

Desarrollo de una interfaz gráfica para el control de posición de un manipulador paralelo plano 3RRR

Graphical interface development for the position control of a 3RRR planar parallel manipulator

Luis Carlos Burbano Castillo, Roger Peregrino Trullo Daza, Giancarlo Daraviña Peña, Héctor Fabio Quintero Riaza.

Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia.

gcdaravina@utp.edu.co

hquinte@utp.edu.co

Resumen — En este artículo se presenta el desarrollo de una interfaz gráfica implementado en un manipulador paralelo plano de tres grados de libertad, tipo 3-RRR. La interfaz gráfica permite el control, en lazo abierto, de la posición del manipulador, permitiendo ubicar en el plano el elemento terminal y especificar su pose. En la interfaz gráfica permite la visualización de variables como posición angular, par motor, voltaje de los servomotores que accionan a los eslabones de entrada. Se realiza la comparación teórica y real del desplazamiento angular y del par en los motores durante la trayectoria elegida, obteniendo resultados muy cercanos entre ambos.

Palabras clave — Manipulador paralelo, interfaz gráfica, trayectoria.

Abstract— This paper presents the development of a graphical interface implemented in a 3-RRR planar parallel manipulator. The graphical interface allows the control, in open loop, of the position of the manipulator, allowing to locate in the plane the end actuator and define its pose. The graphical interface allows the visualization of variables such as angular position, torque, voltage of the servomotors that drive the input links. The theoretical and real comparison of the angular displacement and the torque in the motors during the chosen path is shown, obtaining very close results between both.

Key Word — Parallel manipulator, graphical interface, path.

I. INTRODUCCIÓN

Los manipuladores paralelos son mecanismos basados en cadenas cinemáticas cerradas presentando muy buenos indicadores de funcionamiento en términos de precisión, rigidez y habilidad para manipular cargas pesadas. Este tipo de manipuladores tiene aplicaciones en simuladores de vuelo, y en los últimos años está aumentando su aplicación en la industria de máquinas herramientas y otras aplicaciones. Los

manipuladores paralelos permiten distribuir la carga de la plataforma móvil mediante varias cadenas que soportan una parte de la carga [1].

Los manipuladores paralelos planares poseen movimiento sujeto a un plano, pueden ser de dos o tres grados de libertad; traslación en el plano y una rotación sobre un eje perpendicular al mismo. En lo que respecta a una plataforma planar general de tres eslabonamientos con tres grados de libertad, ésta consiste en una plataforma de movimiento conectada a una base fijada por tres cadenas cinemáticas simples. Usando articulaciones prismáticas y de revolución como pares cinemáticos, se obtienen siete posibles arreglos en manipuladores paralelos planares.

En el estado del arte se encuentran diversos trabajos donde se analizan manipuladores paralelos planos de 3 grados de libertad. En la literatura se encuentran estudios que analizan indicadores de operación de manipuladores paralelos planos. Wu et al [2] realizan el análisis paramétrico de un manipulador 3-PPR buscando optimizar la geometría de las plataformas fija y móvil. En el análisis los autores presentan el análisis de la cinemática directa e inversa, y utilizan la destreza como indicador de funcionamiento del manipulador. Liu et al [3] presentan un análisis de singularidades para obtener una trayectoria libre de singularidades de un manipulador paralelo plano 3-RRR. Agarwal et al [4], desarrollan un esquema de control para manipuladores paralelos para evitar las singulares dentro de su espacio de trabajo. Binaud et al. [5] realizan el análisis de singularidades debido a errores en la geometría de un manipulador 3-RPR, basado en este estudio, formulan un problema de optimización para maximizar el espacio de trabajo. Singh et al [6] desarrollan un control PD tipo modo deslizante combinado con un observador de perturbación en un manipulador 3-PPR; de esta forma desacoplan la dinámica permitiendo el control de la posición de una forma simple.

