

Modelado Dinámico y Simulación de un Robot Paralelo Mediante Software de Diseño 3D

M. A. Regalado-Reyes¹, F. G. Salas-Pérez¹, O. L. Luévano-Cabrales¹, J. C. Morales-Villa¹

Resumen— En este artículo se reporta el uso de una metodología basada en software de diseño mecánico 3D para obtener el modelo dinámico de un manipulador paralelo. La metodología se basa en la creación de un ensamble virtual del mecanismo. Se muestra el modelo dinámico obtenido así como los resultados de simulaciones dinámicas de la aplicación de un controlador Proporcional Derivativo en lazo cerrado para control de seguimiento. El objetivo de este artículo es resaltar la utilidad de esta metodología en dos escenarios: 1- Para acelerar los procesos de diseño y desarrollo de mecanismos, en los que es necesario realizar pruebas dinámicas de movimiento. 2- Para obtener el modelo dinámico de mecanismos con el fin de probar algoritmos de control de movimiento que generen consignas de par o fuerza, cuando dicho modelo sea difícil de obtener de forma analítica.

Palabras claves— Robot paralelo, Modelo dinámico, Software CAD/CAM.

Abstract— In this work we report the use of a 3D software design - based methodology to obtain the dynamic model of a parallel manipulator. This methodology is based on the creation of a virtual assembly of the mechanism. The obtained dynamic model is shown, as well as the results of dynamic simulations of a closed - loop system of a Proportional - Derivative controller applied to the model. The objective of this article is to highlight the usefulness of this methodology in two sceneries: 1- For accelerating the mechanisms design and development processes, when it is necessary to conduct simulation - based dynamic tests of motion. 2- To obtain the dynamic model of mechanisms in order to test motion control algorithms that produce torque or force references, when it is difficult to obtain the dynamic model by analytic methods.

Keywords— Parallel robot, Dynamic model, CAD/CAM Software.

I. INTRODUCCIÓN

Los robots manipuladores paralelos son empleados cada vez más en aplicaciones industriales como manipulación,

empacado, maquinado, así como en aplicaciones en investigación y desarrollo tecnológico, como en simuladores de vuelo y posicionamiento de telescopios. Los robots paralelos están formados por dos o más cadenas cinemáticas, unidas entre sí en un extremo, y unidas por el otro extremo a una base fija. Esta estructura permite al mecanismo proporcionar una rigidez superior a la que presentan los robots seriales, los cuales están formados por una sola cadena cinemática. Además, el diseño de la estructura permite que los actuadores se ubiquen en la base fija del robot, por lo que no agregan masa a las partes móviles del manipulador. Así, la rigidez y resistencia de los eslabones se diseña para soportar solamente las fuerzas debidas al movimiento, a su propio peso, el de la herramienta y el de la carga que debe mover, y no el de los motores. Adicionalmente, al aligerarse la carga sobre la estructura móvil del robot, es posible lograr velocidades muy altas en el elemento final [1].

El modelo dinámico de un manipulador relaciona las fuerzas o pares aplicados en las articulaciones con los desplazamientos que se obtienen, en términos de posiciones, velocidades y aceleraciones articulares. Para la obtención del modelo dinámico de robots paralelos, en la literatura se reporta la utilización de la formulación Lagrangiana, la formulación de Newton-Euler y la formulación por el principio del trabajo virtual [2]-[3]. La complejidad de los modelos dinámicos de robots paralelos es mayor, en general, que la de los modelos dinámicos de los robots seriales, debido al acoplamiento físico entre las cadenas cinemáticas, que se representa matemáticamente con un conjunto de restricciones holonómicas, las cuales, en el modelo Lagrangiano se suman a las fuerzas generalizadas aplicadas a los eslabones.

Por otro lado, algunos paquetes de software de diseño CAD/CAM, como SolidWorks, Catia y NX, cuentan con herramientas para realizar análisis cinemáticos y dinámicos de movimiento de los mecanismos diseñados [4]-[6]. Estas herramientas utilizan algoritmos basados en el método de elemento finito.

