

IDENTIFICACIÓN Y CONTROL DE UN SISTEMA ROBÓTICO UTILIZANDO CONTROL FRACCIONARIO

Jairo Bernardo Viola Villamizar¹. Luis Ángel Silva². Grupo de Investigación Control Industrial Universidad Pontificia Bolivariana.

Recibido abril 6 de 2015 – Aceptado mayo 9 de 2015

<http://dx.doi.org/10.18566/puente.v9n2.a05>

Resumen— En este artículo se presenta la identificación y control de una articulación robótica de 1 grado de libertad empleando controladores fraccionarios. La identificación de los parámetros del modelo dinámico de la articulación emplea el método de los mínimos cuadrados recursivos. El diseño del controlador utiliza un modelo linealizado del sistema robótico obtenido mediante el método de linealización entrada salida, a partir del cual se diseñan los controladores PID fraccionario y PID clásico. Se utiliza un modelo dinámico de co-simulación ADAMS-MATLAB para evaluar el desempeño de cada sistema de control teniendo en cuenta perturbaciones externas de ruido y carga. Los resultados obtenidos muestran que el controlador PID fraccionario presenta un mejor comportamiento ante la presencia de perturbaciones externas y un menor consumo de energía.

Palabras clave— Modelo de co-simulación ADAMS-MATLAB, FOPID, Robótica, Linealización entrada-salida

Abstract—In this paper the identification and control of a robotic system of one degree of freedom using fractional controllers is presented. The identification of the parameters of the dynamic model of the robotic system employs the method of recursive least squares. The controller design uses a linearized model of the robotic system obtained by the method of input-output linearization, from which the fractional PID and classic PID controllers are designed. An ADAMS-MATLAB co-simulation model is used to evaluate the performance of each control system taking into account external perturbations of noise and load. The results show that the fractional PID controller has a better performance in the presence of external perturbations and less energy consumption.

Keywords— ADAMS-MATLAB co-simulation model, FOPID, robotics, Input-Output Linearization.

I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas robóticos presentan un alto grado de complejidad, ya que este tipo de sistemas son multivariantes, no lineales y existe un alto grado de interacción entre los diferentes eslabones que componen el robot. Esto dificulta la implementación de estrategias de control clásicas, las cuales requieren un modelo lineal del sistema para el diseño del controlador, haciendo que los controladores del robot sean ajustados de forma heurística para ciertas condiciones de operación, dentro de las cuales no se consideran perturbaciones externas o incertidumbres paramétricas que afectan el funcionamiento del sistema robótico.

Dentro de las estrategias de control más empleadas en robots manipuladores se encuentra, compensación por gravedad, PID y par calculado [1]. El uso de controladores fraccionarios para el control de sistemas robóticos es un tema de investigación que ha tomado fuerza en los últimos años dada su robustez ante perturbaciones externas e incertidumbres paramétricas del modelo. En [2] se plantea el control visual de un sistema robótico de 6 grados de libertad (gdL) utilizando controladores PI fraccionarios (FOPI). En [3] se plantea el análisis de robustez de un controlador PID fraccionario (FOPID) utilizando técnicas de control difuso para un manipulador robótico de 2gdL. En [4] se realiza el análisis dinámico de un sistema robótico tipo ave utilizando controladores fraccionarios. En [5] se muestra el control de un manipulador robótico de 3gdL utilizando algoritmos de control fraccionario. En [6] se muestra el control fraccionario de posición y velocidad de un grupo de robots cooperativos. En [7] se presenta el control fraccionario de un manipulador robótico teniendo en cuenta las no linealidades del sistema y las incertidumbres paramétricas del mismo.

En este artículo se propone el diseño de controladores fraccionarios aplicados al control de un sistema robótico de 1 grado de libertad (gdL). Inicialmente se construye el modelo de simulación dinámica del sistema robótico utilizando MSC-

¹ Jairo Bernardo Viola Villamizar. Grupo de Investigación Control Industrial Universidad Pontificia Bolivariana. Email: jairo.viola@upb.edu.co

² Luis Ángel Silva. Grupo de Investigación Control Industrial Universidad Pontificia Bolivariana. Email: luis.angel@upb.edu.co

ADAMS y se realiza la co-simulación MSC-ADAMS-MATLAB. Posteriormente, se realiza el proceso de identificación paramétrica del modelo dinámico de sistema utilizando el método de los mínimos cuadrados recursivos a partir de la selección de trayectorias críticas. Empleando el modelo de co-simulación dinámica del sistema se aplica la metodología de linealización entrada salida para obtener un modelo lineal del sistema. Posteriormente se diseñan los controladores PID fraccionario (FOPID) y PID clásico (IOPID) empleando técnicas de diseño frecuencial y el criterio desempeño ITAE. Para evaluar el desempeño de los controladores se tiene en cuenta la presencia perturbaciones externas de carga y ruido.

