

Seguimiento de trayectoria de un robot planar 2GDL en Hardware-In-the-Loop[★]

Noemi Hernández-Oliva^{*} Maria Bárbara Calva-Yañez^{**}
Germán Ardul Muñoz-Hernández^{***}
Edgar Alfredo Portilla-Flores^{**}

^{*} Instituto Politécnico Nacional CECyT 2 Miguel Bernard, Ciudad de México, México (e-mail: nhernandez@ipn.mx).

^{**} Instituto Politécnico Nacional CIDETEC, Ciudad de México, México (e-mail: b_calva@hotmail.com, aportilla@ipn.mx)

^{***} Benemérita Universidad Autónoma de Puebla FCE, Puebla, México (e-mail: gmunoz@ece.buap.mx)

Resumen: En este trabajo se presenta la implementación de una plataforma Hardware-In-the-Loop (HIL) para aplicaciones de control, mediante el uso de dos tarjetas electrónicas Discovery Kit comunicadas en forma serial. Para el desarrollo de la plataforma se programaron en Simulink de Matlab tanto el modelo dinámico de la planta como la ley de control arco tangente propuesta, además de un observador con el fin de obtener los datos provenientes de la comunicación entre las tarjetas. Para validar el comportamiento del sistema HIL implementado se utilizó una trayectoria tipo flor de ocho pétalos, y se realizó una simulación completa del sistema con Simulink y otra mediante el conjunto de herramientas Robotics de Matlab. La comparación de resultados mostró que el comportamiento es similar, por lo que el sistema HIL es una opción viable para verificar leyes de control o la modificación de alguno de los parámetros en la planta sin necesidad de contar con la implementación real.

Keywords: Robot planar 2GDL, ley de control arco tangente, Hardware-In-the-Loop, modelo dinámico, tarjeta electrónica.

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, el desarrollo de sistemas digitales buscando un mejor desempeño ha propiciado el incremento de propuestas de diseño de controladores en el área de la robótica. Estas propuestas se enfocan a diversas tareas y tipos de controladores; en Ding et al. (2018) se propone un control de seguimiento de la trayectoria de un robot móvil por medio de una ley de control de modo deslizante tradicional, que es sustituida por una función tangente hiperbólica simulada en Matlab. En Pedroso et al. (2013), se presenta un control adaptativo que integra dos estrategias de control lineal simuladas en Matlab, aplicadas a un convertidor reductor con una función de peso tangente hiperbólica. Nascimento et al. (2013) proponen un enfoque para la implementación de una función tangente hiperbólica en el hardware con un modelo polinomial, con la ventaja de requerir menos memoria. Munasinghe and Nakamura (2007) presentan un nuevo tipo de control de cumplimiento de posición de fuerza, donde la ganancia del lazo de posición se reduce de acuerdo con la reducción de una función de tangente inversa propuesta.

^{*} Instituto Politécnico Nacional - Grupo de Investigación e Innovación en Mecatrónica (GIIM)

Moreno-Valenzuela et al. (2008) presentan un robot manipulador para seguimiento de trayectoria, aplicando un controlador proporcional derivativo con compensación de gravedad (PD+G), un controlador de Loría y Nijmeijer (LN) y un rediseño de este controlador (LNR). Ortiz et al. (2016) presentan el control de posición de un robot manipulador con un regulador del tipo PD+G con estructuras hiperbólicas. Urrea and Kern (2016) consideran la evaluación y comparación de diversos controladores para un manipulador redundante tipo SCARA de cinco grados de libertad. En López-Pérez et al. (2008), se desarrolla una ley de control de posición para un manipulador basada en funciones trigonométricas hiperbólicas, mientras que Leśniewski and Bartoszewicz (2015) proponen una ley de control por modos deslizantes discreta basada en una función tangente hiperbólica para sistemas con y sin perturbaciones. En Jimenez-Urbe et al. (2015), se presenta la comparación de un control PID y un PD con funciones del tipo tangente hiperbólica aplicado a un robot 3GDL, el cual es validado en dos tarjetas de adquisición de datos.

