

# Diseño y construcción de un prototipo de robot delta para aplicaciones pick & place

Wladimir Pachacama, Juan Salazar, Marco Herrera, Nelson Sotomayor  
Escuela Politécnica Nacional, Quito-Ecuador

**Resumen**—En este artículo se presenta el análisis cinemático, las singularidades y el diseño mecánico de un prototipo de robot de estructura paralela de tres grados de libertad denominado manipulador delta. Se diseña y construye un prototipo mecánico de robot delta que ejecuta tareas de ordenamiento, apilamiento de objetos circulares y seguimiento de trayectorias. Sus movimientos se basan en el análisis cinemático el cual es determinado mediante el método geométrico.

Con el objetivo de tener un prototipo autónomo se implementa un sistema de visión artificial utilizando las herramientas de Matlab para la detección de objetos, dichos objetos detectados se convierten en puntos de referencia para el movimiento del manipulador de estructura paralela delta y con el fin de obtener movimientos continuos se utiliza una interpolación entre puntos basado en un polinomio de quinto orden.

**Palabras clave**—Robot Delta, Análisis Cinemático, Visión Artificial, Singularidades, Dynamixel.

## I. INTRODUCCIÓN

El uso de los robots en la automatización de procesos industriales cada día aumenta con los denominados manipuladores cuyo estudio avanza y combina varias ingenierías como la electrónica, la computación y la mecánica dando como resultados nuevos mecanismo que cumplen la función de un brazo, como es el caso de los robots paralelos. [1]

La actuación en este tipo de manipuladores se lleva a cabo a través de  $n$  actuadores simples [2]. Esta condición hace que los manipuladores paralelos tengan una mayor rigidez, puedan trabajar a mayor velocidad, mayor relación carga/peso y cuenten con más precisión que los robots seriales, que son los más comunes en la industria [3].

Varios trabajos han sido elaborados con este tipo de configuración y las aplicaciones son variadas, desde simuladores de vuelo [4], hasta rotuladores en dos dimensiones [5], obteniendo de esta manera una gama de configuraciones paralelas. Algunos de estos trabajos se pueden apreciar en [6], [7], [8].

Los robots paralelos fueron introducidos ya hace algunos años por Stewart en 1965 y Gough en 1975. En el año de 1989 Clavel, propone un modelo llamado robot delta, cuyo mecanismo está conformado por una base fija y una base

móvil unido por tres cadenas cinemáticas; cada cadena cinemática está formada por dos eslabones y unidos por articulaciones esféricas [2]. Uno de los grandes inconvenientes de este tipo de robots es el problema de singularidad debido a la presencia de las articulaciones pasivas.

El robot delta está siendo aplicado principalmente a nivel de la industria alimenticia, como manipuladores en líneas de empacado de alta velocidad. [3]

En la sección II se presenta el análisis cinemático, el análisis de singularidades y el desarrollo del espacio de trabajo del prototipo diseñado. El diseño mecánico y sistema de control son detallados en la sección III, finalmente las pruebas experimentales de ordenamiento, apilamiento y el seguimiento de una trayectoria definida se presentan en la sección IV.

## II. ANÁLISIS CINEMÁTICO Y SINGULARIDADES

La cinemática estudia el movimiento de un mecanismo con respecto a un sistema sin tomar en cuenta las fuerzas que intervienen. Así la cinemática se interesa por la descripción analítica del movimiento espacial del robot como función del tiempo y en particular por las relaciones entre la posición de la plataforma móvil con los valores que toman sus coordenadas articulares [1]. Los análisis más comunes para su resolución son la representación de Denavit-Hartenberg (D-H) y la solución geométrica, este último método se plantea en este trabajo, considerando la simetría del robot.

En un robot manipulador existen dos tipos de cinemáticas que deben ser analizadas la cinemática directa y la cinemática inversa, los cuales permiten relacionar los valores de las coordenadas articulares con la posición de la plataforma móvil [1].

Para comenzar el análisis del robot delta se debe establecer un modelo geométrico, donde se presentan las variables que serán utilizadas. En la Fig. 1. se muestra un esquema del robot delta con sus variables.

Se coloca un sistema de referencia  $OXYZ$  en el centro de la plataforma fija, con el eje  $Z$  perpendicular a la plataforma y el eje  $X$  perpendicular al eje del motor1. Un segundo sistema  $A_iX_iY_iZ_i$  se coloca sobre el eje del motor trasladándose una distancia  $R$  sobre el eje  $OX$ , y rotado  $\theta_i$  alrededor de  $OZ$ .

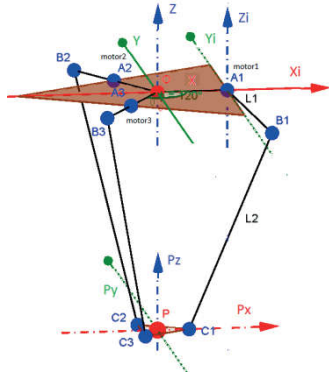


Fig.1. Modelo geométrico del robot delta.

