

# Stabilization of the robotic arms

J. de J. Rubio, *Member, IEEE*, E. Garcia, C. Aguilar and C. Torres

**Abstract—** The main contributions of this paper are as follows: 1) a proportional-derivative controller with inverse dead-zone is addressed for the regulation of robotic arms, where the inputs dead-zone is cancelled with the inverse dead-zone, 2) stability of the mentioned technique is assured, and 3) the considered strategy is validated by two examples.

**Keywords—** Proportional-derivative control, robotic system.

## I. INTRODUCCIÓN

Las características no lineales y no suaves tales como la zona muerta y la histéresis son comunes en los actuadores y los sensores, ejemplos de ello son los conectores mecánicos, las servo-válvulas hidráulicas, los servo-motores eléctricos, y los sistemas bio-médicos. La zona muerta es una de las más importantes no linealidades no suaves en muchos procesos industriales, las cuales pueden limitar severamente el desempeño del sistema; por lo cual, su estudio ha sido de mucho interés en la comunidad de control.

Hay algunos artículos, los cuales consideran las características importantes de los brazos robóticos como [2], [3], [4], [5], [6], [13], [14], y [17]. En el artículo de [2], se trata con el modelado de la dinámica y el análisis del desempeño de un mecanismo con pala en un robot de cocina. En [3], se introduce el modelo de visión para el control de un robot móvil. En [4], se presenta el modelo y la cinemática de un brazo de 5 grados de libertad. En [5], [13], y [14], se considera el seguimiento de trayectoria de los robots móviles. En [6], se propone una red neuronal para excluir la dinámica de un brazo redundante en la ley de control. En [17], se considera el modelo cinemático inverso de un brazo robótico de 7 grados de libertad. En los estudios anteriores, los autores proponen diseños de controladores, pero en ningún caso se consideran sistemas con zona muerta en sus entradas.

Existen algunas investigaciones acerca del control de sistemas con zona muerta en sus entradas. En [1], [8], [9], y

[18], los autores proponen el control de sistemas no lineales con zona muerta en sus entradas; pero ellos no consideran la aplicación de los brazos robóticos.

En este estudio, se diseña un controlador proporcional derivativo con zona muerta inversa para la regulación de brazos robóticos con zona muerta en sus entradas. Los brazos robóticos tienen diferente estructura con respecto a los sistemas considerados en los artículos mencionados anteriormente; por lo tanto, nuevos diseños de controladores se deben realizar. En el control propuesto, se usa el método de Lyapunov para garantizar que el error de regulación converge a cero de manera asintótica.

Este artículo se organiza como sigue. En sección II, se presenta el modelo dinámico de los brazos robóticos con zona muerta en las entradas. En sección III, se introduce el controlador proporcional derivativo con zona muerta inversa. En sección IV, se usa el método propuesto para la regulación de dos brazos robóticos. En sección V, se explican las conclusiones y el trabajo futuro.

## II. MODELO DINÁMICO DE LOS BRAZOS ROBÓTICOS CON ZONA MUERTA EN SUS ENTRADAS

El objetivo principal de esta sección es entender algunos conceptos de los brazos robóticos. La ecuación del movimiento de los brazos robóticos rígidos con  $n$  grados de libertad que considera las uniones está dada como sigue:

$$M(q)q'' + C(q, q')q' + V(q) = \tau \quad (1)$$

donde  $q \in \mathbb{R}^{n \times 1}$  denota los ángulos de las uniones o los desplazamientos de los eslabones del brazo robótico,  $M(q) \in \mathbb{R}^{n \times n}$  es la matriz de inercia la cual es simétrica y definida positiva,  $C(q, q') \in \mathbb{R}^{n \times n}$  contiene los términos centripetas y de Coriolis, y  $V(q)$  son los términos gravitacionales,  $\tau$  denota las zonas muertas de las entradas. Las zonas muertas no simétricas se pueden representar por:

$$\tau = DZ(v) = \begin{cases} m_r(v - b_r) & v > b_r \\ 0 & b_l < v < b_r \\ m_l(v - b_l) & v < b_l \end{cases} \quad (2)$$

donde  $m_r$  y  $m_l$  son las pendientes constantes derecha e izquierda de la zona muerta,  $b_r$  y  $b_l$  representan los puntos de ruptura derecho e izquierdo. Notar que  $v$  es la entrada de las zonas muertas y es la entrada global de control del sistema. Se definen los siguientes dos estados como sigue:

J. de J. Rubio, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, ESIME Azcapotzalco, Instituto Politécnico Nacional, México, jrubioa@ipn.mx, rubio.josedejesus@gmail.com

E. Garcia, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, ESIME Azcapotzalco, Instituto Politécnico Nacional, México, enriquegarcia@linuxmail.org

C. Aguilar, Centro de Investigación en Computación, Instituto Politécnico Nacional, México, carlosaguilar@cic.ipn.mx

C. Torres, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, ESIME Azcapotzalco, Instituto Politécnico Nacional, México, cesartorres11@hotmail.com

$$x_1 = q \in \mathcal{R}^{n \times 1}$$

$$x_2 = \dot{q} \in \mathcal{R}^{n \times 1}$$

$$u = \tau \in \mathcal{R}^{n \times 1}$$

Entonces (1) se puede escribir como sigue:

$$x_1' = x_2$$

$$M(x_1)x_2' + C(x_1, x_2)x_2 + V(x_1) = u \quad (4)$$

donde  $M(x_1) = M$ ,  $C(x_1, x_2) = C$ , y  $V(x_1) = V$  están descritas en (1), la zona muerta  $u$  es [1], [8], [9], [18]:

$$m_r(v - b_r) \quad v > b_r$$

$$u = DZ(v) = \begin{cases} 0 & b_l < v < b_r \\ m_l(v - b_l) & v < b_l \end{cases} \quad (5)$$

los

parámetros  $m_r$ ,  $m_l$ ,  $b_r$ , y  $b_l$  se han descrito en (2),  $v$  es la entrada de control del sistema. La Figura 1 muestra la zona muerta [1].

