

## PROTOTIPO DE ROBOT SCARA CON BASE MÓVIL.

Fabio Abel Aguirre Cerrillo  
Ernesto Christian Orozco Magdaleno  
José Armando Lara González  
Arturo Luna Castro

### RESUMEN

En el presente trabajo se muestran los elementos y partes de un prototipo de robot Scara con base móvil, que tiene la finalidad de ser usado como un equipo de enseñanza-aprendizaje de los conceptos básicos de la robótica en los niveles de licenciatura. Se presenta el diseño mecánico del robot así como los movimientos que realiza cada uno de sus grados de libertad. Se desarrollan las ecuaciones del modelado de cinemática directa e inversa. También se muestran los tipos de actuadores usados en el prototipo y la forma de controlar cada uno de ellos. Finalmente se describe la implementación en el control y manipulación para el movimiento de las articulaciones utilizando una interfaz gráfica de usuario. El robot tiene la capacidad de tomar y dejar piezas al utilizar sujeción por medio de ventosas que utilizan aire comprimido en su funcionamiento.

### INTRODUCCIÓN

En la actualidad vivimos en un mundo donde día a día la ciencia y la tecnología tiene un crecimiento y evolución a una gran rapidez. La robótica en los últimos 40 años ha tenido realmente un ritmo acelerado de desarrollo y se presenta en toda clase de aplicaciones. Los robots están siendo implementados en muchas áreas para brindar una mejor calidad de vida a la humanidad, por lo cual se debe estar preparado e integrarse a este mundo globalizado. Los países llamados de primer mundo se han estado preparando y preparan a su población para afrontar los avances modernos actuales y futuros de aplicaciones de la robótica. Se tiene evidencia que en países como: Alemania, Japón y Estados Unidos de América, por mencionar algunos, introducen estos conocimientos desde edad temprana (5 o 6 años en adelante) en los planes de estudios y de esa forma garantizan que sus generaciones tengan herramientas para afrontar los retos que se les presenten a lo largo de la vida. Significa que los países denominados de primer mundo, ya tienen en sus escuelas e instituciones herramientas para la enseñanza-aprendizaje de la robótica.

Ahora bien, ¿cómo en la situación de la planteado anteriormente en los denominados países en vías de desarrollo y/o países del tercer mundo?. Para responder a la pregunta y no es necesario analizar con detenimiento, solo es cuestión de visitar y observar los laboratorios de las instituciones de nivel superior. Se puede percatar uno mismo que las instituciones no tienen prácticamente evidencias de equipamiento en los laboratorios. Lo anterior es desafortunado pero también es una buena oportunidad de trabajar en ello.

Conociendo el problema planteado, el presente trabajo tiene la finalidad de mostrar una contribución que busca compensar y empezar a resolver el problema de equipamiento para la materia de Robótica del Instituto Tecnológico de Lázaro Cárdenas. Es conveniente comentar que se ha pensado en un robot SCARA con base móvil que cuente con servomotores, motor a pasos, actuadores neumáticos y un sistema de sujeción de vacío, con la finalidad de combinar las diferentes disciplinas en los actuadores del robot y que se usen ampliamente en las aplicaciones industriales.

## JUSTIFICACIÓN

En específico, en las instalaciones de la carrera de Ingeniería Electromecánica del Instituto Tecnológico de Lázaro Cárdenas (ITLAC), se cuenta con un alto déficit de equipamiento para que los alumnos puedan realizar las prácticas correspondientes a la asignatura de la robótica. La falta de interés en el aprendizaje de la comunidad estudiantil de nivel superior y medio superior es un problema educativo fuerte en México, y una de las causas principales es la falta de equipo en los diversos laboratorios de las escuelas. Sin el equipo necesario para realizar prácticas, y, correlacionar lo visto en clase con los aspectos prácticos en el laboratorio, el alumno difícilmente comprende la teoría y pierde el interés por aprender.

Al contar con un diseño propio del robot, se desarrollan las ecuaciones de la cinemática directa e inversa junto con su implementación para controlarlo. Lo anterior es muy valioso, ya que los alumnos tienen la oportunidad de validar las ecuaciones y que se percate que la teoría y/o herramientas matemáticas básicas son de gran apoyo para el control del robot. Además con el diseño propio, se ha pensado en una estructura del robot y que tenga una flexibilidad y adaptabilidad para ser utilizado junto con el programa de la materia de Robótica.

## METODOLOGÍA

Primeramente se realizó un análisis de las características que debería de cubrir el robot, esto es, se debía pensar en características y elementos fundamentales básicos de un robot desde un punto didáctico. Una estructura mecánica que facilite incorporar la cinemática del robot con sus movimientos y generar ecuaciones matemáticas en las que los estudiantes de ingeniería de nivel licenciatura puedan entender, aplicar e implementar de acuerdo a las herramientas y competencias de los alumnos. En la figura 1 se muestra el diseño creado utilizando el software de diseño SolidWorks (Gómez, 2010).

