

## PROTOTIPO PARA APRENDIZAJE – ENSEÑANZA DE LA ROBÓTICA.

Fabio Abel Aguirre Cerrillo  
Arturo Luna Castro  
Elías Gutiérrez Mendoza  
Mauro Berber Palafox

### RESUMEN

El presente trabajo tiene el objetivo de mostrar los elementos y partes de un robot para ser utilizado con fines didácticos, esto es, un prototipo para la enseñanza –aprendizaje de la robótica con sus conceptos fundamentales. Es un trabajo que muestra parte de un pequeño proyecto que tiene la finalidad del auto-equipamiento que tanto hace falta en el sistema educativo. Se muestra el diseño mecánico de un robot que tiene una estructura de un robot PUMA. Se desarrollan las ecuaciones del modelado de la cinemática directa. Dicho modelo cinemático (sus ecuaciones) es validado al comparar el resultado del modelo 3D del robot con un programa realizado en Matlab. Se muestra el prototipo construido y sus elementos, tanto mecánicos, de electrónica y el software para ser controlado. Al ser diseñado para fines didácticos, el robot se puede controlar por medio de un celular para cada una de sus articulaciones. También se ha desarrollado una interfaz gráfica de usuario que permite el libre movimiento del robot, así como almacenar posiciones y rutinas ya establecidas. Tiene la capacidad de realizar tarea de pick & place.

### INTRODUCCIÓN

Todas las áreas del conocimiento requieren de personal altamente calificado para el desempeño de sus funciones. La robótica es un ejemplo en donde se integran una gran cantidad de conocimientos con habilidades y que toda persona que opera un robot debe de contar con las competencias necesarias, definido en la actualidad en el sistema educativo del país. Los robots están siendo implementados en muchas áreas para brindar una mejor calidad de vida a la humanidad, ya sea que se utilice para entornos industriales o los denominados de servicio. Desde el 2010, la demanda de los robots industriales se ha acelerado considerablemente dada la tendencia en la automatización en los procesos de producción y la continua mejora en las innovaciones técnicas de los robots industriales, según los datos presentados por la International Federation of Robotics (IFR).

En el año 2014 se vendieron 229 261 unidades robóticas, lo que equivale un incremento en ventas de robots de un 29 % respecto al año 2013. Entre el 2010 y 2014, el promedio en el incremento de ventas de robots fue del 17 % por año. En el año 2015 se estableció una marca en la venta de robots, alrededor de 240 000 (Worldrobotics, 2016). Desde el año 2010 la industria automotriz (el cliente más importante de la industria robótica) se ha incrementado considerablemente la inversión en robots industriales. En el año 2014 se instalaron 98900 nuevos robots, lo que equivale un 43 % de incremento respecto al año 2013 (IFR, 2016). De lo anterior se puede inferir que cada año se incrementa el número de unidades robóticas en servicio. Por tanto es muy importante estar preparado para afrontar los retos tecnológicos y los sistemas educativos deben de asumir su responsabilidad al preparar alumnos con las competencias requeridas, en este caso, en la robótica. Desafortunadamente las instituciones de educación superior tienen muy poco equipo de laboratorio, por no decir nulo y se dificulta cumplir la labor docente en el proceso enseñanza-aprendizaje con los alumnos, pues estos últimos no tienen las horas de entrenamiento para alcanzar las conocimientos

prácticos requeridos. Es importante comentar que la falta de equipamiento es un problema y una oportunidad de afrontarlo es mediante el auto-equipamiento con prototipos robóticos. Este es la finalidad del presente proyecto de investigación como un proceso para atender un problema.

### JUSTIFICACIÓN

Actualmente se vive en tiempos en los cuales existe software vanguardista en donde el alumno puede realizar simulaciones para una gran cantidad de robots industriales. Dichos simuladores son herramientas muy buenas para el aprendizaje pero es necesario que los alumnos practiquen con dispositivos reales, ya que los robots son parte de la realidad. Observar los materiales, los actuadores, escuchar el ruido que provocan los dispositivos, analizar los tiempos de respuesta, entre muchas otras cosas.