Se presentan como principales aportes la identificación paramétrica del modelo dinámico de un sistema no lineal, el empleo de la metodología de linealización entrada salida para la implementación de controladores fraccionarios y el análisis de robustez ante la presencia de perturbaciones externas de las estrategias de control presentadas.

El artículo está estructurado de la siguiente forma, inicialmente se presenta el modelo dinámico de co-simulación ADAMS-MATLAB del sistema robótico. Posteriormente se presenta el proceso de identificación paramétrica del modelo dinámico del sistema empleando la metodología de los mínimos cuadrados recursivos. Luego se obtiene el modelo linealizado del sistema utilizando la técnica de linealización entrada salida. Finalmente, se presenta el diseño de los controladores FOPID, IOPID y el análisis de robustez ante las diferentes perturbaciones externas de carga, ruido aleatorio e incertidumbre paramétrica así como las conclusiones.

I. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO DINÁMICO DE CO-SIMULACION ADAMS-MATLAB

Con el fin de poder estudiar el comportamiento dinámico en tiempo real del sistema a controlar, es necesario crear un modelo de simulación que pueda emular todas las acciones dinámicas que se ejercen sobre el sistema robótico en operación, tales como las fricciones de Coriolis, el efecto de la gravedad entre otros. Para esto se utilizó el software MSC-ADAMS. La articulación robótica de 1gdl puede ser representada con un péndulo simple, a la cual se le aplica un par para generar el

movimiento. En la Fig. 1. se muestra el péndulo construido en MSC-ADAMS.

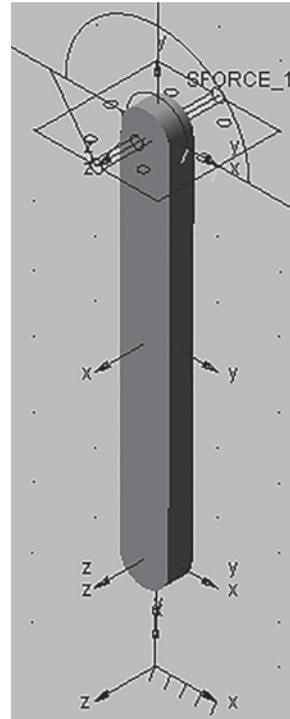


Fig.1. Sistema robótico construido en MSC-ADAMS

Como se observa en la Fig. 1, el péndulo es colocado en el mismo sentido de la gravedad, la cual deberá ser compensada para el desarrollo del controlador. El sistema robótico descrito en la Fig. 1 rotará alrededor del eje Z, y el par aplicado será perpendicular al eje del movimiento. Considerando lo anterior, el modelo es exportado a MATLAB para poder realizar la identificación y control del sistema robótico.

II. IDENTIFICACIÓN DEL MODELO DINÁMICO DE LA ARTICULACIÓN ROBÓTICA

• Modelo dinámico del péndulo

Según [1], para una articulación robótica de 1gdl, el modelo dinámico que rige el comportamiento se presenta en (1)

$$\tau = [I_{r1} + m_1 l_{cl}^2] \ddot{q} + b_1 \dot{q} + f_{c1} \text{sign}(\dot{q}) + [m_1 g l_{cl}] \text{sen}(q) \quad (1)$$

Donde, τ es el par aplicado a la articulación, m_1 es la masa del péndulo, l_{cl} es la localización del

centro de gravedad, g es la fuerza de gravedad, q, \dot{q} y \ddot{q} son respectivamente la posición, velocidad y aceleración del péndulo y b_1 y f_{c1} representan la fricción viscosa y de coulomb.

Ya que la obtención de cada parámetro por separado es una tarea compleja, se expresa (1) como se muestra en (2), para simplificar la cantidad de parámetros que deben hallarse.

$$\tau = \theta_1 \ddot{q} + \theta_2 \dot{q} + \theta_3 \text{sign}(\dot{q}) + \theta_4 \text{sen}(q) \quad (2)$$

Donde $\theta_1 = I_{r1} + m_1 l_{cl}^2$, $\theta_2 = b_1$, $\theta_3 = f_{c1}$, $\theta_4 = m_1 g l_{cl}$.

A partir de (2), se procede a la identificación de las constantes del modelo dinámico θ_1 , θ_2 , θ_3 y θ_4 empleando el método de regresión lineal basado en el algoritmo de los mínimos cuadrados recursivos (RLS).

- *Algoritmo de los mínimos cuadrados*

Para aplicar la identificación paramétrica, es necesario definir el modelo dinámico no lineal del sistema, el cual tiene una serie de constantes referentes a las masas e inercias y unas funciones no lineales que dependen de la posición, velocidad y aceleración del robot.

