

Desarrollo de un robot manipulador accesible para aplicaciones educativas con un sistema de control basado en un microcontrolador PIC®

DANIELA ARRAZOLA, DANIEL CONTRERAS, LUIS FLORES, ULISES FLORES, DIEGO ORBEZO

Resumen—En el siguiente escrito se presenta la metodología utilizada para el desarrollo de un brazo robótico con fines didácticos de 4 grados de libertad con la implementación de un sistema de control basado en un microcontrolador PIC. Se lleva a cabo el análisis matemático del mecanismo para caracterizar la cinemática directa del sistema.

Palabras Clave—robot, manipulador, análisis, control, micro-controlador

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el sector de robots manipuladores destinados a fines educativos y demostrativos ha tenido un gran desarrollo como resultado de la acelerada popularización de la impresión 3D. Actualmente, se puede tener acceso a una impresora 3D sin ser necesariamente un profesional en la industria del diseño. Los fabricantes de impresoras han apostado por el desarrollo de esta tecnología para su uso doméstico o personal. Con el objetivo de impulsar este mercado, las compañías ponen a disposición del público general numerosos modelos diseñados para su impresión directa. Tal es el caso de las empresas BCN3D y Zortrax, que son ampliamente reconocidas en el sector industrial y que también se han introducido en el doméstico.

Dentro del extenso catálogo disponible, se pueden encontrar modelos completos de brazos robóticos estructurados de forma modular que posibilitan su impresión. Dependiendo de la resolución y material de impresión seleccionados, estos robots pueden alcanzar un grado de calidad suficiente que les permita ser utilizados en ámbitos donde se requiera demostrar el funcionamiento de dichos sistemas. Ambos fabricantes, BCN3D y Zortrax, disponen de modelos de brazos robóticos que reciben el nombre de BCN3D Moveo y Zortrax Robotic Arm, respectivamente [1, 2]. Sin embargo, aun cuando es posible el acceso a esta tecnología, el costo de imprimir un modelo de estas características es muy elevado. Esto debido a la complejidad del sistema, el cual es conformado por un gran número de elementos mecánicos y estructurales. De esta manera, la opción de imprimir un brazo robótico se convierte en poco rentable.

Como alternativa a un modelo de impresión 3d, se pueden encontrar propuestas de diseño de bajo costo y de fácil ensamblaje de robots manipuladores de apoyo didáctico adaptados a las necesidades educativas de las instituciones que imparten cursos de robótica o de áreas relacionadas [3, 4]. Siguiendo con esta línea de diseño y solución, se desarrolló un robot manipulador construido a partir de materiales y

elementos mecánicos comunes y estándares, que reducen significativamente el costo en contraste de imprimir cada elemento del sistema. Dichos elementos son comercializados para la construcción de máquinas CNC. Sin embargo, gracias a sus características de precisión, pueden ser implementados en el desarrollo de un sistema con los requerimientos de un brazo robótico. El sistema de control está basado en un microcontrolador PIC. Estos chips también pueden ser considerados como de bajo costo. No obstante, cuentan con todas las funcionalidades necesarias para controlar al sistema. En general, el diseño propuesto también cuenta con la calidad suficiente para ser implementado como un modelo funcional en el ámbito educativo.

A. Generalidades de los Robots Manipuladores

Los robots manipuladores están compuestos cinemáticamente por eslabones conectados por articulaciones para formar una cadena cinemática. Sin embargo, un robot como sistema consta de un manipulador, una muñeca, un efector final, actuadores, sensores, controladores, procesadores y software [5].

El controlador o la unidad de control tiene tres funciones: recopilar y procesar la información proporcionada por los sensores del robot, planificar el movimiento geométrico de la estructura del robot y organizar la información entre el robot y su entorno. La unidad de control incluye el procesador y el software [5].

Los actuadores son los “músculos” de los manipuladores. El controlador envía señales a los actuadores, que a su vez mueven las articulaciones y los eslabones del robot. Los tipos comunes son servomotores, motores paso a paso, actuadores neumáticos y actuadores hidráulicos. Se utilizan otros actuadores novedosos en situaciones específicas. Los actuadores están bajo el mando del controlador [6].