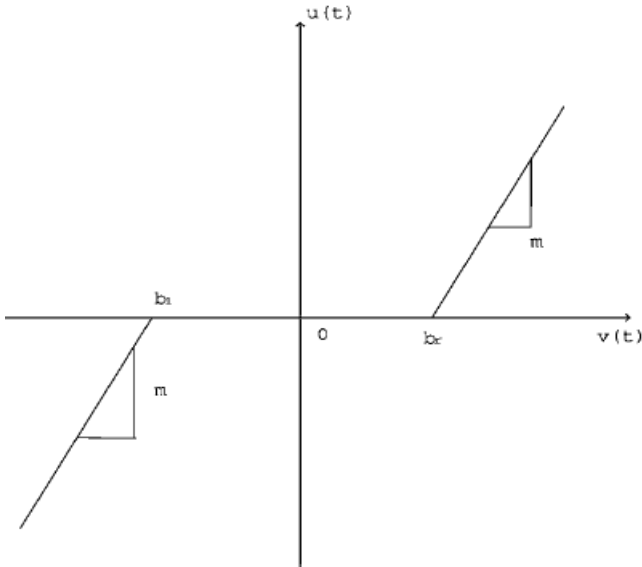


Figura 1. La zona muerta.

Propiedad 1. La matriz de inercia es simétrica y definida positiva, es decir [7], [15], [16]:

$$m_1|x|^2 < x^T M x < m_2|x|^2$$

donde  $m_1$ ,  $m_2$  son constantes positivas conocidas,  $x = [x_1, x_2]^T$ .

Propiedad 2. La matriz de términos centripetas y de Coriolis es anti-simétrica, es decir, satisface la siguiente relación [7], [15], [16]:

$$x^T [M' - 2C] x = 0 \quad (6)$$

donde  $x = [x_1, x_2]^T$ .

El controlador proporcional derivativo clásico es:

$$u = -G_p x_{p1} - G_d x_{p2} \quad (7)$$

donde  $x_{p1} = x_1 - x_{d1}$  y  $x_{p2} = x_2 - x_{d2}$ ,  $G_p$  y  $G_d$  son matrices constantes simétricas y positivas definidas.

### III. CONTROL PROPORCIONAL DERIVATIVO

En este estudio, se considera el caso de regulación, es decir, la velocidad deseada es  $x_{d2} = 0$ . El control proporcional derivativo con zona muerta inversa  $v$  es como sigue:

$$v = DZ^{-1}(u_{pd}) = \begin{cases} (1/m_r)u_{pd} + b_r & u_{pd} > b_r \\ 0 & u_{pd} = 0 \\ (1/m_l)u_{pd} + b_l & u_{pd} < 0 \end{cases} \quad (8)$$

donde los parámetros  $m_r$ ,  $m_l$ ,  $b_r$ , y  $b_l$  son definidos como en (2), el control proporcional derivativo auxiliar es:

$$u_{pd} = -G_p x_{p1} - G_d x_{p2} + V_a - F \text{signo}(x_{p2}) \quad (9)$$

donde  $x_{p1} = x_1 - x_{d1}$  es el error de regulación y  $x_{d1}$  es la posición deseada,  $x_{p2} = x_2$ ,  $G_p$ ,  $G_d$  son matrices definidas positivas constantes y simétricas,  $V$  son los términos gravitacionales de (1),  $V_a$  es el valor aproximado de  $V$ . Se considera que el error de aproximación  $V_p = V_a - V$  es acotado como sigue:

$$|V_p| < V_s \quad (10)$$

La Figura 2 muestra la zona muerta inversa [1], [18] y la Figura 3 muestra el controlador propuesto denotado como PDDZ.

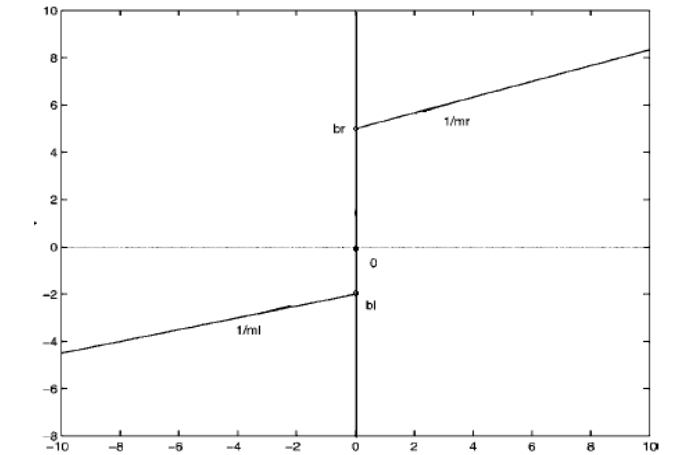


Figura 2. La zona muerta inversa.