El desarrollo de controles mediante el uso de dispositivos digitales ha propiciado la generación de técnicas para su validación (Gregoire et al. (2014)). Así, se puede definir al Hardware-In-the-Loop (HIL) como la interacción

de componentes virtuales y reales, donde el sistema de control puede aplicarse a una planta virtual conteniendo el modelo dinámico del sistema, además de actuadores y sensores modelados de forma virtual o física, con lo cual se verifique su rendimiento y comportamiento. Esta técnica puede emplearse para validar leyes de control; en Shi et al. (2016), se propone un modelo de tangente hiperbólica difusa para el rastreo de caminos en un camión minero articulado validado en HIL. En Sahu et al. (2015), se presenta un modelo de control predictivo multi paramétrico (mpMPC) con un PI en cascada aplicado al control de la temperatura del aire de suministro en sistemas de aire acondicionado, utilizando HIL. Pratt et al. (2017) proponen un modelo de control predictivo en HIL para recursos de distribución de energía y de respuesta de demanda para casas simuladas y sistemas de aire acondicionado.

En el presente trabajo se implementa una ley de control para un robot planar de dos grados de libertad utilizando una función arco tangente, en una plataforma HIL programada en Simulink de Matlab en dos tarjetas electrónicas comunicadas en forma serial. La organización del documento es la siguiente: en la Sección 2 se describe el modelo dinámico del robot planar y la ley de control a implementar; en la Sección 3 se muestra el desarrollo de la plataforma HIL en las tarjetas; en la Sección 4 se analizan los resultados obtenidos de la emulación y la simulación del robot; finalmente, en la Sección 5 se exponen las conclusiones y trabajos a futuro.

2. DINÁMICA DEL ROBOT PLANAR 2GDL

Un robot se define como un manipulador multifuncional reprogramable diseñado para manejar materiales, herramientas o dispositivos, a partir de movimientos con los cuales se obtenga un buen desempeño en una gran variedad de tareas (Spong and Vidyasagar (1989)).

2.1 Modelo dinámico

Para definir el comportamiento de un robot es necesario describirlo con un modelo matemático desde una ley física. La dinámica de un robot rígido serial de n -enlaces (Kelly et al. (2005)) se describe de forma general con la ecuación (1), donde M es la matriz de inercias, C es la matriz de fuerzas centrípetas y de Coriolis, B es la matriz de fricción viscosa y G corresponde al par gravitacional:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + B(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau \quad (1)$$

Para un robot planar de 2 GDL como el que se muestra en la Fig. 1, su modelo dinámico se describe en el espacio de estados para las posiciones de los eslabones q_1 y q_2 , donde las velocidades están dadas por \dot{q}_1 y \dot{q}_2 , como indica la ecuación (2) (Reyes Cortés (2011)). Las expresiones (3) a (6) corresponden a la masa (m_1 , m_2) y longitud de los eslabones (r_1 , r_2), fricción viscosa (b_1 , b_2), fuerza de gravedad (g), longitud del centro de masa de los eslabones (r_{c1} , r_{c2}), inercia de los eslabones (I_1 , I_2), constantes proporcional y derivativa del controlador (K_p , K_d).



Figura 1. Robot planar 2GDL (Reyes Cortés (2011))

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} q \\ \dot{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M(q)^{-1}[\tau(t) - C(q, \dot{q})\dot{q} - B(q, \dot{q})\dot{q} - G(q)] \\ \dot{q} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$m_{11} = m_1 * r_{c1}^2 + m_2 * r_1^2 + m_2 * r_{c2}^2 + 2 * m_2 * r_1 * r_{c2} * \cos(q_2) + I_1 + I_2$$

$$m_{12} = m_2 l_{c2}^2 + m_2 l_1 l_{c1} \cos(q_2) + I_2$$

$$m_{21} = m_2 l_{c2}^2 + m_2 l_1 l_{c1} \cos(q_2) + I_2$$

$$m_{22} = m_2 l_{c2}^2 + I_2$$

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$c_{11} = -2m_2 l_1 l_{c2} \sin(q_2) \dot{q}_2$$