Arrouk et al [7] realizan el análisis de la cinemática inversa utilizando métodos gráficos; los autores representan la pose del actuador final y utilizan las herramientas 3D para obtener el espacio de trabajo total del manipulador. Para evitar las singularidades, Assal [8] estudia un manipulador 3-PPR para ser utilizado en una máquina herramienta híbrida.

Relacionado con el control de manipuladores paralelos planos, Litim [9] desarrolla un control utilizando modos deslizantes no lineales para el control de un manipulador paralelo plano de 2 DOF. Lodhe [10] presenta un sistema PID no lineal robusto en un esquema de control difuso para controlar la trayectoria de un manipulador paralelo plano 2PRP-PPR con presencia de parámetros inciertos y perturbaciones externas. Le et al [11] implementan un control del par, basado en redes neuronales, para el seguimiento de la trayectoria de un manipulador paralelo plano 3-RRR. Lipinski [12] utiliza un controlador retroalimentado para el control de la trayectoria de un manipulador plano 3-RRR con un actuador redundante.

Este trabajo muestra el desarrollo de una interfaz gráfica para el control de un manipulador paralelo plano 3-RRR. La interfaz gráfica permite que el usuario defina la trayectoria y la pose del elemento terminal, el algoritmo desarrollado envía la señal de control a los tres servomotores; cada servomotor tiene un encoder para el control del giro. La interfaz gráfica permite que el usuario visualice los parámetros de salida de los actuadores (posición angular, corriente, par de torsión, y tensión).

II. ANÁLISIS CINEMÁTICO

En la figura 1 se presenta el manipulador paralelo plano 3-RRR construido para la implementación del sistema de control.



Figura 1. Manipulador 3RRR

En la figura 2 se muestra las variables utilizadas para el desarrollo de la cinemática del manipulador. Con el análisis se pretende, una vez se defina la posición del elemento terminal (x_P , y_P), y su pose, θ_7 , encontrar los ángulos de orientación de los eslabones conductores, θ_1 , θ_2 , y θ_3 .

Las ecuaciones del lazo del manipulador permiten obtener

las coordenadas del punto P, a partir de la ubicación de cada uno de los apoyos fijos de los eslabones conductores, como se muestran en las ecuaciones (1) a (6).

Analizando la ubicación del punto P a partir del apoyo A, se obtiene la ecuación con la primera cadena:

$$x_P = x_A + L_1 \cos \theta_1 + L_4 \cos \theta_4 + h \cos(\theta_7 + \pi/6) \quad (1)$$

$$y_P = y_A + L_1 \sin \theta_1 + L_4 \sin \theta_4 + h \sin(\theta_7 + \pi/6) \quad (2)$$

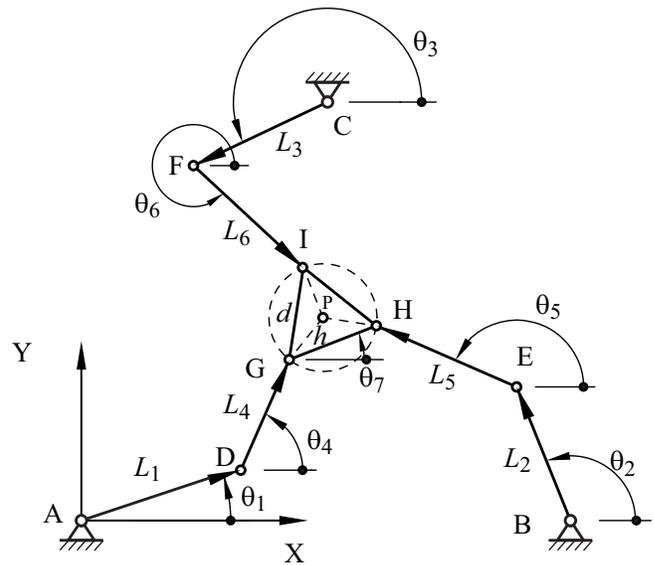


Figura 2: Descripción de las variables geométricas del manipulador

De la misma manera se procede para las siguientes dos cadenas cinemáticas.

