

# Control de Seguimiento de Trayectoria y Paletización de un Robot de Tres Grados de Libertad Tipo SCARA (*Selective Compliance Assembly Robot Arm*)

Boada Y. \*; Morales L. \*; Sotomayor N. \*

*\*Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica  
Quito, Ecuador (Tel: +593-2-2507-144; e-mail: yadira.boada@epn.edu.ec;  
luis.moralesec@epn.edu.ec; nelson.sotomayor@epn.edu.ec)*

---

**Resumen:** *El presente trabajo se centra en el ensamblaje de un robot SCARA de tres grados de libertad y su posterior control para el seguimiento de trayectorias y tareas de paletización. Este manipulador cuenta con tres eslabones unidos por dos articulaciones de tipo revoluto y una prismática, las cuales le proporcionan movilidad en los tres planos. Utilizando programación de alto nivel, se ha diseñado una interfaz de usuario o HMI en el computador desde el cual se envían y se recibe información del robot a través de una tarjeta de adquisición de datos. El programador puede definir tareas como la colocación de una pinza en una posición, generar trayectorias y tareas de paletización deseadas. La regulación y seguimiento trayectorias se han obtenido como resultado del diseño de controladores mediante técnicas de control PID.*

*El sistema fue diseñado con un módulo de potencia compacto y de alta eficiencia, de fácil acceso a todas las variables del sistema tanto en su lectura como escritura, proporcionando vía libre para aplicar cualquier tipo de técnica de control moderno y permitiendo el uso del sistema como plataforma de pruebas para controladores en el entorno académico.*

**Palabras clave:** *Robótica, Controladores PID, Robot SCARA.*

**Abstract:** *The present work has the objective of assembling a SCARA robot with three degrees of freedom and, it will be controlled to path tracking and transport pallets. This robot arm has three links connected by two revolute joints and one prismatic joint, which allows mobility in the three planes. We used high level programming to design a HMI that communicates the robot with the operator through a data card. The programmer can defines some tasks such as: placing of an end-effector in a decided position, path tracking and executing palletizing tasks. The control of SCARA robot was made using PID techniques. Moreover, the robot has a compact and high efficiency power module to enable the easy reading and writing of all system variables. The previous features provide freedom to apply any type of modern control and this robot will be used like a test academic platform.*

**Keywords:** *Robotics, PID Controllers, SCARA robot.*

---

## 1. INTRODUCCIÓN

La arquitectura de robots tipo SCARA, está equipada de libertad total de movimientos en los ejes X e Y, pero limitados severamente en sus desplazamientos en el eje Z, es decir, permite ubicar el efector final en cualquier lugar con gran rapidez y precisión sobre el plano de trabajo, mientras que en el eje vertical solo se realizan desplazamientos en unos pocos centímetros.

Estos manipuladores son una opción diseñada y ampliamente utilizada, en tareas tales como soldadura, pulido, atornillado, clasificación de productos, fabricación de productos de electrónica de consumo, entre otras tareas propias del sector productivo, donde el ser humano debe desarrollar labores

más complejas y aprovechar al máximo las bondades que los prototipos robóticos ofrecen.

Se pretende con este proyecto, la realización de tareas de paletización y el seguimiento de trayectorias predefinidas, que fueron escogidas heurísticamente para la demostración del correcto funcionamiento de dicho módulo. Se utilizó una herramienta nueva del *software* Labview 8.6, el *Toolkit* PID[5] para la creación de un controlador de este mismo tipo. La calibración e implementación del compensador requiere de conocimientos de la teoría de Control y del funcionamiento de cada uno de los parámetros que incluye esta herramienta.

## 2. ENSAMBLAJE DEL ROBOT SCARA

### 2.1 Estructura Mecánica

Los planos de la estructura mecánica del robot se basan en el Cuarto Curso Internacional en Robótica Aplicada desarrollado en México DF 2008 [1]. El robot está compuesto por 23 piezas, diseñadas en lenguaje CAD (*Computer Assisted Design*) mediante el paquete computacional SolidWorks Professional. Este programa proporciona funciones para la modelación de piezas complejas, superficies, laminado, facilita el diseño de grandes ensambles y la creación automática de planos de ingeniería, diseño en 2D y 3D, traductores CAD, análisis de esfuerzos, entre otras bondades.

Tomando en cuenta la dinámica de las piezas del robot, se simuló sus movimientos en SolidWorks Professional tanto de manera individual como colectiva, y se obtuvieron las partes más vulnerables al desgaste y a la deformación que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Piezas críticas del robot SCARA

PIEZA	FUNCIÓN
Base Inferior	Soporta todo el peso del robot
Brazo	Primera articulación rotacional
Antebrazo	Segunda articulación rotacional
Brida	Unión entre cuerpo y brazo y apoyo de rodamientos
Eje de hombro	Transmite el movimiento del motor $M_1$
Eje de codo	Transmite el movimiento del motor $M_2$

Las piezas de la Tabla 1 se manufacturaron en una aleación de acero inoxidable, mientras que las piezas restantes fueron elaboradas en grilón o poliamida 6 y aluminio 1020. Una pinza realiza la función de efector final y el robot SCARA terminado se muestra en la Fig.1, donde aparecen las 2 articulaciones revolutas y 1 prismática que brindan los 3 grados de libertad al manipulador.

