

UACM

Universidad Autónoma
de la Ciudad de México

Nada humano me es ajeno

COLEGIO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

LICENCIATURA EN INGENIERÍA EN SISTEMAS ELECTRÓNICOS INDUSTRIALES

**Modelado y control de un robot de 5 grados
de libertad en arquitectura abierta**

TRABAJO RECEPCIONAL
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE LICENCIADA EN
INGENIERÍA EN SISTEMAS ELECTRÓNICOS INDUSTRIALES

PRESENTA

LETICIA HERNÁNDEZ OROZCO

Director del trabajo recepcional

Dr. Juan Carlos Martínez Rosas

Ciudad de México, diciembre de 2017.

SISTEMA BIBLIOTECARIO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE LA CIUDAD DE MÉXICO COORDINACIÓN ACADÉMICA

RESTRICCIONES DE USO PARA LAS TESIS DIGITALES

DERECHOS RESERVADOS[©]

La presente obra y cada uno de sus elementos está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor; por la Ley de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México, así como lo dispuesto por el Estatuto General Orgánico de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México; del mismo modo por lo establecido en el Acuerdo por el cual se aprueba la Norma mediante la que se Modifican, Adicionan y Derogan Diversas Disposiciones del Estatuto Orgánico de la Universidad de la Ciudad de México, aprobado por el Consejo de Gobierno el 29 de enero de 2002, con el objeto de definir las atribuciones de las diferentes unidades que forman la estructura de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México como organismo público autónomo y lo establecido en el Reglamento de Titulación de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México.

Por lo que el uso de su contenido, así como cada una de las partes que lo integran y que están bajo la tutela de la Ley Federal de Derecho de Autor, obliga a quien haga uso de la presente obra a considerar que solo lo realizará si es para fines educativos, académicos, de investigación o informativos y se compromete a citar esta fuente, así como a su autor ó autores. Por lo tanto, queda prohibida su reproducción total o parcial y cualquier uso diferente a los ya mencionados, los cuales serán reclamados por el titular de los derechos y sancionados conforme a la legislación aplicable.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios que a pesar de que se me presentaron varios obstáculos en el camino me diera la fortaleza para lograr terminar una meta más en mi vida.

Gracias a mis padres Alicia Orozco y Pascual Hernández porque desde que recibí la noticia de estar aceptada en la Universidad Autónoma de la Ciudad de México me dieron su apoyo y motivación para llegar hasta el final y ahora se refleja con mi trabajo recepcional, se los dedico con mucho cariño. Papás ustedes han sido mi ejemplo a seguir y decir “No me rindo con empeño y dedicación todo se puede”.

A mis hermanos Oscar Omar Hernández y Luis Armando Hernández les agradezco ya que en todo momento han estado a mi lado y siempre me han brindado su apoyo.

A mi abuelito Margarito Orozco† le doy las gracias por el abrazo y sus últimas palabras que han sido de aliento para no rendirme jamás “hija cuídate mucho y échale muchas ganas”.

Dr. Juan Carlos Martínez Rosas le agradezco por haber aceptado ser mi director para realizar este trabajo recepcional y sobre todo por la paciencia que me tuvo a lo largo del desarrollo de este. Sé que nunca se lo dije pero desde que escogí la Licenciatura en Ingeniería en Sistemas Electrónicos Industriales mi sueño fue mover un robot y lo logre. Gracias por las enseñanzas y el conocimiento que me brindo, los llevare para que me ayuden en mi vida profesional.

A mis lectores Dr. Guerrero Tejada Cuauhtémoc, Ing. Soriano Ávila Manuel Alberto, Mtro. Vázquez Villanueva Christian Agustín y Mtro. Vázquez Villanueva Fermi, por haber aceptado ser mis lectores y dedicar un poco de su tiempo para revisar mi trabajo recepcional.

Agradezco a quienes estuvieron conmigo en el camino de estudios dentro de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México.

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | |
|--|------------|
| <i>AGRADECIMIENTOS</i> | <i>i</i> |
| <i>ÍNDICE DE CONTENIDO</i> | <i>ii</i> |
| <i>INTRODUCCIÓN</i> | <i>iv</i> |
| <i>RESUMEN.</i> | <i>vii</i> |
| <i>OBJETIVOS.</i> | <i>ix</i> |
| Objetivo general. | <i>ix</i> |
| Objetivos específicos. | <i>ix</i> |
| CAPITULO 1 | |
| <i>Cinemática Directa Del Brazo Robótico SMART MAN</i> | 1 |
| 1.1 Introducción. | 2 |
| 1.2 Cinemática Directa. | 2 |
| 1.2.1 Transformación Homogénea | 2 |
| 1.2.2 Matriz de rotación | 3 |
| 1.3 Implementación de la cinemática directa del brazo robótico académico SMART MAN. | 3 |
| 1.4 Conclusión | 12 |
| CAPITULO 2 | |
| <i>Cinemática Inversa Del Brazo Robótico SMART MAN</i> | 13 |
| 2.1 Introducción. | 14 |
| 2.2 Cinemática inversa. | 14 |
| 2.3 Implementación de la Cinemática Inversa del brazo robótico académico SMART MAN. | 15 |
| 2.4 Conclusión | 20 |
| CAPITULO 3 | |
| <i>Diseño de Interfaz</i> | 21 |
| 3.1 Introducción | 22 |
| 3.2 Motores del brazo Robótico Académico “SMART MAN” | 23 |
| Encoder Incremental en cuadratura. | 24 |
| Encoder Absoluto. | 25 |
| 3.3 Encoders del brazo robótico académico SMART MAN. | 27 |

INDICE DE CONTENIDO

| | | |
|-------------------|---|----|
| 3.4 | Tarjeta del robot e identificación de señales. | 29 |
| 3.5 | Diseño de etapa de amplificación. | 31 |
| 3.6 | Tarjeta de adquisición de datos. | 34 |
| 3.7 | Entrada/Salida de señales. | 37 |
| 3.8 | Conclusión. | 42 |
| CAPITULO 4 | | |
| | <i>Programación y control (3 grados de libertad)</i> | 43 |
| 4.1 | Introducción. | 44 |
| 4.2 | Implementación de control de movimiento de las articulaciones del brazo robótico académico SMART MAN. | 44 |
| 4.3 | Conclusión. | 55 |
| | <i>CONCLUSIÓN FINAL.</i> | 56 |
| | <i>INDICE DE FIGURAS Y TABLAS.</i> | 58 |
| | <i>BIBLIOGRAFIA</i> | 61 |
| | <i>ANEXOS</i> | 62 |
| | <i>EXPERIMENTO</i> | 73 |

INTRODUCCIÓN

La robótica desde su antigüedad ha sido una de las disciplinas que ha llevado al hombre a diseñar y desarrollar prototipos que realicen diversidad de tareas por ejemplo soldar, pintar, entre otras. Al principio, uno de los objetivos principales era diseñar un brazo, pie (partes del cuerpo humano), sin embargo a medida que ha pasado el tiempo se han desarrollado prototipos para realizar el trabajo de actividades del ser humano y otros seres vivos como aves y reptiles.

“La palabra robot proviene de la palabra checa “**ROBOTA**”, que significa trabajo, fue introducido en nuestro vocabulario por el dramaturgo Karel Capek en 1921 en su novela Rossum’s Universal Robots” [Fernando, 2011, pág. 4]. El diccionario Webster [John Wiley&Sons, 1999] define a un robot como un dispositivo automático que efectúa funciones ordinariamente asignadas a los seres humanos. Una definición más precisa de un robot industrial es “**un robot reprogramable multifuncional para realizar multiplicidad de tareas, diseñado para mover algunos objetos, materiales, piezas, o dispositivos especificados, mediante movimientos que son programados a través de variables específicas**”. [K. S. FU, R. C.GONZALEZ, C. S. G. LEE, 1990, pp.5-6]

El campo de la robótica de manipuladores es muy amplio y uno de los problemas ha sido el control de los movimientos del brazo articulado; esto ha generado una amplia bibliografía desde los inicios de la investigación de esta disciplina.

En los años cuarenta, por el Laboratorio Nacional Oak Ridge y el Laboratorio Nacional Argonne, se originó el estudio y el desarrollo de los mecanismos de un robot cuando se diseñaron manipuladores maestro-esclavo para el manejo de materiales radioactivos. A finales de los años cincuenta por Unimation, Inc., se realizó el primer robot comercial controlado por computadora que realizaba un sinfín de tareas automáticamente y el coste de éste era relativamente bajo para reprogramar y cambiar de herramienta cuando se requería.

“Al inicio de los años sesenta, **H.A Ernst[1962]** publicó el desarrollo de un dispositivo llamado el MH-1, una mano mecánica controlada por computadora con sensores táctiles. El sistema consistía en un manipulador ANL, modelo 8, con 6 grados de libertad, controlado por una computadora TX-O mediante un dispositivo de interface. Por el mismo periodo **Tomovic y Boni [1962]** desarrollaron un prototipo de una mano con un sensor de presión que detectaba el objeto y proporcionaba una señal de realimentación de entrada a un motor para iniciar uno de dos modelos de aprehensión. **McCarthy [1968]** y sus colegas en el **Stanford Artificial IntelligenceLaboratory** publicaron el desarrollo de una computadora con manos, ojos y oídos, (es decir, manipuladores con cámaras de TV y micrófonos). **Pieper [1968]** estudió el problema cinemático de un manipulador controlado por computadora, mientras que **Kahn y Roth [1971]** analizaban la dinámica y el control de un brazo restringido utilizando control bang-bang (casi de tiempo mínimo). En la Universidad

de Stanford, **Bolles y Paul [1973]**, utilizaron realimentación tanto visual como de fuerza, demostraron que un brazo Stanford controlado por computadora, conectado a una tarjeta PDF-10, efectuaba el montaje de bombas de agua de automóviles. Hacia la misma época, **Will y Grossiman [1975]** en **IBM** desarrollaron un manipulador controlado por computadora, conectado con sensores de contacto y fuerza para realizar montajes mecánicos en una máquina de escribir de veinte piezas. **Inoue [1974]**, en el **Artificial IntelligenceLaboratory del MIT**, se trabajó sobre los aspectos de inteligencia artificial de la realimentación de fuerzas. En el **Dr(Bejczy, 1974)(Ramón, 2007) aperLaboratory, Nevins y colaboradores [1974]** investigaron técnicas sensoriales basadas en el control coordinado con la fuerza y posición. **Bejczy [1974]**, en el **Jet PropulsionLaboratory**, desarrollo una técnica de control basada en computadora sobre su brazo **Stanford** ampliados para proyectos de exploración espacial” [**K. S. FU, R. C.GONZALEZ, C. S. G. LEE, 1990, pp.5-6.**]

Cabe señalar que hoy en día la robótica se ve como un campo de trabajo mucho más amplio que el que se tenía hace unos pocos años, tratando con investigación y desarrollo en una serie de áreas interdisciplinarias, que incluyen cinemática, dinámica, planificación de trayectorias, control, sensores, lenguajes de programación, e inteligencia de máquina.

Uno de los principales inconvenientes con el que se suelen encontrar la mayoría de los grupos de investigación es la imposibilidad de implementar nuevos algoritmos de control sobre las arquitecturas cerradas que presentan prácticamente la totalidad de los robots industriales del mercado. Es decir, la mayoría de los robots industriales están diseñados para realizar una sola tarea y no poder ser modificados y mantener el mismo algoritmo de control.

La arquitectura abierta es una característica que ofrece enorme flexibilidad al momento de implementar los experimentos, cambiar la configuración o actualizar el hardware, en otras palabras, es un sistema que puede permitir la reprogramación de diferentes tipos de leyes de control, es decir, que el diseño del algoritmo de control ya no es desconocido y puede ser reconfigurado por el usuario, así de esta forma reducir las limitaciones establecidas por el diseño original y desarrollar mejoras y actualizaciones a los sistemas robóticos.

Los sistemas de arquitectura cerrada tienen un desempeño limitado sujeto a las leyes programadas. Una solución para introducir leyes de control avanzadas y así mejorar el desempeño en los robots, es abrir la arquitectura de su sistema, pero a esta solución se le presenta una gran dificultad, cuando se enfrenta a una arquitectura cerrada existente una falta de información al respecto a los parámetros del sistema y con esto es claramente difícil la obtención del modelo dinámico puesto que son datos reservados por el diseño de fábrica. La falta de información referente a los parámetros exactos de dichos sistemas de arquitectura cerrada, trae como consecuencia que sea prácticamente imposible la obtención del modelo dinámico, y por tanto, se considera la opción de realizar un control sin modelo.

Con lo ya mencionado anteriormente, en este trabajo excepcional se propone una metodología para realizar el análisis del brazo robótico académico SMART MAN de cinco grados de libertad, tomando solo en cuenta las tres primeras articulaciones, en arquitectura abierta, con la finalidad de implementar en él controladores diferentes, utilizando diferentes fuentes, conceptos matemáticos y de ingeniería y con la ayuda de herramientas de software realizar la simulación del sistema, asignando valores aproximados a los reales en la simulación de la dinámica del brazo robótico Académico SMART MAN.

Al final de este proceso se obtendrán los datos de los sensores (encoders), motores, y engranaje de cada uno de ellos, así como también el análisis de la Cinemática Directa y Cinemática Inversa, realizando una interfaz con una tarjeta de circuito impreso (PCB) entre el brazo robótico académico SMART MAN y la tarjeta de adquisición de datos QUANSER INNOVATE EDUCATE Q8-USB mediante la computadora.

Esta investigación cuenta con cuatro capítulos que tienen como propósito determinar el estudio de cada una de las etapas, para dar movimiento a las articulaciones del brazo robótico académico SMART MAN.

Así el primer capítulo hace énfasis al cálculo de la cinemática directa, partiendo desde las mediciones de las distancias que presentan las articulaciones, hasta la resolución de la matriz Homogénea encontrando los parámetros de **Denavit-Hartenberg [1955]**.

En el segundo capítulo se describe el análisis de la Cinemática Inversa por métodos geométricos, a partir de los cálculos de la Cinemática Directa.

El tercer capítulo presenta el diseño de interfaz de entradas-salidas de la tarjeta de adquisición de datos QUANSER INNOVATE EDUCATE Q8-USBy el brazo robótico académico SMART MAN, mediante el diseño de una tarjeta de circuito impreso (PCB).

El cuarto capítulo describe la programación y control (Control Proporcional-Integral) realizado en el software Matlab en un entorno de programación de simulink.

RESUMEN.

El presente trabajo de tesis se realizó con el fin de diseñar la electrónica y acondicionamiento necesarios para controlar la posición y orientación de un brazo robótico académico SMART MAN. El cual se ha planificado para tener la posibilidad de controlarlo mediante una tarjeta de adquisición de datos y amplificadores, de tal manera que se tenga la posibilidad de usar el software de Matlab para diseñar algoritmos de control y así poder llevar a cabo la cinemática inversa en tiempo real. La tarjeta de adquisición de datos QUANSER INNOVATE EDUCATE Q8-USB, ha sido el medio para enviar voltajes y recibir lecturas de desplazamiento articular.

El brazo robótico académico SMART MAN, tiene una capacidad de carga de 1Kg, cuenta con 5 articulaciones más una tenaza de sujeción para fines educativos, utiliza servomotores de D.C. con codificadores ópticos y cajas de engranes. Los rangos de las articulaciones son:

- Muñeca de arriba-abajo 310° y rotación 360°
- Codo $\pm 130^\circ$
- Hombro $130^\circ/-35^\circ$
- Cintura 310°

Se diseñó una etapa de potencia para cada servomotor debido a que la tarjeta de adquisición de datos QUANSER INNOVATE EDUCATE Q8-USB solo entrega señales de control tanto de voltaje como de corriente muy pequeñas, por lo cual fue necesario amplificar la señal de voltaje con un múltiplo de 3 mediante una etapa amplificadora que suministrara la corriente y voltajes necesarios para activar los servomotores de cada articulación.

Se implementó un programa realizado en el software Matlab y simulink para el control y manejo de corrientes, voltajes y señales de los encoders de cada servomotor para manipular la velocidad, posición y orientación de las articulaciones a través de un controlador PI; asimismo se leyó el bit home para la posición inicial del brazo robótico SMART MAN.

Se estudió la cinemática directa, donde se utilizó álgebra lineal para desarrollar un método generalizado y sistemático para describir y representar la localización de los elementos del brazo robótico académico SMART MAN con respecto a un sistema de referencia fijo. Dadas las variables de las articulaciones, se determinó la posición y orientación del efecto final mediante el algoritmo **Denavit-Hartenberg [1955]**.

De igual forma se estudió la cinemática inversa, dada la posición y orientación del efecto final del brazo robótico Académico SMART MAN de 5 grados de libertad y sus parámetros de articulación y elementos, se encontraron los ángulos de articulación correspondientes $q=(q_1, q_2, q_3, q_4, q_5)$ del robot, de manera que pueda posicionarse como se

desea el efecto final. Para resolver el problema cinemático inverso se utilizaron métodos geométricos.

En síntesis, con lo mencionado en los párrafos anteriores, el brazo robótico Académico SMART MAN, puede ser modificado para realizar diversas tareas dentro de su espacio de trabajo.

OBJETIVOS.

Objetivo general.

Obtener el modelo cinemático directo e inverso del Robot SMART MAN en arquitectura abierta, diseñar la etapa de potencia y acondicionamiento de entradas y salidas y desarrollar un controlador PI para controlar el brazo robótico SMART MAN utilizando MATLAB y la tarjeta de adquisición de datos QUANSER INNOVATE EDUCATE Q8-USB para posicionar y orientar sus tres articulaciones principales.

Objetivos específicos.

- Diseñar una etapa de potencia para controlar los motores de CD para mover cada una de las articulaciones del robot SMART MAN.
- Lectura de seis encoders y un bit indicador de la posición de inicio, comúnmente llamada posición de home, todas estas señales serán enviadas a la tarjeta de adquisición de datos QUANSER INNOVATE EDUCATE Q8-USB.
- Realizar una tarjeta de entradas y salidas para la interfaz del brazo robótico con la tarjeta de adquisición de datos QUANSER INNOVATE EDUCATE Q8-USB.
- Determinar la Cinemática Directa y la Cinemática Inversa el brazo robótico SMART MAN.
- Mediante el programa Matlab en simulink y QUARC realizar en diagramas de bloques un controlador PI a una frecuencia de 1 KHz ó un periodo de 1 ms de las tres primeras articulaciones.



CAPITULO 1

Cinemática Directa

Del Brazo Robótico SMART MAN

1.1Introducción.

En este capítulo se presenta el método de obtención de la cinemática directa para determinar y representar la geometría espacial del brazo robótico académico SMART MAN, con respecto a un sistema de referencia fijo.

1.2Cinemática Directa.

“Se utiliza fundamentalmente álgebra lineal para desarrollar un método generalizado y sistemático para describir la localización de un objeto en el espacio 3D (tridimensional) con respecto a un sistema de referencia fijo. Dado que un robot puede considerarse como una cadena cinemática formada por objetos rígidos o eslabones unidos entre sí mediante articulaciones, se puede establecer un sistema de referencia fijo situado en la base del robot y describir cada uno de los eslabones con respecto a dicho sistema de referencia. De esta forma, el problema cinemático directo se reduce a encontrar una matriz homogénea de transformación que relacione la posición y orientación del extremo del robot respecto del sistema de referencia fijo situado en la base del mismo (dadas las posiciones articulares, encontrar el punto del efecto final en el espacio de tarea o espacio articular). Esta matriz de transformación será función de las coordenadas articulares. Se utiliza una matriz de rotación 3×3 para describir las operaciones rotacionales del sistema ligado al cuerpo al sistema de referencia. Utilizando entonces las coordenadas homogéneas para representar vectores de posición en un espacio tridimensional, y las matrices de rotación se ampliarán a matrices de transformación homogénea 4×4 para incluir las operaciones translacionales del sistema de coordenadas ligadas al cuerpo. Esta representación matricial de un elemento mecánico rígido para describir la geometría espacial de un brazo fue utilizada por primera vez por **Denavit-Hartenberg [1955]**. La ventaja de utilizar la representación de elementos de **Denavit-Hartenberg [1955]** es su universalidad algorítmica para derivar las ecuaciones cinemáticas de un brazo” **[K. S. FU, R. C. GONZALEZ, C. S. G. LEE, 1990, p.15]**.

1.2.1 Transformación Homogénea

Una extensa parte del estudio de la cinemática trata de establecer la relación que existe entre un sistema de coordenadas y otro marco de referencia. La relación que existe entre ambos sistemas se llama transformación homogénea, la cual involucra a la geometría en tres dimensiones, por tanto, este esquema permite analizar las operaciones de rotación de un sistema de coordenadas a otro, así como las operaciones de translación en la que se

conocen las coordenadas de un vector que se desplaza en algunos de los tres ejes del marco de referencia.

1.2.2 Matriz de rotación

“Una matriz de rotación 3×3 se puede definir como una matriz de transformación que opera sobre un vector de posición en un espacio euclídeo tridimensional y transforma sus coordenadas expresadas en un sistema de coordenadas rotado $0UVW$ (sistema ligado al cuerpo) a un sistema de coordenadas de referencia $0XYZ$. Es decir, ambos sistemas de coordenadas tienen sus orígenes coincidentes en el punto 0 . El sistema de coordenadas $0XYZ$ está fijo en el espacio tridimensional y se considera que es el sistema de referencia, el sistema de coordenadas $0UVW$ está girando con respecto al sistema de referencia $0XYZ$. Físicamente uno puede considerar que el sistema de coordenadas $0UVW$ es un sistema de coordenadas ligada al cuerpo, esto es, esta permanente y convenientemente unido al cuerpo rígido y se mueve junto con él” [K. S. FU, R. C. GONZALEZ, C. S. G. LEE, 1990, pp.15-16]

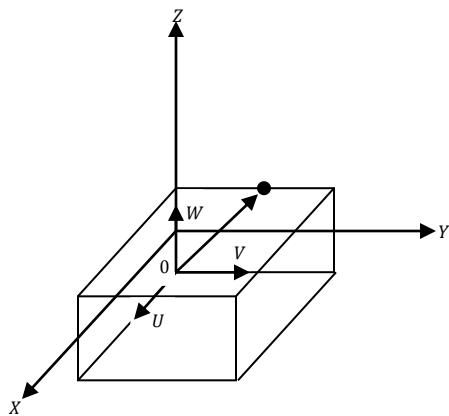


Figura 1. 1Sistema de coordenadas de referencia ligado al cuerpo.

1.3 Implementación de la cinemática directa del brazo robótico académico SMART MAN.

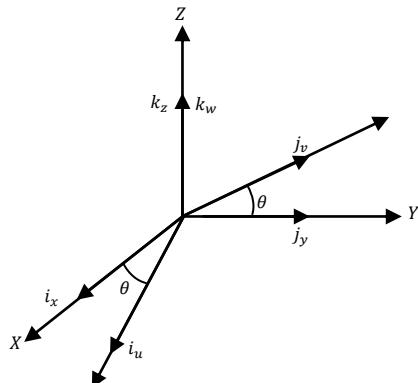
Como se mencionó anteriormente un manipulador robótico consiste de varios eslabones, usualmente conectados por articulaciones de un solo grado de libertad. Con el fin de controlar el efecto final con respecto a la base, es necesario encontrar la relación entre los sistemas de referencia adjuntos entre estos. Una forma de elegir estos sistemas de referencia es mediante la conversión **Denavit-Hartenberg** [1955], en la cual, cada transformación homogénea A_i es representada como un producto de cuatro trasformaciones básicas.

La matriz de transformación homogénea T representa una rotación de ángulo α respecto del eje $0X$, seguida por una traslación de a unidades a lo largo del eje $0X$, seguida por una traslación de d unidades a lo largo del eje $0Z$, seguida por una rotación de ángulo θ respecto al eje $0Z$.

$$A_i = \text{Rot}_{z,\theta_i} \text{Trans}_{z,d_i} \text{Trans}_{x,a_i} \text{Rot}_{x,\alpha_i}$$

Para la Rot_{z,θ_i} y Rot_{x,α_i} se utilizan las matrices de rotación básicas obtenidas a partir de los vectores unitarios (i_x, j_y, k_z) y (i_u, j_v, k_w) a lo largo de los ejes de coordenadas $0XYZ$ y $0UVW$, respectivamente y utilizando el producto escalar de dos vectores que da como resultado un número real al multiplicar el producto de sus módulos por el coseno del ángulo que forman.

Matriz de rotación 3x3 para rotación respecto al eje $0Z$ con ángulo θ .

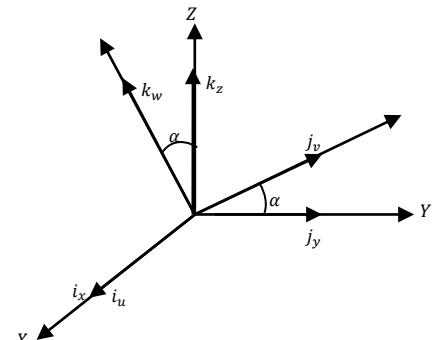


$$R_z = \begin{bmatrix} i_x \cdot i_u & i_x \cdot j_v & i_x \cdot k_w \\ j_y \cdot i_u & j_y \cdot j_v & j_y \cdot k_w \\ k_z \cdot i_u & k_z \cdot j_v & k_z \cdot k_w \end{bmatrix}$$

$$R_z = \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(90 + \theta) & \cos(90) \\ \cos(90 + \theta) & \cos\theta & \cos(90) \\ \cos(90) & \cos(90) & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_z = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Matriz de rotación 3x3 para rotación respecto al eje $0X$ con ángulo α .



$$R_z = \begin{bmatrix} i_x \cdot i_u & i_x \cdot j_v & i_x \cdot k_w \\ j_y \cdot i_u & j_y \cdot j_v & j_y \cdot k_w \\ k_z \cdot i_u & k_z \cdot j_v & k_z \cdot k_w \end{bmatrix}$$

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & \cos(90) & \cos(90) \\ \cos(90) & \cos\alpha & \cos(90 + \alpha) \\ \cos(90) & \cos(90 + \alpha) & \cos\alpha \end{bmatrix}$$

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix}$$

Utilizando el concepto de matriz de transformación, una matriz de rotación 3x3 se puede ampliar a una matriz de transformación homogénea 4x4 T_{rot} para operaciones de rotación pura. Así las ecuaciones anteriores se hacen

$$R_z = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_i = T_{z,\theta} T_{z,d} T_{x,a} T_{x,\alpha} \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & 0 \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i & 0 \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Donde a_i es la longitud del eslabón, α_i es el ángulo de torsión, d_i es el desplazamiento de la articulación (offset de la articulación) y θ_i es el ángulo de la articulación.

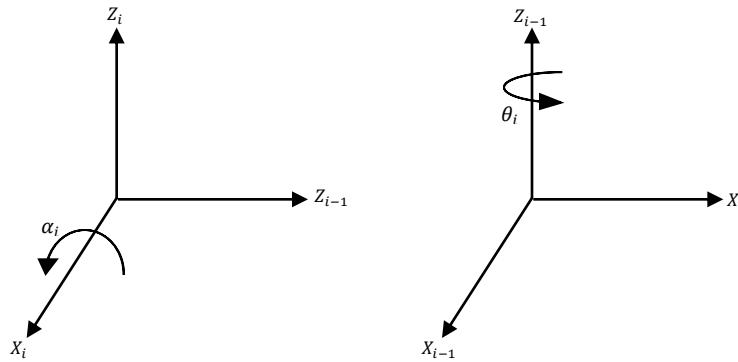


Figura 1.2 Sentido positivo de los ángulos α_i y θ_i

Continuando con el algoritmo de **Denavit-Hartenberg [1955]** a continuación se mencionan los pasos para obtener los parámetros de las coordenadas de los elementos de un robot.

- Elegir un sistema de coordenadas fijo ($X_0Y_0Z_0$) asociado a la base del robot.
- Localizar el eje de cada articulación Z_i :
 - Si la articulación es giratoria, el eje será el propio eje de giro.
 - Si es prismática, el eje lleva la dirección del desplazamiento.
- Situar los ejes X_i en la línea normal común a Z_i y Z_{i-1} . Si estos son paralelos, se elige sobre la línea normal que corta a ambos ejes.
- El eje Y_i debe completar el triedro dextrógiro.
- Parámetros de **Denavit-Hartenberg [1955]**.

- α_i : ángulo entre el eje Z_{i-1} , sobre el plano perpendicular a X_i . El signo lo da la regla de la mano derecha.
- a_i : distancia entre los ejes Z_i y Z_{i-1} a lo largo de X_i . El signo lo define el sentido de X_i .
- θ_i : ángulo que forman los ejes X_{i-1} y X_i sobre el plano perpendicular a Z_{i-1} . El signo lo define la regla de la mano derecha.
- d_i : distancia a lo largo del eje Z_{i-1} desde el origen del sistema S_{i-1} hasta la intersección del eje Z_{i-1} con el eje X_i . En el caso de articulaciones prismáticas será la variable de desplazamiento.

En relación a lo anterior, la resolución del problema cinemático directo del brazo robótico Académico “SMART MAN” se realizó, utilizando el algoritmo de **Denavit-Hartenberg [1955]**, dado que asigna un sistema de coordenadas ortonormales a cada elemento del brazo de acuerdo a configuraciones de brazos similares aquellas de la geometría del brazo humano. El etiquetado del sistema de coordenadas comienza desde la base soporte hasta el efecto final del brazo.

