

Determinación de los Parámetros para el Servomotor NXT LEGO Mindstorms® con Técnicas de Identificación de Sistemas

Ing. María Luisa Pinto Salamanca, MSc. Giovanni Rodrigo Bermúdez Bohórquez

RESUMEN

Se presenta el estudio y modelamiento de un servomotor NXT® del kit de robótica LEGO® MINDSTORMS® y la aplicación de técnicas de Identificación de sistemas ISIS para la determinación de sus parámetros. Se explican las etapas desarrolladas en el proceso de identificación, adquisición de los datos de entrada y salida con el programa Robolab™ 2.9 categoría Investigator y el controlador NXT®, la obtención del modelo con el Toolbox de Identificación de Matlab® y la comparación de los modelos propuestos con las respuestas reales. Los resultados se muestran como ejemplo para la determinación de los parámetros requeridos en cualquier plataforma robótica móvil.

Palabras Clave— Servomotor, Kit de Robótica, Identificación de Sistemas, Parámetros.

I. INTRODUCCIÓN

A partir de los modelos geométricos, cinemáticos y dinámicos es posible simular un sistema robótico y establecer el diseño de controladores para los mismos. Dichos modelos se basan en la aplicación de ciertas leyes de la física con la intervención de las características geométricas o parámetros del robot, para el planteamiento de ecuaciones que describen las variables asociadas a su comportamiento (posición, orientación, velocidades, fuerzas, etc.) (Ollero, 2001).

Existen dos métodos principales para obtener el modelo de un sistema: el *modelado teórico*: se trata de un método analítico, en el que se recurre a leyes básicas de la física para describir el comportamiento dinámico de un fenómeno o proceso; y la *identificación del sistema*: se trata de un método experimental que permite obtener el modelo de un sistema a partir de datos reales recogidos de la planta bajo estudio.

Los sistemas de Robótica: LEGO DACTA® y MINDSTORMS® NXT® Hardware Developer Kit (LEGO, 2006) se presentan como herramientas especialmente útiles para el diseño, construcción programación y modelado de diversos prototipos robóticos móviles y articulados. Ambos sistemas, están constituido por una serie de piezas LEGO®, un dispositivo programable, un conjunto de sensores

(entradas) y actuadores (salidas) compatibles, que permiten armar estructuras robóticas, tomar señales de ambiente, procesar datos y ejecutar ciertas tareas.

El conjunto de actuadores del kit LEGO® MINDSTORMS® NXT® se compone por tres motores que incorporan un sensor de posición, que al ser insertados y relacionados con otras piezas, generan los movimientos en el robot. Con ciertas especificaciones de los fabricantes y algunos experimentos cuyos resultados están disponible vía web (Hurbain, 2006), (Hurbain, 2007), se pueden conocer algunas características mecánicas y eléctricas de estos servomotores; sin embargo, la información presentada no incluye valores para todos sus parámetros, lo cual afecta el modelado de la plataforma robótica en la cual se incluye dicho motor. A continuación se presenta la aplicación de algunos conceptos de modelamiento, identificación de sistemas ISIS y simulación con el fin de determinar y calcular los parámetros para el servomotor NXT®.

Este artículo se presenta como resultado explorativo del estudio y modelado de las Plataformas Robóticas Móviles dentro de las actividades realizadas como Joven Investigadora 2007 Colciencias en el Grupo de Investigación en Robótica Móvil ROMA de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas y el Grupo de Investigación en Robótica y Automatización Industrial GIRA de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

II. LOS SERVOMOTORES NXT®

Los servomotores del kit de robótica LEGO® MINDSTORMS® son motores DC que incorporan un sensor de posición con un grado de resolución y una velocidad de rotación del eje de 170 rpm. El modelo de los servomotores como actuadores del sistema, se define teniendo en cuenta los parámetros eléctricos de un motor DC y la caja reductora de velocidad que lo compone. Un esquema representativo se muestra en la figura 1. En (Hurbain, 2007) se presentan algunos datos y curvas características de los motores para los kits de Robótica de LEGO® sobre los valores eléctricos (voltaje aplicado, corriente, potencia eléctrica) y mecánicos (velocidad de rotación, potencia mecánica, eficiencia).