En el proceso de desarrollo y simulación de movimiento de nuevos diseños de robots y otros mecanismos, es de gran utilidad contar con herramientas de visualización de dichos movimiento. Se han reportado aplicaciones de

¹ Marco Antonio Regalado-Reyes (marco_regalado@outlook.com), Francisco Guillermo Salas-Pérez (fsalas@upgop.edu.mx), Olga Lidia Luévano-Cabrales, Julio César Morales-Villa. Universidad Politécnica de Gómez Palacio, Carr. El Vergel - La Torreña km 0 820 Localidad El Vergel, Gómez Palacio, Dgo. C.P. 35120.

visualización y animación generadas en paquetes de software para animación profesional, como 3DSMax [7]-[8]. Por otro lado, algunos paquetes de software de diseño CAD/CAM proveen la capacidad de generar animación de los movimientos para facilitar el proceso de diseño.

La utilización de las capacidades mencionadas, presentes en los paquetes de software CAD/CAD, pueden ser una solución a necesidades de diseño y simulación de robots, que requieran desde la realización del diseño 3D, generación del modelo dinámico, realización de simulaciones de algoritmos de control y generación de las animaciones visuales correspondientes. Esta solución es aplicable tanto a necesidades surgidas en la industria, en diseño y fabricación de manipuladores, como a necesidades en la academia. En la industria por lo general se establecen tiempos limitados para obtener resultados de diseño, análisis, simulaciones y animaciones, con el fin de preparar su fabricación. Por otro lado, en la academia se requiere realizar estudios en simulación para validar propuestas, por ejemplo, sobre algoritmos de control de movimiento, movilidad, manipulabilidad, generación de trayectorias, o incluso en generación de diseños novedosos. La rapidez con la que se puede obtener un modelo dinámico mediante un software de diseño puede ser una ventaja para el investigador y para el ingeniero de diseño, sobre la utilización de técnicas de análisis no basadas en software, sobre todo en los casos en que no es indispensable que el modelo sea analítico.

En este artículo se reporta el diseño de un manipulador paralelo planar, utilizando un software de diseño CAD/CAM, así como la obtención del modelo dinámico correspondiente mediante el uso de herramientas proporcionadas por el mismo software. Se reporta la exportación de dicho modelo a un software de análisis numérico, en el que se realizan simulaciones de la aplicación de algoritmos de control en lazo cerrado a tal modelo. Así mismo, se genera la animación del movimiento del manipulador diseñado, siguiendo las consignas de movimiento generadas en el lazo de control. Las principales contribuciones de este trabajo son las siguientes: 1. Mostrar el proceso de desarrollo y utilización de modelos dinámicos, a partir de la creación de un modelo 3D, mediante un paquete de software de diseño CAD/CAM y un paquete de software de análisis numérico. 2. Mostrar la generación automática de animaciones del movimiento generado. 3. Analizar la conveniencia de la utilización del proceso de desarrollo mencionado.

El resto del artículo está organizado de la siguiente manera: En la Sección 2 se presenta el manipulador diseñado, incluyendo su modelo cinemático y su espacio

de trabajo. En la Sección 3 se presenta el proceso de creación del manipulador en el software de diseño CAD/CAM, así como la generación y exportación del modelo dinámico. En la Sección 4 se presentan las simulaciones de control de movimiento realizadas. Por último, se exponen algunas conclusiones.

En este artículo se emplea la siguiente notación. Los vectores se representan con letras minúsculas en negrita y cursiva, mientras que las matrices se representan con letras mayúsculas en cursivas, y los escalares se representan con letras minúsculas en cursivas.

