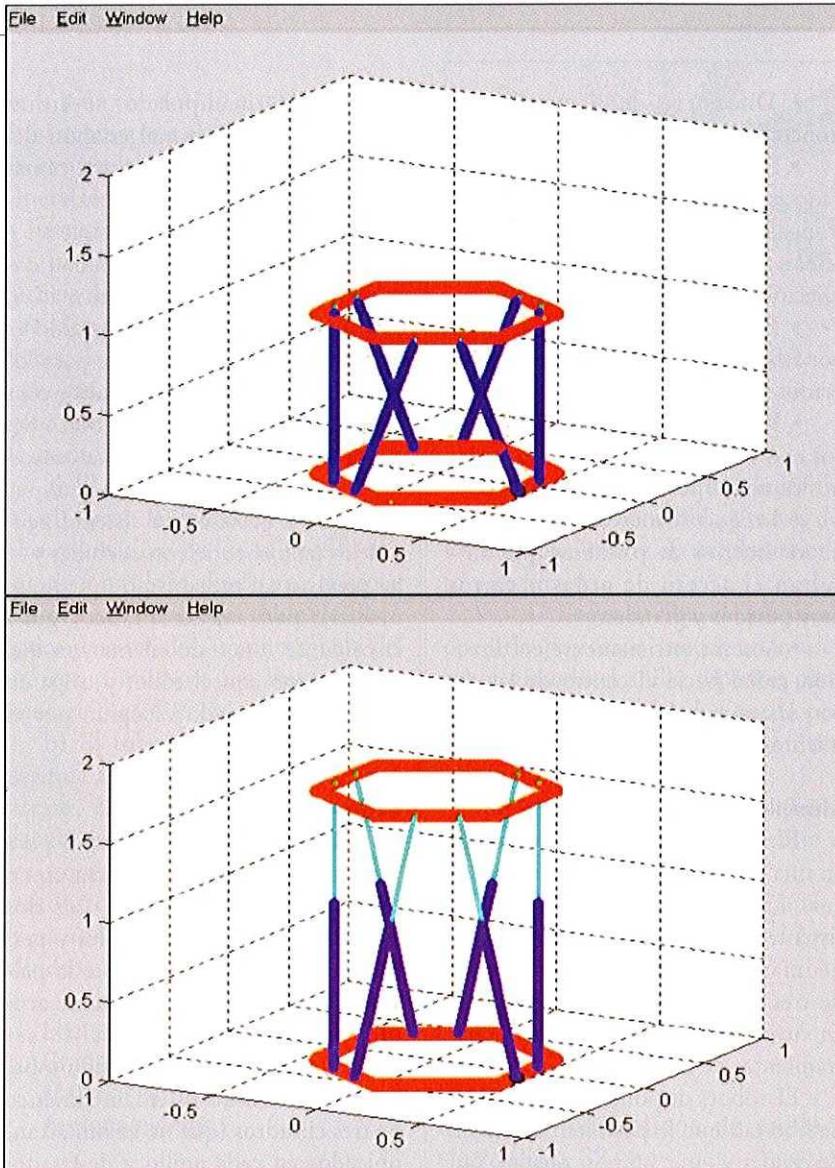


Figura 3- Animación de la dinámica directa

lizado una planificación de trayectorias dividiendo el desplazamiento total (calculado con la cinemática inversa) en varios segmentos iguales, con el fin de hallar la configuración del robot que deberá cumplir al pasar por cada tramo de la trayectoria.

Para la resolución de la dinámica directa se ha desarrollado un simulador en MatLab, utilizando las ecuaciones generales de la dinámica multicuerpo. La figura 3 muestra una animación del modelo obtenida para una fuerza constante, aplicada sobre cada actuador durante un periodo de 0,5 segundos. Para resolver el problema de integración se utilizó el Método del Algoritmo Híbrido.