Los parámetros que dependen de las masas e inercias, pueden ser calculados utilizando matrices de regresión lineal ya que estos parámetros cumplen con la propiedad de linealidad. De acuerdo a lo anterior, El algoritmo de los mínimos cuadrados recursivos utiliza el regresor lineal mostrado en (3).

$$y(k) = \psi(k)^T \theta \quad (3)$$

Donde, $y(k)$ es el vector de mediciones de entradas y salidas, $\psi(k)$ es la matriz de observaciones de parámetros y funciones conocidas y θ es el vector de parámetros a estimar.

A partir de (3), se definen las ecuaciones de los mínimos cuadrados recursivos (4)-(6), las cuales emplean las muestras tomadas del sistema, en este caso posición, velocidad, aceleración y el par aplicado al sistema robótico.

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + \frac{P(k-1)\psi(k)e(k)}{1 + \psi(k-1)^T P(k-1)\psi(k)} \quad (4)$$

$$P(k) = P(k-1) + \frac{P(k-1)\psi(k)\psi(k)^T e(k)P(k-1)}{1 + \psi(k-1)^T P(k-1)\psi(k)} \quad (5)$$

$$e(k) = y(k) - \psi(k)^T \hat{\theta}(k-1) \quad (6)$$

Donde, $\hat{\theta}(k)$ es el vector de parámetros estimados, $\psi(k)$ es la matriz de observaciones y parámetros, $e(k)$ corresponde al error de cada iteración y $P(k)$ es la matriz de covarianza.

- *Selección de la trayectoria de identificación*

Con el fin que el robot recorra todo su espacio de trabajo, se implementaron las trayectorias (7) y (8), compuestas por funciones seno y coseno, las cuales garantizaran que el péndulo se mueva en la región deseada.

Las constantes que acompañan a (7) y (8) están relacionadas con el par necesario para romper la inercia del péndulo, en donde (7) se empleara en la etapa de identificación y (8) en la etapa validación del modelo identificado

$$[2000 \cos(2t) + 2000 \text{sen}(10t)]N - \text{mm} \quad (7)$$

$$[2000 \cos(t) + 2000 \text{sen}(2t)]N - \text{mm} \quad (8)$$

- *Identificación aplicando el método de los mínimos cuadrados recursivos*

A partir del modelo de co-simulación mostrado en Fig.1, se implementa la trayectoria planteada en (7) y se toman los datos de posición, velocidad y aceleración del péndulo.

Una vez tomados los datos, se implementa el algoritmo de los mínimos cuadrados recursivos, descrito por las ecuaciones (4)-(6), obteniendo las constantes del modelo dinámico planteado en (2) que corresponden a $\theta_1=150.0136$, $\theta_2= -41.69$, $\theta_3=-4.69$, $\theta_4=5274.7$. Con las constantes del modelo dinámico identificadas se procede a la construcción del modelo de simulación en Simulink para validarlas con el modelo de co-simulación ADAMS-MATLAB (bloque naranja).

En la Fig. 2. se muestra el modelo de co-simulación versus el modelo dinámico identificado basado en (2) con las constantes θ_1 , θ_2 , θ_3 y θ_4 obtenidas anteriormente.