Considerando la simetría del robot, cada cadena cinemática puede ser tratada por separado como se muestra en la Fig.2.

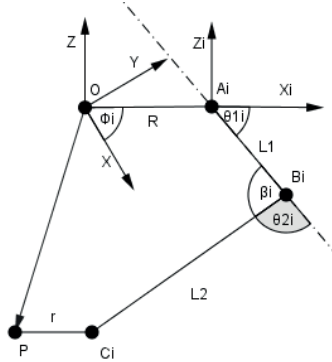


Fig.2. Representación de una cadena cinemática rotada y trasladada.

Considerando las matrices de rotación y traslación se pueden obtener los siguientes vectores:

$$\overline{OA_i} = \begin{bmatrix} c\phi_i & -s\phi_i & 0 & Rc\phi_i \\ s\phi_i & c\phi_i & 0 & Rs\phi_i \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Rc\phi_i \\ Rs\phi_i \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\overline{OB_i} = \begin{bmatrix} c\phi_i & -s\phi_i & 0 & Rc\phi_i \\ s\phi_i & c\phi_i & 0 & Rs\phi_i \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_1 c\theta_{1i} \\ 0 \\ -L_1 s\theta_{1i} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\phi_i(L_1 c\theta_{1i} + R) \\ s\phi_i(L_1 c\theta_{1i} + R) \\ -L_1 s\theta_{1i} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\overline{OC_i} = \begin{bmatrix} c\phi_i & -s\phi_i & 0 & Rc\phi_i \\ s\phi_i & c\phi_i & 0 & Rs\phi_i \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_x c\phi_i + P_y s\phi_i + r - R \\ P_y c\phi_i - P_x s\phi_i \\ P_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_x + r c\phi_i \\ P_y + r s\phi_i \\ P_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\overline{B_i A_i} = \overline{OA_i} - \overline{OB_i} = \begin{bmatrix} -c\phi_i L_1 c\theta_{1i} \\ -s\phi_i L_1 c\theta_{1i} \\ L_1 s\theta_{1i} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\overline{B_i C_i} = \overline{OC_i} - \overline{OB_i} = \begin{bmatrix} P_x - c\phi_i(R + L_1 c\theta_{1i} - r) \\ P_y - s\phi_i(R + L_1 c\theta_{1i} - r) \\ P_z + L_1 s\theta_{1i} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\overline{A_i C_i} = \overline{OC_i} - \overline{OA_i} = \begin{bmatrix} P_x - c\phi_i(r - R) \\ P_y - s\phi_i(r - R) \\ P_z \end{bmatrix} \quad (6)$$

#### A. Cinemática Inversa.

La cinemática inversa determina las posiciones articulares de cada actuador para una posición conocida de la plataforma móvil. Basados en la representación vectorial de la primera cadena cinemática de la Fig. 3 se plantea lo siguiente:

$$A_i C_i^2 = L_1^2 + L_2^2 - 2L_1 L_2 \cos(\beta_i) \quad (7)$$

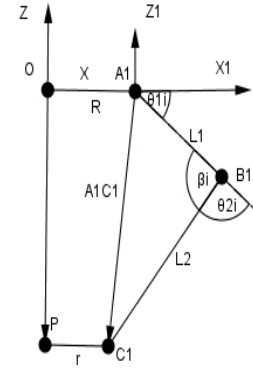


Fig.3. Representación vectorial de la primera cadena cinemática.

La ecuación (8) muestra el cálculo de la posición que debe adoptar el actuador para una determinada postura del efector final en el punto  $P(P_x, P_y, P_z)$  con dimensiones  $R$  para el diámetro de la base fija,  $r$  para el del efector final,  $L_1$  y  $L_2$  que corresponden a las dimensiones de los eslabones.

$$\theta_{1i} = \sin^{-1} \left( \frac{c_i}{\sqrt{a_i^2 + b_i^2}} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{b_i}{a_i} \right) \quad (8)$$

Donde:

$$a_i = -2P_z L_1;$$

$$b_i = 2L_1(P_x c\phi_i + P_y s\phi_i + r - R);$$

$$c_i = (P_x + c\phi_i(r - R))^2 + (P_y + s\phi_i(r - R))^2 + P_z^2 + L_1^2 - L_2^2$$

#### B. Cinemática Directa.

La cinemática directa determina la posición del efector final conociendo la posición de los actuadores. Para establecer las relaciones matemáticas que determinen la posición del efector final se parte de (5) donde se define el vector  $\overline{BC_i}$  y cuya magnitud es  $L_2$  que viene dado por:

$$\|\overline{BC_i}\| = (P_x - c\phi_i(R + L_1 c\theta_{1i} - r))^2 + (P_y - s\phi_i(R + L_1 c\theta_{1i} - r))^2 + (P_z + L_1 s\theta_{1i})^2 = L_2^2 \quad (9)$$