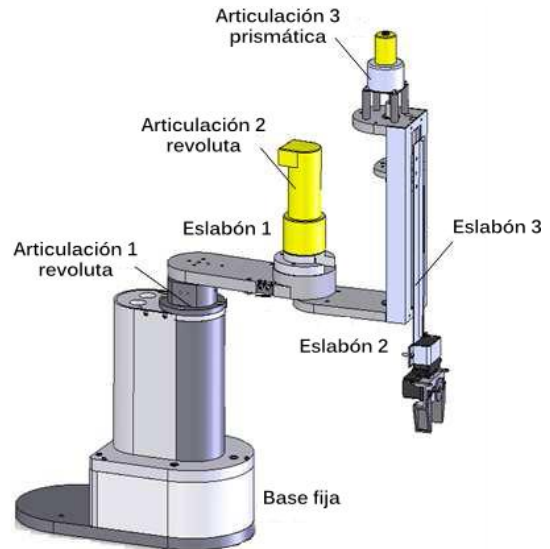


Figura 1. Robot SCARA de tres grados de libertad.

### 2.2 Diseño Electrónico

La parte electrónica comprende los circuitos necesarios para el manejo de: 3 servomotores (motores de DC) de las tres articulaciones del manipulador, 2 servomotores de menor torque para el control del efector final, 6 fines de carrera electromecánicos, 2 encoders en cuadratura y 1 absoluto y finalmente la conexión de un pórtico DB25 para el fácil acceso a todas las variables anteriormente mencionadas.

Estos elementos y circuitos permiten la comunicación entre la PC y el robot utilizando la tarjeta de adquisición de datos PCI-6221M [7], que fue escogida acorde a las características de sensores y actuadores del manipulador, la Fig.2 muestra la interacción de todos los módulos electrónicos que conforman el control del robot SCARA.

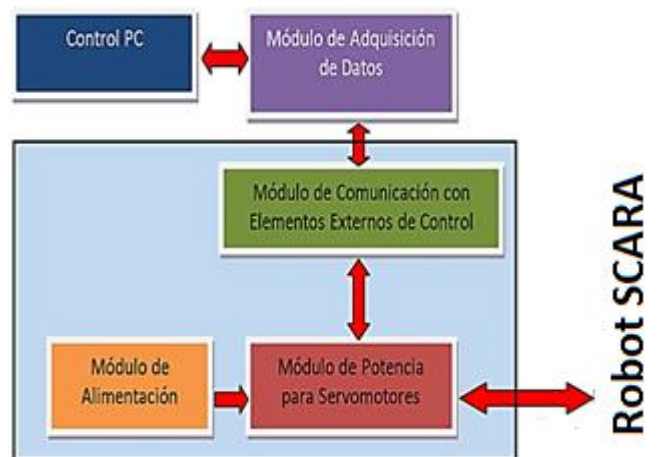


Figura 2. Diagrama de módulos electrónicos del Robot SCARA.

3. PROGRAMA DE CONTROL

3.1 Modelo Geométrico Directo del robot SCARA

Los manipuladores se consideran un conjunto de  $n$  articulaciones y  $n$  eslabones, donde un par de articulación-eslabón le otorga un grado de libertad al robot. Para determinar la ubicación de un eslabón  $i$  con respecto al eslabón  $i-1$ , se puede asociar a cada uno un sistema de referencia. A cada sistema de referencia se le asocia una matriz de Transformación Homogénea (TH) [2] que representa la rotación y translación relativa entre el eslabón  $i$  y el  $i-1$  para consecutivamente ubicar el elemento final del robot en la posición deseada.

Las matrices de TH requieren parámetros de traslación y de rotación que deben ser obtenidos en base a la trayectoria o posición deseada, dependiendo también de la geometría propia del robot SCARA. El Modelo Geométrico o Modelo Cinemático Directo (MGD) permite calcular los pares de puntos cartesianos (x, y) para cada una de las articulaciones del robot y al que el efector final debe llegar, utilizando las coordenadas de rotación o ángulos  $q_1, q_2, \dots, q_n$  ( $n$  depende del número de grados de libertad).

Estas matrices de TH contienen las coordenadas de rotación y traslación de dos sistemas asociados a dos eslabones consecutivos de un robot, y se denota como  ${}^{i-1}T_i$ . Por ejemplo,  ${}^0T_1$  denota la orientación y posición del sistema 1 (primer eslabón móvil) con respecto al sistema ubicado en la base fija del robot o sistema 0. En la matriz  ${}^{i-1}T_i$  se distinguen los ángulos de rotación en torno a los ejes X, Y y Z, además el vector de posición del  $i$ -ésimo eslabón en esos mismos ejes.

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

donde:  $\theta_i$  es el ángulo en torno al eje  $Z_{i-1}$  para que los ejes  $X_{i-1}$  y  $X_i$  queden paralelos y es positivo si rota en sentido anti-horario,  $d_i$  es la distancia medida a lo largo de  $Z_{i-1}$  desplazando el origen del sistema  $S_i$ ,  $a_i$  es la distancia entre el origen del sistema  $S_i$  y  $S_{i-1}$  medida a lo largo del eje  $X_i$ ,  $\alpha_i$  es el ángulo en torno a  $X_i$  para que  $Z_{i-1}$  y  $Z_i$  queden paralelos y es positivo si rota en sentido anti-horario. Las distancias vienen dadas en centímetros (cm) y los ángulos en grados.

