

# Comparación de Diferentes Algoritmos Adaptables En un Robot Industrial CRS A465: Resultados Experimentales

Jorge Gudiño-Lau

Juan C. Martínez

Eduardo Pérez-Camacho

Marco A. Arteaga

Sección de Eléctrica, DEPMI

Universidad Nacional Autónoma de México

Apdo. Postal 70-256, México, D.F., 04510, México

Tel.: + 52 55 56 22 30 13, Fax: + 52 55 56 16 10 73

E-mail: *jglau@verona.fi-p.unam.mx*, *jcmtzr@yahoo.com*,  
*edpecamacho@yahoo.com.mx*, *arteaga@verona.fi-p.unam.mx*

## Resumen

A pesar de que existen una gran cantidad de artículos reportados en la literatura sobre leyes de control adaptable, existen muy pocos trabajos con resultados experimentales sobre manipuladores industriales. En este trabajo se presenta un estudio experimental de desempeño de diferentes leyes de control adaptable para robots rígidos.

## 1 Introducción

La mayoría de los procesos con robots industriales son controlados con esquemas de control PID. Esta generalización es debida a la simplicidad de su empleo y diseño. Sin embargo, en vista de la naturaleza no lineal de los manipuladores el desempeño obtenido no es muy alto. A fin de dar una solución a este problema, son propuestos diferentes algoritmos de control adaptable.

En la literatura sobre control adaptable existen una gran cantidad de artículos sobre trabajos teóricos y de simulación, por ejemplo en Ortega y Spong (1989) contiene un resumen teórico de un algoritmo adaptable para control de movimiento de robots rígidos que consigue convergencia global. En Sadegh y Guglielmo (1989) se presenta una ley de control adaptable exponencialmente estable para manipuladores, entre otros. Sin embargo, existen muy pocas implementaciones con robots industriales, esto da como resultado la pregunta

¿cuál es el tipo de algoritmo que mejor desempeño tiene en robots industriales?. En Reyes y Kelly (1997) se describe la evaluación de tres esquemas de identificación para determinar los parámetros dinámicos de un robot de dos grados de libertad con transmisión directa. Basado en el principio de conservación de energía, Poignet y Gautier (2000) presentan una comparación de dos métodos para identificación de parámetros de robots mediante la estimación de mínimos cuadrados de un robot *SCARA*. Ping-An y Hui-Tang (1996) presentan un nuevo método de identificación sin medición de velocidad angular. Prifer y Wahl (1994) comparan dos modelos diferentes para identificación de la dinámica de robots de dos grados de libertad con transmisión directa.

El modelo dinámico de los manipuladores posee parámetros que dependen de los momentos de inercia, fricción y gravedad. En muchas de la aplicaciones, los manipuladores usualmente sostienen objetos de diferentes masas que son ignoradas en todo momento. El problema de controlar sistemas con incertidumbres paramétricas es el principal motivo para el empleo de leyes de control adaptable.

Este trabajo presenta un estudio comparativo de tres algoritmos de control adaptable en un robot industrial modelo A465 de la marca CRS *Robotics*. El objetivo de este trabajo es evaluar y comparar el desempeño de los diferentes esquemas de adaptación presentados en Slotine y Li (1987),

Burg *et al.* (1997) y Arteaga Pérez y Siciliano (2000) bajo las mismas condiciones de trabajo.

El artículo está organizado como sigue. En la Sección 2 se describe el equipo experimental, en la Sección 3 se hace una descripción de los métodos de identificación de parámetros. La comparación de los resultados experimentales son mostrados en la Sección 4. Finalmente en la Sección 5 se dan las conclusiones de los resultados experimentales.

## 2 Equipo Experimental

Los algoritmos de identificación han sido evaluados en un brazo robot industrial A465 de la firma canadiense CRS Robotics, el cual se encuentra en el Laboratorio de Robótica de la Universidad Nacional Autónoma de México (ver Figura 1).

La configuración articular del brazo mecánico de seis grados de libertad es actuada por servomotores de corriente directa con encoders ópticos de alta resolución. Una descripción detalla del robots A465 es dada en Martínez (2002). Los algoritmos son ejecutados en una computadora personal Pentium IV PC a 1.5 GHz, se utilizan dos tarjetas de control FlexMotion de la firma *National Instruments* a una velocidad de muestreo de 7 ms. La programación de los algoritmos de control se realizo en el software CVI de *National Instruments*.