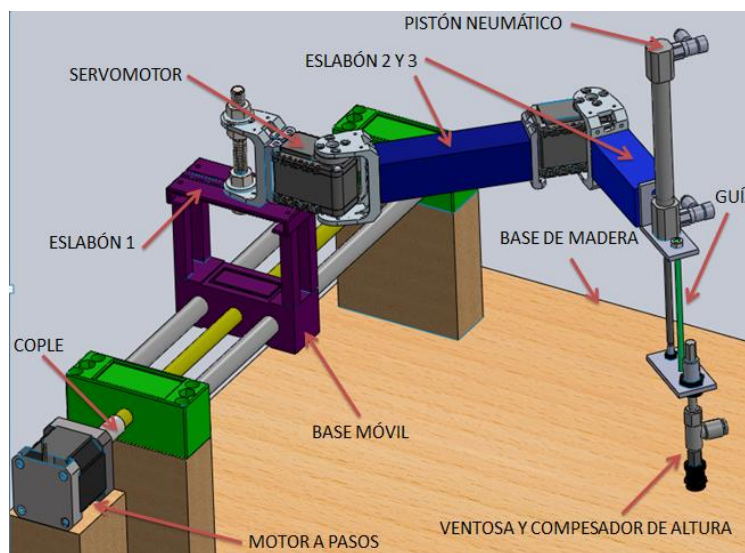


Figura 1. Diseño mecánico del robot SCARA.

De la figura 1 se observa que se tiene una base móvil montada sobre unas guías cilíndricas y una barra roscada que tiene un diámetro de 10 mm con un paso de 2 mm por revolución. Al girar la barra roscada se produce un movimiento lineal y la base móvil se desplaza de izquierda a derecha o viceversa, en función del sentido de giro proporcionado por el motor a pasos que tiene 200 pulsos por revolución ( $1.8^\circ$  a paso completo). El motor a pasos es un Nema 17 y es el modelo ST4118L1206-A que proporciona un torque de 49.5 Ncm. Tiene un voltaje de alimentación de 4 volts y una corriente de 1.2 amperes (Nanotec, 2015). Para el movimiento articular rotacional se ha montado un

servomotor por cada articulación. De esta forma se tienen los movimientos del robot Scara tradicional. El servomotor es el Dynamixel AX-12A (Dynamixel, 2015). También se cuenta con un cilindro neumático y un sistema de sujeción por vacío tal y como lo muestra la figura 2.

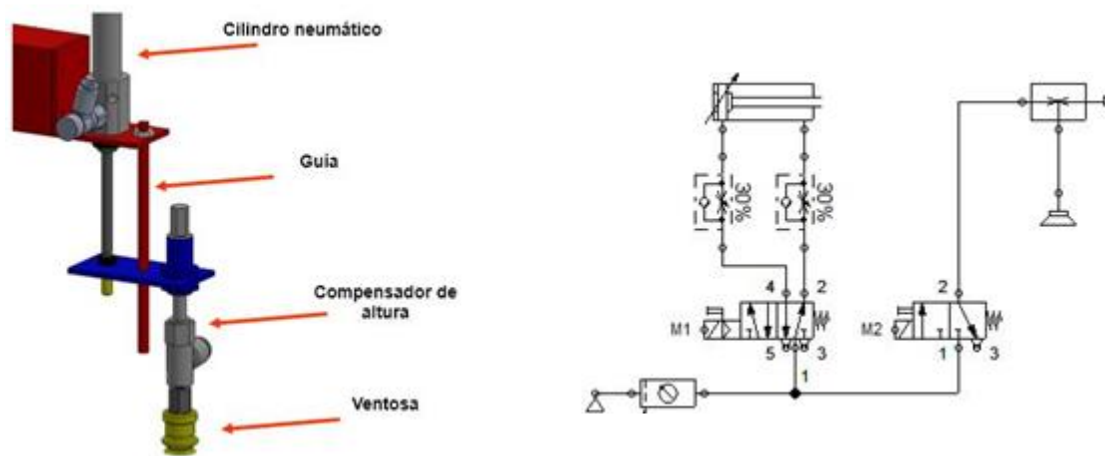


Figura 2. Montaje del sistema neumático y su circuito.

Significa que el cilindro neumático puede ejecutar movimientos verticales para que el robot pueda realizar tareas de pick & place al tener una ventosa en el extremo final para la sujeción de piezas (Hesse ,2004). El modelo del cilindro es el CJ2B10-60AZ. Tiene un diámetro de embolo de 10 mm y una carrera de 60 mm (SMC México, 2015). Para evitar el giro del vástago del cilindro se ha colocado una guía mecánica que pasa a través de una placa. EL cilindro neumático es controlado por medio una válvula 5/2 vías de accionamiento eléctrico. Observar que se cuentan con dos válvulas de estrangulación y antirretorno para regular la velocidad de avance y retroceso. El sistema de sujeción de vacío tiene un compensador de altura de 10 mm. La ventosa se conecta al eyector de vacío. El suministro de aire es controlador por la válvula 3/2 vías de accionamiento eléctrico.

Una vez diseñado, se ha procedido a la construcción del robot tal y como se muestra la figura 3. Se puede observar que se tienen cuatro grados de libertad. Donde  $d_1$  es un grado de libertad prismático en la base móvil,  $\theta_1$  y  $\theta_2$  son dos grados de libertad rotativos en el brazo y  $d_4$  es un último grado de libertad prismático, todo o nada sin posiciones intermedias donde se ubica el efector final.

Es importante mencionar que la integración de una base móvil al robot SCARA genera un espacio de trabajo mayor, ya que la base móvil permite mover el espacio de trabajo del robot SCARA tradicional a lo largo de su carrera. Para el análisis cinemático directo se consideran solo los dos grados de libertad rotativos del brazo  $\theta_1$  y  $\theta_2$ , ya que la base móvil realiza un movimiento lineal y solamente se suma el valor de su desplazamiento en la coordenada x del robot construido mostrado en la figura 4.