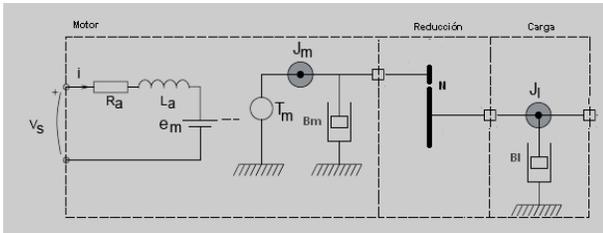


Fig. 1. Diagrama Esquemático Motor

Para modelar el comportamiento de cada servomotor se requirió definir los siguientes parámetros:

R_a : Resistencia de armadura [Ω]

L_a : Inductancia de armadura [H]

K_e : Constante de fuerza contraelectromotriz [$V/rad/s$]

K_T : Constante de torque [Nm/A]

J_m : Momento de Inercia del Motor [Kgm^2]

B_m : Coeficiente de fricción viscosa del motor [$Nm/rad/s$]

N : Relación de reducción del motor

J_l : Momento de Inercia de la carga [Kgm^2]

B_l : Coeficiente de fricción viscosa de la carga motor [$Nm/rad/s$]

Los valores disponibles en parámetros del motor valores parámetros del motor hallados en (Hurbain, 2007), fueron:

$$R_a = 6,8562\Omega, L_a : despreciable \quad (1)$$

$$K_t = 0.3179 \frac{Nm}{A} \quad (2)$$

$$K_e = 0.46389 \frac{V}{rad/s} \quad (3)$$

$$B_m = 1,1278 \times 10^{-3} \frac{Nm}{rad/s} \quad (4)$$

El factor de reducción se determinó de acuerdo a la relación entre la velocidad del eje del motor y el valor real de revoluciones sentido por el encoder que esta acoplado mediante una relación de dos piñones, al lado de dicho eje según se aprecia en las figuras 2 y 3. Según el número de ranuras del encoder que deben analizarse por vuelta, la relación aparente entre la velocidad del motor y el eje de salida que debe ser la misma que se mide por el sensor es de 1:15, así que $N=15$. Esto se confirma en los cálculos de (Hurbain, 2007). Valor que puede aceptarse debido a que en la figura 5 no es muy visible la relación entre el número de dientes de cada piñón en la caja reductora, sumado a la dificultad de desarmar el servomotor sin destruirlo.

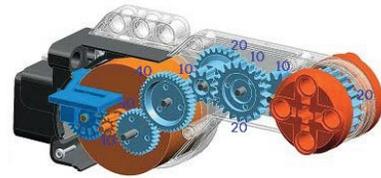


Fig. 2. Servomotor NXT (LEGO education, 2006)



Fig. 3. Encoder Servomotor NXT (Hurbain, 2006)

Para corroborar la aproximación de estos valores y la determinación de los parámetros restantes, a continuación se aplican ciertas técnicas de identificación de sistemas ISIS.

III.OBTENCIÓN DE DATOS DE ENTRADA/SALIDA Y TRATAMIENTO PREVIO DE LOS DATOS REGISTRADOS

La Identificación del Sistemas se trata de un método experimental que permite obtener el modelo de un sistema a partir de datos reales recogidos de la planta bajo estudio. En términos generales, el proceso de identificación comprende la obtención de datos de entrada/salida; el tratamiento previo de los datos registrados; la elección de la estructura del modelo; la obtención de los parámetros del modelo; y finalmente la validación del modelo (Guillen, 2006).

Para el caso de la identificación de los parámetros y el modelo del servomotor NXT® se debió analizar la estructura interna del motor, la caja de reducción, los circuitos de control y de mando que se encontraron en el controlador NXT® y en el mismo servomotor.

Aprovechando las características de adquisición de las señales dadas por los sensores del Kit Lego Mindstorms™, incluidos los encoders de cada servomotor, a través del programa Robolab™ 2.9 categoría **INVESTIGATOR**, se obtuvieron las posiciones angulares (en grados) para cada motor. La figura 5 muestra el procedimiento realizado, en el que se incluye el programa diseñado para que el motor durante cuarenta segundos se moviera invirtiendo su sentido de giro periódicamente; mediante la opción de adquisición se registraron las posiciones angulares del motor y aprovechando las herramientas matemáticas de multiplicación y división también dadas por el software Robolab™ 2.9, se realizó la conversión de la señal medida a radianes y se derivó para obtener la velocidad angular. Dicha figura presenta un ejemplo de la señal obtenida y su tratamiento para conocer la velocidad angular.

