

**DEVELOPMENT OF A PARALLEL ROBOT DELTA KEOPS TYPE WITH
MODIFICABLE STRUCTURE****DESARROLLO DE UN ROBOT DELTA PARALELO TIPO KEOPS CON
ESTRUCTURA MODIFICABLE****MSc. Cristhian Riaño, PhD. Cesar A. Peña Cortés, PhD. Aldo Pardo García****Universidad de Pamplona.**

Ciudadela Universitaria. Pamplona, Norte de Santander, Colombia.

Tel.: (+577) - 568 5303, Fax: (+577) - 568 5303 Ext. 156.

E-mail: {cristhian.riano, cesarapc, apardo13}@unipamplona.edu.co

Abstract: In this paper the study, design and development of a parallel robot with changeable Keops type structure built specifically to operate in a workspace with cylindrical shape are presented. Stages of the study, design and development of robot, applying techniques of genetic algorithms to calculate optimal dimensions and architecture of implemented control to regulate current, speed and position in Brushless DC motors is presented in this article. Exposing terminates development results Cheops parallel robot with modifiable structure type.

Keywords: Genetic algorithms, inverse kinematics, workspace, optimization, BLCD, linear delta parallel robot.

Resumen: En el presente artículo se exponen el estudio, diseño y desarrollo de un robot paralelo tipo Keops con estructura modificable construido específicamente para operar en un espacio de trabajo con forma cilíndrica. Se presenta en este artículo las etapas del estudio, diseño y desarrollo de robot, la aplicación de técnicas de algoritmos genéticos para el cálculo óptimo de las dimensiones y la arquitectura de control implementada para regular corriente, velocidad y posición en motores *Brushless* DC. Se finaliza exponiendo los resultados obtenidos del desarrollo del robot paralelo tipo Keops con estructura modificable.

Palabras clave: Algoritmos genéticos, cinemática inversa, espacio de trabajo, motor brushless CD, robot lineal delta paralelo.

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas robóticos demandan de nuevas técnicas y tecnologías que les brinden autonomía y le permitan al robot adaptarse a entornos cambiantes. Los Sistemas mecatrónicos y especialmente robóticos son requeridos ampliamente en la industria y con tendencia creciente por la necesidad de actualizar los sistemas de producción convencionales, los cuales orientaban los sistemas robóticos a tareas de manipulación de objetos, posicionamiento de herramientas y tareas repetitivas programadas

previamente. Es necesario seguir adelantando estudios a las distintas configuraciones para definir sus características y explotar sus capacidades en diversas aplicaciones que aun demandan ser atendidas (Aracil *et al.*, 2006) (Duran *et al.*, 2013) (Gutiérrez, 2012).

Las configuraciones de robots paralelos hacen que los estudios difieran de un robot a otro por existir distintas morfologías (Martínez *et al.*, 2010). Este es el objeto de estudio de nuestro trabajo investigativo donde se concibe la idea de tener un robot paralelo que permita modificar su estructura

para obtener variantes de la configuración y someter a evaluación sus prestaciones dinámicas (Pierrot *et al.*, 1990).

El robot paralelo tipo Keops está formado por cadenas cinemáticas cerradas, estas cadenas deben ser estudiadas con técnicas de análisis cinemático diferentes a los utilizados en los robots seriales, sus estudios conducen a explorar situaciones especiales que conlleven a pérdida de control debido a singularidades en las que el robot puede ganar grados de libertad y comprometer su control (Mitsi *et al.*, 2008). Luego de conocer su comportamiento dentro del área de trabajo es posible tener control articular del robot y generar trayectorias para tareas determinadas.

El robot paralelo tipo Keops es un robot con funcionamiento mecánico basado en mecanismo husillo tuerca, tal vez su elemento de mayor cuidado debido a las restricciones que puede generar en el movimiento son las juntas de unión o articulaciones (Riaño *et al.*, 2014).