- Segunda cadena:

$$x_P = x_B + L_2 \cos \theta_2 + L_5 \cos \theta_5 + h \cos(\theta_7 + 5\pi/6) \quad (4)$$

$$y_P = y_B + L_2 \sin \theta_2 + L_5 \sin \theta_5 + h \sin(\theta_7 + 5\pi/6) \quad (3)$$

- Tercera cadena:

$$x_P = x_C + L_3 \cos \theta_3 + L_6 \cos \theta_6 + h \cos(\theta_7 + 3\pi/2) \quad (5)$$

$$y_P = y_C + L_3 \sin \theta_3 + L_6 \sin \theta_6 + h \sin(\theta_7 + 3\pi/2) \quad (6)$$

Las coordenadas angulares de los eslabones de entrada, θ_1 , θ_2 , θ_3 , y acopladores, θ_4 , θ_5 , y θ_6 , se obtienen una vez sea definido la posición del elemento terminal (x_P , y_P) y la orientación del elemento terminal, θ_7 . Para esto se utilizan las ecuaciones 1 a 6; dado la no linealidad del sistema de ecuaciones, se utiliza el método de Newton-Raphson para resolverlo.

Las ecuaciones de velocidades, se obtienen después de derivar con respecto al tiempo las ecuaciones de lazo cerrado (1) a (6):

$$\omega_k = \frac{\partial \theta_k}{\partial \theta_1} \omega_1 + \frac{\partial \theta_k}{\partial \theta_2} \omega_2 + \frac{\partial \theta_k}{\partial \theta_3} \omega_3 \quad (13)$$

Primera cadena. Derivando la Ec (1)

$$\begin{aligned} -L_1 \sin \theta_1 \cdot \omega_1 - L_4 \sin \theta_4 \cdot \omega_4 \\ - h \sin(\theta_7 + \pi/6) \cdot \omega_7 - v_{xP} = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

Derivando la Ec (2)

$$\begin{aligned} L_1 \cos \theta_1 \cdot \omega_1 + L_4 \cos \theta_4 \cdot \omega_4 \\ + h \cos(\theta_7 + \pi/6) \cdot \omega_7 - v_{yP} = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

Segunda cadena. Derivando la Ec (3)

$$\begin{aligned} -L_2 \sin \theta_2 \cdot \omega_2 - L_5 \sin \theta_5 \cdot \omega_5 \\ - h \sin(\theta_7 + 5\pi/6) \cdot \omega_7 - v_{xP} = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

Derivando la Ec (4)

$$\begin{aligned} L_2 \cos \theta_2 \cdot \omega_2 + L_4 \cos \theta_4 \cdot \omega_4 \\ + h \cos(\theta_7 + 5\pi/6) \cdot \omega_7 - v_{yP} = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

Tercera cadena. Derivando la Ec (5)

$$\begin{aligned} -L_3 \sin \theta_3 \cdot \omega_3 - L_6 \sin \theta_6 \cdot \omega_6 \\ - h \sin(\theta_7 + 3\pi/2) \cdot \omega_7 - v_{xP} = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

Derivando la Ec (6)

$$\begin{aligned} L_3 \cos \theta_3 \cdot \omega_3 + L_5 \cos \theta_5 \cdot \omega_5 \\ + h \cos(\theta_7 + 3\pi/2) \cdot \omega_7 - v_{yP} = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

Con este sistema de ecuaciones se puede realizar el análisis de velocidades directo e inverso. Si se conocen las componentes de velocidad del punto P, y la velocidad angular de la plataforma móvil, se puede determinar las velocidades angulares de las manivelas y los acopladores.