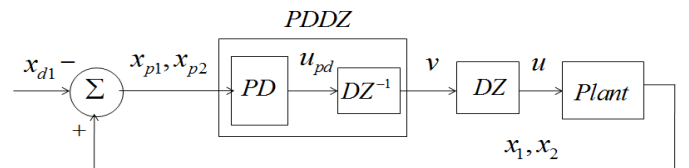


Figura 3. El controlador propuesto.

Ahora se discute la convergencia del sistema en lazo cerrado.

**Teorema 1:** El error del sistema en lazo cerrado del control proporcional derivativo con zona muerta inversa (8), (9) para el brazo robótico con zonas muertas en sus entradas (4), (5) es estable asintótico y su velocidad  $x_{p2}$  convergerá a:

$$\limsup_{T \rightarrow \infty} \|x_{p2}\|^2 = 0 \quad (11)$$

donde  $T$  es el tiempo final,  $x_{p2} = x_2$ , y  $V_s < F$ .

**Prueba:** La función de Lyapunov propuesta es:

$$V_1 = (1/2)x_{p2}^T M x_{p2} + (1/2)x_{p1}^T G_p x_{p1} \quad (12)$$

Sustituyendo (8), (9) en (4), (5) el sistema en lazo cerrado es como sigue:

$$M \dot{x}_2 = -G_p x_{p1} - G_d x_2 + V_p - F \text{signo}(x_2) - C x_2 \quad (13)$$

Usando el hecho  $x_{p2} = x_2$ , la derivada de (12) es:

$$\dot{V}_1 = x_{p2}^T M \dot{x}_2 + (1/2)x_{p2}^T \dot{M} x_{p2} + x_{p2}^T G_p x_{p1} \quad (14)$$

donde  $x_{p1} = x_1 - x_{d1} = x_2 - x_{d2} = x_2 = x_{p2}$  y  $x_{p2} = x_2$ . Sustituyendo (13) en (14) da:

$$\dot{V}_1 = -x_{p2}^T G_d x_{p2} + x_{p2}^T [V_p - F \text{signo}(x_{p2})] + (1/2)x_{p2}^T [M' - 2C] x_{p2}^T$$

Usando (6), (8), (10), y que  $|x_{p2}| = |x_{p2}| \text{signo}(x_{p2})$ , se obtiene:

$$\dot{V}_1 < -x_{p2}^T G_d x_{p2} + |x_{p2}|^T V_s - |x_{p2}|^T F$$

$$\dot{V}_1 < -x_{p2}^T G_d x_{p2} \quad (15)$$

donde  $V_s < F$ . Por lo tanto, el error es estable asintótico [10]. Integrando (15) desde 0 a  $T$  se produce:

$$\int_0^T x_{p2}^T G_d x_{p2} dt < V_{1,0} - V_{1,T} < V_{1,0}$$

$$\rightarrow (1/T) \int_0^T x_{p2}^T G_d x_{p2} dt < (1/T) V_{1,0}$$

$$\rightarrow \limsup_{T \rightarrow \infty} (1/T) \int_0^T x_{p2}^T G_d x_{p2} dt < [\limsup_{T \rightarrow \infty} (1/T)] V_{1,0} = 0$$

Si  $T \rightarrow \infty$  entonces  $\|x_{p2}\|^2 = 0$ , (11) es establecido.

#### IV. SIMULACIONES

En esta sección, el control proporcional derivativo con zona muerta inversa denotado como PDDZ se comparará con el control proporcional derivativo con compensación de gravedad de [7] denotado como PD para la regulación de dos brazos robóticos con zonas muertas en sus entradas. En este artículo se usa el error con raíz del error cuadrático medio (ECM) [10], [11], [12] para los resultados de la comparación el cual está dado como sigue:

$$ECM = [(1/T) \int_0^T x_p^2 dt]^{0.5} \quad (16)$$

donde:

$$x_p^2 = x_{p11}^2 + x_{p12}^2 + x_{p13}^2 + x_{p21}^2 + x_{p22}^2 + x_{p23}^2$$

$$x_p^2 = u_1^2 + u_2^2 + u_3^2$$

para los estados  $x$ , o para las entradas  $u$ .

##### A. Ejemplo 1

Considera el transelevador [11] de la Figura 4.

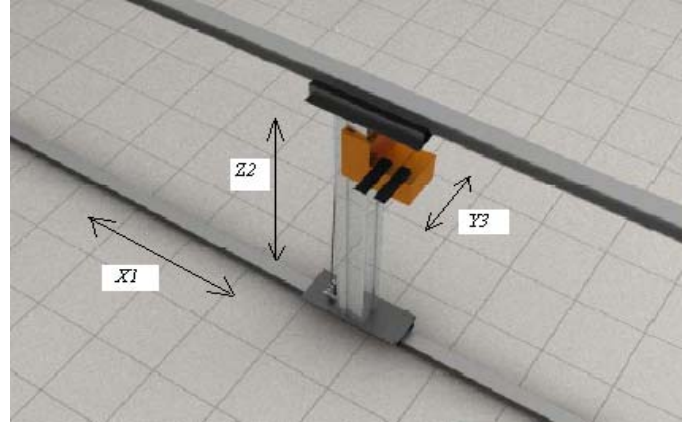


Figura 4. Transelevador.