El Robot de cinemática paralela está compuesto por tres actuadores lineales que dependiendo de su disposición se pueden obtener variantes del mismo. Entre las variantes más comunes se encuentran las configuraciones denominadas Delta, Tricept, ortogonal y Keops y todas ellas se soportan sobre una base fija (Hunt, 1983). El efector final está conectado por medio de eslabones a los actuadores del robot. El diseño de algoritmos de control para este robot es una tarea compleja y alientan el desarrollo de este trabajo. (Vivas & Poignet, 2009).

2. ARQUITECTURA ROBOT DELTA PARALELO KEOPS

La estructura del robot paralelo delta tipo Keops consiste en un arreglo en forma de pirámide invertida de sus actuadores lineales. Esta configuración se caracteriza por tener alta rigidez producto de la ubicación simétrica de sus tres actuadores. El robot está conformado por tres actuadores lineales motorizados distribuidos simétricamente en ángulos de 120° . Estos actuadores son los encargados de transformar el movimiento circular proveniente del motor en desplazamiento lineal y transmitirlo al efector final en el espacio de trabajo (Wang *et al.*, 2007) (Baturone, 2001).

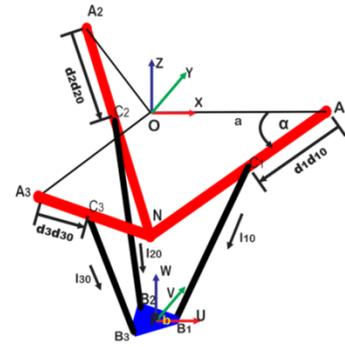


Fig. 1. Arquitectura Robot Paralelo Tipo Keops.

La arquitectura básica de un manipulador paralelo Delta Keops se muestra en la Figura 1. Está conformada por una plataforma móvil, una base fija en la parte superior donde los actuadores $A1$, $A2$, $A3$ se encuentran anclados, y tres eslabones de soporte con idéntica estructura cinemática $I10$, $I20$, $I30$. Cada eslabón se conecta en un extremo a los actuadores lineal $A1$, $A2$, $A3$ y en el otro extremo a la plataforma móvil mediante articulaciones esféricas. Esta configuración del robot paralelo tipo Keops tiene la característica que sus Actuadores lineales poseen $a = 45^\circ$ de inclinación con respecto a la base fija inicial y para efectos de estudio. El ángulo a se desea que sea modificable.

En la Figura 2 se presenta la estructura del robot delta paralelo Keops con la arquitectura expuesta. Los actuadores transmiten el movimiento al efector final utilizando seis eslabones conectados en pares por medio de articulaciones esféricas en sus extremos. El efector final se encuentra sujeto al otro extremo de los eslabones empleando de igual forma juntas esféricas para su conexión.

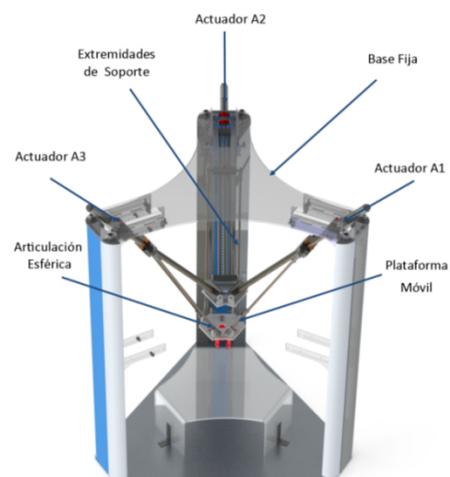


Fig. 2. Estructura del robot paralelo tipo Keops.

Las articulaciones esféricas se debe seleccionar que sean rígidas en la dirección normal a su base y seleccionar un ángulo de inclinación admisible correcto. Los ángulos de inclinación admisible comercialmente oscilan entre 15° y 22° y generan restricciones considerables al diseño. La articulación seleccionada tiene un ángulo admisible de 17° . Esta restricción fue incluida en el proceso de diseño y optimización.