$$c_{12} = -m_2 l_1 l_{c2} \sin(q_2) \dot{q}_2$$

$$c_{21} = m_2 l_1 l_{c2} \sin(q_2) \dot{q}_1$$

$$c_{22} = 0$$

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$b_{11} = b_1$$

$$b_{12} = 0$$

$$b_{21} = 0$$

$$b_{22} = b_2$$

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$g_{11} = (m_1 * r_{c1} + m_2 * r_1) * g * \sin(q_1) + m_2 * g * r_{c2} * \sin(q_1 + q_2)$$

$$g_{21} = m_2 * g * r_{c2} * \sin(q_1 + q_2)$$

$$G = \begin{bmatrix} g_{11} \\ g_{21} \end{bmatrix} \quad (6)$$

2.2 Ley de control propuesta

La ecuación (7) presenta la forma general de una ley de control que utiliza la función arco tangente, mientras que la ecuación (8) corresponde a la ley de control tipo arco tangente implementada en el presente trabajo:

$$\tau = K_p * \text{atan}(e) - K_d * \text{atan}(\dot{q}) + G \quad (7)$$

$$\tau = K_p * \text{atan}(\lambda * e) - K_d * \text{atan}(\gamma * \dot{q}) + G \quad (8)$$

donde e es el error de posicionamiento dado por $e = (q_d - q)$, q_d es la posición deseada, λ es una matriz de conversión (radianes, grados) y γ es una matriz unitaria que permite expresar en los mismos términos a la segunda parte de la ecuación de la ley de control.

3. HARDWARE-IN-THE-LOOP (HIL)

HIL es una técnica alternativa de bajo costo cuando se requiere ajustar algún parámetro del controlador en una planta real (Gregoire et al. (2014)), ya que dicha modificación puede realizarse al emular su comportamiento en un dispositivo electrónico en repetidas ocasiones, sin alterar la planta física. Para el caso del robot planar de este trabajo, se propuso una plataforma utilizando dos tarjetas electrónicas Discovery Kit de ST Microelectronics, las cuales cuentan con las siguientes características:

- Microcontrolador STM32F407VGT6 de 32-bit ARM Cortex-M4.
- Memoria flash de 1 Mbyte.
- Herramienta de depuración integrada ST-LINK.
- Acelerómetro digital ST-MEMS.
- Micrófono digital.
- DAC de audio con controlador de altavoz de clase D integrado.
- 8 LED y 2 botones pulsadores.
- Conector USB OTG micro-AB.
- Fuente de alimentación de 3V a 5V.

Las tarjetas se programaron en Simulink-Matlab versión 2018a y el blockset libre de Waijung, el cual utiliza el codificador embebido al momento de descargar programas a la tarjeta Discovery Kit. Para implementar la plataforma se realizaron tres programas; el primero incluye a la planta (modelo dinámico del robot planar) mientras que el segundo corresponde a la ley de control (arco tangente), siendo ambos programas descargados a las tarjetas electrónicas. Un tercer programa denominado observador (programado directamente en Simulink) monitorea el comportamiento del sistema de control y grafica los resultados, los cuales son leídos por medio de la comunicación serial entre las tarjetas y la computadora. Dicha comunicación requiere una velocidad de transmisión de 115,200 baudios, mientras que el tiempo de integración para ambos sistemas (simulado y plataforma HIL) es de $t = 0,001s$, lo que permite su sincronización.

En la Fig. 2 se muestra el programa realizado para la planta, el cual consta del modelo dinámico del robot planar realizado dentro de un bloque de función y los correspondientes bloques de comunicación. En la Fig. 3 aparece el programa para la ley de control, el cual consta de la función arco tangente en un bloque de función con los correspondientes bloques de comunicación con la tarjeta modelo. Por su parte, la Fig. 4 muestra el programa correspondiente al observador, desde el cual se visualizan los datos provenientes de la comunicación entre las tarjetas de la planta y el control.