Reemplazando los valores de  $\phi_i = (0^\circ, 120^\circ, 240^\circ)$  determinados por la simetría del robot delta en (9) se obtiene:

$$P_x^2 + 2a_1P_x + P_y^2 + P_z^2 - 2a_2P_z = a_3 \quad (10)$$

Donde:

$$\begin{aligned} a_1 &= r - R - L_1c\theta_{11} \\ a_2 &= L_1s\theta_{11} \\ a_3 &= L_2^2 - a_1^2 - a_2^2 \end{aligned}$$

$$P_x^2 + b_1P_x + P_y^2 - \sqrt{3}b_1P_y + P_z^2 - 2b_2P_z = b_3 \quad (11)$$

Donde:

$$\begin{aligned} b_1 &= R - r + L_1c\theta_{12} \\ b_2 &= L_1s\theta_{12} \\ b_3 &= L_2^2 - b_1^2 - b_2^2 \end{aligned}$$

$$P_x^2 + c_1P_x + P_y^2 + \sqrt{3}c_1P_y + P_z^2 - 2c_2P_z = c_3 \quad (12)$$

Donde:

$$\begin{aligned} c_1 &= R - r + L_1c\theta_{13} \\ c_2 &= L_1s\theta_{13} \\ c_3 &= L_2^2 - c_1^2 - c_2^2 \end{aligned}$$

Las ecuaciones (10), (11) y (12) son utilizadas en el cálculo de  $P_x$ ,  $P_y$  y  $P_z$ .

$$P_y = \frac{A+BP_z}{c} \quad (13)$$

Donde:

$$\begin{aligned} A &= \frac{a_3 - b_3}{2a_1 - b_1} - \frac{a_3 - c_3}{2a_1 - c_1} \\ B &= \frac{2(c_2 - a_2)}{2a_1 - c_1} - \frac{2(b_2 - a_2)}{2a_1 - b_1} \\ C &= \frac{\sqrt{3}b_1}{2a_1 - b_1} + \frac{\sqrt{3}c_1}{2a_1 - c_1} \end{aligned}$$

$$P_x = D - EP_z \quad (14)$$

Donde:

$$\begin{aligned} D &= \frac{a_3 - b_3}{2a_1 - b_1} - \frac{\sqrt{3}b_1A}{C(2a_1 - b_1)} \\ E &= \frac{2(b_2 - a_2)}{2a_1 - b_1} + \frac{\sqrt{3}b_1A}{C(2a_1 - b_1)} \\ P_z &= \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \end{aligned} \quad (15)$$

Donde:

$$a = E^2 + \left(\frac{B}{C}\right)^2 + 1$$

$$b = 2 \left( \frac{AB}{C^2} - DE - a_1E - a_2 \right)$$

$$c = D^2 + \left(\frac{A}{C}\right)^2 + 2a_1D - a_3$$

### C. Análisis de Singularidades

Una configuración singular es aquella en la que el efector final adopta una posición de tal manera que hace que el robot paralelo pierda su rigidez, o este forzando el movimiento de una junta, pudiendo de esta manera desestabilizar al robot.

#### 1) Matriz Jacobiana:

En el análisis de singularidad de una cadena cinemática cerrada se plantea que estas poseen un vector de entrada  $\theta$  y un vector de salida  $x$ , que corresponden a las articulaciones activas (motores) y a las coordenadas cartesianas del efector final respectivamente, donde la relación de estos vectores es [9]:

$$F(\theta, x) = 0 \quad (16)$$

Derivando (16) con respecto al tiempo se tiene:

$$\frac{\partial F}{\partial \theta} \dot{\theta} + \frac{\partial F}{\partial x} \dot{x} = J_\theta \dot{\theta} + J_x \dot{x} = 0 \quad (17)$$

La ecuación (17) reescrita muestra una relación entre a velocidades de entrada y salida del manipulador.

$$\dot{\theta} = J\dot{x} = (J_\theta)^{-1}J_x\dot{x} \quad (18)$$

Entonces se obtiene una matriz Jacobiana ( $J$ ) que queda separada en una matriz asociada a la cinemática directa  $J_x$  y otra matriz asociada a la cinemática inversa  $J_\theta$ , donde las dos matrices son de orden  $n \times n$ .