El sistema de referencia del robot o sistema 0 se encuentra en el punto de giro de  $\theta_1$ , es decir, en el centro del rotor del primer servomotor. El segundo movimiento en  $\theta_2$  y los parámetros  $L_1$  y  $L_2$  son las distancias del primer y segundo eslabón respectivamente, tal y como la muestra la figura 4. En la tabla 1 se muestran los parámetros de Denavit-Hartenberg para generar las matrices de transformación (Jazar, 2010) dadas por las ecuaciones (1) y (2).

Tabla 1. Parámetros Denavit-Hartenberg.

Articulación	$a_i$	$\alpha_i$	$d_i$	$\theta_i$
1	$L_1$	0	0	$\theta_1$
2	$L_2$	0	0	$\theta_2$

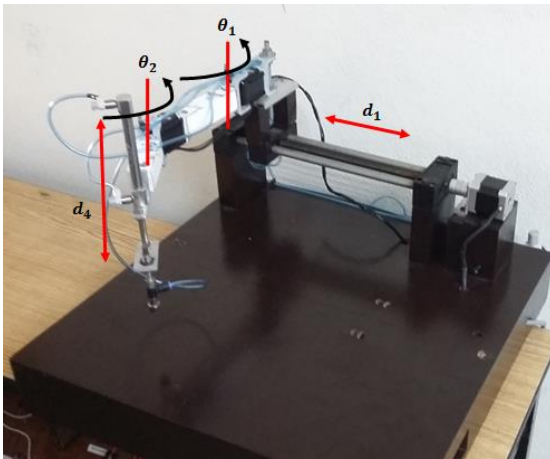


Figura 3. Prototipo construido.

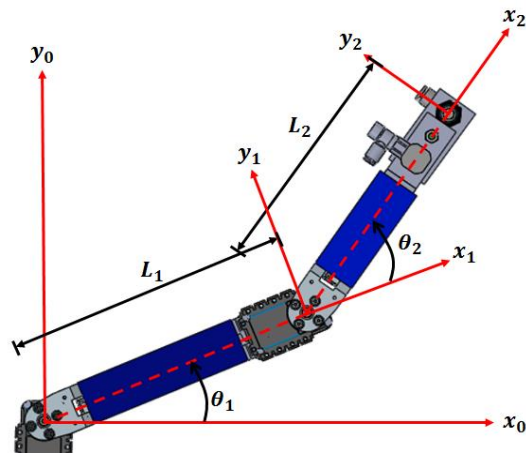


Figura 4. Asignación de ejes de referencia.

$${}^0A_1 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 & L_1\cos\theta_1 \\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 & L_1\sin\theta_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1) \quad {}^1A_2 = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & L_2\cos\theta_2 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & L_2\sin\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Para obtener la matriz de transformación homogénea total  $T$  del sistema, se requiere multiplicar las matrices anteriores, esto es,  $T = {}^0A_2 = {}^0A_1 {}^1A_2$ .

$$T = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2) & -\sin(\theta_1 + \theta_2) & 0 & L_1\cos\theta_1 + L_2\cos(\theta_1 + \theta_2) \\ \sin(\theta_1 + \theta_2) & \cos(\theta_1 + \theta_2) & 0 & L_2\sin\theta_1 + L_2\sin(\theta_1 + \theta_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

De la ecuación (3) se establece que:

$$P_x = L_1\cos\theta_1 + L_2\cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (4)$$

$$P_y = L_2\sin\theta_1 + L_2\sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (5)$$

Las ecuaciones (4) y (5) representan la posición final dados los ángulos  $\theta_1$  y  $\theta_2$ , así como el valor de los parámetros  $L_1$  y  $L_2$ . De esta forma se tiene resuelto el problema de la cinemática directa del robot. Las ecuaciones (4) y (5) son las ecuaciones que se utilizan para implementarlas físicamente. Con

las ecuaciones obtenidas y con ayuda de MATLAB (Gilat, 2006), se desarrolló un programa que muestra el espacio de trabajo de los puntos  $\theta_1$  y  $\theta_2$ , tal y como se muestra en la figura 5.

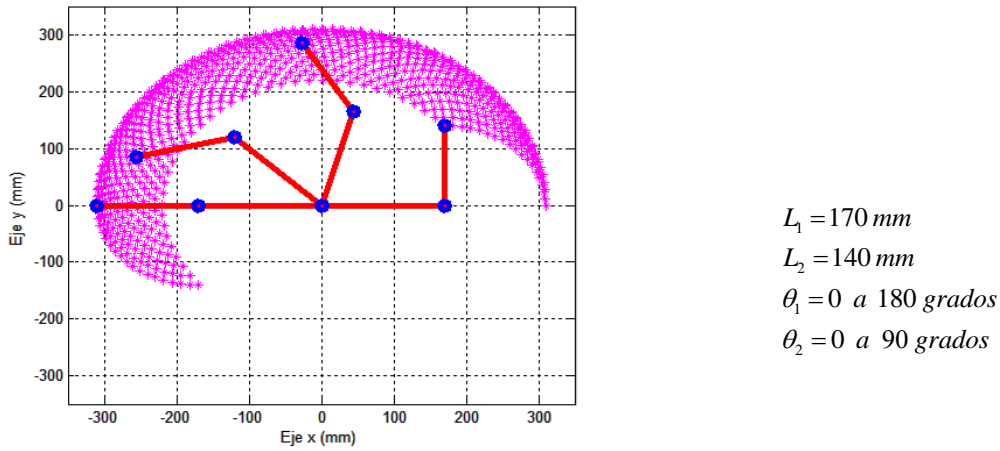


Figura 5. Espacio de trabajo del robot SCARA en plano X-Y.