Para la obtención de los datos de entrada se requirió analizar los planos y esquemas de los circuitos de control para el

motor: salida del procesador, driver de potencia, PWM y puentes H (figura 6). Según la información del kit de desarrollo ofrecido por Kit Lego Mindstorms™, entre los terminales **MA0** y **MA1** corresponden a las salidas del driver LB1836 ó LB1930 (AllDatasheets, 2007), al cual debe conectarse el motor; **POWERMA** (Potencia al motor A) es una señal de voltaje (4.3V) común en todos los puertos de salida y entrada, para alimentar otros circuitos; y los pines **TACHOA1** y **TACHOA0** son las señales del encoder del motor A, que portan información sobre el número de pulsos generados cuando el motor esta en movimiento y el sentido de giro del mismo.

A. Datos de Entrada.

A partir de los comandos de avance y retroceso con diferentes niveles de velocidad dados a partir de las instrucciones de potencia, tal como se llaman en el programa Robolab™ 2.9 fue posible gobernar el movimiento del motor A. Las señales de entrada para el proceso de identificación se obtuvieron de la relación entre los niveles de “potencia” disponibles y los valores reales de voltaje aplicados al motor, lo cual se logró mediante una medición directa del voltaje entre los terminales **MA0** y **MA1** del controlador NXT®. Los valores obtenidos se muestran en la tabla 2 para un nivel inicial de carga en la batería del NXT en 7.63V, con la cual se polarizó el motor durante la toma de datos.

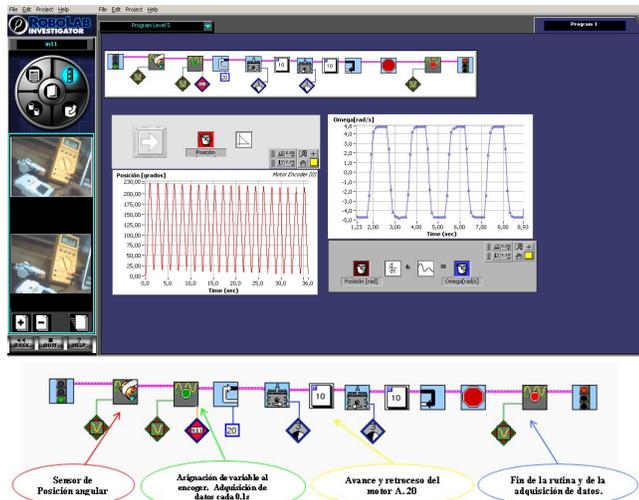


Fig. 5. Obtención de datos con Robolab™ 2.9.

Tabla 2. Relación entre el comando Potencia y el Voltaje aplicado a cada motor

Nivel de Potencia Batería: 7.63V	Voltaje Aplicado al motor (MA0-MA1) [V]	
	Avanzar	Retroceder
1	2.50	-2.44
2	3.31	-3.31
3	4.91	-4.92
4	6.57	-6.58
5	7.51	-7.50

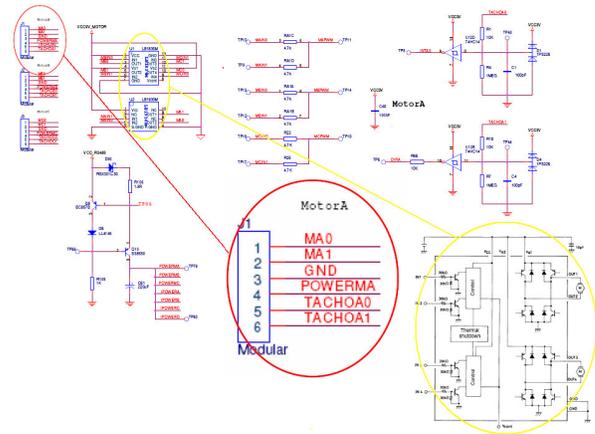


Fig. 6. Circuito Electrónico Controlador NXT (LEGO, 2006), (AllDatasheets, 2007)

B. Datos de Salida.

A partir de la instrucción de inicialización del sensor de rotación (NXT Rotation Sensor) de Robolab™ 2.9, se adquirieron los datos de posición angular dados por los pulsos del encoder en el servomotor. Luego de una conversión de grados a radianes para la posición angular y de su derivación mediante instrucciones matemáticas del mismo programa Robolab™ 2.9, se obtuvieron los datos de velocidad necesarios para la identificación del sistema.