Elementos de la matriz Jacobiana asociada a la cinemática directa.

$$J_x = \begin{bmatrix} j_{x11} & j_{x12} & j_{x13} \\ j_{x21} & j_{x22} & j_{x23} \\ j_{x31} & j_{x32} & j_{x33} \end{bmatrix} \quad (19)$$

Donde:

$$\begin{aligned} j_{xi1} &= S\theta_{3i}C(\theta_{1i} + \theta_{2i})C\phi_i - C\theta_{3i}S\phi_i \\ j_{xi2} &= S\theta_{3i}C(\theta_{1i} + \theta_{2i})S\phi_i + C\theta_{3i}C\phi_i \\ j_{xi3} &= S\theta_{3i}S(\theta_{1i} + \theta_{2i}) \end{aligned}$$

Elementos de la matriz Jacobiana asociada a la cinemática inversa (Elementos de la diagonal principal).

$$J_\theta = \begin{bmatrix} j_{\theta 1} & 0 & 0 \\ 0 & j_{\theta 2} & 0 \\ 0 & 0 & j_{\theta 3} \end{bmatrix} \quad (20)$$

Donde:

$$j_{\theta_i} = L_1 S \theta_{3i} S \theta_{2i}$$

Por definición una matriz se dice singular si no posee su inversa, lo que directamente quiere decir que una matriz presenta singularidad si su determinante es cero.

La singularidad correspondiente a la cinemática directa corresponde a configuraciones en las que el efector final esta localmente en movimiento aun cuando sus actuadores estén inmóviles. La singularidad referente a la cinemática inversa corresponde a configuraciones en la cual una cadena cinemática alcanza un límite de su espacio de trabajo. Lo que implica que pequeños movimientos del efector final en ciertas direcciones no pueden ser alcanzados.

$$\det \begin{pmatrix} j_{\theta_1} & 0 & 0 \\ 0 & j_{\theta_2} & 0 \\ 0 & 0 & j_{\theta_3} \end{pmatrix} = j_{\theta_1} * (j_{\theta_2} * j_{\theta_3}) = 0 \quad (21)$$

La ecuación (21) puede ser escrita de la siguiente forma:

$$\det(J_{\theta}) = L_1 S \theta_{31} S \theta_{21} * L_1 S \theta_{32} S \theta_{22} * L_1 S \theta_{33} S \theta_{23} \quad (22)$$

Para que (22) sea igual a cero  $\theta_{2i} = 0^\circ$  o  $180^\circ$  y  $\theta_{3i} = 0^\circ$  o  $180^\circ$

2) Destreza del robot delta:

La destreza de un robot paralelo se puede definir como la precisión del posicionamiento del efector final dentro de su espacio de trabajo, para su cálculo se establece un valor denominado número de condición [7].

$$k(J) = \|J\| \|J^{-1}\| \quad (23)$$

La destreza local *CI* queda definida como la inversa del número de condición, los valores de *CI* estan entre “0” y “1”, en donde el valor de “0” indica que el robot está en configuración singular, por el contrario si el valor es “1”, su configuración es isotrópica.

Para tener un dato general de la destreza del robot tipo delta se hace una suma de las destrezas locales a lo largo de todo el espacio de trabajo [10].

$$GCI = \frac{\sum_{i=1}^W CI}{W} \quad (24)$$

D. Análisis del Espacio de Trabajo

Para determinar el espacio de trabajo que puede alcanzar el robot delta es necesario conocer dos factores importantes como son el método por el cual se va a determinar y además conocer las dimensiones del robot. Las dimensiones del robot delta son calculadas por el algoritmo de óptimos mínimos que se toma de [11], para desarrollar este algoritmo se parte de dos valores iniciales los cuales son el radio de la base fija (R) y el de la base móvil (r) con el objetivo de no tener un robot demasiado grande, además se parte de un espacio de trabajo

preestablecido el cual se consideró necesario para cumplir tareas de apilamiento y ordenamiento.

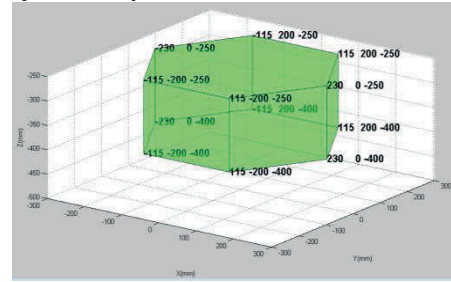


Fig.4. Espacio de trabajo establecido.

La Fig.4 es un hexágono con un radio interno de 200[mm] con una altura de 250[mm] partiendo de -400[mm] en el eje z. Los valores que arroja el algoritmo de óptimos mínimos se presentan luego de haber sido ajustados con referencia a [11][12][13], se obtiene la Tabla I.

TABLA I. DIMENSIONES DEL ROBOT DELTA

L <sub>1</sub> [mm]	L <sub>2</sub> [mm]	R [mm]	r [mm]
180	380	110	30

Con estos datos se calcula el espacio de trabajo por el siguiente método.

