

Simulación Dinámica de Robot de 3 Grados de Libertad Lab–Volt® Sistema Servo Robot 5250

ALDO HERNÁNDEZ DÍAZ¹, PEDRO VARGAS GARCÍA², MA. NATIVIDAD ROMANO RODRÍGUEZ¹, RENÉ PÉREZ MARTÍNEZ¹, AND JOSÉ JUAN HERNÁNDEZ MEDINA¹

¹Ingeniería en Electromecánica, Instituto Tecnológico Superior de Tlaxco, Predio Cristo Rey, Ex Hacienda de Xalostoc s/n, Tlaxco Tlaxcala.

aldo.hernandez8318@gmail.com, manatividadromanorgz@gmail.com, reneperetz@gmail.com, jjhmedina@gmail.com, hilario.lopez.x@gmail.com

²Dirección de Planeación, Universidad Politécnica de Puebla, 3er. Carril del ejido serrano s/n, San Mateo Cuanalá, Puebla, México. C.P. 72640, pedro.vargas@uppuebla.edu.mx

Compiled 30 de noviembre de 2018

El presente trabajo muestra el modelado y simulación de un manipulador de 3 grados de libertad con la finalidad de conocer la dinámica del sistema. El trabajo se realiza en dos partes, la primera parte muestra el modelado cinemático; en la segunda parte se construye mediante la formulación de Euler-Lagrange o modelamiento de energía la dinámica del sistema, finalmente sus respectivas simulaciones, pero sin dejar de considerar sus diferencias significativas. © 2018 Universidad Politécnica de Puebla

OCIS codes: (140.3490) Lasers, distributed feedback; (060.2420) Fibers, polarization-maintaining; (060.3735) Fiber Bragg gratings.

<http://dx.doi.org/10.1364/ao.XX.XXXXXX>

1. INTRODUCCIÓN

El modelado y simulación de sistemas robotizados no es trivial en términos de docencia, investigación, y aplicación industrial; por lo cual es necesario describir matemáticamente los sistemas físicos, al igual que simular el comportamiento en programas especializados capaces de reproducir dicho comportamiento. Para este caso se utiliza el Robot Lab–Volt® sistema servo robot 5250 que es un manipulador robótico de configuración estándar a la de un robot manipulador antropomórfico y de uso industrial, cuenta con tres grados de libertad de tipo rotacional y capaz de emular tareas semejantes a las que se utilizan en un sistema de manufactura autónomo.

Tomando como referencia al manipulador Lab–Volt® sistema servo robot 5250 se construye el modelo cinemático y dinámico para poder llevar a cabo simulaciones en Matlab con iguales dimensiones y escalables en cuanto a longitud, masa, potencia, etc. Lo anterior con el fin de poder en una etapa posterior comprobar los resultados obtenidos en la simulación, sobre el manipulador real[1].

En el presente trabajo se muestra cómo construir un modelo cinemático por medio del algoritmo Denavit-Hartenberg[2] a través de matrices de transformación homogénea. También se construye el modelo dinámico por medio de la formulación

Euler-Lagrange, encontrando una ecuación diferencial de forma matricial y resolviéndola por medio de simulación en Matlab®, utilizando un Runge-Kuta de cuarto orden y así conocer el comportamiento de los eslabones con sus parámetros correspondientes y descritos en la sección de resultados.

El artículo está organizado de la siguiente manera. En la sección 2, se presentan los antecedentes importantes de este trabajo. En la sección 3, se presentan el desarrollo del modelo cinemático. En la sección 4, la construcción del modelo dinámico. En la sección 5, se presentan los resultados y simulaciones.

2. ANTECEDENTES

Uno de los principales problemas a resolver en la automatización de procesos, es lograr reproducir las tareas humanas por parte de sistemas autónomos e inteligentes, capaces de realizar tareas repetitivas sin descanso y con el mínimo de mantenimiento. Así pues, durante décadas se han desarrollado tecnologías capaces de cumplir con las normas y estándares de calidad, así como con una reducción de tiempo de los procesos de producción de artículos de consumo o maquinaria y equipo.

