

Diseño propio y Construcción de un Brazo Robótico de 5 GDL

Martínez A. Gloria M., Jáquez O. Sonia A., Rivera M. José y Sandoval R. Rafael.

Resumen.- Los robots de diseño propio son los que se desarrollan con materiales reciclados y son diseños propios de quienes los programa, tiene un bajo costo económico, tanto en adquisición, como en mantenimiento e instalación, normalmente están diseñados para cumplir un solo tipo de aplicaciones; por lo que su arquitectura puede ser cerrada, son veloces para cumplir sus tareas, que normalmente están definidas, su exactitud es muy variable (80-100%), debido a la diversidad de los materiales con que son construidos, su ambiente de programación está limitado a ciertos movimientos y adquisición de datos de sus sensores. Estas ventajas los hace un gran apoyo para desarrollar investigación en sistemas de control de robots manipuladores. Este artículo presenta la metodología del diseño propio, construcción y especificaciones básicas de un robot manipulador, usando como herramienta de diseño el software *SolidWorks®* por su amplia gama de comandos de diseño y análisis dentro de las tecnologías CAD. Con esta metodología se demuestra que el diseño de un robot puede ser de bajo costo y de alto rendimiento obteniendo un diseño y un ensamble del mismo antes de la construcción, a la cual se parte después de tener un resultado satisfactorio del diseño. El robot manipulador usado para demostrar esta metodología cuenta con 5 grados de libertad los cuales son suficientes para un amplio campo de acción en cuanto a sus movimientos; se muestran también las bases teóricas de su modelado cinemático para terminar de cumplir con un diseño versátil, práctico, y con especificaciones bien fundamentadas.

Palabras clave—Robótica, diseño propio, construcción, caracterización.

I. INTRODUCCIÓN

Un brazo manipulador o brazo robótico se puede definir como el conjunto de elementos electromecánicos que propician el movimiento de un elemento terminal (gripper o herramienta) [1,2].

La constitución física de la mayor parte de estos manipuladores guarda cierta similitud con la anatomía de las extremidades superiores del cuerpo humano, por lo que, en ocasiones, para hacer referencia a los distintos elementos que componen al robot, se usan términos como: cintura, hombro,

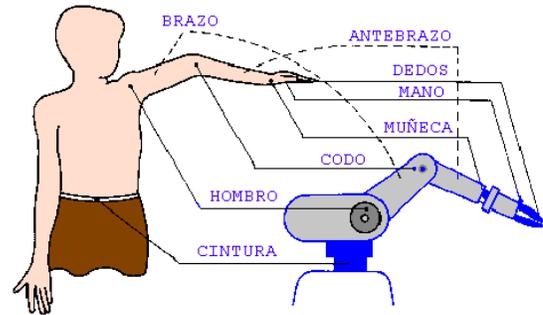


Fig. 1 Similitud brazo robótico con extremidades superiores del cuerpo humano

TABLA I. CLASIFICACIÓN DE ROBOTS MANIPULADOR

Tipo de Robot	Tipo comercial de uso general	Tipo de diseño propio	Tipo y uso industrial
Acceso económico	Accesible costo	Bajo costo	Alto costo
Costo de instalación y mantenimiento	Bajo costo	Bajo costo	Alto costo
Arquitectura abierta	Si	No	No
Velocidad	Lento	Rápido	Muy rápido
Ambiente de programación Robusto	Si	No	No
Exactitud 0-100%	70-100%	80-100%	90-100%
Ejemplos	Legó Mecano	Desarrollados con material reciclado	Puma Scara

brazo, codo, muñeca, etc. Como se muestra en la Figura 1.

Una especificación general de un brazo robótico comprende: sus grados de libertad, su configuración y su cinemática directa e inversa [7,9]. Estas especificaciones son dadas desde el diseño propio de cada robot y su aplicación. Hay una clasificación de robots manipuladores la cual presenta las diferencias de diseño, precisión, precio, etc., esta se puede apreciar en la Tabla I.

Tomando en cuenta que la mayoría del equipo robótico dentro de un área académica y de investigación son de tipo industrial o comercial [3,6,8,9,10], los cuales ya están especificados y caracterizados, además en la literatura revisada son pocos los modelos de robots de diseño propio [12,13,14] en los cuales se basan más a su control que a su modelado, en este artículo se presenta una metodología de diseño propio y construcción de un brazo manipulador de 5 grados de libertad (GDL) basado en la tecnología CAD, al

Manuscrito recibido el 7 de Diciembre de 2007. Este trabajo fue respaldado por la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de Chihuahua.