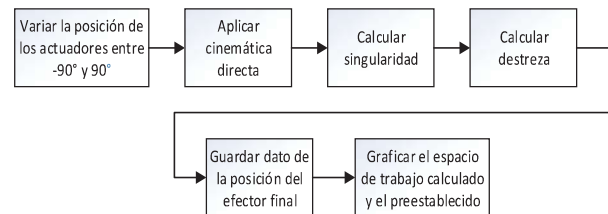


Fig.5. Diagrama de bloques para el cálculo del espacio de trabajo.

Además de la Fig. 5 se obtiene el valor de destreza global el cual es,  $GCI = 0.4179$

III. DISEÑO MECÁNICO Y SISTEMA DE CONTROL

Con las dimensiones ya establecidas del prototipo, se proceden a diseñar las piezas en el software Solidwork 2016, estas herramientas nos permiten observar la forma del prototipo y también calcular el peso y la deformación al aplicar una fuerza determinada.

Los materiales empleados son hierro para el soporte y la base fija, aluminio para los eslabones plástico ABS para piezas complementarias.

Se realiza un análisis estático con el fin de validar las dimensiones y materiales del prototipo de robot delta para su posterior construcción, este análisis se realiza en las piezas en donde se considera que el robot soporta la mayor carga.

El primer estudio estático se realizó en el acople del eje del actuador con el eslabón L<sub>1</sub>, cuyas longitud es de 85 mm y un radio de 5 mm. La sujeción del eje, son las caras cilíndricas

en las cuales el eje se soporta sobre dos rodamientos, uno en cada extremo aplicando una fuerza de 10 [N], en la misma dirección de la gravedad.

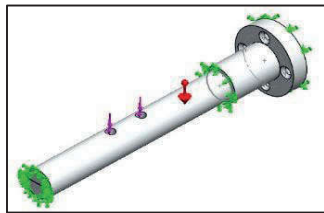


Fig.6. Análisis de Fuerzas sobre el eje de acople.

A continuación se muestran el análisis por elementos finitos que muestra la máxima deformación que se tiene en la pieza representada de color rojo, cuyo valor de desplazamiento es  $1.508 \times 10^{-4}$  [mm], este valor es muy pequeño y nos indica que la pieza trabajará correctamente con cargas menores a los 10 [N].

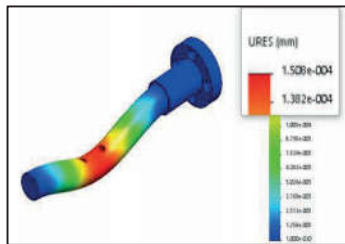


Fig.7. Desplazamientos en el eje de acople.

El segundo estudio estático se realiza en el eslabón  $L_1$ , cuya función es la de transmitir el movimiento del actuador al eslabón  $L_2$  y a la base móvil, como se muestra en las Fig. 8 y 9.

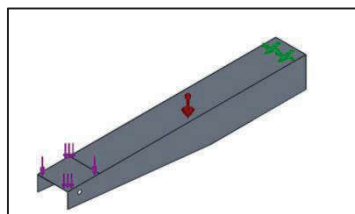


Fig.8. Análisis de fuerzas sobre el eslabón  $L_1$ .

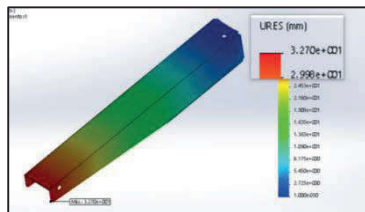


Fig.9. Desplazamientos del eslabón  $L_1$ .

Finalmente se hace el análisis sobre el brazo de sujeción

estática el cual está construida con un tubo de hierro de  $30 [mm] \times 30 [mm]$  y cuyo resultado se pueden apreciar en las Fig.10 y Fig.11, en este caso la carga aplicada es de 50 [N].



Fig.10. Análisis de fuerzas del brazo de sujeción estática.

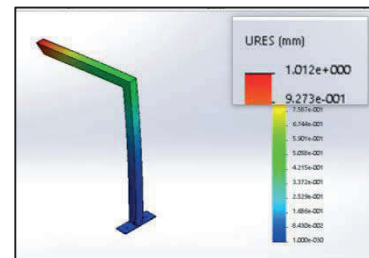


Fig.11. Desplazamientos del brazo de sujeción estática.

Además, se obtiene información sobre la tensión de Von-Mises o también denominada teoría de energía de distorsión, esta teoría se presenta en materiales dúctiles que son capaces de absorber una cierta cantidad de energía antes de sufrir una falla o de romperse.

Los robots paralelos tienen la característica de ser simétricos y basándose en este concepto se realizó el análisis por el método geométrico; a continuación, se muestra en la Fig.12, que la distribución de los actuadores en el prototipo cumple con esta definición.