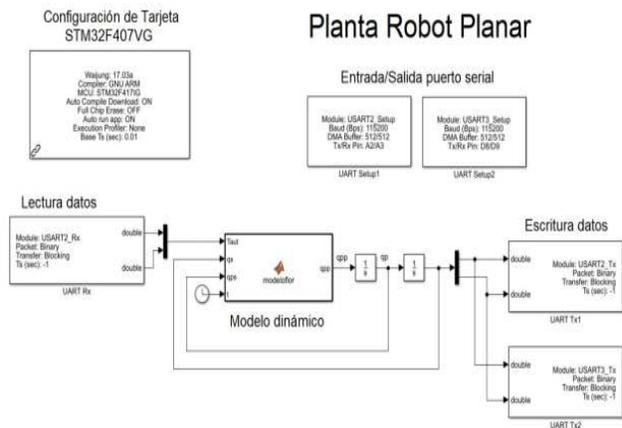


Figura 2. Programa modelo

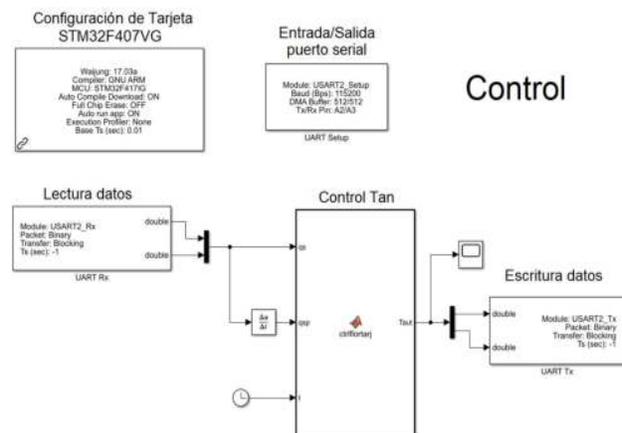


Figura 3. Programa control

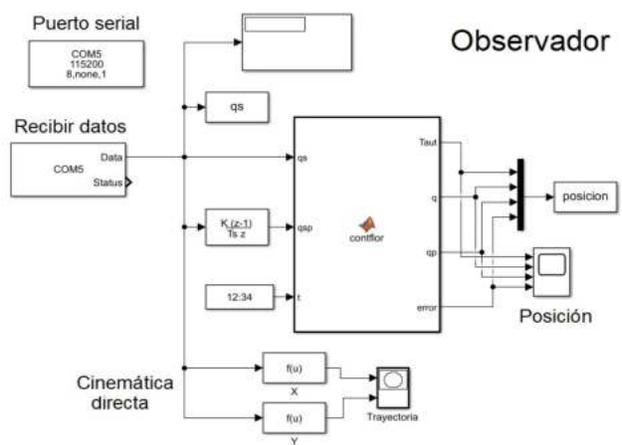


Figura 4. Programa observador

La Fig. 5 muestra la comunicación serial de la plataforma HIL con base en el puerto USART de la tarjeta, requiriendo un adaptador USB-serial para conectarse a la computadora donde se obtienen los datos a graficar. Finalmente,

la Fig. 6 presenta el diagrama con la interacción entre las señales en la plataforma HIL (que envía y recibe los parámetros del torque, posición y velocidad) y el observador (que grafica la cinemática directa, posición, torque, error de posición y la integral del error al cuadrado).