II. MANIPULADOR DISEÑADO

En la Figura 1 se muestra el diagrama cinemático del robot. Es un mecanismo de cinco barras con cinco articulaciones rotatorias, llamado también mecanismo paralelo 5R [9]. Consta de dos piernas, formadas cada una con un par de eslabones denotados por e_{11} , e_{12} , e_{21} y e_{22} , unidas a la base fija por un extremo, en los puntos A_1 y A_2 , en articulaciones cuyas variables son q_1 y q_2 . Además, las piernas están unidas entre sí por el otro extremo, en el punto P . Las variables q_1 y q_2 son actuadas, mientras que las variables β_1 y β_2 , de las articulaciones que unen los eslabones e_{11} con e_{12} y e_{21} con e_{22} en los puntos B_1 y B_2 , son no actuadas. Adicionalmente, con el eslabón e_{21} como lado se forma un paralelogramo, donde los otros tres lados son b (base), e_{a1} y un segmento del eslabón e_{a2} . Similarmente, con el eslabón e_{22} como lado se forma otro paralelogramo, donde los otros tres lados son e_{a3} , un segmento del eslabón e_{a2} y un segmento del eslabón e_{a4} (ver Figura 2). Estos paralelogramos tienen la función de mantener la misma orientación respecto al plano cartesiano, del eslabón e_{a4} , el cual sirve como elemento final, con independencia de la posición.

El sistema de referencia fijo xy tiene su origen en A_1 , como se muestra en la Figura 1. La longitud de los eslabones e_{11} y e_{12} se denota como r_1 , mientras que la longitud de los eslabones e_{21} y e_{22} se denota como r_2 .

A. Modelo Cinemático Inverso

En esta sección se estudia el modelo cinemático inverso, así como el espacio de trabajo y las configuraciones singulares del robot diseñado.

El modelo cinemático mapea los vectores de variables articulares $\mathbf{q} = [q_1 \ q_2 \ \dots \ q_n]^T$ y $\boldsymbol{\beta} = [\beta_1 \ \beta_2 \ \dots \ \beta_m]^T$, donde n y m son los números de articulaciones actuadas y no actuadas,

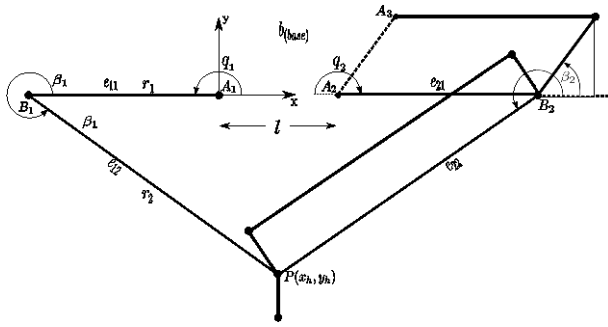


Figura 1. Diagrama cinemático de robot diseñado

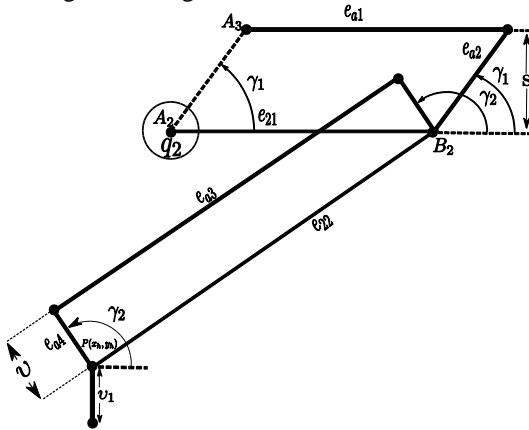


Figura 2. Paralelogramos

respectivamente, que para un robot con articulaciones rotatorias corresponden a los desplazamientos angulares, con el vector de variables operacionales $\mathbf{x} = [x \ y \ z \ \varphi]^T$, donde las tres primeras variables representan la posición del elemento final en el espacio y φ representa en forma general su orientación. Típicamente se denota como:

$$\mathbf{x} = \mathbf{f}(\mathbf{q}, \boldsymbol{\beta})$$

Por otro lado, mediante el modelo cinemático inverso, dado un vector \mathbf{x} y un vector \mathbf{q} o $\boldsymbol{\beta}$, en general se obtiene el otro vector \mathbf{q} o $\boldsymbol{\beta}$ correspondiente:

$$\mathbf{q} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\beta})$$

$$\boldsymbol{\beta} = \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{q})$$