El sistema de ecuaciones dado por las ecuaciones (7) a (12) permite determinar la velocidad del elemento terminal (v_P , ω_7) si se especifican las velocidades angulares de los eslabones de entrada (ω_1 , ω_2 , ω_3).

Con este sistema de ecuaciones, también se puede determinar las velocidades angulares de los acopladores en función de las velocidades angulares de los eslabones de entrada, como se muestra en la ecuación (13):

donde ω_k y θ_k son, respectivamente, la velocidad angular y posición angular del eslabón k .

Con procedimientos similares, se obtienen las velocidades del centro de masa de los eslabones en función de las velocidades angulares de los eslabones de entrada, ver ecuación (14):

$$v_{Gk} = v_{Gk\theta_1} \cdot \omega_1 + v_{Gk\theta_2} \cdot \omega_2 + v_{Gk\theta_3} \cdot \omega_3 \quad (14)$$

donde v_{Gk} es el vector velocidad del centro de masas del eslabón k , $v_{Gk\theta_j}$ es la derivada parcial del vector velocidad v_{Gk} con respecto a θ_j con $j = 1, 2, 3$.

El análisis de aceleraciones se obtiene al derivar con respecto al tiempo las ecuaciones de velocidades.

III. ANÁLISIS DINÁMICO

El análisis dinámico del manipulador se obtiene utilizando un enfoque energético. Despreciando la energía potencial debido a que todos sus componentes se encuentran sobre el mismo plano (x, y); por lo tanto, la ecuación está dada por:

$$\frac{d}{dt} E_C = \sum potencias = \sum T_k \cdot \omega_k + \sum F_j \cdot v_j \quad (15)$$

siendo T_k el par que actúa sobre el eslabón k , ω_k la velocidad angular del eslabón, F_j el vector fuerza que se ejerce sobre el punto j , y v_j el vector velocidad del punto j .

La energía cinética del manipulador está dada por:

$$E_C = \sum_{k=1}^3 \frac{1}{2} J_{Ai} \omega_i^2 + \sum_{k=4}^7 \frac{1}{2} m_i v_{Gi}^2 + \frac{1}{2} J_{Gi} \omega_i^2 \quad (16)$$

siendo $k = 1,2,3$ las manivelas, $k = 4,5,6$ los acopladores, $k = 7$ la plataforma móvil. En la Ec 16, J_{Ai} es el momento de inercia de la manivela i alrededor de su apoyo, m_i es la masa del eslabón i , v_{Gi} el vector velocidad de su centro de masa, J_{Gi} el momento de inercia de masas alrededor de su centro de masa, y ω_i es la velocidad angular del eslabón i .

La derivada de la energía cinética con respecto al tiempo está dada por:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} E_C = & J_{1A} \cdot \omega_1 \cdot \alpha_1 + J_{1B} \cdot \omega_2 \cdot \alpha_2 \\ & + J_{3C} \cdot \omega_3 \cdot \alpha_3 + J_{G4} \cdot \omega_4 \cdot \alpha_4 + m_4 \cdot v_{G4} \cdot a_{G4} \\ & + J_{G5} \cdot \omega_5 \cdot \alpha_5 + m_5 \cdot v_{G5} \cdot a_{G5} + J_{G6} \cdot \omega_6 \cdot \alpha_6 \\ & + m_6 \cdot v_{G6} \cdot a_{G6} + J_{G7} \cdot \omega_7 \cdot \alpha_7 + m_7 \cdot v_{G7} \cdot a_{G7} \end{aligned} \quad (17)$$

La potencia del manipulador está dada por:

$$\sum potencias = T_1 \cdot \omega_1 + T_2 \cdot \omega_2 + T_3 \cdot \omega_3 \quad (18)$$

siendo T_i el par requerido en el servomotor que acciona a la manivela i .

De la combinación de las Ecs 17, 18, 15 y 16, se obtienen el par requerido en cada servomotor.