Después de ordenar e importar los datos de entrada y salida como vectores columna, se aplicaron las funciones del toolbox de identificación de Matlab™. La figura 7 presenta dos ejemplos de conjuntos de datos de entrada y salida que se analizaron para la identificación del sistema.

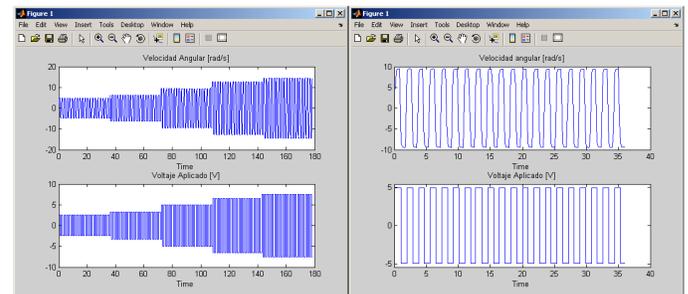


Fig. 7. Datos de entrada: voltaje aplicado, salida: velocidad angular

IV. MODELO DE CAJA NEGRA, ELECCIÓN DE LA ESTRUCTURA Y OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO

De acuerdo al conjunto de datos de entrada/salida obtenidos para mediciones con los cinco niveles de potencia; con técnicas de identificación paramétrica y con las funciones relacionadas de Matlab™: “arx” modelo ARX, “oe” modelo OUTPUT ERROR, “armax” modelo ARMAX y “bj” modelo BOX JENKINS, se obtuvieron diferentes modelos del servomotor.

La figura 8 presenta las repuestas al escalón de dos de los modelos obtenidos, ante una entrada con un nivel de potencia de “3”, en las que se aprecia la inestabilidad y ganancia negativa de algunos, pero la aproximación a una posible respuesta real de otro como el modelo Output Error mOE_{31}

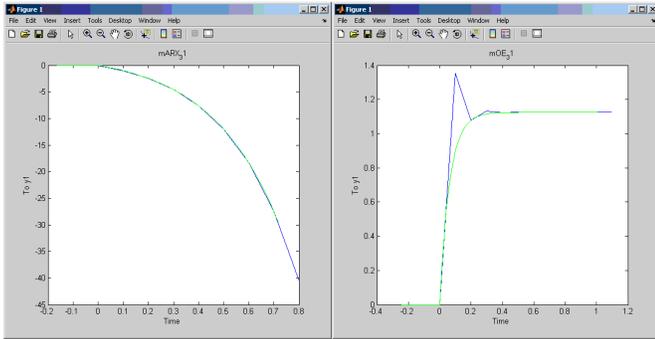


Fig. 8. Respuesta al escalón Modelos Potencia=3.

A. Validación del Modelo.

De acuerdo a las repuestas al escalón y su aproximación con las respuestas reales del sistema, los modelos que inicialmente se seleccionaron fueron aquellos con estructuras: “oe” para las entradas de voltaje correspondientes a los cinco niveles de potencia (mOE_11 a mOE_51) y la estructura “arx” para el cuarto y quinto nivel de potencia (mARX_41 y mARX_41).

También se noto una aproximación pero con ganancia negativa de los modelos con estructuras “armax” y “bj” con datos de entrada para los niveles de potencia uno, dos, cuatro y cinco. Los modelos que presentaban considerables oscilaciones en la repuesta al escalón no se tuvieron en cuenta.

Utilizando los métodos de validación proporcionados por el Toolbox de Identificación de Matlab™ (los cuales se basan en la simulación del modelo obtenido, y la comparación entre su salida y la respuesta real del sistema), fue posible seleccionar el mejor modelo. A través de la función “compare” se mostró la diferencia entre la salida simulada de cada modelo y la salida real del sistema.