Figura 1: Robot CRS A465 Robotics.

## 3 Algoritmos de adaptación utilizados para la comparación

El modelo dinámico de un robot rígido puede ser escrito como en Sciavicco y Siciliano (1996), resultando en

$$\mathbf{H}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{D}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau} \quad (1)$$

donde  $\mathbf{q} \in \mathbb{R}^n$  es el vector de coordenadas generalizadas de articulación.  $\mathbf{H}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$  es la matriz de inercia simétrica positiva definida,  $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} \in \mathbb{R}^n$  es el vector de torques de Coriolis y centrífugos,  $\mathbf{g}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^n$  es el vector de torques gravitacionales,  $\mathbf{D} \in \mathbb{R}^{n \times n}$  es la matriz diagonal semidefinida positiva de los coeficientes de fricción viscosa de las articulaciones, y  $\boldsymbol{\tau} \in \mathbb{R}^n$  es el vector de torques actuando en las articulaciones.

Lo que nos permite describir los tres esquemas de control adaptable para calcular los parámetros dinámicos de un robot de seis grados de libertad. El primer método está dado en Slotine y Li (1987).

La ley de control es definida como:

$$\boldsymbol{\tau} = \hat{\mathbf{H}}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}_r + \hat{\mathbf{C}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}_r + \hat{\mathbf{D}}\dot{\mathbf{q}} + \hat{\mathbf{F}}_c(\dot{\mathbf{q}}_r) + \hat{\mathbf{g}}(\mathbf{q}) - \mathbf{K}_D \mathbf{s} \quad (2)$$

$$\text{donde} \quad \mathbf{s} = \dot{\tilde{\mathbf{q}}} + \boldsymbol{\Lambda}\tilde{\mathbf{q}}. \quad (3)$$

La ley de adaptación de parámetros es descrita por

$$\dot{\hat{\boldsymbol{\varphi}}} = -\boldsymbol{\Gamma}^{-1}\mathbf{Y}^T(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \dot{\mathbf{q}}_r, \ddot{\mathbf{q}}_r)\mathbf{s} \quad (4)$$

$$\text{donde} \quad \dot{\mathbf{q}}_r = \dot{\mathbf{q}}_d - \boldsymbol{\Lambda}\tilde{\mathbf{q}} \quad (5)$$

$\hat{\boldsymbol{\varphi}}$  es el vector  $m$ -dimensional de parámetros estimados del manipulador. La importancia de este algoritmo se debe a que la matriz del regresor  $\mathbf{Y}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \dot{\mathbf{q}}_r, \ddot{\mathbf{q}}_r)$ , no es una función de la aceleración angular. El segundo método es dado por (2) en combinación con una técnica de filtrado (Burg *et al.* 1997) para la estimación de velocidad, definida por

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{Y}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}_d, \ddot{\mathbf{q}}_d)\hat{\boldsymbol{\varphi}} - \mathbf{K}_P\tilde{\mathbf{q}} - \mathbf{K}_D\mathbf{e}_f \quad (6)$$

donde la variable  $\mathbf{e}_f \in \mathbb{R}^n$  es la salida del error de velocidad del filtro para compensar la carencia de una medición directa de la señal de velocidad, los errores de seguimiento de posición son filtrados utilizando la siguiente ecuación dinámica

$$\dot{\mathbf{p}} = -(k+1)\mathbf{p} + (k^2+1)\mathbf{e} \quad (7)$$

$$\mathbf{e}_f = -k\mathbf{e} + \mathbf{p} \quad (8)$$

donde  $\mathbf{p} \in \mathbb{R}^n$  es utilizada como una variable interna del filtro. La constante escalar positiva  $k$  es una ganancia del controlador. El filtro utiliza el error de seguimiento de posición,  $\mathbf{e}$ , como la entrada y produce una señal en su salida  $\mathbf{e}_f$ , la cual

se empleará para capturar el comportamiento de  $\dot{\mathbf{e}}$ .