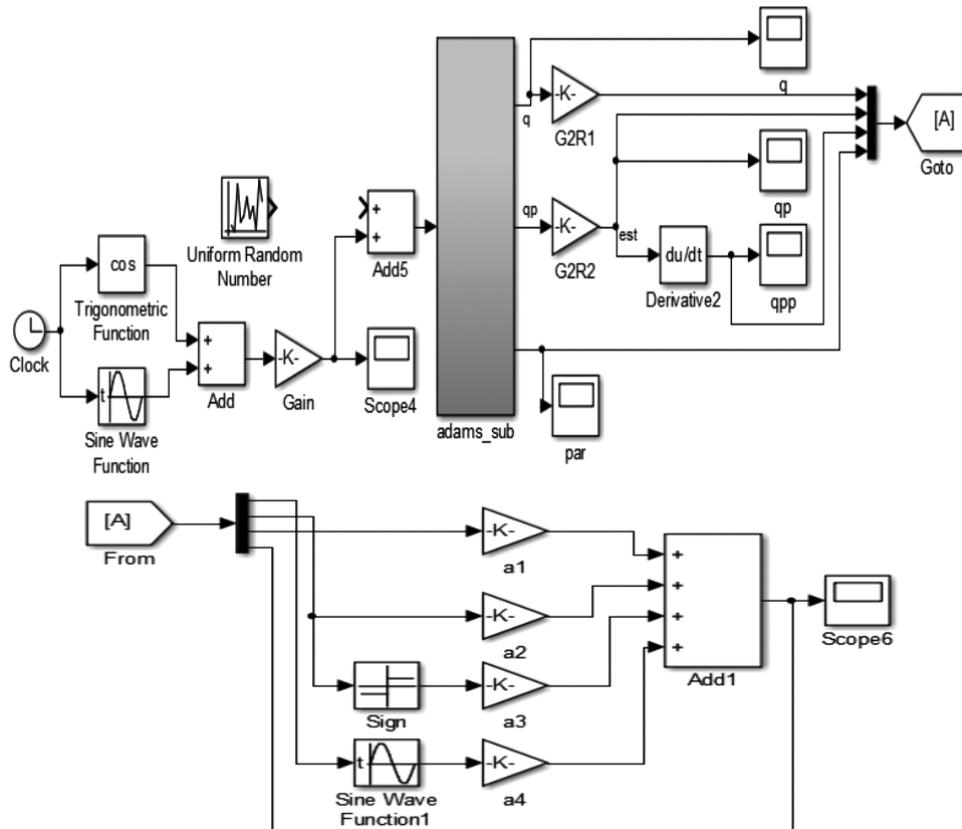
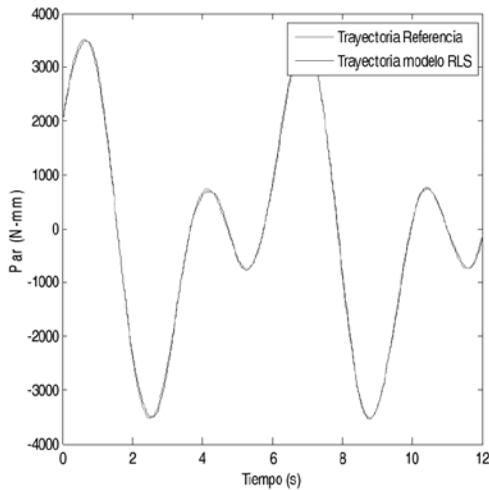
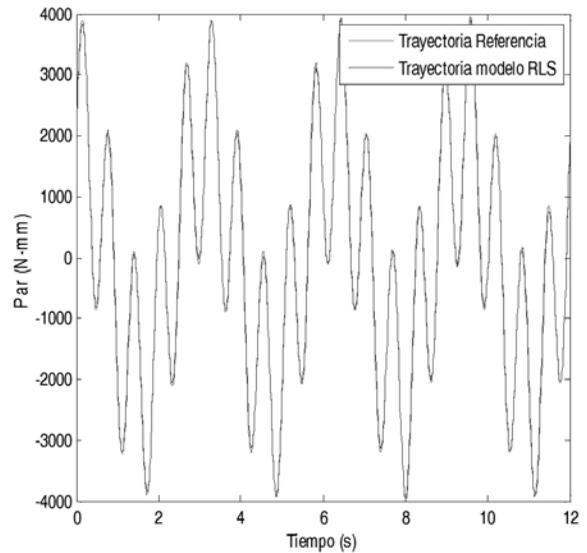


Fig. 2. Modelo de co-simulación vs modelo dinámico en MATLAB

En la Fig. 3. se observa la respuesta del sistema identificado con respecto al modelo de simulación empleando las trayectorias descritas en (7) y (8), donde el ajuste de la respuesta (correlación entre las señales) aproximada es del 99.7%.



(a)



(b)

Fig. 3. Respuesta del modelo de simulación y el modelo estimado para a) trayectoria (7) b) trayectoria (8)

III. LINEALIZACIÓN DEL SISTEMA ROBÓTICO EMPLEANDO LA TÉCNICA ENTRADA SALIDA

Para la implementación de las técnicas de control FOPID e IOPID, se requiere un modelo lineal del sistema. Dado que el sistema robótico es no lineal como se describe en (2), se requiere de una técnica de linealización para obtener un modelo lineal del mismo. En este caso se empleó la técnica de linealización entrada-salida [8]-[9]. La representación del sistema en variables de estado se muestra en (9), con $x_1 = q$ y $x_2 = \dot{q}$.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2(t) \\ -\frac{\theta_2}{\theta_1}x_2(t) - \frac{\theta_3}{\theta_1}\text{sign}(x_2(t)) - \frac{\theta_4}{\theta_1}\sin(x_1(t)) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ \theta_1 \end{bmatrix} \tau(t) \quad (9)$$

Si,

$$\begin{aligned} f(x) &= \begin{bmatrix} x_2(t) \\ -\frac{\theta_2}{\theta_1}x_2(t) - \frac{\theta_3}{\theta_1}\text{sign}(x_2(t)) - \frac{\theta_4}{\theta_1}\sin(x_1(t)) \end{bmatrix} \\ g(x) &= \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ \theta_1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad y$$

El sistema (9) puede ser expresado como:

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad (10)$$

$$y = h(x) = x_1 \quad (11)$$

La ley de control entrada-salida está dada por (12).