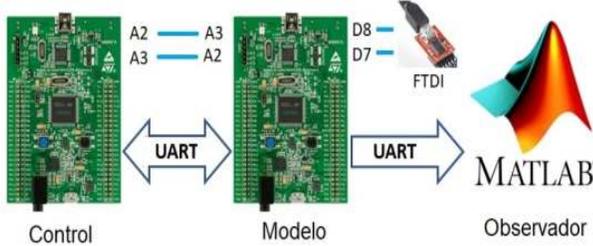


Figura 5. Conexiones físicas plataforma HIL

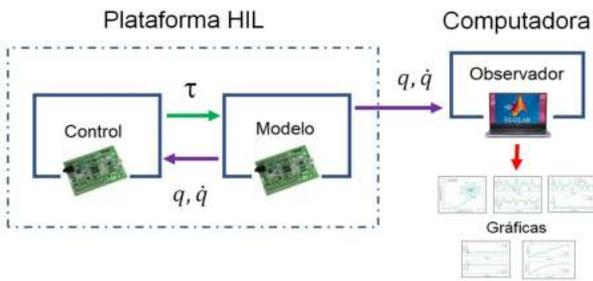


Figura 6. Conexiones físicas plataforma HIL

4. RESULTADOS OBTENIDOS

Para comparar los resultados de la plataforma HIL, se realizó una simulación completa del sistema utilizando Simulink de Matlab y verificado con el conjunto de herramientas Robotics. Los parámetros de la simulación son: masa $m_1 = 23,902 \text{ kg}$ y $m_2 = 3,880 \text{ kg}$ y longitud de los eslabones $r_1 = 0,45 \text{ m}$ y $r_2 = 0,45 \text{ m}$, fricción viscosa $b_1 = 2,288 \text{ Ns/m}$ y $b_2 = 0,175 \text{ Ns/m}$, fuerza de gravedad $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, longitud del centro de masa de los eslabones $r_{c1} = 0,091 \text{ m}$ y $r_{c2} = 0,048 \text{ m}$, inercia de los eslabones $I_1 = 1,266 \text{ kgm}^2$, $I_2 = 0,093 \text{ kgm}^2$, constantes del controlador $K_p = [100 \ 0; \ 0 \ 15]$ y $K_d = [100 \ 0; \ 0 \ 15]$.

Los valores para la trayectoria propuesta son: coordenada en $x=0,4$, coordenada en $y=0,4$, radio $rc=0,2$, $\alpha=0,075$ y $\beta=4$. La trayectoria deseada en términos de las coordenadas se presenta en el sistema de ecuaciones (9), mientras que para determinar la posición articular de los eslabones se emplea la cinemática inversa que se presenta en el sistema de ecuaciones (10):

$$x = xc + \alpha + (rc * (\cos(t))) * (\sin(\beta * t)) \quad (9)$$

$$y = yc + \alpha + (rc * (\sin(t))) * (\sin(\beta * t))$$

$$q_{2d} = \text{acos} \left(\frac{x^2 + y^2 - r_1^2 - r_2^2}{2 * r_1 * r_2} \right) \quad (10)$$

$$q_{1d} = \text{atan} \left(\frac{y}{x} \right) - \text{atan} \left(\frac{r_2 * \sin(q_{2d})}{r_1 + r_2 * \cos(q_{2d})} \right)$$

Como se mencionó anteriormente, los resultados de la plataforma HIL propuesta y emulada con las dos tarjetas electrónicas se compararon con los de la simulación en Simulink, como se muestra en la Fig. 7:

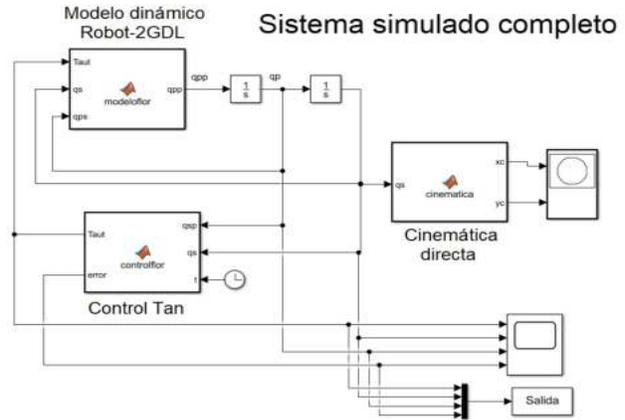


Figura 7. Programa simulación completa

La Fig. 8 muestra la plataforma HIL y sus correspondientes conexiones físicas, mientras que la Fig. 9 presenta el resultado obtenido de la simulación utilizando Robotics, en donde se puede validar que el robot sigue la trayectoria propuesta dentro de su espacio de trabajo.