El uso de manipuladores robóticos está muy difundido para actividades de manufactura, debido a que pueden tener múltiples configuraciones y a la precisión con la que logran dichas actividades[3]; esto es gracias a la construcción de modelos matemáticos fiables que describen la dinámica de robots y la implementación de técnicas de control efectivas capaces de darle al robot la precisión deseada dentro del sistemas de manufactura.

El uso de manipuladores robóticos ha ido en aumento con el paso de los años, como lo expone la figura 1, que a partir del 2010 hasta el 2014, el uso de manipuladores industriales operativos alrededor del mundo ha tenido un crecimiento considerable, que en la automatización de procesos juegan un papel primordial ya sea en precisión o en reducción de pasos en el proceso[4].

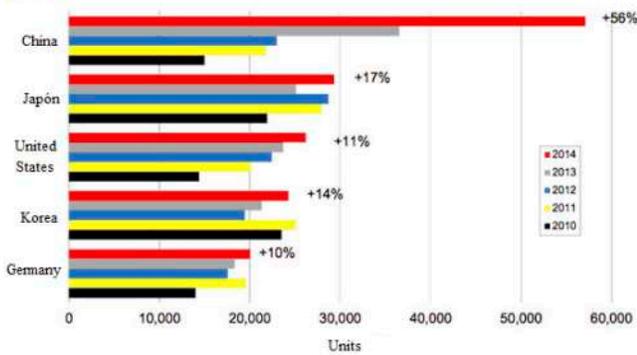


Fig. 1. Tendencia de la robótica industrial a través de los años representada en miles de unidades.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Uno de los principales problemas a resolver en el área de la robótica es el control de los manipuladores industriales, así como su modelado para poder establecer estrategias de control en sus diferentes configuraciones.

El problema abordado en este trabajo consiste en describir mediante modelos matemáticos la manera en la que el brazo robótico realiza trayectorias a través del espacio tridimensional, para lo cual es importante que se consideren dos situaciones, en la primera las fuerzas que producen el movimiento no estarán involucradas, y la segunda es considerar las fuerzas que se involucran en el movimiento de los eslabones[5].

Para éste trabajo se utiliza el robot Lab-Volt® sistema servo robot 5250 mostrado en la figura 2. Este robot es un manipulador con 3 grados de libertad de tipo rotacional para definir posición y dos más para definir orientación.



Fig. 2. Configuración de Lab-Volt® sistema servo robot 5250, de 3 grados de libertad[1].

4. METODOLOGÍA

Para poder describir el movimiento del robot, primero se deben obtener los modelos cinemáticos y dinámicos que representen el movimiento del manipulador tomando en cuenta las fuerzas que producen dicho movimiento.

A. Cinemática del manipulador

La técnica utilizada para encontrar la cinemática directa del manipulador consiste en utilizar matrices de transformación homogénea que describen la posición del efector final en las tres coordenadas espaciales, además de describir las matrices de rotación de cada una de las articulaciones, y así conocer la orientación de las mismas. La figura 3 muestra la configuración y disposición de las articulaciones y eslabones para aplicar el algoritmo de Denavith-Hartenberg y la tabla 1 muestra los parámetros obtenidos[6].

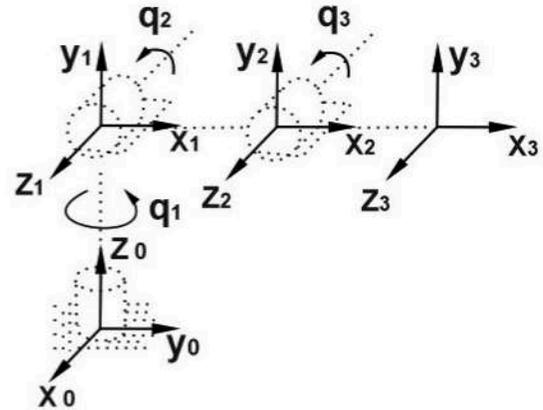


Fig. 3. Configuración de Lab-Volt® sistema servo robot 5250, de 3 grados de libertad.