G. Mónica Martínez A. y Sonia A. Jáquez hasta la fecha se han desempeñado como estudiantes del programa de M. C. en Ing. Electrónica del Instituto Tecnológico de Chihuahua en la División de Estudios de Posgrado e Investigación (DEPI-ITCH); Ave. Tecnológico 2909; Chihuahua, Chih., México; C.P. 31310; Tel: (614) 201-2078, ext. 36; (e-mail gmmartinez@itchihuahua.edu.mx y sjaquez@itchihuahua.edu.mx)

José Rivera M. y Rafael Sandoval R. hasta la fecha se han desempeñado como Profesores Investigadores de la DEPI-ITCH (e-mail jrivera@itchihuahua.edu.mx y rsandoval@itchihuahua.edu.mx)

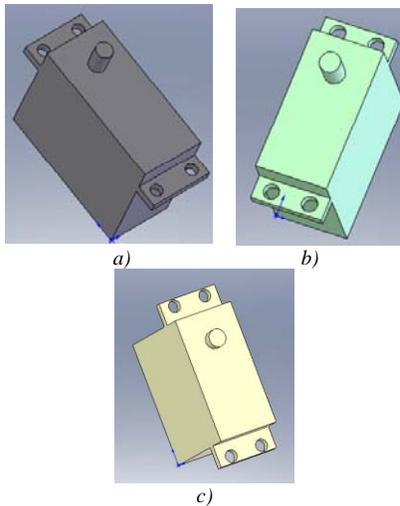


Fig. 2 Servomotores utilizados: a) HS-805BB, b) HS-311 y c) FP-S148.

cual se decidió nombrar SPIDER, mostrando las ventajas dentro de lo económico y lo práctico de tener tecnología propia, mostrando también que su modelado cinemático y sus principales especificaciones se pueden obtener de manera sencilla y están fundamentadas de manera confiable tanto como tecnologías comerciales e industriales, incluyendo como resultados del trabajo de este artículo la simulación de trayectorias utilizando la cinemática obtenida de SPIDER.

En la Sección II se presenta el diseño del brazo manipulador, en la Sección III se aborda la construcción física del robot, la especificación general en la que se incluye la cinemática directa e inversa y simulación de trayectorias, en la Sección IV se presentan conclusiones del trabajo presentado y por último se listan las referencias consultadas.

II. DISEÑO DEL ROBOT

El brazo robótico SPIDER está compuesto de segmentos o miembros interconectados por puntas o articulaciones, cada articulación está compuesta sobre un eje del cual giran dos segmentos, cuyos movimientos son generados por servomotores. Los distintos elementos del brazo son: la base (A), el hombro (B), el brazo (C), codo (D), muñeca (E) y pinza (F).

Se utilizó *SolidWorks*[®] [11] como herramienta de diseño del brazo robótico, así mismo se aprovecharon las ventajas de simulación con las que cuenta este software para evaluar su posible desempeño.

El robot está basado en una configuración de un robot articulado [5] de 5 GDL, cada pieza fue diseñada en *SolidWorks*[®] y al finalizar el modelado de las piezas, se realizó un ensamble virtual para hacer las correcciones y modificaciones que fueran necesarias hasta que arrojaron un resultado satisfactorio.

A. Dimensiones y ensamble.

De forma breve y sencilla se muestra el ensamble y el modelo de las piezas del robot así como de los motores