El tercer método es un esquema de adaptación y control de seguimiento, utiliza un observador lineal para estimar la velocidad dado en Arteaga Pérez (2002). La ley de control es definida por

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{Y}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}_r, \ddot{\mathbf{q}}_r)\hat{\boldsymbol{\phi}} - \mathbf{K}_R(\dot{\mathbf{q}}_o - \dot{\mathbf{q}}_r) - \mathbf{K}_P(\tilde{\mathbf{q}} + \mathbf{z}) \quad (9)$$

La ley de adaptación es

$$\dot{\hat{\boldsymbol{\phi}}} = -\boldsymbol{\Gamma}^{-1}\mathbf{Y}^T(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}_r, \ddot{\mathbf{q}}_r)(\hat{\mathbf{s}} + \hat{\mathbf{r}}) \quad (10)$$

con

$$\hat{\mathbf{s}} + \hat{\mathbf{r}} = (\dot{\hat{\mathbf{q}}} - \dot{\mathbf{q}}) + \boldsymbol{\Lambda}\tilde{\mathbf{q}} \quad (11)$$

donde

$$\dot{\mathbf{q}}_r = \dot{\mathbf{q}}_d - \boldsymbol{\Lambda}\tilde{\mathbf{q}} + \boldsymbol{\Lambda}\mathbf{z} \quad (12)$$

$$\dot{\mathbf{q}}_o = \dot{\mathbf{q}} - \boldsymbol{\Lambda}\mathbf{z} \quad (13)$$

$$\mathbf{s} = \dot{\mathbf{q}} - \dot{\mathbf{q}}_r = \dot{\tilde{\mathbf{q}}} + \boldsymbol{\Lambda}\tilde{\mathbf{q}} - \boldsymbol{\Lambda}\mathbf{z} \quad (14)$$

$$\mathbf{r} = \dot{\mathbf{q}} - \dot{\mathbf{q}}_o = \dot{\mathbf{z}} + \boldsymbol{\Lambda}\mathbf{z} \quad (15)$$

$$\mathbf{z} = \mathbf{q} - \hat{\mathbf{q}} \quad (16)$$

$\mathbf{z}$  es el error de observación. El observador lineal es definido como

$$\dot{\hat{\mathbf{q}}} = \dot{\mathbf{q}}_o + \boldsymbol{\Lambda}\mathbf{z} + k_d\mathbf{z} \quad (17)$$

$$\dot{\hat{\mathbf{q}}}(0) = (\dot{\mathbf{q}}_o + \boldsymbol{\Lambda}\mathbf{z}(0) + k_d\mathbf{z}(0)) \quad (18)$$

$$\ddot{\hat{\mathbf{q}}}_o = \ddot{\mathbf{q}}_r + k_d\boldsymbol{\Lambda}\mathbf{z} \quad (19)$$

donde  $k_d$  es una constante positiva.

## 4 Resultados Experimentales

En esta sección se describen los resultados experimentales obtenidos de los tres esquemas de identificación.

Primero se muestran los resultados obtenidos para las ganancias del controlador PD para cada motor de las seis articulaciones por el método de oscilación de Ziegler y Nichols (Åström y Wittenmark 1990). La Tabla 1, muestra las ganancias PD obtenidas para cada motor del brazo robot A465 CRS Robotics.

Para los tres casos, la trayectoria deseada  $\mathbf{q}_d$  fue empleada con la siguiente característica de movimiento (20), han sido seleccionadas para proporcionar movimiento sin cambios abruptos de posición  $\mathbf{q}_d$ , velocidad  $\dot{\mathbf{q}}_d$ , y aceleración  $\ddot{\mathbf{q}}_d$  desde el inicio hasta el final del movimiento, previniendo la

	$\mathbf{K}_p$	$\mathbf{K}_d$
Articulación 1	42	1.4112
Articulación 2	90	2.5920
Articulación 3	70	2.2896
Articulación 4	264	2.3760
Articulación 5	276	2.5500
Articulación 6	186	1.8079

Tabla 1:  $\mathbf{K}_p$  and  $\mathbf{K}_d$  Las ganancias para cada articulación del A465.

saturación de los actuadores durante el movimiento.

$$\mathbf{q}_d(t) = \begin{bmatrix} (40^\circ \sin(\omega 1t))(1 - e^{K_{e1}t^3}) \\ (35^\circ \sin(\omega 2t))(1 - e^{K_{e2}t^3}) \\ (20^\circ \sin(\omega 3t))(1 - e^{K_{e3}t^3}) \\ (45^\circ \sin(\omega 4t))(1 - e^{K_{e4}t^3}) \\ (60^\circ \sin(\omega 5t))(1 - e^{K_{e5}t^3}) \\ (60^\circ \sin(\omega 6t))(1 - e^{K_{e6}t^3}) \end{bmatrix} \quad (20)$$

donde de  $\omega 1$  hasta  $\omega 6$  representan las frecuencias de las trayectorias deseadas para las seis articulaciones y  $K_{e1}, \dots, K_{e6} = 2.0$ .