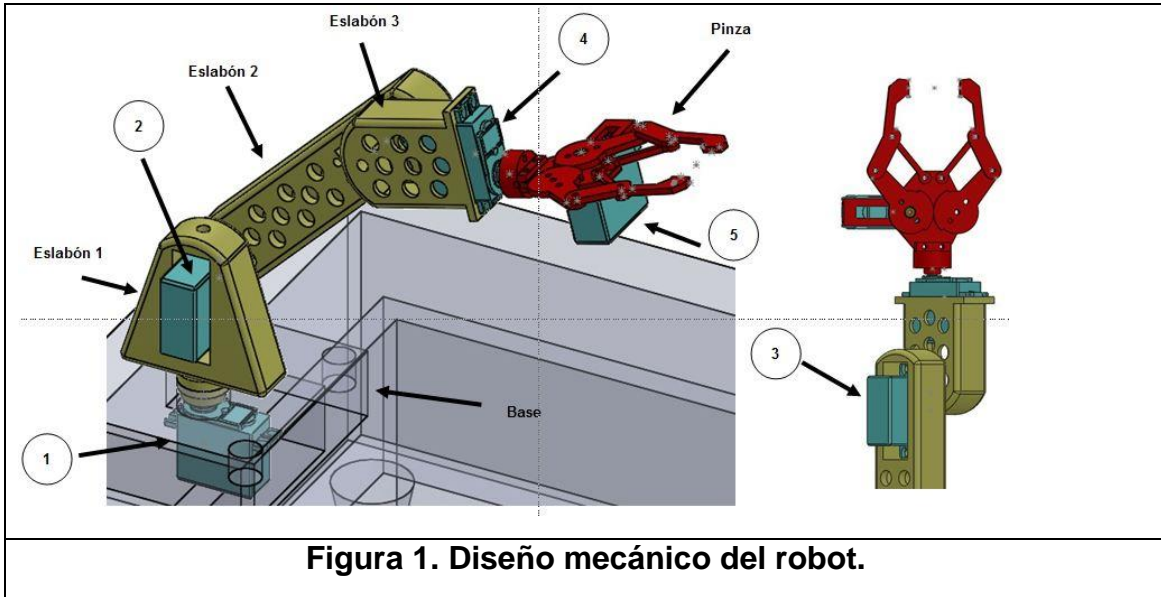
El presente trabajo es un prototipo de un robot que pretende ser un apoyo didáctico en la enseñanza – aprendizaje de la robótica. En la actualidad el material didáctico tiene muchas finalidades; más que ilustrar tiene como objetivo llevar al alumno a trabajar, investigar, descubrir, construir e incluso innovar. Adquiriendo así un aspecto funcional dinámico, propiciando la oportunidad de enriquecer la experiencia del alumno, aproximándolo a la realidad y ofreciéndole un mayor campo de acción.

### METODOLOGÍA

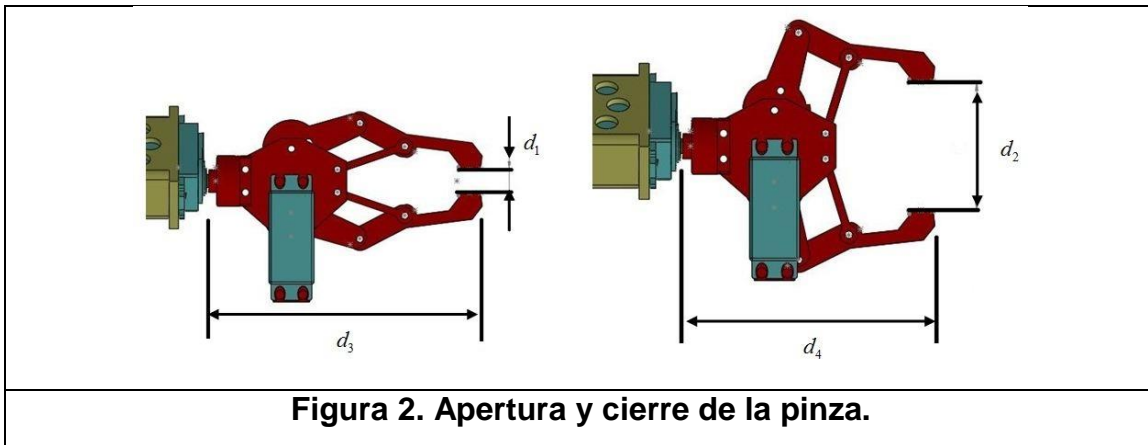
Antes de describir el diseño y estructura mecánica del robot o prototipo, es importante relatar que fue necesario pensar y analizar el tipo de configuración que el robot debería de tener y que mostrara los aspectos teóricos de los contenidos de la materia de Robótica de la carrera de Ingeniería Electromecánica para que el diseño contara con una configuración de un robot de aplicación industrial.