$$u = \frac{1}{L_g L_f(x)} [-\beta_0 h(x) - \beta_1 L_f(x) - L_f(x)^2 + v] \quad (12)$$

Donde v es la nueva entrada del sistema, β_0 y β_1 son las constantes del polinomio deseado que representa el comportamiento en lazo abierto del sistema linealizado. $L_f(x)$, $L_f(x)^2$ y $L_g L_f(x)$, empleando el álgebra del Lie están dadas por (13).

$$\begin{aligned} l_f h(x) &= \frac{\partial h(x)}{\partial x} f(x) = x_2 \quad (13) \\ l_g h(x) &= \frac{\partial h(x)}{\partial x} g(x) = 0 \\ l_f^2 h(x) &= \frac{\partial l_f h(x)}{\partial x} f(x) = -\frac{\theta_2}{\theta_1}x_2(t) - \frac{\theta_3}{\theta_1}\text{sign}(x_2(t)) - \frac{\theta_4}{\theta_1}\sin(x_1(t)) \\ l_g l_f h(x) &= \frac{\partial l_f h(x)}{\partial x} g(x) = \frac{1}{\theta_1} \end{aligned}$$

El polinomio característico deseado para el sistema linealizado es (14).

$$s^2 + \beta_1 s + \beta_0 = 0 \quad (14)$$

con $\beta_0 = \beta_1 = 2$. A partir del modelo dinámico linealizado, se realiza un proceso de identificación para obtener el modelo lineal correspondiente al sistema robótico, para esto se empleó la herramienta ident de MATLAB. El sistema estimado corresponde a un sistema de segundo orden con polos reales mostrado en (15).

$$G_p(s) = \frac{0.064011}{1 + 0.1739s + 0.11s^2} \quad (15)$$

IV. DISEÑO DE LAS ESTRATEGIAS DE CONTROL

• Controlador FOPID

El controlador FOPID [10]-[13], es una estrategia de control que utiliza operadores del tipo s^α , donde α corresponde a un número real no entero usada para el control y optimización de procesos. El controlador FOPID, se define en (16).

$$G_C(s) = k_p + \frac{k_i}{s^\alpha} + k_d s^\mu \quad (16)$$

Como puede observarse en (16), el controlador FOPID, cuenta con 5 parámetros, la constante proporcional k_p , integral k_i , derivativa k_d y adicionalmente α y μ que corresponden a orden integral y derivativo respectivamente.

Con respecto al PID clásico, que solo cuenta con 3 grados de libertad k_p , k_i y k_d , el controlador FOPID tiene 5 grados de libertad, lo cual aumenta las posibilidades de sintonización y permite alcanzar el punto de operación deseado más fácilmente. Para la sintonización de este tipo de controladores, se deben tener en cuenta 5 condiciones, las cuales son:

- Margen de fase (pm):

$$\arctan(G_c(jw_c)G_p(jw_c)) = -180 + pm \quad (17)$$

(13)

- Frecuencia de cruce de ganancia (w_c):

$$|G_c(jw_c)G_p(jw_c)| = 0 \text{ dB} \quad (18)$$

- Robustez ante variaciones de ganancia de la planta:

$$\frac{d}{dw}(\arctan(G_c(jw)G_p(jw))) = 0 \quad (19)$$

- Rechazo al ruido de alta frecuencia:

$$\left| \frac{G_c(j\omega)G_p(j\omega)}{1 + G_c(j\omega)G_p(j\omega)} \right| = B \text{ dB} \quad (20)$$

- Rechazo de perturbaciones en la salida:

$$\left| \frac{1}{1 + G_c(j\omega)G_p(j\omega)} \right| = A \text{ dB} \quad (21)$$

Donde A y B corresponden a los valores máximos de la función de sensibilidad y de sensibilidad complementaria deseados a alta frecuencia. (20) y (21) garantizan el funcionamiento robusto del controlador.

Para la implementación de esta metodología de diseño, es necesario conocer el margen de fase, el margen de ganancia y la frecuencia de cruce de ganancia del sistema. Es importante resaltar que la solución de este sistema de ecuaciones no lineales requiere el uso de técnicas de optimización para la obtención de las constantes k_p , k_i , k_d α y μ . Se utiliza ITAE como criterio de desempeño para la sintonización del controlador fraccionario.

- Controlador IOPID*

El controlador IOPID diseñado se basa en las ecuaciones (14)-(18), que utilizan el diseño en frecuencia para obtener las constantes del controlador y el comportamiento deseado del sistema. Las especificaciones de diseño son un margen de fase de 60° y una frecuencia de corte de 7 rad/s

- Diseño de controladores FOPID e IOPID*

Con los criterios de diseño definidos por (17)-(21), se resuelve el sistema de ecuaciones utilizando IAE (integral del error absoluto) como criterio de desempeño. En la TABLA I se muestran las constantes obtenidas con su respectivo índice de desempeño.