Para el servomotor 1 sería

$$\begin{aligned} T_1 = & J_{1A} \cdot \alpha_1 + J_{G4} \alpha_4 \frac{\partial \theta_4}{\partial \theta_1} + m_4 \cdot v_{G401} \cdot a_{G4} \\ & + J_{G5} \alpha_5 \frac{\partial \theta_5}{\partial \theta_1} + m_5 \cdot v_{G501} \cdot a_{G5} + J_{G6} \alpha_6 \frac{\partial \theta_6}{\partial \theta_1} \\ & + m_6 \cdot v_{G601} \cdot a_{G6} + J_{G7} \alpha_7 \frac{\partial \theta_7}{\partial \theta_1} \\ & + m_7 \cdot v_{G701} \cdot a_{G7} \end{aligned} \quad (19)$$

IV. ALGORITMO PARA LA GENERACIÓN DE TRAYECTORIAS A PARTIR DEL SOFTWARE MATLAB

Las ecuaciones requeridas para el control de la trayectoria del manipulador 3-RRR se obtienen a partir de las ecuaciones de la cinemática inversa, definiendo punto a punto la ubicación y pose del elemento terminal (x_p , y_p , θ_7). El algoritmo fue desarrollado en Matlab. En el modelo matemático de la cinemática inversa se determinan los ángulos de entrada del mecanismo, partiendo de una posición en particular de la plataforma móvil que dependen de la trayectoria que ésta describa.

El algoritmo desarrollado determina el voltaje de control requerido por el servomotor; esta información es enviada a los tres servomotores mediante el puerto de comunicación USB2 Dynamixel. La tarjeta USB2 Dynamixel transforma un puerto USB en un puerto serial y permite el enlace entre los servos RX 64 y el ordenador. El servomotor RX 64 tiene un rango de trabajo de 0° a 300° , con un paso de $0,29^\circ$ y con un par máximo de 64 kg cm.

Cada servomotor está encargado del control de movimiento de los eslabones conductores, consiguiendo así que la plataforma móvil se ubique en la posición y pose deseada. Los resultados obtenidos de los modelos matemáticos: cinemática directa e inversa y dinámica inversa fueron resueltos por medio de Matlab y verificados en SolidWorks.

V. INTERFAZ GRAFICA

El desarrollo de la interfaz fue realizado en el programa Matlab, el cual permite una mejor interacción del usuario. El programa permite visualizar las trayectorias predeterminadas, el par motor, las coordenadas de la plataforma móvil y permite visualizar el comportamiento cinemático de las trayectorias, cuyos datos son entregados por los actuadores y la cinemateca inversa.

En la Figura 3 se presenta la interfaz desarrollada para el control del manipulador 3. El diseño de la interfaz gráfica le permite al usuario generar un método de interacción entre el usuario y el manipulador paralelo plano de 3GDL, facilitando así la manipulación de este. Esta interfaz se desarrolló en el software Matlab a manera de ejecutable.

En la interfaz gráfica el usuario tendrá acceso a un menú desplegable en el que podrá encontrar información acerca del manipulador, así como también el manual de usuario de los servomotores RX-64 y de la tarjeta de control USB2Dynamixel.



Figura 3: Panel de inicio

Desde el panel de inicio se puede ingresar al panel de control (figura 4); en este panel el usuario puede acceder a la programación del control de posición del manipulador. El usuario puede seleccionar una configuración de trayectoria del manipulado; se dispone de una trayectoria circular, triangular y rectangular. El usuario puede observar varios cuadros de texto en los que se muestran los datos de entrada y salida de los servomotores, algunos de estos datos se muestran gráficamente

para que el usuario pueda evaluar el comportamiento real e ideal del manipulador.