Los parámetros  $\alpha$ ,  $\theta$ ,  $d$  y  $a$  se hallan utilizando el algoritmo de Denavit-Hartenberg (D-H) [2], y se los reemplaza en (1) para obtener el MGD, es decir, las coordenadas  $P_x$ ,  $P_y$  y  $P_z$  del efector final en cada instante de tiempo. Estos parámetros se definen en la Tabla 2 recordando que  $a_2$ ,  $a_3$  y  $d_1$  son constantes físicas del robot, mientras que  $\theta_1$  y  $\theta_2$  son los ángulos de las articulaciones rotacionales y  $q_3$  es la coordenada de tipo prismática que varía según el desplazamiento del efector final.

Tabla 2. Parámetros del robot SCARA obtenidos con D-H

ESLABÓN	$a_i$	$\alpha_i$	$d_i$	$\theta_i$
1	0	0	$d_1$	$\theta_1$
2	$a_2$	0	0	$\theta_2$
3	$a_3$	0	$q_3$	0

donde:  $a_i$ : longitud del eslabón,  $\alpha_i$ : ángulo de torsión del elemento (medida según el sentido de las agujas del reloj entre el eje  $i-1$  y el eje  $i$ ),  $d_i$ : offset del eslabón,  $\theta_i$ : ángulo entre elementos adyacentes.

Para obtener estos parámetros se siguió la siguiente metodología [2]:

- Numerar los eslabones comenzando con 1 (primer eslabón móvil) y acabando con  $n$  (último eslabón móvil). Se numerará como 0 a la base fija del robot.
- Numerar cada articulación comenzando por 1 (la correspondiente al primer grado de libertad) y acabando en  $n$ .
- Localizar el eje de cada articulación. Si es rotativa, el eje será su propio eje de giro, si es prismática, será el eje a lo largo del cual se produce el desplazamiento.
- El sistema  $S_0$  se escoge localizando el origen sobre el eje  $Z_0$ ; los ejes  $X_0$  y  $Y_0$  se toman arbitrariamente, pero formando un sistema ortogonal. Este sistema coincide con la base.
- Para  $i$  desde 1 hasta  $n-1$ , situar el sistema  $S_i$  (perteneciente al eslabón  $i$ ) en la intersección del eje  $Z_i$  con la línea normal común a  $Z_{i-1}$  y  $Z_i$ . Si ambos ejes se cortasen se situaría  $S_i$  en el punto de corte, si fuesen paralelos  $S_i$  se situaría en la articulación  $i+1$ .
- Situar  $X_i$  en la línea normal común a  $Z_{i-1}$  y  $Z_i$  con la dirección de la articulación  $i$  a la  $i+1$  (hacia donde se aleja).
- Situar  $Y_i$  de modo que forme un sistema ortogonal con  $X_i$  y  $Z_i$ .
- Repetir los pasos e, f y g desde  $i=1$  hasta  $i=n-1$ .
- Situar el sistema  $S_n$  en el extremo del robot de modo que si la articulación  $n$  es revolvente, se debe alinear  $Z_n$  con  $Z_{n-1}$ ; si la articulación  $n$  es prismática, se debe tomar arbitrariamente a  $Z_n$ . El eje  $X_n$  se escoge como en el paso f.
- Obtener  $\theta_i$  como el ángulo que se debe girar en torno a  $Z_{i-1}$  para que  $X_{i-1}$  y  $X_i$  queden paralelos, siendo positivo si la rotación es en sentido antihorario.
- Obtener  $d_i$  como la distancia medida a lo largo de  $Z_{i-1}$  desplazando el origen del sistema  $S_i$ .
- Obtener  $a_i$  como la distancia entre el origen del sistema  $S_i$  y  $S_{i-1}$ , medida a lo largo del eje  $X_i$ .
- Obtener  $\alpha_i$  como el ángulo que habría que girar en torno a  $X_i$  para que  $Z_{i-1}$  y  $Z_i$  queden paralelos, siendo positivo si la rotación es en sentido antihorario.

En la Fig. 3 se muestra gráficamente la forma de obtención de los parámetros de la Tabla 2, mientras que en la Fig. 4 se observan los sistemas de referencia  $S_i$  (fijo y móviles) para cada articulación según el algoritmo de D-H.

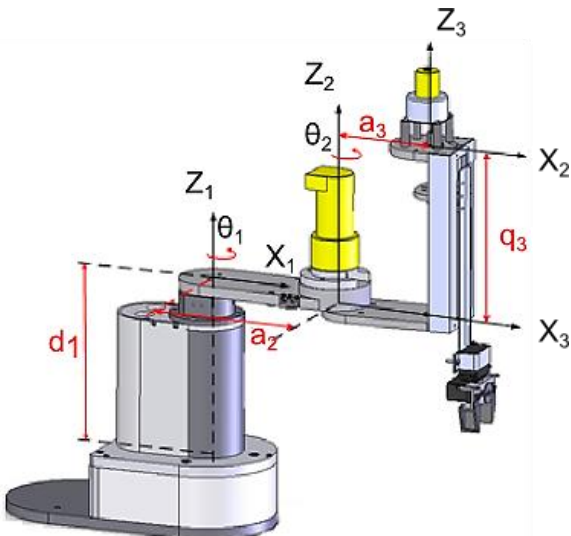


Figura 3. Parámetros y ejes  $X_i, Z_i$  según el algoritmo de D-H.