TABLA I.
CONSTANTES DE LOS CONTROLADORES FOPID E IOPID

Controlador	k_p	k_i	α	k_d	μ	IAE
FOPID	31.8	3.18	0.12	5.9	0.88	0.344
IOPID	42.9	0	0	5.68	0	0.31

En Fig. 4. y Fig. 5. se muestran la respuesta temporal y la acción de control de los controladores FOPID e IOPID. Como se observa en la Fig. 4. el controlador fraccionario presenta una respuesta transitoria con un menor sobreimpulso que su contraparte entera. En la Fig.5 se observa que la acción de control ejercida por el FOPID es menor a la ejercida por el controlador IOPID.

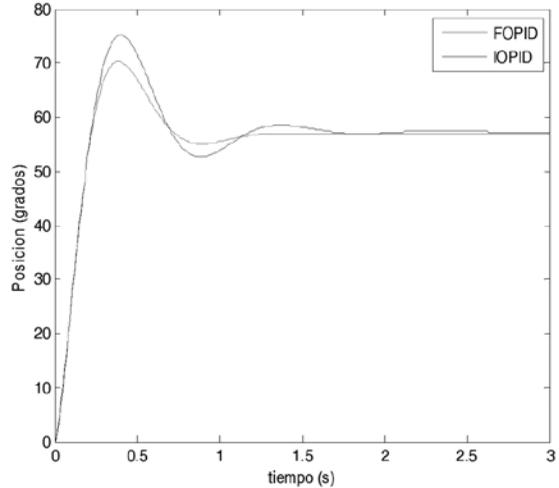


Fig. 4. Respuesta transitoria del sistema del FOPID e IOPID

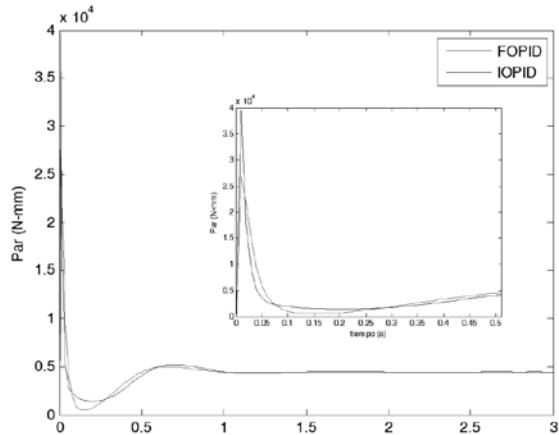


Fig. 5. Acción de control ejercida por el FOPID e IOPID

V. ANÁLISIS DE ROBUSTEZ

Con el objetivo de contrastar el funcionamiento de los 2 controladores, se plantea un análisis de robustez, donde se realizaron 3 pruebas. La primera consiste en agregar ruido aleatorio al lazo de retroalimentación. La segunda consiste en una perturbación externa colocando una masa adicional al péndulo y en tercer lugar una variación de la masa del eslabón con carga.

- *Ruido aleatorio en el lazo de retroalimentación*

Para probar la robustez del controlador ante la presencia de ruido aleatorio, se introduce una señal de ruido del 20% del valor de la entrada. En la Fig. 6. se muestra la respuesta transitoria y en Fig. 7. la acción de control del sistema para el controlador FOPID e IOPID. Como se observa en Fig. 6. y Fig. 7, el controlador FOPID presenta una mayor robustez ante la presencia de ruido aleatorio respecto al controlador IOPID, ya que mantiene el comportamiento dinámico a pesar de la presencia de ruido y mantiene un menor valor de la acción de control.

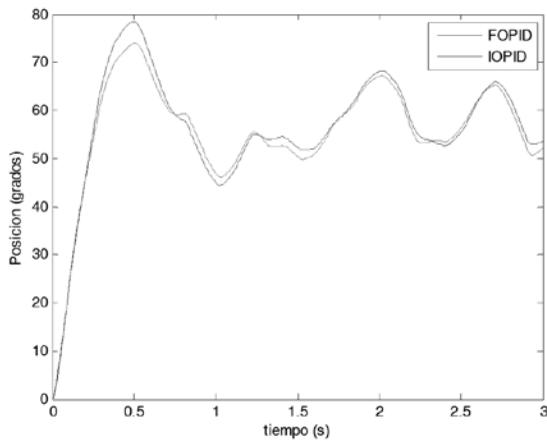


Fig. 6. Respuesta transitoria ante la presencia de ruido aleatorio.