B. Los Motores Paso a Paso como Actuadores en los Robots Manipuladores

Los motores paso a paso ocupan un nicho único en el mundo del control de motores. Estos motores se utilizan comúnmente en aplicaciones de medición y control. Varias características comunes a todos los motores paso a paso los hacen ideales para este tipo de aplicaciones [7].

En específico, estos motores son empleados en algunos robots, en el más pequeño y término medio del rango industrial y con los robots de enseñanza y pasatiempo. También son



Figura 1. Motor Paso a Paso NEMA 17

ampliamente usados en otras aplicaciones industriales [8]. El brazo robótico presentado yace en esta clasificación y por ese motivo, los actuadores corresponden a motores paso a paso. Algunas de las características favorables para esta aplicación son [7]:

- Sin escobillas: los motores paso a paso no tienen escobillas. El conmutador y las escobillas de los motores convencionales son algunos de los componentes más propensos a fallas y crean arcos eléctricos que son indeseables o peligrosos en algunos entornos.
- Independiente de la carga: los motores paso a paso giran a una velocidad establecida independientemente de la carga siempre que la carga no exceda el par nominal del motor.
- Posicionamiento de lazo abierto: los motores paso a paso se mueven en incrementos o pasos cuantificados. Siempre que el motor funcione dentro de su especificación de par, la posición del eje se puede conocer en todo momento sin necesidad de un mecanismo de retroalimentación.
- Par de retención: los motores paso a paso pueden mantener el eje estacionario.
- Excelente respuesta para el arranque, frenado y reversa.

1) *Tipos de Motores Paso a Paso:* Hay tres tipos básicos de motores paso a paso: de imanes permanentes, de reluctancia variable e híbridos. Los motores de imanes permanentes tienen un rotor magnetizado, mientras que los motores de reluctancia variable tienen rotores de hierro dulce dentados. Los motores paso a paso híbridos combinan aspectos de la tecnología de imanes permanentes y de reluctancia variable [7].

El estator, o parte estacionaria del motor paso a paso, contiene múltiples devanados. La disposición de estos devanados es el factor principal que distingue los diferentes tipos de motores paso a paso desde un punto de vista eléctrico. Desde la perspectiva del sistema eléctrico y de control, los motores de reluctancia variable están lejos de los otros tipos. Tanto los motores de imán permanente como los híbridos pueden bobinarse utilizando bobinados unipolares, bobinados bipolares o bobinados bifilares [7].

2) *Selección del Motor para la Aplicación del Brazo Robótico:* La aplicación del brazo robótico requiere la máxima

TABLA I
CARACTERÍSTICAS DEL MICROCONTROLADOR PARA EL CONTROL DE MOTORES PASO A PASO

I/O básico	Para generar señales de control de paso completo o medio paso, comunicaciones digitales/pulsos de entrada para velocidad y retroalimentación desde interruptores de referencia y seguridad.
Módulo Capture Compare PWM	Para micropasos (o medio paso).
Comparadores	Detección y protección de sobrecorriente.

estabilidad y fluidez en el movimiento de los eslabones del sistema. Para ello, las vibraciones generadas deben ser mínimas. Por esta razón los motores de reluctancia variable no resultan una opción viable para la construcción. Por otro lado, los motores de imán permanente e híbridos presentan características que sí permiten el desempeño deseado. Sin embargo, los motores de imán permanente son más silenciosos que los motores híbridos, y a pesar de que estos últimos cuentan con una mejor resolución, el tamaño de paso de los motores de imán permanente puede ser compensado a través de sistemas de engranajes.

En el caso de la selección entre un motor paso a paso de imán permanente de tipo unipolar o bipolar, se decidió trabajar con motores bipolares (Figura 1). Esta configuración nos permite contar con un torque mayor, lo cual es favorable para esta aplicación ya que se busca maximizar esta característica en pos de evitar que los ejes de las articulaciones sean vencidos con el peso de los eslabones y con ello, evadir la pérdida del control de la posición.