En la figura 1 se muestra el diseño mecánico del robot y que se ha montado sobre una base de madera. En el diseño se ha utilizado el software de diseño mecánico SolidWorks (Gómez, 2010). Se puede ver que las primeras tres articulaciones con sus tres eslabones, corresponden a la configuración del robot industrial PUMA. Los eslabones se han construido con el apoyo de una impresora de plástico 3D. Cada uno de estos tres eslabones es movido por un servomotor montado en el eje de la articulación. En total son 5 servomotores, indicados con los números encerrados en un círculo. El servomotor utilizado es el MG995 de PowerPro. Tienen un voltaje de alimentación de 4.8 volts a 6.0 volts para un torque de 9.40 kg-cm a 11.00 kg-cm, respectivamente (TowerPro, 2015). Es importante comentar que el ensamble de cada una las piezas puede ser una actividad de aprendizaje para el alumno y conocer los elementos principales de su robot.

Como elemento final se tiene una pinza mecánica que puede girar sobre su propio eje y que puede abrir y cerrar para que el prototipo tenga la capacidad de trabajar en operaciones de pick & place (tomar y dejar).



Para la apertura y cierre de la pinza se tiene por el servomotor, tal y como lo muestra la figura 2. Si el grado de apertura  $d_1$  es menor  $d_2$ , la longitud  $d_3$  es mayor a  $d_4$  y el alcance de la pinza es ligeramente mayor. El caso opuesto indica que el alcance de la pinza es menor pero con una distancia de apertura mayor. En cuanto al grado de apertura, la pinza tiene la capacidad de tomar piezas de 1 mm a 50 mm.



Una vez diseñado el robot, se realizó el análisis para obtener las ecuaciones de la cinemática directa utilizando el procedimiento de Denavit-Hartenberg (Jazar, 2010). En la figura 3 se muestran los sistemas o tramas de referencia con la finalidad de obtener las matrices de transformación de un sistema de referencia a otro y encontrar la posición final ( $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$ ), respecto al sistema de referencia cero, dados los ángulos de cada una de las articulaciones y las longitudes de los eslabones como parámetros. En la tabla 1 se muestran los parámetros de Denavit-Hartenberg como resultado de la asignación de los sistemas de referencia.

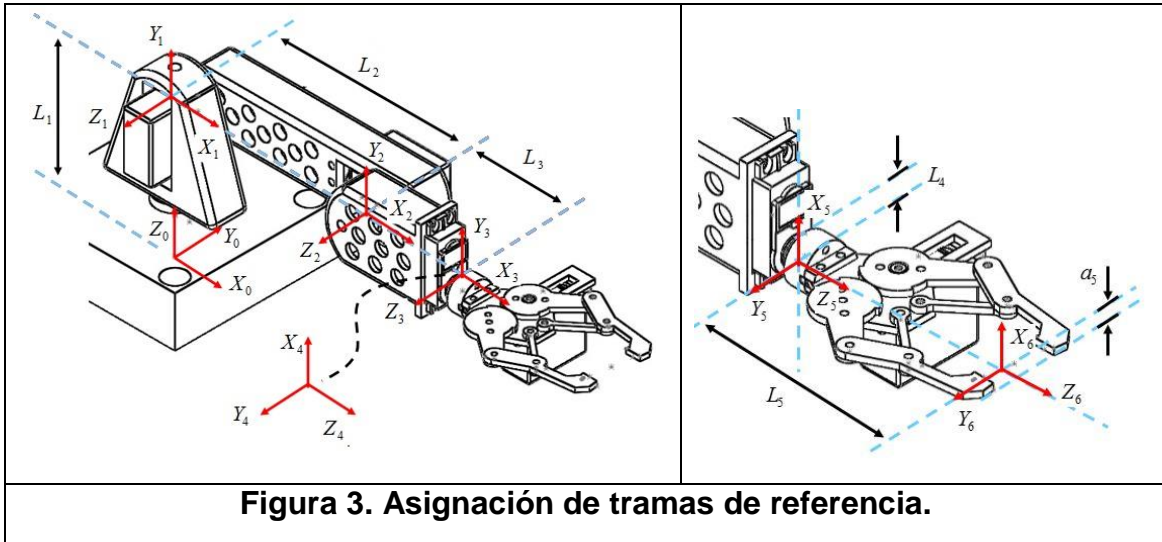


Tabla 1. Parámetros de Denavit-Hartenberg del robot.

Trama	$\theta_i$	$d_i$	$a_i$	$\alpha_i$
1	$\theta_1$	$L_1$	0	90
2	$\theta_2$	0	$L_2$	0
3	$\theta_3$	0	$L_3$	0
4	90	0	0	90
5	0	0	$L_4$	0
6	$\theta_5$	$L_5$	$a_5$	0

La matriz de transformación de una trama a otra trama es:

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

donde los parámetros de Denavit-Hartenbert son:

$a_i$  - distancia de  $Z_{i-1}$  a  $Z_i$  a lo largo del eje  $X_{i-1}$ .