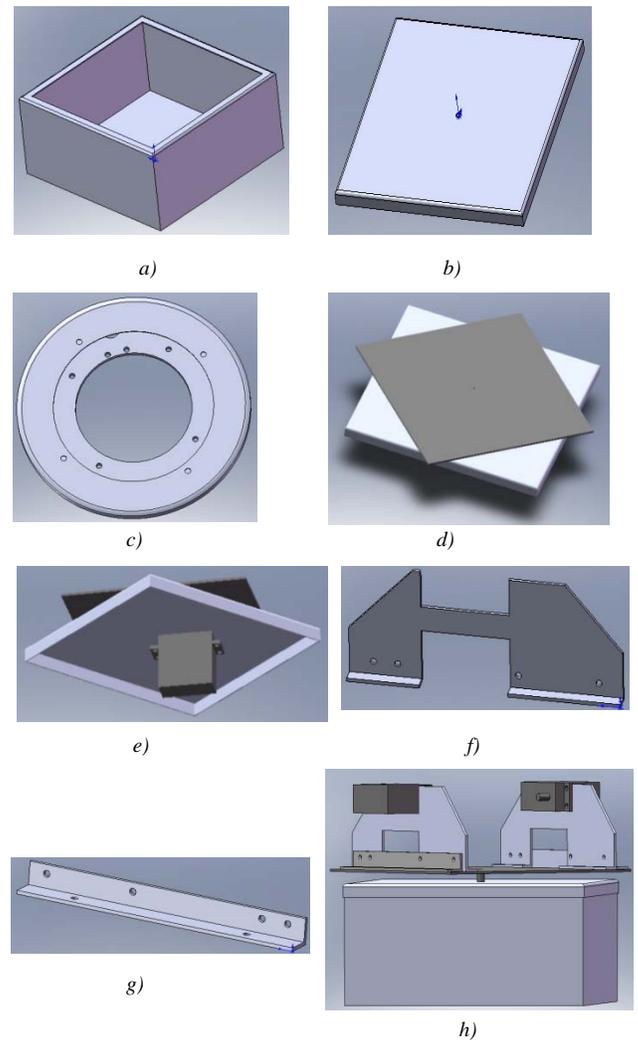


Fig. 3 Ensamble y piezas utilizadas hasta Hombro a) caja de control y soporte base, b) tapa caja, c) anillo de distribución de peso de base, d) ensamble de base con caja soporte vista superior, e) ensamble de base con caja soporte vista inferior, f) soporte motor hombro, g) perfil de soporte, h) ensamble hasta hombro.

utilizados, los servomotores utilizados fueron de 3 tipos siendo el más grande el Hitec[®] HS-805BB (utilizado en base, hombro y codo), seguido del Hitec[®] HS-311 (utilizado en la muñeca y el roll) y por último un Futaba[®] FP-S148 (para la pinza) que se muestran en la Figura 2.

Se empieza el ensamble de abajo hacia arriba de los elementos del brazo el cual se puede apreciar de la Figura 3 a la 8.

Una vez que se completó el ensamble de manera satisfactoria utilizando *SolidWorks*[®] se realizaron varias simulaciones como un análisis de colisiones entre piezas con el cual se definió la envolvente de trabajo de SPIDER, además se realizó un análisis de propiedades físicas de cada pieza (densidad, masa, área de superficie, momentos de inercia, etc.), esto con el fin de tener una clara idea del funcionamiento del diseño al ser construido y así evitar pérdidas de material y tiempo.

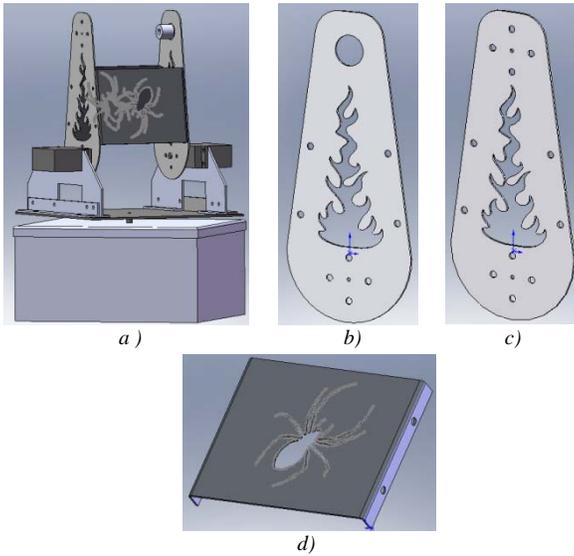


Fig. 4 Ensamble y piezas utilizadas hasta el brazo a) ensamble hasta brazo, b) brazo con buje, c) brazo con motor y d) tapa de brazo.

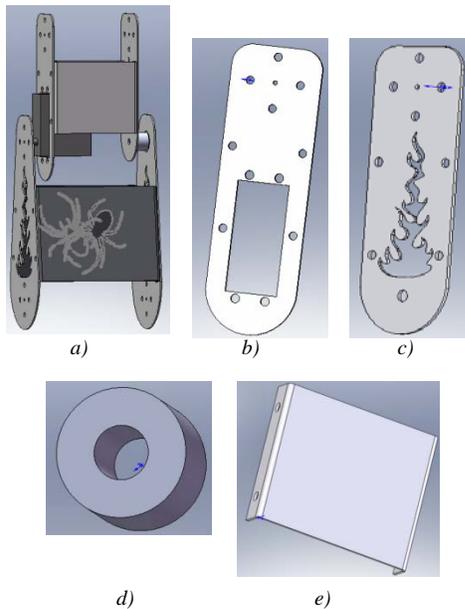


Fig. 5 Ensamble y piezas utilizadas hasta el codo a) ensamble hombro y codo, b) codo con motor, c) codo sin motor, d) buje y e) tapa de codo.

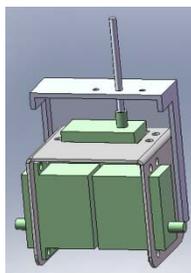


Fig. 6 Ensamble muñeca.