Ahora se describe la solución del problema de cinemática inversa. Se utilizan de apoyo a la figura 6 y figura 7 para obtener el valor de  $\theta_2$  y  $\theta_1$ , respectivamente. De la figura 6, utilizando ley de cósenos y el teorema de Pitágoras, se tiene:

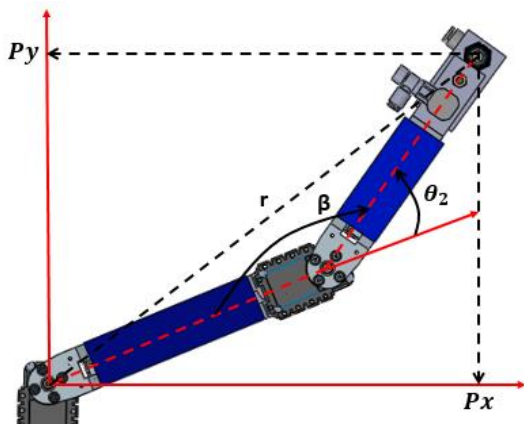


Figura 6. Análisis geométrico para

$\theta_2$ .

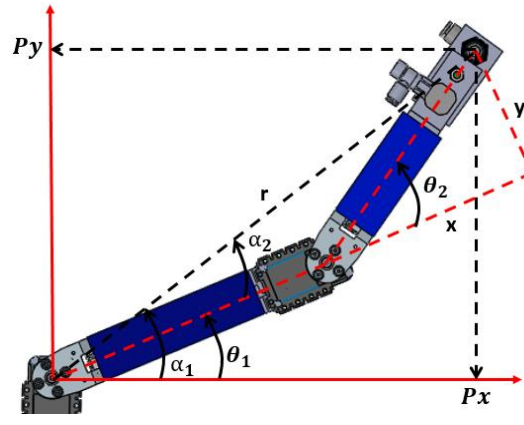


Figura 7. Análisis geométrico para

$\theta_1$ .

$$r^2 = L_1^2 + L_2^2 - 2L_1L_2\cos\beta \quad (6)$$

$$r^2 = Px^2 + Py^2 \quad (7)$$

Igualando las ecuaciones anteriores, con  $\beta = 180 - \theta_2$  y que  $\cos(180 - \theta_2) = -\cos(\theta_2)$ , se despeja para  $\cos \theta_2$  y definiendo  $D = \cos \theta_2$ :

$$D = \frac{Px^2 + Py^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1L_2} \quad (8)$$

Utilizando  $Sen \theta_2 = 1 - Cos^2 \theta_2$  con  $tan \theta_2 = Sen \theta_2 / Cos \theta_2$ , se tiene que:

$$\theta_2 = tan^{-1} \left( \frac{\pm \sqrt{1 - D^2}}{D} \right) \quad (9)$$

Ahora se utiliza la figura 7 para realizar el análisis geométrico de  $\theta_1$ . Se tiene que:

$$\theta_1 = \alpha_1 - \alpha_2 \quad (10)$$

Se observa que  $\alpha_1 = P_y / P_x$ . Para encontrar  $\alpha_2$ , se tiene la relación:

$$tan \alpha_2 = \frac{y}{L_1 + x} \quad (11)$$

Como ya se tiene  $\theta_2$ , se puede conocer el valor de las dos variables x,y. Por tanto se tiene que:

$$\alpha_2 = tan^{-1} \left( \frac{L_2 Sin \theta_2}{L_1 + L_2 Cos \theta_2} \right) \quad (12)$$

Sustituyendo  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  en ecuación (10), finalmente se tiene que:

$$\theta_1 = tan^{-1} \frac{P_y}{P_x} - tan^{-1} \left( \frac{L_2 Sin \theta_2}{L_1 + L_2 Cos \theta_2} \right) \quad (13)$$

Las ecuaciones (9) y (13) representan que valor ángulos  $\theta_1$  y  $\theta_2$  se requieren para llegar a al punto deseado  $P_x, P_y$ . Para validar la ecuaciones (4), (5), (9) y (13) se ha desarrollado una interfaz grafica de usuario con el software Matlab (Barragan, 2007). En la figura 8 se muestran dos pantallas de la interfaz. En la pantalla de la izquierda se introduce el valor del punto  $P_x, P_y$  y se obtienen los valores de los ángulos  $\theta_1$  y  $\theta_2$ . Ahora en la pantalla de la derecha, se introduce el valor de los ángulos  $\theta_1$  y  $\theta_2$  y se obtienen el valor del punto  $P_x, P_y$ .

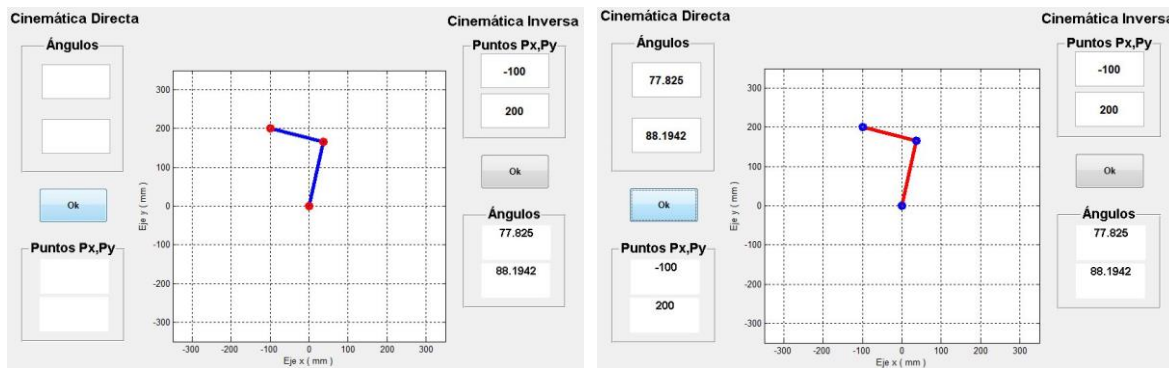


Figura 8. Validación de la cinemática directa e inversa.