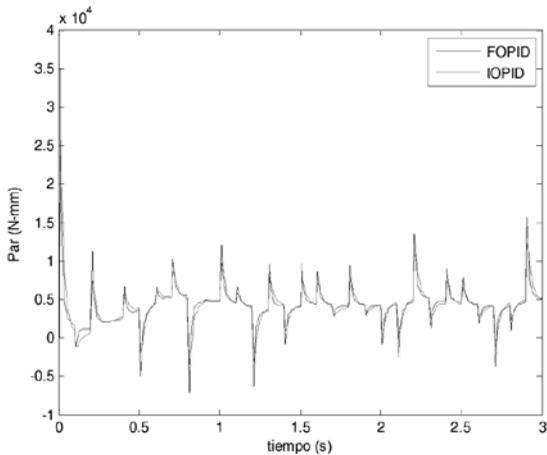


Fig. 7. Acción de control ante la presencia de ruido aleatorio.

- *Carga externa al péndulo*

Se agrega una carga adicional de 100g al péndulo como se muestra en la Fig.8.

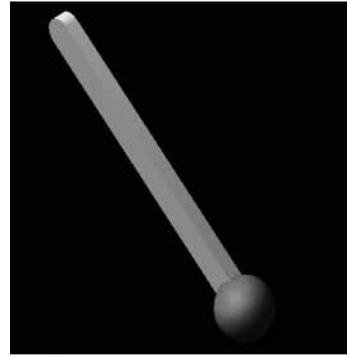


Fig.8 Péndulo con carga adicional de 100 g.

La respuesta transitoria y la acción de control se muestran en la Fig. 9. y Fig. 10. Como se observa en la Fig.9 el controlador FOPID presenta una mejor respuesta transitoria que el controlador IOPID.

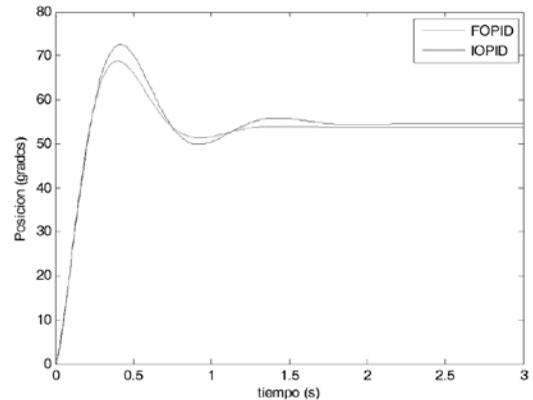


Fig. 9 Respuesta transitoria del sistema con carga adicional de 100g.

En la Fig.10 el controlador FOPID presenta una menor acción de control a pesar de la carga adicional colocada al sistema

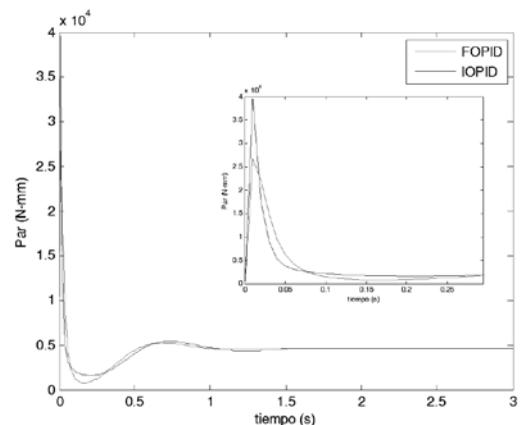


Fig.10 Acción de control del sistema con carga adicional de 100g.

- *Variación de la masa del eslabón con carga adicional*

Para probar la robustez ante incertidumbres paramétricas del modelo, se varía la masa interna del péndulo en un 30% y se adiciona carga de 100 g. En la Fig.11 y Fig.12 se observa la respuesta transitoria y la acción de control del sistema con incertidumbre paramétrica y carga adicional para los controladores IOPID y FOPID.

Como se observa en la Fig.11 y Fig.12, el controlador FOPID, presenta una mejor respuesta transitoria y una menor acción de control que el controlador IOPID.

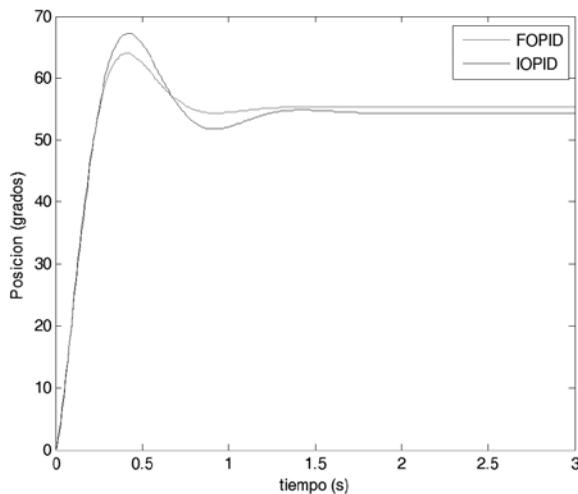


Fig.11 Respuesta transitoria del sistema con incertidumbre paramétrica del -30% para la masa del péndulo.