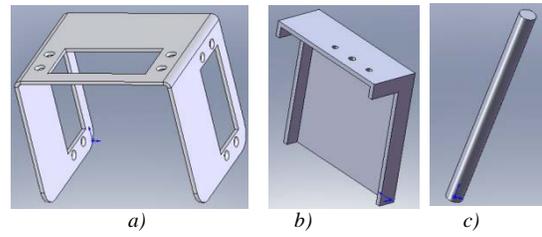


Fig. 7 Piezas utilizadas para la muñeca a) soporte motores muñeca y de pinza, b) tapa muñeca y c) flecha pinza.

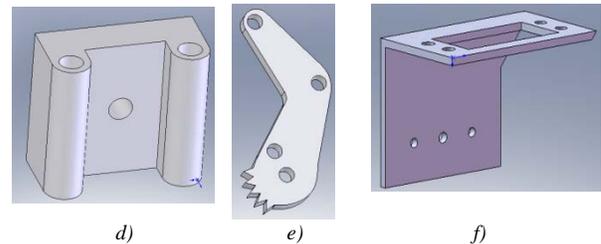
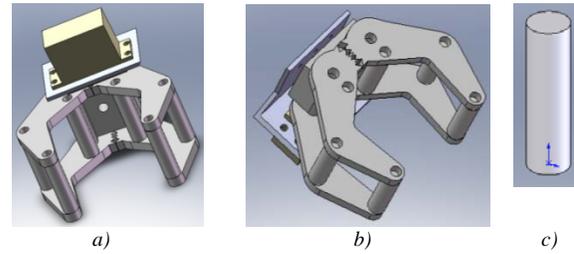


Fig. 8 Ensamble pinza y piezas utilizadas para pinza a) Ensamble pinza vista superior, b) ensamble pinza vista inferior, c) perno separador pinzar, d) base pinza, e) dedo pinza y f) acople motor pinza.

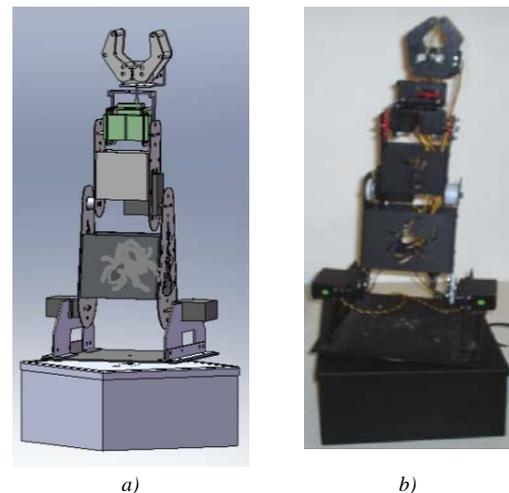


Fig. 9 Comparación entre diseño y construcción de SPIDER a) diseño ensamble virtual vista frontal y b) construcción ensamble real vista frontal.

III. CONSTRUCCIÓN FÍSICA DEL ROBOT

A. Construcción del robot diseñado.

Después del diseño se procedió a la construcción, el material utilizado fue aluminio, por su ligereza y fácil manejo, nos apoyamos de un taller de soldadura con extensa maquinaria (plasma, fresadoras CNC, tornos, taladros,