Una vez que se diseñó, modelo y construyo el robot SCARA, es necesario entonces implementar el hardware requerido para llevar a cabo el control de posición del robot. Para la comunicación con el servomotor desde la computadora se ha utilizado un dispositivo de comunicación llamado USB2Dynamixel tal y como se muestra en la figura 9. Una vez que se instala el controlador del USB2Dynamixel, la computadora lo reconoce como un puerto COM. Los servomotores se conectan en serie utilizando su protocolo de comunicación Half dúplex asíncrona. Desde la computadora se envía un paquete de datos al puerto del servomotor. El paquete de datos contiene la información necesaria que el servomotor entiende para girar a una posición en grados especificada por el usuario.

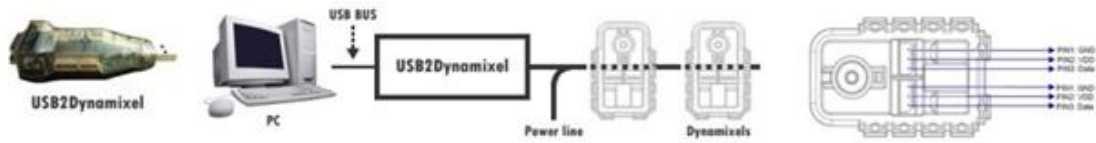


Figura 9. Comunicación del servomotor y el computador.

Para el control del motor a pasos y el sistema neumático se ha desarrollado una tarjeta de control que se muestra en la figura 10. Se tiene un microcontrolador Arduino Uno, siendo el encargado de enviar los pulsos necesarios al controlador A4988 (Pololu, 2015) y que el eje del motor a pasos gire. También el Arduino es el encargado de enviar las señales a los relevadores. Dichos relevadores son los encargados de activar las bobinas de las electroválvulas para el control del cilindro neumático y de la ventosa de sujeción mostrado con anterioridad en la figura 2. Las señales de control del Arduino (Arduino, 2015) son generadas en una computadora que contiene una interfaz grafica de usuario de Matlab (Barragan, 2007) y son enviadas por medio de comunicación serial.

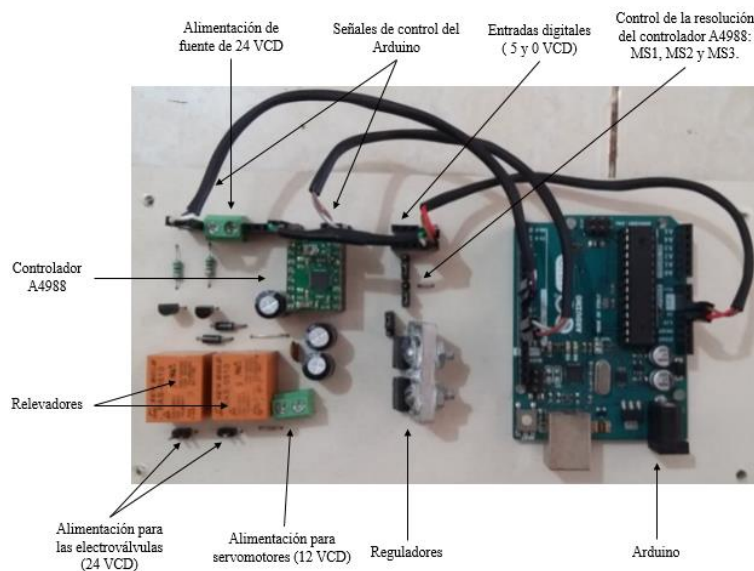


Figura 10. Tarjeta de control.

## PRUEBAS Y RESULTADOS

Para llevar a cabo las pruebas se ha realizado una GUI (Graphical User Interface) o interfaz gráfica con el software MATLAB. El objetivo de esta interfaz gráfica es tener el control total del robot, por lo que se encarga de enviar la información de control al Arduino y al USB2Dynamixel. La GUI cuenta con una interfaz principal que se compone de: Selección de cero, Cinemática Directa, Cinemática Inversa y Subrutinas, tal y como lo muestra la figura 11.