$\alpha_i$  - el ángulo entre  $Z_{i-1}$  a  $Z_i$  medida en un plano perpendicular al eje  $X_{i-1}$ , utilizando la regla de la mano derecha.

$d_i$  - la distancia de  $X_{i-1}$  a  $X_i$  medida sobre  $Z_{i-1}$ .

$\theta_i$  - el ángulo que forman los ejes  $X_{i-1}$  a  $X_i$  medidos en un plano perpendicular al eje  $Z_i$ , utilizando la regla de la mano derecha.

Por tanto las matrices de transformación son:

$${}^0A_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & \sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & 0 & -\cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$${}^1A_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & L_2 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & L_2 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$${}^2A_3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & L_3 \cos \theta_3 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & L_3 \sin \theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$${}^3A_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$${}^4A_5 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L_4 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$${}^5A_6 = \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & -\sin \theta_5 & 0 & a_5 \cos \theta_5 \\ \sin \theta_5 & \cos \theta_5 & 0 & a_5 \sin \theta_5 \\ 0 & 0 & 1 & L_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

Para obtener la matriz de transformación general a lo largo de todo el sistema, se requiere multiplicar las matrices de las ecuaciones (2) a (7), esto es:

$$T = {}^0A_6 = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 {}^3A_4 {}^4A_5 {}^5A_6 \quad (21)$$

y que se representa como:

$$T = [n \quad o \quad a \quad P] = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & P_x \\ n_y & o_y & a_y & P_y \\ n_z & o_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

Donde los vectores  $n$ ,  $o$  y  $a$  representan la orientación del sistema de referencia 6 con respecto al sistema 0. El vector  $P$  representa la posición del sistema de referencia 6 con respecto al sistema de referencia 0. Desarrollando la ecuación (8) se obtienen los valores de los vectores  $n$ ,  $o$ ,  $a$  y  $P$  de la ecuación (9). En el presente trabajo sólo se atenderá el caso del vector de posición  $P$  ( $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$ ), dado por las ecuaciones (10), (11) y (12) y que para su validación se ha utilizado el modelo 3D del robot en SolidWorks. El software permite colocar relaciones de posición dadas por los valores de los ángulos  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$ ,  $\theta_4$  y  $\theta_5$ , para luego utilizar la herramienta de “medir”, entre el punto donde se encuentra trama de referencia 0 y el punto en donde se encuentra la trama de referencia 6. El valor de los parámetros del robot de encuentra en la tabla 2. Además las ecuaciones son implementadas en un pequeño programa hecho con el software Matlab (Gilat, 2006).

$$\begin{aligned} P_x = & L_3 (\cos \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3 - \cos \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3) + L_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 + \\ & L_4 (\cos \theta_1 \cos \theta_2 \sin \theta_3 + \cos \theta_1 \cos \theta_3 \sin \theta_2) + \\ & L_5 (\cos \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3 - \cos \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3) + \\ & a_5 (\sin \theta_1 \sin \theta_2) - a_5 \cos \theta_5 (\cos \theta_1 \cos \theta_2 \sin \theta_3 + \cos \theta_1 \cos \theta_3 \sin \theta_2) \end{aligned} \quad (23)$$

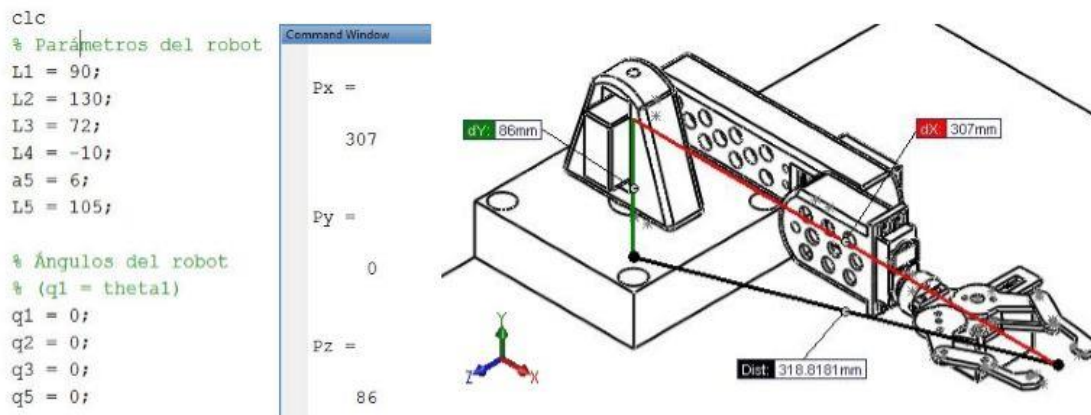
$$\begin{aligned}
 P_y = & L_3 (\sin\theta_1 \cos\theta_2 \cos\theta_3 - \sin\theta_1 \sin\theta_2 \sin\theta_3) + L_2 \sin\theta_1 \cos\theta_2 - \\
 & L_4 (\cos\theta_2 \sin\theta_1 \sin\theta_3 + \cos\theta_3 \sin\theta_1 \sin\theta_2) + \\
 & L_5 (\cos\theta_2 \cos\theta_3 \sin\theta_1 - \sin\theta_1 \sin\theta_2 \sin\theta_3) - \\
 & a_5 \cos\theta_1 \sin\theta_5 - a_5 \cos\theta_5 (\cos\theta_2 \sin\theta_1 \sin\theta_3 + \cos\theta_3 \sin\theta_1 \sin\theta_2)
 \end{aligned} \tag{24}$$