El modelo del transelevador se escribe como (1) y se representa como sigue:

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix} \quad V = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} \quad (17)$$

donde:

$$m_{11} = m_1 + m_2 + m_3 = 2.9020 \text{ kg}$$

$$m_{22} = m_2 + m_3 = 0.5480 \text{ kg}$$

$$m_{33} = m_3 = 0.150 \text{ kg}$$

los otros parámetros de  $M$  son cero, todos los parámetros de  $C$  son cero,  $v_2 = (m_2 + m_3)g = 0.15 \text{ kg} \cdot 9.81 \text{ m/s}^2$ , los otros parámetros de  $V$  son cero.  $m_1$ ,  $m_2$ , y  $m_3$  son las masas de los eslabones uno, dos, y tres, respectivamente,  $x_{11} = x_1$ ,  $x_{12} = y_2$ , y  $x_{13} = z_3$ , son las longitudes de los eslabones uno, dos, y tres, respectivamente, en  $m$ ,  $g$  es la constante de aceleración gravitacional.  $m_i = m_i = 0.5$ ,  $b_i = 0.5$ , y  $b_i = -0.5$  son los parámetros de las zonas muertas de las entradas.

El PDDZ está dado por las ecuaciones (8), (9) con los parámetros  $G_p = \text{diagonal}[1000, 1000, 1000]$ ,  $G_d = \text{diagonal}[30, 30, 10]$ ,  $V_s = [0, 9.81, 0]^T$ , con  $F = [f_1, f_2, f_3]^T = [0, 9.81, 0]^T$  la condición dada en (11)  $V_s < F$  se satisface; por lo tanto, el error del sistema en lazo cerrado del PDDZ aplicado al brazo robótico se garantiza que es estable asintótico.

El PD está dado por [7] con parámetros  $G_p = \text{diagonal}[2000, 2000, 2000]$ ,  $G_d = \text{diagonal}[30, 30, 10]$ ,  $V = [v_1, v_2, v_3]^T$ .

El resultado de la comparación de las funciones de control se muestra en la Figura 5, la posición de los estados se muestra

en la Figura 6 y los resultados de la comparación de los errores de los controladores se muestra en la Figura 7. La comparación de los errores de las velocidades en norma cuadrática  $\|x_{p2}\|^2$  de (11) para los controladores de presenta en la Figura 8. Desde el teorema de la ecuación (11),  $\|x_{p2}\|^2$  convergerá a cero para PDDZ. La Tabla I muestra los resultados del ECM usando (16).

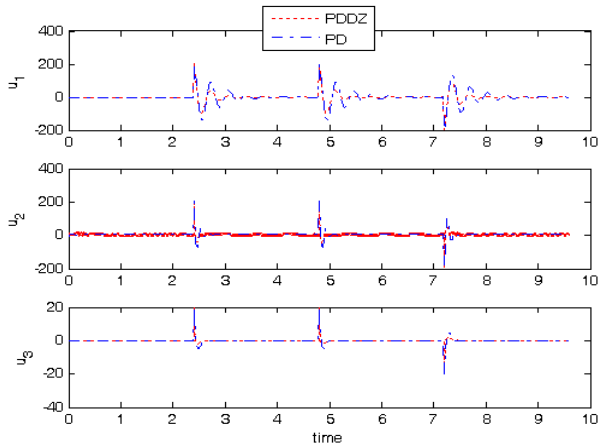


Figura 5. Entradas para el ejemplo 1.

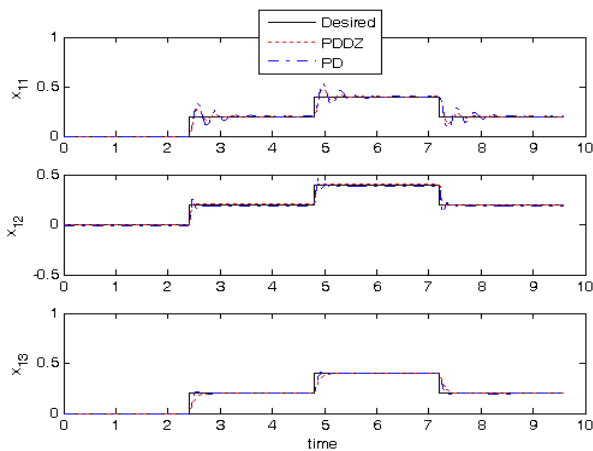


Figura 6. Estados de posición para el ejemplo 1.

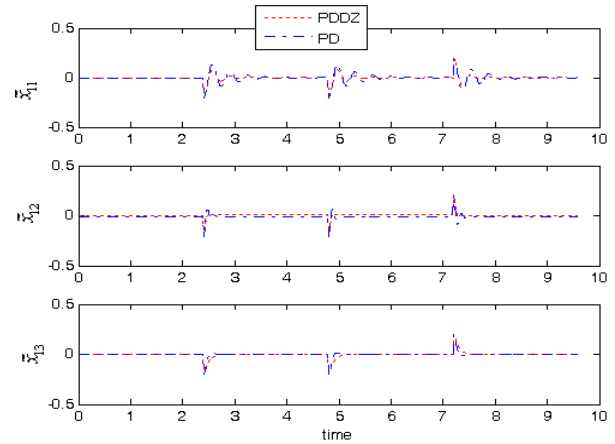


Figura 7. Errores de los estados de posición para el ejemplo 1.