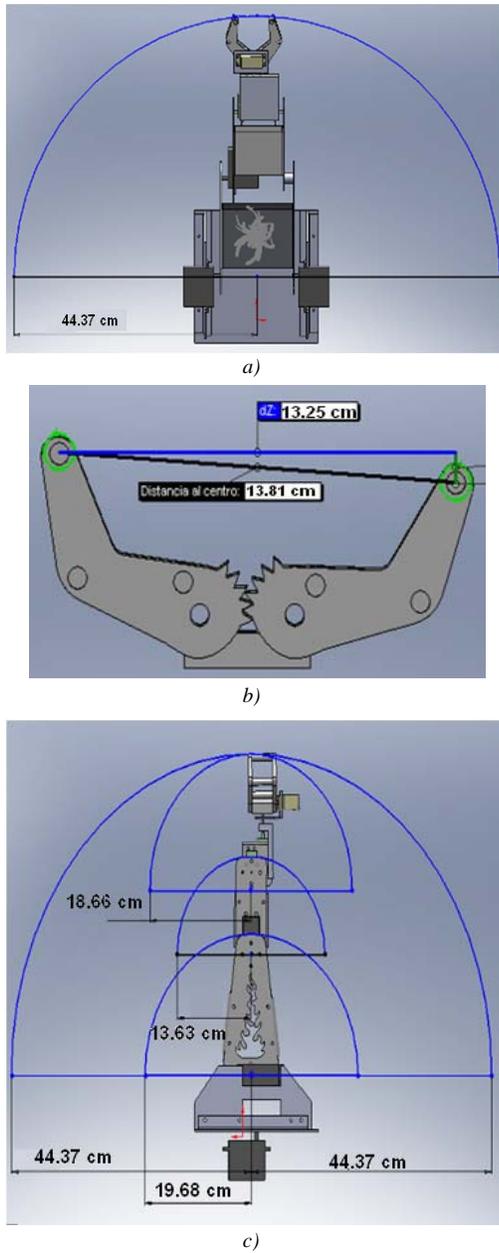


Fig. 10 Dimensiones envolvente de trabajo SPIDER a) envoltura de trabajo vista superior, b) apertura máxima pinza y c) envoltura de trabajo vista lateral.

TABLA II. CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DEL ROBOT

Articulación	A	B	D	E	F
Amplitud (°)	180	180	180	180	90
Rango de Trabajo (°)	± 90	± 90	± 90	+80/-100	± 45
Velocidad Nominal (°/s)	428.5	428.5	428.5	400	400
Resolución Angular (°)	7	7	7	7	7
Resolución Angular (°)	1	1	1	1	1

dobladoras, máquinas de soldar, etc.) para poder llevar a cabo la fabricación acorde al diseño de las piezas, en la Figura 9 se puede comparar el ensamble virtual del diseño con el resultado obtenido de la construcción.

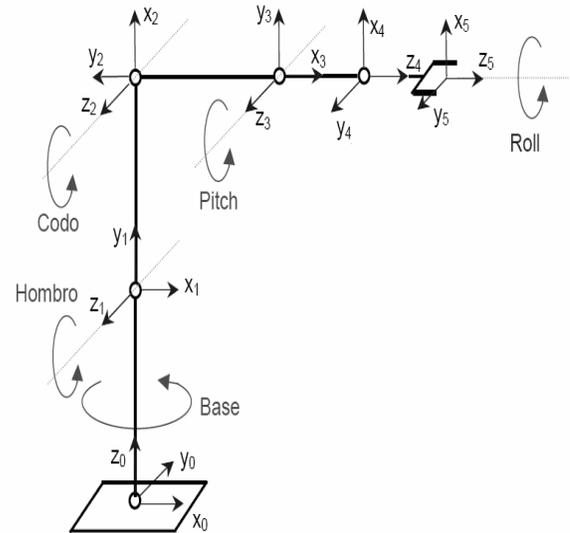


Fig. 11 Asignación de Ejes.

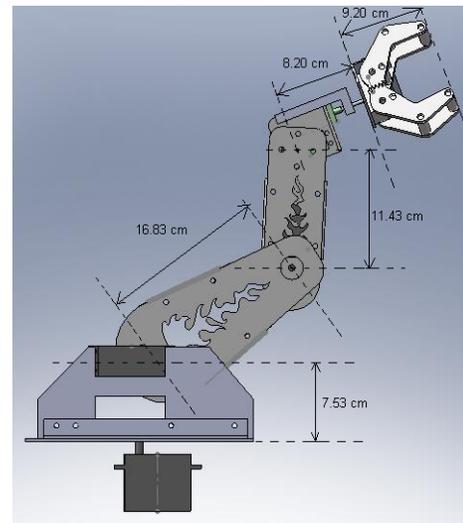


Fig. 12 Medidas entre articulaciones. (Medidas en centímetros).

B. Características Técnicas.

Terminado el diseño y la construcción se realizó un análisis de sus principales características para determinar su peso, el cual es de 4kg, amplitud, velocidad y resolución, los resultados se muestran en la Tabla II. La envoltura de trabajo se muestra en la Figura 10.

C. Cinemática Directa

Después de tener establecido un modelo y sus especificaciones se puede proceder a obtener su cinemática para completar con esta su modelado.

Para el cálculo de la matriz de transformación de la cinemática directa del robot se asignaron los siguientes ejes a cada articulación; los cuales se asignaron siguiendo el algoritmo D-H [7, 9]. Como se puede apreciar en la Figura 11.

Considerando las medidas de las articulaciones que se pueden ver en la Figura 12 y la asignación de ejes se

TABLA III.
PARÁMETROS D-H DEL ROBOT

Articulación	e	d	a	a
1	θ_1	7.53	90°	0
2	θ_2	0	0°	16.83
3	θ_3	0	0°	11.43
4	θ_4	8.20	90°	0
5	θ_5	9.20	0°	0

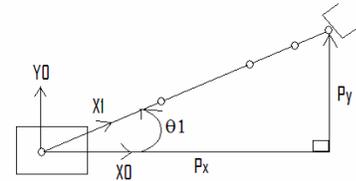


Fig. 13 Diagrama superior solución Codo Arriba.

procedió a llenar la tabla de parámetros del robot (Tabla III) para el cálculo de la cinemática directa.