$$\begin{aligned}
 P_z = & L_3 (\sin\theta_2 \cos\theta_3 + \cos\theta_2 \sin\theta_3) + L_2 \sin\theta_2 + L_1 - L_4 (\sin\theta_1 \sin\theta_3 - \cos\theta_2 \cos\theta_3) + \\
 & L_5 (\cos\theta_2 \sin\theta_3 + \cos\theta_3 \sin\theta_2) - a_5 \cos\theta_5 (\sin\theta_2 \sin\theta_3 - \cos\theta_2 \cos\theta_3)
 \end{aligned} \tag{25}$$

**Tabla 2. Medidas de los parámetros del robot (mm).**

$L_1$	90	$L_4$	-10
$L_2$	130	$L_5$	105
$L_3$	72	$a_5$	6

En las figuras 4 y 5 se muestran dos pruebas de la validación de las ecuaciones (10), (11) y (12). Se puede observar los datos de entrada en Matlab y los datos de salida que genera el programa y que se comparan con las mediciones realizadas con SolidWorks. Tomar en cuenta el sistema de referencia de SolidWorks XYZ con el asignado con el asignado en la figura 3.



**Figura 4. Prueba 1 de validación ecuaciones cinemática directa.**



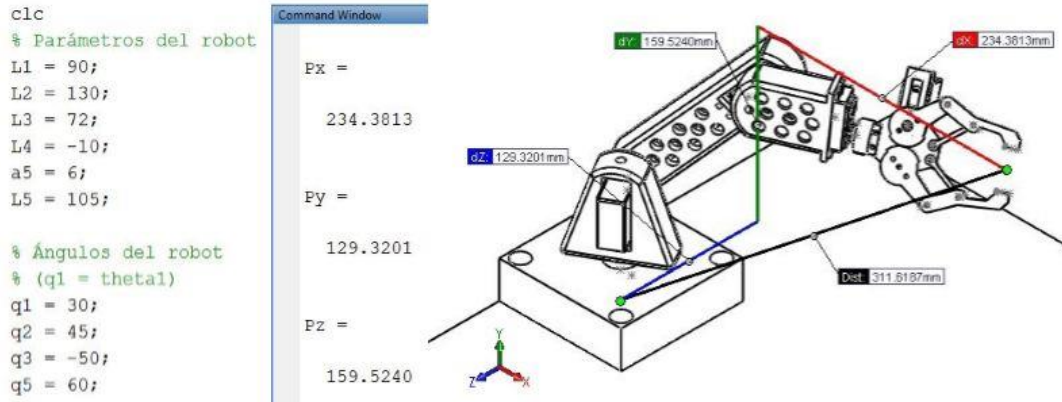


Figura 5. Prueba 2 de validación ecuaciones cinemática directa.

Una vez diseñada la parte mecánica y habiendo realizado el análisis de la cinemática directa, se ha procedido a la construcción del robot. En la figura 6 se muestran cuatro fotografías del robot construido.