No obstante, puesto que en el mecanismo real por lo general se dispone de sensores solo para las variables \mathbf{q} , es necesario determinar los modelos cinemáticos $\mathbf{q} = \mathbf{g}'(\mathbf{x})$ (y $\boldsymbol{\beta} = \mathbf{h}'(\mathbf{x})$). En tales casos, la solución del modelo cinemático inverso no es única, sino que, dependiendo de la configuración del mecanismo, es posible obtener varios conjuntos de variables articulares a partir de un conjunto de variables operacionales (*modo de funcionamiento*, véase [9]-[11]). En el robot estudiado, se tienen dos conjuntos de variables articulares: las variables articulares

actuadas: q_1 y q_2 , y las variables articulares no actuadas: β_1 y β_2 , mientras que el conjunto de variables operacionales consta de las coordenadas del elemento final: x_p y y_p , en el plano (ver Figura 1).

Denotando como r_{A1} al segmento que va del origen al punto (x_p, y_p) , y como θ_1 al ángulo que forma dicho segmento con el eje X en sentido anti-horario, es posible escribir :

$$r_1 \cos q_1 + r_2 \cos \beta_1 - r_{A1} \cos \theta_1 = 0$$

$$r_1 \sin q_1 + r_2 \sin \beta_1 - r_{A1} \sin \theta_1 = 0$$

De donde se puede obtener:

$$r_2 \cos \beta_1 = r_{A1} \cos \theta_1 - r_1 \cos q_1$$

(1)

$$r_2 \sin \beta_1 = r_{A1} \sin \theta_1 - r_1 \sin q_1 \tag{2}$$

Elevando al cuadrado (1) y (2) se obtiene:

$$r_2^2 \cos^2 \beta_1 = r_{A1}^2 \cos^2 \theta_1 - 2r_1 r_{A1} \cos \theta_1 \cos q_1 + r_1^2 \cos^2 q_1 \tag{3}$$

$$r_2^2 \sin^2 \beta_1 = r_{A1}^2 \sin^2 \theta_1 - 2r_1 r_{A1} \sin \theta_1 \sin q_1 + r_1^2 \sin^2 q_1 \tag{4}$$

Después de sumar (3) y (4) y de aplicar identidades trigonométricas para simplificar la expresión, se obtiene:

$$\cos(\theta_1 - q_1) = \frac{r_{A1}^2 + r_1^2 - r_2^2}{2r_1 r_{A1}} \tag{5}$$

Finalmente, despejando q_1 en (5) se obtiene:

$$q_1 = \theta_1 \mp \arccos\left(\frac{r_{A1}^2 + r_1^2 - r_2^2}{2r_1 r_{A1}}\right) \tag{6}$$

$$\text{donde } \theta_1 = \arctan\left(\frac{y_p}{x_p}\right), r_{A1} = \sqrt{x_p^2 + y_p^2}.$$

Siguiendo un procedimiento similar, denotando r_{A2} al segmento que va del punto $A_2 = (0, l)$ al punto (x_p, y_p) y como θ_2 al ángulo que forma dicho segmento con el eje X en sentido anti-horario, se obtiene

$$\cos(\theta_2 - q_2) = \frac{r_{A2}^2 + r_1^2 - r_2^2}{2r_1 r_{A2}} \tag{7}$$

Despejando q_2 en (7) se obtiene:

$$q_2 = \theta_2 \mp \arccos\left(\frac{r_{A2}^2 + r_1^2 - r_2^2}{2r_1 r_{A2}}\right) \tag{8}$$

$$\text{donde } \theta_2 = \arctan\left(\frac{y_p}{x_p - l}\right), r_{A2} = \sqrt{(x_p - l)^2 + y_p^2}.$$

Nótese en (6) y en (8) se dan dos soluciones para q_1 y q_2 , que corresponden a cuatro modos de funcionamiento posibles en el manipulador (Reveles, 2011). La obtención del modelo cinemático inverso $\boldsymbol{\beta} = \mathbf{h}'(\mathbf{x})$ se realiza siguiendo procedimientos similares, con los que se obtiene:

$$\beta_1 = \theta_1 \mp \arccos\left(\frac{r_{A1}^2 + r_2^2 - r_1^2}{2r_2 r_{A1}}\right) \tag{9}$$

$$\beta_2 = \theta_2 \mp \arccos\left(\frac{r_{A2}^2 + r_2^2 - r_1^2}{2r_2 r_{A2}}\right) \tag{10}$$