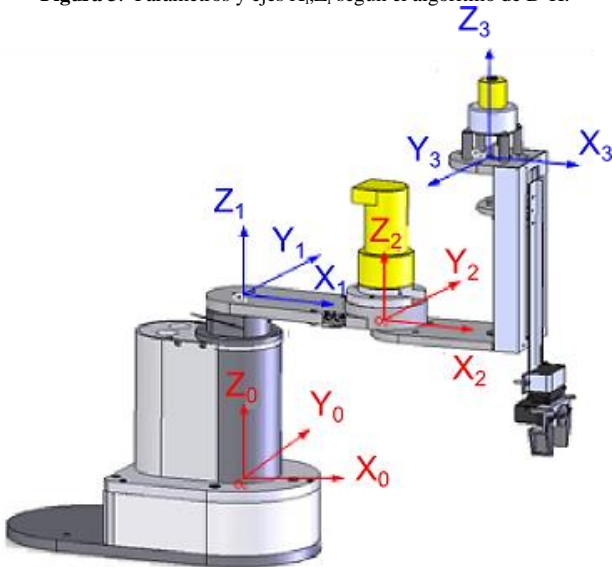


Figura 4. Ejes  $X_i, Y_i$  y  $Z_i$  de las 3 articulaciones según el algoritmo de D-H.

Si se reemplazan los datos de la Tabla 2, de manera iterativa en la matriz de TH se pueden obtener las matrices de transformación correspondientes a los tres eslabones: dos rotacionales  ${}^0T_1(\theta_1)$  y  ${}^1T_2(\theta_2)$ , y uno prismático  ${}^2T_3(q_3)$ . Finalmente se realiza una post-multiplicación para obtener una nueva HT que representa la posición del efector final con respecto a la base fija del robot  ${}^0T_3 = {}^2T_3 {}^1T_2 {}^0T_1$ .

$${}^0T_1(\theta_1) = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$${}^1T_2(\theta_2) = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & a_2 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & a_2 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$${}^2T_3(d_3) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$${}^0T_3 = \begin{bmatrix} C_{12} & -S_{12} & 0 & a_3 C_{12} + a_2 C_1 \\ S_{12} & C_{12} & 0 & a_3 S_{12} + a_2 S_1 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 + d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

donde,  $C_{12} = \cos(\theta_1 + \theta_2)$ ,  $S_1 = \sin \theta_1$ ,  $C_1 = \cos \theta_1$ .

De la última columna de la matriz (5) se obtiene la posición final del actuador o efector final ( $P_x, P_y$  y  $P_z$ ).

$$P_x = a_3 C_{12} + a_2 C_1 \quad (6)$$

$$P_y = a_3 S_{12} + a_2 S_1 \quad (7)$$

$$P_z = d_3 + d_1 \quad (8)$$

Reemplazando  $d_1, a_2$  y  $a_3$  por sus medidas físicas en centímetros se obtienen las ecuaciones (9-11) que son el MGD:

$$P_x = 14 C_{12} + 14 C_1 \quad (9)$$

$$P_y = 14 S_{12} + 14 S_1 \quad (10)$$

$$P_z = d_3 + 15 \quad (11)$$

### 3.2 Modelo Geométrico Inverso del robot SCARA

A partir del MGD (9-11) se deducen expresiones en función de  $P_x, P_y$  y  $P_z$  que definen en cualquier instante los ángulos  $q_1, q_2$  y  $q_3$  que las articulaciones rotacionales y prismática deben moverse hasta alcanzar la posición deseada del efector final. Después de un análisis geométrico en el espacio de trabajo del manipulador y la utilización de la Ley de cosenos se obtuvieron las siguientes ecuaciones:

$$q_3 = P_z - 15 \quad (12)$$

$$q_2 = \cos^{-1} \left( \frac{P_x + P_y - 392}{392} \right) \quad (13)$$

$$q_1 = \sin^{-1} \left( \frac{P_y}{\sqrt{P_x^2 + P_y^2}} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{14 \sin(q_2)}{14 + 14 \cos(q_2)} \right) \quad (14)$$

Si  $x \geq 0$ ,

$$q_1 = -\sin^{-1} \left( \frac{P_y}{\sqrt{P_x^2 + P_y^2}} \right) + \tan^{-1} \left( \frac{14 \sin(q_2)}{14 + 14 \cos(q_2)} \right) \quad (15)$$

Si  $x < 0$ .

Estas ecuaciones representan el Modelo Geométrico Inverso (MGI) del robot SCARA. Según la geometría propia de nuestro robot se efectuaron ciertas correcciones necesarias en la presente aplicación. El MGI es de gran importancia en este trabajo, ya queda lugar a la generación de trayectorias y tareas de paletización utilizando un control en lazo cerrado permitiendo el cálculo de los ángulos y desplazamientos que deberán tener los eslabones para llegar a los puntos deseados dentro del área de trabajo.

3.3 Estrategia de Control

Se implementó un control PID para garantizar un error de posición nulo, es decir, la diferencia entre la posición deseada y la calculada por el manipulador será cero. Tomando en cuenta el tipo de actuadores del robot, la señal de control  $u(t)$  será un PWM (*Pulse Width Modulation*) para cada uno de los motores DC, teniendo como mínimo valor de ancho de pulso un 0.1% de su período debido a la inercia de los motores. La ley de control está definida por la expresión (16) [3].

$$u(t) = W_n^2 e(t) + 2\varepsilon W_n \dot{e}(t) + k_i \int_0^t e(t) dt \quad (16)$$

donde:  $u(t)$  = señal de control,  $e(t)$  = señal de error.

La frecuencia natural  $W_n$  está directamente relacionada con la constante  $K_p$  o ganancia proporcional del controlador. Esta ganancia tiene la característica de aumentar la velocidad del control, además el tiempo de subida es más rápido pero a costa de un mayor sobre-impulso que puede desestabilizar el sistema. La constante de amortiguamiento  $\xi$  está relacionada con el valor de la constante derivativa  $K_d$ . Si la constante  $K_d$  aumenta, el control es más lento, el sobre-impulso decrece y la estabilidad mejora. La constante de integración  $K_i$  provoca consecuencias similares que la proporcional.