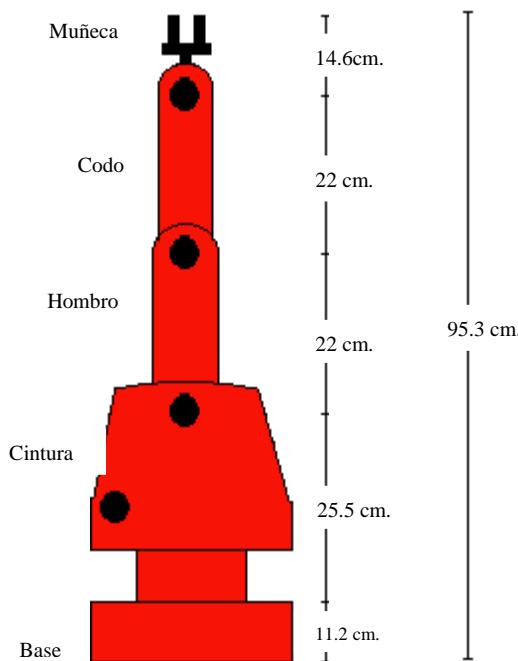


Figura 1.3 Longitudes de cada articulación del brazo robótico académico SMART MAN.

En la Figura 1.3 se muestran las longitudes de cada articulación desde la base hasta el efecto final, con ello se encontraron los valores de los parámetros de longitud de eslabón y offset de la articulación (a_i y d_i).

El sistema de coordenadas del brazo robótico se modeló imaginando que solo tiene tres grados de libertad. Para ello se utilizó la regla de la mano derecha para posicionar los ejes de coordenadas X, Y y Z.

En la regla de la mano derecha como se observa en la Figura 1.4, se orientan los dedos de la mano derecha, excepto el pulgar, en el sentido positivo del eje OX y se envuelve o gira hacia el sentido positivo del eje OY, levantando recto el pulgar se tendrá el sentido positivo del eje OZ.

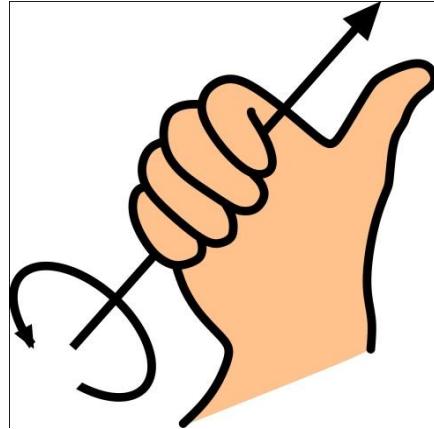


Figura 1. 4 Regla de la mano derecha.

También se puede emplear la regla de la mano izquierda como se puede observar en la Figura 1.5 los dedos medio, índice y pulgar se colocan en direcciones perpendiculares entre sí, se nombran los ejes a partir del dedo medio en orden alfabético.

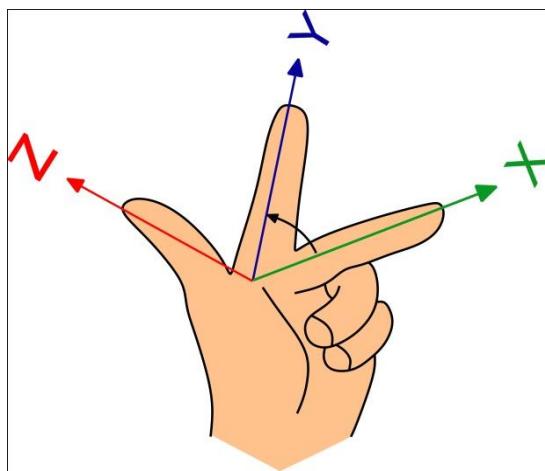


Figura 1. 5 Regla de la mano izquierda.

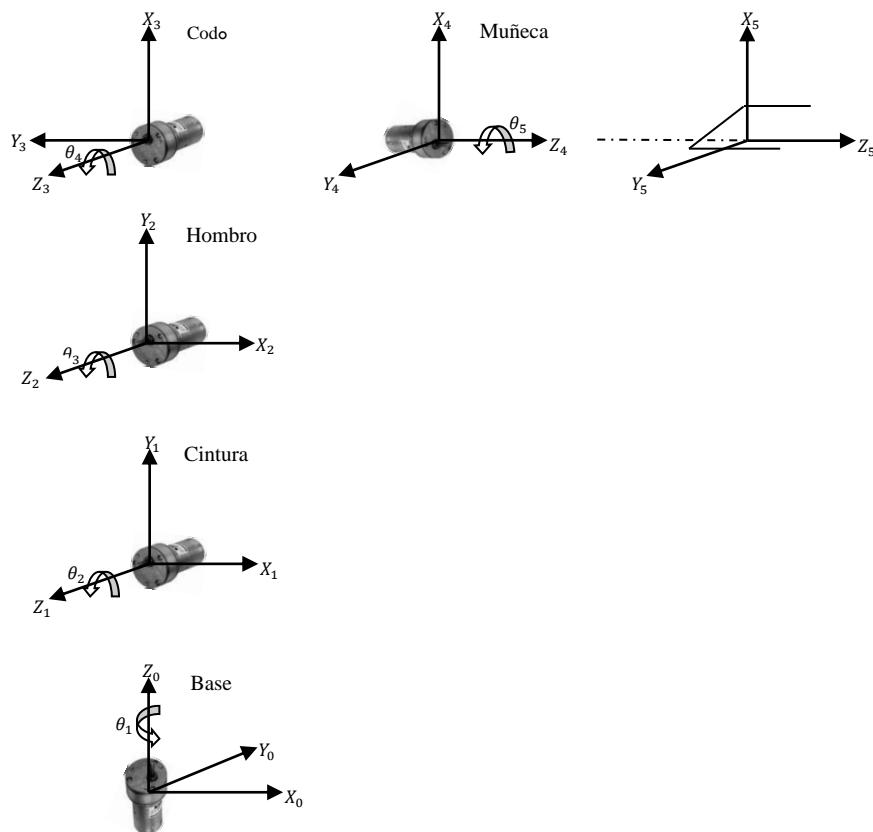


Figura 1.6 Sistema de coordenadas de las articulaciones de brazo robótico académico SMART MAN con 5 grados de libertad.

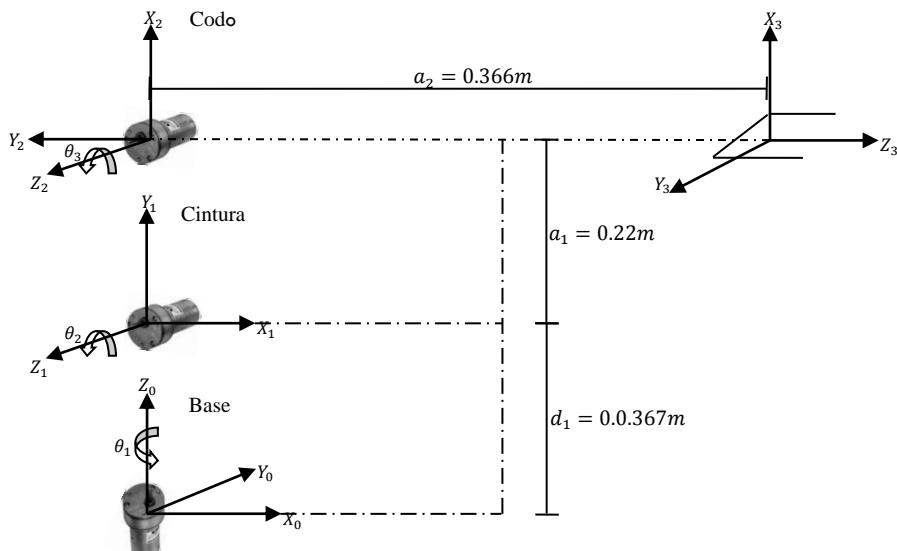


Figura 1.7 Sistema de coordenadas de las articulaciones de brazo robótico académico SMART MAN tomando solo 3 grados de libertad.

Una vez establecido el sistema de coordenadas **Denavit-Hartenberg [1955]** para cada elemento, se puede desarrollar fácilmente una matriz de transformación homogénea que relacione el sistema de coordenadas i – ésmo con el sistema de coordenadas $(i - 1)$ – ésmo

| Parámetros de coordenadas de los elementos del brazo robótico Académico “SMART MAN” (Tomando en cuenta sólo 3 grados de libertad) | | | | |
|--|---------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|--|
| Articulación i | Angulo de giro α_i | Longitud del eslabón a_i | Offset de la articulación d_i | Angulo de la articulación θ_i |
| 1_{0-1} | $\pi/2$ | 0 | d_1 | θ_1 |
| 2_{1-2} | 0 | a_1 | 0 | θ_2 |
| 3_{2-3} | $\pi/2$ | a_2 | 0 | θ_3 |

Tabla 1. 1 Parámetros de brazo robótico académico SMART MAN

La matriz homogénea 0T_i que especifica la localización del sistema de coordenadas i – ésmo con respecto al sistema de coordenadas de la base es el producto en cadena de matrices de transformación de coordenadas sucesivas ${}^{i-1}A_i$ y se expresa como

$${}^0T_i = {}^0A_1 {}^1A_2 \dots {}^{i-1}A_i = \prod_{j=1}^i {}^{j-1}A_j \text{ para } i = 1, 2, \dots, n$$

$$= \begin{bmatrix} X_i & Y_i & Z_i & P_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^0R_i & {}^0P_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

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

En la Figura 1.7 se muestran las coordenadas de las tres primeras articulaciones (tres grados de libertad) donde se realizó el análisis para encontrar los Parámetros de **Denavit-Hartenberg [1955]** obtenidos en la Tabla 1.1; sustituyendo los valores de dichos parámetros en las matrices de transformación de coordenadas sucesivas 0A_1 , 1A_2 y 2A_3 se obtuvo la matriz homogénea 0T_3 .

$${}^0\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & \sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & 0 & -\cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & a_1 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & a_1 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2\mathbf{A}_3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & 0 & \sin \theta_3 & a_2 \sin \theta_3 \\ \sin \theta_3 & 0 & -\cos \theta_3 & -a_2 \cos \theta_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^0\mathbf{T}_3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & \sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & 0 & -\cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & a_1 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & a_1 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & 0 & \sin \theta_3 & a_2 \sin \theta_3 \\ \sin \theta_3 & 0 & -\cos \theta_3 & -a_2 \cos \theta_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^0T_3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 * \cos \theta_2 * \cos \theta_3 - \cos \theta_1 * \sin \theta_2 * \sin \theta_3 & \sin \theta_1 & \cos \theta_1 * \cos \theta_2 * \sin \theta_3 + \cos \theta_1 * \cos \theta_3 * \sin \theta_2 & a_1 * \cos \theta_1 * \cos \theta_2 + \cos \theta_1 * \cos \theta_2 * d_3 * \sin \theta_3 + \cos \theta_1 * \cos \theta_3 * a_2 * \sin \theta_2 \\ \cos \theta_2 * \cos \theta_3 * \sin \theta_1 - \sin \theta_1 * \sin \theta_2 * \sin \theta_3 & -\cos \theta_1 & \cos \theta_2 * \sin \theta_1 * \sin \theta_3 + \cos \theta_3 * \sin \theta_1 * \sin \theta_2 & a_1 * \cos \theta_2 * \sin \theta_1 + \cos \theta_2 * a_2 * \sin \theta_1 * \sin \theta_3 + \cos \theta_3 * a_2 * \sin \theta_1 * \sin \theta_2 \\ \cos \theta_2 * \sin \theta_3 + \cos \theta_3 * \sin \theta_2 & 0 & \sin \theta_2 * \sin \theta_3 - \cos \theta_2 * \cos \theta_3 & d_1 + a_1 * \sin \theta_2 - \cos \theta_2 * \cos \theta_3 * a_2 + a_2 * \sin \theta_2 * \sin \theta_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Se realizó en el software Matlab el cálculo de la matriz homogénea y se verificó el algoritmo de **Denavit-Hartenberg [1955]**, buscando que el resultado fuera lo más aproximado posible, se asignaron valores de las distancias de cada articulación.

Programa en Matlab para realizar la multiplicación de las matrices de transformación de coordenadas sucesivas 0A_1 , 1A_2 y 2A_3

Se declaran las variables simbólicas para realizar la multiplicación de las matrices:c1:
 $\cos \theta_1$, c2: $\cos \theta_2$, c3: $\cos \theta_3$, s1: $\sin \theta_1$, s2: $\sin \theta_2$, s3 : $\sin \theta_3$.

```
syms c1 s1 c2 s2 c3 s3 d1 a2 d3
```

A, B y C son las matrices de transformación de coordenadas sucesivas $A = {}^0A_1$, $B = {}^1A_2$, $C = {}^2A_3$

```
A=[c1 0 s1 0;s1 0 -c1 0;0 1 0 d1;0 0 0 1];
B=[c2 -s2 0 a2*c2;s2 c2 0 a2*s2;0 0 1 0; 0 0 0 1];
C=[c3 0 s3 d3*s3;s3 0 -c3 -d3*c3;0 1 0 0; 0 0 0 1];
```

MatH es la multiplicación de la matriz Homogénea.

```
MatH=A*B*C
```

El resultado de la matriz Homogénea es el siguiente:

MatH =

```
[ c1*c2*c3 - c1*s2*s3, s1, c1*c2*s3 + c1*c3*s2, a2*c1*c2 + c1*c2*d3*s3 + c1*c3*d3*s2]
[ c2*c3*s1 - s1*s2*s3, -c1, c2*s1*s3 + c3*s1*s2, a2*c2*s1 + c2*d3*s1*s3 + c3*d3*s1*s2]
[ c2*s3 + c3*s2, 0, s2*s3 - c2*c3, d1 + a2*s2 - c2*c3*d3 + d3*s2*s3]
[ 0, 0, 0, 1]
```

Mencionando que a1: Distancia de las articulaciones 1-2, a2: Distancia de las articulaciones 2-3, d1: Distancia de las articulaciones 0-1.

```
a1=0.22;
a2=0.366;
d1=0.367;
```

Posteriormente se declaran variables para los valores de los ángulos θ_1, θ_2 y θ_3 ; es decir q1: θ_1 , q2: θ_2 y q3: θ_3 y se resuelve la matriz MatH.

```
q1=0;
q2=0+(pi/2)-(pi/2);
q3=0+(pi/2);
c1=cos(q1);
s1=sin(q1);
c2=cos(q2);
s2=sin(q2);
c3=cos(q3);
s3=sin(q3);
```

Resultado de la matriz MatH con ángulos igual a cero.

MatH=

| Matriz de rotación | Vector de Posición |
|----------------------|--------------------|
| 0 0 1 | 0.5860 |
| 0 1 0 | 0 |
| 1 - - 0 - - 0 | 0.3670 |
| 0 0 0 | 1 |

Transformación de perspectiva

Como se puede observar en el resultado anterior, en la posición Home cuando los ángulos son cero ($\theta_1 = 0, \theta_2 = 0$ y $\theta_3 = 0$), la matriz Homogena T entrega el valor de las distancias (vector de posición xyz) en donde se localiza el efecto final.

1.4 Conclusión

Como resultado del capítulo presentado, se puede decir que la cinemática directa del brazo robótico académico SMART MAN se puede obtener de manera más fácil mediante el algoritmo de Denavit-Hartember, obteniendo cada uno de sus parámetros. Lo cual muestra que en la cinemática directa, la posición y orientación de las articulaciones se obtiene mediante variables mapeadas del espacio articular al espacio 3D.



CAPITULO 2

Cinemática Inversa

Del Brazo Robótico

SMART MAN

2.1 Introducción.

En este capítulo se describe el procedimiento para resolver el problema de la cinemática inversa de un brazo robótico académico SMART MAN utilizando algoritmos geométricos a partir de la solución del problema cinemático directo. Se demuestra que este método tiene varias ventajas sobre otros métodos: el mismo algoritmo aplica para dar solución a la cinemática inversa de cualquier brazo robótico, independientemente del tipo de articulaciones y del número de grados de libertad; se obtiene una solución simple en forma rápida, resaltando la sencillez en la implementación, se utiliza la representación de elementos de **Denavit-Hartemberg [1955]**.

2.2 Cinemática inversa.

Con el fin de controlar la posición y orientación del efecto final de un robot para alcanzar su objetivo, es más importante la solución cinemática inversa. En otras palabras, dado un punto en el espacio de trabajo (3D), es posible calcular las posiciones articulares $q = (q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6 \dots q_n)^T$ del robot, de tal manera que el efecto final se pueda posicionar como se desee en el espacio de trabajo.

“El problema cinemático inverso se puede resolver por diversos métodos, tales como la transformación inversa (**Paul y col. [1981]**), el álgebra de tornillo (**kohl y Son [1975]**), matrices duales (**Deñaba [1956]**), cuaterniones duales (**Yang y Freudenstein [1964]**), iterativo (**Uicker y col. [1981]**), y métodos geométricos (**Lee y Ziegler [1984]**). Pieper [**1968**] presentó la solución cinemática para cualquier manipulador con seis grados de libertad que tienen pares de revolución o prismáticos, para las tres primeras articulaciones y los ejes de las articulaciones de las últimas tres se intersectan en un punto. La solución se puede expresar como un polinomio de cuarto grado en una incógnita y una solución en forma cerrada para las incógnitas restantes. **Paul y col. [1981]** presentaron una técnica transformada inversa utilizando las matrices de transformaciones homogéneas 4x4 para resolver la cinemática para la misma clase de manipuladores simples que analizaba Pieper. Aunque la solución resultante es correcta, tiene el problema de que no da una indicación clara sobre cómo seleccionar una solución apropiada de las diversas soluciones posibles para una configuración de brazo particular” [**K. S. FU, R. C. GONZALEZ, C. S. G. LEE, 1990, p.55**].

2.3 Implementación de la Cinemática Inversa del brazo robótico académico SMART MAN.

En la solución del problema de la cinemática inversa del brazo robótico académico SMART MAN se utilizó el método geométrico utilizando los siguientes ejes de coordenadas para cada articulación.

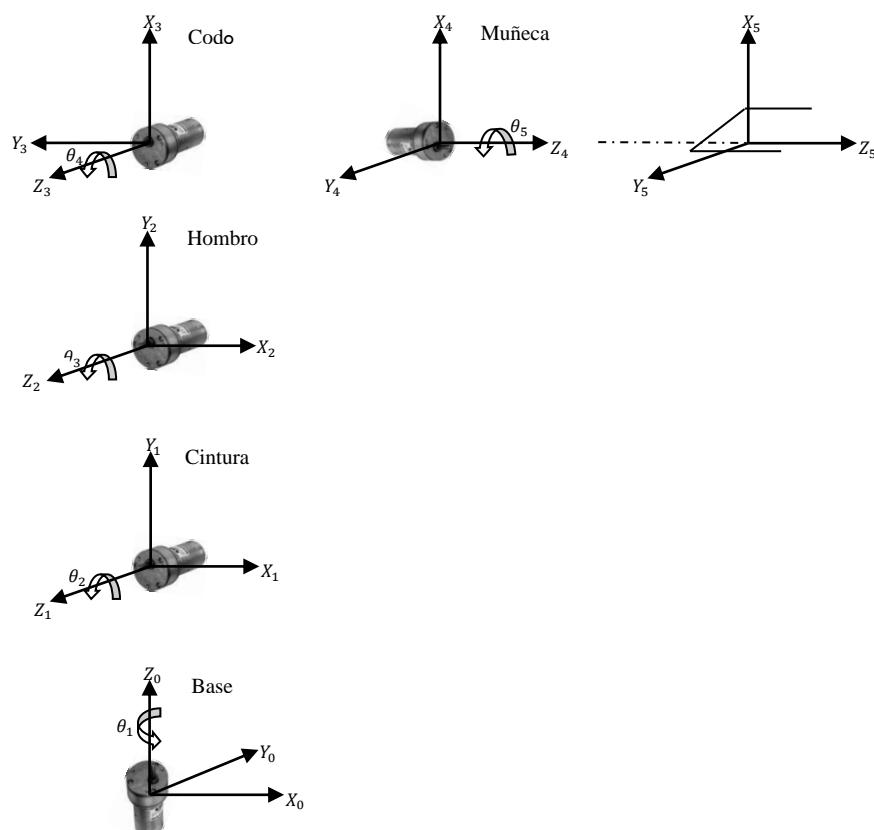


Figura 2. 1 Sistema de coordenadas de las articulaciones de brazo robótico académico SMART MAN.

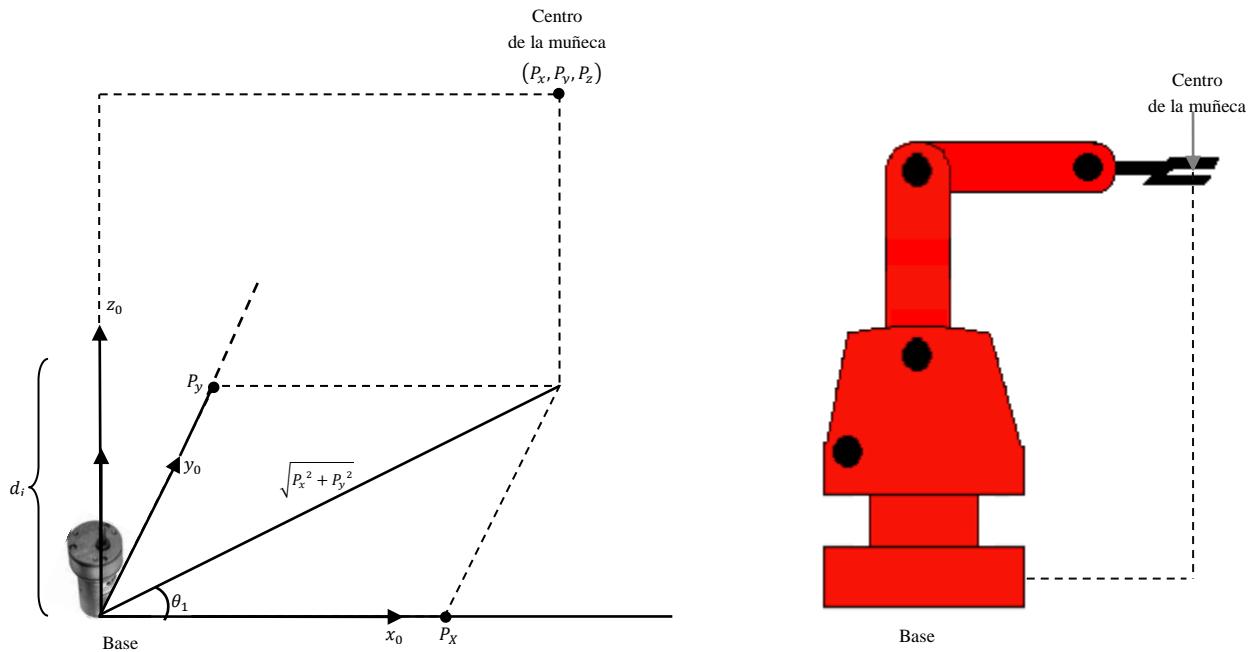


Figura 2.2 Diagrama geométrico de la primera articulación (cintura) del brazo robótico académico SMART MAN.

En el análisis de la primera articulación (cintura) se realizó el diagrama de la Figura 2.2 donde se observa que en el plano XY hay una distancia entre la base y el efecto final. Para calcular dicha distancia se realizó un triángulo rectángulo con los puntos P_x y P_y ; y por medio del teorema de Pitágoras se obtuvo el valor de la distancia = $\sqrt{P_x^2 + P_y^2}$.

El valor de θ_1 se obtuvo a partir dela razón trigonométrica tangente que se define usualmente sobre un triángulo rectángulo.

$$\tan \theta_1 = \frac{P_y}{P_x}$$

$$\theta_1 = \tan^{-1} \frac{P_y}{P_x}$$

$$\theta_1 = \arctan(P_x, P_y)$$

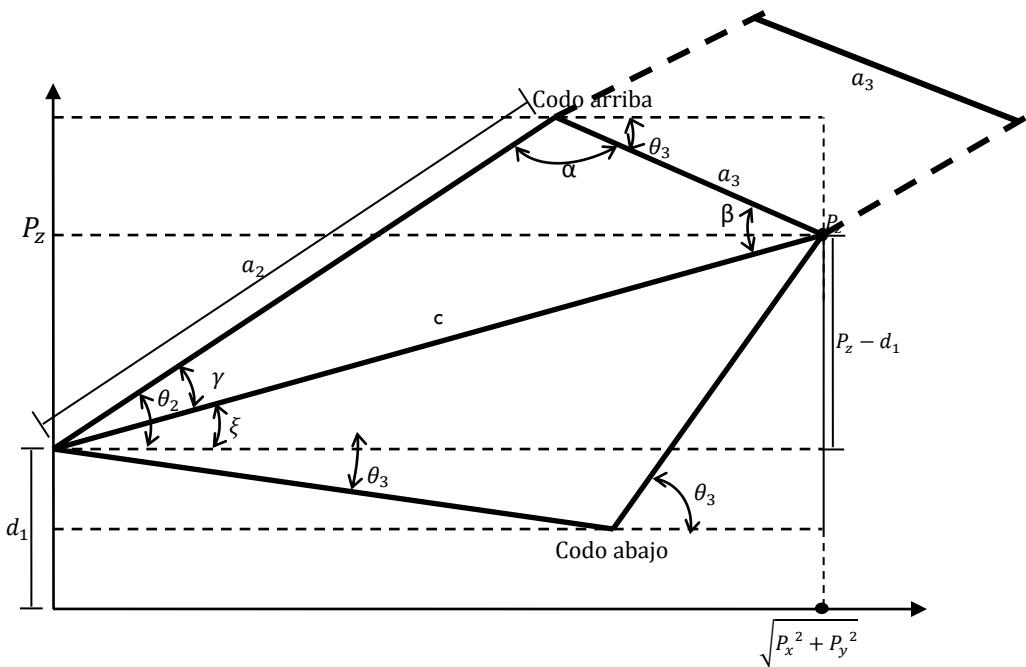


Figura 2.3 Diagrama geométrico de las tres principales articulaciones cintura, hombro y codo del brazo robótico académico SMART MAN.

Tomando en cuenta las tres articulaciones principales: cintura, hombro y codo, del brazo robótico académico SMART MAN que se muestran en la Figura 2.3, se efectúa el análisis en codo arriba para encontrar los valores de los ángulos de las dos articulaciones restantes (codo y hombro).

$$\text{Notar que } \theta_2 = \gamma + \xi$$

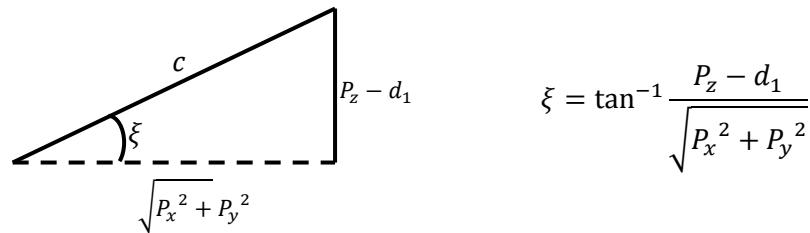
En el diagrama de la Figura 2.3 se observa que entre sus articulaciones del brazo robótico, se forma un triángulo oblicuo (no rectángulo), siendo que se conocen las medidas de dos de sus lados a_3 y a_2 , la distancia $c = \sqrt{(P_z - d_1)^2 + (P_x^2 + P_y^2)}$ y la medida del ángulo incluido γ , se puede definir por la ley de cosenos, de la siguiente manera:

$$\cos \gamma = \frac{a_2^2 + c^2 - a_3^2}{2a_2c}$$

$$\gamma = \cos^{-1}\left(\frac{a_2^2 + c^2 - a_3^2}{2a_2c}\right)$$

$$a_3^2 = a_2^2 + c^2 - 2a_2c \cos \gamma$$

Asimismo se desea encontrar el valor del ángulo ξ utilizando la función de arc tg.

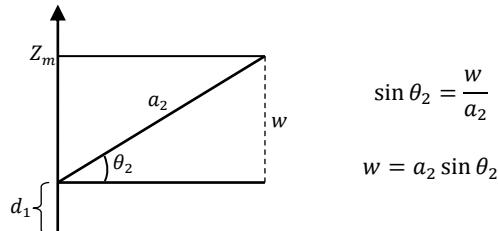


Finalmente al sustituir el resultado de γ y ξ , se obtiene que θ_2 tiene como resultado.

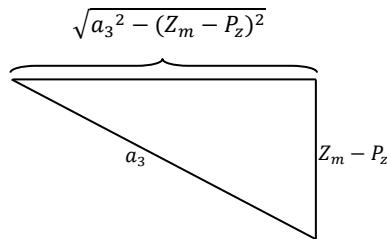
$$\theta_2 = \gamma + \xi$$

$$\theta_2 = \cos^{-1} \left(\frac{a_2^2 + c^2 - a_3^2}{2a_2c} \right) + \xi = \tan^{-1} \frac{P_z - d_1}{\sqrt{P_x^2 + P_y^2}}$$

Por otro lado, del diagrama de la Figura 2.3 se desprende



$Z_m = a_2 \sin \theta_2 + d_1$, tal que:



Lo cual implica que

$$\theta_3 = -\tan^{-1} \frac{Z_m - P_z}{\sqrt{a_3^2 - (Z_m - P_z)^2}}$$

Así con los cálculos anteriores, de forma geométrica se obtienen los ángulos θ_1, θ_2 y θ_3 de las articulaciones. Ya que la Cinemática Inversa del brazo robótico académico SMART MAN consiste en dar una posición deseada desde el espacio 3D y encontrar los ángulos de las tres articulaciones para que el efecto final del Robot se posicione en dicha posición 3D deseada.