i	q_i	d_i	a_i	α_i
1	q_1	d_1	0	90°
2	q_2	0	a_2	0
3	q_3	0	a_3	0

Cuadro 1. Parámetros de Denavit-Hartenberg

A partir de la definición de las configuraciones y la disposición de las articulaciones del robot, es posible obtener un modelo del mismo, como se muestra en la figura 4. Con los parámetros encontrados se construye la matriz de transformación homogénea que describe la posición desde el origen del robot hasta la posición final definida por los valores de las articulaciones q_1, q_2 y q_3 en la ecuación 1, donde $C_{2+3} = \text{Cos}(q_1 + q_2)$ y $S_{2+3} = \text{Sen}(q_1 + q_2)$ para simplificar las expresiones[7].

$$\Delta_3^0 = \begin{bmatrix} C_1 C_{2+3} & -C_1 S_{2+3} & S_1 & a_3 C_1 C_{2+3} + a_2 C_1 C_2 \\ S_1 C_{2+3} & -S_1 S_{2+3} & -C_1 & a_3 S_1 C_{2+3} + a_2 S_1 C_2 \\ S_{2+3} & C_{2+3} & 0 & a_3 S_{2+3} + a_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

B. Dinámica del manipulador

El modelo dinámico para robots manipuladores de n grados de libertad viene dado por la ecuación 2[8], con la cual se modelará el sistema Lab-Volt® sistema servo robot 5250.

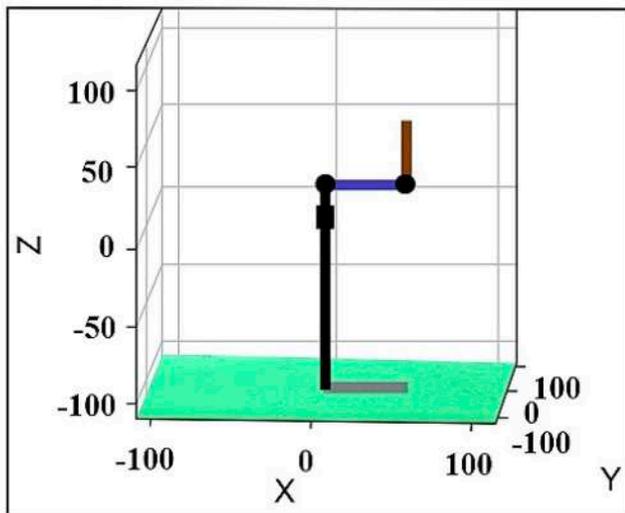


Fig. 4. Configuración de Lab-Volt® sistema servo robot 5250, de 3 grados de libertad, con unidades en milímetros.

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + g(q) \quad (2)$$

Donde $M(q) \in R^{n \times n}$ es la matriz de inercias, $C(q, \dot{q}) \in R^{n \times n}$ es la matriz de fuerzas centrífugas y de Coriolis, $g(q) \in R^n$ es el vector de pares gravitacionales, y $\tau \in R^n$ es el vector de fuerzas externas. Los vectores q , \dot{q} y $\ddot{q} \in R^n$ representan las posiciones, velocidades y aceleraciones de las variables articulares respectivamente [9].

Las matrices y vectores mencionados en la ecuación 2 se obtienen a partir de la formulación Euler Lagrange o modelo de energía, considerando la relación de energía potencial y cinética conocida como Lagrangiano en la ecuación 3.

$$L = K - U \quad (3)$$

Donde L es el Lagrangiano, K la energía cinética y U la energía potencial en cada uno de los eslabones del manipulador. La energía total del sistema viene dada en la ecuación 4, la cual es la suma de todas las energías potenciales de los eslabones, donde ω_1 es la velocidad angular, I_1 es el momento de inercia de la articulación 1 respectivamente. m_2 y m_3 son las masas y V_2 y V_3 las velocidades de los eslabones 2 y 3 respectivamente.

$$K = \frac{1}{2}\omega_1^T I_1 \omega_1 + \frac{1}{2}m_2 v_2^T v_2 + \frac{1}{2}m_3 v_3^T v_3 \quad (4)$$