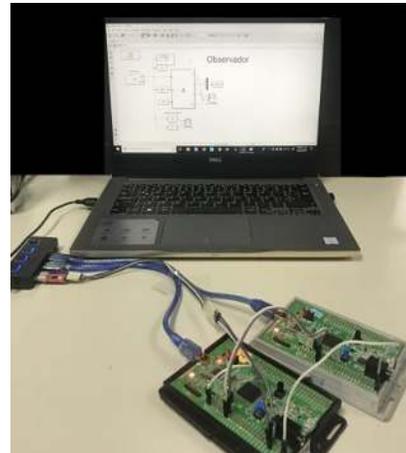


Figura 8. Plataforma HIL propuesta

La Fig. 10 muestra los resultados de la emulación del sistema con la plataforma y de la simulación; en ambos casos el robot es capaz de seguir la trayectoria deseada y formar una flor de ocho pétalos. Este tipo de trayectorias de alta complejidad ha sido tratado por Reyes Cortés (2011) mediante una simulación completa en Matlab. La Fig. 11 presenta el comportamiento de la posición en ambos eslabones. Para el eslabón 1 (q_1) y el eslabón 2 (q_2), la posición que se sigue es prácticamente la misma entre el sistema emulado y el simulado. En la Fig. 12 se observan los torques necesarios en los motores del

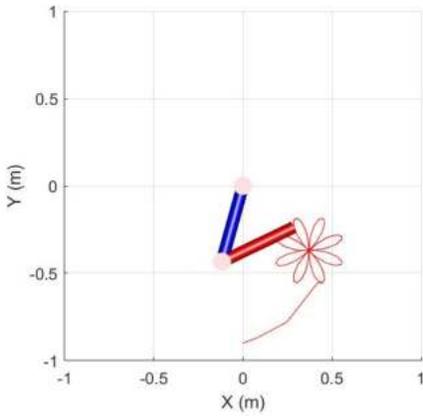


Figura 9. Simulación en Robotics toolbox

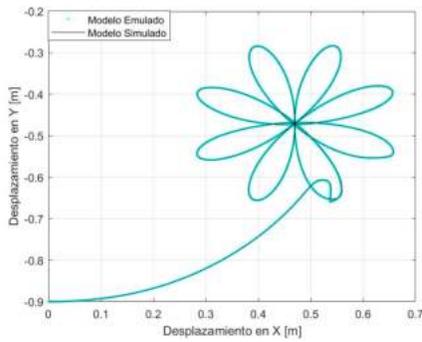


Figura 10. Trayectoria deseada flor de ocho pétalos

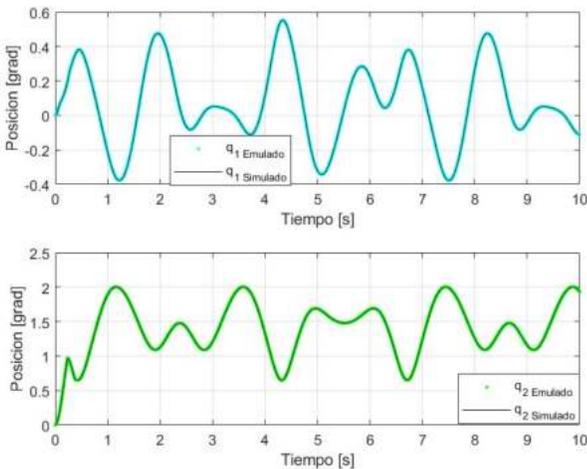


Figura 11. Posiciones de los eslabones

robot para desplazarse a lo largo de la trayectoria de una flor propuesta; al igual que con las posiciones, en los torques se requiere un mayor esfuerzo en q_2 para realizar el seguimiento en ambos sistemas. En la Fig. 13 se ve que el error converge a cero en menos de un segundo para q_2 y en aproximadamente diez segundos para q_1 en

ambos sistemas. Para analizar el sistema mediante el error dinámico se obtuvo la integral del error al cuadrado de la posición de los eslabones, donde q_1 requiere un valor de 0,004 y q_2 un valor de 0,2 para que el sobretiro en la respuesta de salida sea pequeño (Fig. 14).