Posteriormente, se realizó un Programa en el software Matlab con los cálculos que se obtuvieron de forma manual obteniendo el siguiente resultado:

Valores de las distancias que hay de una articulación a otra a1: Distancia de las articulaciones 1-2, a2: Distancia de las articulaciones 2-3, d1: Distancia de las articulaciones 0-1.

```
d1=0.367;
a1=0.22;
a2=0.366;
```

Conversión de radianes a grados
 $\text{Crg}=180/\pi;$

Variables para dar valor a la coordenada (X, Y, Z) en el plano 3D de la posición deseada, partiendo desde las distancias de las articulaciones en su posición inicial. Es decir, existe un offset en la articulación 1 y 3; se puede observar en la Figura 1.7 del capítulo 1.

```
px=0.366+0.05;
py=0.0;
pz=0.22+d1;
```

A continuación se muestran los cálculos en lenguaje de matlab de los cálculos que se realizaron anteriormente para calcular los ángulos θ_1, θ_2 y θ_3 , para obtener la Cinemática Inversa del brazo robótico académico SMART MAN.

```
theta1=atan(py/px);  $\theta_1 = \arctan(P_x, P_y)$ 
```

theta1g=theta1*Crg; Conversión de radianes a grados.

dpxy=sqrt(px^2+py^2); Distancia entre los puntos P_x y P_y distancia= $\sqrt{P_x^2 + P_y^2}$.

c=sqrt((pz-d1)^2+dpxy^2); $c = \sqrt{(P_z - d_1)^2 + (P_x^2 + P_y^2)}$

gam=acos((a2^2+c^2-a3^2)/(2*a2*c)); $\gamma = \cos^{-1}\left(\frac{a_2^2 + c^2 - a_3^2}{2a_2c}\right)$

gamg=gam*Crg; Conversión del ángulo γ de radianes a grados.

psi=atan(((pz-d1)/dpxy)); $\xi = \tan^{-1} \frac{P_z - d_1}{\sqrt{P_x^2 + P_y^2}}$

psig=psi*Crg; Conversión del ángulo ξ de radianes a grados.

$$\text{theta2}= \text{gam}+\text{psi}; \quad \theta_2 = \gamma + \xi$$

theta2g=theta2*Crg; Conversión del ángulo θ_2 de radianes a grados.

$$\text{zm}=\text{a2}*\sin(\text{theta2})+\text{d1}; \quad z_m = a_2 \sin \theta_2 + d_1$$

$$\text{theta3}=-\text{atan}((\text{zm}-\text{pz})/\sqrt{\text{a3}^2-(\text{zm}-\text{pz})^2}); \quad \theta_3 = -\tan^{-1} \frac{z_m - P_z}{\sqrt{a_3^2 - (z_m - P_z)^2}}$$

theta3g=theta3*Crg; Conversión del ángulo θ_3 de radianes a grados.

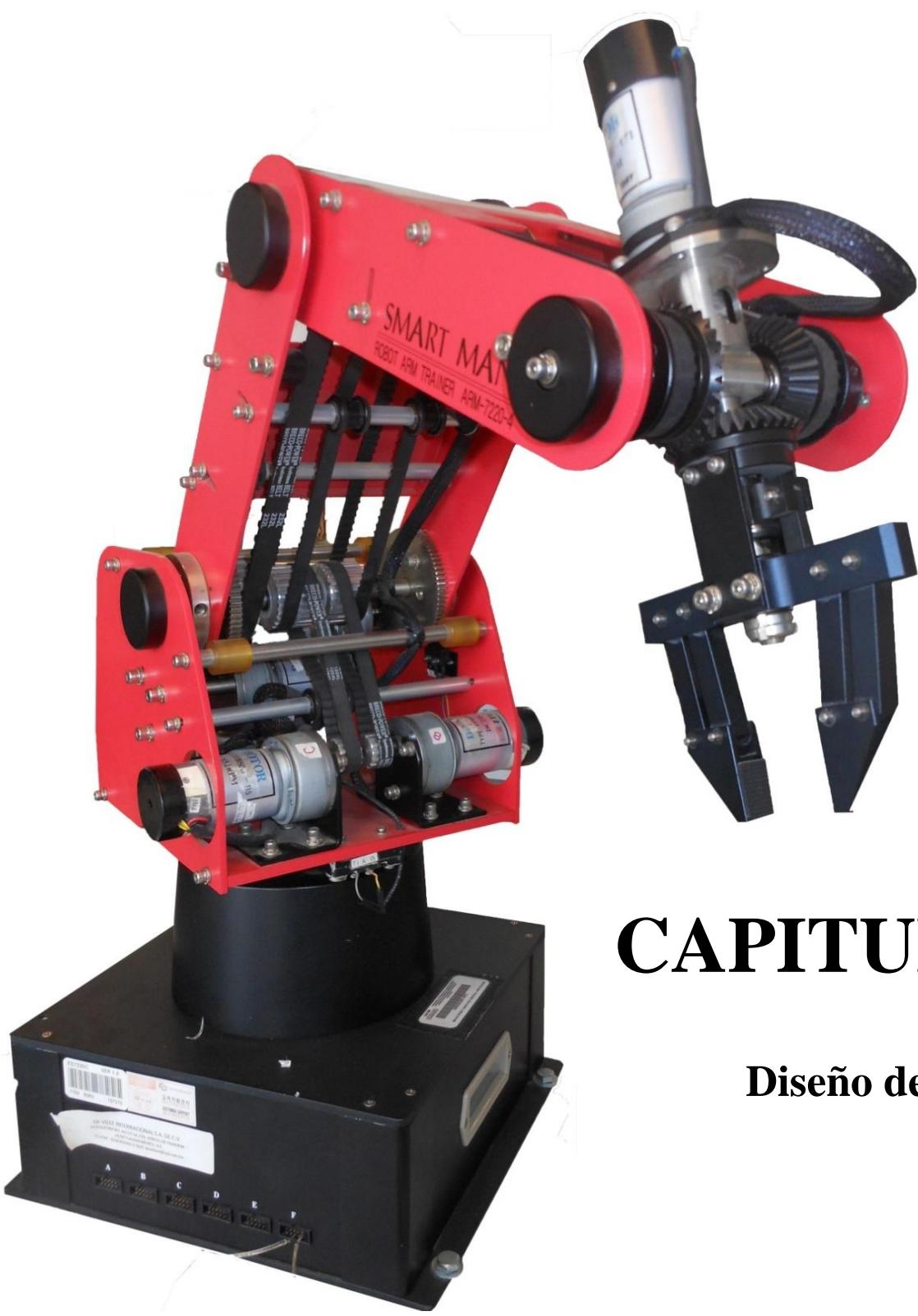
theta=[theta1g, theta2g-90, theta3g]; Despliega los valores de θ_1, θ_2 y θ_3 .

En el Software Matlab se realizó una prueba para verificar que los cálculos fueran los correctos. Donde se Observa que cuando se le asignan los valores de la coordenada xyz en las distancias iniciales del brazo robótico académico SMART MAN, los ángulos de cada articulación es igual a cero.

```
px =
  0.3660
py =
  0
pz =
  0.5870
theta =
  0  0  0
```

2.4 Conclusión

Como resultado de este capítulo se puede mencionar que en el análisis de la cinemática inversa del brazo robótico académico SMART MAN se obtuvo lo esperado, es decir, se realizó una prueba colocando los valores de las distancias iniciales (offset) a la coordenada x,y,z y dio como resultado ángulos de cero grados, así se puede colocar otra coordenada y nos calculara los ángulos que debe moverse cada articulación para llegar a la posición deseada. Este un método es necesario para llevar a cabo tareas en el espacio 3D. Permite realizar tareas de posicionamiento entre puntos x, y, z. Y es utilizada ampliamente en la industria para aplicaciones de posicionamiento, corte, soldadura, pintura, desbastado de piezas y colocación de objetos de un punto a otro.



CAPITULO 3

Diseño de Interfaz

3.1Introducción

En este capítulo se describe de forma detallada el diseño de interfaz del brazo robótico académico SMART MAN y la tarjeta de adquisición de datos QUANSER INNOVATE EDUCATE Q8-USB, utilizando una tarjeta de conectores para enviar los datos de entrada y salida.

En el diagrama de bloques de la Figura 3.1 se observa que por medio de la tarjeta de conectores se envían los datos de las señales de los encoders y de los bits límite del brazo robótico académico SMART MAN hacia la tarjeta de adquisición de datos QUANSER INNOVATE EDUCATE Q8-USB. Así también la tarjeta de adquisición de datos QUANSER INNOVATE EDUCATE Q8-USB envía la señal de voltaje y corriente pequeña que va conectada a una etapa de amplificación para aumentar 3 veces la señal para alimentar a los motores de cada articulación del brazo robótico académico SMART MAN.

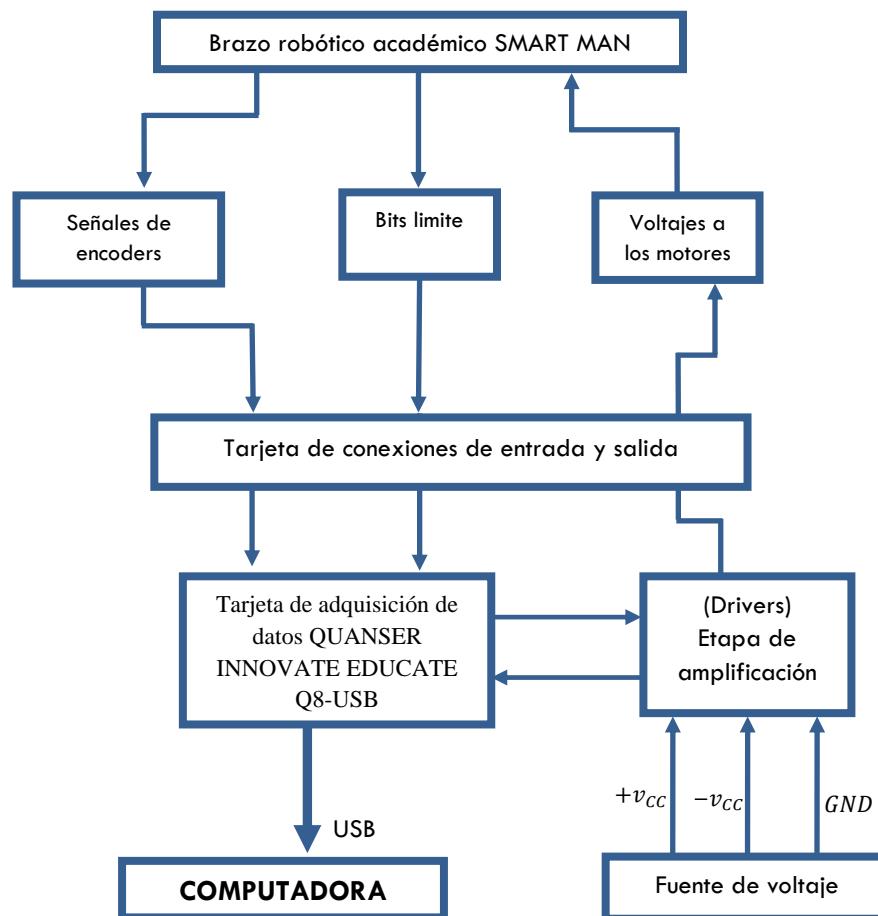


Figura 3. 1 Diagrama de bloques de la interfaz del brazo robótico académico SMART MAN y la tarjeta de adquisición de datos QUANSER INNOVATE EDUCATE Q8-USB

3.2 Motores del brazo Robótico Académico “SMART MAN”

En las articulaciones del brazo robótico académico SMART MAN se utilizan los Motores DC MODELO DME 38B 50G-116 de 24V/34.2RPM y DC TYPE DME 38B 50G-115 de 24V/65.2RPM.

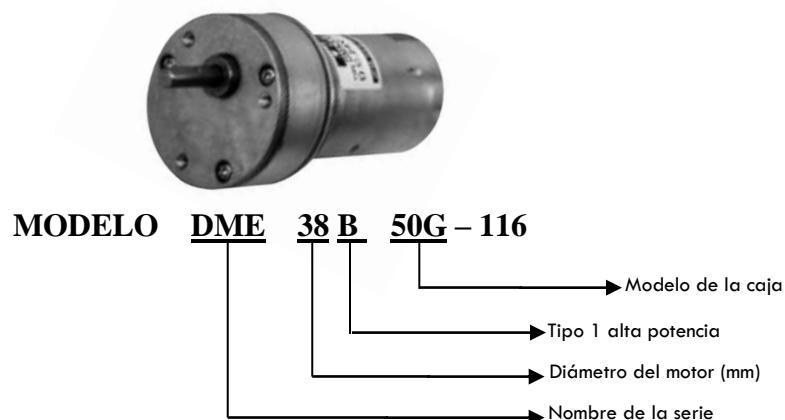


Figura 3. 2 Motor DC.

Los motores tienen un transductor rotativo llamado encoder que transforma un movimiento angular en una serie de pulsos digitales, así como también cada uno cuenta con una caja de engranes, es decir, debido a que los motores de las articulaciones del brazo robótico tienen estas características y mediante una señal eléctricamente codificada se indica las acciones de velocidad y movimiento, se dice que es un servomotor.

Un servomotor, es un motor que puede ser controlado en su velocidad de funcionamiento y en la posición dentro de un rango de operación para ejecutar la actividad requerida.
[Francisco A., Juan A Candelas, Ramón Corrales, p.1]

Los servomotores suelen estar compuestos por 4 elementos fundamentales:

- I. “Motor de corriente continua (DC): Es una fuente de torque que le brinda movilidad al servo. Cuando se aplica un potencial a sus dos terminales, este motor gira en un

sentido a su velocidad máxima. Si el voltaje aplicado en sus dos terminales es inverso, el sentido del giro también se invierte.” **[Francisco A., Juan A Candelas, Ramón Corrales, p.1]**

- II. “Engranajes reductores: Tren de engranajes que se encarga de reducir la alta velocidad de giro del motor para acrecentar su capacidad de torque” **[Francisco A., Juan A Candelas, Ramón Corrales, p.1].**
- III. “Sensor de desplazamiento: En la Robótica se suele utilizar como sensor un encoder, pero también puede ser utilizado un potenciómetro, tacómetro o resolvers, Sin embargo, la naturaleza analógica de los potenciómetros, así como de temperatura, precisión, y no linealidad los hace poco atractivos e inconvenientes. Además, el tacómetro y el resolvers no son viables por su tamaño y peso además de no tener una resolución adecuada y pierden competencia ante la tecnología óptica de los encoders.”**[Francisco A., Juan A Candelas, Ramón Corrales, p.1]**

Encoder Incremental en cuadratura.

“El encoder incremental también se conoce como encoder relativo. En la configuración de interruptor de haz de luz, enfrente del disco que se encuentra en el rotor del servomotor se encuentra el arreglo de los diodos LEDs cuya luz emitida pasa por las rendijas A, B y Z para ser detectados por los elementos fotosensibles. La luz que pasa por las rendijas A y B tiene una diferencia de fase de 90° grados eléctricos. La salida es una onda rectangular con la misma diferencia de fase de 90° eléctricos.

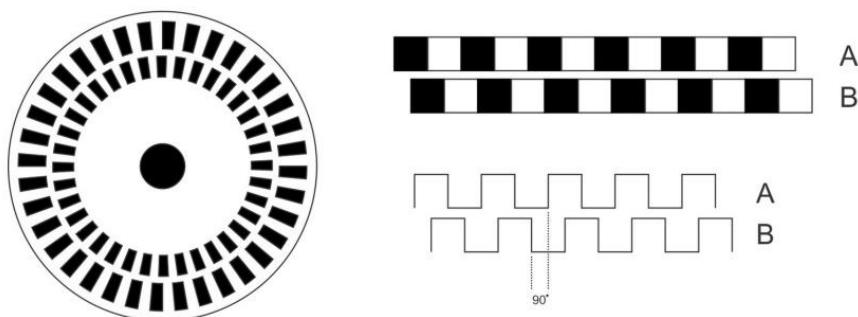


Figura 3. 3 Encoder incremental en cuadratura.

La salida del encoder incremental son pulsos que son proporcionales al ángulo de rotación. Por cada fracción de desplazamiento rotacional en la flecha del servomotor, el encoder incremental cambia su salida de bajo a alto o viceversa. La posición medida por el encoder es relativa a la última posición o posición anterior, por eso el encoder incremental se le conoce también como encoder relativo. Los pulsos no representan el valor absoluto de la posición, en tal caso el valor absoluto de la posición viene dado por acumular los pulsos de salida; la contabilidad de esos puntos se lleva a cabo por un circuito electrónico contador de pulsos.” **[Fernando Reyes, p. 77-78]**

Encoder Absoluto.

“El encoder absoluto, como su nombre lo indica, detecta la posición absoluta de desplazamiento del servomotor. La salida del encoder absoluto son códigos binarios digitales que se pueden encontrar en formato de código decimal (binary-coded decimal, BCD) o en código binario cíclico (gray code). Debido a que la salida del encoder absoluto esta en código binario, este no acumula errores como sucede en el encoder incremental. El encoder absoluto puede medir la posición en cualquier punto de una rotación completa, sin perder la posición previa.

La estructura básica del encoder absoluto es la misma del encoder incremental en configuración fotointerruptor o en patrones codificados. El número de ranuras determina el número de bits y se encuentran configuradas en bandas de círculos concéntricos distribuidos desde el perímetro hasta el centro del disco giratorio formando un patrón codificado. Los círculos más grandes representan los bits menos significativos, y los círculos más cercanos al centro del disco son los bits más significativos.” **[Fernando Reyes, p. 80-81]**

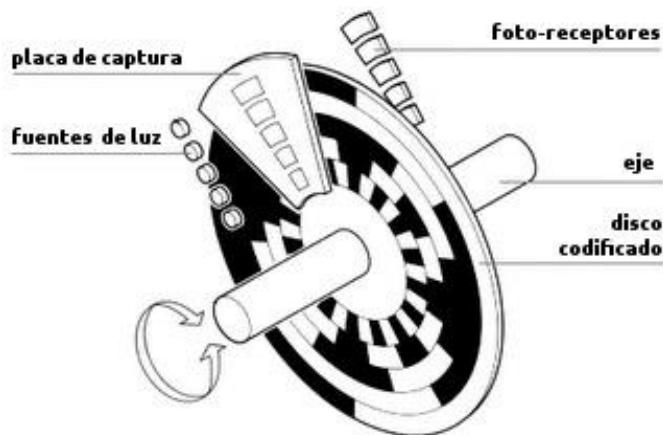


Figura 3. 4 Encoder Absoluto.

“La desventaja de los encoders absolutos radica en la dificultad de fabricarlo en tamaño miniatura y producirlo a bajo costo. El número de cables en la señal de salida se incrementan en función directa del número de bits. La principal ventaja es que no pierde la posición previa si la fuente de alimentación se desconecta, es decir, siempre detecta la posición correcta en función del tiempo.

Una comparación entre el encoder absoluto con el incremental radica principalmente en su tamaño. El encoder absoluto aumenta su volumen en forma proporcional con el número de bits, lo que se traduce en cableado. En contraste la salida del encoder incremental es una serie de pulsos y el conector que proporciona la información de la posición no interviene en aumentar el volumen. En la actualidad los encoders incrementales son los que más se emplean en la robótica.”

[Fernando Reyes, p. 82]

IV. Circuito de control: Es una placa electrónica que implementa una estrategia de control de la posición por realimentación. Para ello, este circuito compara la señal de entrada de referencia (posición deseada) con la posición actual medida por el encoder. La diferencia entre la posición actual y la deseada es amplificada y utilizada para mover el motor en la dirección necesaria para reducir el error.

[Francisco A., Juan A Candelas, Ramón Corrales, p.1]

3.3 Encoders del brazo robótico académico SMART MAN.

Los sensores digitales de posición que se emplearon en el brazo robótico académico SMART MAN son los integrados en los servomotores ya de fábrica, construidos con tecnología optoelectrónica. Como se mencionó anteriormente un encoder óptico consta básicamente de una fuente de luz conformada por un arreglo de diodos LEDs que se encuentran enfrente de un disco giratorio con ranuras. En la parte posterior de este disco se coloca una tarjeta con rendijas que hacen la función de guía de luz. La posición de las rendijas sirve como código de la luz para ser detectada por elementos fotosensibles. El disco giratorio esta acoplado en el rotor del servomotor para que gire de la misma forma y por lo tanto el encoder óptico produce una señal de salida un tren de pulsos proporcional al ángulo de giro del rotor.

Los encoders que utilizan los servomotores de las articulaciones del brazo robótico académico SMART MAN son de tipo incremental en cuadratura ya que proporcionan normalmente dos formas de ondas cuadradas y desfasadas entre sí en 90° grados eléctricos, los cuales por lo general son “canal A” y “canal B”. Está disponible además otra señal llamada canal Z que indica un pulso cuando el encoder termina una revolución. En la Figura 3.5 se muestra el encoder que se utilizó con un disco giratorio de 6 ranuras.

Canal A: Este canal sirve para contar el número de pulsos para obtener una eficiencia óptima en el funcionamiento del encoder.

Canal B: Es para determinar la dirección de giro.

Canal Z: Permite saber en cada momento la posición absoluta del encoder.

Se realizó la lectura de los encoders en relación a los engranes para determinar el número de pulsos por revolución.

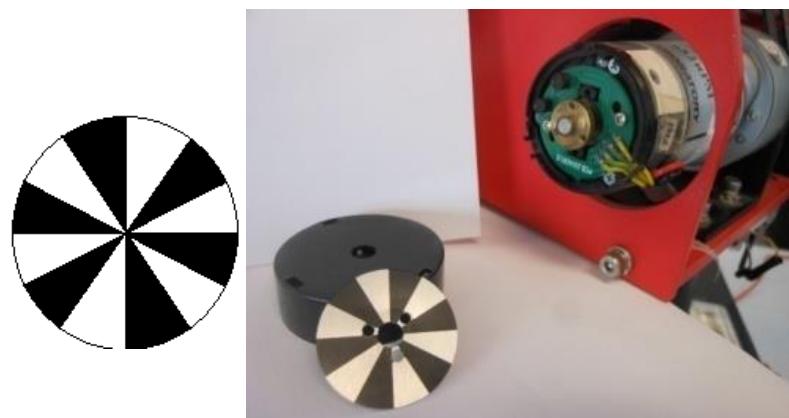


Figura 3.5 Encoder incremental.

Una forma factible para saber el número de pulsos por revolución solo del encoder fue utilizando la tarjeta de Adquisición.

Por otro lado, se obtuvo la relación de transmisión de engranaje de cada articulación por medio del número de dientes, mencionando que cada una de ellas cuenta con dos engranes de diferente longitud como se muestra en la Figura 3.6.

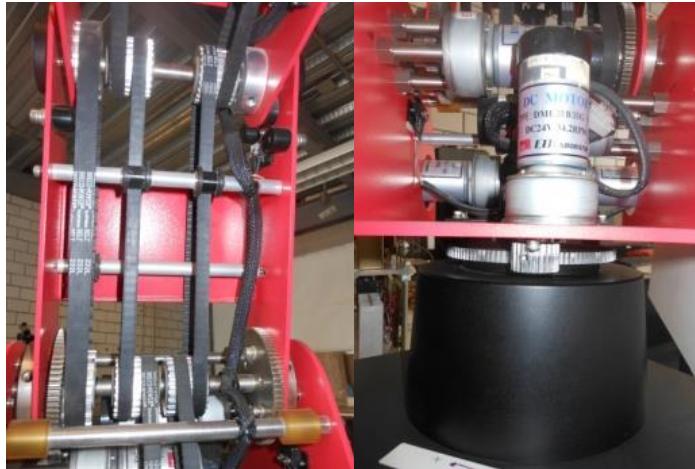


Figura 3.6 Fotos de los engranes del brazo robótico Académico “SMART MAN”.

| Articulación | Engranaje arrastrado (grande) No. De dientes | Engranaje motriz (pequeño) No. De dientes | Relación de transmisión | Pulsos total del encoder |
|-------------------|---|--|-------------------------|--------------------------|
| Base (motor F) | 120 | 24 | 5 | 14250 |
| Cintura (motor D) | 76 | 19 | 4 | 11400 |
| Hombro (motor E) | 76 | 19 | 4 | 11400 |
| Codo (motor C) | 24 | 13 | 1.84 | 5244 |
| Codo (motor C) | 24 | 13 | 1.84 | 5244 |

Tabla 3.1 Tabla de relación de transmisión de engranajes de las articulaciones del brazo robótico académico SMART MAN.

Para el cálculo de la relación de transmisión de engranaje de la Tabla 3.1 se tiene en cuenta el número de dientes de cada rueda. Esto indica el número de revoluciones del engranaje motriz en una revolución del engranaje arrastrado.

$$\text{relación de transmisión} = \frac{\text{numero de dientes del engranaje arrastrado}}{\text{numero de dientes del engranaje motriz}}$$

El análisis anterior se realizó con el propósito de saber cuántos pulsos por revolución da el encoder mientras se realiza la relación de transmisión, es decir, por medio de la tarjeta de

adquisición de datos se tuvo una lectura de 2850 pulsos, estos se multiplican por la relación de engranajes y da el total los pulsos por revolución del encoder.

3.4 Tarjeta del robot e identificación de señales.

El brazo robótico académico SMART MAN contiene una tarjeta interna como se muestra en la Figura 3.7 en la cual se tuvo que identificar las señales de canal “A” y canal “B” del encoder, así como también la conexión del motor, el bit home y la alimentación de voltaje, para cada articulación de brazo robótico académico SMART MAN.

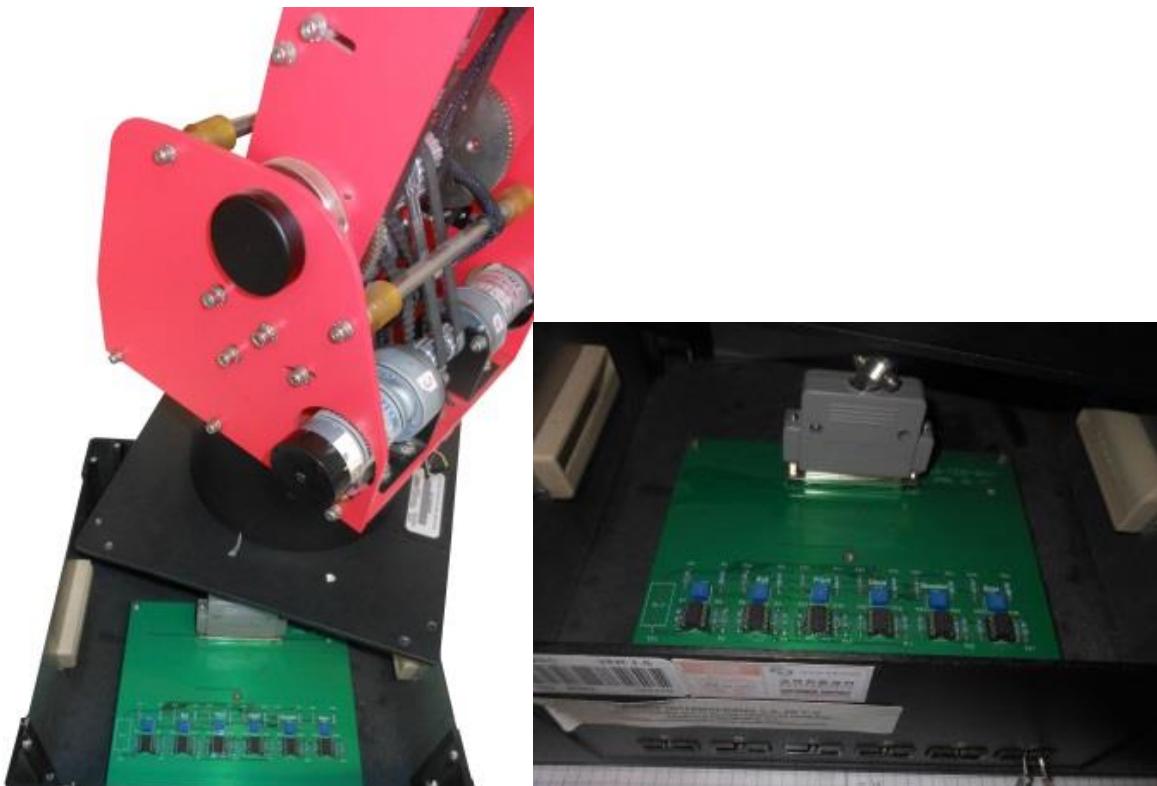
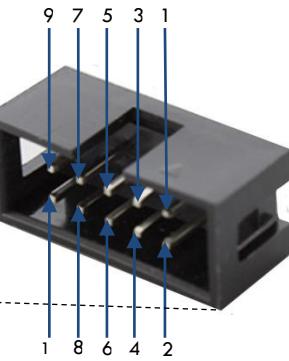


Figura 3.7 Tarjeta del brazo robótico académico SMART MAN.



1. GND
2. Canal "B" del encoder
3. Voltaje
4. Canal "A" del encoder
5. NC
6. Bit home
7. Motor
8. NC
9. Motor
10. NC

Figura 3.8 Conector macho 10 pines de las entradas de las articulaciones del brazo robótico Académico “SMART MAN”

Con el multímetro se realizaron varias pruebas de continuidad para identificar que pin es para cada señal de voltaje, GND, encoder (canal A y canal B), bit home y motor de las articulaciones del brazo robótico académico SMART MAN. En la Figura 3.8 se muestra el esquema de los pines con el nombre de la señal que le corresponde.