C. Control de los Motores Paso a Paso

Los microcontroladores PIC a partir de su interfaz (Tabla I [9]), permiten implementar un sistema de control digital capaz de impulsar los actuadores o motores del robot manipulador, así como también llevar a cabo una integración de sensores con el fin de mejorar la funcionalidad de este. La propiedad más importante de un PIC para el control de los de los motores paso a paso es el módulo CCP. Mediante el cual, es posible la generación de señales PWM, cuyas características permiten controlar los siguientes aspectos:

- Posicionamiento: los motores paso a paso son fáciles de posicionar ya que estos se mueven en pasos basados en pulsos suministrados a los devanados del estator.
- Sentido de giro: la dirección de rotación se cambia invirtiendo la secuencia de pulsos.
- Control de velocidad: la velocidad se controla mediante la frecuencia de pulsos.

El rotor puede estar hecho para indexar lentamente, haciendo una pausa después de cada incremento, o puede moverse rápidamente generando un movimiento continuo. El máximo par torsor dinámico en un motor paso a paso ocurre con bajas frecuencias de pulsos. Por lo tanto, puede fácilmente acelerar una carga. Una vez que se haya alcanzado la posición

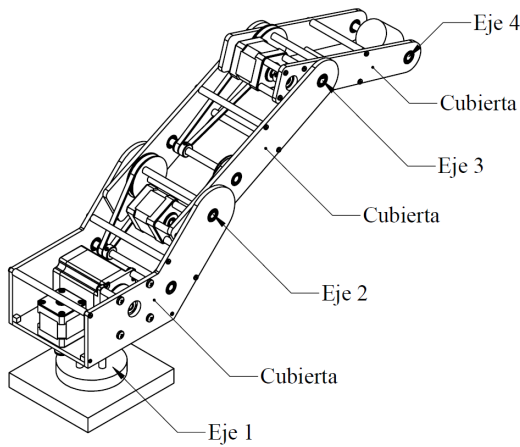


Figura 2. Diagrama esquemático del brazo robótico.

requerida y se terminen los impulsos de control, el eje se detiene sin necesidad de embragues o frenos [8].

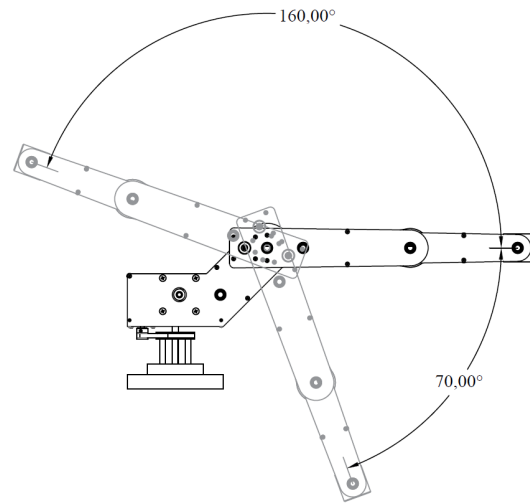
Los momentos de rotación o ángulos de paso reales de la flecha pueden obtenerse normalmente desde 1.8 grados hasta 90 grados, dependiendo de la selección particular del motor. Así, con un ángulo de paso nominal de 1.8 grados, una corriente de 1000 pulsos dará un desplazamiento angular de 1800 grados o cinco revoluciones completas. También tienen una capacidad de velocidad baja sin necesidad de reducción de engranaje. Por ejemplo, si el motor mencionado anteriormente es accionado por 500 pulsos por segundo, girará a 150 RPM [8].