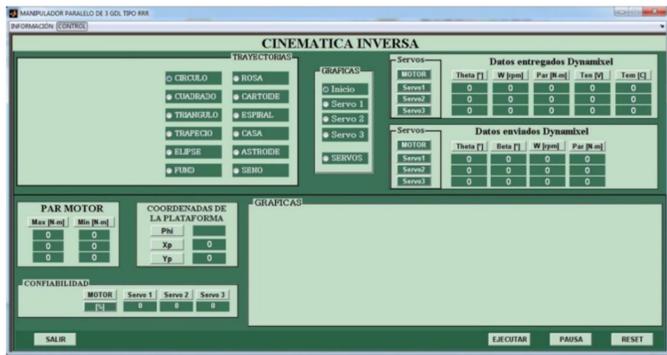


Figura 4: Panel de inicio

VI. RESULTADOS

Para validar el funcionamiento de la interfaz gráfica y realizar la comparación entre el modelo teórico y el comportamiento del manipulador, se eligió una trayectoria circular, ver figura 5. El algoritmo desarrollado encuentra la solución del modelo matemático de la cinemática inversa a partir de la trayectoria elegida. Los datos de salida del algoritmo son los movimientos de rotación requeridos en los actuadores para obtener el movimiento especificado. Estos valores son traducidos al lenguaje de la máquina mediante el enlace de comunicación de la tarjeta USB2Dynamixel, y son enviados a los servomotores RX-64, los cuales a su vez retornan los valores reales de posición, velocidad angular, tensión y temperatura.

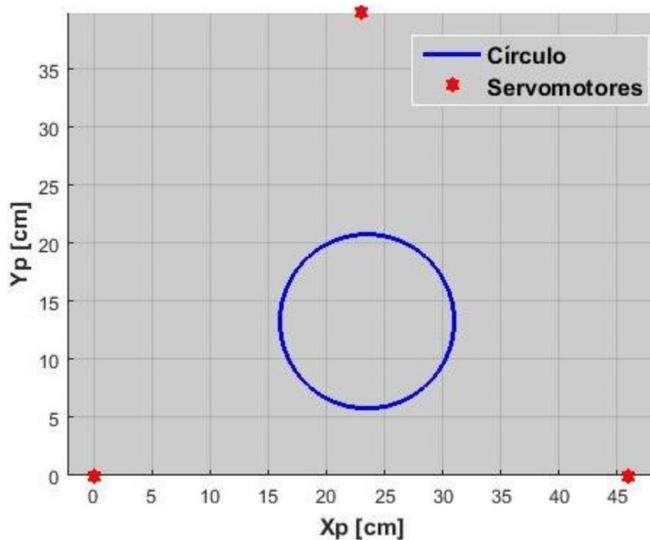


Figura 5: Trayectoria circular

Los valores del desplazamiento angular y par de torsión obtenidos con el modelado matemático de la cinemática inversa y los valores reales retornados por los servomotores se grafican en función de las posiciones, con el propósito de estimar el

comportamiento ideal del manipulador respecto al real. En la figura 6 se presenta el desplazamiento angular ideal y real del servomotor 2.

En la figura 6, en el desplazamiento angular ideal y real se puede apreciar que los valores angulares teóricos tienen un comportamiento aproximado al de los valores angulares reales, lo cual valida el modelo matemático de la cinemática inversa utilizado para el control de posición angular del mecanismo. También se puede observar que la diferencia que existe entre estas dos graficas es más notable cuando el manipulador adopta posiciones extremas, es decir cuando se acerca a los límites del área de trabajo.