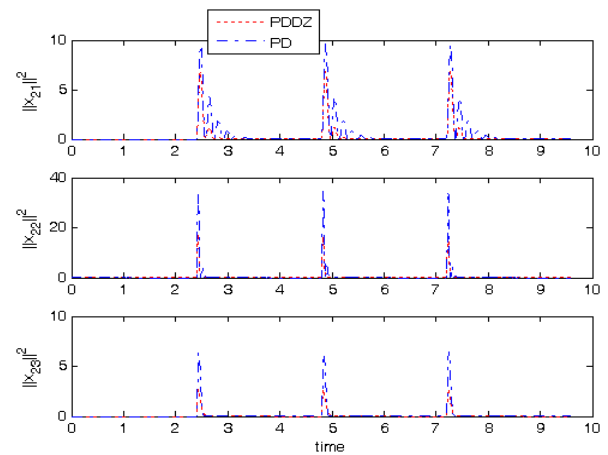


Figura 8. Errores de velocidad para el ejemplo 1.

TABLA I. RESULTADOS PARA EL EJEMPLO 1.

Métodos	ECM para x	ECM para u
PD	0.6077	807.9397
PDDZ	0.3297	493.2034

Notar que la técnica PD requiere ganancias mayores que las del método PDDZ para obtener resultados satisfactorios. Desde las Figuras 5, 6, y 7, se puede ver que PDDZ mejora el PD por que las señales de la planta para el primero siguen mejor las señales de referencia que el segundo, y en el primero las entradas son más pequeñas que en el segundo. Desde la Figura 8, se muestra que PDDZ mejora el PD por que el error de velocidad  $\|x_{p2}\|^2$  presentado por el primero es más pequeño que el presentado por el segundo. Desde la Tabla I, se muestra que el PDDZ alcanza mejor exactitud cuando se compara con el PD por que el ECM es más pequeño para el primero que para el segundo.

### B. Ejemplo 2

Considera el brazo robótico [12] de la Figura 9.

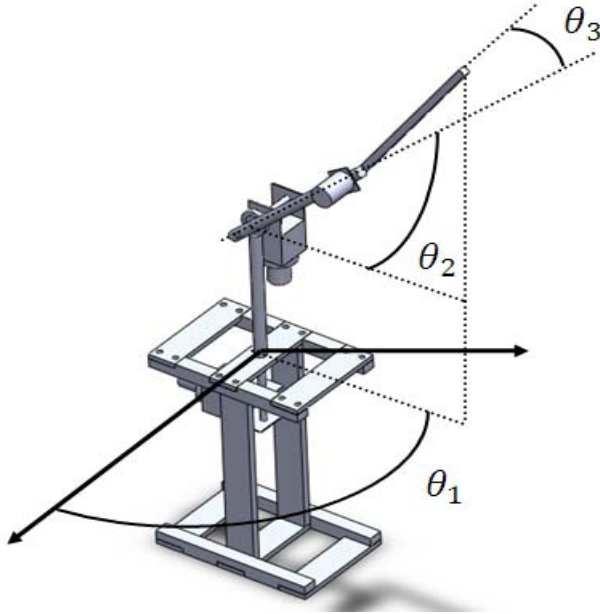


Figura 9. Brazo robótico articulado.

El brazo robótico articulado se escribe como (1) y se representa como sigue:

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix}$$

$$V = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix}$$

donde:

$$m_{11} = J_1 + (m_2 l_{e2}^2 + m_3 l_2^2) C_2^2 + 2m_3 l_2 l_{e3} C_2 C_{23} + m_3 l_{e3}^2 C_{23}^2$$

$$m_{22} = J_2 + m_3 l_2^2 + m_3 l_{e3}^2 C_2^2 + m_2 l_{e2}^2 + 2m_3 l_2 l_{e3} C_3$$

$$m_{33} = J_3 + m_3 l_{e3}^2$$

$$m_{23} = J_3 + m_3 l_{e3}^2 + m_3 l_2 l_{e3} C_3$$

$$m_{32} = J_3 + m_3 l_{e3}^2 + m_3 l_2 l_{e3} C_3$$

los otros parámetros de M son cero,

$$c_{11} = (1/2)(m_2 l_{e2}^2 C_2^2 + 2m_3 l_2 l_{e3} C_2 C_{23} + m_3 l_2^2 C_2^2 + m_3 l_{e3}^2 C_{23}^2) x_{21}$$

$$c_{21} = (-m_3 l_2 l_{e3} C_2 S_{23} - m_3 l_{e3}^2 S_{23} C_{23}) x_{23} + [-(m_2 l_{e2}^2 + m_3 l_2^2) S_2 C_2$$

$$-m_3 l_2 l_{e3} S_2 C_{23} - m_3 l_2 l_{e3} C_2 S_{23} - m_3 l_{e3}^2 S_{23} C_{23}] x_{22}$$