II. DESARROLLO

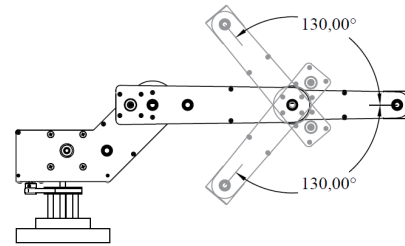
A. Diseño y Construcción

El diseño del brazo robótico presentado consiste en un robot antropomórfico de 4 grados de libertad basado en el modelo industrial de gama baja Dorna Robot, de la marca Dorna Robotics (Figura 2). Las características mecánicas y estructurales de este robot permitieron adaptar la construcción del sistema a procesos de manufactura accesibles. Las partes designadas como cubiertas (Figura 2), están diseñadas para ser cortadas con una máquina láser en una placa de MDF de 5.5 mm de espesor. Este procedimiento es rápido, asequible y preciso. Los elementos mecánicos que conforman la transmisión del sistema, como poleas, cintas, ejes y rodamientos son de dimensiones estándares y no requieren de algún maquinado específico. Los motores paso a paso utilizados cuentan con marcos estándares NEMA, ampliamente conocidos en la industria. La base constituye la geometría mas compleja sin embargo puede fabricarse de algún material resistente como madera. La geometría del adaptador del efector final es simple y puede obtenerse a partir de un elemento tubular de aluminio.

El tren de poleas para cada articulación (Figura 2) tiene una relación de velocidad específica. Es decir, cada eje requiere de un motor con un paso único. En la Tabla II se presenta



(a)



(b)

Figura 3. Rangos de desplazamiento angular para las articulaciones del brazo robótico.

TABLA II
RELACIONES DE VELOCIDAD DE LOS TRENES DE POLEAS DE CADA ARTICULACIÓN

	Paso del motor	Relación de velocidad	Paso de la articulación
Eje 1	3.75°	4	0.9375°
Eje 2	11.25°	12	0.9375°
Eje 3	11.25°	12	0.9375°
Eje 4	0.9°	1	0.9°

la relación de velocidad y desplazamiento angular para cada caso.

B. Sistema de Control

El sistema electrónico que controla los actuadores del robot (motores paso a paso) está basado en un microcontrolador PIC 16F877A, como unidad central de procesamiento (Figura 4). Entre las características de este microcontrolador se encuentra la posibilidad de generar una señal PWM con el módulo CCP, necesaria para el funcionamiento de los motores. El módulo Timer0 de este dispositivo permite implementar un contador que incrementa su valor a partir de una señal de reloj externa. También se cuenta con un módulo USART, que permite establecer una comunicación serial entre dispositivos [10].