Fueron dos razones por la cual se escogieron estas trayectorias. La primera, inicializar la posición, velocidad y aceleración en cero en el tiempo  $-t = 0s-$ . La segunda, aprovechar al máximo las capacidades de los actuadores para movimientos deseados en altas velocidades y aceleraciones, donde las no linealidades de la dinámica del robot son muy importantes.

La matriz de ganancia de los tres esquemas de control adaptable  $\boldsymbol{\Gamma}^{-1}$  es una matriz constante diagonal positiva definida, dada por

$$\boldsymbol{\Gamma}^{-1} = \text{diag}\{0.00001, 0.00001, 0.00001, 0.00001, 0.00001, 0.00001, 0.00001, 0.00001, 0.00001, 0.00001, 2.00000, 2.00000, 2.00000, 0.15000, 0.15000, 0.19000, 0.00150, 0.00150, 0.00150, 0.50000, 0.50000, 0.50000, 0.50000, 0.01000, 0.02000, 0.05000, 0.50000, 0.50000, 0.50000, 0.01000, 0.02000, 0.01000\}$$

La Tabla 2 muestra las ganancias calculadas por la metodología de Ziegler y Nichols en cada esquema de identificación  $\boldsymbol{\Lambda}$ ,  $\mathbf{K}_p$  y  $\mathbf{K}_d$ .

Ganancia	Slotine y Li (1987)	Burg et al. (1997)	Arteaga (2001)
$\Lambda_{\text{art.1}}$	10	8	12
$\Lambda_{\text{art.2}}$	15	9	15
$\Lambda_{\text{art.3}}$	15	9	15
$\Lambda_{\text{art.4}}$	8	12	12
$\Lambda_{\text{art.5}}$	8	14	15
$\Lambda_{\text{art.6}}$	14	14	15
$K_{p_1}$	623.0000	686.44890	560.44890
$K_{p_2}$	1142.0000	1489.7189	1142.2245
$K_{p_3}$	841.2430	1148.2498	841.24300
$K_{p_4}$	485.7197	466.87730	466.87730
$K_{p_5}$	506.7508	476.41700	235.59580
$K_{p_6}$	92.17605	92.176000	45.582600
$K_{p_1}$	31.50500	31.505000	31.500000
$K_{p_2}$	57.91167	57.915700	57.915700
$K_{p_3}$	51.16780	51.167800	51.167800
$K_{p_4}$	4.710690	4.7106400	4.7106000
$K_{p_5}$	5.055600	5.0556000	2.5278000
$K_{p_6}$	1.037420	1.0300000	0.5187000

Tabla 2: Ganancias  $\Lambda$ ,  $K_p$  y  $K_d$

En la Tabla 3, se utilizó la norma  $\mathcal{L}^2$  como el criterio para evaluar el índice de desempeño del error de seguimiento en los esquemas (2), (6) y (9).

Norma $\mathcal{L}^2$	Slotine y Li (1987)	Burg et al. (1997)	Arteaga (2001)
$\mathcal{L}^2(\tilde{\mathbf{q}})$	0.518297	0.483177	0.424279
$\mathcal{L}^2(\tilde{q}_1)$	0.271775	0.159658	0.230039
$\mathcal{L}^2(\tilde{q}_2)$	0.137317	0.109241	0.124022
$\mathcal{L}^2(\tilde{q}_3)$	0.213718	0.147437	0.181928
$\mathcal{L}^2(\tilde{q}_4)$	0.184163	0.289829	0.211498
$\mathcal{L}^2(\tilde{q}_5)$	0.170146	0.266527	0.105945
$\mathcal{L}^2(\tilde{q}_6)$	0.259562	0.138783	0.150530

Tabla 3: Evaluación de desempeño con la norma de error de seguimiento  $\mathcal{L}^2$