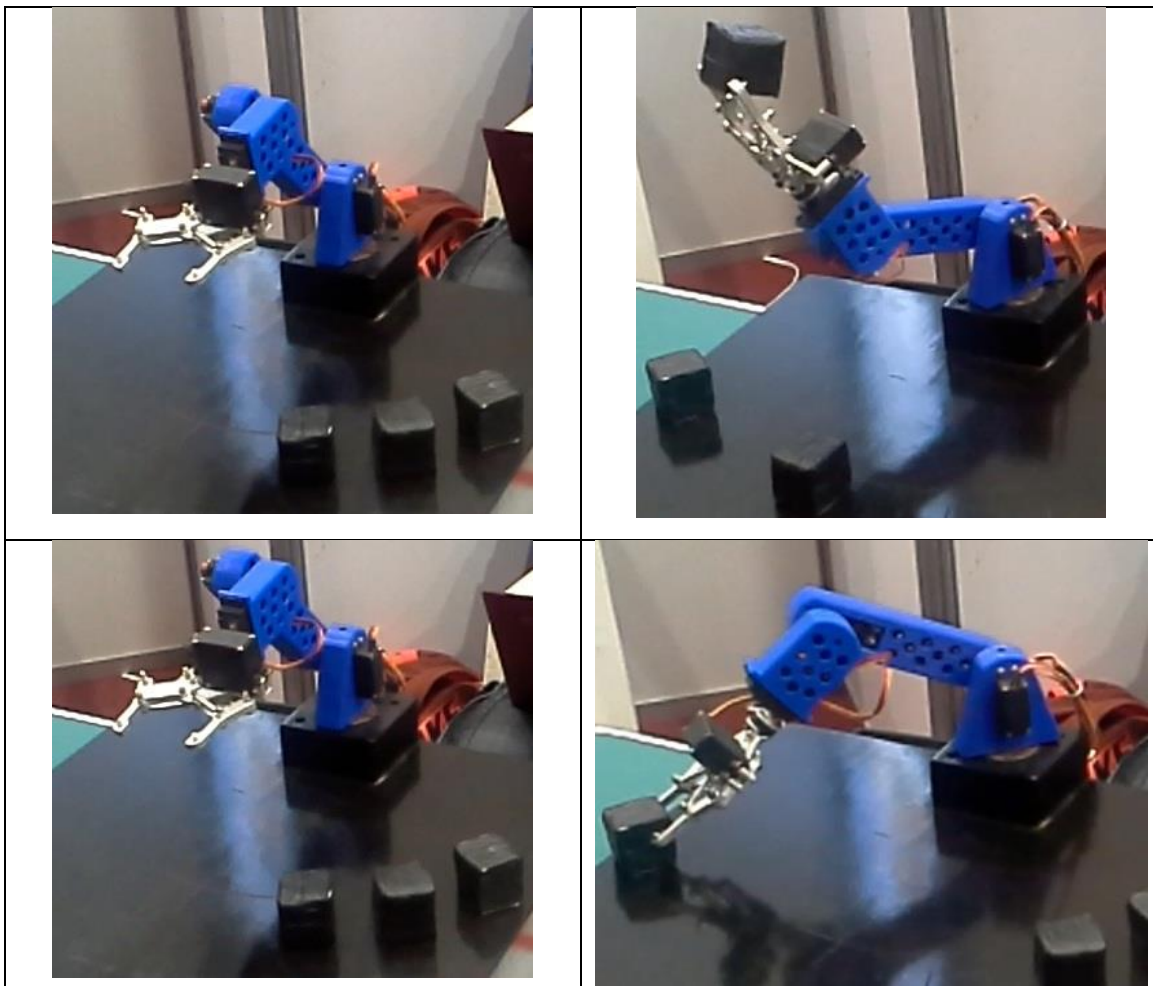


Figura 6. Fotografías del robot.

Para el control del robot se tienen dos opciones. Una de ellas es por medio de un celular y la otra es por medio de una interfaz gráfica de Matlab (Barragan, 2007), tal y como lo muestra la figura 7. En el sistema operativo Android de un celular se ha realizado un programa que emite las señales de control y que son enviadas por bluetooth al microcontrolador Arduino (Arduino, 2016), utilizando un dispositivo electrónico Bluetooth HC-06. El microcontrolador es el encargado de generar las señales de PWM para cada uno de los servomotores y tener el movimiento del robot. A cada una de las articulaciones se les ha identificado (ver figura 8).