Para el controlador PID propiamente dicho, se utilizó el *software* LabView 8.6, que cuenta con herramientas especiales para su construcción. La sintonización del PID, fue realizada siguiendo las reglas de ZIEGLER-NICHOLS puesto que no se disponía de la función de transferencia de los servomotores colocados en las articulaciones, la Fig. 5 muestra el lazo de control PID para las dos articulaciones de tipo revoluta.

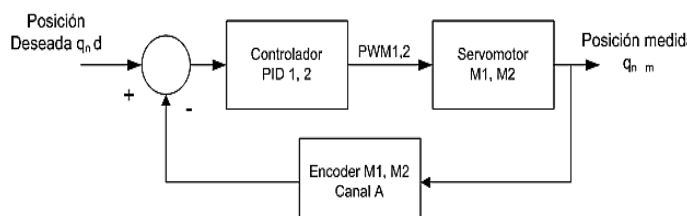


Figura 5. Lazo de control para articulaciones revolutas.

Para el motor perteneciente a la articulación prismática, se implementó un control tipo ON/OFF debido a la simplicidad de su movimiento, es decir, deslizar el tercer eslabón paralelamente al eje Z después de posicionar a los dos eslabones revolutos anteriores en la ubicación exacta en el plano de trabajo. La articulación prismática únicamente permite que la pinza que es el efector final, se aproxime o se separe del plano de trabajo.

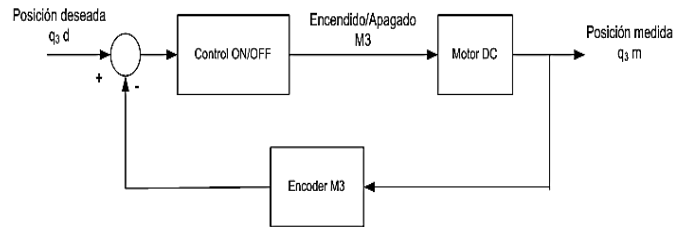


Figura 6. Lazo de control para articulación prismática.

3.4 Desarrollo de la interfaz de usuario en el computador

Para controlar las posiciones y trayectorias seguidas por el robot SCARA, se diseñó en LabView una interfaz que cuenta con controles e indicadores para la ejecución de los modelos geométricos Directo e Inverso (MGD y MGI respectivamente), la generación de 3 trayectorias escogidas heurísticamente (círculo, espiral y rosa de los vientos) con dimensiones definidas por el operador, y la ejecución de tareas de paletización a manera de ejemplo.

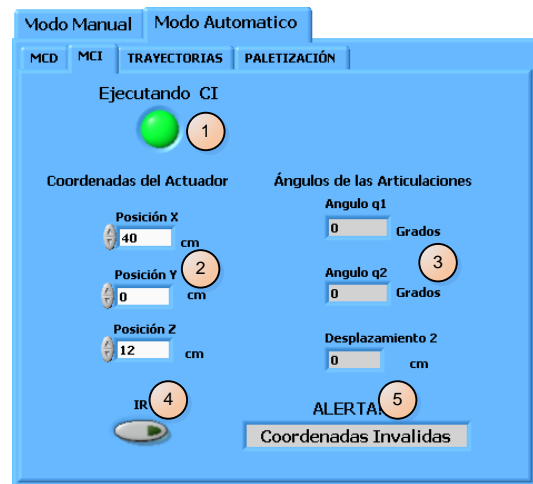


Figura 7. Pantalla inicial de interfaz del MCI.

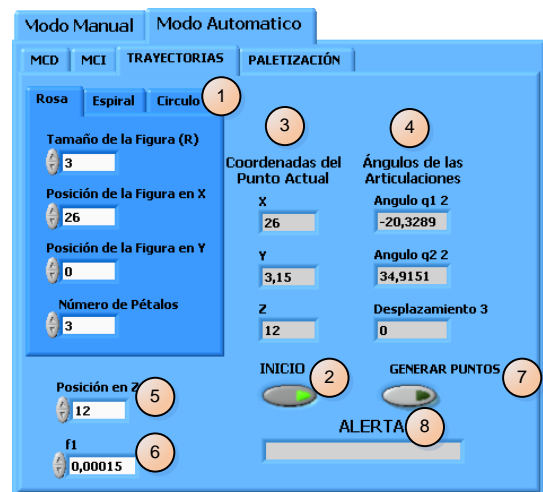


Figura 8. Pantalla de interfaz para generación de trayectorias.

Para el desarrollo de las tareas descritas en el párrafo anterior, se programaron las ecuaciones vistas en la sección 3



empleando lenguaje C, tratando en todo momento de disminuir el coste computacional para realizar control en tiempo real. Dentro de la interfaz, se aprecian también las respuestas de los motores DC frente a la señal de entrada o *setpoint*, que es la posición a la que el efector final debe llegar. En la programación del controlador PID se incluye el cálculo del ancho de pulso de la señal PWM o  $u(t)$  que se actualiza y disminuye hasta que el robot alcance la posición deseada.

Una vez que el controlador PID ha calculado el ancho de pulso del PWM, este dato es enviado al algoritmo de generación de la señal PWM que debe tener en cuenta la frecuencia y el número de muestras para un correcto funcionamiento del controlador (ver Fig. 9).