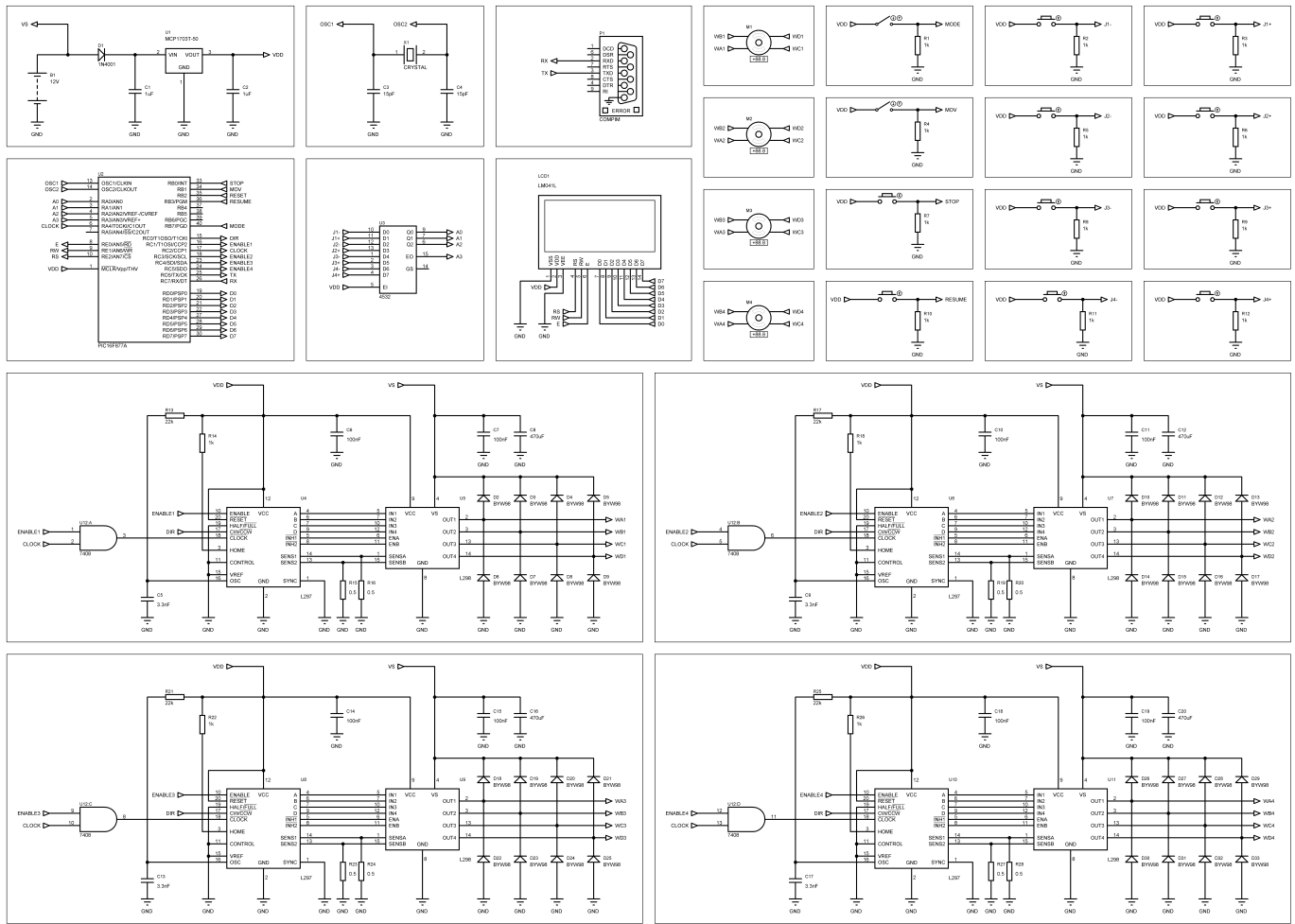


Figura 4. Diagrama electrónico del circuito de control.

Cada motor es manejado por dos circuitos integrados que funcionan conjuntamente, el L297 y L298. Este último consiste en un puente h para energizar y conmutar los devanados del motor. El L297 es un circuito específico para controlar los parámetros de funcionamiento de un motor paso a paso, como el sentido de giro o el tipo de paso (medio paso o paso completo), a partir de una única señal de reloj. La interfaz de usuario está conformada por una pantalla LCD y una serie de botones e interruptores para seleccionar el modo de operación y controlar al robot de forma manual. El estado de los botones es determinado a través de un decodificador con prioridad.

C. Programación y Modos de Operación

El sistema desarrollado cuenta con dos modos de operación, control manual y secuencia programada. Para el primer caso existen dos tipos de movimiento, fino y continuo. En el movimiento fino los motores son controlados por pulsos únicos generados en un pin del microcontrolador, consiguiendo que estos avancen un paso a la vez. Para el movimiento continuo una señal PWM es generada a través del módulo CPP, logrando así una serie de pulsos que permiten un accionamiento ininterrumpido. Para ambos casos el sentido de giro puede ser

establecido configurando el circuito integrado L297. Según la articulación activa, el sentido de giro, y el tipo de movimiento, en la pantalla LCD se despliega la información correspondiente.

Para ejecutar una secuencia programada se utiliza el software MATLAB con el fin de establecer una comunicación serial y con ello lograr una interconexión con el sistema. El programa de MATLAB envía el número de pasos a realizar para alcanzar cierto número de grados, así como la cantidad que determina el motor a accionar y el sentido de giro. El microcontrolador contabiliza el número de pulsos suministrados al motor a través de un sistema de lazo cerrado con la señal PWM retroalimentada al módulo Timer0. De esta manera se logra posicionar cada articulación dado un desplazamiento angular ingresado por el usuario.