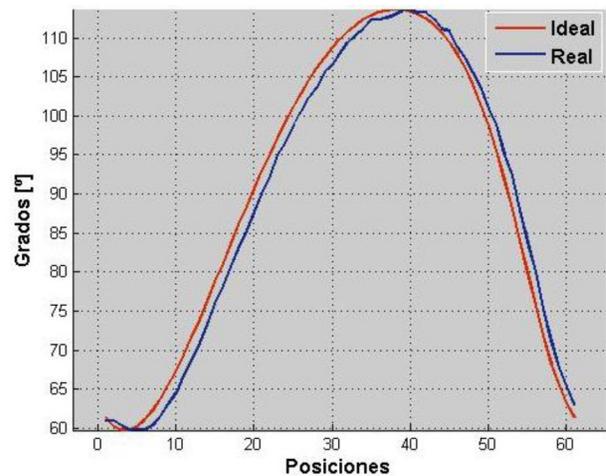


Figura 6: Desplazamiento angular ideal y real del servomotor 2

El servo RX 64 tiene un microcontrolador incorporado que tiene la capacidad de realizar un seguimiento de su velocidad, la temperatura, la posición del eje, el voltaje y la carga. En las figuras 7, 8 y 9 se presentan el valor real y el ideal del par requerido en los tres servomotores para seguir la trayectoria elegida.

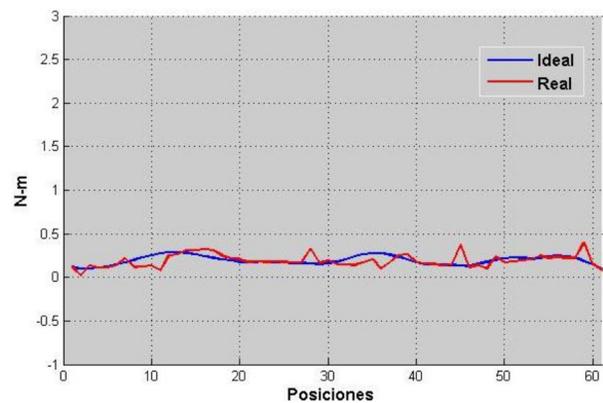


Figura 7: Par torsor ideal y real del servomotor 1

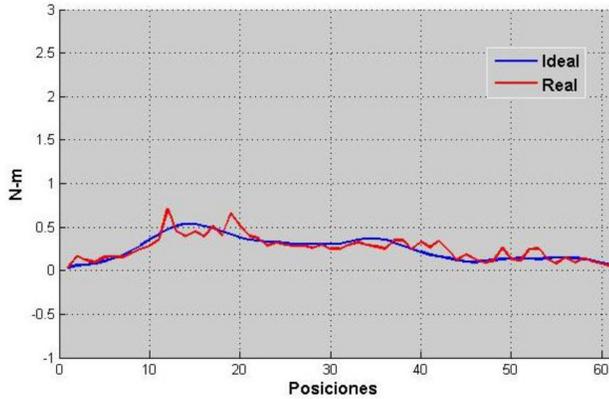


Figura 8: Par torsor ideal y real del servomotor 2

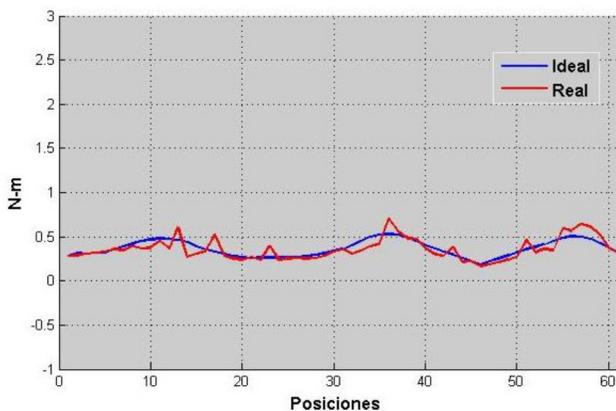


Figura 9: Par torsor ideal y real del servomotor 3

En las figuras del par ideal y real de los servomotores del manipulador, se observa que el par real suministrado por los servomotores en algunas posiciones es mayor, esto debido a que existe un contacto de fricción entre el soporte y el bastidor primario, este efecto no es considerado en el análisis de la dinámica inversa, lo que justifica en gran medida el desfase entre las gráficas.