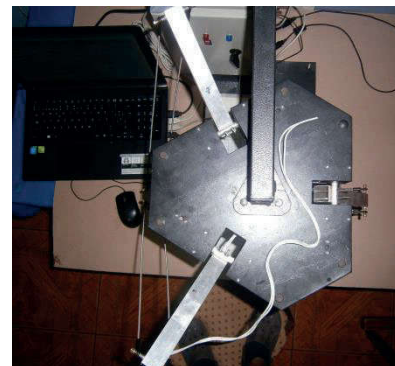


Fig.12. Distribución de actuadores

Los actuadores están separados  $120^\circ$  entre sí y con ayuda

del eje de acople se conectan a los eslabones  $L_1$  y este mediante juntas esféricas al eslabón  $L_2$  formando un paralelogramo, los cuales se unen a la base móvil.

Finalmente, el robot ensamblado junto a su fuente de poder se muestra en la Fig.13.



Fig.13. Prototipo robot delta terminado.

#### IV. SISTEMA DE CONTROL

El sistema de control es implementado en el software Matlab R2014a, en la Fig. 14se muestra la interfaz del usuario la cual permite realizar las pruebas de movimientos y tareas de apilamiento y ordenamiento.



Fig.14. Ventana de Matlab, prueba de movimientos.

##### A. Generación de trayectorias punto a punto.

El control de movimiento se lo realiza mediante una interpolación entre los puntos especificados, para lo cual se emplea una definición paramétrica de la curva que permita la generación de movimientos tanto en el espacio de trabajo como en el espacio de las variables articulares, para lo cual se utiliza un polinomio de quinto grado.

$$P(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4 + a_5t^5 \quad (25)$$

Siguiendo el procedimiento se obtienen la primera y segunda derivada de la ecuación (25).

$$\dot{P}(t) = a_1 + 2a_2t + 3a_3t^2 + 4a_4t^3 + 5a_5t^4 \quad (26)$$

$$\ddot{P}(t) = 2a_2 + 6a_3t + 12a_4t^2 + 20a_5t^3 \quad (27)$$

Para  $t = 0$ , se tiene:

$$P(0) = a_0$$

$$\dot{P}(0) = a_1$$

$$\ddot{P}(0) = 2a_2$$

Considerando que la primera y segunda derivada representan la velocidad y aceleración respectivamente, para  $t=0$ , se tiene que:

$$a_1 = 0$$

$$2a_2 = 0 \rightarrow a_2 = 0$$

Ahora considerando  $t = t_f$ , donde  $t_f$  es el tiempo final del recorrido y luego reemplazándolo en las ecuaciones (25), (26) y (27) se tiene un sistema de tres ecuaciones con 3 incógnitas que arroja como resultado el polinomio característico para una curva suave entre dos puntos.

$$P(t) = 10 \left(\frac{t}{t_f}\right)^3 + 15 \left(\frac{t}{t_f}\right)^4 + 6 \left(\frac{t}{t_f}\right)^5 \quad (28)$$

Como una forma de asegurar los movimientos suaves y evitar las vibraciones del efector final, al momento de la ejecución de tareas se implementa un controlador PID que regulara la salida de los actuadores.

##### B. Controlador proporcional, integral, derivativa (PID).

Este tipo de control es el más utilizado ya que en la mayoría de los casos suele dar buenos resultados. Para utilizar este controlador se parte de una base que es el error entre el valor deseado y el valor medido, este último debe ser lo más preciso posible para que el resultado de la variable controlada sea mejor [14]. Por las características de los datos que se obtienen en la realimentación de los motores se usa la forma digital del PID.

$$U[n] = U[n-1] + E[n] \frac{2K_p T_m + 2K_d + K_i T_m^2}{2T_m} + E[n-1] \frac{K_i T_m^2 - 2K_p T_m - 4K_d}{2T_m} + E[n-2] \frac{K_d}{T_m} \quad (29)$$

El sistema de control del manipulador delta se muestra el diagrama de bloques de la Fig.15.

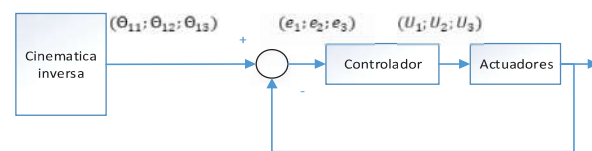


Fig.15. Diagrama de bloques del sistema de control.

TABLA II. PARÁMETROS DEL CONTROLADOR PI.

Actuadores	$Kp$	$Ki$
Actuador 1	0.58	0.05
Actuador 2	0.68	0.07
Actuador 3	0.58	0.09

En la Tabla II se muestra los parámetros del controlador PID sobre los actuadores sintonizados basados en pruebas de ensayo y error. A continuación, en la Fig. 16 se muestra la respuesta del actuador 1 para el cambio de referencia de posición angular.