3. CINEMÁTICA INVERSA ROBOT PARALELO DELTA KEOPS

La arquitectura general de un manipulador paralelo Delta Keops se muestra en la Figura 1, se compone de una plataforma móvil (color azul), una base fija en la parte superior donde los actuadores A_1 , A_2 , A_3 (color rojo) se encuentran anclados, y tres eslabones que conectan el efector final con los actuadores de igual estructura cinemática (color negro). Cada eslabón conecta la base fija a la plataforma móvil mediante una junta prismática, una articulación de giro y una junta esférica en serie, donde la articulación prismática es accionada por un actuador lineal. Además esta configuración del robot delta lineal presenta las líneas de acción de las tres articulaciones prismáticas inclinadas. (Mitsi *et al.*, 2008).

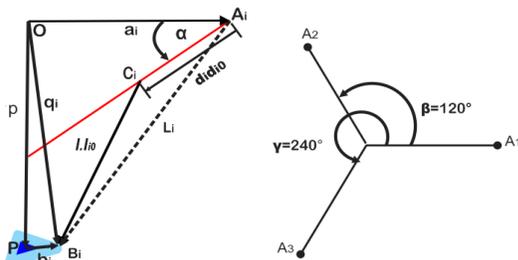


Fig. 3. Geometría del robot paralelo delta Keops.

Para objeto de estudio se ubicó un sistema de referencia de coordenadas cartesianas $O-XYZ$ en el punto O que es el centro de la plataforma base, y otro sistema de coordenadas $P-UVW$ está ubicado en el punto P que es el centro de la plataforma móvil.

Se sitúa el eje X en la dirección de OA , y al eje U paralelo al eje X en la dirección de PB_1 .

Los tres rieles D_iE_i para $i = 1, 2, y 3$ se interceptan entre sí en el extremo N (vértice del cono) y se cruzan en el plano XY en los puntos A_1 , A_2 , y A_3 que se encuentran en un círculo de radio a .

Los tres enlaces o brazos C_iB_i para $i = 1, 2, y 3$ de longitud L se interceptan con el plano UV en los puntos B_1 , B_2 , y B_3 que se encuentran en un círculo de radio b .

Los vectores $P, b_i, a_i, d_{i0}, l_i, l_{i0}, q_i, L_i$ están expresados con respecto al sistema de referencia $O-XYZ$.

Los ángulos $\beta = 120$ grados y $\gamma = 240$ grados (Fig. 3).

3.1 Cinemática inversa del robot delta Keops

El problema cinemático inverso del robot paralelo delta Keops consiste en hallar la posición o desplazamiento de cada uno de los tres actuadores lineales a partir de una posición dada de la plataforma móvil.

De acuerdo a la Figura 1, la transformación (posición y orientación) de la plataforma móvil con respecto a la plataforma fija se puede describir por un vector de posición p :

$$p = [p_x \quad p_y \quad p_z]^T$$

Una matriz de rotación $[{}^A R_B]$ de 3×3 ; donde esta puede ser expresada en términos de cosenos de U , V y W , los cuales son tres vectores unitarios definidos a lo largo de los ejes del sistema de referencia móvil $P-UVW$:

$$[{}^A R_B] = \begin{bmatrix} U_x & V_x & W_x \\ U_y & V_y & W_y \\ U_z & V_z & W_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

La orientación de la plataforma móvil se puede describir por tres ángulos de Euler γ , \mathbf{q} y \mathbf{f} , estos son ángulos rotados sobre los ejes X , Y , Z del sistema de referencia fijo:

$$[{}^A R_B] = R_z(\mathbf{f}) R_y(\mathbf{q}) R_x(\mathbf{y}) \quad (2)$$

El sistema de referencia móvil se conservó paralelo al sistema de referencia fijo, por tanto la matriz de rotación será igual a la matriz identidad de 3×3 :

$$[{}^A R_B] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

También se tiene que $[{}^B b_i]$ es el vector desde P hasta B_i y puede ser expresado como:

$$\begin{aligned} {}^B b_1 &= [b \ 0 \ 0]^T \\ {}^B b_2 &= [b \cdot \cos 120 \ b \cdot \sin 120 \ 0]^T \\ {}^B b_3 &= [b \cdot \cos 240 \ b \cdot \sin 240 \ 0]^T \end{aligned} \quad (4)$$