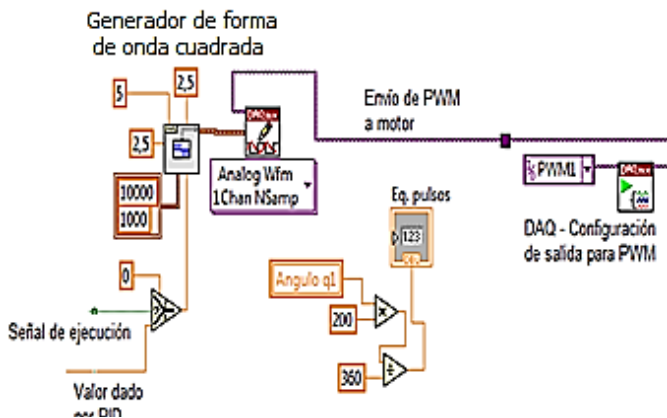


Figura 9. Algoritmo de generación de la señal de control PWM.

#### 4. PRUEBAS Y RESULTADOS

Una vez ensamblado el robot SCARA, se pudo observar que la estructura mecánica construida en poliamida y aleación de hierro para ciertas piezas, resultó robusta con articulaciones lo suficientemente rígidas para realizar las tareas que nos planteamos inicialmente.

En la Fig. 10 se muestra la estructura mecánica completa del manipulador y que se utilizó para realizar las pruebas del control implementado en el computador.



Figura 10. Robot SCARA completo con módulo de entradas y salidas.

#### 4.1 Pruebas de Control Cinemático

Dentro del programa de control se procedió a la calibración de los parámetros de ganancia proporcional  $K_p$ , tiempo integral  $T_i$ , y tiempo derivativo  $T_d$  deducidos de las ecuaciones (17, 18 y 19), buscando alcanzar de forma rápida y sin error, los puntos o ángulos deseados en el plano de trabajo del manipulador.

$$K_c = \frac{1}{K_p} \quad (17)$$

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \quad (18)$$

$$K_d = K_p T_d \quad (19)$$

Para esta aplicación en particular del robot SCARA, se definió un tiempo de levantamiento de  $t_d=2$  segundos, un tiempo de establecimiento  $t_s=4$  segundos, eliminar por completo el sobre-impulso o  $M_p$  de la respuesta del sistema y obtener un error de posición o  $E_{ss}$  nulo.

En la Tabla 3 se aprecian las constantes para el controlador PID que después de ser calibrado, produjo la mejor respuesta al escalón (ángulo o posición (x,y) de referencia), mientras que en la Fig. 11 se observa la respuesta escalón de uno de los servomotores de las articulaciones rotacionales.

Tabla 3. Constantes de los controladores PID de las articulaciones rotacionales

	PID_M <sub>1</sub>	PID_M <sub>2</sub>
$K_c$	20	30
$T_i$	2	1.1
$T_d$	0.2	0.13

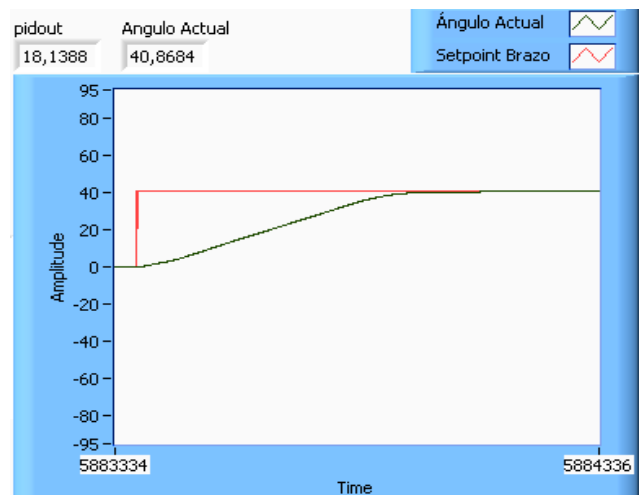


Figura 11. Respuesta del servomotor M<sub>1</sub> (brazo del robot), referencia (línea roja) y respuesta (línea negra).

4.2 Respuesta del robot SCARA a los modelos cinéticos Directo e Inverso

Cuando el robot SCARA alcanza los puntos (x,y) o ángulos entregados por los modelos cinemáticos directo e inverso respectivamente, lo hace de forma rápida y exacta, tratando en todo momento de mantener una diferencia casi nula entre el punto o ángulo deseado y el punto o ángulo medidos. Para las articulaciones tipo revoluta, se muestran los datos de precisión, exactitud y repetibilidad en la Tabla 4.

Tabla 4. Parámetros del robot SCARA

MEDIDA	VALOR ( ° )
Precisión	± 0.017
Exactitud	± 0.045
Repetibilidad	± 0.029

4.3 Pruebas de control en la generación de trayectorias y tareas de paletización

Para el ajuste de parámetros de los compensadores PID's en la generación de trayectorias se debe tomar en cuenta la variación continua, rápida y permanente de los ángulos. Para este efecto se aumentaron progresivamente las constantes  $K_c$  (recíproco de  $K_p$ ) y  $T_i$  hasta obtener la salida deseada, y manteniendo fijo el valor del tiempo  $T_d$  para el motor  $M_1$ . Para el motor  $M_2$   $T_d$  fue decrementado y se obtuvieron los datos mostrados en la Tabla 5.