Utilizando las herramientas presentadas se han desarrollado una serie de algoritmos de navegación que permiten el auto-guiado del robot a lo largo de una trayectoria desconocida *a priori*. [5]

**Aplicación: aspectos generales del proyecto TREPADA**

El desarrollo de medios tecnológicos avanzados para el mantenimiento de palmeras ha sido planteado como prioritario para la población de Elche para poder preservar un patrimonio histórico de más de 2.000 años, con más de 180.000 especímenes que se encuentran en claro dete-

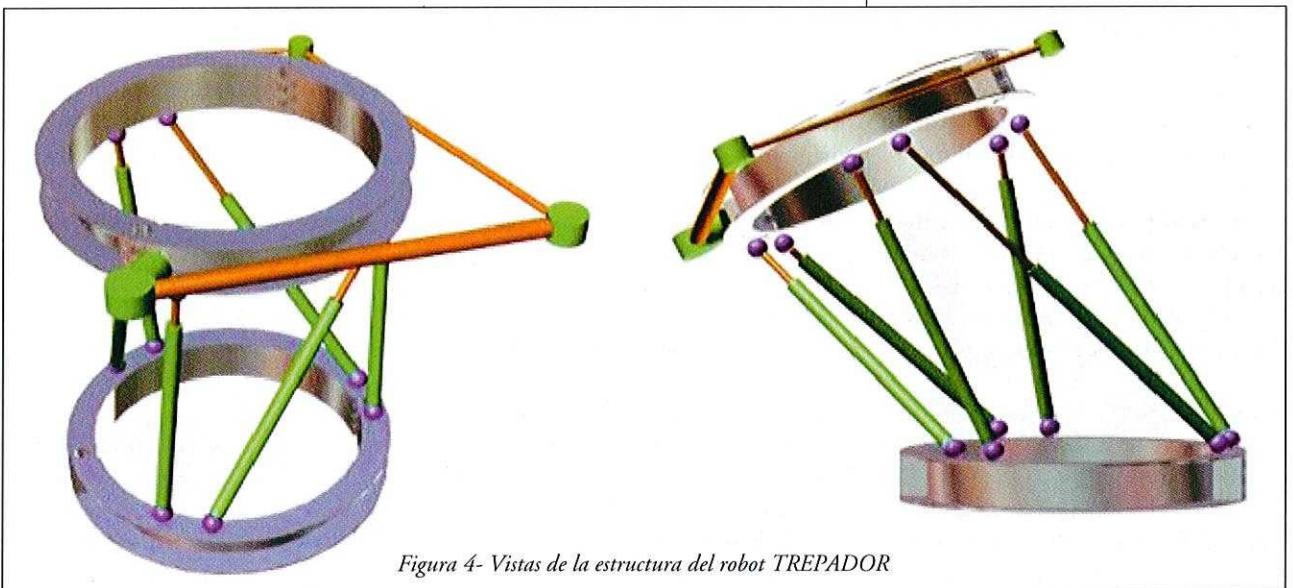


Figura 4- Vistas de la estructura del robot TREPADA

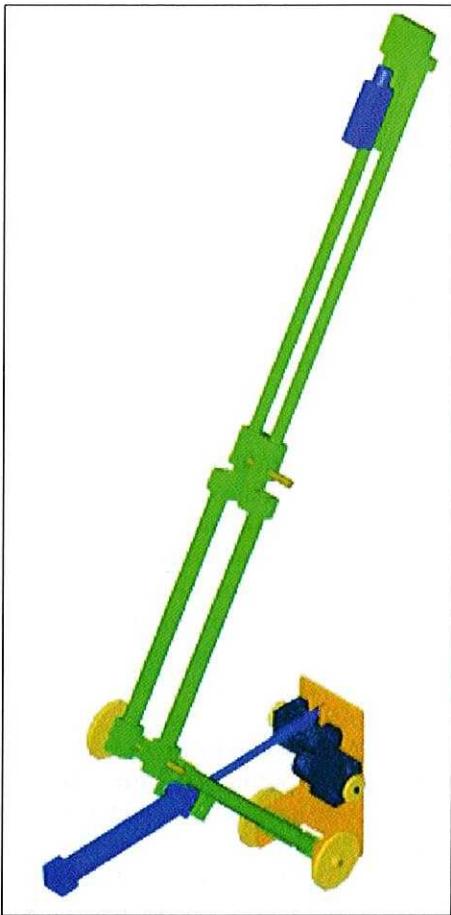


Figura 5- Brazo manipulador para las tareas de corte y fumigación

rioro por el ataque de plagas y falta de mano de obra para su Mantenimiento

En general, las siguientes características físicas de las palmeras determinan la morfología del robot que debe desarrollarse:

- Altitud elevada entre 12 y 18 m.
- Curvatura a veces caprichosa del perfil de los troncos, mucho más notable en palmeras de gran altura.