El modelo cinemático de velocidad relaciona el vector

de velocidad operacional $\dot{x} = \frac{\partial x}{\partial t}$, con el vector $\dot{q} = \frac{\partial q}{\partial t}$, y se puede expresar de forma general como:

$$A\dot{x} = B\dot{q} \quad (11)$$

donde las matrices A y B se conocen como matrices jacobianas (Tsai, 1999). Despejando \dot{q} en (11) se obtiene

$$\dot{q} = B^{-1}A\dot{x} \quad (12)$$

Las matrices jacobianas A y B del mecanismo se obtuvieron en [12]:

$$A = \begin{bmatrix} \cos\beta_1 & \sin\beta_1 \\ \cos\beta_2 & \sin\beta_2 \end{bmatrix}, \quad B = r_1 \begin{bmatrix} \sin(\beta_1 - q_1) & 0 \\ 0 & \sin(\beta_2 - q_2) \end{bmatrix} \quad (13)$$

III. DISEÑO USANDO SOFTWARE CAD/CAM

El diseño del manipulador se realizó utilizando el software SolidWorks®. Se creó un ensamblaje virtual, el cual se utiliza para representar un mecanismo en el que sus componentes tienen capacidad de movimiento relativo entre sí y respecto a un marco de referencia definido. En general, la creación de un ensamblaje virtual en SolidWorks® incluye los siguientes pasos:

1. Diseño de las piezas. Se diseña en tres dimensiones cada una de las piezas del ensamblaje, proporcionando las dimensiones en cada uno de los ejes.
2. Creación del ensamblaje. Una vez que las piezas fueron diseñadas, se realiza el ensamblaje mecánico virtual, uniendo las piezas e indicando los grados de libertad relativos así como las restricciones de movimiento de cada una de las piezas dentro del mismo ensamblaje. Asimismo, es necesario especificar la densidad del material de cada uno de los componentes del ensamblaje.

A. Conversión a formato xml

El software SolidWorks® proporciona al usuario la capacidad de exportar el ensamblaje virtual creado en formato xml. En este formato es posible importarlo desde Matlab®/Simulink. En este software, a partir del archivo xml importado, se crea un modelo de Simulink (extensión mdl), formado por bloques de la biblioteca SimMechanics de Simscape. Cada uno de los bloques creados pueden inspeccionarse y permiten al usuario ver los valores de los parámetros de cada bloque definidos en la creación del modelo. El diagrama de bloques resultante de la importación del ensamblaje se muestra en las Figuras 3 y 4.

En los bloques correspondientes a las articulaciones de rotación del robot se les pueden agregar puertos de actuador y de sensor, para introducir y obtener las señales necesarias, respectivamente (ver Figura 5).

Cabe resaltar que es posible crear modelos nuevos, a partir del modelo creado en Simulink con el ensamblaje importado, simplemente agregando los bloques necesarios para realizar las operaciones deseadas, tales como

representación numérica y gráfica de variables, así como la generación de las señales de control para el modelo del mecanismo.

IV. SIMULACIÓN

Con el fin de observar el comportamiento del modelo dinámico generado mediante el procedimiento descrito, bajo condiciones de aplicación de pares o momentos de

torsión (τ_1 y τ_2) en las articulaciones actuadas, se realizaron simulaciones de un sistema en lazo cerrado formado por el modelo dinámico y controlador de seguimiento. Se implementó un controlador Proporcional Derivativo (PD) de seguimiento de trayectoria en espacio articular. Las dimensiones de los eslabones del robot se muestran en la Tabla I.

La configuración inicial del manipulador es la mostrada en la Figura 1, donde los valores de las variables articulares son $q_1 = \pi$ [rad] (180°) y $q_2 = 0$ [rad] (0°). Las coordenadas de la posición inicial del elemento final son $x_H = 0.10225$ [m] y $y_H = -0.4428$ [m].