La norma  $\mathcal{L}^2$  calcula el promedio de la raíz cuadrática media del error de seguimiento y está dada por:

$$\mathcal{L}^2[\tilde{\mathbf{q}}] = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \|\tilde{\mathbf{q}}(t)\|^2 dt} \quad (21)$$

El tiempo de duración en la evaluación de desempeño fue de  $T = 1200$ s. Se calculó la norma del error de cinco pruebas en línea, utilizando las trayectorias de prueba (20), para cada uno de

los controladores antes mencionados. Para validar los algoritmos de adaptación mencionados anteriormente se introdujeron los parámetros obtenidos de los tres esquemas en el modelo simulado del robot, con la finalidad de comparar la respuesta a lazo abierto de la planta real y la simulada.

## 5 Conclusiones

En este documento se ha presentado la evaluación experimental de tres algoritmos de identificación en línea para determinar los parámetros dinámicos del brazo robot industrial.

De las tres leyes de control adaptable, la presentada en (9) mostro los mejores resultados de acuerdo con el uso de la norma  $\mathcal{L}^2$  para los errores de seguimiento. Sin embargo, éste es el más complejo de implementar. En (2) la velocidad de la articulación,  $\dot{\mathbf{q}}$ , ha sido calculada mediante diferenciación numérica de la posición de la articulación,  $\mathbf{q}$ . Este introduce una aproximación para el valor de la velocidad lo cual causo que el valor de la norma  $\mathcal{L}^2$  obtenida presentara el valor más grande. En (6) los resultados obtenidos presentaron una mejoría, sin embargo, éste tiene una norma de desempeño similar con respecto a (2).

### Agradecimientos

Este trabajo de investigación es apoyado por la DGAPA bajo el proyecto IN106901 y becas del CONACYT y PROMEP–México.

## Referencias

- Arteaga Pérez, M. A.** 2002. Robot control and parameter estimation with only joint position measurements. Submitted in Automatica.
- Arteaga Pérez, M. A. y B. Siciliano.** 2000. On tracking control of flexible robot arms. *IEEE Transactions on Automatic Control*, to appear.
- Åström, K. J. y B. Wittenmark.** 1990. *Computer-Controlled Systems*. New Jersey: Prentice–Hall.
- Burg, T., D. Dawson y P. Vedagarbha.** 1997. A redesigned dcal controller without velocity measurements: theory and demonstration. *Robotica* 15. 337–346.

- Martínez, J. C.** 2002. Parameters identification of an industrial robot with different adaptive schemes. Universidad Veracruzana, México.
- Ortega, R. y M. W. Spong.** 1989. Adaptive motion control of rigid robots: a tutorial. *Automatica* 25(6). 877–888.
- Ping-An, B., P. J. y C. Hui-Tang.** 1996. A learning scheme for the parameter identification of robots dynamics.. *IEEE International Conference On Industrial Technology*. Shangai, China. 651–655.
- Pognet, P. y M. Gautier.** 2000. Comparison of weighted least squares and extended kalman filtering methods for dynamic identification of robots. *IEEE International Conference On Robotics and Automation*. San Francisco CA, USA. 3622–3627.
- Prufer, M. Schmidt, C. y F. Wahl.** 1994. Identification of robot dynamics with differential and integral models: A comparison. *IEEE International Conference On Robotics and Automation*. San Diego CA, USA. 340–345.
- Reyes, F. y R. Kelly.** 1997. Experimental evaluation of identification schemes on a direct drive robot. *Robotica* 15. 563–571.
- Sadegh, N. y K. Guglielmo.** 1989. A new learning controller for mechanical manipulators. *IEEE International Conference On Control and Automation*. 2827–2833.
- Sciavicco, L. y B. Siciliano.** 1996. *Modeling and Control of Robot Manipulators, 1er ed.*. Singapore: McGraw–Hill.
- Slotine, J. J. E. y W. Li.** 1987. On the adaptive control of robot manipulators. *International Journal of Robotics Research* 6(3). 49–59.

## Apéndice A: Resultados Experimentales y Simulados del Comportamiento Dinámico del Robot A465

Con el propósito de validar el comportamiento dinámico del brazo robot A465, se compararon las respuestas a lazo abierto del robot real y el simulado, en el último caso se sustituyeron los parámetros identificados.