Resolviendo lo anterior, queda:

$$\begin{aligned} {}^B b_1 &= [b \ 0 \ 0]^T \\ {}^B b_2 &= [-b/2 \ \sqrt{3} \cdot b/2 \ 0]^T \\ {}^B b_3 &= [-b/2 \ -\sqrt{3} \cdot b/2 \ 0]^T \end{aligned} \quad (5)$$

El vector posición q_i se puede obtener por:

$$q_i = p + {}^A R_B {}^B b_i \quad (6)$$

Reemplazando las ecuaciones 1 y 5 en la ecuación 5, se obtiene:

$$\begin{aligned} q_1 &= \begin{bmatrix} p_x + bU_x \\ p_y + bU_y \\ p_z + bU_z \end{bmatrix} \\ q_2 &= \begin{bmatrix} p_x - bU_x/2 + \sqrt{3}bV_x/2 \\ p_y - bU_y/2 + \sqrt{3}bV_y/2 \\ p_z - bU_z/2 + \sqrt{3}bV_z/2 \end{bmatrix} \\ q_3 &= \begin{bmatrix} p_x - bU_x/2 - \sqrt{3}bV_x/2 \\ p_y - bU_y/2 - \sqrt{3}bV_y/2 \\ p_z - bU_z/2 - \sqrt{3}bV_z/2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

Los vectores a_i de la plataforma base pueden ser expresados como:

$$\begin{aligned} a_1 &= [a \ 0 \ 0]^T \\ a_2 &= [a \cdot \cos 120 \ a \cdot \sin 120 \ 0]^T \\ a_3 &= [a \cdot \cos 240 \ a \cdot \sin 240 \ 0]^T \end{aligned} \quad (8)$$

Resolviendo la ecuación anterior, se obtiene:

$$\begin{aligned} a_1 &= [a \ 0 \ 0]^T \\ a_2 &= [-a/2 \ \sqrt{3} \cdot a/2 \ 0]^T \\ a_3 &= [-a/2 \ -\sqrt{3} \cdot a/2 \ 0]^T \end{aligned} \quad (9)$$

También los vectores unitarios d_{i0} de los tres actuadores lineales, de acuerdo a la Figura 1 se pueden expresar como:

$$\begin{aligned} d_{10} &= [-\cos \mathbf{a} \ 0 \ -\sin \mathbf{a}]^T \\ d_{20} &= [\cos \mathbf{a}/2 \ -\sqrt{3}(\cos \mathbf{a})/2 \ -\sin \mathbf{a}]^T \\ d_{30} &= [\cos \mathbf{a}/2 \ \sqrt{3}(\cos \mathbf{a})/2 \ -\sin \mathbf{a}]^T \end{aligned}$$

Teniendo en cuenta que \mathbf{a} es el ángulo entre cada riel y la plataforma base.

De acuerdo a la geometría del robot delta Keops mostrada en la Figura 3, se obtiene:

$$L_i = d_i d_{i0} + l_{i0} \text{ para } i=1,2,3. \quad (10)$$

$$L_i = q_i - a_i \text{ para } i=1,2,3. \quad (11)$$

Resolviendo la ecuación 10 se obtiene:

$$L_i - d_i d_{i0} = l_{i0} \quad (12)$$

Elevando al cuadrado a ambos lados de la ecuación 12 y resolviendo, se obtiene:

$$\begin{aligned} (L_i - d_i d_{i0})^2 &= (l_{i0})^2 \\ L_i^2 - 2d_i(L_i \cdot d_{i0}) + (d_i d_{i0})^2 &= (l_{i0})^2 \\ L_i^2 - 2d_i(L_i \cdot d_{i0}) + d_i^2(d_{i0} \cdot d_{i0}) &= l^2(l_{i0} \cdot l_{i0}) \end{aligned} \quad (13)$$

Como d_{i0} y l_{i0} son vectores unitarios, el producto escalar entre dos vectores unitarios es el coseno del ángulo entre ellos, entonces:

$$\begin{aligned} (d_{i0} \cdot d_{i0}) &= \cos 0 = 1 \\ (l_{i0} \cdot l_{i0}) &= \cos 0 = 1 \end{aligned}$$