TABLA I
DIMENSIONES DE LOS ESLABONES DEL ROBOT

Eslabón	Longitud [m]
r_1	0.3
r_2	0.5966
l	0.2046

A. Controlador PD

El objetivo de implementar un controlador de seguimiento es observar el comportamiento del modelo dinámico obtenido con el procedimiento descrito, cuando se le aplican consignas de par o momento de torsión, las cuales, en el mecanismo real, son generadas por el actuador correspondiente (un motor). El controlador de seguimiento, a su vez recibe las referencias de posición y velocidad deseadas. Se decidió implementar un controlador PD debido a su sencillez y facilidad de implementación. Las ganancias empleadas en el controlador se muestran en la Tabla II. En los bloques correspondientes a las dos articulaciones actuadas se introdujeron las señales de par para generar el movimiento deseado en el mecanismo, y al mismo tiempo se obtuvieron las respectivas señales de posición angular (ver Figura 5).

TABLA II
GANANCIAS DEL CONTROLADOR PD

Articulación	K_p [Nm/grad]	K_v [Nm s/grad]
1	40	15
2	40	15

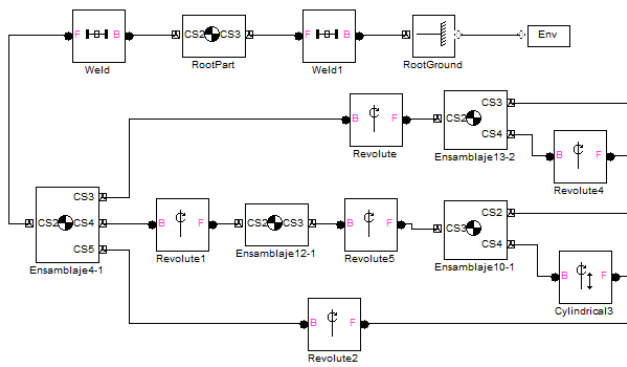


Figura 3. Lado izquierdo del diagrama de bloques del ensamble importado

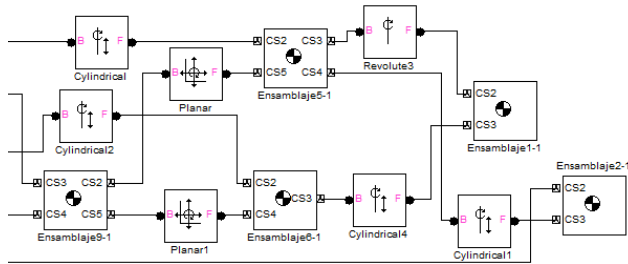


Figura 4. Lado derecho del diagrama de bloques del ensamble importado

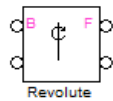


Figura 5. Bloque de articulación de revolución

B. Trayectoria Deseada

Se diseñó una trayectoria circular en espacio operacional, con diámetro de 0.08 [m], que debe completarse en 4 segundos. El centro de dicho círculo se ubica a una distancia de 0.04 [m] a la derecha de la posición inicial $P(x_h, y_h)$, de manera que el manipulador inicia la trayectoria en el punto medio del lado izquierdo del círculo. Se generaron las referencias de posición y velocidad articular para trazar un círculo y se emplearon los modelo cinemáticos inversos de posición y de velocidad obtenidos en (6), (8), (9), (10), (12) y (13) para obtener las referencias articulares de posición y velocidad.

C. Resultados de la Simulación

La Figura 6 muestra una imagen de la animación generada por Simulink del movimiento del modelo del manipulador. La Figura 7 muestra los errores de posición obtenidos \tilde{q}_1 y \tilde{q}_2 , respectivamente. La Figura 8 muestra