La energía cinética de cada uno de los eslabones viene dada por K_1 , K_2 y K_3 respectivos a cada eslabón del manipulador, en las ecuaciones 5, 6 y 7 respectivamente.

$$K_1 = \frac{1}{2}I_2 \dot{q}_1^2 \quad (5)$$

$$K_2 = \frac{1}{2}m_2[l_{c2}^2 \dot{q}_2^2 + l_{c2}^2 \cos(q_2) \dot{q}_1^2] + \frac{1}{2}I_2(\dot{q}_1^2 + \dot{q}_2^2) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} K_3 = & \frac{1}{2}m_3 l_{c3}^2 \dot{q}_2^2 + \frac{1}{2}m_3 l_{c3}^2 \dot{q}_3^2 + m_3 l_{c3}^2 \dot{q}_2 \dot{q}_3 + \\ & m_3 l_2 l_{c3} \cos(q_2) \cos(q_2 + q_3) \dot{q}_1^2 + \\ & \frac{1}{2}m_3 l_{c3}^2 \cos^2(q_2 + q_3) \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2}m_3 l_2^2 \dot{q}_2^2 + \\ & \frac{1}{2}m_3 l_2^2 \cos^2(q_2) \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2}I_1[\dot{q}_1^2 + (\dot{q}_2 + \dot{q}_3)^2] + \\ & m_3 l_2 l_{c3} \cos(q_3) \dot{q}_2 \cos(\dot{q}_2 + \dot{q}_3) \end{aligned} \quad (7)$$

Las variables q y \dot{q} son la posición y velocidad de las articulaciones 1, 2 y 3 respectivamente en las ecuaciones 5, 6 y 7. Nótese en la ecuación 4 que cada uno de los términos separados por el signo más corresponden a la segunda y tercera articulación. Hay que notar que el primer término de la ecuación se mueve en su eje de giro, por lo que solamente produce una velocidad angular, y es restringida por la inercia del mismo elemento, y los eslabones 2 y 3 se ve considerada la velocidad tangencial y es restringido por la masa del eslabón.

Mientras que la energía potencial total viene dada por la ecuación 8, la cual es la suma de las energías potenciales de los eslabones descritas en las ecuaciones 9, 10 y 11; viene dado por U_1 , U_2 y U_3 también respectivamente a cada eslabón [10].

$$U = m_1 g h_1 + m_2 g h_2 + m_3 g h_3 \quad (8)$$

$$U_1(q) = m_1 g h_1 \quad (9)$$

$$U_2(q) = m_2 g [h_2 + l_{c2} \sin(q_2)] \quad (10)$$

$$U_3(q) = m_3 g [h_3 + l_2 \sin(q_2) + l_{c3} \sin(q_2 + q_3)] \quad (11)$$

En la ecuación 8, dado que el primer eslabón gira sobre su propio eje, la energía potencial es cero ya que no existe altura que genere un par gravitacional en el mismo ($h_1 = 0$), los términos restantes son de los eslabones 2 y 3, por lo cual la diferencia de energías queda descrita en la ecuación 12, a la cual se le conoce como Lagrangiano del sistema.

$$\begin{aligned} L = & \frac{1}{2}\omega_1^T I_1 \omega_1 + \frac{1}{2}m_2 v_2^T v_2 + \frac{1}{2}m_3 v_3^T v_3 - \\ & -(m_2 g h_2 + m_3 g h_3) \end{aligned} \quad (12)$$

Las ecuaciones dinámicas que modelan el robot de 3 grados de libertad se obtienen aplicando las ecuaciones de Lagrange utilizando la ecuación 13. que describe las derivadas parciales del Lagrangiano con respecto a la posición de cada eslabón, q_i , la velocidad de cada eslabón \dot{q}_i y con respecto al tiempo t . Con este procedimiento se obtienen las matrices de inercia, de aceleraciones centrífugas y de Coriolis y las de pares gravitacionales descritas en la ecuación 2, La forma de éstas ecuaciones es la siguiente.