Por tanto la ecuación 13 queda expresada como:

$$\begin{aligned} L_i^2 - 2d_i(L_i \cdot d_{i0}) + d_i^2 &= l^2 \\ d_i^2 - 2d_i(L_i \cdot d_{i0}) + L_i^2 - l^2 &= 0 \end{aligned} \quad (14)$$

La ecuación 14 se resuelve aplicando la solución de la ecuación cuadrática, que está dada por:

$$\begin{aligned} x &= \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \\ d_i &= \frac{2(L_i \cdot d_{i0}) \pm \sqrt{[2(L_i \cdot d_{i0})]^2 - 4(L_i^2 - l^2)}}{2} \end{aligned} \quad (15)$$

Resolviendo la ecuación anterior se obtiene la solución de la cinemática inversa del robot delta Keops, la cual se puede expresar como:

$$d_i = (L_i \cdot d_{i0}) \pm \sqrt{(L_i \cdot d_{i0})^2 - L_i^2 - l^2}$$

La ecuación anterior proporciona dos soluciones para cada actuador, en este proyecto se toma el menor valor de las dos soluciones para cada actuador.

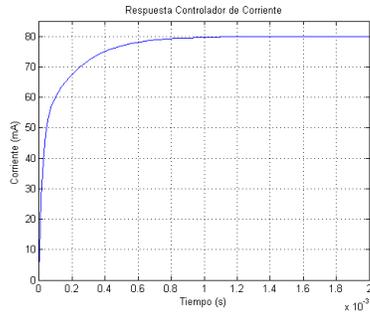


Fig. 8. Resultado simulación lazo de corriente (Respuesta Corriente).

Soportado en el lazo de control de corriente se realiza la regulación de velocidad. La arquitectura de control de velocidad se muestra en la Figura 6. En la Figura 9 se aprecia la respuesta del sistema frente a una entrada paso de 5000 rpm se comprueba que el sistema se estabiliza en la velocidad requerida a pesar de tener un pequeño sobreimpluso característicos de sistemas de segundo orden.

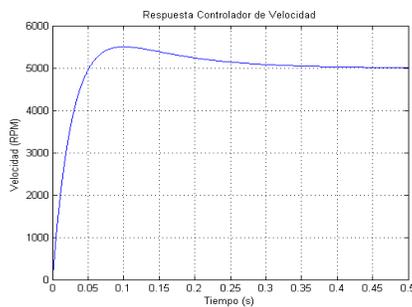


Fig. 9. Resultado simulación lazo Control de Velocidad (Velocidad).

La arquitectura de control de posición se muestra en la Figura 6. El regulador de posición se implementa como un controlador del tipo proporcional integral derivativo (PID). En la Figura 10 se aprecia la respuesta del sistema frente a una entrada paso de 500 qc se comprueba que el sistema se estabiliza en la posición requerida.

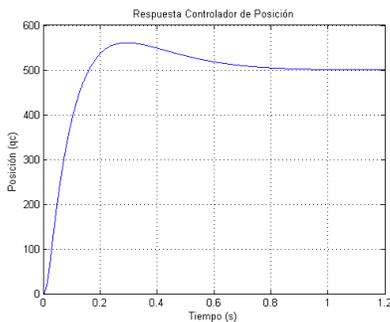


Fig. 10. Resultado simulación lazo de Posición (Entrada Paso).

5. ESPACIO DE TRABAJO DEL ROBOT PARALELO DELTA KEOPS

El espacio de trabajo propuesto es un espacio cilíndrico de 15 cm de diámetro y 22 cm de alto, se crea una nube con un número significativo de puntos igualmente espaciados los cuales se ubican dentro del cilindro. En cada uno de los puntos se realizan las verificaciones cinemáticas para corroborar que la plataforma móvil del robot alcanza cada uno de estos puntos (Reynoso & Favela, 2005), (Merlet, 2002).

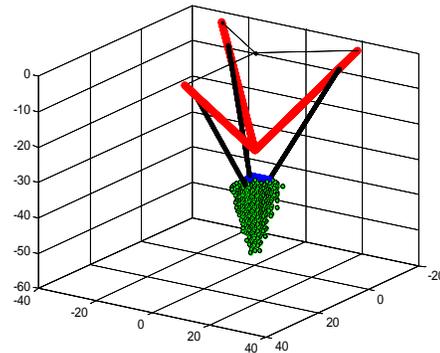


Fig. 11. Diagrama en bloques del Controlador PID.