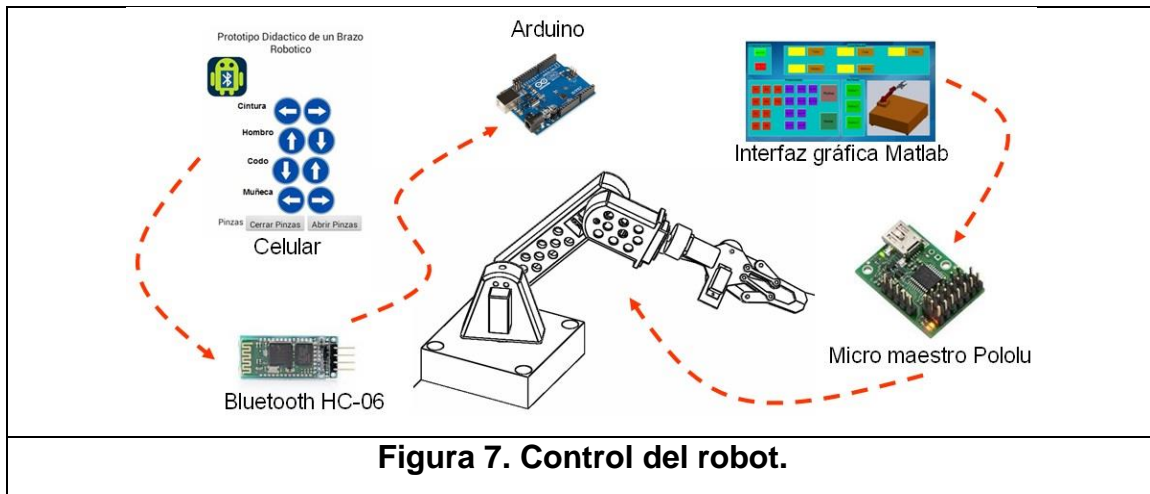


Figura 7. Control del robot.

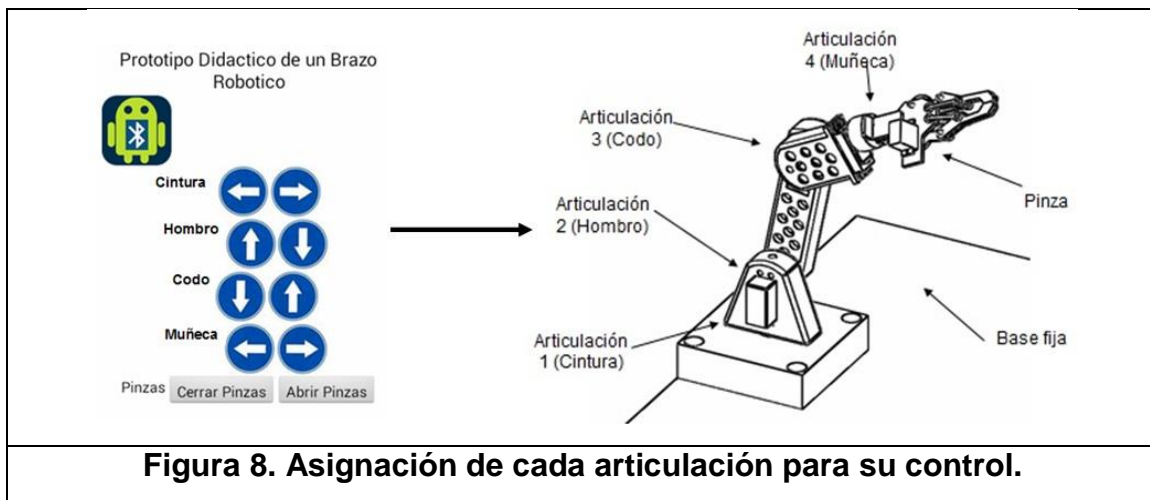


Figura 8. Asignación de cada articulación para su control.

En la otra opción, las señales de control de PWM que van hacia los servomotores los genera el Micro Maestro 6-Channel USB Servo Controller (Pololu, 2016), con la capacidad de manejar hasta 6 servomotores con una alimentación para su funcionamiento de 5 VCD aunque la fuente de poder que proporciona la potencia eléctrica tiene un rango de 5-16 VCD. Tiene comunicación serial TTL y un puerto de comunicación USB mini-B. Al instalar el controlador del Micro Maestro, la computadora lo detecta como un puerto COM. Significa que el origen de las señales de control es la computadora que tiene una interfaz gráfica tal y como lo muestra la figura 9. Observar que se tienen los paneles de control de: comunicación, controles, posiciones y rutinas.