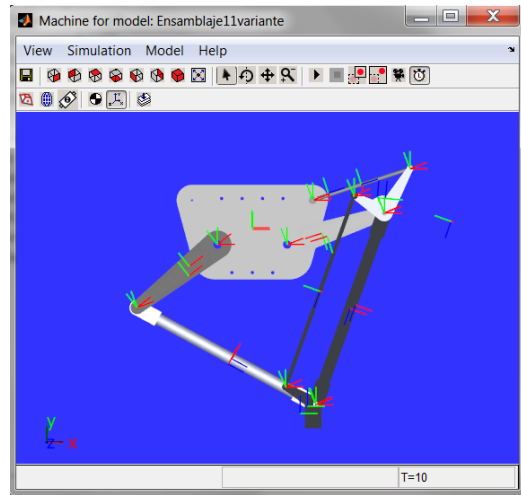


Figura 6. Animación del movimiento del manipulador

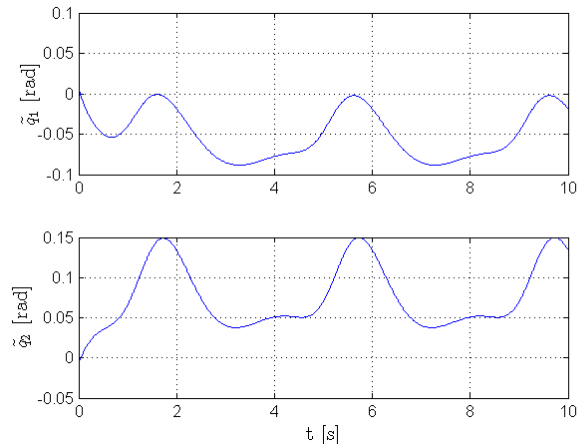


Figura 7. Errores obtenidos \tilde{q}_1 y \tilde{q}_2

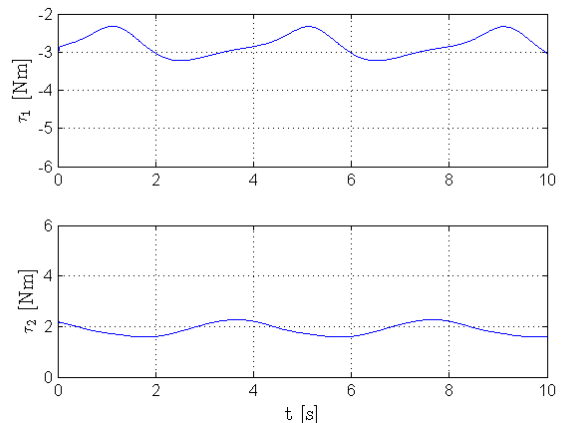


Figura 8. Pares deseados τ_1 y τ_2

los pares deseados generados por el controlador PD, para las articulaciones actuadas 1 y 2, respectivamente. Nótese que los errores obtenidos son pequeños, por debajo de 0.1 [rad] (5.7°) en q_1 y 0.16 [rad] (8.6°) en q_2 , como respuesta

a los pares aplicados, que están por debajo de sus valores iniciales de 3.5 [Nm] y 2.7 [Nm] para τ_1 y τ_2 , respectivamente. Esto indica que el comportamiento del modelo dinámico es adecuado para la tarea deseada y los pares introducidos.

V. CONCLUSIÓN

En este artículo se presentó un método para la obtención de un modelo dinámico de un robot paralelo planar de dos grados de libertad, mediante la utilización de un software de diseño CAD/CAM. Con el fin de validar el comportamiento dinámico del modelo obtenido, se realizaron simulaciones de la aplicación de un controlador de seguimiento PD al modelo dinámico obtenido, y se presentaron los resultados de dichas simulaciones. Se puede afirmar que el procedimiento para obtener el modelo dinámico de un mecanismo mostrado aquí puede ser utilizado tanto para acelerar el proceso de desarrollo de sistemas mecatrónicos, como para probar el comportamiento dinámico de los mismos y su respuesta a controladores de movimiento, como parte de un estudio para su posible aplicación. Como trabajo futuro, se plantea un estudio comparativo del modelo dinámico del robot obtenido siguiendo el método reportado aquí con un modelo dinámico obtenido usando un método analítico.

VI. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado gracias al apoyo de la SEP México a través de PRODEP.