3.5 Diseño de etapa de amplificación.

Dado que la tarjeta de adquisición de datos QUANSER INNOVATE EDUCATE Q8-USB entrega voltajes y una señal de corriente muy pequeña, se requiere de una etapa de potencia que aumente el nivel de la señal tanto en corriente como en voltaje.

Las características necesarias se tomaron a partir de las especificaciones de la tarjeta de adquisición de datos QUANSER INNOVATE EDUCATE Q8-USB y de los servomotores del brazo robótico académico SMART MAN. La tarjeta de adquisición de datos tiene un rango de $\pm 10\text{ V}$, mientras que los servomotores tienen un voltaje máximo de $\pm 24\text{ V}$ de corriente directa, por lo tanto es necesario amplificar la señal de voltaje 3 veces para obtener la máxima potencia de los motores, para ello fue necesario realizar una amplificación variable.

La amplificación de voltaje se llevó a cabo con un amplificador operacional de alto voltaje MC1436CP1 (maneja un voltaje de salida de $\pm 28\text{V}$ y voltajes de la fuente de alimentación de $\pm 5\text{V}$ a $\pm 36\text{V}$), en configuración no inversora con un resistor de precisión de $1\text{ K}\Omega$ y un potenciómetro TRIM-POT de ajuste superior de $5\text{ K}\Omega$ en la realimentación, obteniendo el factor de amplificación deseado, en este caso un factor variable de 1 hasta 6. Por otro lado, para la protección de la tarjeta de adquisición de datos QUANSER INNOVATE EDUCATE Q8-USB se colocó otro amplificador operacional de alto voltaje en configuración buffer.

Para amplificar la corriente se usó un circuito push-pull de simetría complementaria clase AB ya que recibe una pequeña polarización constante en su entrada independiente de la existencia de señal, tienen un alto rendimiento y calidad, usando dos transistores complementarios, el transistor PNP (MJ15004G) para los ciclos negativos y el transistor NPN (MJ15003G) para los ciclos positivos; estos transistores ofrecen una distorsión de cruce muy pequeña y mantienen amplios márgenes de linealidad. Para la protección contra transitorios se colocó un diodo de potencia en cada uno de los transistores.

Para diseñar la tarjeta impresa de la etapa de amplificación se utilizó el software Proteus Design Suite (software de automatización de diseño electrónico) que consta de dos programas principales Ares (Software de Edición y Ruteo Avanzado: realización de las pistas) e Isis (Sistema de Enrutado de Esquemas Inteligente) como se observa en la Figura 3.9 y la Figura 3.10.

En la Figura 3.11 y Figura 3.12 se muestra físicamente la etapa de amplificación de cada una de las articulaciones para el brazo robótico académico SMART MAN. También se realizó una pequeña tarjeta impresa como se muestra en la figura 3.13, donde se conectan

las salidas del amplificador hacia la tarjeta de adquisición de datos QUANSER INNOVATE EDUCATE Q8-USB

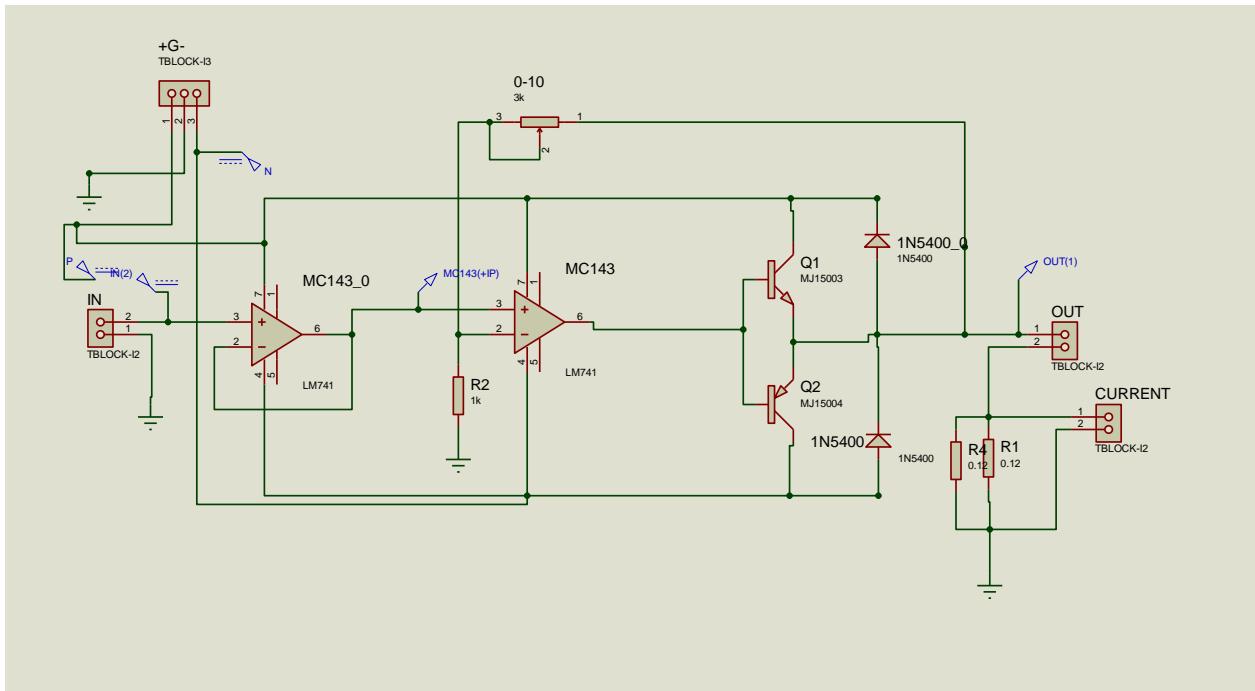


Figura 3. 9 Etapa de Amplificación realizado en el software Proteus Profesional 7 (ISIS Profesional)

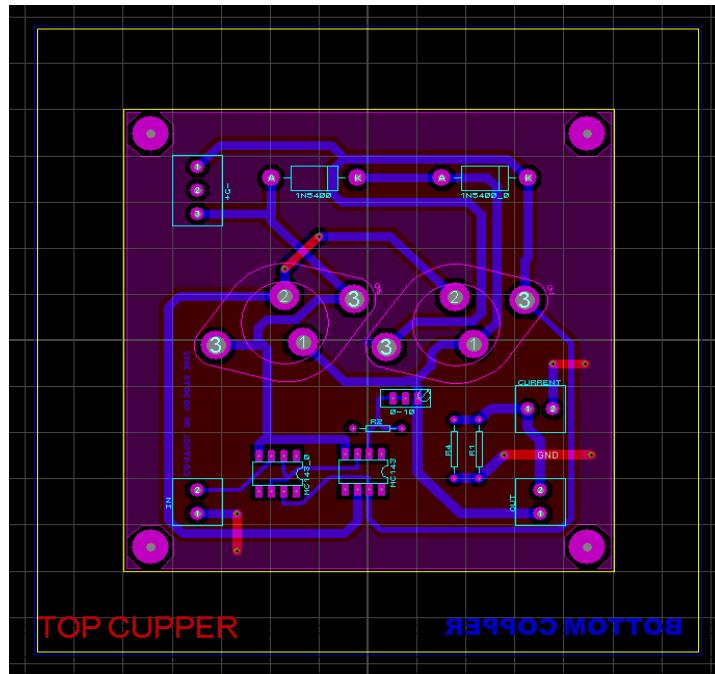


Figura 3. 10 Etapa de Amplificación Realizado en el software Proteus Profesional 7 (ARES Profesional)

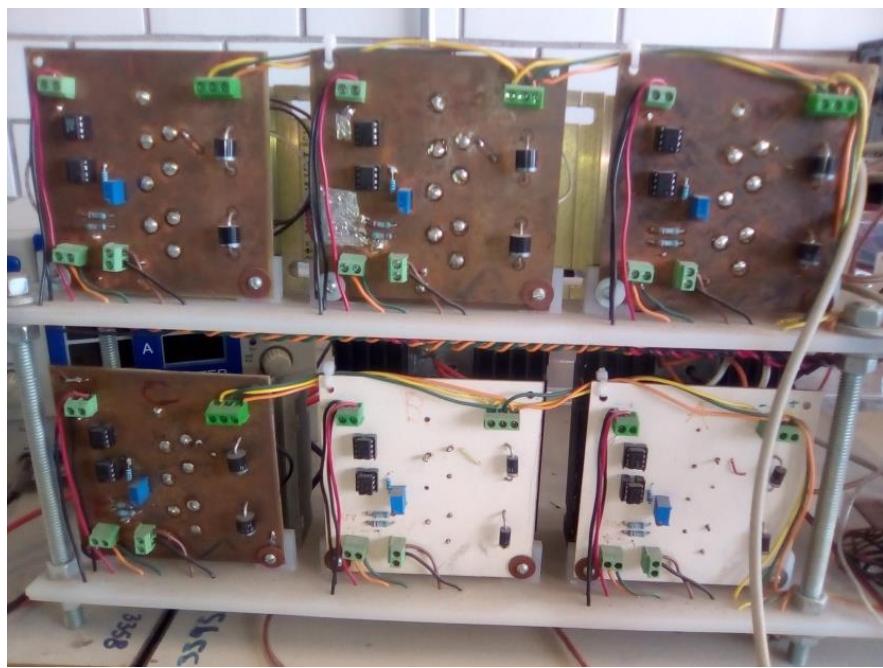


Figura 3. 11 Etapa de Amplificación para cada articulación del brazo robótico académico SMART MAN (parte de adelante).

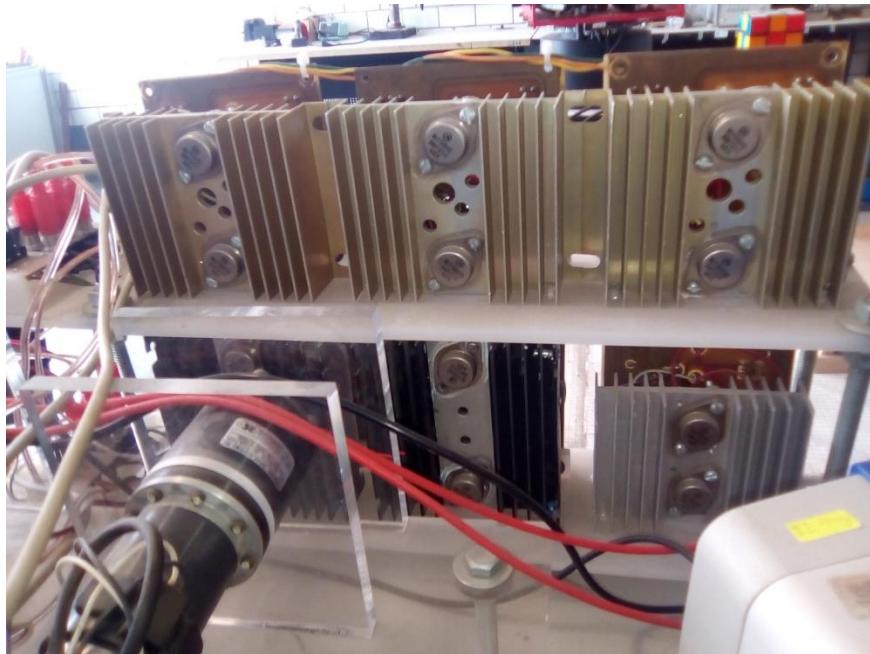


Figura 3. 12 Etapa de Amplificación para cada articulación del brazo robótico académico SMART MAN (parte de atrás).

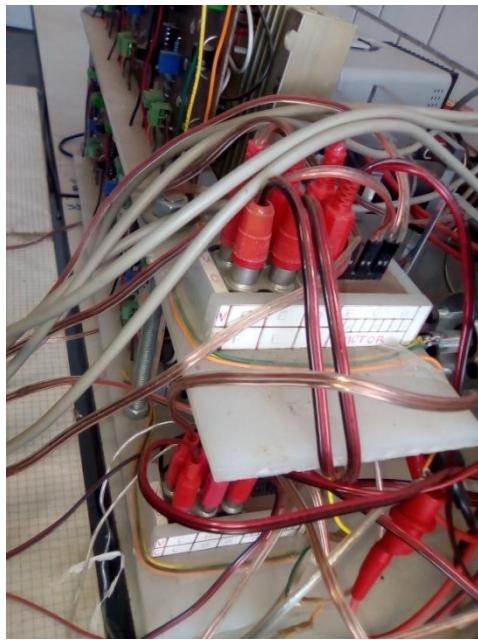


Figura 3. 13 Tarjeta de conectores para las salidas de la atapa de Amplificación que se conectan a la tarjeta de adquisición de datos.

3.6 Tarjeta de adquisición de datos.



Figura 3. 14Tarjeta de adquisición de datos QUANSER INNOVATE EDUCATE Q8-USB.

Se entiende por Adquisición de Datos a la acción de medir variables, convertirlas en formato digital con una velocidad de muestreo, almacenarlas en un computador y procesarlas en cualquier sentido. Este proceso necesita de una interfaz entre el mundo físico y el computador que se suele denominar como Tarjeta de Adquisición de Datos.

El proceso de adquisición de datos del mundo físico incluye los siguientes pasos fundamentales:

1. Utilización de un sensor/transductor adecuado para la variable que se desea medir, el cual permite detectar y convertir la variable física en una señal analógica de voltaje o corriente eléctrica.
2. Acondicionamiento de la señal eléctrica: En esta etapa se resuelven problemas relacionados con la señal obtenida, como son el filtrado, la amplitud y/o potencia de la señal, la no linealidad de la misma, entre otras.
3. Conversión de la señal eléctrica al lenguaje binario, propio del computador. Este proceso se conoce técnicamente como conversión Analógica /Digital (A/D).
4. Almacenamiento de los datos que, en forma digital, podrán ser almacenados en la memoria del computador y desplegados en la pantalla o en otro periférico del mismo.

Es decir, la tarjeta de Adquisición de Datos es un Hardware que permite comunicar al computador con el mundo exterior a través de sus puertos. La tarjeta que se utiliza para leer los datos de las variables de las articulaciones del brazo robótico académico SMART MAN es QUANSER INNOVATE EDUCATE Q8-USB.

La tarjeta de adquisición de datos QUANSER INNOVATE EDUCATE Q8-USB cuenta con ocho entradas analógicas que soportan un voltaje de -10 V hasta $+10\text{ V}$, de igual forma cuenta con ocho salidas analógicas que pueden entregar voltaje de -10 V hasta $+10\text{ V}$. Como se muestra en la Figura 3.15 para dichas entradas y salidas se utilizan conectores RCA.

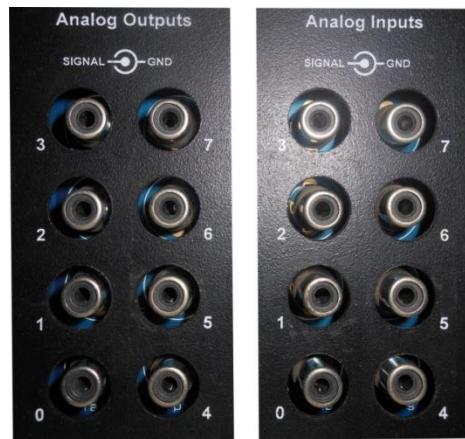


Figura 3.15 Puertos Entradas/Salidas analógicas de la tarjeta QUANSER INNOVATE EDUCATE Q8-USB.

Así mismo, cuenta también con ocho entradas digitales que se pueden configurar como señales de PWM. Manejan un voltaje en estado bajo de 0 V y un voltaje en estado alto de 5 V. Como se muestra en la Figura 3.16 para estas entradas y salidas se utilizan conectores de cable plano de dieciséis pines.

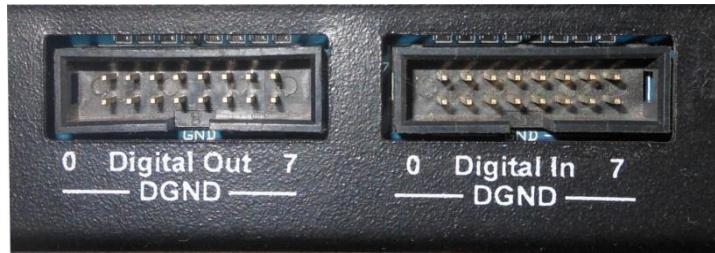


Figura 3. 16 Puerto Entradas/Salidas digitales de la tarjeta QUANSER INNOVATE EDUCATE Q8-USB.

También cuenta con ocho entradas de encoder para los sistemas de control, los cuales funcionan con un voltaje de 5 V y una corriente no mayor a 10 mA. El conector que utilizan estas entradas es DIN5 como se muestra en la Figura 3.17.



Figura 3. 17 Entradas de los encoders de la tarjeta QUANSER INNOVATE EDUCATE Q8-USB. En la parte izquierda se muestra la conexión de cada pin y las características que deben cumplir los encoders.

Tiene un puerto de control donde se puede extraer un voltaje fijo de 5 V, una señal wachdog e introducir una señal de interrupción externa, estas señales necesitan un conector de cable plano de diez pines como se muestran en la Figura 3.18.

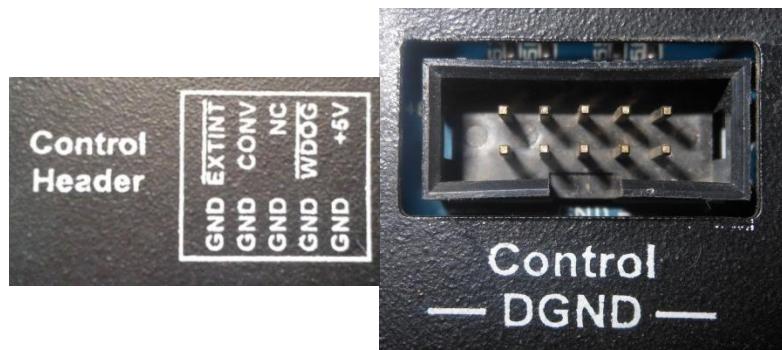


Figura 3. 18 Puerto de control digital que cuenta en la tarjeta con su descripción.

Finalmente la tarjeta QUANSER INNOVATE EDUCATE cuenta con un acceso a tierra digital y tierra analógica para poderse referenciar de una manera sencilla a circuitos externos. Se muestra en la figura 3.19.



Figura 3. 19 Conexiones a tierra digital y analógica.

3.7 Entrada/Salida de señales.

Se diseñó una tarjeta de circuito impreso para la interfaz del brazo robótico académico SMART MAN y la tarjeta de adquisición de datos QUANSER INNOVATE EDUCATE Q8-USB como se muestra en la Figura 3.23 esta cuenta con conectores para cada una de las entradas de la tarjeta de adquisición de datos, es decir, para las entradas analógicas, entradas digitales, encoder y servomotor; así como también las entradas para la tarjeta del brazo robótico académico SMART MAN.

Se realizó un circuito de polarización de base (comutación de corte y saturación de fuente) utilizando un transistor NPN BC547 como se muestra en el circuito de la Figura 3.20 para activar o desactivar con 5V los switch límite de cada articulación y colocar el brazo robótico académico SMARTMAN en su posición inicial. Los interruptores son normalmente cerrados ya que permiten el paso de la corriente eléctrica y se interrumpe cuando se oprime el interruptor.

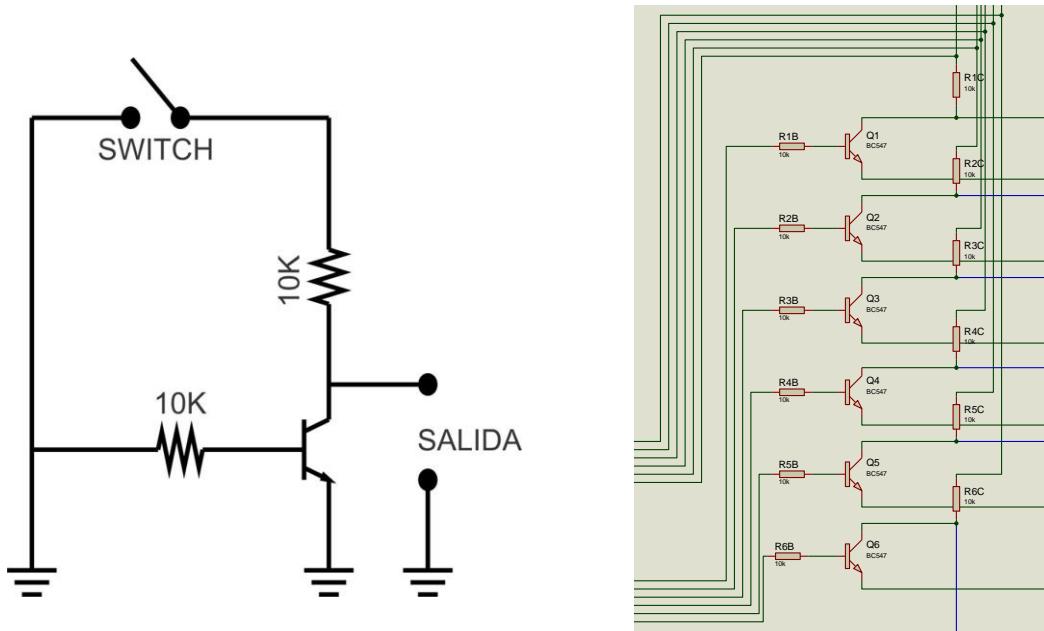


Figura 3.20 Circuito para activar y desactivar los switch limite.

En los conectores de los encoders se colocó un condensador cerámico de $0.1\mu F$ en paralelo con GND y voltaje ya que esto ayuda a estabilizar el voltaje para proteger el encoder y proveer un camino de baja impedancia (o inductancia) de retorno a tierra, ver Figura 3.21.

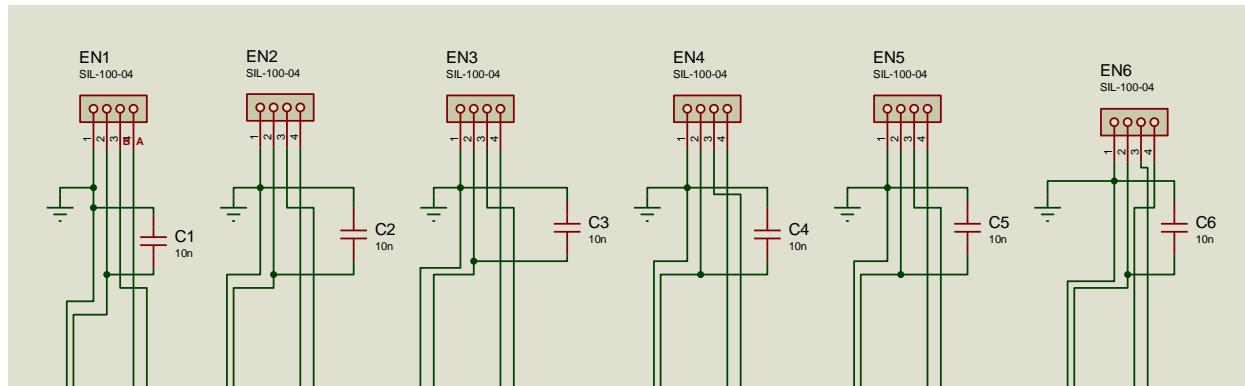


Figura 3.21 Conexiones para los encoder.

En la Figura 3.22 se muestra el esquema del circuito completo de la tarjeta de conectores realizado en el software Proteus Profesional 7 (ISIS Profesional) que se efectuó para la interfaz entre el brazo robótico académico SMART MAN y la tarjeta de adquisición de datos QUANSER INNOVATE EDUCATE Q8-USB; en el mismo esquema se observa el conector J8 , este se utiliza para mandar las señales de voltaje mediante la tarjeta de

adquisición de datos QUANSER INNOVATE EDUCATE Q8-US para alimentar a los switch limite y a los encoders del brazo robótico académico SMAR MAN, así como también se observa el conector J7 que se utiliza para mandar las señales de entrada de los switch limite a la tarjeta de adquisición de datos QUANSER INNOVATE EDUCATE Q8-US. Cada par de pines corresponde a una entrada o salida digital.

En la Figura 3.23 se muestra el esquema realizado en ARES Proteus de la tarjeta de conectores para la interfaz de entradas-salidas de la tarjeta de adquisición de datos QUANSER INNOVATE EDUCATE Q8-US y el brazo robótico académico SMAR MAN, y posteriormente se pasó a circuito impreso (PSB) como se muestra en la Figura 3.24.

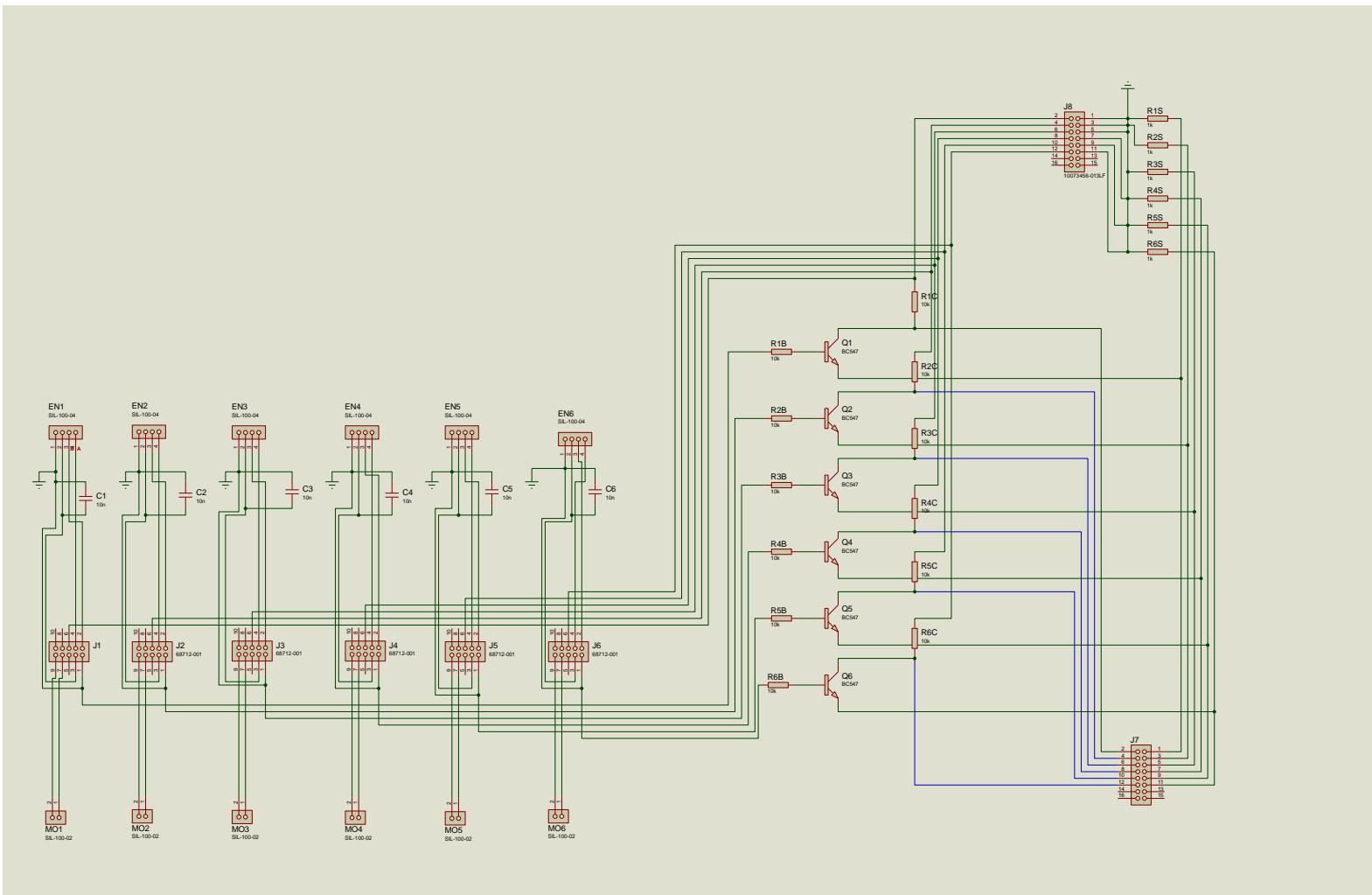


Figura 3. 22 Circuito de la tarjeta de conexiones para la interfaz, realizado en el software Proteus Profesional 7 (ISIS Profesional).

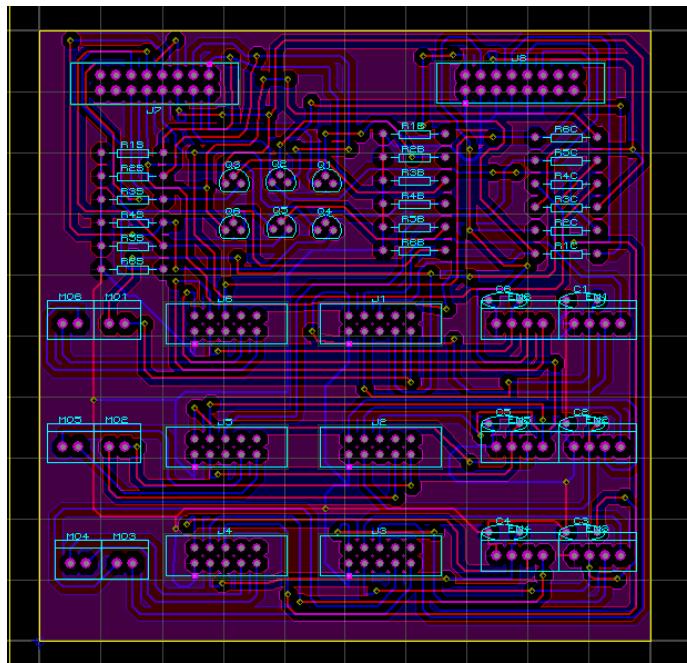


Figura 3. 23 Circuito de la tarjeta de conexiones para la interfaz, realizado en Ares Proteus Profesional 7 (ISIS Profesional).