VII. DISCUSIÓN

El sistema de control implementado para el mecanismo plano de 3 grados de libertad, utilizando las ecuaciones de la cinemática inversa e implementado mediante Matlab, muestra la validez del método geométrico utilizado. La comparación en las gráficas obtenidas de desplazamiento angular y par de torsión de los servomotores indica la bondad del modelo. La interfaz desarrollada es una herramienta pedagógica valiosa en la que se observan las variables de operación del manipulador, a la vez que permite el control del manipulador.

VIII. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo brindado por la Vicerrectoría de Investigación y Extensión de la Universidad Tecnológica de Pereira, al proyecto titulado *Desarrollo de manipulador paralelo de tipo planar y espacial con visión artificial para alternativa de automatización y actualización para la industria*, código 8-16-3.

IX. REFERENCIAS

- [1]. J. P. Merlet, *Parallel robots*, Dordrecht, Springer: 2006, p.8.
- [2]. X. Wu, Z. Xie, J. Kepler, and S. Bai, "A parametric model of 3-PPR planar parallel manipulators for optimum shape design of platforms," *Mech. and Mach. Theory*, vol 118, pp. 139-157, Dec, 2017.
- [3]. S. Liu, Z. C. Qiu, and X. M. Zhang, Singularity and path-planning with the working mode conversion of a 3-DOF 3-RRR planar parallel manipulator, "*Mech. and Mach. Theory*, vol 107, 166-188, Jan, 2017.
- [4]. A. Agarwal, C. Nasa y S. Bandyopadhyay, "Dynamic singularity avoidance for parallel manipulators using a task-priority based control scheme," *Mech. and Mach. Theory*, vol 96, pp. 107-126, Feb, 2016.
- [5]. N. Binaud, S. Caro, and P. Wenger, "Comparison of 3-RPR planar parallel manipulators with regard to their kinetostatic performance and sensitivity to geometric uncertainties," *Meccanica*, vol 46 (1), pp. 75-88, Feb, 2011.
- [6]. Y Singh, V. Vinoth, R. Kiran, J. V Mohanta, and S. Mohan, "Inverse dynamics and control of a 3-DOF planar parallel (U-shaped 3-PPR) manipulator," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 34, pp. 164-179, Aug, 2015.
- [7]. K. Arrouk, B. Bouzgarrou y G. Gogu, "CAD-based unified graphical methodology for solving the main problems related to geometric and kinematic analysis of planar parallel robotic manipulators," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, pp. 302-321, Feb, 2016.
- [8]. S. M. Assal, "Non-Singular 3-DOF Planar Parallel Manipulator with High Orientational Capability for a Hybrid Machine Tool," presented at the 16th International Conference on Advanced Robotics (ICAR), Montevideo, Uruguay, 2013.
- [9]. M. Litim, B. Ilouche, A. Omari, A. Dequidt y L. Vermeiren, "Sliding mode control of Biglide planar parallel manipulator," 11th International Conference on Informatics in control, Automation and Robotics (ICINVO), pp. 303-310, Viena, Austria, 2014.
- [10]. P. S. Londhe, Y. Singh, M. Santhakumar, B. M. Patre y L. M. Waghmare, "Robust nonlinear PID-like fuzzy logic control of a planar parallel (2-PRP-PPR) manipulator," *ISA Transactions*, pp. 218-232, Jul, 2016.
- [11]. Q. D. Le, H. J. Kang, and T. D. Le, "Adaptive extended computed control or 3 DOF planar parallel

manipulators using neural network and error compensator,” 12th International Conference on Intelligent Computing ICIC 2016, In Intelligent Computing Methodologies, pp 437-448 Lanzhou, China, 2016.

- [12]. K. Lipinski, “Modeling and Control of a redundantly actuated variable mass 3RRR planar manipulator controlled by a model-based feedforward and a model-based-proportional-derivative feedforward-feedback controller.,” *Mechatronic*, vol 37, pp. 42-53, Aug, 2016.