D. Software

Para el desarrollo y diseño del sistema de control se llevó a cabo una simulación en el software Proteus. De esta manera fue posible la realización de pruebas y mediciones de todos los componentes para asegurar el correcto funcionamiento del circuito. Para demostrar la comunicación serial entre

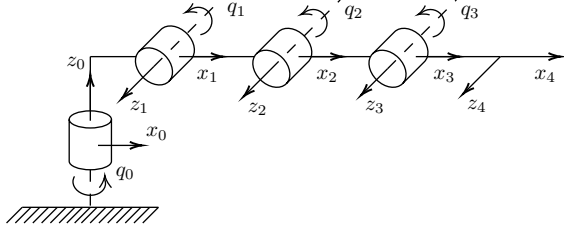


Figura 5. Asignación de ejes para cada articulación.

MATLAB y el sistema, se generaron puertos seriales virtuales con el software Virtual Serial Port. Este nos permitió hacer la interconexión entre dispositivos sin necesidad de una implementación física. Para la programación en lenguaje ensamblador del microcontrolador PIC16F877A se empleó el software MPLAB X IDE.

III. RESULTADOS

A. Cinemática Directa

A partir del modelo propuesto se desarrolló un análisis del mecanismo para determinar la cinemática directa del brazo robótico (Figura 5). Se utilizó la metodología de Denavit-Hartenberg la cual consiste en definir los parámetros de rotación (a) y longitud (l) de los eslabones, así como el ángulo (q) y la distancia (d) de las articulaciones [5, 6]. En la Tabla III se presentan los resultados obtenidos.

Con estos datos, se puede calcular la matriz de transformación homogénea para cada articulación siguiendo la Ecuación 1.

$$A_i = \begin{pmatrix} c_{q_i} & -s_{q_i}c_{\alpha_i} & s_{q_i}s_{\alpha_i} & l_i c_{q_i} \\ s_{q_i} & c_{q_i}c_{\alpha_i} & -c_{q_i}s_{\alpha_i} & l_i s_{q_i} \\ 0 & s_{\alpha_i} & c_{\alpha_i} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Posteriormente, se obtiene la matriz T_0^3 a partir de la Ecuación 2.

$$T_0^3 = A_0 A_1 A_2 A_3 \quad (2)$$

Las funciones x , y , y z que conforman la cinemática directa del robot se pueden deducir a partir de los valores de T_0^3 como sigue:

$$x = T_{0\ 14}^3 \quad (3)$$

$$y = T_{0\ 24}^3 \quad (4)$$

$$z = T_{0\ 34}^3 \quad (5)$$

Para la computación de la matriz T_0^3 se utilizó el software

TABLA III
PARÁMETROS DENAVIT-HARTENBERG DEL BRAZO ROBÓTICO

z_{i-1}		x_{i-1}	
x_{i-1}	$x - i$	z_{i-1}	z_i
q_0	d_0	l_0	$-\pi/2$
q_1	0	l_1	0
q_2	0	l_2	0
q_3	0	l_3	0

MATLAB obteniendo los siguientes valores de x , y y z :

$$x = (3262c_{q_0})/25 + (1018c_{q_0}c_{q_1})/5 - \dots \quad (6)$$

$$(1018s_{q_0}s_{q_1})/5 + 20c_{q_3}(c_{q_2}(c_{q_0}c_{q_1} - \dots \\ s_{q_0}s_{q_1}) - s_{q_2}(c_{q_0}s_{q_1} + c_{q_1}s_{q_0})) - \dots \\ 20s_{q_3}(c_{q_2}(c_{q_0}s_{q_1} + c_{q_1}s_{q_0}) + \dots \\ s_{q_2}(c_{q_0}c_{q_1} - s_{q_0}s_{q_1})) + \dots \\ (3822c_{q_2}(c_{q_0}c_{q_1} - s_{q_0}s_{q_1}))/25 - \dots \\ (3822s_{q_2}(c_{q_0}s_{q_1} + c_{q_1}s_{q_0}))/25$$