$$c_{12} = [-(m_2 l_{e2}^2 + m_3 l_2^2) S_2 C_2 - m_3 l_2 l_{e3} S_2 C_{23}$$

$$-m_3 l_2 l_{e3} C_2 S_{23} - m_3 l_{e3}^2 S_{23} C_{23}] x_{21}$$

$$c_{13} = (-m_3 l_2 l_{e3} C_2 S_{23} - m_3 l_{e3}^2 S_{23} C_{23}) x_{21}$$

$$c_{22} = -m_3 l_2 l_{e3} S_3 x_{23}$$

$$c_{23} = -m_3 l_2 l_{e3} S_3 x_{22}$$

$$c_{32} = -(1/2) m_3 l_2 l_{e3} S_3 x_{23}$$

$$c_{33} = -(1/2) m_3 l_2 l_{e3} S_3 x_{22}$$

los otros parámetros de C son cero,

$$v_1 = [m_2 l_{e2} + m_3 l_2] g C_2 + m_3 g l_{e3} C_{23}$$

$$v_3 = m_3 g l_{e3} C_{23}$$

los otros parámetros de V son cero.  $m_1$ ,  $m_2$ , y  $m_3$  son las masas de los eslabones uno, dos, y tres en kg,  $x_{11} = \theta_1$ ,  $x_{12} = \theta_2$ , y  $x_{13} = \theta_3$ , son los ángulos de las uniones uno, dos, y tres en rad,  $g$  es la constante de aceleración gravitacional,  $J_1$ ,  $J_2$ , y  $J_3$  son las inercias en  $\text{kgm}^2$ ,  $C_2 = \cos(x_{21})$ ,  $C_3 = \cos(x_{12})$ ,  $C_{23} = \cos(x_{21} + x_{12})$ ,  $S_2 = \sin(x_{21})$ ,  $S_3 = \sin(x_{12})$ ,  $S_{23} = \sin(x_{21} + x_{12})$ . Los parámetros son tomados de [12].  $m_r = m_l = 0.5$ ,  $b_r = 0.5$ , y  $b_l = -0.5$  son los parámetros de las zonas muertas de las entradas.

El PDDZ está dado por las ecuaciones (8), (9) con parámetros  $G_p = \text{diagonal}[250, 500, 500]$ ,  $G_d = \text{diagonal}[10, 10, 10]$ ,  $V_s = [0, 1.0, 0.5]^T$ , con  $F = [k_1, k_2, k_3]^T = [0, 1.0, 0.5]^T$  la condición dada en (11)  $V_s < F$  se satisface; por lo tanto, el error del sistema en lazo cerrado del PDDZ aplicado a los brazos robóticos se garantiza que es estable asintótico.

El PD está dado por [7] con parámetros  $G_p = \text{diagonal}[500, 1000, 1000]$ ,  $G_d = \text{diagonal}[10, 10, 10]$ ,  $V = [v_1, v_2, v_3]^T$ .

El resultado de la comparación de las funciones de control se muestra en la Figura 10, los estados de posición se muestran en la Figura 11 y los resultados de la comparación para los errores de los controladores se muestra en la Figura 12. La comparación de los errores de velocidad en norma cuadrática  $\|x_{p2}\|^2$  de (11) para los controladores se presenta en la Figura 13. Desde el teorema de la ecuación (11),  $\|x_{p2}\|^2$  convergerá a cero para PDDZ. La Tabla II muestra los resultados del ECM usando (16).

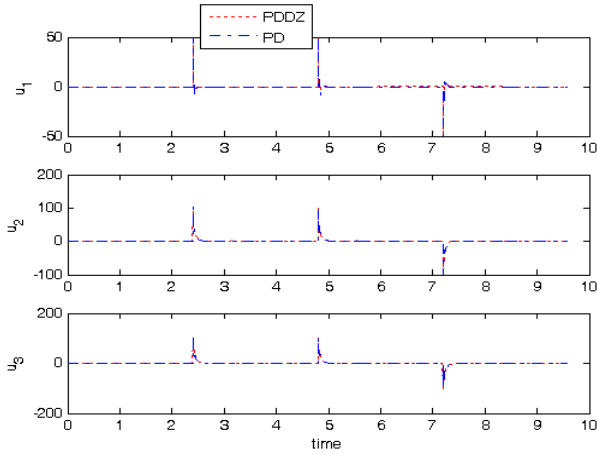


Figura 10. Entradas para el ejemplo 2.

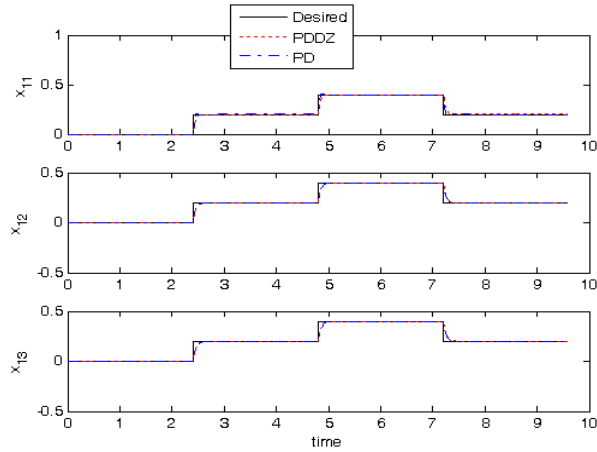


Figura 11. Estados de posición para el ejemplo 2.