En la Figura 11 se evidencia el espacio de trabajo general que cumple el robot paralelo delta Keops incluyendo las restricciones como son el ángulo de apertura en las articulaciones esféricas, bloqueo entre los brazos y límites máximos para evitar colisiones. Se puede verificar que en el espacio de trabajo del robot se encuentra el área de trabajo propuesta y el sistema alcanza correctamente cada uno de los puntos que comprenden este espacio de trabajo.

6. CÁLCULO ÓPTIMO DE LA DIMENSIONES DEL ROBOT

El objetivo es lograr un diseño que cumpla con el espacio de trabajo requerido y además tenga las menores dimensiones posibles generando un diseño óptimo. Para el proceso de optimización se empleó algoritmos genéticos (GAs) (Merlet, 2002). Los algoritmos genéticos inician la optimización con una población cuyas características permiten obtener el área de trabajo propuesta, luego se compara la solución de cada uno y los individuos que producen la mejor solución (evaluados por una función de objetivo por su desempeño) sobreviven. Los genes de los individuos que sobreviven se transmiten a la siguiente generación; esto,

acompañado de procesos de combinación y mutación, facilita la obtención de respuestas cada vez más cercanas al objetivo. Los resultados se plasman en el prototipo CAD (Ver Figura 2).

7. RESULTADOS

Los resultados obtenidos son satisfactorios por obtener un robot delta paralelo Keops funcional, en la figura 12 se observa el resultado del desarrollo del robot.

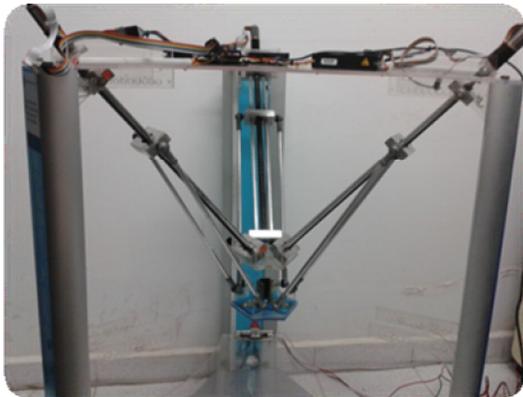


Fig. 12. Desarrollo Robot paralelo delta Keops.

Se logró cumplir con los requerimientos de diseño y crear un mecanismo simple de sujeción de los actuadores que permite la modificación del ángulo de inclinación de los actuadores para obtener variantes del robot que se puedan someter a estudio.

Para comprobar los resultados del control expuesto, se implementó un algoritmo computacional que permite crear por medio de fresado un triángulo. Se sometió el robot paralelo delta Keops construido a esta prueba y en la Figura 13 se expone el resultado obtenido.



Fig. 13. Pruebas de verificación.

8. CONCLUSIONES

Se realizó el estudio cinemático el cual describe correctamente el comportamiento del robot delta paralelo Keops, logrando determinar las coordenadas articulares de los actuadores para conseguir una posición dada del efector final o plataforma móvil y en hallar la posición o desplazamiento de cada uno de los tres actuadores lineales a partir de una posición dada de la plataforma móvil. Se crearon *scripts* en Matlab para validar el comportamiento de las dos configuraciones de robots.

El diseño de los controladores propuestos, responden a las condiciones cambiantes provocadas por la dinámica real del sistema robótico, logrando una acción de control donde se consigue seguir la señal de referencia requerida, demostrando que el controlador final se adecua y se acopla frente a las variaciones presentadas en la referencia.

El método del cálculo de espacio de trabajo por medio de verificación de un número grande de puntos proporciona un análisis muy aproximado de las condiciones cinemáticas, definiendo si un robot logra o no a cubrir el espacio de trabajo propuesto que para nuestro estudio fue un cilindro de diámetro 150 mm con 220 mm de altura.