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right] - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \tau_i; \text{ con } i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (13)$$

$$M(q) = \begin{bmatrix} M_{11}(q) & M_{12}(q) & M_{13}(q) \\ M_{21}(q) & M_{22}(q) & M_{23}(q) \\ M_{31}(q) & M_{32}(q) & M_{33}(q) \end{bmatrix} \ddot{q} \quad (14)$$

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} C_{11}(q, \dot{q}) & C_{12}(q, \dot{q}) & C_{13}(q, \dot{q}) \\ C_{21}(q, \dot{q}) & C_{22}(q, \dot{q}) & C_{23}(q, \dot{q}) \\ C_{31}(q, \dot{q}) & C_{32}(q, \dot{q}) & C_{33}(q, \dot{q}) \end{bmatrix} \dot{q} \quad (15)$$

$$g(q) = \begin{bmatrix} g_1(q) \\ g_2(q) \\ g_3(q) \end{bmatrix} \quad (16)$$

5. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

A continuación, se presentan los resultados de las simulaciones de la cinemática directa y la dinámica del robot manipulador. En la primera sección se muestra la cinemática directa, que al variar las variables articulares, el manipulador cambia la posición del efector final en las posiciones X, Y y Z. En la segunda sección se muestra el modelo dinámico, en el cual se la posición de cada uno de los eslabones, tomando en cuenta las fuerzas que producen el movimiento.

parámetro	cantidad	Unidad
Masa eslabón 1	13.5	kg
Masa eslabón 2	7.23	kg
Masa eslabón 3	2.76	kg
Longitud eslabón 1	0.37	m
Longitud eslabón 2	0.43	m
Longitud eslabón 3	0.28	m
Centro de masa l_{c1}	0	m
Centro de masa l_{c2}	0.52	m
Centro de masa l_{c3}	0	m
Momento de inercia I_1	0.04	kgm^2
Momento de inercia I_2	0.002595	kgm^2
Momento de inercia I_3	0.03610	kgm^2

Cuadro 2. Parámetros de simulación dinámica

A. Resultados de cinemática directa

En la tabla 3 se muestran las posiciones X, Y y Z en el espacio tridimensional al dar valores a las variables articulares q_1, q_2 y q_3 . La posición inicial en $q_1 = q_2 = q_3 = 0$ es $X = 71cm, Y = 0;$ y $Z = 37cm$, de acuerdo a las dimensiones de los eslabones del robot manipulador, que este caso es el cero del manipulador.

No	Valor de variables articulares en (°)			Posición de efector final (mm)		
	q_1	q_2	q_3	X	Y	Z
1	90°	0°	0°	0	710	370
2	0°	45°	45°	300	0	950
3	45°	45°	45°	210	210	950
4	0°	0°	90°	430	0	650
5	90°	45°	0°	0	210	370
6	0°	90°	0°	0	0	1080

Cuadro 3. Resultados de simulación cinemática directa.

Para el caso de la cinemática directa se mueven los valores de las variables articulares y se obtiene la posición del efector final, como lo muestra la figura 5. En este caso el ejemplo de la figura corresponde al renglón 5 con el valor en grados para las respectivas articulaciones[11].

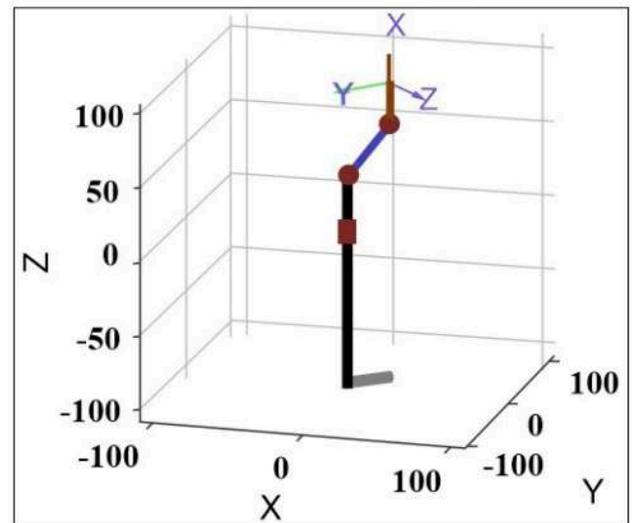


Fig. 5. Cambio de posición cambiando variables articulares.