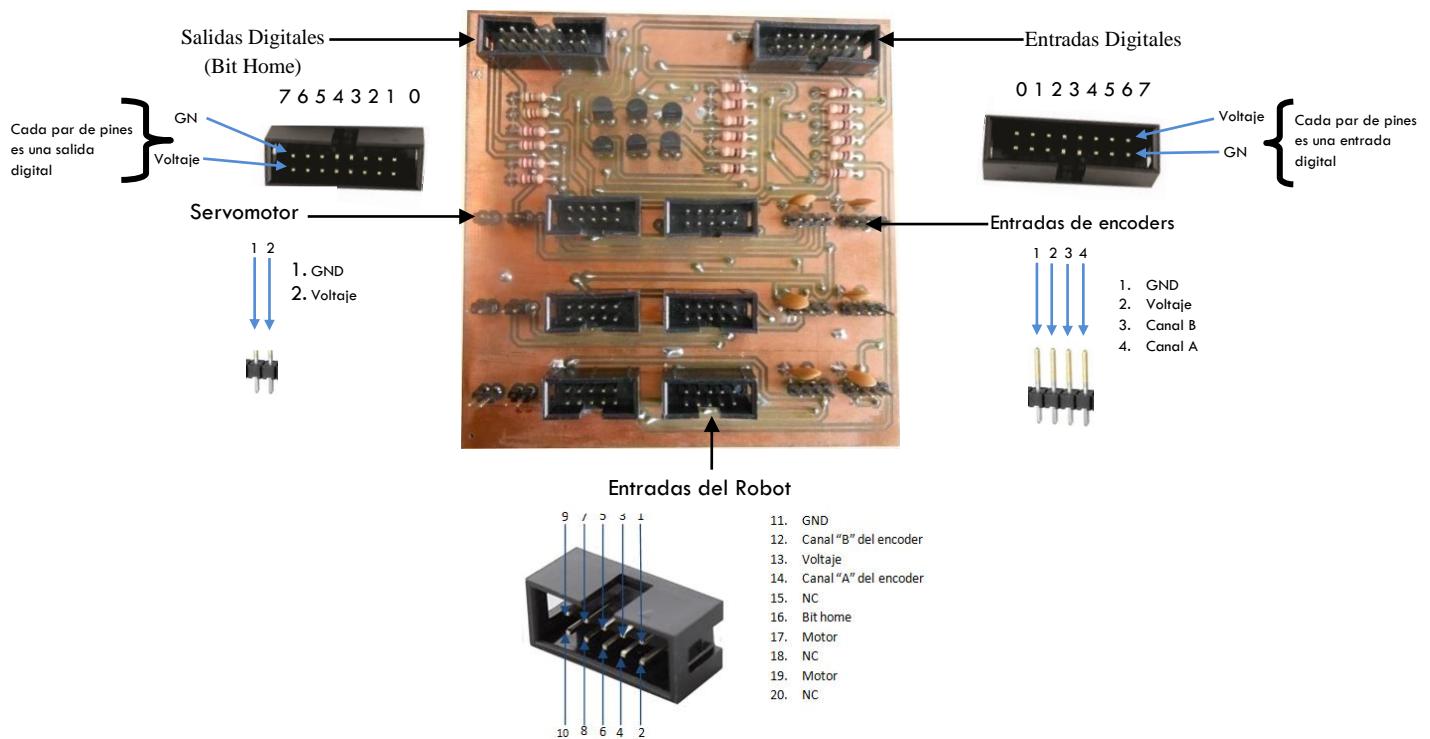
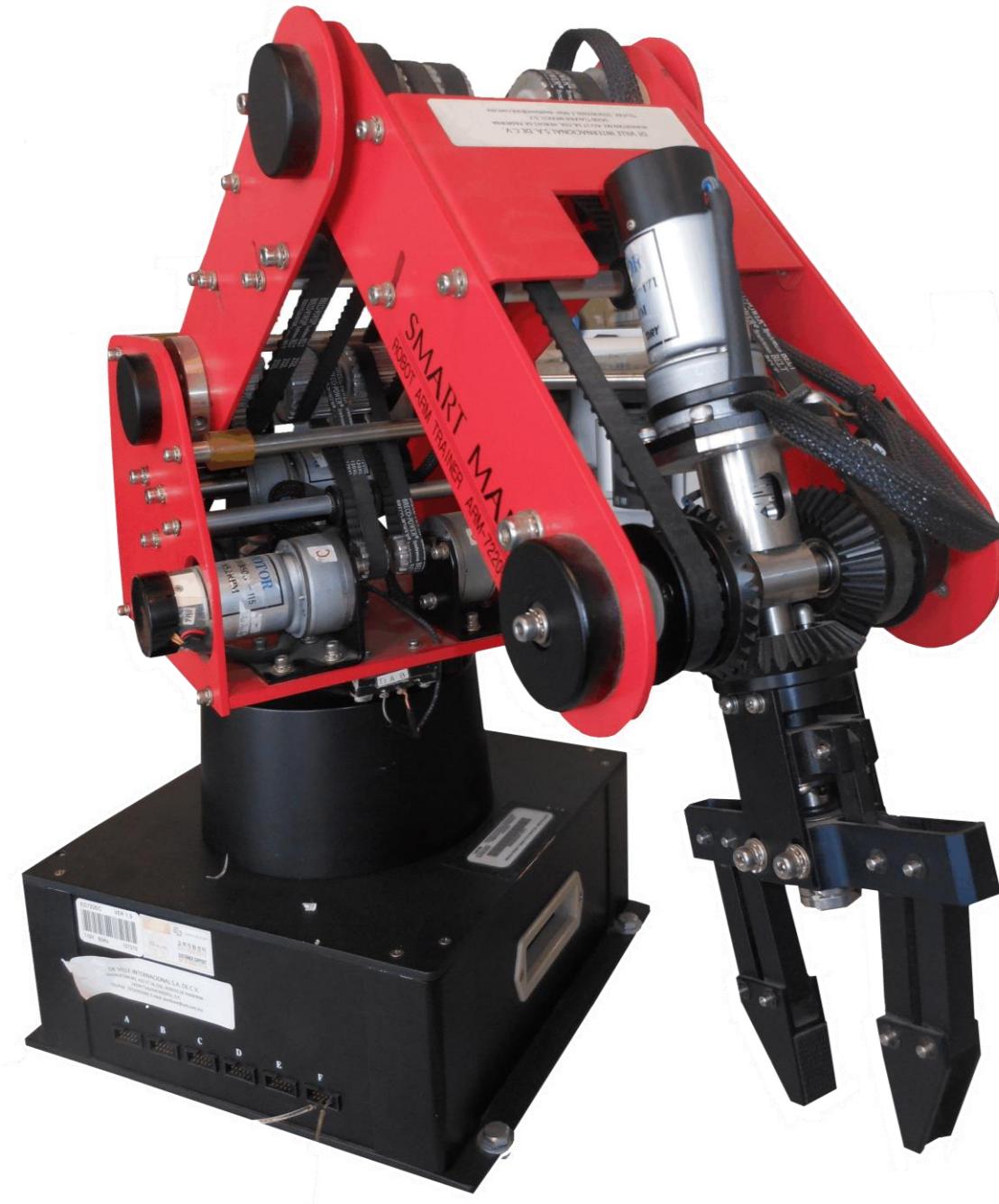


Figura 3. 24 Tarjeta de circuito impreso (PCB) de los conectores de entrada-salida para la interfaz.

3.8Conclusión.

En este capítulo se expuso el diseño de la interfaz de los encoders, switch limite y servomotores el brazo robótico académico SMART MAN con la tarjeta de adquisición de datos QUANSER INNOVATE EDUCATE Q8-USB para ser manipulados mediante la computadora. Esto fue posible con una tarjeta de circuitos impresos (PCB), para realizar las conexiones de entrada y salida entre ellos.



CAPITULO 4

Programación y control (3 grados de libertad)

4.1 Introducción.

En este capítulo se muestran las pruebas de interfaz del brazo robótico académico SMART MAN con la tarjeta de adquisición de datos QUANSER INNOVATE EDUCATE Q8-USB, se realizaron en un entorno de programación de Simulink, que permite construir y simular modelos de sistemas físicos y sistemas de control mediante diagramas de bloques. El comportamiento de dichos sistemas se define mediante bloques de funciones de transferencia, operaciones matemáticas, elementos de Matlab y señales predeterminadas de todo tipo. El entorno de programación Simulink combinado con QUARC (Real Time Control Software) funciona sobre el entorno de programación Matlab.

4.2 Implementación de control de movimiento de las articulaciones del brazo robótico académico SMART MAN.

Se implementó un control PI (Control proporcional-integral) en Simulink en el software Matlab, utilizando el diagrama de bloques mostrado en la Figura 4.1 para cada una de las articulaciones del brazo robótico académico SMART MAN; este lazo de control tiene algunas funciones importantes como utilizar la realimentación de encoders para rechazar las perturbaciones y eliminar el error estacionario con la acción integral. En la Figura 4.2 se muestra el diagrama de bloques del lazo de control realizado con Simulink y QUARC en el software de Matlab. Este lazo de control es para colocar el brazo robótico en una posición deseada. A la entrada se lee el sensor del motor (encoder en cuadratura incremental) el cual nos entrega la posición articular real y en el controlador es comparada con la posición deseada proveniente del cálculo de la Cinemática Inversa, dando valor a las coordenadas xyz se obtiene la posición en el plano 3D del efecto final. En la Figura 4.3 se muestran las gráficas de dicha comparación observando que la posición real (q_1 , q_2 y q_3) y la posición deseada (qd_1 , qd_2 , y qd_3) son casi iguales con un margen de error muy pequeño. Como se puede apreciar en la Figura 4.4 el margen de error es casi cero.

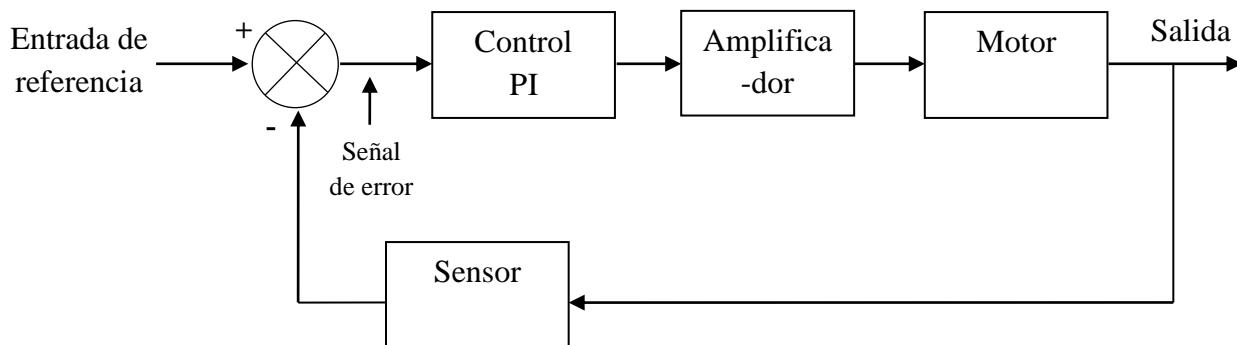


Figura 4.1 Diagrama de bloques de un control PI (Control Proporcional-Integral).

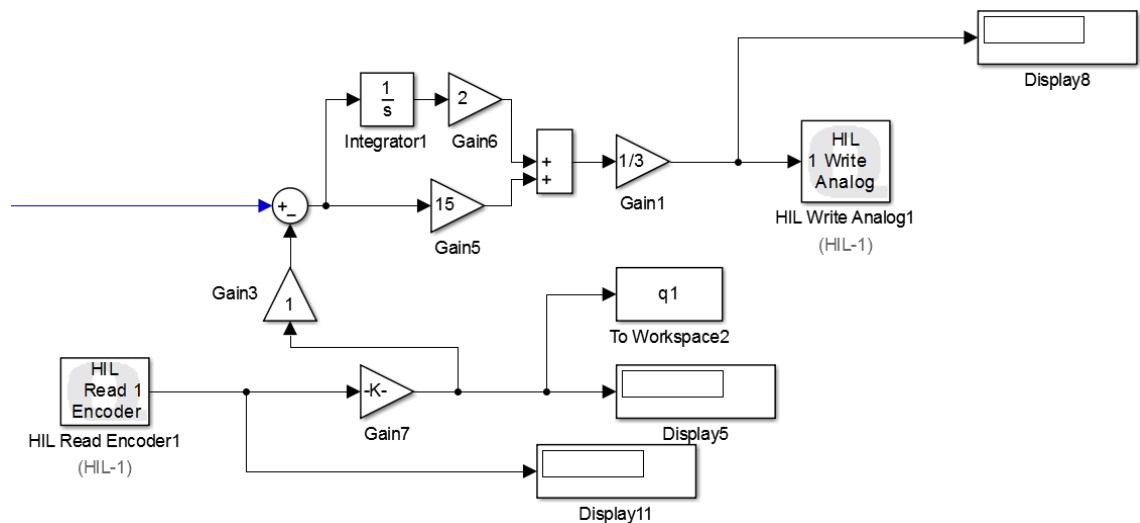


Figura 4. 2 Diagrama de bloques del lazo de control PI en Simulink en el software Matlab.

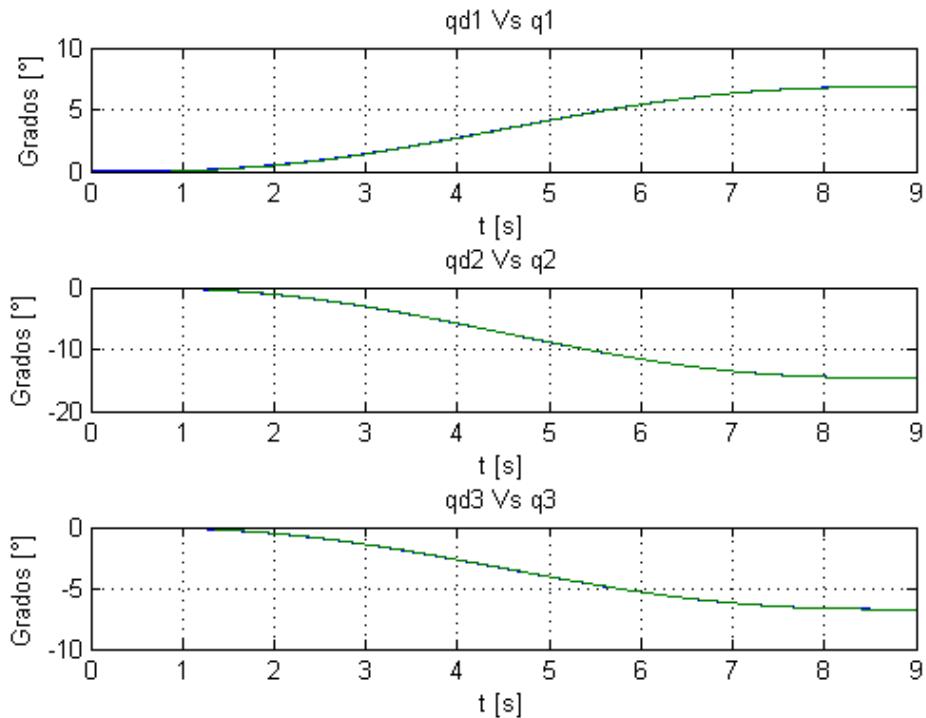


Figura 4. 3 Graficas que muestra la comparación que realiza el controlador PI de la posición real con la posición deseada de las tres primeras articulaciones.

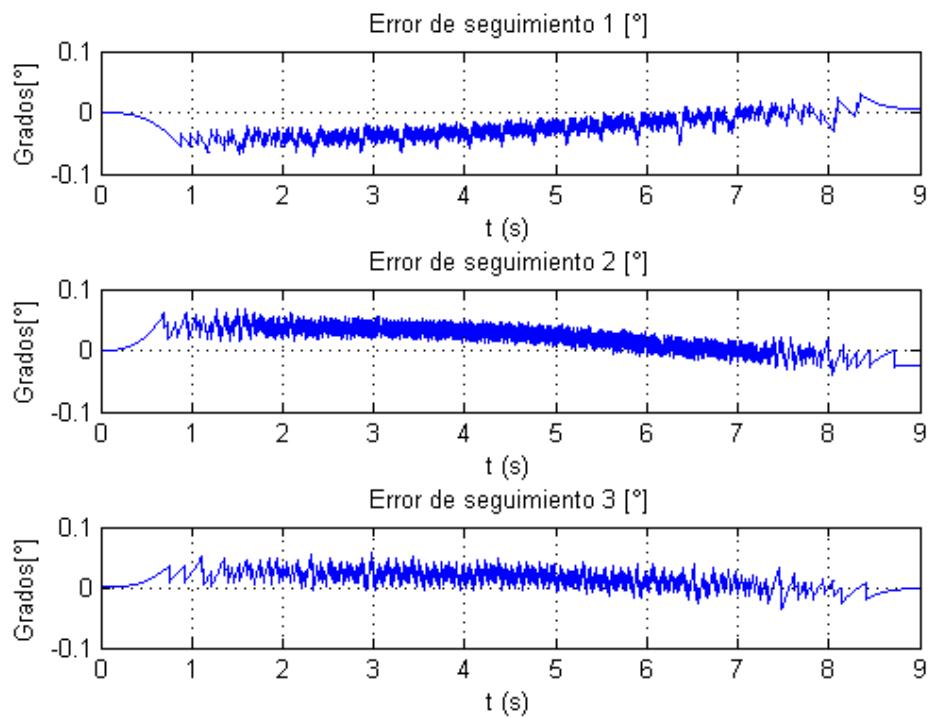


Figura 4. 4 Graficas de la señal de error que obtiene el control PI en las tres primeras articulaciones.

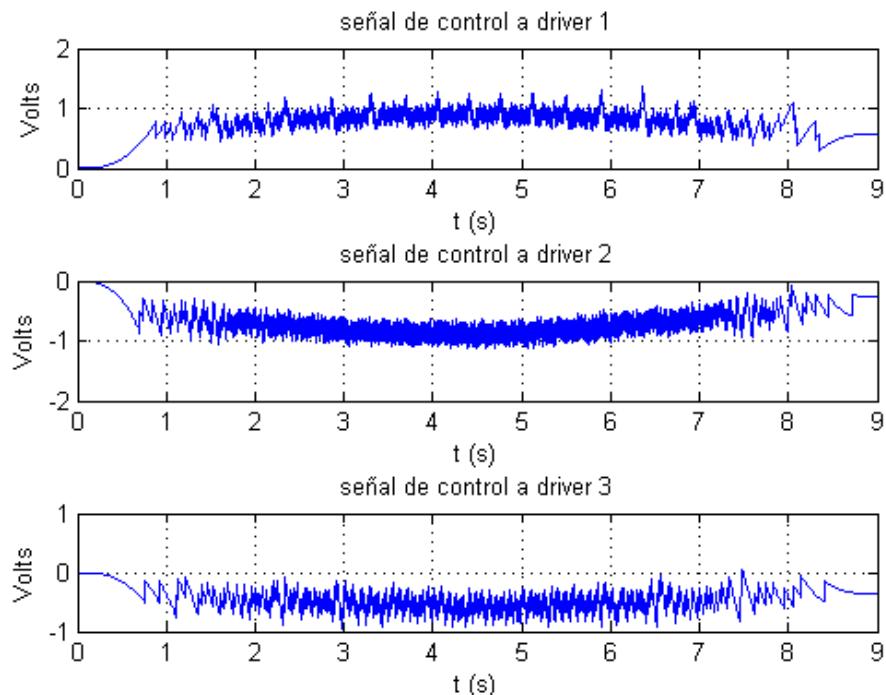


Figura 4. 5 Graficas del voltaje de salida de la tarjeta adquisición de datos QUANSER INNOVATE EDUCATE Q8-US que va hacia el amplificador y alimenta a los servomotores.

El brazo robótico académico SMART MAN como se muestra en la Figura 4.7 tiene una etapa de calibración realizada en Simulink y QUARC, para colocarlo en una posición inicial, poniendo sus ángulos en cero. Con las constantes Constant1, Constant2 y Constant3 se le da valores que se leen en las entradas qdf1, qdf2, y qdf3, siendo estos los grados que se requieren mover, para que de forma manual se observe que cada articulación tenga ángulos en cero grados.

Posteriormente, ya que el robot se colocó en la posición inicial, en las constantes valorX, valorY y valorZ, se colocan los valores de la coordenada en xyz en el plano 3D en la que se desea mover el brazo robótico académico SMART MAN y en las entradas x, y y z se leen dichos valores con los cuales en la función “Cinemática” se realiza el cálculo de los ángulos de la nueva posición utilizando la cinemática inversa. Los valores de los nuevos ángulos se muestran en las salidas theta1g, theta2g y theta. En la función “Cinemática” se realizan los cálculos de la geometría de los ángulos de las tres primeras articulaciones (cintura, hombro y codo) del brazo robótico académico SMART MAN resolviendo la cinemática inversa partiendo del problema cinemático directo. La cinemática inversa, consiste en que dada una posición deseada en el espacio 3D, se debe encontrar los ángulos de las 3 articulaciones del brazo robótico académico SMART MAN (theta 1, theta2 y theta3) para que el efecto final del Robot se posicione en dicha posición 3D deseada.

Se diseñaron trayectorias deseadas para permitir un seguimiento deseado suave, además de asegurar el inicio de cada movimiento con una derivada cero (parte del reposo) de desplazamiento y el final de movimiento también con derivada cero (llega a un estado de reposo) de desplazamiento. Ello con el fin de asegurar un perfil de movimiento acelerado en un principio y desacelerado al final, todo en términos de un polinomio de quinto grado en el dominio del tiempo.

En la Figura 4.6 se observa el movimiento de las tres primeras articulaciones del brazo robótico académico SMART MAN, desde el punto inicial donde acelera para llegar a su velocidad máxima y posteriormente empezar a frenar hasta parar en el punto final deseado, esto se lleva a cabo mediante una función polinomial de quinto grado que genera una secuencia de puntos en el espacio en posición y orientación, a lo largo del tiempo.

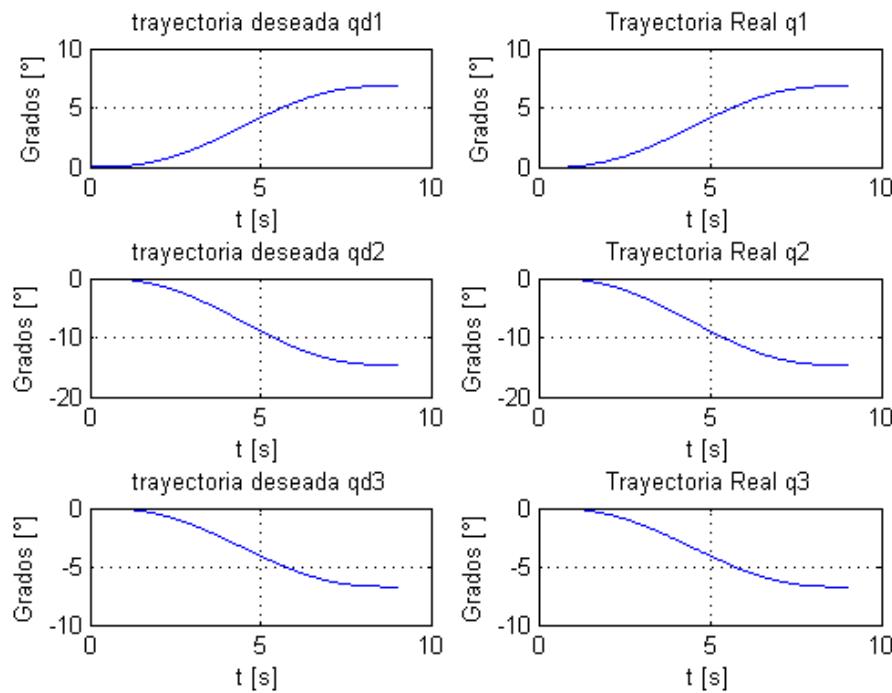


Figura 4.6 Grafica de las trayectorias deseadas de las tres primeras articulaciones..

El polinomio de quinto orden utilizado para el seguimiento suave de trayectoria es función del tiempo t debido a que está determinado para programarse en cualquier tiempo de duración, dependiendo del cálculo de los coeficientes en términos del tiempo final tf de la matriz BB. El polinomio de quinto grado es el siguiente:

$$a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5$$

El valor de los coeficientes a_0 , a_1 y a_2 del polinomio es igual a cero ya que en estos puntos no hay movimiento por tanto no hay velocidad y aceleración.

Para encontrar el valor de los coeficientes a_3 , a_4 y a_5 en un intervalo de tiempo se obtiene la matriz BB de 3X3, obteniendo la primera derivada (velocidad) y segunda derivada (aceleración) con respecto al tiempo del polinomio de quinto grado.

$$BB = \begin{pmatrix} t^3 & t^4 & t^5 \\ 3t^2 & 4t^3 & 5t^4 \\ 6t & 12t^2 & 20t^3 \end{pmatrix} \begin{array}{l} \text{Posición} \\ \text{Velocidad} \\ \text{Aceleración} \end{array}$$

Tomando los ángulos calculados por la cinemática inversa de las tres primeras articulaciones del brazo robótico académico SMART MAN cuando se da valores a la coordenada xyz, se resuelve la matriz en cada instante del tiempo deseado. θ_3 , θ_4 y θ_5 son los nuevos ángulos que se calculan en cada instante de tiempo.

$$\begin{pmatrix} a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t^3 & t^4 & t^5 \\ 3t^2 & 4t^3 & 5t^4 \\ 6t & 12t^2 & 20t^3 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \theta_3 \\ \theta_4 \\ \theta_5 \end{pmatrix}$$

Se resolvió esta matriz en el software Matlab con un tiempo de 10 segundos para cada articulación. En el programa que a continuación se explica donde se calcula la cinemática inversa a partir de la cinemática directa, se observan los datos para calcular la trayectoria deseada para cada articulación.