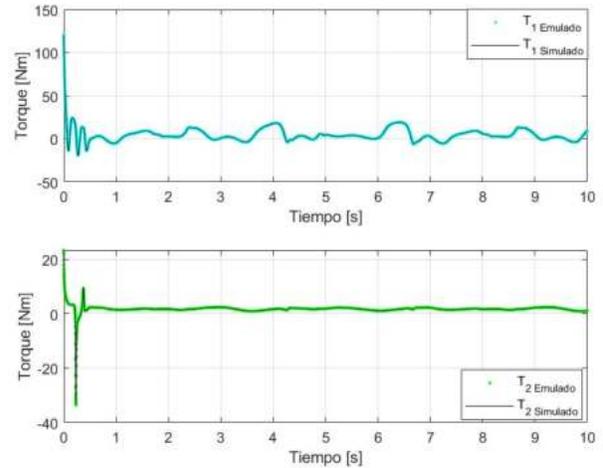


Figura 12. Torque requerido por los motores en los eslabones

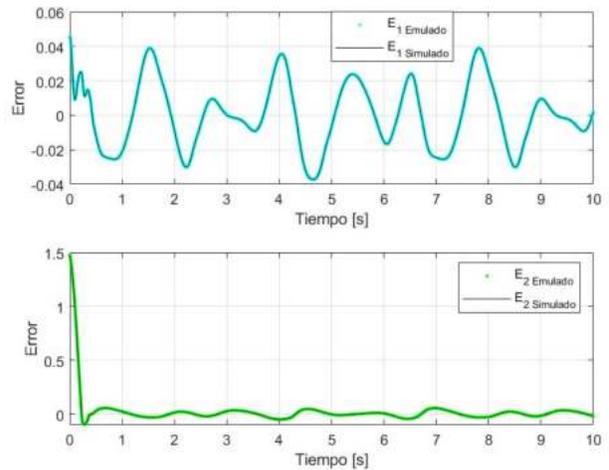


Figura 13. Error de posición de los eslabones

5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se desarrolló y validó una plataforma implementada en HIL con dos tarjetas electrónicas Discovery Kit de STM Microelectronics, utilizando comunicación serial entre las tarjetas y la computadora, con la finalidad de enviar y recibir datos entre ellos. En los resultados obtenidos se observa que los sistemas emulado y simulado presentan comportamientos similares y un sobretiro pequeño. La implementación de la planta a partir

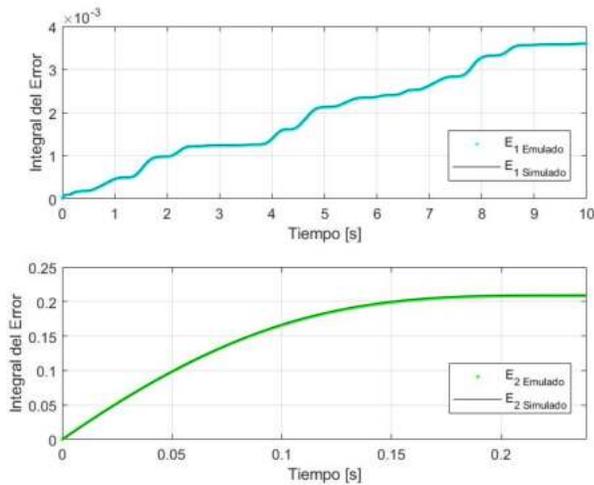


Figura 14. Integral del error cuadrático de posición

del modelo dinámico y de la ley de control deseada en las tarjetas electrónicas usando la técnica de HIL, permite validar el comportamiento del sistema sin necesitar la planta real, pudiendo cambiar las leyes de control y los parámetros de la planta, por lo que dicha técnica es una alternativa viable de diseño a bajo costo.

Finalmente, como trabajo a futuro se plantea complementar el modelo utilizado incluyendo el efecto de los actuadores y sensores del sistema y realizando la comparación de los resultados obtenidos en la emulación con los generados por la planta real.

ACKNOWLEDGEMENTS

El primer autor agradece al CONACyT por la beca para estudios de doctorado. Todos los autores agradecen al Instituto Politécnico Nacional el apoyo por medio del proyecto SIP20196288.