Trayectorias de torque usando diferentes frecuencias, es decir, una para cada articulación:

$$\begin{aligned}
 v_1 &= 2.0 \sin(5\pi t) & [Volts] \\
 v_2 &= 2.0 \sin(7\pi t) & [Volts] \\
 v_3 &= 2.0 \sin(9\pi t) & [Volts] \\
 v_4 &= 2.0 \sin(11\pi t) & [Volts] \\
 v_5 &= 2.0 \sin(13\pi t) & [Volts] \\
 v_6 &= 2.0 \sin(15\pi t) & [Volts]
 \end{aligned}
 \tag{22}$$

Todas las pruebas experimentales se realizaron bajo las siguientes condiciones iniciales para el brazo robot,  $q_1(0) = q_2(0), \dots, q_6(0) = \dot{q}_1(0), \dots, \dot{q}_6(0) = \ddot{q}_1(0), \dots, \ddot{q}_6(0) = 0$ .

La exactitud en los parámetros estimados se verifico al realizar ésta comparación. En todos los casos se usaron las entradas de torque dadas por (22). De la Figura 3 a 8 se muestran los resultados de esta comparación. Los resultados de éstas muestran que las simulaciones con los parámetros estimados siguen bastante bien la forma de onda de los resultados experimentales en el brazo robot. En el caso del esquema dado en (Arteaga Pérez 2002), la comparación muestra el mejor comportamiento dinámico. Sin embargo, en los tres esquemas los resultados muestran notables desviaciones de convergencia.

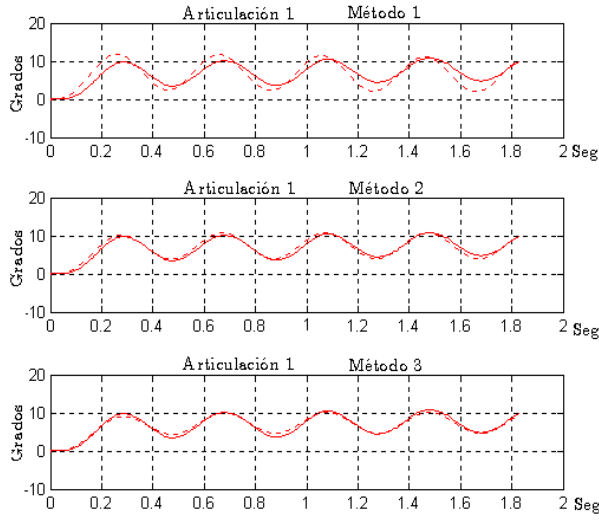


Figura 2: Respuestas para la articulación 1, simulado ( $\cdots$ ) y experimental ( $—$ ).

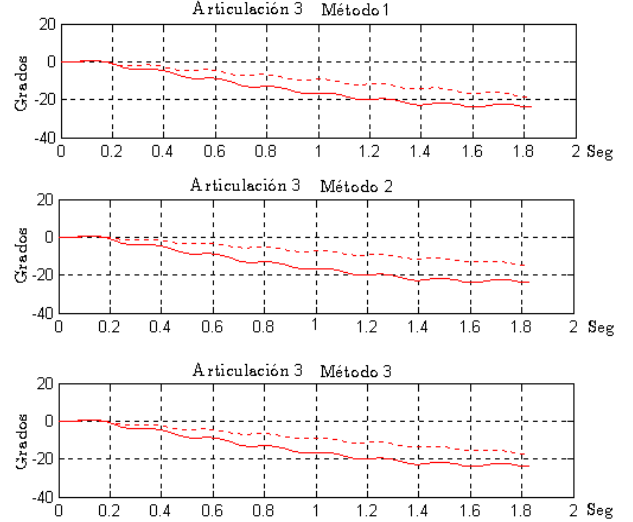


Figura 4: Respuestas para la articulación 3, simulado ( $\cdots$ ) y experimental ( $—$ ).