Función en la que se guardan las variables de entrada y salida

```
function [theta1g, theta2g, theta3g, pxx, pyy, pzz]
fcn(t, x, y, z, qdf1, qdf2, qdf3). Variables que guardan las distancias iniciales de las
tres primeras articulaciones.
```

```
d1=0.37;
a2=0.22;
a3=0.366;
Crg=180/pi;
```

Variables donde se realiza la conversión de centímetros a metros de la coordenada x y y z, en la que se quiere posicionar el brazo robótico académico SMART MAN.

```
px=x*(1/100)+a3;
py=y*(1/100)+0;
pz=z*(1/100)+(a2+d1);
```

En las siguientes líneas se realizan los cálculos geométricos de la cinemática inversa del brazo robótico académico SMART MAN que se obtuvieron anteriormente en el capítulo II.

```

theta1=atan(py/px);
theta1g=theta1*Crg;
dpxy=sqrt(px^2+py^2);
c=sqrt((pz-d1)^2+dpxy^2);
gam=acos((a2^2+c^2-a3^2)/(2*a2*c));
gamg=gam*Crg;
psi=atan(((pz-d1)/dpxy));
psig=psi*Crg;
theta2=gam+psi-(90*pi/180)*0;
theta2g=theta2*Crg-90;
zm=a2*sin(theta2)+d1;
theta3=-atan((zm-pz)/sqrt(a3^2-(zm-pz)^2));
theta3g=theta3*Crg;
qdf1=theta1+qdf1;
qdf2=theta2-(90*(pi/180))+qdf2;
qdf3=theta3+qdf3;

```

En las líneas posteriores se realizan trayectorias deseadas, como se mencionó anteriormente esto para que haya un seguimiento deseado suave en la velocidad.

```

q10 = 0*(pi/180);
tf = 10;   (Tiempo que tarda en efectuarse la trayectoria deseada)

% Para la primera articulación
a10 = q10;
a11 = 0;a12 = 0;

BB = [ tf^3,      tf^4,      tf^5;
       3*tf^2,    4*tf^3,    5*tf^4;
       6*tf,     12*tf^2,  20*tf^3];

bb = inv(BB)*[qdf1 - q10; 0; 0];
a13 = bb(1);
a14 = bb(2);
a15 = bb(3);

theta1 = a10 + a11*t + a12*t^2 + a13*t^3 + a14*t^4 + a15*t^5;
theta1g = theta1*(180/pi);

%Para la segunda articulación

q12 = 0*(pi/180);
a20 = q12;
a21 = 0;
a22 = 0;

BB2 = [ tf^3,      tf^4,      tf^5;
       3*tf^2,    4*tf^3,    5*tf^4;
       6*tf,     12*tf^2,  20*tf^3];

bb2 = inv(BB2)*[qdf2 - q12; 0; 0];
a23 = bb2(1);
a24 = bb2(2);

```

```
a25 = bb2(3);

theta2 = a20 + a21*t + a22*t^2 + a23*t^3 + a24*t^4 + a25*t^5;
theta2g = theta2*(180/pi);

%Para la tercera articulación

q13 = 0*(pi/180);
a30 = q13;
a31 = 0
a32 = 0;

BB3 = [ tf^3,      tf^4,      tf^5;
         3*tf^2,   4*tf^3,   5*tf^4;
         6*tf,     12*tf^2,  20*tf^3];

bb3 = inv(BB3)*[qdf3 - q13; 0; 0];
a33 = bb3(1);
a34 = bb3(2);
a35 = bb3(3);

theta3 = a30 + a31*t + a32*t^2 + a33*t^3 + a34*t^4 + a35*t^5;
theta3g = theta3*(180/pi);

pxx=px;
pyy=py;
pzz=p
```

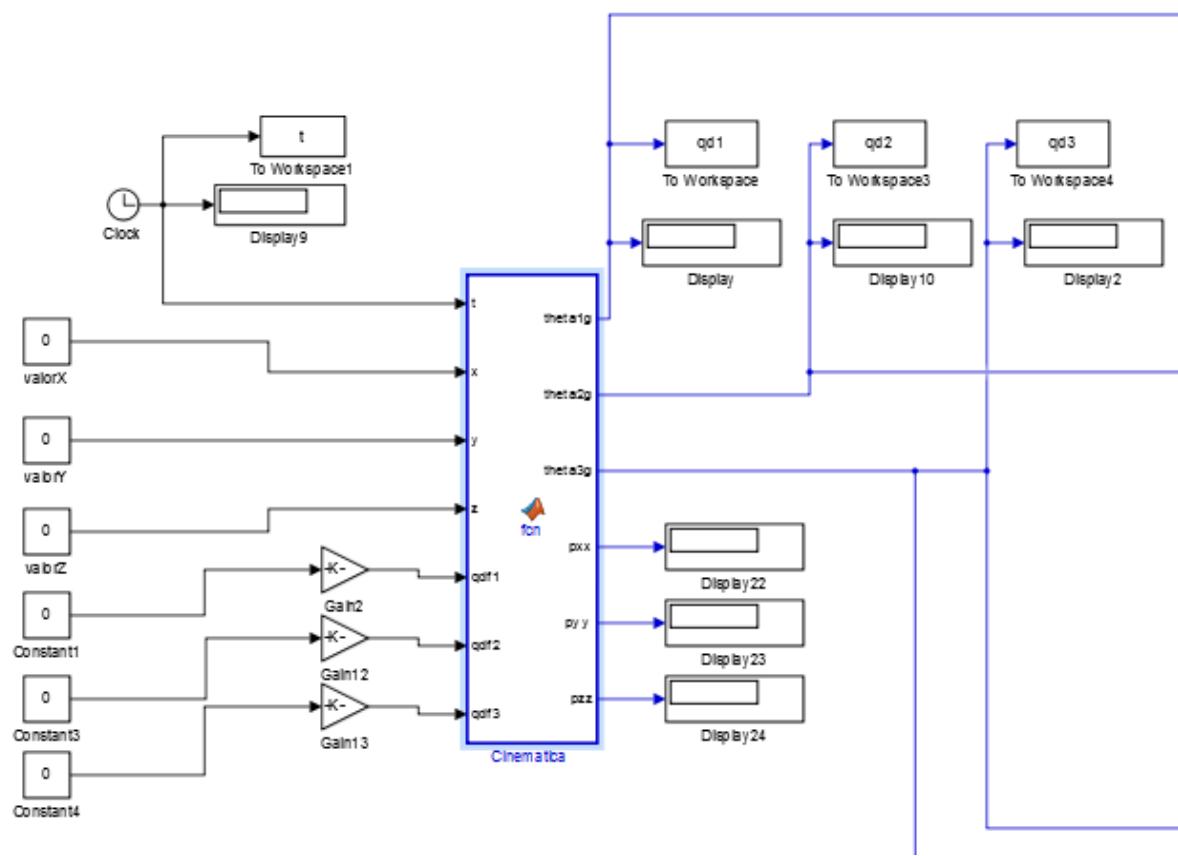


Figura 4. 7 Diagrama de bloques para dar valores a las coordenadas X, Y y Z y calibrar la posición inicial del brazo robótico académico SMART MAN, colocar las coordenadas de la posición deseada y la función “Cinemática”

Al igual que en las articulaciones, Se implementó un Control PI para posicionar y abrir-cerrar el gripper, que permite sujetar un objeto y moverlo de una posición a otra, este abre aproximadamente 10 centímetros. El diagrama se muestra en la figura 4.8.

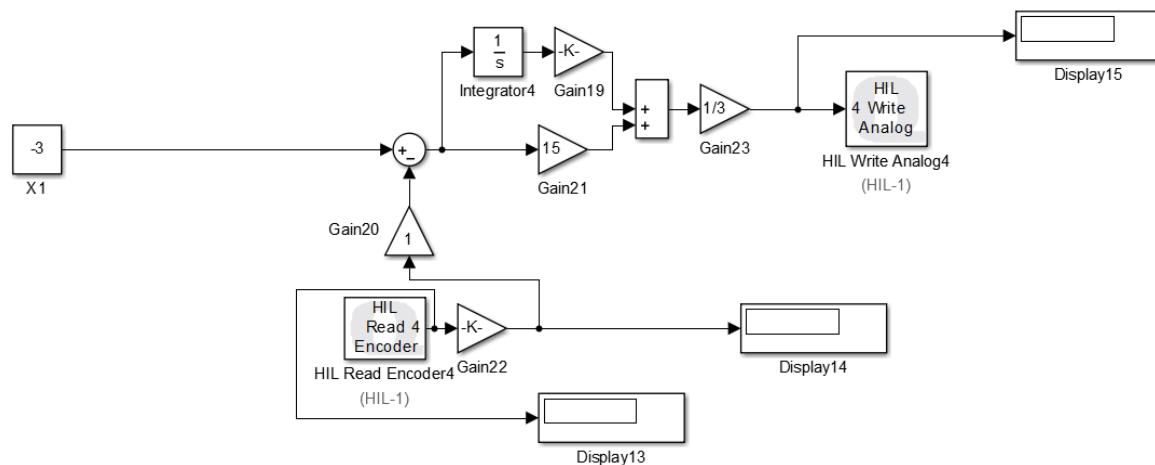
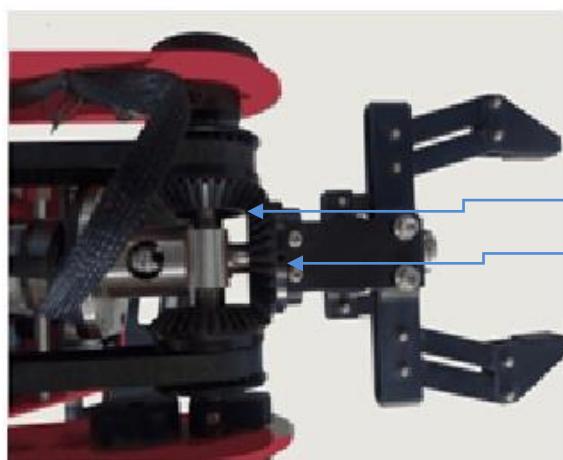
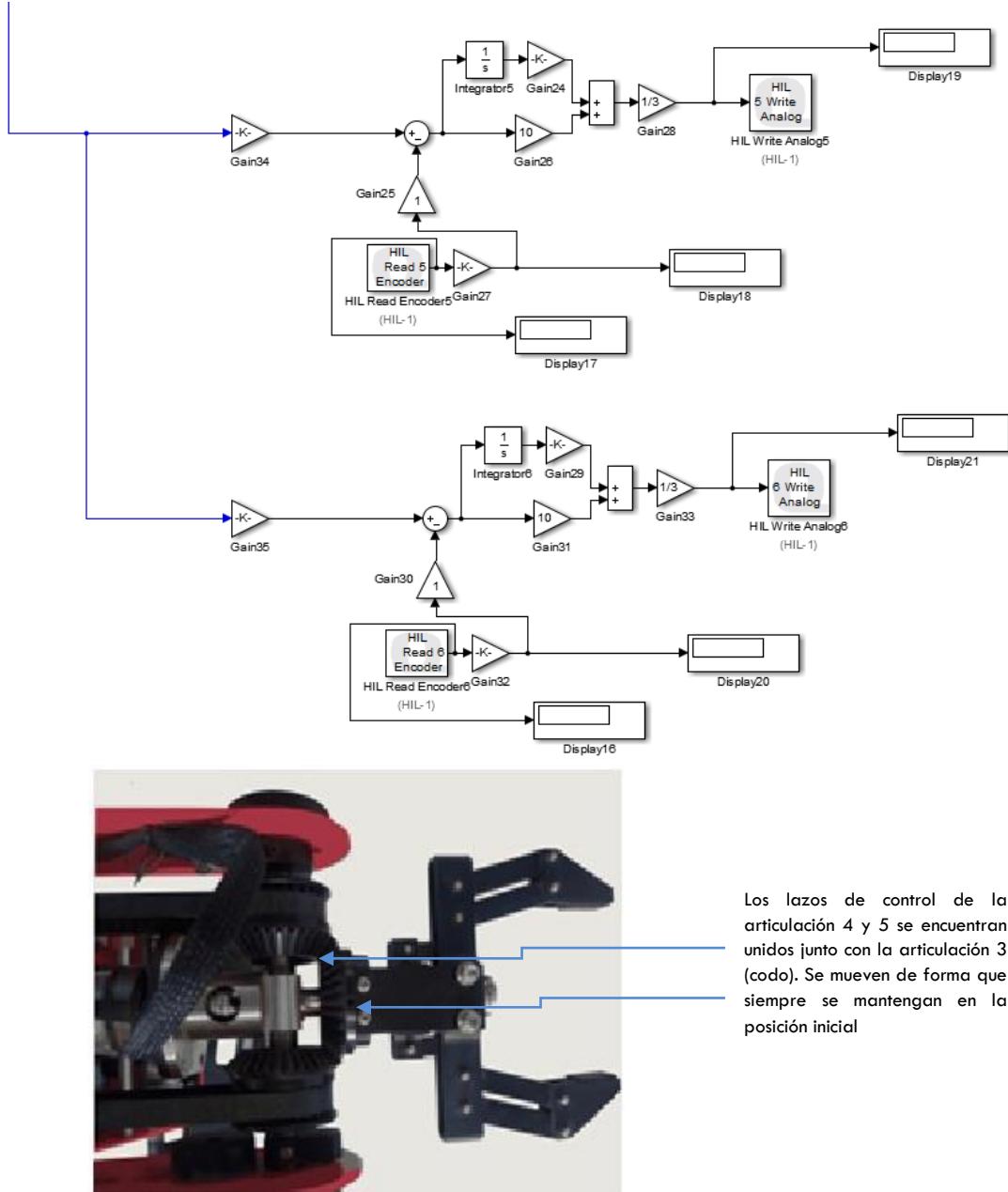


Figura 4. 8 Diagrama de bloques con un control PI para posicionar el griper (abrir-cerrar).

La articulación 4 y 5 se mantuvieron fijas ya que el análisis de la cinemática directa y la cinemática inversa solo se realizaron para las tres primeras articulaciones, en trabajos futuros se pretende explotar toda la estructura del robot, tanto a nivel cinemático, dinámico y de control

. Los lazos de control de estas dos articulaciones se unieron al lazo de control de la articulación tres (codo) como se muestra en la Figura 4.9.



Los lazos de control de la articulación 4 y 5 se encuentran unidos junto con la articulación 3 (codo). Se mueven de forma que siempre se mantengan en la posición inicial

Figura 4. 9 Diagrama de bloques en Simulink en el software Matlab de la articulacion 4 y 5, se mantienen fijas.

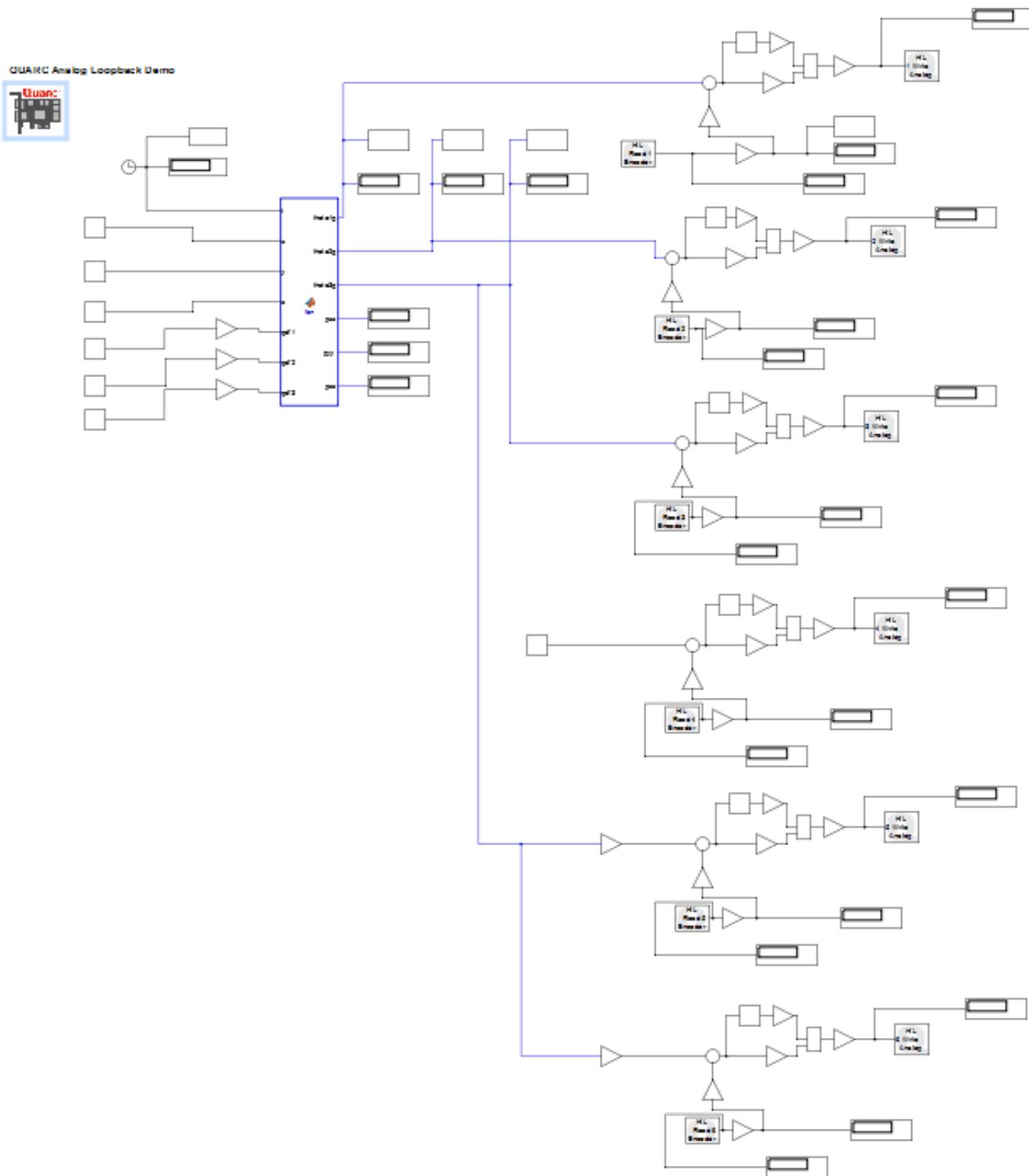


Figura 4. 10 Diagrama de bloques en Simulink en el software Matlab de todo el sistema para posicionar el brazo robótico académico SMART MAN, de una posición inicial a una posición deseada.

4.3 Conclusión.

En este capítulo se diseñó en el software Matlab un programa para llevar a cabo los cálculos de la cinemática directa y cinemática inversa como se muestra en la Figura 4.7 que se analizaron en el capítulo I y II, observando que estos cálculos fueran los correctos, así como también se diseñó un control PI con el cual se pudo posicionar el brazo robótico Académico “SMART MAN” en una coordenada deseada.

CONCLUSIÓN FINAL

A lo largo del presente trabajo de tesis se obtuvo el análisis en cada etapa para llegar a obtener la cinemática directa y cinemática inversa, así como también la implementación de un control PI (Control Proporcional- Integral) y la interfaz del brazo robótico académico SMART MAN y la tarjeta de adquisición de datos QUANSER INNOVATE EDUCATE Q8-USB. Esto con el fin de posicionar y orientar el brazo robótico académico SMART MAN en una coordenada deseada.

En el análisis de la cinemática directa se obtuvieron los resultados esperados obteniendo los parámetros de **Denavit-Hartenberg [1955]** (α_i , a_i , θ_i y d_i), realizando la multiplicación de matrices de transformación de coordenadas sucesivas 0A_3 . Con las que posteriormente se obtuvo la matriz homogénea 0T_3 . Esta matriz se calculó en el software Matlab con los valores de los parámetros y se observó que el resultado fue el correcto.

Posteriormente, se realizó el análisis de la cinemática inversa a partir de la solución de la cinemática directa utilizando métodos geométricos, usando geometría y trigonometría con el fin de encontrar la ecuación del valor de los ángulos de cada articulación, en hombro arriba. Estos cálculos se pasaron al software de Matlab para realizar pruebas y verificar que fueran los correctos.

Posteriormente de que se obtuvo la cinemática directa y la cinemática inversa, se prosiguió a realizar un programa en el software Matlab con los cálculos obtenidos anteriormente y se realizó un diagrama de bloques para implementar un control PI (control proporcional-integral). Este programa está diseñado para posicionar al brazo robótico académico SMART MAN en una coordenada xyz en el plano 3D deseada, para ello se realizó una tarjeta de circuito impreso (PCB) para las conexiones de entradas y salidas del brazo robótico académico SMART MAN y la tarjeta de adquisición de datos QUANSER INNOVATE EDUCATE Q8-USB y realizar la interfaz entre ellos mediante la computadora.

Los cálculos teóricos de la cinemática directa y la cinemática inversa no tuvieron mayor dificultad sin embargo el problema fue cuando ya se implementó todo el sistema completo físicamente, se observó que el brazo robótico tiene una compensación gravitacional que dificultaba realizar las pruebas finales, a pesar de ello se acoplo el sistema con las trayectorias deseadas para que hiciera más lento el movimiento el brazo robótico académico SMART MAN y llegara a su posición deseada sin alterar los resultados.

Finalmente, se puede concluir que la implementación del brazo robótico académico SMART MAN de cinco grados de libertad en arquitectura abierta, que solo se realizó a las

tres primeras articulaciones, se puede realizar a las 2 articulaciones restantes y Gripper con todos los datos adquiridos en el desarrollo de este trabajo de tesis, así como también diseñar un control diferente para posicionar y orientar y realice alguna tarea.

INDICE DE FIGURAS Y TABLAS

| | |
|--|----|
| <i>Figura 1. 1Sistema de coordenadas de referencia ligado al cuerpo.</i> | 3 |
| <i>Figura 1. 2 Sentido positivo de los ángulos α_i y θ_i</i> | 5 |
| <i>Figura 1. 3 Longitudes de cada articulación del brazo robótico Académico “SMART MAN”</i> | 6 |
| <i>Figura 1. 4 Regla de la mano derecha.</i> | 7 |
| <i>Figura 1. 5 Regla de la mano izquierda.</i> | 7 |
| <i>Figura 1. 6 Sistema de coordenadas de las articulaciones de brazo robótico académico SMART MAN con 5 grados de libertad.</i> | 8 |
| <i>Figura 1. 6 Sistema de coordenadas de las articulaciones de brazo robótico académico SMART MAN tomando solo 3 grados de libertad.</i> | 8 |
| | |
| <i>Figura 2. 1 Sistema de coordenadas de las articulaciones de brazo robótico académico SMART MAN.</i> | 15 |
| <i>Figura 2. 2 Diagrama geométrico de la primera articulación (cintura) del brazo robótico académico SMART MAN.</i> | 16 |
| <i>Figura 2. 3 Diagrama geométrico de las tres principales articulaciones cintura, hombro y codo del brazo robótico académico SMART MAN.</i> | 17 |
| | |
| <i>Figura 3. 1 Diagrama de bloques de la interfaz del brazo robótico académico SMART MAN y la tarjeta de adquisición de datos QUANSER INNOVATE EDUCATE Q8-USB</i> | 22 |
| <i>Figura 3. 2 Motor DC.</i> | 23 |
| <i>Figura 3. 3 Encoder incremental en cuadratura.</i> | 24 |
| <i>Figura 3. 4 Encoder Absoluto.</i> | 25 |
| <i>Figura 3. 5 Encoder incremental.</i> | 27 |
| <i>Figura 3. 6 Fotos de los engranes del brazo robótico Académico “SMART MAN”</i> | 28 |
| <i>Figura 3. 7 Tarjeta del brazo robótico académico SMART MAN.</i> | 29 |
| <i>Figura 3. 8 Conector macho 10 pines de las entradas de las articulaciones del brazo robótico Académico “SMART MAN”</i> | 30 |
| <i>Figura 3. 9 Etapa de Amplificación realizado en el software Proteus Profesional 7 (ISIS Profesional)</i> | 32 |
| <i>Figura 3. 10 Etapa de Amplificación Realizado en el software Proteus Profesional 7 (ARES Profesional)</i> | 32 |
| <i>Figura 3. 11 Etapa de Amplificación para cada articulación del brazo robótico académico SMART MAN (parte de adelante).</i> | 33 |
| <i>Figura 3. 12 Etapa de Amplificación para cada articulación del brazo robótico académico SMART MAN (parte de atrás).</i> | 33 |
| <i>Figura 3. 13 Tarjeta de conectores para las salidas de la atapa de Amplificación que se conectan a la tarjeta de adquisición de datos.</i> | 34 |
| <i>Figura 3. 14 Tarjeta de adquisición de datos QUANSER INNOVATE EDUCATE Q8-USB.</i> | 34 |
| <i>Figura 3. 15 Puertos Entradas/Salidas analógicas de la tarjeta QUANSER INNOVATE EDUCATE Q8-USB.</i> | 35 |
| | |
| <i>Figura 3. 16 Puertos Entradas/Salidas digitales de la tarjeta QUANSER INNOVATE EDUCATE Q8-USB.</i> | 36 |
| <i>Figura 3. 17 Entradas de los encoders de la tarjeta QUANSER INNOVATE EDUCATE Q8-USB. En la parte izquierda se muestra la conexión de cada pin y las características que deben cumplir los encoders.</i> | 36 |
| <i>Figura 3. 18 Puerto de control digital que cuenta en la tarjeta con su descripción.</i> | 37 |

INDICE DE FIGURAS Y TABLAS

| | |
|---|-----------|
| <i>Figura 3. 19 Conexiones a tierra digital y analógica.</i> | <i>37</i> |
| <i>Figura 3. 20 Circuito para activar y desactivar los switch limite.</i> | <i>38</i> |
| <i>Figura 3. 21Conexiones para los encoder.</i> | <i>38</i> |
| <i>Figura 3. 22 Circuito de la tarjeta de conexiones para la interfaz, realizado en el software Proteus Profesional 7 (ISIS Profesional).</i> | <i>40</i> |
| <i>Figura 3. 23 Circuito de la tarjeta de conexiones para la interfaz, realizado en AresProteus Profesional 7 (ISIS Profesional).</i> | <i>41</i> |
| <i>Figura 3. 24 Tarjeta de circuito impreso (PCB) de los conectores de entrada-salida para la interfaz.</i> | <i>41</i> |
| | |
| <i>Figura 4. 1 Diagrama de bloques de un control PI (Control Proporcional-Integral).</i> | <i>44</i> |
| <i>Figura 4. 2 Diagrama de bloques del lazo de control PI en Simulink en el software Matlab.</i> | <i>45</i> |
| <i>Figura 4. 3 Graficas que muestra la comparación que realiza el controlador PI de la posición real con la posición deseada de las tres primeras articulaciones.</i> | <i>45</i> |
| <i>Figura 4. 4 Graficas de la señal de error que obtiene el control PI en las tres primeras articulaciones.</i> | <i>46</i> |
| <i>Figura 4. 5 Graficas del voltaje de salida de la tarjeta adquisición de datos QUANSER INNOVATE EDUCATE Q8-US que va hacia el amplificador y alimenta a los servomotores.</i> | <i>46</i> |
| <i>Figura 4. 6 Grafica de las trayectorias deseadas de las tres primeras articulaciones..</i> | <i>48</i> |
| <i>Figura 4. 7 Diagrama de bloques para dar valores a las coordenadas X, Y y Z y calibrar la posición inicial del brazo robótico académico SMART MAN, colocar las coordenadas de la posición deseada y la función Cinemática”</i> | <i>52</i> |
| <i>Figura 4. 8Diagrama de bloques con un control PI para posicionar el griper (abrir-cerrar).</i> | <i>52</i> |
| <i>Figura 4. 9Diagrama de bloques en Simulink en el software Matlab de la articulacion 4 y 5, se mantienen fijas.</i> | <i>53</i> |
| <i>Figura 4. 10 Diagrama de bloques en Simulink en el software Matlab de todo el sistema para posicionar el brazo robótico académico SMART MAN, de una posición inicial a una posición deseada.</i> | <i>54</i> |
| | |
| <i>Figura E. 1 Calibración de la primera articulación (Cintura)</i> | <i>74</i> |
| <i>Figura E. 2 Calibración de la segunda articulación (Hombro).</i> | <i>75</i> |
| <i>Figura E. 3 Calibración de la tercera articulación (codo)</i> | <i>75</i> |
| <i>Figura E. 4 Valores de la Coordenada para mover al brazo robótico Académico “SMART MAN” en una posición deseada.</i> | <i>76</i> |
| <i>Figura E. 5Primer movimiento del brazo robótico Académico “SMART MAN” para la primera posición.</i> | <i>77</i> |
| <i>Figura E. 6Segundo movimiento del brazo robótico Académico “SMART MAN” para la primera posición.</i> | <i>77</i> |
| <i>Figura E. 7 Tercer movimiento del brazo robótico Académico “SMART MAN” para la primera posición.</i> | <i>78</i> |
| <i>Figura E. 8Cuarto movimiento del brazo robótico Académico “SMART MAN” para la primera posición.</i> | <i>78</i> |
| <i>Figura E. 9 Movimiento del Gripper.</i> | <i>79</i> |
| <i>Figura E. 10 Coordenada de la segunda posición.</i> | <i>80</i> |
| <i>Figura E. 11 Primer movimiento del brazo robótico Académico “SMART MAN” para la segunda posición.</i> | <i>80</i> |
| <i>Figura E. 12 Segundo movimiento del brazo robótico Académico “SMART MAN” para la segunda posición.</i> | <i>81</i> |
| <i>Figura E. 13Tercer movimiento del brazo robótico Académico “SMART MAN” para la segunda posición.</i> | <i>81</i> |
| <i>Figura E. 14Cuarto movimiento del brazo robótico Académico “SMART MAN” para la segunda posición.</i> | <i>82</i> |

Figura E. 15Quinto movimiento del brazo robótico Académico “SMART MAN” para la segunda posición. 82

Tablas

Tabla 1. 1 Parámetros de brazo robótico académico SMART MAN _____ 9
Tabla 3. 1 Tabla de relación de transmisión de engranes de las articulaciones del brazo robótico académico SMART MAN. 28

BIBLIOGRAFIA

- Bejczy, A. K. (1974). "Robot Arm Dynamics and Control," Technical Memo 33-669, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, Calif.
- Boller, R., and Paul, R.(1973). "An Experimental System for Computer Controlled Mechanical Assembly," Stanford Artificial Intelligence Laboraroty Memo AIM-220, Stanford Univrsity, Palo Alto, Calif.
- Denavit, J., andHartenberg, R. S. (1955)."A Kinematic Notation for Lower-pair Mechanisms Based on Matrices,"J. App. Mech, vol. 77, pp.215-221.
- Ernst H. A. (1962). "MH-1, A Computer-Oriented Mechanical Hand," PROC. 1962 Spring Joint Computer Conf., San Francisco, Calif., pp.39-51
- Fernando, R. C. (2011). Robótica CONTROL DE ROBOTS MANIPULADORES. México: Alfaomega.
- Inoue, H. (1974)."Force Feedback in Precise Assembly Tasks," MIT Artificial Intelligence Laboratory Memo 308, MIT, Cambridge, Mass.
- K. S. FU, R. C. Gonzalez (1990). ROBOTICA: Control, detección, visión e inteligencia. España: McGraw-Hill.
- Kahn, M. E. and Roth(1971). "The Near- Minimum-Time Control of Open-Loop Articulated Kinematic Chains,"Trans. ASME, J. Dynamic Systems, Measurement and Control, vol 93, pp.164-172.
- McCarthy, J., et al. (1968). "A Computer with Hands, Eyes, and Ears , " 1968 Fall Joint Computer Conf., AFIPS Proceedings, pp. 329-338.
- Nevins, J. L., Whitney, D. E., et al. (1974-1976)."Exploratory Research in Industrial Modular Assembly,"NSF Project Reports 1 to 4; C. S. Draper Laboratory, Cambridge. Mass.
- Pieper, D. L. (1968). "The Kinematics of Manipulators under Computer Control" Artificial Intelligence Project Memo No. 72., Computer Science Department, Stanfort University, Palo Alto, Calif.
- Ramón, F. A. (2007). Servomotores. Universidad de Alicante.
- Sons, J. W. (1999). Diccionario Webster. Estados Unidos: Springfield, Massachusetts.
- Tomovic, R., and Boni, G. (1962). "An Adaptive Artificial Hand,"IRE Trans. Automatic Control, vol. AC-7, no.3, pp.3-10.
- Will, P., and Grossman, D. (1975)."An Experimental System for Computer Controlled Mechanical Assembly," IEEE Trns. Comput., vol. C-24, no. 9, pp.879-888

ANEXOS

ANEXO 1. Hoja de especificación del Brazo Robótico “SMART MAN”



5 Joints Arm-Robot Training System ED-7220C

5 JOINT ARM-ROBOT TRAINER **ED-7220C**



Zoom

Feature Extra Standard Option Accessories

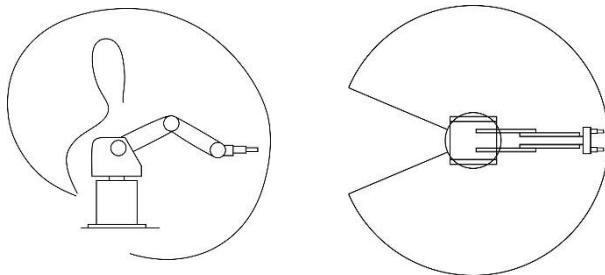


- 5 Joints + Gripper Robot for Educational purpose.
- Precise Driving Using the DC Servo Motor.
- IBM PC Compatible Interface.
- 5-Joint arm can be integrated with intelligent robot platform (ED-7272).