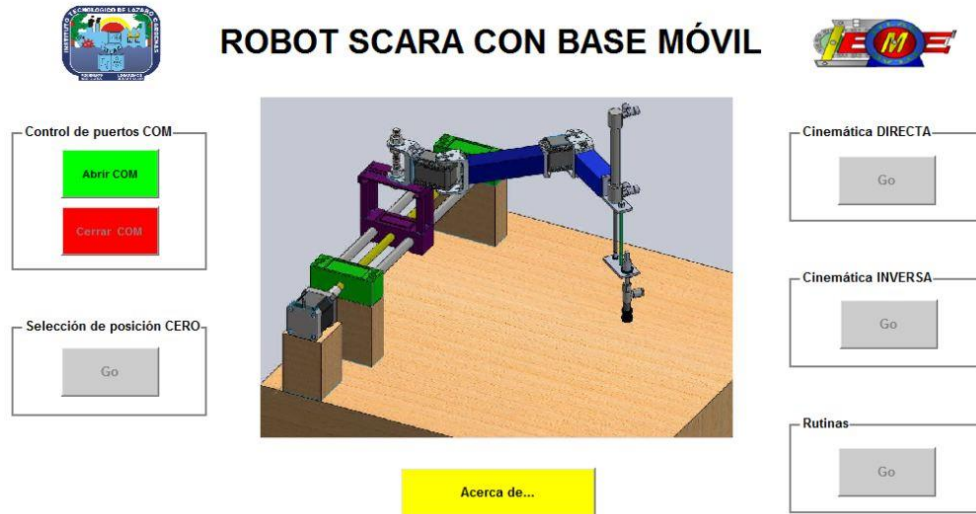


Figura 11. Interfaz gráfica principal.

La figura 12 muestra la interfaz para colocar la base móvil en una posición de inicio para que el robot lo tome como referencia y a partir de ese punto el robot empiece a hacer el registro de la posición a la que ha sido movido. Recordar que esta acción la proporciona el motor a pasos y no se tiene un sistema de retroalimentación de posición.

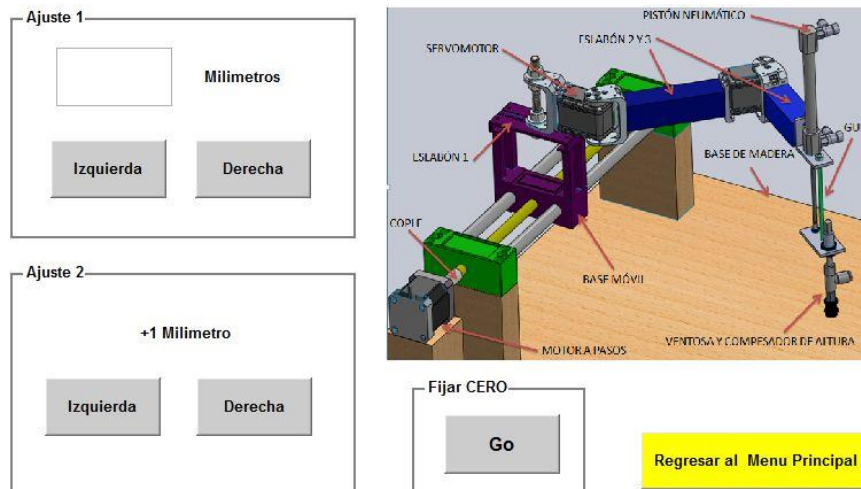


Figura 12. Subinterfaz de Selección de cero.

En la figura 13 se muestra la interfaz para trabajar con la cinemática directa. Al introducir los valores de los ángulos y la posición que se requiere de la base móvil, el robot ejecuta los movimientos y proporciona las coordenadas correspondientes así como la gráfica de su posición. También se tiene el control para manipular el cilindro y la ventosa.



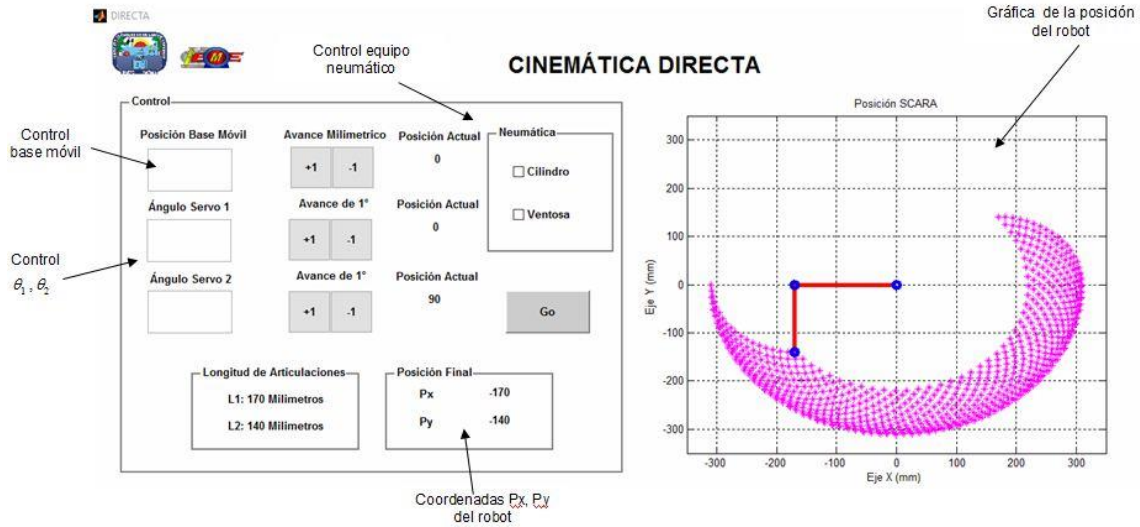


Figura 13. Subinterfaz de Cinemática Directa.

En la figura 14 se muestra la interfaz para trabajar con la cinemática inversa. Observar que ahora se introducen las coordenadas del punto  $P_x$ ,  $P_y$  para obtener los ángulos que se requieren para llegar a la posición deseada.