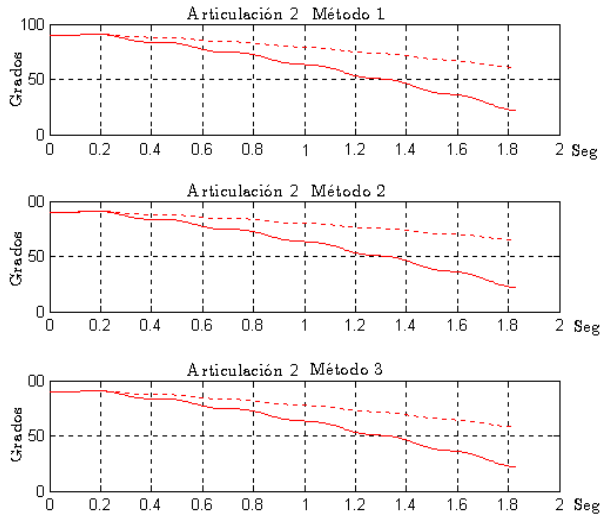


Figura 3: Respuestas para la articulación 2, simulado ( $\cdots$ ) y experimental ( $—$ ).

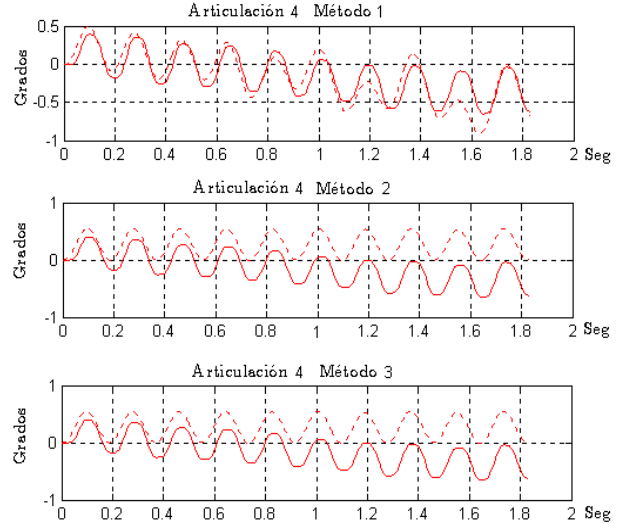


Figura 5: Respuestas para la articulación 4, simulado ( $\cdots$ ) y experimental ( $—$ ).

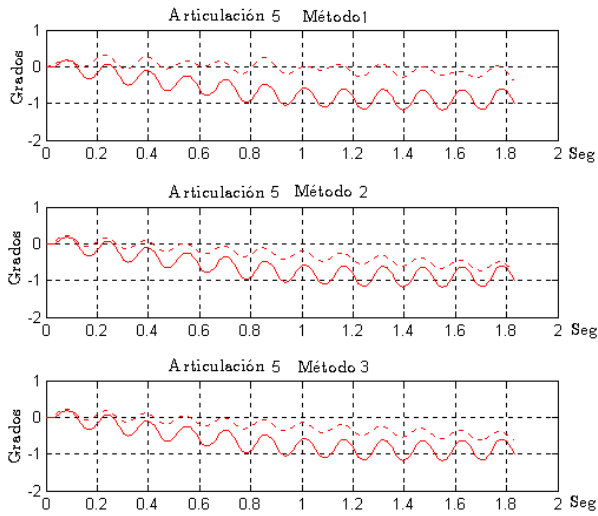


Figura 6: Respuestas para la articulación 5, simulado ( $\cdots$ ) y experimental ( $—$ ).

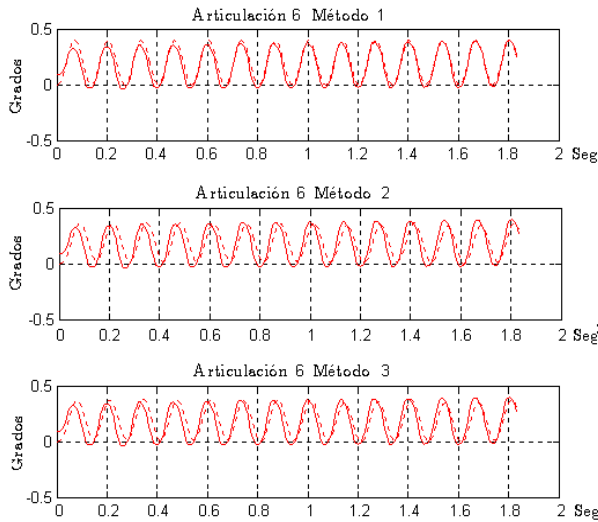


Figura 7: Respuestas para la articulación 6, simulado ( $\cdots$ ) y experimental ( $—$ ) responses for joint 6.