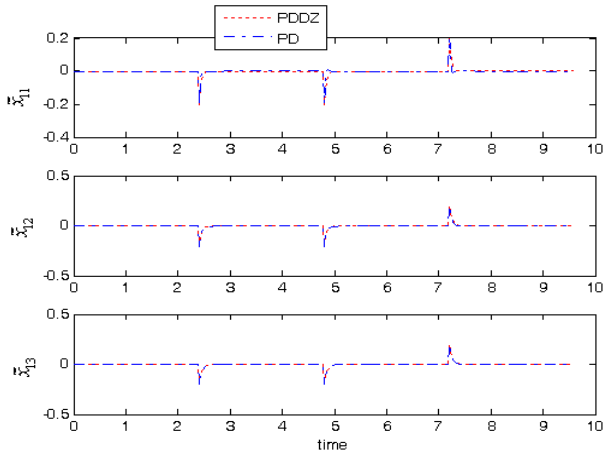


Figura 12. Errores de los estados de posición para el ejemplo 2.

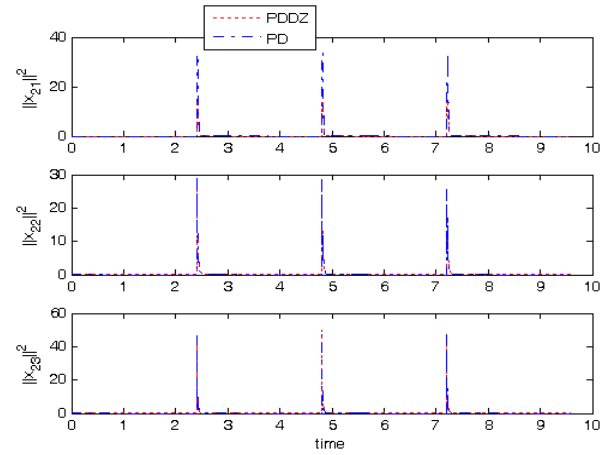


Figura 13. Errores de velocidad para el ejemplo 2.

TABLA II. RESULTADOS PARA EL EJEMPLO 2.

Métodos	ECM para x	ECM para u
PD	0.3592	43.4465
PDDZ	0.3083	42.2897

Notar que la técnica PD requiere ganancias mayores que las del método PDDZ para obtener resultados satisfactorios. Desde las Figuras 10, 11, y 12, se puede ver que PDDZ mejora el PD por que las señales de la planta para el primero siguen mejor las señales de referencia que el segundo, y en el primero las entradas son más pequeñas que en el segundo. Desde la Figura 13, se muestra que PDDZ mejora el PD por que el error de velocidad  $\|x_{p2}\|^2$  presentado por el primero es más pequeño que el presentado por el segundo. Desde la Tabla II, se muestra que el PDDZ alcanza mejor exactitud cuando se compara con el PD por que el ECM es más pequeño para el primero que para el segundo.

## V. CONCLUSIONES

En esta investigación, se presentó el control proporcional derivativo con zona muerta inversa para brazos robóticos con zona muerta en sus entradas. Las simulaciones mostraron que la técnica propuesta alcanza mejor desempeño cuando se compara con el control proporcional derivativo con compensación de gravedad para la regulación de dos brazos robóticos, el resultado muestra la viabilidad, eficiencia, y el potencial especialmente importante en los brazos robóticos. Como trabajo futuro, se mejorará al considerar que algunos parámetros del controlador son desconocidos.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los editores y los revisores sus comentarios acertados y valiosos que ayudaron a mejorar el presente trabajo. También se agradece a la Secretaría de Investigación y Posgrado, a la Comisión de Operación y Fomento de Actividades Académicas, y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por su apoyo en el desarrollo de esta investigación.