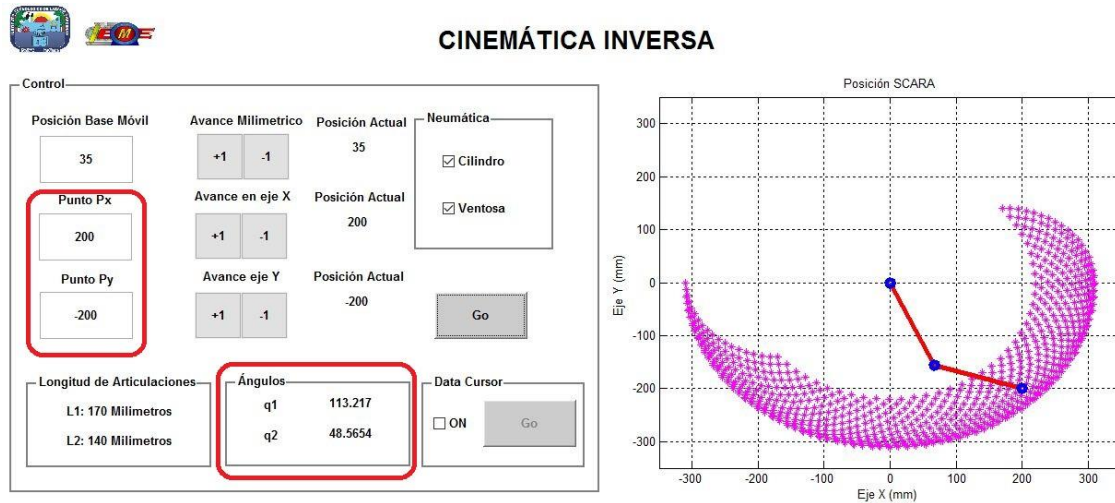


Figura 14. Subinterfaz de Cinemática Directa.

El faltante componente por describir de la interfaz principal es la interfaz de subrutinas llamada rutina automática y se muestra en la figura 15. Se tiene la posibilidad de hacer 3 subrutinas. Por ejemplo, al trabajar con la subrutina 2 solo es necesario habilitarla. Ahora es necesario contar con dos puntos. Un punto es para tomar la pieza y otra es para dejarla. Para guardar el punto de tomar, se debe de utilizar la interfaz de cinemática directa o la de inversa, esto es, se mueve el robot a la posición deseada y se guarda la posición. Una vez guardada la posición de tomar, se tiene la posibilidad de oprimir el botón de Go y el robot ejecuta la acción necesaria para tomar dicha posición.

El mismo procedimiento se hace para la posición de dejar. Una vez que el robot tiene la información de los puntos de tomar y dejar, se oprime el botón de *Ejecutar Rutina*. Significa que el robot puede hacer tareas de un manipulador de piezas.

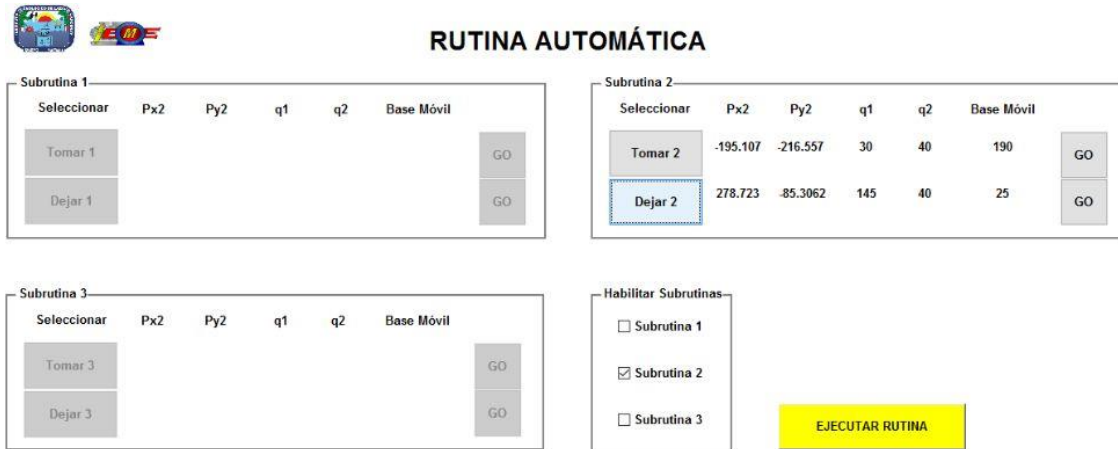


Figura 15. Subinterfaz de Subrutinas.

En las figuras 16 y 17 se muestran una de tantas pruebas en el empleo de la interfaz gráfica con el robot, una de ellas es para la cinemática directa y otra es para la inversa. Se observa en las figuras que se utilizó un cubo de madera en las pruebas. Es importante mencionar que las pruebas han sido satisfactorias. También se han hecho pruebas de lo anteriormente explicado en la figura 15 con resultados positivos de funcionamiento.