ANEXO 1. Hoja de especificación del Brazo Robótico “SMART MAN”

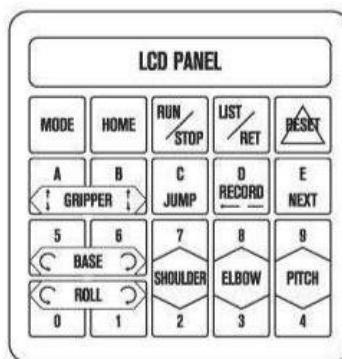
| ROBOT BODY (ARM-7220-4) | | |
|---------------------------|---|-------------------------|
| Number of Joints | 5 Joint + Gripper | |
| Construction | Vertical Articulated Arm | |
| Precision(Position) | $\pm 0.5\text{mm}$ | |
| Movement Speed | 10mm/s Max. (Approx) | |
| Load Capacity | 1 Kg | |
| Actuator | DC Servo Motor (OpticalEncoder) | |
| MotionRange | BodyJoint | 310° |
| | ShoulderJoint | +130°/-35° |
| | ElbowJoint | $\pm 130^\circ$ |
| | Wrist | Up-Down $\pm 130^\circ$ |
| | | Rotation 360° |
| GripperOpening | 55mm (Rubber Pad Exception: 68mm) | |
| Sensor (GripperPressure) | Capability to detect small object size ($\pm 0.5\text{mm}$) | |
| Dimension | Base: 220X180(H)mm, Arm Length: 220+220mm, Action Radius: 610mm (Largest) | |
| Weight | 33Kg | |
| ROBOT Controller (ED-MK4) | | |
| Functions | Providing 8 ports for an encoded motor to optically drive ED-XR4, ED-7270 Robot, ED-SCR Robot and Accessories | |
| Input Terminal | 8 Port and LED | |
| InputSwitch | 8Port ToggleSwitch | |
| Output Terminal | 8 Port and LED | |
| Processor | 16 bit Processor, 8 bit Motor Controller, 8 bit Teach pendant | |
| Software | ED-72C Robot Talk (The inside instructions internal organs over 100) | |
| Dimension | 385(W)x150(H)x460(D)mm | |
| Weigth | 14.3Kg | |

Robot Environment



Control Panel of Teaching Loader

- IBM Computer
- Falt Cable: 6ea
- Dust Cover: 1ea
- RS-232C Cable: 2ea
- AC Power Cord: 1 ea
- Loader LD-7220-2C
- Operation manual



Technical Overview

USB Data Acquisition Boards



Quanser's ground-breaking USB data acquisition technology delivers reliable real-time performance via USB interface. Q2-USB and Q8-USB are combined with a terminal board for easy and quick access to signals. They include an extensive range of hardware features and software support capabilities and are compatible with both MATLAB® and LabVIEW™.

With low I/O conversion times and easy connectivity, the Q2-USB and Q8-USB are ideal for teaching controls concepts as the user can achieve up to a 2 kHz close-loop control rate. This control rate is superior to any other commercially available USB-DAQ technology.

When combined with a Quanser Power Amplifier (see pages 12 and 14) and QUARC® control design software, the Q2-USB or Q8-USB provides a convenient rapid prototyping and Hardware-In-The-Loop (HIL) development environment. With the wide range of inputs and outputs, you can easily connect and control a variety of devices instrumented with analog and digital sensors, including encoders – all with one board. The Q2-USB and Q8-USB are supported by the Quanser HIL SDK, which provides APIs for C, C++, ActiveX, .NET, LabVIEW™ and MATLAB®.

Request a free 30-day demo license of QUARC control design software. Visit www.quanser.com/QUARC

System Specifications: Q8-USB and Q2-usb

Features

- Optimized for real-time control performance with QUARC or custom code
- USB 2.0 Hi-Speed Interface
- Combined with quick-connect terminal board
- Robust metal terminal board case
- Multiple OS compatibility: Windows® XP, Windows® Vista, Windows® 7
- 1X encoder velocities are provided in Q8-USB
- Multiple Q8-USB or Q2-USB can be used simultaneously
- Interrupt support is provided in Q8-USB for the encoder index pulses, external interrupt and external convert lines

System Requirements

Q2-USB

- Type A USB 2.0 connector
(USB 2.0 driver is required)

Q8-USB

- Type A USB 2.0 connector
(USB 2.0 driver is required)

Dimensions

Q2-USB

0.085 x 0.102 x 0.018 m

Q8-USB

0.228 x 0.168 x 0.26 m

I/O Summary

Q2-USB

- 2 ADCs
- 2 DACs
- 2 encoder inputs with full-quadrature positions
- 2 PWM
- 8 configurable DIO

Q8-USB

- 8 ADCs
- 8 DACs
- 8 encoder inputs with 4X quadrature position and 1X quadrature velocities
- 8 PWM
- 8 digital input
- 8 digital output

ANALOG INPUTS

Number of Channels

Q2-USB

Q8-USB

Resolution

2

8

Input Range

12-bit

16-bit

Conversion Time

± 10 V

± 5 V, ± 10 V

Input Impedance

250 ns[†]

4 us[†]

Max Full Scale Range (FSR) Error

10 M Ω

1 M Ω

Number of Channels

± 10 LSB

± 12 LSB, ± 6 LSB

ANALOG OUTPUTS

Number of Channels

Q2-USB

Q8-USB

Resolution

2

8

Output Range

12-bit

16-bit

SlewRate

± 10 V

± 10.8 V, ± 10 V,

Conversion Time

3.5 V / μ s

± 5 V, 10.8 V

DC Output Impedance

10 μ s[†]

10 V, 5 V.

Short-circuitCurrentClamp

0.5 Ω

3.5 V / μ s

Max Capacitive Load Stability

20 mA

10 μ s[†]

Non-linearity

4000 pF

0.5 Ω

Max Full Scale Range (FSR) Error

± 1 LSB

20 mA

Max Load for Specified Performance

± 12 LSB

4000 pF

Number of Encoder Inputs

2 k Ω

± 1 LSB

Input Low

2 k Ω

± 65 LSB

Input High

0.66 V

2 k Ω

Input LeakageCurrent

2.31 V

0.66 V

Max. A and B Frequency in Quadrature

± 2 μ A

3.50 V

Max. Count Frequency in 4X Quadrature

6 MHz

± 2 μ A

EncoderVelocities

10 MHz

24.883 MHz

Number of Encoder Inputs

N/A

99.532 MHz

Input Low

1.50 V

Input High

99.532 MHz

Input LeakageCurrent

3.50 V

Max. A and B Frequency in Quadrature

± 2 μ A

99.532 MHz

Max. Count Frequency in 4X Quadrature

10 MHz

EncoderVelocities

N/A

99.532 MHz

ANEXO 2. Tarjeta de adquisición de datos QUANSER INNOVATE EDUCATE Q8-USB

DIGITAL INPUT

| | Q2-USB | Q8-USB |
|----------------------|--------|--------|
| Number of Lines | 8 | 8 |
| Input Low | 0.66 V | 1.50 V |
| Input High | 2.31 V | 3.50 V |
| Input LeakageCurrent | ± 2 µA | ± 2 µA |

DIGITAL OUTPUT

| | Q2-USB | Q8-USB |
|-----------------|--------|--------|
| Number of Lines | 8 | 8 |
| Input Low | 0.40 V | 0.55 V |
| Input High | 2.40 V | 4.50 V |

PWM OUTPUT

| | Q2-USB | Q8-USB |
|-----------------------|----------|------------|
| Number of PWM Outputs | 2† | 8† |
| Output Low (Max) | 0.40 V | 0.55 V |
| Output High (Min) | 2.40 V | 4.50 V |
| Resolution | 16-bit†† | 16-bit†† |
| MinimumFrequency | 2.385 Hz | 23.7309 Hz |
| MaximumFrequency | 40 MHz | 49.766 MHz |

† Shared with the digital outputs
†† This is dependent on the frequency selected for the PWM

SOFTWARE SUPPORT

| | Q2-USB | Q8-USB |
|-----------------------|---|---|
| Target Support | <ul style="list-style-type: none"> • Quanser QUARC® for Windows® • National Instruments LabVIEW™ | <ul style="list-style-type: none"> • Quanser QUARC® for Windows® • National Instruments LabVIEW™ |
| OS Drivers | <ul style="list-style-type: none"> • Microsoft Windows® XP • Windows® Vista • Windows® 7 | <ul style="list-style-type: none"> • Microsoft Windows® XP • Windows® Vista • Windows® 7 |
| API | <ul style="list-style-type: none"> • C • C++ • ActiveX • .NET (VB, C#, C++ and others) • LabVIEW™ • MATLAB® | <ul style="list-style-type: none"> • C • C++ • ActiveX • .NET (VB, C#, C++ and others) • LabVIEW™ • MATLAB® |

ANEXO 3. Hoja de especificación del amplificador operacional MC1436



Order this document by MC1436/D

MC1436, C

High Voltage, Internally Compensated Operational Amplifiers

The MC1436, C was designed for use as a summing amplifier, integrator, or amplifier with operating characteristics as a function of the external feedback components.

- Output Voltage Swing:
±22 V_{pk(min)} (V_{CC} = +28 V, V_{EE} = -28 V)
- Fast Slew Rate: 2.0 V/μs Typ
- Internally Compensated
- Offset Voltage Null Capability
- Input Overvoltage Protection
- AVO_L: 500,000 Typ
- Characteristics Independent of Power Supply Voltages:
(±5.0 Vdc to ±36 Vdc)

OPERATIONAL AMPLIFIERS

SEMICONDUCTOR TECHNICAL DATA



P1 SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 626



D SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 751
(SO-8)

PIN CONNECTIONS

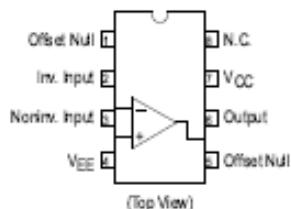


Figure 1. Differential Amplifier with ±20 V Common Mode Input Voltage Range

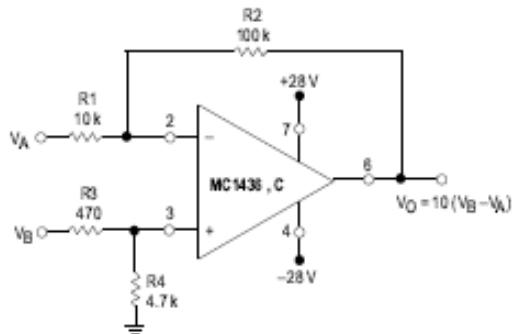
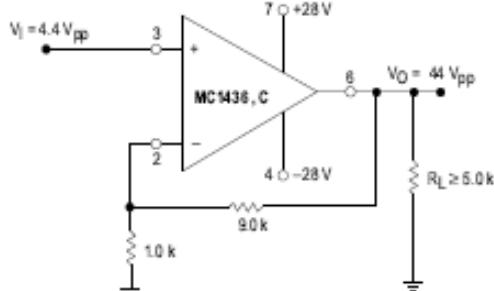


Figure 2. Typical Noninverting X10 Voltage Amplifier



ORDERING INFORMATION

| Device | Operating Temperature Range | Package |
|--------------|------------------------------|-------------|
| MC1436CD,D | T _A = 0° to +70°C | SO-8 |
| MC1436CP1,P1 | | Plastic DIP |

ANEXO 3. Hoja de especificación del amplificador operacional MC1436

MC1436, C

MAXIMUM RATINGS ($T_A = +25^\circ\text{C}$, unless otherwise noted.)

| Rating | Symbol | MC1436 | MC1436C | Unit |
|--|----------------------|-------------|----------------------------|------|
| Power Supply Voltage | V_{CC} V_{EE} | +34 -34 | +30 -30 | Vdc |
| Input Differential Voltage Range | V_{IDR} | Note 2 | | V |
| Input Common Mode Voltage Range | V_{ICR} | Note 2 | | V |
| Output Short Circuit Duration ($V_{CC} = V_{EE} = 28$ Vdc, $V_O = 0$) | I_{SC} | 5.0 | | sec |
| Power Dissipation (Package Limitation) Derate above $T_A = +25^\circ\text{C}$ | P_D | 680 4.6 | mW mW/ $^\circ\text{C}$ | |
| Operating Ambient Temperature Range | T_A | 0 to +70 | $^\circ\text{C}$ | |
| Storage Temperature Range | T_{stg} | -65 to +150 | $^\circ\text{C}$ | |

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($V_{CC} = +28$ V, $V_{EE} = -28$ V, $T_A = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise noted.)

| Characteristic | Symbol | MC1436 | | | MC1436C | | | Unit |
|--|----------------|-----------------------|-------------------------|---------------|------------------|-------------------------|--------------|------------------|
| | | Min | Typ | Max | Min | Typ | Max | |
| Input Bias Current $T_A = +25^\circ\text{C}$ $T_A = T_{low}$ to T_{high} (See Note 1) | I_B | — — | 15 — | 40 55 | — — | 25 — | 90 — | nA/dc |
| Input Offset Current $T_A = +25^\circ\text{C}$ $T_A = +25^\circ\text{C}$ to T_{high} $T_A = T_{low}$ to $+25^\circ\text{C}$ | I_O | — — — | 5.0 — 14 | 10 — 14 | — — — | 10 — — | 25 — — | nA/dc |
| Input Offset Voltage $T_A = +25^\circ\text{C}$ $T_A = T_{low}$ to T_{high} | V_{IO} | — — | 5.0 — | 10 14 | — — | 5.0 — | 12 — | mVdc |
| Differential Input Impedance (Open loop, $f \leq 5.0$ Hz) Parallel Input Resistance Parallel Input Capacitance | r_p C_p | — — | 10 2.0 | — — | — — | 10 2.0 | — — | MΩ pF |
| Common Mode Input Impedance ($f \leq 5.0$ Hz) | Z_{IC} | — | 250 | — | — | 250 | — | MΩ |
| Input Common Mode Voltage Range | V_{ICR} | ± 22 | ± 25 | — | ± 18 | ± 20 | — | Vpk |
| Equivalent Input Noise Voltage ($A_V = 100$, $R_L = 10$ kΩ, $f = 1.0$ kHz, BW = 1.0 Hz) | a_n | — | 60 | — | — | 60 | — | nV/(Hz) $^{1/2}$ |
| Common Mode Rejection (DC) | CMR | 70 | 110 | — | 50 | 90 | — | dB |
| Large Signal DC Open Loop Voltage Gain ($V_O = \pm 10$ V, $R_L = 100$ kΩ) $T_A = +25^\circ\text{C}$ $T_A = T_{low}$ to T_{high} ($V_O = \pm 10$ V, $R_L = 10$ kΩ, $T_A = +25^\circ\text{C}$) | A_{VOL} | 70,000 50,000 — | 500,000 — 200,000 | — — — | 50,000 — — | 500,000 — 200,000 | — — — | V/V |
| Power Bandwidth (Voltage Follower) ($A_V = 1$, $R_L = 5.0$ kΩ, THD $\leq 5\%$, $V_O = 40$ Vpp) | BWP | — | 23 | — | — | 23 | — | kHz |
| Unity Gain Crossover Frequency (Open loop) | f_C | — | 1.0 | — | — | 1.0 | — | MHz |
| Phase Margin (Open loop, Unity Gain) | ϕ_m | — | 50 | — | — | 50 | — | Degrees |
| Gain Margin | A_M | — | 18 | — | — | 18 | — | dB |
| Slew Rate (Unity Gain) | SR | — | 2.0 | — | — | 2.0 | — | V/μs |
| Output Impedance ($f \leq 5.0$ Hz) | Z_O | — | 1.0 | — | — | 1.0 | — | kΩ |
| Short Circuit Output Current | I_{SC} | — | ± 17 | — | — | ± 19 | — | mA/dc |

NOTES: 1. $T_{low} = 0^\circ\text{C}$ for MC1436, C $T_{high} = +70^\circ\text{C}$ for MC1436C.

2. Either or both input voltages must not exceed the magnitude of V_{CC} or $V_{EE} + 3.0$ V.

ANEXO 3. Hoja de especificación del amplificador operacional MC1436

MC1436, C

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($V_{CC} = +28$ V, $V_{EE} = -28$ V, $T_A = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise noted.)

| Characteristic | Symbol | MC1436 | | | MC1436C | | | Unit |
|--|----------------------|---------------|---------------|------------|---------------|---------------|------------|-----------------|
| | | Min | Typ | Max | Min | Typ | Max | |
| Output Voltage Range ($R_L = 5.0 \text{ k}\Omega$) $V_{CC} = +28 \text{ Vdc}$, $V_{EE} = -28 \text{ Vdc}$ $V_{CC} = +36 \text{ Vdc}$, $V_{EE} = -36 \text{ Vdc}$ | V_O | ± 20 — | ± 22 — | — — | ± 20 — | ± 22 — | — — | V_{pk} |
| Power Supply Rejection $V_{EE} = \text{Constant}$, $R_S \leq 10 \text{ k}\Omega$ $V_{CC} = \text{Constant}$, $R_S \leq 10 \text{ k}\Omega$ | PSR + PSR — | — — | 35 35 | 200 200 | — — | 50 50 | — — | $\mu\text{V/V}$ |
| Power Supply Current (See Note 2) I_{CC} I_{EE} | I_{CC} I_{EE} | — — | 2.8 2.8 | 5.0 5.0 | — — | 2.8 2.8 | 5.0 5.0 | mA/dc |
| DC Quiescent Power Consumption ($V_O = 0$) | P_C | — | 146 | 280 | — | 146 | 280 | mW |

NOTES: 2. $V_{CC} = V_{EE} = 5.0 \text{ Vdc}$ to 30 Vdc for MC1436
 $V_{CC} = V_{EE} = 5.0 \text{ Vdc}$ to 28 Vdc for MC1436C

MJ15003 (NPN), MJ15004 (PNP)

Complementary Silicon Power Transistors

The MJ15003 and MJ15004 are power transistors designed for high power audio, disk head positioners and other linear applications.

Features

- High Safe Operating Area
- For Low Distortion Complementary Designs
- High DC Current Gain
- These Devices are Pb-Free and are RoHS Compliant*

MAXIMUM RATINGS

| Rating | Symbol | Value | Unit |
|---|---------------|-------------|--------------------------|
| Collector-Emitter Voltage | V_{CEO} | 140 | Vdc |
| Collector-Base Voltage | V_{CBO} | 140 | Vdc |
| Emitter-Base Voltage | V_{EBO} | 5 | Vdc |
| Collector Current - Continuous | I_C | 20 | Adc |
| Base Current - Continuous | I_B | 5 | Adc |
| Emitter Current - Continuous | I_E | 25 | Adc |
| Total Power Dissipation @ $T_C = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C | P_D | 250 1.43 | W W/ $^\circ\text{C}$ |
| Operating and Storage Junction Temperature Range | T_J, T_{Sg} | -65 to +200 | $^\circ\text{C}$ |

Stresses exceeding Maximum Ratings may damage the device. Maximum Ratings are stress ratings only. Functional operation above the Recommended Operating Conditions is not implied. Extended exposure to stresses above the Recommended Operating Conditions may affect device reliability.

THERMAL CHARACTERISTICS

| Characteristic | Symbol | Max | Unit |
|---|----------|------|--------------------|
| Thermal Resistance, Junction-to-Case | R_{JC} | 0.70 | $^\circ\text{C/W}$ |
| Maximum Lead Temperature for Soldering Purposes 1/16" from Case for ≤ 10 secs | T_L | 265 | $^\circ\text{C}$ |

*For additional information on our Pb-Free strategy and soldering details, please download the ON Semiconductor Soldering and Mounting Techniques Reference Manual, SOLDERRMD.

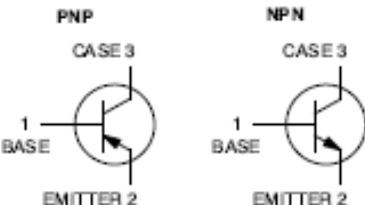


ON Semiconductor®

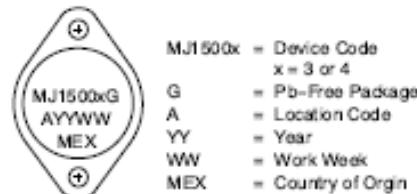
<http://onsemi.com>

20 AMPERE POWER TRANSISTORS COMPLEMENTARY SILICON 140 VOLTS, 250 WATTS

SCHEMATIC



MARKING DIAGRAM



ORDERING INFORMATION

| Device | Package | Shipping |
|----------|-----------------------|----------------|
| MJ15003G | TO-204AA (Pb-Free) | 100 Units/Tray |
| MJ15004G | TO-204AA (Pb-Free) | 100 Units/Tray |

ANEXO 4. Hoja de especificación del transistor MJ15003 (NPN) y MJ15004 (PNP)

MJ15003 (NPN), MJ15004 (PNP)

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_C = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

| Characteristic | Symbol | Min | Max | Unit |
|---|------------------------|------------|----------|--|
| OFF CHARACTERISTICS | | | | |
| Collector Emitter Sustaining Voltage (Note 1) ($I_C = 200 \text{ mA}_\text{dc}, I_B = 0$) | $V_{CEO(\mu\text{A})}$ | 140 | — | V_dc |
| Collector Cutoff Current ($V_{CE} = 140 \text{ V}_\text{dc}, V_{BE(\mu\text{A})} = 1.5 \text{ V}_\text{dc}$) ($V_{CE} = 140 \text{ V}_\text{dc}, V_{BE(\mu\text{A})} = 1.5 \text{ V}_\text{dc}, T_C = 150^\circ\text{C}$) | I_{CE0} | — | 100 2 | μA_dc mA_dc |
| Collector Cutoff Current ($V_{CE} = 140 \text{ V}_\text{dc}, I_B = 0$) | I_{CEO} | — | 250 | μA_dc |
| Emitter Cutoff Current ($V_{EB} = 5 \text{ V}_\text{dc}, I_C = 0$) | I_{EBO} | — | 100 | μA_dc |
| SECOND BREAKDOWN | | | | |
| Second Breakdown Collector Current with Base Forward Biased ($V_{CE} = 50 \text{ V}_\text{dc}, t = 1 \text{ s}$ (non repetitive)) ($V_{CE} = 100 \text{ V}_\text{dc}, t = 1 \text{ s}$ (non repetitive)) | I_{SB} | 5.0 1.0 | — | A_dc |
| ON CHARACTERISTICS | | | | |
| DC Current Gain ($I_C = 5 \text{ Adc}, V_{CE} = 2 \text{ V}_\text{dc}$) | h_{FE} | 25 | 150 | — |
| Collector Emitter Saturation Voltage ($I_C = 5 \text{ Adc}, I_B = 0.5 \text{ Adc}$) | $V_{CE(\mu\text{A})}$ | — | 1.0 | V_dc |
| Base Emitter On Voltage ($I_C = 5 \text{ Adc}, V_{CE} = 2 \text{ V}_\text{dc}$) | $V_{BE(\mu\text{A})}$ | — | 2.0 | V_dc |
| DYNAMIC CHARACTERISTICS | | | | |
| Current Gain — Bandwidth Product ($I_C = 0.5 \text{ Adc}, V_{CE} = 10 \text{ V}_\text{dc}, f_{test} = 0.5 \text{ MHz}$) | f_T | 2.0 | — | MHz |
| Output Capacitance ($V_{CB} = 10 \text{ V}_\text{dc}, I_E = 0, f_{test} = 1 \text{ MHz}$) | C_{ob} | — | 1000 | pF |

1. Pulse Test: Pulse Width = 300 μs , Duty Cycle $\leq 2\%$.

EXPERIMENTO

En las Figuras E.1, E.2 y E.3 se muestran las imágenes de cómo se realizó la calibración de las tres primeras articulaciones brazo robótico académico SMART MAN para colocarlo en su posición inicial.

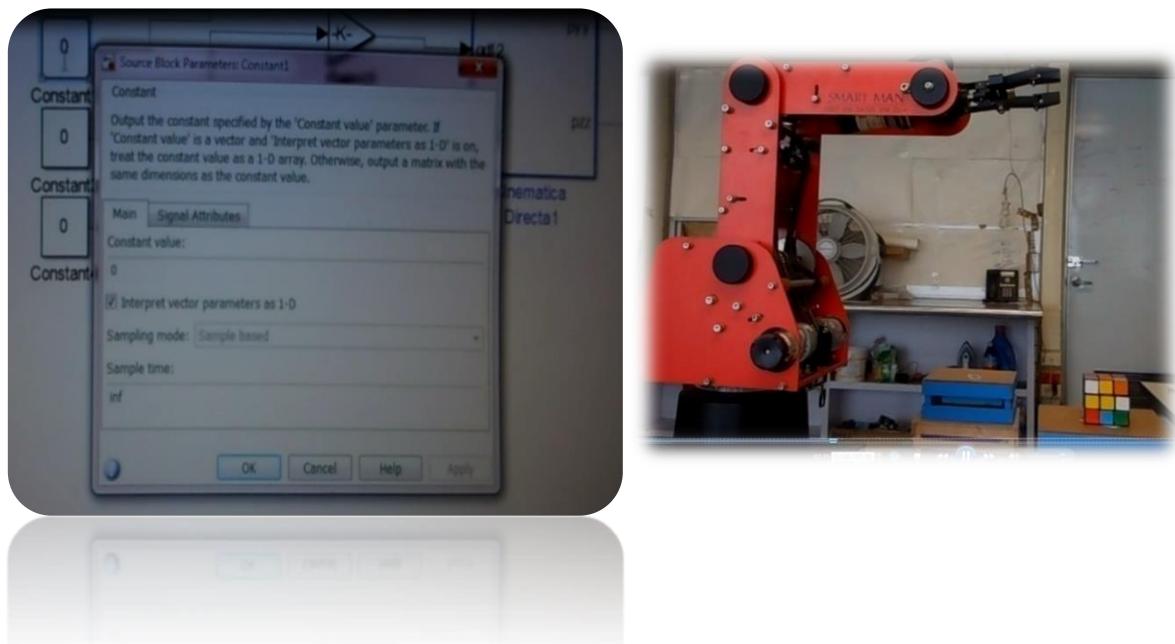


Figura E. 1 Calibración de la primera articulación (Cintura)

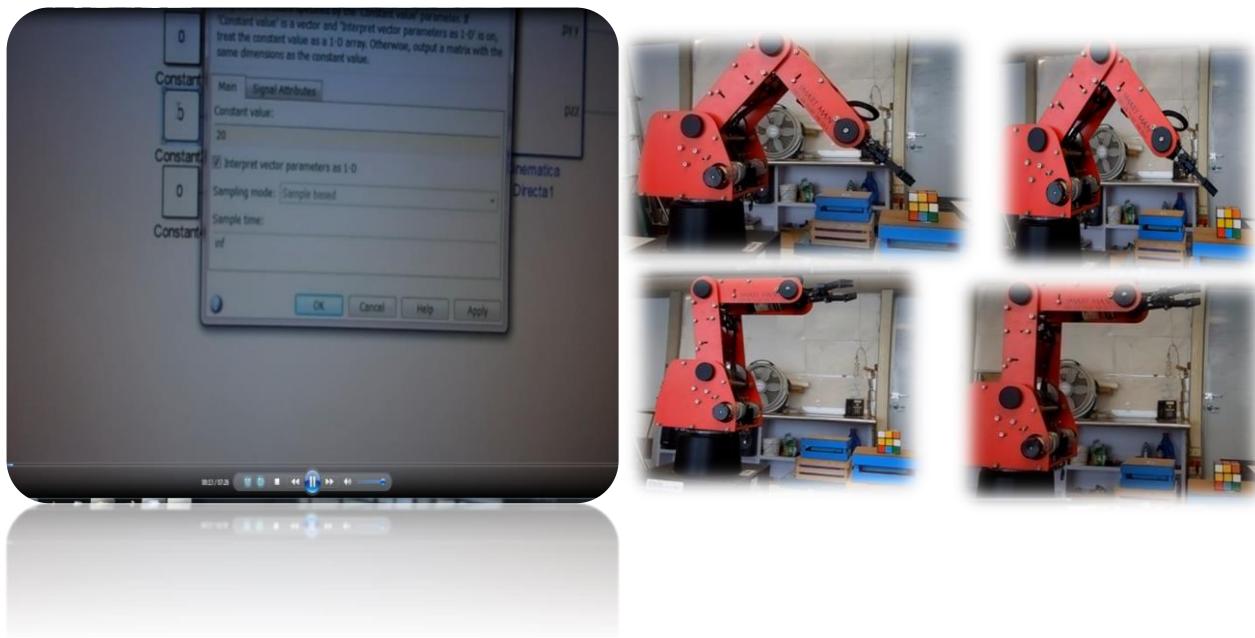


Figura E. 2 Calibración de la segunda articulación (Hombro).