Tabla 5. Constantes de los controladores PID de las articulaciones rotacionales para generar trayectorias

	PID_M1	PID_M2
$K_c$	100	100
$T_i$	7	8
$T_d$	0.2	0.08

En la Fig. 12 se muestra una de las trayectorias programadas, la generación de una rosa de los vientos como trayectoria predefinida desde la interfaz de usuario. La configuración de parámetros como: número de pétalos, coordenadas (h,k) del centro, radio y resolución de la figura pueden aumentar o disminuir los puntos que formarán la trayectoria. Las ecuaciones de los puntos cartesianos (x, y) que permiten generar dicha figura son:

$$x = r[\sin(2\pi f_2 t) \sin(2\pi f_1 t)] + h \quad (20)$$

$$y = r[\sin(2\pi f_1 t) \cos(2\pi f_2 t)] + k \quad (21)$$

donde:  $r$  es el radio de la figura,  $f_1$  es la constante de número de puntos guía,  $f_2$  es el número de pétalos de la rosa,  $t$  es el tiempo variable que permite la generación de puntos,  $h$  es el

desplazamiento de la figura en eje X, y  $k$  es el desplazamiento de la figura en eje Y.

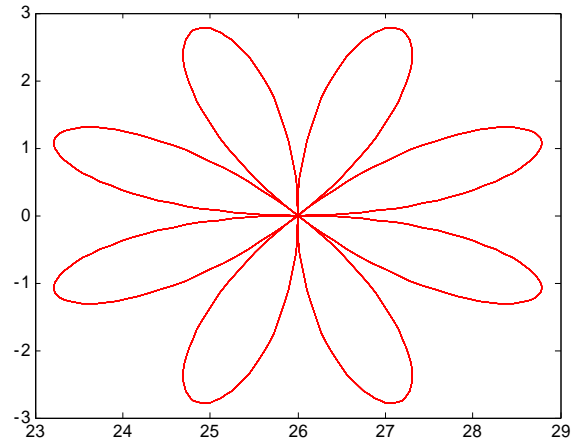


Figura 12. Trayectoria "Rosa de los Vientos" programada en la interfaz del robot SCARA.

El robot SCARA al poseer una pinza como efector final puede sujetar firmemente un lápiz que le permita dibujar cualquiera de las trayectorias disponibles en la interfaz, esto a manera de mostrar el verdadero movimiento sobre el plano de trabajo. La Fig. 13 indica la trayectoria dibujada por el manipulador que se asemeja a la presentada en la Fig. 12 que es la de referencia.

Las Figs. 14 y 15 muestran las trayectorias esperada y generada de una espiral cuya ecuación matemática es:

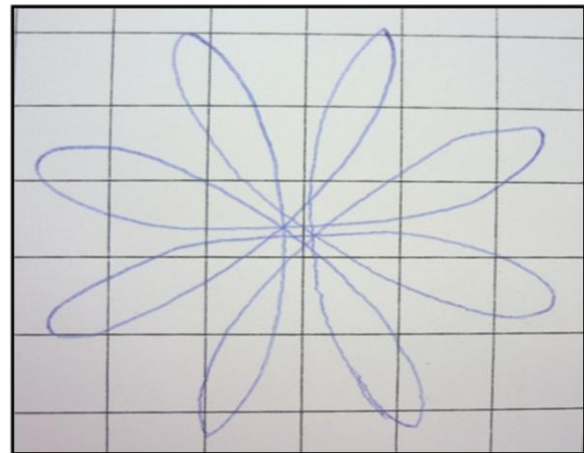


Figura 13. "Rosa de los Vientos" generada por el robot SCARA.

$$x = a t f_1 [\cos(2\pi f_1 t)] + h \quad (22)$$

$$y = a t f_1 [\sin(2\pi f_1 t)] + k \quad (23)$$

donde:  $a$  es la distancia de separación de los brazos de la espiral,  $f_1$  es la constante de número de puntos guía,  $t$  es la variable de generación de puntos,  $h$  es el desplazamiento de la figura en eje X, y  $k$  es el desplazamiento de la figura en eje Y.

En la Fig. 16 se puede observar al robot implementado, siguiendo la trayectoria de la Fig. 14 y marcándola en su espacio de trabajo.

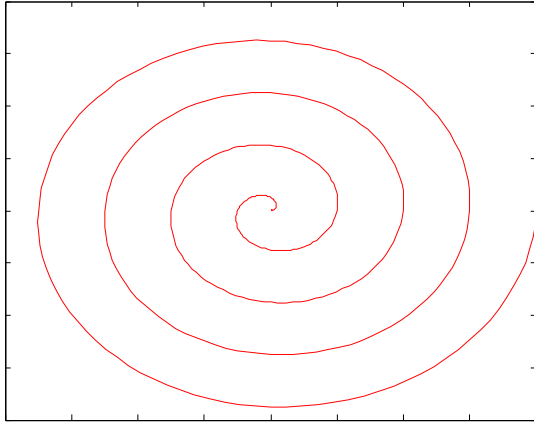


Figura 14. Trayectoria “Espiral” programa en la interfaz del robot SCARA.

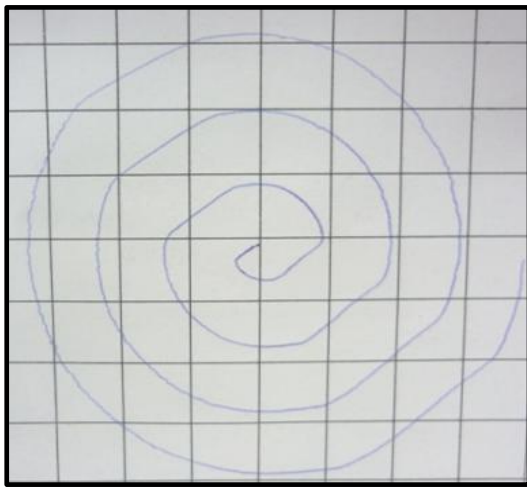


Figura 15. “Espiral” generada por el robot SCARA.