B. Resultados de la Dinámica del Manipulador

En esta sección se presentan los resultados simulados a partir de las ecuaciones dinámicas del manipulador, en esta ocasión se utiliza el software Matlab@[12], y resolviendo el sistema de ecuaciones diferenciales de segundo orden, el cual se obtiene de la ecuación 2, al despejar a \ddot{q} , se obtiene la ecuación 17 [13].

$$\ddot{q} = M^T(q)[\tau - C(q, \dot{q})\dot{q}] - g(q) \quad (17)$$

El sistema se resuelve por medio del método numérico Runge Kutta de cuarto orden. En la figura 6 se muestran las posiciones de las variables articulares descritas por el vector $[q_1, q_2, q_3]^T = [45, 50, 60]^T$, mientras que la figura 7 muestra a todos los eslabones en la posición del vector $[q_1, q_2, q_3]^T = [45, 45, 45]^T$

Para que las simulaciones fueran posibles es necesario aplicar una estrategia de control, la cual fue un Proporcional-Derivativo, dada la naturaleza del sistema, la aplicación de la estrategia de control es aplicada a la ecuación diferencial de primer orden en la ecuación 17, la cual hace posible que las articulaciones se mantengan en las posiciones de $[q_1, q_2, q_3]^T = [45, 50, 60]^T$ y $[q_1, q_2, q_3]^T = [45, 45, 45]^T$ en las figuras 6 y 7 respectivamente

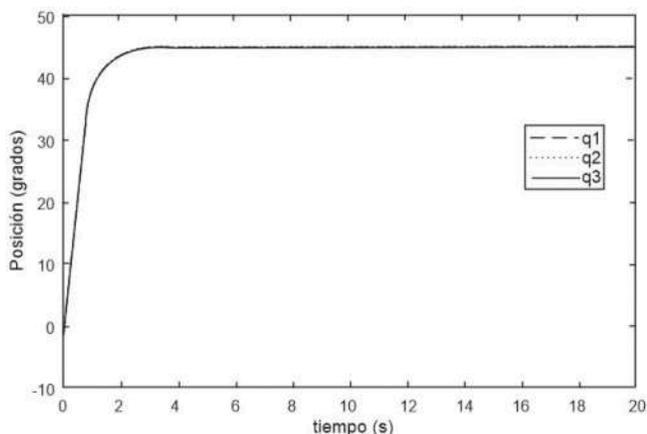


Fig. 6. Cambio de posición cambiando variables articulares, $[q_1, q_2, q_3]^T = [45, 50, 60]^T$.

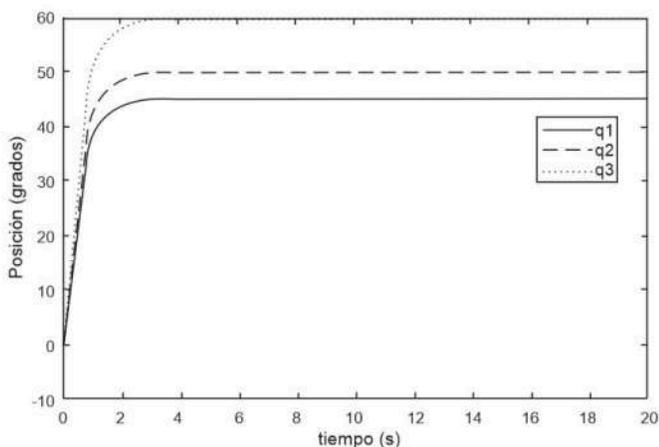


Fig. 7. Cambio de posición cambiando variables articulares, $[q_1, q_2, q_3]^T = [45, 45, 45]^T$.

Dentro de los resultados de simulación dinámica y cinemática podemos argumentar que no son métodos ajenos uno a otro si no que son complementarios, mientras que los

modelos dinámicos se utilizan regularmente para controlar el sistema mediante diferentes técnicas de control automático, la cinemática determina la posición de las articulaciones y del efector final y así saber su posición en el área de trabajo del manipulador.