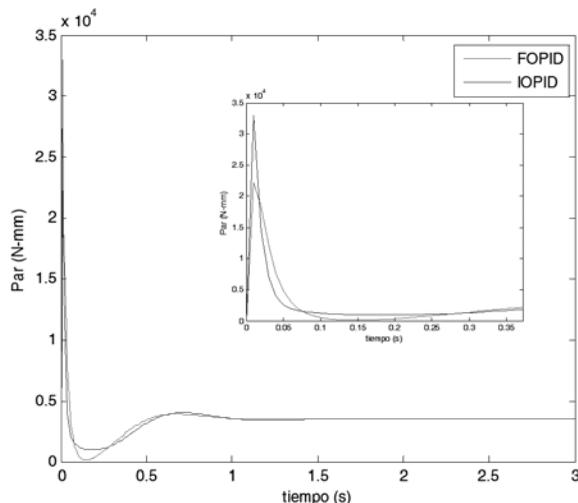


Fig.12 Acción de control del sistema con incertidumbre paramétrica del -30% para la masa del péndulo

CONCLUSIONES

En este artículo se presentó la identificación, linealización y control para una articulación Robótica de 1gdl utilizando co-simulación ADAMS-MATLAB. Las estrategias de control empleadas son los controladores FOPID e IOPID, los cuales son sometidos a pruebas de robustez para analizar su comportamiento dinámico y acción de control ante diferentes condiciones de operación. Las pruebas de robustez realizadas son la presencia de ruido aleatorio, presencia de carga externa e incertidumbre paramétrica de la masa del péndulo. Teniendo en cuenta las pruebas realizadas, el controlador FOPID, presenta las mejores prestaciones en respuesta transitoria y acción de control, lo que significa un mejor comportamiento dinámico del sistema con un menor gasto energético en los actuadores, prolongando su vida útil.

REFERENCIAS

- [1] F. Reyes Cortes, "MATLAB aplicado a Robotica y mecatronica", alfaomega grupo editor, 460 p, ISBN 978-6077073574.
- [2] C. Copot, A. Burlacu, C. Ionescu, C. Lazar, R. De Keyser "A fractional order control strategy for visual servoing systems" Mechatronics, vol. 23, pp. 848–855, Octubre 2013.
- [3] R. Sharma, K.P.S Rana, V. Kumar, "performance analysis of fractional order fuzzy PID controllers applied to a robotic manipulators" Expert systems with applications, vol. 41, pp. 4274–4289, Marzo 2013.
- [4] M. S. Couceiro, N.M. Fonseca Ferrerira, J. A. T. Machado "Application of fractional algorithms in the control of a robotic bird" Commun Nonlinear Sci simulat, vol. 15, pp. 895–910, Mayo 2010.
- [5] J. Samardzic, M.P Lazarevic, B. cvetkovic "Optimal conventional and fractional PID control algorithm for a robotic system with three degrees of freedom driven by dc motors" IEEE 9th symposium of intelligent systems and informatics, pp. 297–301, Septiembre 2011.
- [6] N.M.F Ferrerira, J.A.T Machado, J.K Tar. "Fractional order of two Cooperating Manipulators" Computational Cybernetics, pp. 27–32, noviembre 2008.
- [7] J.A.T Machado, A. Azenha "Fractional order hybrid control of robot manipulators" systems, man and Cybernetics, pp. 788–793, Octubre 1998.
- [8] S. Sastry, Nonlinear Systems: Analysis, Stability, and Control. Springer. 1999.
- [9] A. Isidori. Nonlinear control systems. Springer.1995.
- [10] R. Villanova, A. Visioli. PID Control in the Third Millennium, Advances in Industrial Control. Springer, London, UK, 2012, 600 p, ISBN 978-1-4471-2425-2.
- [11] V. Duarte, J. Sa Da Costa. An introduction to fractional control. The Institution of Engineering and Technology, 2013.
- [12] YQ Chen, Y. Luo. Fractional order motion controls. Wiley, 2012.
- [13] B. Vinagre, C. Monje, Fractional Order System and Controls Fundamentals and Applications, Nueva York: editorial Springer. 2010. 430 p. ISBN 978-1-84996-334-3.

BIOGRAFIA



Jairo Bernardo Viola Villamizar. Ingeniero Electrónico de la Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga, Colombia 2013. Sus áreas de interés están orientadas a control de procesos, estrategias de control avanzado, robótica industrial y control fraccionario.



Luis Ángel Silva. PhD de la Universidad Politécnica de Madrid, España, en 2005. Actualmente profesor asociado de la Universidad Pontificia Bolivariana y sus áreas de interés incluyen Procesamiento de imágenes, reconocimiento de patrones, robótica industrial y control avanzado de procesos.