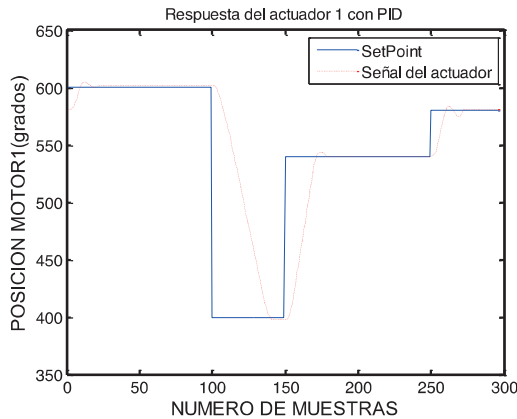


Fig. 16. Respuesta del controlador en el actuador 1.

El actuador 2 y 3 presentan las mismas respuestas ante cambios de referencia de posición.

## V. RESULTADOS EXPERIMENTALES

El uso de los motores con nuevas tecnologías han logrado dar un mejor rendimiento en el control de robots manipuladores, específicamente el motor utilizado en este trabajo, el Dynamixel [15] puede ser fácilmente adaptado a la plataforma Arduino que presenta diversas funciones y facilidades de programación lo cual fue una herramienta útil y necesaria para enlazar los motores con el software de control, en esta tarjeta se insertan librerías para controlar el servomotor y se envían órdenes desde el software y la tarjeta se encarga de codificarlas [16].

Para detectar los objetos en el espacio de trabajo se coloca una cámara que apunta directamente al centro. Capturada la imagen se procesa con el toolbox de Matlab para buscar objetos de forma circular y de un diámetro entre 50 [mm] y 70 [mm] y que corresponden a los objetos con los que trabaja el prototipo diseñado, como se muestra en la Fig. 17.

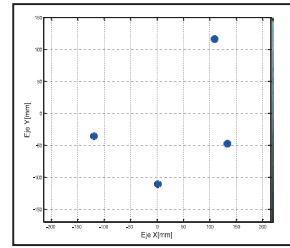


Fig. 17. Detección de los centros de objetos circulares de un diámetro determinado.

Para ejecutar las tareas con movimientos suaves se aplica la trayectoria punto a punto descrita mediante (28). A continuación, se explica el procedimiento referente al apilamiento de objetos:

Inicialmente los objetos están aleatoriamente distribuidos dentro del campo de visión de la cámara. La Fig. 18 muestra los objetos detectados por el sistema de visión.

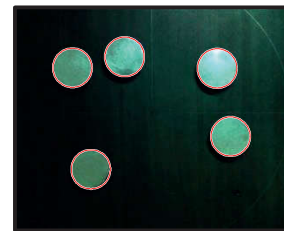


Fig. 18. Detección de objetos.

El sistema de visión procesa la información y da una representación en un plano cartesiano, donde se presenta la ubicación del objeto en el plano xy como se muestra en la Fig. 19.

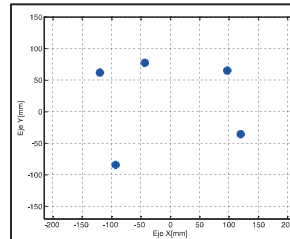


Fig. 19. Representación de objetos en el plano xy.

El robot delta procede a apilar los objetos en el punto (0,0) del sistema de coordenadas u otro punto determinado por el operador, como se muestra en la Fig. 20.



Fig. 20. La ejecución del apilamiento de objetos en el punto (0,0).

En la Fig. 21 se muestra el comportamiento del robot frente al seguimiento de una trayectoria programada en Matlab y

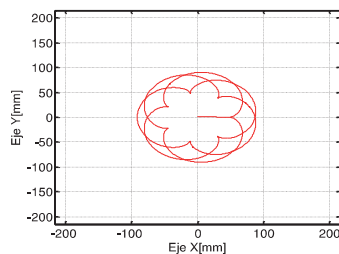


Fig.21. Trayectoria creada en Matlab.

En la Fig. 22 la trayectoria real ejecutada por el prototipo diseñado.

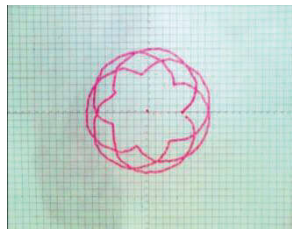


Fig.22. Trayectoria seguida por el prototipo.

## VI. CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta el análisis cinemático, análisis de singularidades y destreza de un prototipo de robot de estructura paralela de 3 grados de libertad.

El prototipo del robot delta es capaz de realizar el apilamiento, ordenamiento y seguimiento de trayectorias con movimientos suaves utilizando interpolación punto a punto mediante un polinomio de quinto orden.