## REFERENCIAS

- [1] S. Abrir, W. F. Xie, C. Y. Su, Adaptive tracking of nonlinear systems with non-symmetric dead-zone input, *Automatica*, vol. 43, pp. 522-530, 2007.
- [2] Y. Chen, B. Lib, Z. Deng, Dynamic Modeling and Performance Analysis of a 3-DOF Pan Mechanism for a Cooking Robot, *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, vol. 38, no. 2, pp. 243-260, 2010.
- [3] F. González, J. G. Guarnizo, G. Benavides, Emulation System for a Distribution Center Using Mobile Robot, Controlled by Artificial Vision and Fuzzy Logic, *IEEE Latin America Transactions*, vol. 12, no. 4, pp. 557-563, 2014.
- [4] C. A. G. Gutiérrez, J. R. Reséndiz, J. D. M. Santibáñez, G. M. Bobadilla, A Model and Simulation of a Five-Degree-of-Freedom Robotic Arm for Mechatronic Course, *IEEE Latin America Transactions*, vol. 12, no. 2, pp. 78-86, 2014.
- [5] V. M. Hernandez-Guzman, R. V. Carrillo-Serrano, R. Silva-Ortigoza, PD control for robot manipulators actuated by switched reluctance motors, *International Journal of Control*, vol. 86, no. 3, pp. 540-554, 2013.
- [6] J. Kern, M. Jamett, C. Urrea, H. Torres, Development of a neural controller applied in a 5 DOF robot redundant, *IEEE Latin America Transactions*, vol. 12, no. 2, pp. 98-106, 2014.
- [7] F. L. Lewis, D. M. Dawson, C. T. Abdallah, *Control of robot manipulators*, Theory and Practice, ISBN: 0-8247-4072-6, 2004.
- [8] J. H. Perez-Cruz, J. J. Rubio, J. Linares-Flores, E. Rangel, Control of uncertain plants with unknown deadzone via differential neural networks, *IEEE Latin America Transactions*, vol. 13, no. 7, pp. 2089-2093, 2015.
- [9] J. H. Perez-Cruz, J. J. Rubio, J. Pacheco, E. Soriano, State estimation in MIMO nonlinear systems subject to unknown deadzones using recurrent neural networks, *Neural Computing and Applications*, vol. 25, no. 3-4, pp. 693-701, 2014.
- [10] J. J. Rubio, Stable and optimal controls of a proton exchange membrane fuel cell, *International Journal of Control*, vol. 87, no. 11, pp. 2338-2347, 2014.
- [11] J. J. Rubio, J. Pacheco, J. H. Pérez-Cruz, F. Torres, Mathematical model with sensor and actuator for a transelevator, *Neural Computing and Applications*, vol. 24, no. 2, pp. 277-285, 2014.
- [12] J. J. Rubio, J. Serrano, G. M. Figueroa, C. F. Aguilar-Ibañez, Dynamic model with sensor and actuator for an articulated robotic arm, *Neural Computing and Applications*, vol. 24, no. 3-4, pp. 573-581, 2014.
- [13] R. Silva-Ortigoza, V. M. Hernandez-Guzman, M. Antonio-Cruz, D. Munoz-Carrillo, DC/DC Buck Power Converter as a Smooth Starter for a DC Motor Based on a Hierarchical Control, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 2, pp. 1076-1084, 2015.
- [14] R. Silva-Ortigoza, C. Marquez-Sanchez, F. Carrizosa-Corral, M. Antonio-Cruz, J. M. Alba-Martinez, G. Saldaña-Gonzalez, Hierarchical Velocity Control Based on Differential Flatness for a DC/DC Buck Converter-DC Motor System, *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2014, pp. 1-12, 2014.
- [15] J. E. Slotine, W. Li, *Applied Nonlinear Control*, Macmillan Pub.Co., Englewood Cliffs, NJ 07632, 1991.
- [16] M. W. Spong, M. Vidyasagar, *Robot Dynamics and Control*, John Wiley & Sons, 1989.
- [17] E. Y. Veslin, M. S. Dutra, O. Lengerke, E. A. Carreño, M. J. M. Tavera, A Hybrid Solution for the Inverse Kinematic on a Seven DOF Robotic Manipulator, *IEEE Latin America Transactions*, vol. 12, no. 2, pp. 212-218, 2014.
- [18] J. Zhou, X. Z. Shen, Robust adaptive control of nonlinear uncertain plants with unknown dead-zone, *IET Control Theory and Applications*, vol. 1, pp. 25-32, 2007.



**José de Jesús Rubio (M'08)** is a full time professor of the Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, ESIME Azcapotzalco, Instituto Politécnico Nacional. He has published 74 papers in International Journals, 1 International Book, 8 chapters in International Books, and he has presented 29 papers in International Conferences with 650 citations. He is a member of the IEEE AFS Adaptive Fuzzy Systems. He is part of the editorial board of the *Evolving Systems* journal. He is member of the National Systems of Researchers with level II. He has been the tutor of 3 P.Ph.D. students, 5 Ph.D. students, 29 M.S. students, 4 S. students, and 17 B.S. students.



**Enrique Garcia** was born in México. He received the diploma in robotics engineering from ESIME Azcapotzalco in 2007, the M.S degree from in the Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, ESIME Azcapotzalco, Instituto Politécnico Nacional from 2010. He is a Ph.D. student in the Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, ESIME Azcapotzalco, Instituto Politécnico Nacional, from 2014. He has published 3 paper in an International Journal. His fields of interest are dynamic modeling, system identification, control, robotic systems, and stability.



**Carlos Aguilar-Ibañez** was born in Tuxpan, Ver., México. He received the B.S. degree in Physics from the Higher School of Physics and Mathematics of the National Polytechnic Institute (Mexico City) in 1990. From the Research Center and Advanced Studies of the N.P.I (Mexico City), he received the M.S. degree in Electrical Engineering in 1994, and after postgraduate studies in Automatic Control, he received the Ph.D. degree in June of 1999. From that year until the present Dr. Aguilar has been a researcher, at the Center for Computing Research (C.I.C.). He is a member of the Sistema Nacional de Investigación (SNI) of México since 2000. His research is on non linear systems, mechanical vibrations and chaos theory.



**Cesar Torres** received the B.S. degree from ESIME Zacatenco, Instituto Politécnico Nacional, Mexico. He received the M.S. from the Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, ESIME Azcapotzalco, IPN Mexico in 2011. He received the Ph.D. of the Centro de Investigación en Computación, Instituto Politécnico Nacional in 2013. He is a professor of the Instituto Politécnico Nacional, ESIME Azcapotzalco. He has published 5 papers in international journals. His research is on mathematical models, automotive, robotic, and optimal control.