Usando estos parámetros se puede obtener la ecuación del brazo (modelo cinemático directo) la cual mapea el sistema coordinado L_5 de la punta de la herramienta, con respecto al sistema coordinado L_0 de la base, esta ecuación resulta,

$$T_0^5(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5) = \begin{bmatrix} N & D & A & P \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Donde N es el vector normal,

$$N = \begin{bmatrix} C_1 C_{234} C_5 + S_1 S_5 \\ S_1 C_{234} C_5 - C_1 S_5 \\ S_{234} C_5 \end{bmatrix} \quad (2)$$

D es el vector de deslizamiento,

$$D = \begin{bmatrix} -C_1 C_{234} S_5 + S_1 C_5 \\ -S_1 C_{234} S_5 - C_1 C_5 \\ -S_{234} S_5 \end{bmatrix} \quad (3)$$

A es el vector de aproximación,

$$A = \begin{bmatrix} C_1 S_{234} \\ S_1 S_{234} \\ -C_{234} \end{bmatrix} \quad (4)$$

y P es el vector de posición,

$$P = \begin{bmatrix} \frac{1}{8} C_1 (30 S_{234} + 25 C_{234} + 36 C_{23} + 54 C_2) \\ \frac{1}{8} S_1 (30 S_{234} + 25 C_{234} + 36 C_{23} + 54 C_2) \\ \frac{25}{8} - \frac{15}{4} C_{234} + \frac{25}{8} S_{234} + \frac{9}{2} S_{23} + \frac{27}{4} S_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

D. Cinemática Inversa.

Para la cinemática inversa del robot se tomó en cuenta sólo la solución codo arriba en las Figuras 13 y 14 se pueden apreciar los cálculos realizados para esta configuración.

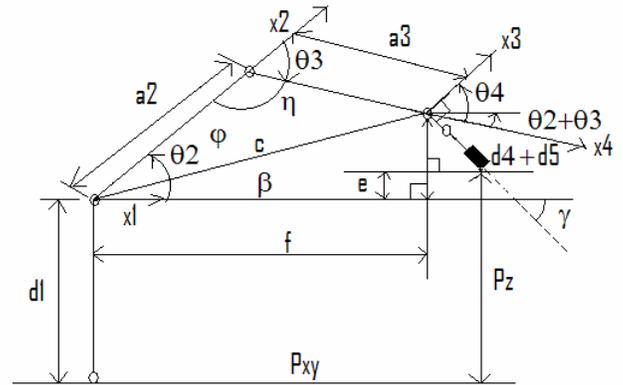


Fig. 14 Diagrama lateral solución Codo Arriba.

Las ecuaciones obtenidas mediante trigonometría (como se puede apreciar toda la nomenclatura está referenciada en las Figuras 13 y 14), resultan,

$$P_{xy} = \sqrt{P_x^2 + P_y^2} \quad (6)$$

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left[\frac{P_y}{P_x} \right] \quad (7)$$

$$f = P_{xy} - (d_4 + d_5) \cos \gamma \quad (8)$$

$$e = P_z - (d_4 + d_5) \sin \gamma - d_1 \quad (9)$$

$$\beta = \text{atan}2 \left(\frac{e}{f} \right) \quad (10)$$

$$c = \sqrt{e^2 + f^2} \quad (11)$$

$$\varphi = \cos^{-1} \left(\frac{a_3^2 - a_2^2 - c^2}{-2a_2 c} \right) \quad (12)$$

$$\eta = \cos^{-1} \left(\frac{c^2 - a_3^2 - a_2^2}{-2a_2 a_3} \right) \quad (13)$$

$$\theta_2 = \beta + \varphi \quad (14)$$

$$\theta_3 = \eta - \pi \quad (15)$$

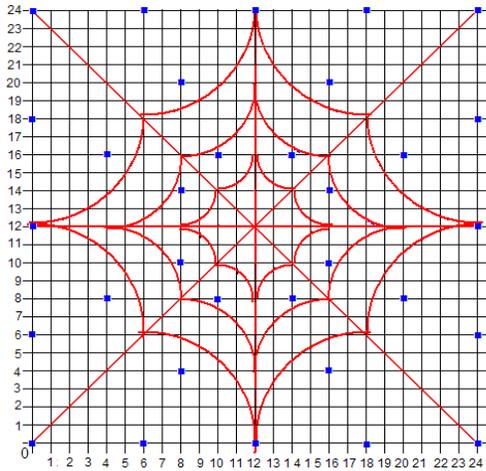


Fig. 15 Coordenadas de la trayectoria (los puntos son las coordenadas y las líneas la trayectoria esperada).