## VII. REFERENCIAS

- [1] Barrientos, A., Peñín, L., Balaguer, C., & Aracil, R., (2007), "Fundamentos de Robótica", Editorial McGraw-Hill/Interamericana, Madrid.
- [2] Merlet, J.P., (2006), "Parallel Robots". Segunda edición, Editorial Springer, The Netherlands, Dordrecht.
- [3] Bonev, I., (2001), "Affordable Academic Parallel Robots". [En línea]. Disponible en: <http://www.parallernic.org/Reviews/Review002.html>
- [4] Arias, R.,(2013), "Diseño, construcción y control de una plataforma stewart con 6 grados de libertad que funcione como un simulador de vuelo", Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- [5] Yanez, R., (2007), "Resolución de mecanismo paralelo planar 3RRR impulsado por actuadores eléctricos", Instituto Politécnico Nacional, Querétaro.
- [6] Tumbaco, D., Quimbíta, W., "Diseño y construcción de un prototipo de robot delta con implementación de un cortador laser CNC utilizando la plataforma ROBOTIC OPERATING SYSTEM (ROS) para la elaboración de artículos publicitarios", Escuela Politécnica del Ejército, Quito.
- [7] Urea, L., & Medina, S., (2012), "Diseño e implementación de una plataforma robótica tipo delta" (Tesis de pregrado), Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá.
- [8] Briomes, J., (2009), "Diseño, Análisis y construcción de un robot paralelo traslacional", Instituto Politécnico Nacional, Querétaro.
- [9] Gosselin & Angeles, (1990), Singularity Analysis of Closed-Loop Kinematic Chain, IEEE Transactions on Robotics and Automation, DOI: 10.1109/70.56660 - Source: IEEE Xplore.

delta", IV congreso internacional de ingeniería mecatrónica y automatización.

- [11] Peña, C., & Martínez, E., & Cárdenas, P., (2011), "Optimización dimensional de un robot paralelo tipo delta basado en el menor consumo de energía", Ciencia e Ingeniería Neogranadina, Vol. 21-1, pp, 73-88.
- [12] Balmaceda, A., (2011), "Metodología de rediseño de un robot paralelo tipo delta de 3 grados de libertad en función de un espacio de trabajo prescrito" (Tesis de maestría), Instituto Politécnico Nacional, Querétaro.
- [13] Cortés, J., & Cortés, H., & García, J., (2013), "Diseño óptimo dimensional de una máquina robótica de arquitectura paralela para aplicaciones pick & place", VI congreso internacional de ingeniería mecánica y IV de ingeniería mecatrónica.
- [14] Sotomayor, N., Msc, (2009), "Control con microprocesadores", Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- [15] Manual de usuario Dynamixel AX-12 A , 2006.
- [16] Aceves. A., PhD, Manual Bioloid de Robotis.

## VIII. BIOGRAFÍAS

**Wladimir Pachacama**, nació en Quito-Ecuador el 29 de Octubre de 1988. Realizó sus estudios secundarios en el Colegio Técnico Don Bosco. Se graduó en la Escuela Politécnica Nacional como Ingeniero en Electrónica y Control.

Áreas de interés: Robótica, Automatización e Instrumentación industrial, controladores lógico programable.



**Juan Salazar**, nació en Quito-Ecuador el 26 de Octubre 1988. Sus estudios secundarios los realizo en el Colegio Nacional Mixto Eloy Alfaro. Se graduó en la Escuela Politécnica Nacional como Ingeniero en Electrónica y Control

Áreas de interés: Robótica, automatización y control industrial.



**Marco Herrera**. Se graduó de ingeniero en Electrónica y control en la Escuela Politécnica Nacional, Quito-Ecuador, en el 2009. Obtuvo su título de maestría en Automática y Robótica en la Universidad Politécnica de Madrid, España 2014. Del 2010 al 2012 fue docente en la Universidad Internacional del Ecuador, Quito-Ecuador. Desde el 2014 es docente en el departamento de automatización y control industrial de la Escuela Politécnica Nacional. Sus principales actividades de enseñanza

e investigación se han relacionado con los sistemas de control y robótica. Áreas de interés: control óptimo, control por modos deslizantes, modelado y control difuso.



**Nelson Sotomayor**, nació en Quito-Ecuador el 9 de Septiembre de 1971. Realizó sus estudios secundarios en el Instituto Nacional Mejía. Se graduó en la Escuela Politécnica Nacional como Ingeniero en Electrónica y Control en 1999. Obtuvo su título de Magíster en Ingeniería industrial en junio del 2006 en la Escuela Politécnica Nacional. En septiembre del 2008 como becario del Gobierno de México y la Agencia de Cooperación Internacional del Japón

(JICA), participó en el IV Curso Internacional de Robótica Aplicada, en el Centro Nacional de Actualización Docente CNAD ubicado en México DF. Actualmente desempeña el cargo de Profesor Principal T/C en el Departamento de Automatización y Control Industrial de la