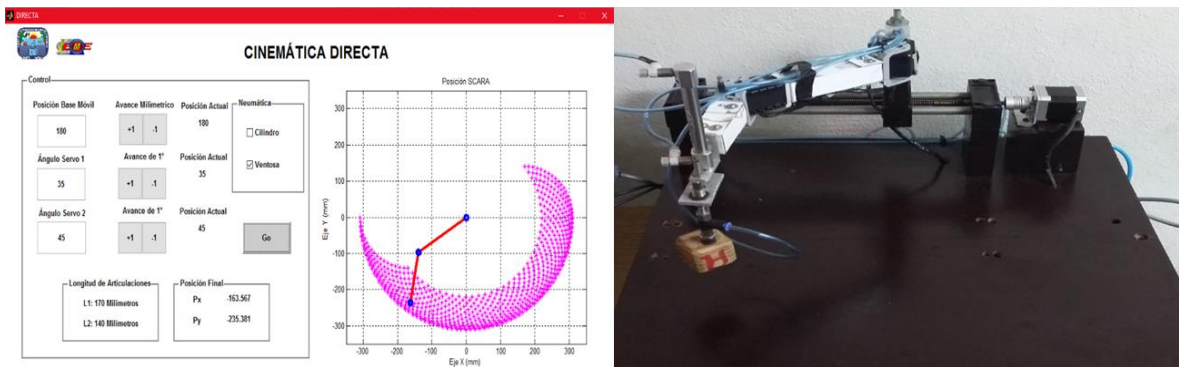


Figura 16. Prueba de cinemática directa con el robot.

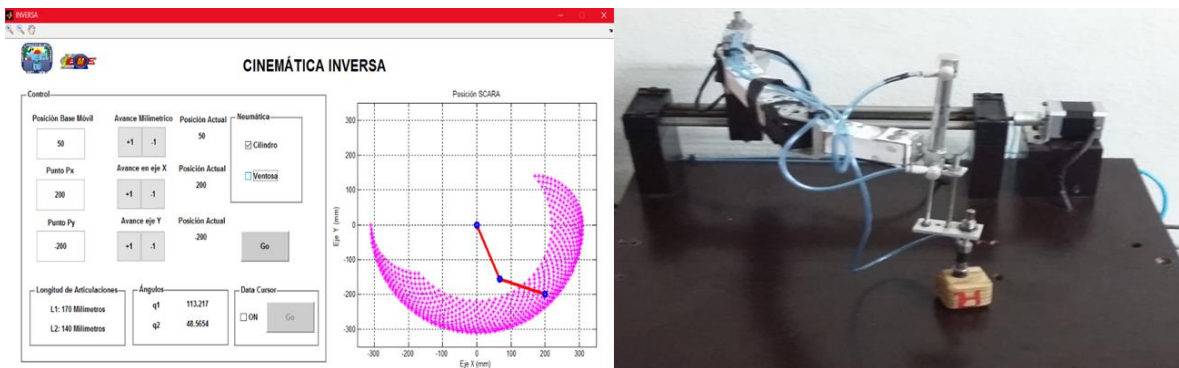


Figura 17. Prueba de cinemática inversa con el robot.

## CONCLUSIONES

La formación de los alumnos en las instituciones educativas debe estar acompañada con un trabajo adecuado con conocimientos especializados para afrontar los retos de su vida profesional. Se deben de invertir horas de trabajo y entrenamiento en los laboratorios de las instituciones. El presente trabajo es un proyecto que busca contribuir en el auto-equipamiento del laboratorio de robótica del ITLAC. Es de gran importancia la participación de alumnos en este tipo de proyectos, ya que fortalecen su ingenio y creatividad, y así aterrizar sus conocimientos en un prototipo funcional.

El prototipo desarrollado cumple con las características mínimas para realizar prácticas en el laboratorio, en donde el alumno puede relacionar los conceptos básicos de robótica, como son: la morfología de un robot, sus actuadores, los problemas cinemáticos, y la interacción con un programa de control. Mediante una interfaz gráfica sencilla e intuitiva el alumno podrá generar movimientos de cinemática directa e inversa del robot. Para posteriormente programar una rutina automática y realizar una serie de trabajos con el robot. Gracias a que cuenta con la base móvil, el robot puede desplazar su área de trabajo, por lo que puede interactuar con otros robots sin problema alguno, generando así una simulación de un proceso industrial.

Es necesario resaltar que el presente trabajo es un esfuerzo muy importante y que se debe de seguir trabajando para que el prototipo se transforme en un producto que se pueda ofrecer a diferentes instituciones.

## BIBLIOGRAFIA

Arduino. (2015). Catálogo de productos del fabricante, sección learning. Recuperado de <https://www.arduino.cc/#>

Barragan, Diego Orlando Guerrero. (2007). Manual de interfaz gráfica de usuario de Matlab. [www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/10740/19/%255Bmatlab%255D\\_MATLAB\\_GUIDE.pdf](http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/10740/19/%255Bmatlab%255D_MATLAB_GUIDE.pdf)

Dynamixel. (2015). Catálogo de productos del fabricante, sección servomotores AX series. Recuperado de <http://en.robotis.com>

Gilat, A. (2006). *Matlab Una introducción con ejemplos prácticos*. Editorial Reverte, Edición en español, España.

Gómez, S. (2010) *El gran libro de SolidWorks*,. Alfaomega Grupo Editor, Cuarta reimpression, Distrito Federal, México.

Hesse, S. (2004) *Las pinzas y sus aplicaciones*. Blue Digest on Automation Festo, Edición en español, Esslingen, Alemania.

Jazar, R.N. (2010) *Theory of Applied Robotics Kinematics, Dynamics and control*. Springer, Second Edition, New Cork, USA.

Nanotec. (2015). Catálogo de productos del fabricante, sección motores a pasos. Recuperado de <http://en.nanotec.com/products/250-st4118-stepper-motor-nema-17/>.

SMC México (2015). Catálogo de productos del fabricante, sección válvulas direccionales de control. Recuperado de <http://www.smc.com.mx/digital-catalog/>