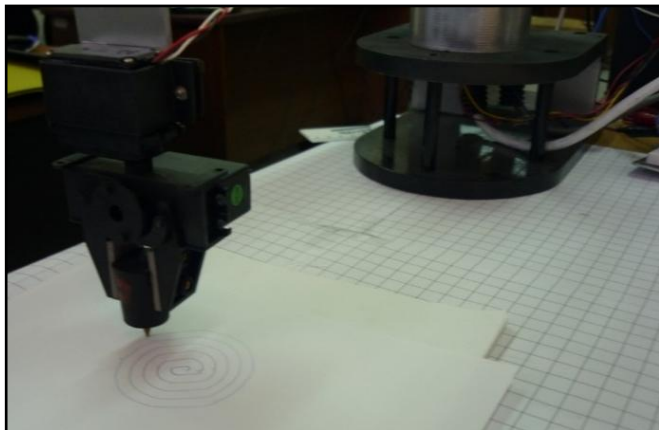


Figura 16. Ejecución de una trayectoria programada para el robot SCARA.

Las tareas de paletización son muy comunes en los manipuladores y constan de un movimiento continuo y repetitivo en el tiempo, se trata de ubicar el efector final en una posición deseada, tomar un objeto o palet automáticamente, trasladarlo y soltarlo en otra posición deseada. Durante las pruebas, se escogieron fusibles de 3 cm de largo aproximadamente como palets u objetos a

transportar, el agarre de la pinza permite levantar hasta 3 fusibles sin peligro a soltarlos y los datos técnicos para la ejecución de esta tarea se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Datos para tareas de paletización

<b>Máxima altura de carga</b>	150 mm*
<b>Zona de trabajo hasta</b>	280 mm
<b>Peso de pallet (unidad)</b>	350 gr **
<b>Máxima apertura de pinza</b>	30 mm

\*milímetros, \*\*gramos.

## 5. CONCLUSIONES

El movimiento suave de las articulaciones del robot SCARA, se debe al uso de rodamientos o cojinetes que disminuyen la fricción y evitan el desgaste de las piezas móviles acopladas a un eje, además le sirven de apoyo y facilitan su rotación. Es apropiado el uso de rodamientos del tipo de bolas rígidas que sirven para operar incluso a altas velocidades y requieren de muy poco servicio de mantenimiento, por este motivo son los más populares y aptos para este tipo de aplicación.

El algoritmo de Denavit–Hartenberg para la definición de ejes y obtención del Modelo Geométrico Directo (MGD), es una herramienta útil y una forma simplificada de definir los puntos cartesianos de ubicación del efector final, definiendo previamente los ángulos para cada una de las articulaciones rotacionales y/o prismáticas del manipulador.

Las características principales de un robot SCARA son la precisión y la velocidad con que ejecuta sus movimientos, para cumplir estos requerimientos se utilizaron motores que llevan acoplados *encoders* de alta resolución, otorgándole a éste, rotaciones en el orden de las centésimas de grado en cualquier posición o trayectoria.

Para el motor perteneciente a la articulación prismática, se implementó un control tipo ON/OFF puesto que el movimiento a lo largo del eje Z consiste únicamente en deslizar el efector final verticalmente.

Se implementaron dos compensadores tipo PID para los dos servomotores que controlan el movimiento rotacional del manipulador. Con la calibración y sintonización de estos compensadores (siguiendo un método heurístico), se logró obtener una respuesta sobre-amortiguada y con error en estado estable de 0.05 milímetros para ambos motores.. Esto se traduce en una veloz respuesta del sistema, sin oscilaciones y con una excelente aproximación entre el punto deseado y el medido.

Las tareas de paletización constituyen una de las principales aplicaciones de los brazos robóticos porque introducen automatismos y mecanizado en línea para una amplia gama de procesos industriales, reduciendo costos de producción y tiempos de ejecución de casi cualquier manufactura.



## 6. AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento especial a la Escuela Politécnica Nacional por otorgar parte del financiamiento para la culminación de este trabajo.

## 7. REFERENCIAS

- [1] R. Silva, F. Riveros, M. Cordero, *Cuarto Curso Internacional en Robótica Aplicada, Diseño Mecánico*. México DF, Septiembre 2008.
- [2] A. Barrientos, L. Peñín, C. Balaguer, *Fundamentos de Robótica*. Segunda edición. 2007.
- [3] K. Ogata, *Control Automático*. Edición 2006.
- [4] W., Etienne, Modeling, *Identification and Control of Robots*. Tercera edición, 2002.
- [5] *Toolkit PID Manual*, National Instruments, 2009.
- [6] *LabView 8.6 Manual*, National Instruments, 2009.
- [7] *Low-Cost M Series Multifunction DAQ PCI 6221-M Manual*, National Instruments, 2009.
- [8] O. Vivas. (2006). *Control Predictivo De Un Robot Tipo Scara* Predictive Control of a Scara Robot. Revista Chilena de Ingeniería, Vol. 14 N° 2.
- [9] Dessaint L., Saad M., HCbert B. (April 1992). Al-Haddad K. *An Adaptive Controller For A Direct-Drive Scara Robot*. IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol. 39, No 2.
- [10] I. Minchala. (Agosto 2009). *Curso de Robótica Industrial*. Escuela Politécnica Nacional.