$$y = (3262s_{q_0})/25 + (1018c_{q_0}s_{q_1})/5 + \dots \quad (7)$$

$$\dots (1018c_{q_1}s_{q_0})/5 + \dots \\ \dots 20c_{q_3}(c_{q_2}(c_{q_0}s_{q_1} + c_{q_1}s_{q_0}) + \dots \\ \dots s_{q_2}(c_{q_0}c_{q_1} - s_{q_0}s_{q_1})) + \dots \\ \dots 20s_{q_3}(c_{q_2}(c_{q_0}c_{q_1} - s_{q_0}s_{q_1}) - \dots \\ \dots s_{q_2}(c_{q_0}s_{q_1} + c_{q_1}s_{q_0})) + \dots \\ \dots (3822c_{q_2}(c_{q_0}s_{q_1} + c_{q_1}s_{q_0}))/25 + \dots \\ \dots (3822s_{q_2}(c_{q_0}c_{q_1} - s_{q_0}s_{q_1}))/25$$

$$z = 11151/100 \quad (8)$$

B. Simulación

En la Figura 7a se muestra la ventana de comandos de MATLAB en la ejecución del programa. La salida "Recibido" indica que la conexión serial entre el software y el sistema de control fue exitosa. Es decir, el microcontrolador recibió los parámetros necesarios para mover cada articulación: selección del motor, sentido de giro y número de pasos. La interfaz de usuario generada se presenta en la Figura 7b. Esta está conformada por un botón cuya acción es finalizar la rutina del robot.

La simulación en Proteus del circuito electrónico se puede observar en la Figura 6. Los elementos mostrados consisten en la pantalla LCD, el puerto serial y cada uno de los motores. Se presentan los tres posibles modos de operación: control manual con movimiento fino y continuo, y secuencia programada. Para este último se puede apreciar la activación de los puertos TXD (transmisión) y RXD (recepción) del puerto serial que indican una comunicación en curso con MATLAB. Para el caso del control manual, los pines TXD y RXD se mantienen deshabilitados.

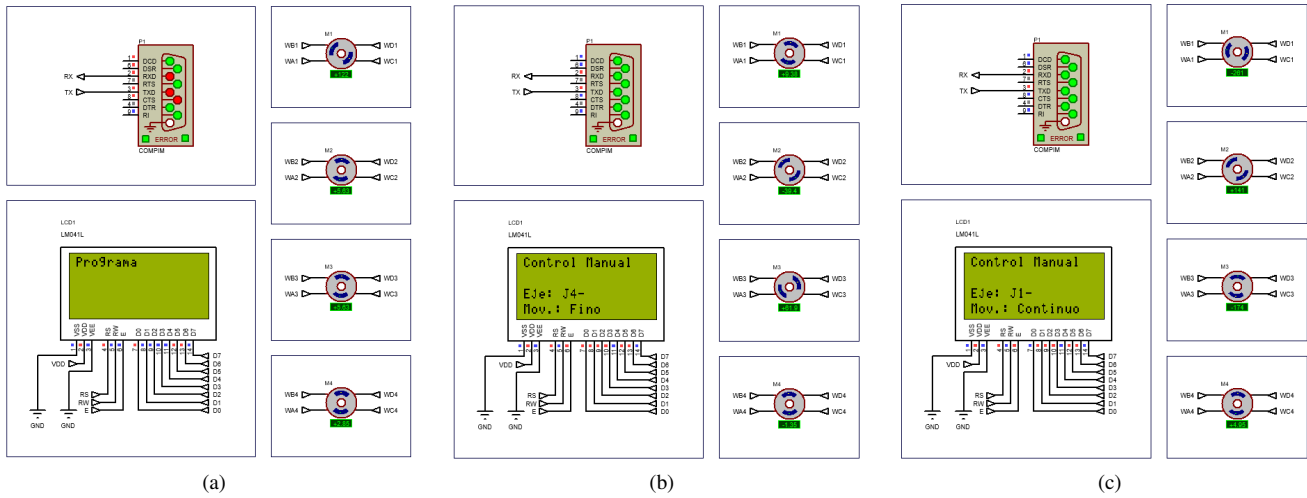
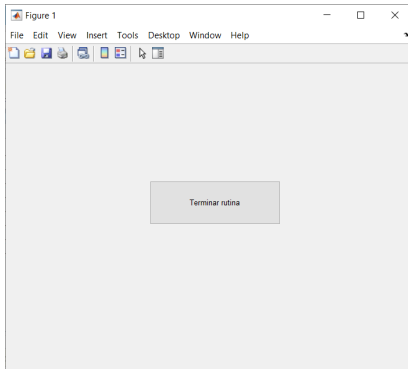