- Diferencias de diámetro en el tronco de la palmera.
- Defectos acumulados en el podado de las palmeras que dan lugar a troncos irregulares con apéndices de ramas mal cortadas que dificultan la sujeción sobre el tronco verdadero.
- Follajes y cogotes exagerados por falta de un Mantenimiento apropiado.
- Fallas estructurales en los troncos con estrechamientos debido a daños causados por agentes externos.
- Irregularidades en los terrenos de los huertos de palmeras que dificultan el acceso de grúas o carros muy pesados y grandes.
- Accesos estrictamente en dirección radial hacia el centro de las cepas; las ramas no permiten desplazamientos laterales.

**Morfología del robot**

El robot propuesto esta basado en una plataforma de Stewart 6-6, figura 4, de seis grados de libertad consistente de dos anillos, seis cilindros neumáticos, un brazo manipulador de tres grados de libertad y la pinza en cuyo extremo irán alojadas las herramientas de trabajo.[6]

El robot, dispone de seis grados de libertad que le permiten ascender, descender y girar sobre sí mismo, por lo cual tiene una total autonomía para navegar sobre el tronco de la palmera acomodándose automáticamente a las discontinuidades y variaciones caprichosas que puedan existir en el perfil del tronco y en su diámetro.

El brazo manipulador se ilustra en la figura 5. Sobre el eslabón del extremo se puede apreciar una cámara de TV. La primera y segunda articulación del brazo son rotacionales y accionadas por cilindros neumáticos y la articulación final será prismática. El propósito de esta configuración es dar al brazo un gran alcance para lograr los acercamientos necesarios para el corte y la fumigación. El brazo del robot va recogido durante el ascenso.

En el extremo del brazo manipulador se ha previsto un sistema neumático para el corte con cuchillas y se ha previsto un mecanismo (que no se muestra) para sujetar la rama y guiar la caída de ésta, de tal manera que no colisione con el robot y caiga en un lugar apropiado escogido por el operador.

**Utilización del robot**

El robot ha sido diseñado para ser montado sobre la palmera como se muestra en la figura 6. Los dos anillos del robot son abatibles y permiten su manipulación sobre la palmera, a través de un sistema de acoples mecánicos. Después de ser instalado el robot, éste se centra sobre la palmera con un sistema neumático de tres cilindros (que no se muestran) ubicados en cada anillo y desfasados 120°. Los cilindros ejercerán una fuerza equilibrada ya que se ha previsto para su control, en cada caso, una válvula neumática proporcional reguladora de presión. En el caso de una pérdida de presión, el robot se quedará sujeto firmemente al tronco

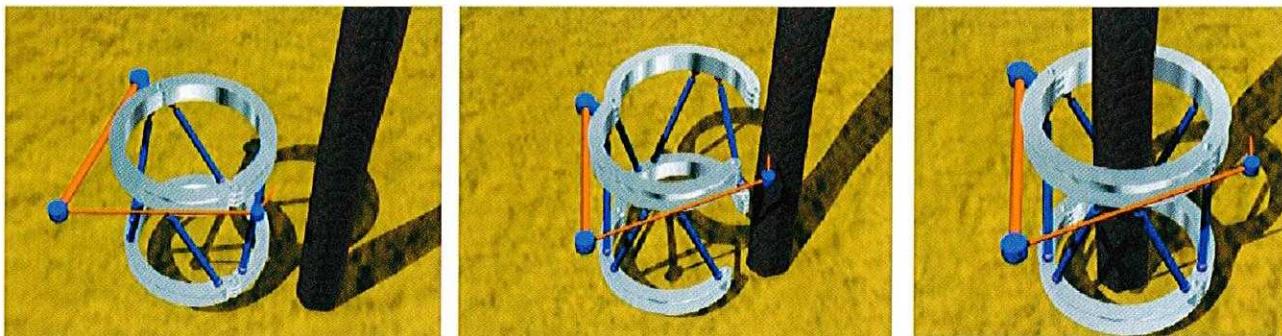


Figura 6- En estas figuras se aprecia la morfología del robot y la secuencia de configuraciones necesarias para montarlo en la palmera

de la palmera debido a que los cilindros neumáticos son de simple efecto, con resorte de extensión.