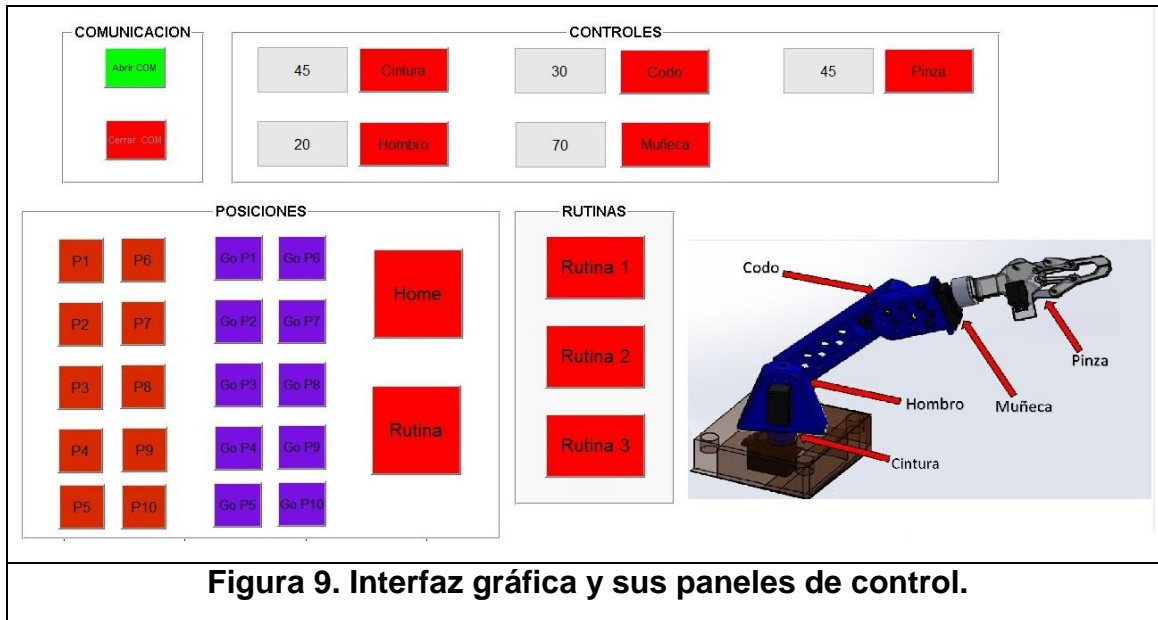


Figura 9. Interfaz gráfica y sus paneles de control.

- **COMUNICACIÓN.** Permite abrir y cerrar puerto para comunicarse con el Micro Maestro.
- **CONTROLES.** Permite introducir el valor de los ángulos para que el robot se mueva a la posición deseada.
- **POSICIONES.** Se tiene programado para almacenar hasta 10 posiciones. Una vez guardada una posición, por ejemplo P1, con solo oprimir el botón Go P1, el robot toma dicha posición almacenada.
- **RUTINAS.** El robot tiene almacenadas tres rutinas programadas y que con solo oprimir cualquiera de dichos botones, el robot realiza la tarea especificada.

## CONCLUSIONES

Las instituciones educativas de todos los niveles deben de estar preparadas para hacer frente a las demandas de los sectores industriales y en específico de la robótica. El trabajo que se ha presentado es un esfuerzo para el auto-equipamiento y contar con herramientas de enseñanza - aprendizaje de la robótica.

Se ha seguido con una metodología para obtener las ecuaciones de la cinemática directa del robot presentado. Dichas ecuaciones se han validado utilizando un programa en Matlab y sus resultados se han comparado con el modelo del robot hecho en 3D. Será necesario compactar las ecuaciones de la cinemática directa con la finalidad de obtener un menor esfuerzo computacional.

Se ha presentado conceptualmente el flujo de las señales y los elementos físicos para ejecutar acciones de movimiento en el robot. Los movimientos articulares se pueden controlar desde un celular con sistema operativo Android. También se es posible controlar los movimientos desde una interfaz gráfica de Matlab.

Es importante continuar con el trabajo del presente proyecto con la finalidad de que el prototipo se convierta en un producto robusto. Se debe de trabajar en el problema del modelado de la cinemática inversa e implementarla con las ecuaciones de la cinemática directa. Es importante iniciar con la generación de material didáctico del robot para que realmente se implemente en el plan de estudios de la materia de robótica al contar con actividades trabajo que deben de realizar los estudiantes.

## BIBLIOGRAFIA

Arduino. (2016). Catálogo de productos del fabricante, sección learning. Obtenido el 10 de febrero de 2016., 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).

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.

IFR. (2016). *International Federation of Robotics Industrial Robots Section*. Obtenida el 1 de Junio 2016, de <http://www.ifr.org>.

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

Pololu. (2016). Catálogo de productos del fabricante RC Servo Controllers, Obtenido el 16 de febrero de 2016., de <https://www.pololu.com/category/12/rc-servo-controllers>

TowerPro. (2015). *Catálogo de productos del fabricante, sección Robotics Servo*. Obtenido el 15 de Octubre de 2015 de, <http://www.towerpro.com.tw/product/mg995-robot-servo-180-rotation-2>.

Worldrobotic. (2016). *World Robotics 2015 Industrial Robots Executive Summary*. Obtenida el 7 de Junio 2016, de <http://www.worldrobotics.org>