Figura 6. Modos de operación del sistema.



(a)



(b)

Figura 7. Programa de MATLAB.

IV. CONCLUSIONES

Al tratarse de una simulación del modelo y no de una construcción física, el proyecto desarrollado presenta limitaciones que se derivan del alcance del software Proteus y su capacidad de procesamiento. Estas pueden considerarse como posibles mejoras al sistema. En primera instancia, el brazo robótico no cuenta con sensores que permitan ajustar el rango de movimiento de las articulaciones. Esto representa un peligro sustancial para el robot, pues de ser excedidos los límites de desplazamiento angular (Figura 3), los motores pueden dañarse. Otra funcionalidad importante por considerar es la capacidad del sistema para regresar a una posición inicial

o home. Esta característica requiere de la implementación de encoders en cada articulación con el fin de conocer la posición de los ejes de los motores de forma directa y no a través de un procedimiento indirecto como lo es el conteo de pulsos. Finalmente, la frecuencia de reloj propuesta es considerablemente menor a la comúnmente utilizada para esta clase de sistemas.

Considerando estas aspectos, el sistema presenta un rendimiento adecuado y cuenta con las funcionalidades necesarias para ser implementado en una aplicación educacional. La interacción con el control manual y la interfaz de MATLAB para la programación de secuencias no representan sistemas complejos y pueden ser utilizados por alguien que busca una introducción al control de brazos robóticos.

REFERENCIAS

- [1] BCN3D Technologies. (2019, 10 diciembre). *BCN3D MOVEO – Un brazo robótico de código abierto impreso en 3D*. <https://www.bcn3D.com/es/bcn3D-moveo-un-brazo-robotico-de-codigo-abierto-impreso-en-3D/>
- [2] Zortrax. (2015, 21 septiembre). *Zortrax Robotic Arm*. Zortrax Library. <https://library.zortrax.com/project/zortrax-robotic-arm/>
- [3] Andueza, Luís, & Aguirre, Iñaki (2008). *Diseño de un manipulador robótico con tres grados de libertad para fines educativos*. Ciencia e Ingeniería, 30(1),3-13.(2019, 10 diciembre). ISSN: 1316-7081. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=5075/507550784002>
- [4] Torres Cuadro, C. G. (2015, junio). *Diseño e implementación de un brazo robótico de bajo costo para la introducción a la robótica educativa*. Universidad de Los Andes.
- [5] Jazar, R. N. (2010). *Theory of Applied Robotics. Kinematics, Dynamics, and Control* (Second Edition). Springer.
- [6] Niku, S. B. (2020). *Introduction to Robotics. Analysis, Control, Applications* (Third Edition). Wiley.
- [7] Condit, R. (2004). *Stepping Motors Fundamentals* (N.o AN907). Microchip Technology Inc.
- [8] Saha, S. K. (2010). *Introducción a la Robótica*. McGraw-Hill.
- [9] Microchip Technology Inc. (s. f.). *Stepper Motors*. Microchip. <https://www.microchip.com/design-centers/motor-control-and-drive/motor-types/stepper>
- [10] Microchip Technology Inc. (2007). *PIC16F883/884/886/887 Data Sheet* (N.o DS41291B).