**Operación del robot para el podado y fumigación**

En la figura 7 se muestra la secuencia de operaciones del robot para extender el brazo e iniciar las operaciones de mantenimiento de la palmera. En general, se puede resumir la operación del robot con la secuencia de eventos descritos a continuación.

a) El operario instala el robot en la palmera y lo centra con los cilindros neumáticos de los anillos. El robot es controlado desde una consola a la que se conecta un cable de fibra óptica para señales, una manguera de aire comprimido y una línea de alimentación a 24 V. c.c.

b) El robot es guiado para que ascienda a lo largo de la palmera; para esto, el sistema de control de la plataforma de Stewart realiza de manera coordinada (de acuerdo a los comandos que recibe) la secuencia de operaciones necesaria sobre los seis cilindros neumáticos, desplazándose

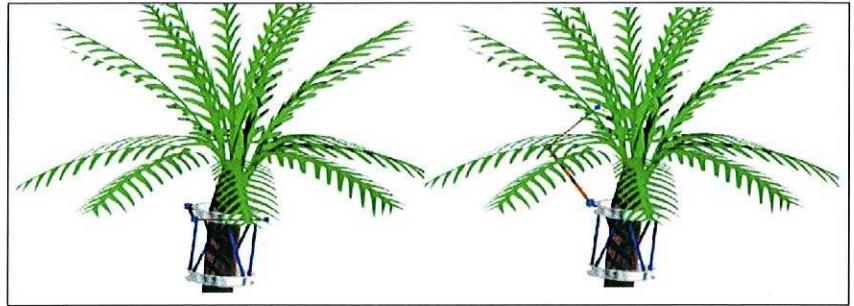


Figura 7 - Secuencia de operaciones para la extensión y el posicionamiento del brazo manipulador de podado y fumigación

y orientándose de acuerdo a la información sensorial obtenida a través de los sensores lineales de desplazamiento y de presión.

c) Al llegar arriba el robot, el operario posiciona sucesivamente el robot girando el anillo superior, para que el brazo manipulador pueda penetrar en el sentido radial de las hojas a cortar.

d) Se extiende el brazo manipulador y se realizan las tareas de corte y fumigación

e) El robot desciende de la misma manera que ascendió, con el brazo manipulador recogido.

**TREPA: especificaciones mecánicas generales**

Las anteriores tablas muestran las especificaciones mecánicas definidas para el diseño y fabricación del robot. ■

**Referencias**

[1]. Haug, E. J. Computer Aided Kinematics and Dynamics Of Mechanical Systems, Allyn and Bacon, 1989

[2]. Saltarén. R. P., Tools for modeling and parametric design of robots based on multibody dynamics, PhD Thesis, Universidad Politécnica de Madrid. 1996.

[3]. Merlet, J. P, Les Robots Parallèles, Ed. Hermes, 1997.

[4]. R. Saltarén, R. Aracil, J.M. Sabater, O. Reinoso, and L.M. Jiménez, "Modelling, Simulation and Conception of Parallel Climbing Robots for Construction and Service", in Proc. 2nd International Workshop & Conference on climbing & walking robots (CLAWAR), Sept. 1999, pp. 253-265

[5]. R.Saltarén, R.Aracil, M.Almonacid, J.M.Sabater and J.M.Azorín, "Kinematic Control for Navigation of Mobile Parallel Robots Applied to Large Structures" No publicado.

[6]. R. Aracil, R. Saltarén, and J.M. Sabater, "TREPA, Parallel Climbing Robot for Maintenance of Palm Trees and Large Structures", in Proc. 2nd International Workshop & Conference on climbing & walking robots (CLAWAR), Sept. 1999, pp. 453-461

No.	Elemento	Descripción
1	Grados de libertad	Seis
2	Material estructural	Duraluminio 6063 T5
3	Accionamientos	Cilindros neumáticos de doble efecto Diám. 32 mm
4	Válvulas neumáticas	Válvulas direccionales 5/3 y servo-válvulas 1/8"
5	Anillos	Abatibles con bisagra y cierre automático.
6	Capacidad de ascenso por paso	800 mm
7	Capacidad de giro sobre sí mismo	30°-90°
8	Velocidad de ascenso	0,36 m/s
9	Peso estimado	25 kg

Tabla 1. Robot trepador (Plataforma de Stewart 6-6)

No.	Elemento	Descripción
1	Estructura	En duraluminio 6063 T5
2	Grados de libertad	Tres más la pinza
3	Accionamientos	Neumáticos y motores a pasos con reductores.
4	Alcance extendido	2.500 mm
5	Sistema de visión	2 cámaras de TV
6	Peso	15 kg

Tabla 2. Brazo manipulador