Cabe mencionar que en la construcción del modelo dinámico se despreciaron tanto la fricción estática y la fricción de Coulomb a modo de facilitar el cómputo en la simulación, aunque el modelo matemático no es completo, ofrece una aproximación a la realidad.

Para concluir, debemos considerar la construcción de modelos matemáticos una herramienta eficaz como descripción de sistemas físicos, el planteamiento por medio de ecuaciones diferenciales y las simulaciones son útiles para conocer el comportamiento del sistema. Gracias a éste tipo de análisis obtenemos representaciones de manera matemática relacionando así la construcción física, y los actuadores involucrados.

REFERENCIAS

1. SISTEMA SERVOROBOT SERIE 5202 No. 36015-02, FESTO DIDACTIC. 2015.
2. FRANCISCO BELTRAN-CARBAJAL, ANTONIO VALDERRABANO-GONZALEZ Y JULIO CESAR ROSAS-CARO, UN ENFOQUE DE CONTROL DE MOVIMIENTO PARA UN SISTEMA DE TRASLACIÓN DE ROBOTS USADO EN SISTEMAS DE MANUFACTURA FLEXIBLE, ResearchGate, 2015.
3. FERNANDO REYES CORTÉS ROBÓTICA, CONTROL DE ROBOTS MANIPULADORES, ALFAOMEGA. Primera edición. 2011.
4. FRANK TOBE, IFR PREDICTS 15 5 INDUSTRIAL ROBOT GROWTH THROUGH 2018, Tehe Robot Report, 2015
5. F.J. LÓPEZ, S. VERGARA, M.A., VARGAS, A. PALOMINO Y D. PINTO, D. VILARIÑO DISEÑO Y MODELO DINÁMICO DE ROBOT ESFÉRICO DE 3-DOF PARA CUELLO ROBÓTICO DE ROBOT HUMANOIDE, Memorias del XXIII Congreso Internacional anual de la SOMIM. 2017.
6. ALEJANDRO GUTIÉRREZ-GILES, MARCO A. ARTEAGA-PÉREZ Y HERBERT SIRA-RAMÍREZ, CONTROL DE FUERZA DE ROBOTS MANIPULADORES BASADO EN OBSERVADORES PROPORCIONALES INTEGRALES GENERALIZADOS, Elsevier, ScienceDirec, 2016.
7. KELLY RAFAEL Y SANTIBÁÑEZ VICTOR CONTROL DE MOVIMIENTO DE ROBOTS MANIPULADORES PEARSON, PRENTICE HALL. 2003.
8. MARK W. SPONG, SETH HUTCHINGSON, M VIDAYASSAGAR ROBOT DINAMYS AND CONTROL, WILEY, SEGUNDA EDICIÓN. 2004.
9. FERNANDO REYES CORTÉS, MATLAB APLICADO A ROBÓTICA Y MECATRÓNICA, Elsevier, ScienceDirec, 2016.
10. DÍAZ SERGIO, GUTIERREZ CITLALIH Y DANIEL HERNÁNDEZ, DISEÑO Y CONTROL EN TIEMPO REAL DE UN BRAZO DE ROBOT MEDIANTE UNA INTERFAZ VIRTUAL, Revista de Tecnología e Innovación ScienceDirec, ISSN-En línea: 2410-3993. 2016.
11. CORKE, PETER I. A ROBOTICS TOOLBOX FOR MATLAB. IEEE ROBOTICS AND AUTOMATION MAGAZINE., March 1996. Volume 3
12. SPONG, M. W. MOTION CONTROL OF ROBOT MANIPULATORS. IEEE Press. 1993
13. GEORGE ELLIS Y ROBERT D. LORENZ, 1999 COMPARISON OF MOTION CONTROL LOOPS FOR INDUSTRIAL APPLICATIONS, CONFERENCE RECORD - IAS ANNUAL MEETING (IEEE INDUSTRY APPLICATIONS SOCIETY) 4:2599 - 2605 VOL.4