REFERENCIAS

Ding, Y., Liu, C., Lu, S., and Zhu, Z. (2018). Hyperbolic sliding mode trajectory tracking control of mobile robot. *Advances in Engineering Research. 3rd International Conference on Electrical, Automation and Mechanical Engineering (EAME 2018)*, 127, 234–238.

Gregoire, L.A., Bélanger, J., Dufour, C., and Blanchette, H.F. (2014). Real-time simulation of modular multilevel converters (mmcs). In H. Abu-Rub, M. Malinowski, and K. Al-Haddad (eds.), *Power Electronics for Renewable Energy Systems, Transportation and Industrial Applications*, 591–607. John Wiley & Sons, Ltd.

Jimenez-Uribe, A., Serna-Hernández, L.F., Hernández-Paredes, J.M., and Muñoz-Barrón, B. (2015). Comparative study of a pid and pd control bounded by hyperbolic tangent function in robot 3 dof. In *2015 International Conference on Mechatronics, Electronics and Automotive Engineering (ICMEAE)*, 199–204.

Kelly, R., Davila, V.S., and Perez, J.A.L. (2005). *Control of Robot Manipulators in Joint Space*. Springer.

Leśniewski, P. and Bartoszewicz, A. (2015). Hyperbolic tangent based switching reaching law for discrete time sliding mode control of dynamical systems. In *2015 International Workshop on Recent Advances in Sliding Modes (RASM)*, 1–6.

López-Pérez, E., Sánchez-Sánchez, P., Michua-Camarillo, A., Reyes-Cortés, F., and Cebada-Reyes, J.G. (2008). A new control structure for robot manipulators based on the trigonometric functions $\text{sech}+\sinh$. *Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference 2008*, 490–495.

Moreno-Valenzuela, J., Santibáñez, V., and Campa, R. (2008). On output feedback tracking control of robot manipulators with bounded torque input. *International Journal of Control, Automation, and Systems*, 6, 76–85.

Munasinghe, S.R. and Nakamura, M. (2007). Hyperbolic tangent function based force-position compliant controller for robotic devices. In *2007 International Conference on Control, Automation and Systems*, 2397–2401.

Nascimento, I., Jardim, R., and Morgado-Dias, F. (2013). A new solution for the hyperbolic tangent implementation in hardware: Polynomial modeling of the fractional exponential part. *Neural Computing and Applications*, 23, 363–369.

Ortiz, T.J., Arroyo, O.R., Jaime, J.C.M., Díaz, M.L., and Cortés, F.R. (2016). Control de posición hiperbólico de robots manipuladores. *La Mecatrónica en México*, 5(1), 1–9.

Pedroso, M.D., Nascimento, C.B., Tuset, A.M., and dos Santos Kaster, M. (2013). A hyperbolic tangent adaptive pid + lqr control applied to a step-down converter using poles placement design implemented in fpga. *Mathematical Problems in Engineering*, 1–8.

Pratt, A., Ruth, M., Krishnamurthy, D., Sparn, B., Lunacek, M., Jones, W., Mittal, S., Wu, H., and Marks, J. (2017). Hardware-in-the-loop simulation of a distribution system with air conditioners under model predictive control. In *2017 IEEE Power Energy Society General Meeting*, 1–5.

Reyes Cortés, F. (2011). *Robótica. Control de robots manipuladores*. Alfaomega Grupo Editor, México.

Sahu, C., Radhakrishnan, T.K., and Sivakumaran, N. (2015). Real time closed loop data based estimation and explicit model based control of an air conditioning system implemented in hardware in loop scheme. In *2015 International Conference on Robotics, Automation, Control and Embedded Systems (RACE)*, 1–7.

Shi, G., Yang, J., Zhao, X., Li, Y., Zhao, Y., and Li, J. (2016). A H -infinity control for path tracking with fuzzy hyperbolic tangent model. *Journal of Control Science and Engineering*, 1–9.

Spong, M.W. and Vidyasagar, M. (1989). *Robot Dynamics and Control*. Wiley.

Urrea, C. and Kern, J. (2016). Design, simulation and comparison of controllers for a redundant robot. *Case Studies in Mechanical Systems and Signal Processing*, 3, 9–21.