VII. REFERENCIAS

- [1] Bengtsson, K. (2016). IRB 366-8/1130, IRB 360-6/1600. Recuperado el 20 de Enero de 2016, de <https://library.e.abb.com/public/5089951be174befec1257c430032d757/>
- [2] Tsai, L. W. (1999). *Robot Analysis*. New York: John Wiley & Sons,
- [3] Khalil, W., y Dombre, E. (2002). *Modeling, Identification and Control of Robots*. London: Kogan Page Science.
- [4] Solidworks. (2016). Motion Analysis Overview. Recuperado el 20 de Enero de 2016, de <http://www.solidworks.com/sw/products/simulation/motion-analysis.htm>
- [5] Siemens. (2016). Motion Analysis: Design-Integrated Multibody Dynamics Simulation. Recuperado el 20 de Enero de 2016, de <http://www.plm.automation.siemens.com/en/us/products/nx/forsimulation/>
- [6] Dassault Systemes. (2016). CATIA Systems Engineering. Recuperado el 20 de Enero de 2016, de <http://www.3ds.com/products-services/catia-products/v6/portfolio/digital-product-experience/s/catiasystems-engineering/>
- [7] Encinas, E. (2008) "Desarrollo de un módulo de animación virtual para un sistema de control de mecanismos en tiempo real", Tesis de Maestría, Instituto Tecnológico de La Laguna, Torreón, Coah.
- [8] García, C. (2009) "Evaluación de controladores convencionales en un robot manipulador paralelo 3-RRR", Tesis de Maestría, Instituto Tecnológico de La Laguna, Torreón, Coah.:

- [9] Liu, X.; Wang, J. y Pritschow, G. (2006) "Kinematics, singularity and workspace of planar 5R symmetrical parallel mechanisms", *Mechanism and Machine Theory*, vol. 41, pp. 145-169.
- [10] Chablat, D.; Wenger, P. y Angeles, J. (1998) "Working Modes and Aspects in Fully-Parallel Manipulators", en *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1964-1969.
- [11] Reveles, D. (2011) "Estudio sobre las Condiciones de Cambio del Modo de Funcionamiento de Robots Paralelos", Tesis de Maestría, Instituto Tecnológico de La Laguna, Torreón, Coah.
- [12] Alvarado, O. (2010). "Construcción, Modelado y Control de un Mecanismo Tipo Péndulo Invertido Esférico", Tesis de Maestría, Instituto Tecnológico de La Laguna, Torreón, Coah.

VIII. BIOGRAFÍAS



Marco Antonio Regalado Reyes nació en Cd. Juárez, Chihuahua, el 24 de octubre de 1993. Finalizó la Ingeniería en Tecnologías de Manufactura en la Universidad Politécnica de Gómez Palacio Diciembre de 2015. Actualmente ejerce su profesión como diseñador industrial en la empresa Gebesa. Sus áreas de interés son el desarrollo de proyectos y productos con aplicación de software CAD - CAE - CAM.



Francisco Guillermo Salas Pérez obtuvo su título de Ingeniero Electrónico, Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica y Doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica en el Instituto Tecnológico de La Laguna, Torreón, Coah., en 2003, 2008 y 2013, respectivamente. Actualmente es profesor investigador en la Universidad Politécnica de Gómez Palacio, Durango. Sus intereses en investigación son el control inteligente, los robots paralelos y la automatización.



Olga Lidia Luévano Cabrales nació en la ciudad de Torreón Coahuila, estudió Ingeniería Industrial en Producción y Maestría en Ciencias de la Ingeniería Industrial en el Instituto Tecnológico de la Laguna, y es aspirante a Doctora en Ciencias en Ingeniería Industrial y Manufactura por la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales. Tiene 13 años de experiencia en la industria, 16 años en la docencia a nivel de educación superior y posgrado. Actualmente dirige la carrera de Ingeniería en Animación y Efectos Visuales en la Universidad Politécnica de Gómez Palacio y sigue participando como profesora investigadora en la carrera de Ingeniería en Tecnologías de Manufactura.



Julio César Morales Villa nació en Salaverna, Zacatecas, 22 de Agosto de 1967. Ingeniero Eléctrico Industrial, Instituto Tecnológico de Saltillo, Maestría en Administración, Universidad Autónoma de Coahuila, campus Torreón, Coahuila, México, 2009.

Actualmente es profesor investigador en la Universidad Politécnica de Gómez Palacio, Durango. Sus intereses en investigación son la automatización y control de robots con aplicación en la industria.