RECONOCIMIENTO

Este trabajo se desarrolló con la colaboración de la Universidad de Pamplona a través de la Maestría en Controles Industriales y el Grupo de Investigación en Automatización y Control, el PhD. Cesar A. Peña Cortés y el PhD. Aldo Pardo García.

REFERENCIAS

- AG, I. (2011). Maxon Motor. *Sachseln, Switzerland*.
- Ahmed, N. A. (2005). *Modeling and simulation of ac-dc buck-boost converter fed dc motor with uniform PWM technique. Electric power systems research, 73(3), 363-372.*
- Ali, Y., Noor, S., Bashi, S., & Hassan, M. (2003). *Microcontroller performance for DC motor speed control system. Power Engineering Conference, 2003. PECon 2003. Proceedings. National, pp. 104-109.*

- Aracil, R., Saltarén, R., Sabater, J. M., y Reinoso, O. (2006). *Robots paralelos: Máquinas con un pasado para una robótica del futuro*. Revista iberoamericana de automática e informática industrial, 3(1), 16-28.
- Baturone, A. O. (2001). *Robótica: manipuladores y robots móviles*. Barcelona, España: Marcombo.
- Duran, L. D., Amaya, H. J., y Cortes, P. C. (2013). *Avances en el control de plataformas bípedas usando el sistema kinect*. Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada, 2(22), 117-124.
- George, M. A. (2010). *Model reference controlled separately excited DC motor*. Neural Computing and Applications, 19(3), 343-351.
- Gutiérrez R., J. (2012). *Desarrollo de un módulo didáctico de robótica paralela y visión artificial con un sistema de sujeción universal*. Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada.
- Hunt, K. (1983). *Structural kinematics of in-parallel-actuated robot-arms*. Journal of Mechanical Design, 105(4), 705-712. Retrieved from <http://mechanicaldesign.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1452244>
- Karaskakovski, I., & Shutinoski, G. (2008). *Comparison of sliding mode and proportional integral control for brushless DC motor*. Control Engineering Practice, 16, 429-443.
- Martínez O, E., Peña C, y Yime, E. (2010). *Diseño Óptimo de un robot paralelo con configuración delta para aplicaciones educativas*. Revista Educación en Ingeniería, 5(10), pp. 110-119.
- Merlet, J.-P. (2002). *Optimal design for the micro parallel robot MIPS*. Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA'02. IEEE International Conference on, 2, pp. 1149-1154.
- Mitsi, S., Bouzakis, K., Misopolinos, L., & Milutinovic, D. (2008). *Optimal design of three translational 3 DOF parallel mechanisms for machining processes with genetic algorithms*. Proceedings of the 3rd International Conference on Manufacturing Engineering (ICMEN), pp. 1-3.
- Pardo, A. y Díaz, J. (2004). *Fundamentos en sistemas de control automático*. Fundamentos en sistemas de control automático. Universidad de Pamplona.
- Pierrot, F., Reynaud, C., & Fournier, A. (1990). *DELTA: a simple and efficient parallel robot*. Robotica, 8(02), 105-109.
- Reynoso, G., y Favela, A. (2005). *Maximización del espacio de trabajo en un robot manipulador paralelo tipo Delta con actuadores lineales*. Memorias del Congreso Nacional de la Asociación Mexicana de Control Automático, AMCA.
- Riaño, J. C., Peña, C. C., & Pardo, G. A. (2014). *Approach in the Optimal Development of Parallel Robot for Educational Applications*. WSEAS: Recent Advances in Intelligent Control, Modelling and Simulation, Cambridge, USA.
- Siegenthaler, C., Rufli, M., & Schafroth, D. (2009). *Energy Consumption Minimization on a Robotic Fish*. Swiss Federal Institute of Technology, Zurich.
- Vivas, A., & Poignet, P. (2009). *Control predictivo de un robot paralelo*. RIAII, 3(4), 45-52.
- Wang, Z., Wang, G., Ji, S., Wan, Y., & Yuan, Q. (2007). *Optimal design of a linear delta robot for the prescribed cuboid dexterous workspace*. Robotics and Biomimetics, 2007. ROBIO 2007. IEEE International Conference on, (pp. 2183-2188).