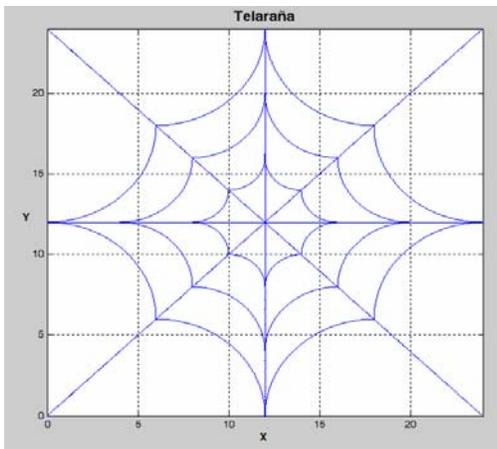


Fig. 16 Resultado de la Simulación de trayectorias realizada en MATLAB.

$$\theta_4 = \frac{\pi}{2} + \gamma - \theta_2 - \theta_3 \quad (16)$$

Estas son las ecuaciones para calcular los ángulos en cada articulación dado una posición (x,y,z) del elemento terminal del robot.

E. Simulación de Trayectorias.

Con las siguientes coordenadas (x,y,z) que se aprecian en la Figura 15, donde los puntos son las coordenadas (x,y) y las líneas la trayectoria esperada, donde la coordenada z se fijó a un valor constante de 5.

Se simuló la trayectoria con la cinemática inversa del robot en MATLAB.

El programa se realizó con perfiles de velocidad uniforme y trapezoidal, primero se procedió a trazar las líneas, después por separado los diferentes niveles de telaraña. Por lo que se realizaron 7 diferentes trayectorias: 4 de las líneas y 3 por cada nivel de telaraña.

Para las primeras 4 trayectorias se calculó con una velocidad de 3 cm/sg y los tiempos de aceleración/desaceleración de 1 sg. Para los niveles de telaraña se usó una velocidad de 1 cm/sg y los tiempos de aceleración/desaceleración de 0.5 sg.

El resultado obtenido en la programación de las trayectorias propuestas se puede apreciar en la Figura 16, de la cual se puede concluir que el cinemático obtenido de SPIDER es correcto.

IV. CONCLUSIONES

El diseño de este robot fue sencillo y práctico con la herramienta de *Solidworks*[®] la cual nos ayudó a tener un modelo esperado sin pérdida de tiempo y material, haciendo a SPIDER económico y con un campo de acción de múltiple aplicación debido a sus 5 GDL, por lo que queda asentado que un robot de diseño propio está al alcance de cualquiera, por su fácil diseño y construcción, siguiendo la metodología propuesta. En este proyecto se contó con la ayuda de un taller especializado, sin embargo consideramos que aún sin un taller de este tipo se puede llevar a cabo la construcción de un robot de diseño propio de una manera sencilla y económica. También se puede obtener sus especificaciones aplicando las bases teóricas que implementamos en este artículo las cuales son de uso general dentro del área de robótica.

El método utilizado de diseño, simulación y construcción es una ventaja en cuanto a no tener pérdidas de material y tiempo lo cual es económico y práctico, y además cumple con el cometido de las tecnologías CAD.

Un trabajo a futuro consiste en la caracterización de este brazo manipulador, la cual consta de un análisis detallado sobre parámetros tales como la confiabilidad, la incertidumbre (condiciones de trabajo), la precisión, la exactitud, características de carga y MTBF.