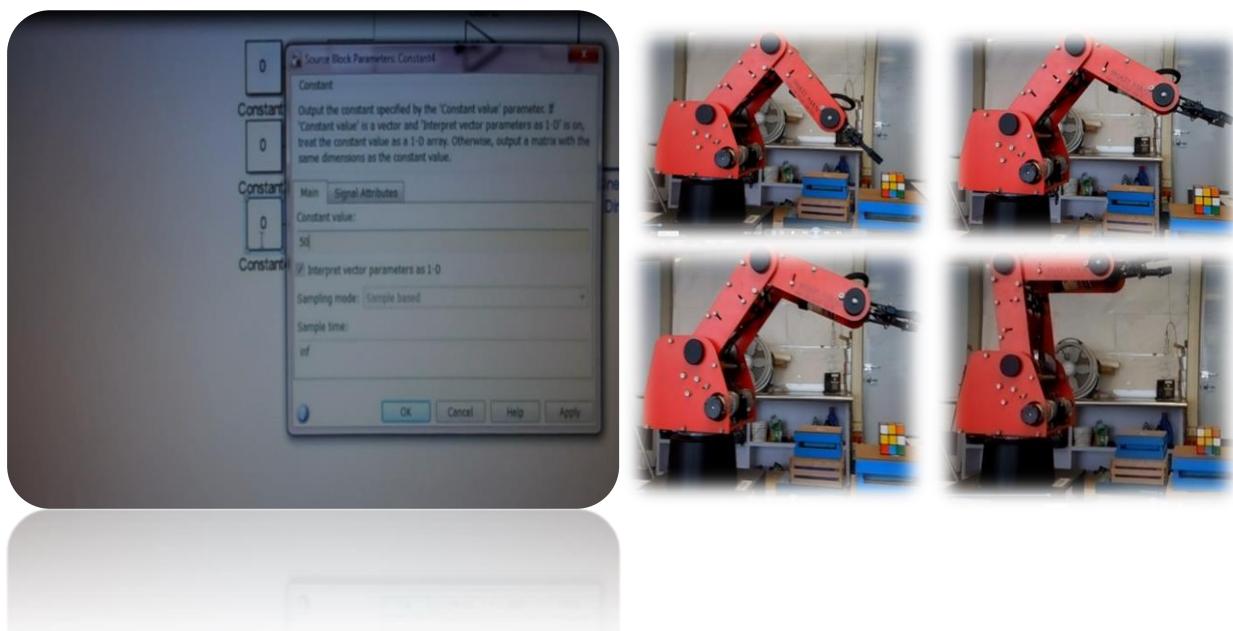


Figura E. 3 Calibración de la tercera articulación (codo)

Posteriormente se dio valores a la coordenada como se muestra en la Figura e.4, para posicionar el brazo robótico académico SMART MAN justo con el gripper cerca del objeto para que lo sujetara y mover el brazo a otra posición.

Las Figuras E.5, E.6, E.7 y E.8 se muestran algunos movimientos que realizo el brazo robótico académico SMART MAN para seguir a la posición deseada.

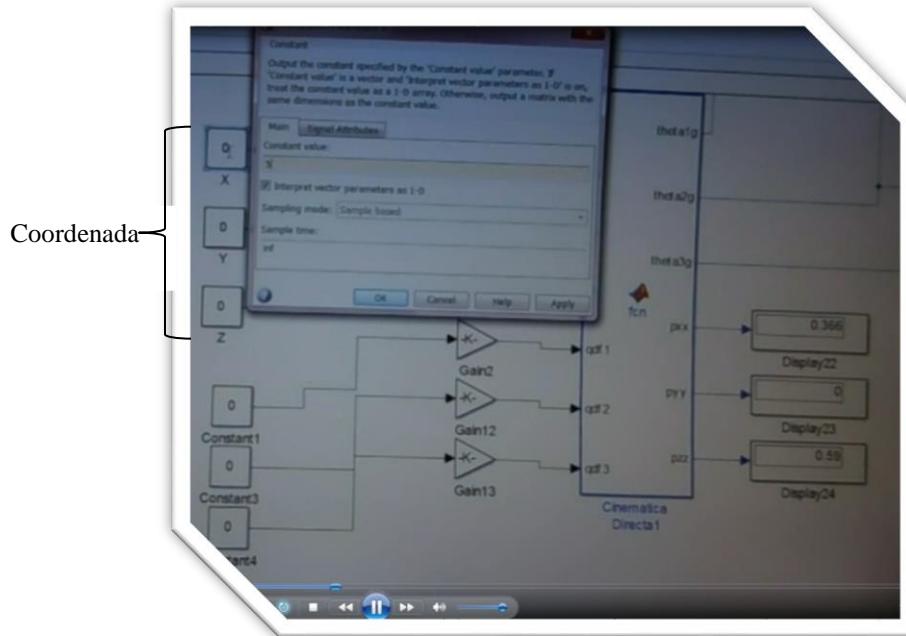


Figura E. 4 Valores de la Coordenada para mover al brazo robótico académico SMART MAN en una posición deseada.



Figura E. 5 Primer movimiento del brazo robótico académico SMART MAN para la primera posición.

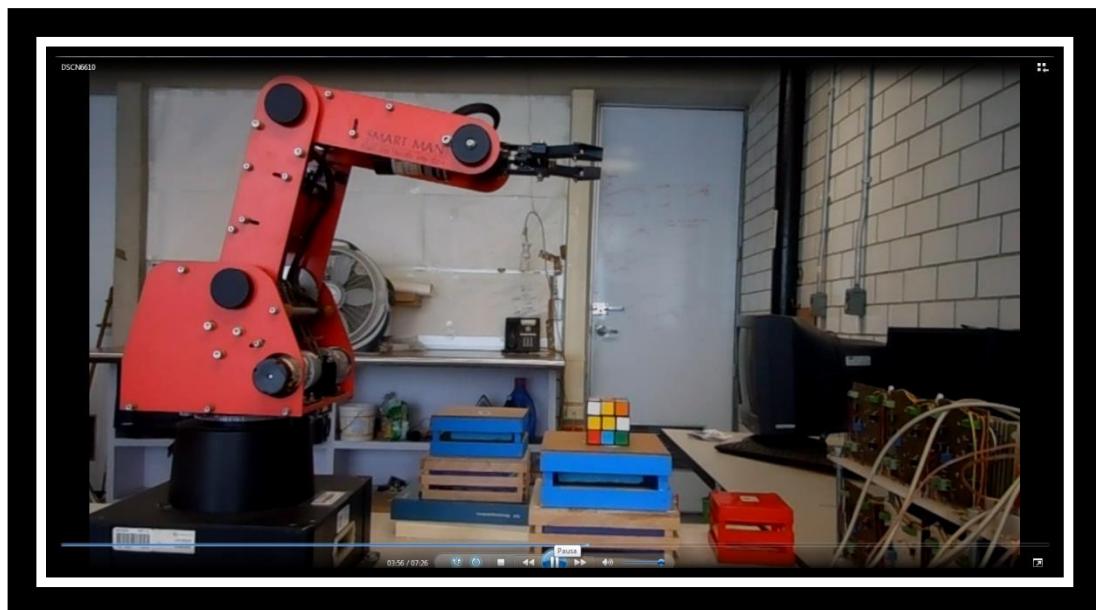


Figura E. 6 Segundo movimiento del brazo robótico académico SMART MAN para la primera posición.

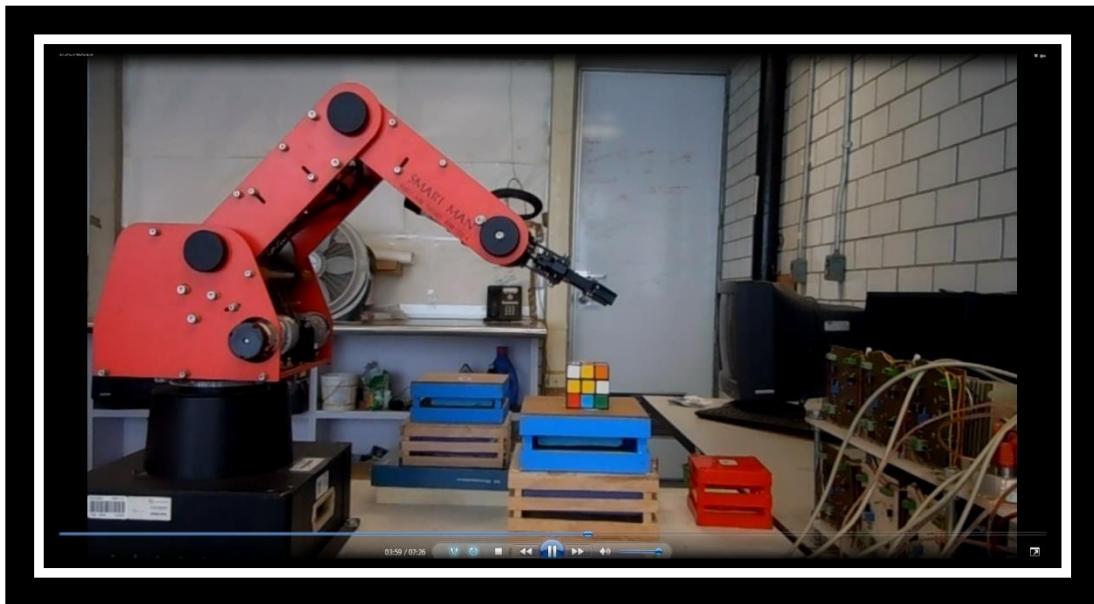


Figura E. 7 Tercer movimiento del brazo robótico académico SMART MAN para la primera posición.

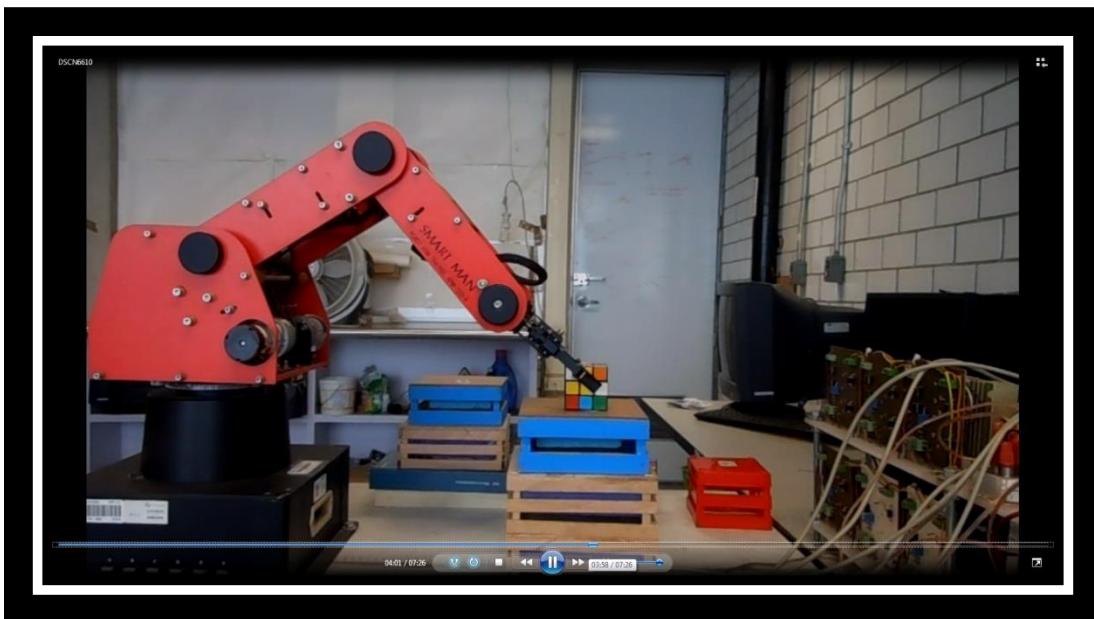


Figura E. 8Cuarto movimiento del brazo robótico Académico SMART MAN para la primera posición.

Ya que llego el brazo robótico académico SMART MAN a la posición deseada y el Gipper tomo el objeto como se muestra en la Figura E.9, se le asignó una nueva coordenada como se observa en la Figura E.10 la cual movió el objeto de un lugar a otro.

Los movimientos que realizo el brazo robótico académico SMART MAN se muestran en las Figuras que se presentan a continuación.

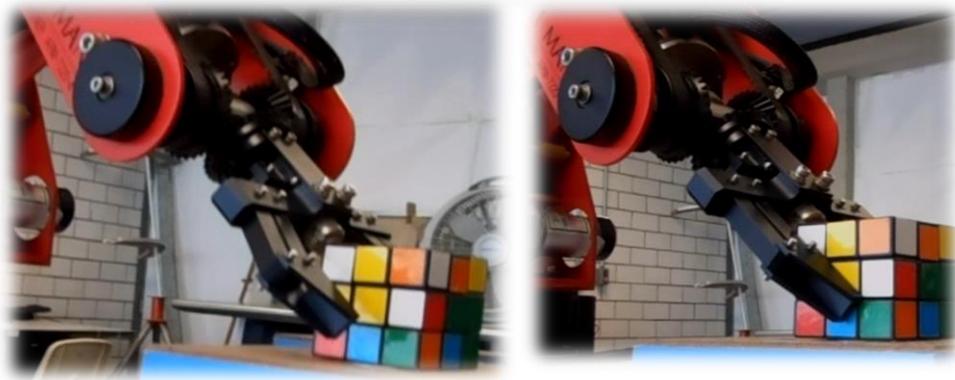
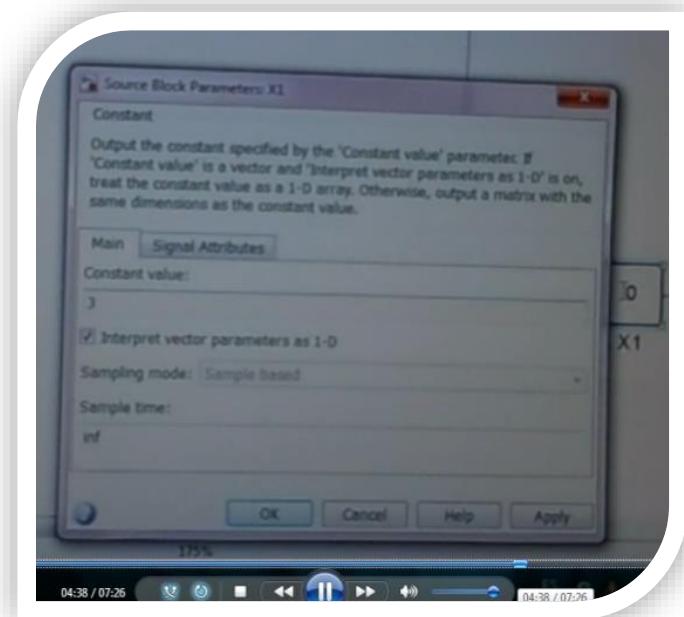


Figura E. 9 Movimiento del Gripper.

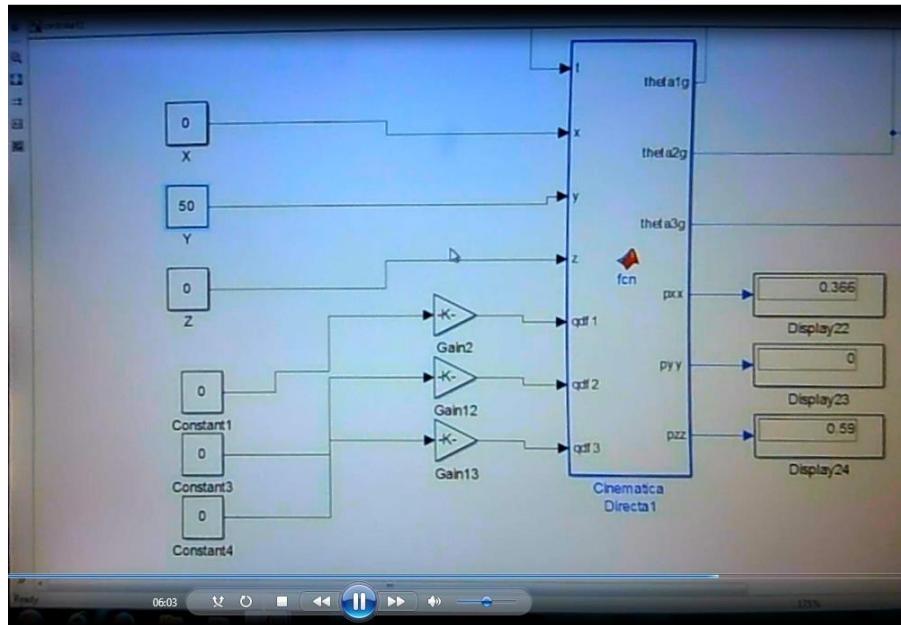


Figura E. 10 Coordenada de la segunda posición.

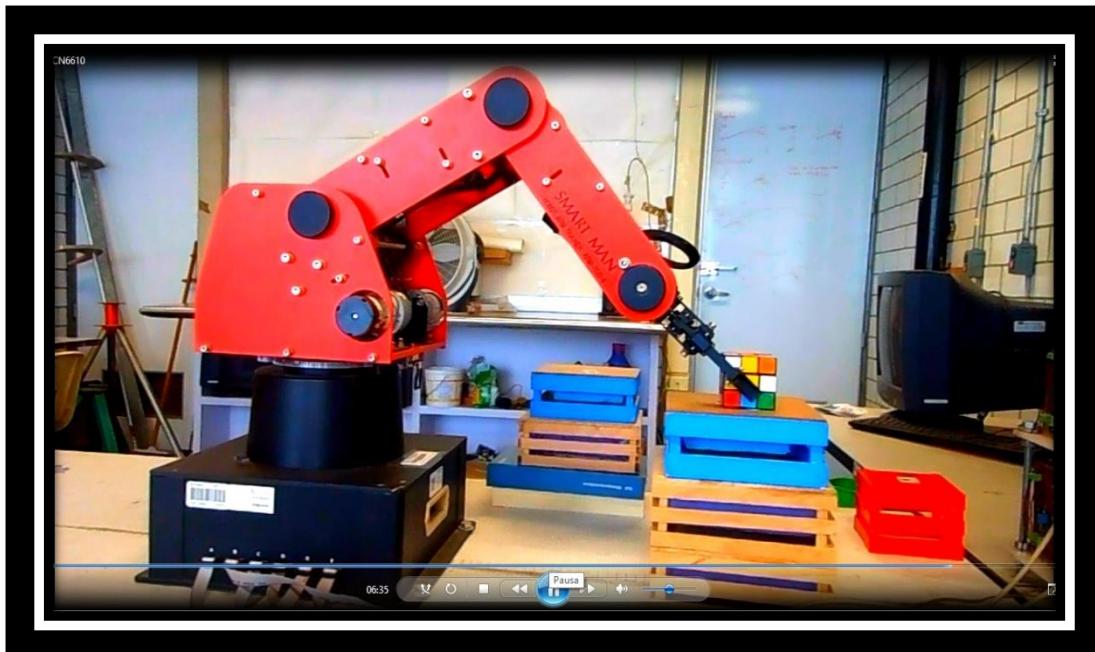


Figura E. 11 Primer movimiento del brazo robótico académico SMART MAN para la segunda posición.

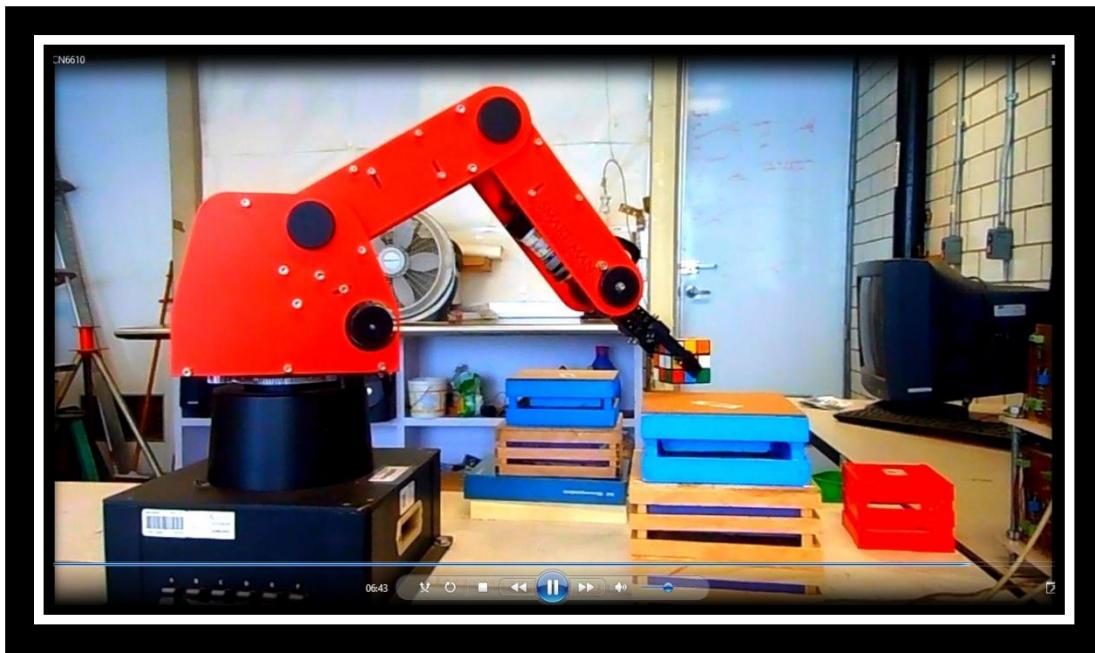


Figura E. 12 Segundo movimiento del brazo robótico académico SMART MAN para la segunda posición.

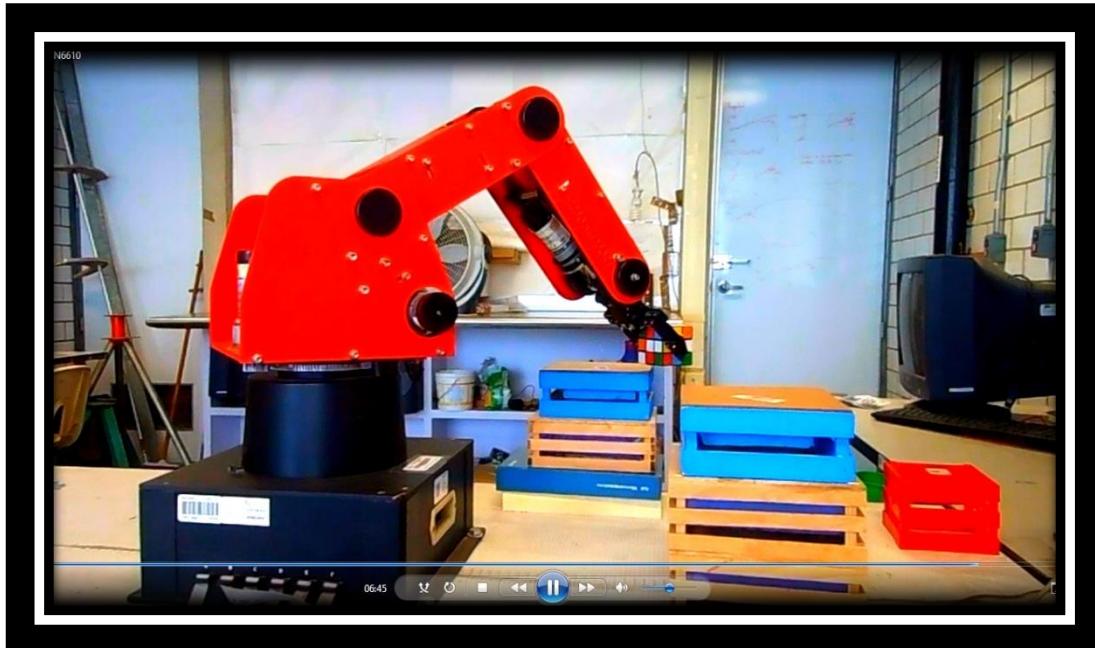


Figura E. 13Tercer movimiento del brazo robótico académico SMART MAN para la segunda posición.

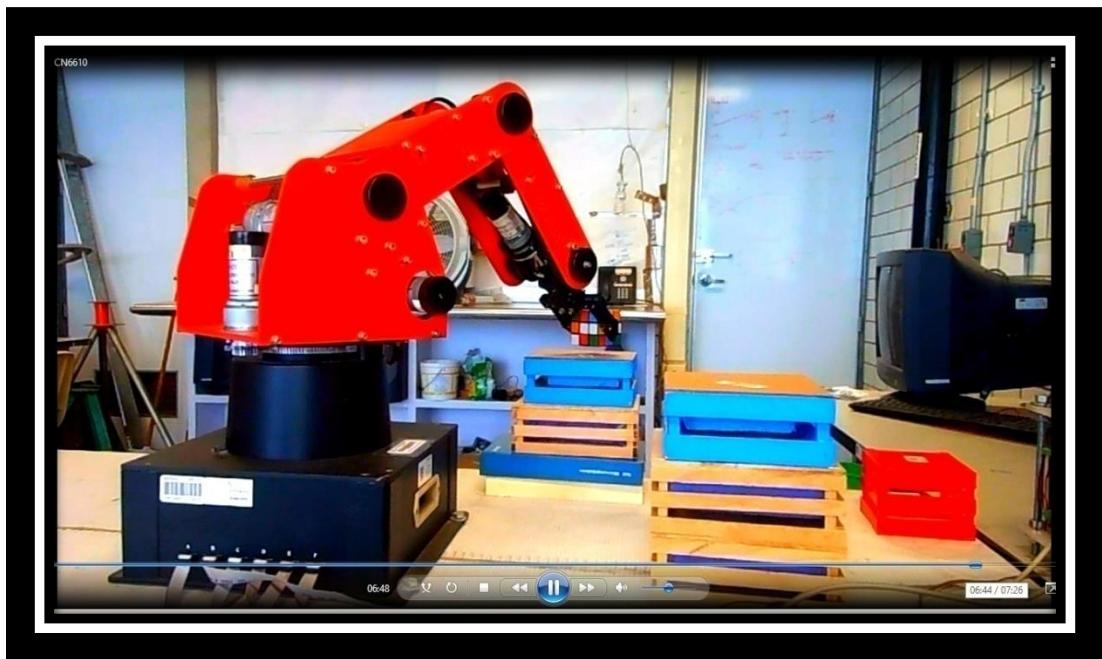


Figura E. 14Cuarto movimiento del brazo robótico académico SMART MAN para la segunda posición.

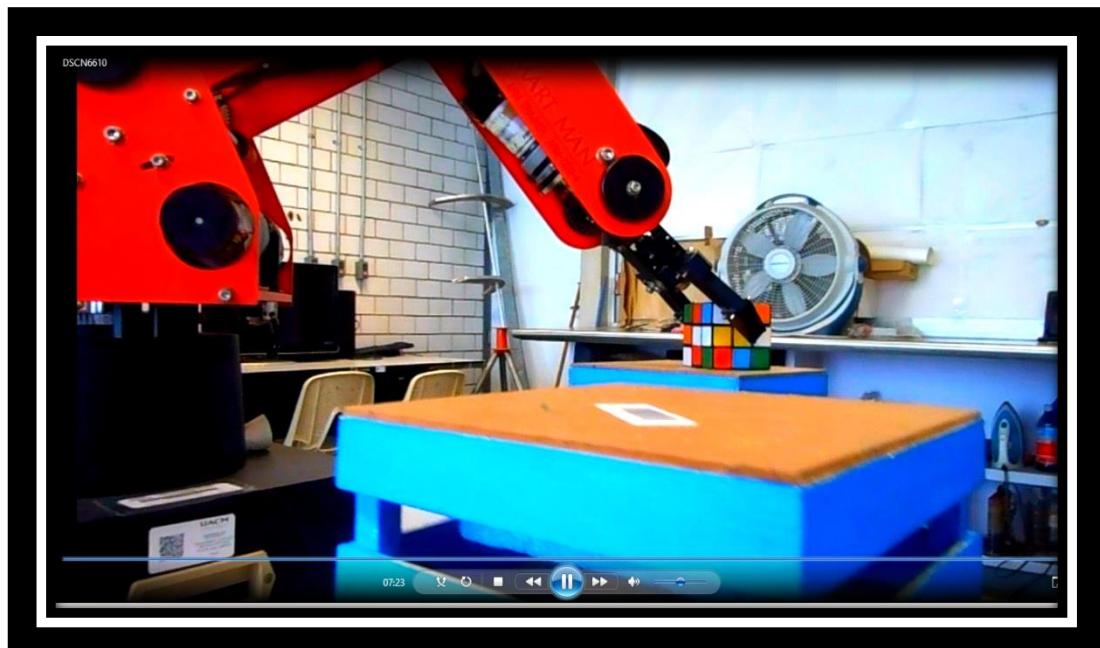


Figura E. 15Quinto movimiento del brazo robótico académico SMART MAN para la segunda posición.