REFERENCIAS

- [1] Mendonza Sánchez Eduardo Augusto, "Control de un Robot Manipulador", Tesis Profesional, Marzo 2004, Universidad de las Américas, Puebla. Disponible en: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lep/mendoza_s_ea/capitulo2.pdf
- [2] González Victor R, Centro de Formación del Profesorado e Innovación Educativa Valladolid II, "Curso 2007: Fundamentos de Robótica", Valladolid, España. Disponible en: http://cfievalladolid2.net/tecnoc/ctrl_robotica/sistema/morfologia.htm.
- [3] Parra Marquez Juan Carlos, Cid Cifuentes Karina Pilar, "Implementación de Robot Scorbot er-vplus, para docencia, en realidad virtual", Revista Digital Universitaria UNAM, Mayo 2007, Volumen 8 Número 5, ISSN: 1067-6079.
- [4] Apuntes de Control Numérico, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería y Ciencias Sociales y Administrativas. Disponible en: <http://www.geocities.com/siei2006/BRAZOROBOTICO.pdf>
- [5] Williams Karl, "Build your own Humanoid Robots", Mc Graw-Hill 2004, ISBN 0-07-142274-9.
- [6] Juárez C. Jesse I, Ramírez H. Lucía Guadalupe, Rivera M. José, Maldonado O. Cristina, Sandoval R. Rafael, "Instrumento Virtual para el control del Robot Industrial Motoma UP- 20", Somi XXI Congreso de Instrumentación, Octubre 2006. ISBN 970-32-2673-6.
- [7] Sandoval R. Rafael, "Apuntes de Fundamentos de Robótica", Curso 2007. Instituto Tecnológico de Chihuahua.
- [8] Tzvi Raz, Graphics robot Simulator for Teaching Introductory robotics, IEEE Transactions on Education, Vol 32 No. 2, Mayo 1989.
- [9] R. J. Schilling, Fundamentals of Robotics: Analysis and Control. Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall 1990.
- [10] White, R.B. Read, R.K. Koch, M.W. Schilling, R.J., A Graphics Simulator for Robotic Arm, IEEE Transactions on Education, Vol. 32 No. 4, Noviembre 1989.
- [11] L. Stephen Wolfe, Roy Wysack, "Design parts with SolidWorks", 2 edition Junio 1997, ISBN-100934869227.

[12] Ramón Pernia Grillo, Diseño y Construcción del prototipo mecánico de un robot de limpieza doméstico, proyecto del Departamento de Informática e Ingeniería Industrial, Especialidad Mecánica, Universidad de Lleida.

[13] Eduard Ros Ramón, Diseño y construcción de la estructura mecánica de un hexápodo, proyecto de la Escola Politècnica Superior, C/ Jaume II 69, 25001 Lleida.

[14] F. Dreoni, M.G. Ortega, F.R. Rubio, J. Gómez-Ortega, Identificación y Control de un Robot Manipulador, Proyecto de investigación CICYT DPI2001-2424-C02 y DPI2000- 1218-C0401.



Gloria Mónica Martínez Aguilar nació un 18 de Diciembre de 1981 en Torreón, Coahuila. Obteniendo el Grado de Ingeniero Electrónico con especialidad en Instrumentación y Control en el Instituto Tecnológico de la Laguna en el año del 2005. Actualmente estudia la Maestría en Ciencias en Ingeniería en Electrónica en la especialidad de Instrumentación en el Instituto Tecnológico de Chihuahua. Ha realizado investigaciones en el área de Robótica e Instrumentación. Es miembro del Club de Robótica del Instituto Tecnológico de

Chihuahua.



Sonia Anabel Jáquez Olvera nació un 24 de Octubre de 1978 en Ciudad Cuauhtemoc Chihuahua. Obteniendo el Grado de Ingeniero Industrial en Calidad y Productividad por el Instituto Tecnológico de Cd. Cuauhtemoc en el año del 2001. Actualmente estudia la Maestría en Ciencias en Ingeniería en Electrónica en la especialidad de Instrumentación en el Instituto Tecnológico de

Chihuahua. Ha realizado investigaciones en el área de Robótica Móvil. Es miembro del Club de Robótica del Instituto Tecnológico de Chihuahua.



Mejía R. José en 1987 obtuvo el título de Ingeniero en Electrónica con especialidad en instrumentación en el Instituto Tecnológico de Cd. Guzmán Jal. Obtuvo el grado Maestro en Ciencias en 1983 en Ingeniería Electrónica en el Instituto Tecnológico de Chihuahua. De 1985 a 1995 laboró en la empresa Cable Productos de Chihuahua y desde 1995 a la fecha es profesor investigador en la división de estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de Chihuahua. Ha publicado internacionalmente varios artículos científicos y técnicos. Sus áreas de investigación son: Instrumentación y control, Metrología, Estudios de confiabilidad, procesamiento digital de señales, y desarrollo de aplicaciones con lógica difusa y redes neuronales.



Rafael Sandoval Rodríguez nació un 24 de Octubre de 1968, recibió los grados de Ingeniero Industrial en Electrónica y de Maestro en Ciencias en Ingeniería en Electrónica, por el Instituto Tecnológico de Chihuahua, en 1991 y 1994, respectivamente. Recibió el grado de Doctor en Filosofía en Ingeniería Eléctrica, por la Universidad de Nuevo México, en el 2005. Es miembro de la IEEE y asesor de la rama estudiantil IEEE en el ITCH. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores del CONACYT. Actualmente es Profesor Investigador en el ITCH. Sus áreas de investigación son robótica, redes de sensores y sistemas de control en redes.