Algunos porcentajes de aproximación se muestran en la figura 9. Aunque las respuestas provienen de sistemas estables, el porcentaje de aproximación mayor no sobrepasa el 56.55 %, lo cual demuestra que los datos de entradas y salida no contienen la suficiente información para el proceso de identificación, pero para este caso y debido a la forma como se adquirieron estos datos, se consideran suficientes. Los modelos a seleccionar con los métodos de validación de la función compare fueron de estructuras: “oe” con porcentajes de máximos aproximación de 55.51 a 55.66 %.

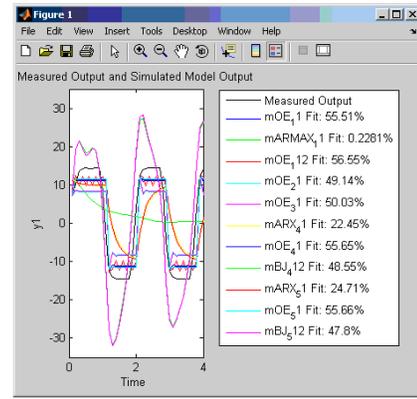


Fig. 9. Comparación modelos aplicados al sistema

Las funciones de transferencia de los tres modelos con mayor porcentaje de aproximación se presentan en la tabla 3, se incluyen tres modelos de primer orden y uno de segundo orden. Se concluye entonces que cualquiera de estos modelos representa el comportamiento del servomotor, sin embargo se propuso realizar la identificación por el método de caja blanca para comprobar este comportamiento.

Tabla 3. Funciones de Transferencia de los modelos con mayores porcentajes de Aproximación

Modelo	Función de Traserencia Discreta	Función de Traserencia Continua
mOE_{11}	$\frac{1,558}{z + 0,06275}$	$\frac{405,8933}{s + 276,8591}$
mOE_{112}	$\frac{1,645z + 1,647}{z^2 + 1,114z + 0,01278}$	$\frac{302,9522s + 463,9267}{s^2 + 205,7242s + 315,9889}$
mOE_{41}	$\frac{1,548}{z + 0,01837}$	$\frac{60,7647}{s + 39,972}$
mOE_{51}	$\frac{1,568}{z + 0,02715}$	$\frac{55,0652}{s + 36,0625}$

V.MODELO DE CAJA BLANCA

Considerando el servomotor como un sistema conformado por un motor DC y una caja reductora de velocidad, las siguientes ecuaciones pueden definir su modelo:

$$\frac{di_a}{dt} L_a = -i_a \frac{R_a}{L_a} - \omega_m \frac{K_e}{L_a} + V_s \quad (5)$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = i_a \frac{K_r}{J_m} - \omega_m \frac{B_m}{J_m} \quad (6)$$

Teniendo en cuenta la relación del reductor de velocidad N y tomando ω como la velocidad angular apreciable y útil para cualquier aplicación en el eje de salida del servomotor, considerada como:

$$\omega = \frac{\omega_m}{N} \quad (7)$$

Las ecuaciones 5 y 6 se expresaron en términos de variables de estado como:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{K_e}{L_a N} \\ \frac{K_T}{J_m} & -\frac{B_m}{J_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (8)$$

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (9)$$

Con $x_1 = i_a$; $x_2 = \omega$; $u = V_s$; $y = \omega$.

Basado en estas ecuaciones, se pudieron encontrar sus parámetros con un modelamiento de caja blanca, el cual mezcla el conocimiento del sistema definido en unas ecuaciones de estado, con los datos de entrada y salida del sistema, adquiridos por los sensores de cada servomotor y el programa Robolab™ 2.9 categoría **INVESTIGATOR** con los que se obtuvieron las posiciones angulares (en grados) para cada motor de acuerdo a la aplicación de ciertos escalones de voltaje. En términos paramétricos, los servomotores se pueden representar como:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A(\theta)x + B(\theta)u + Ke(t) \\ y &= C(\theta)x + D(\theta)u + e(t) \end{aligned} \quad (10)$$

Donde

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\theta_1 & -\theta_2 \\ \theta_3 & -\theta_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (11)$$

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (12)$$

El modelo final para los datos obtenidos con todos los conjuntos de datos de entrada-salida (datos11) se determinaron a partir de la función **idgrey** de Matlab™. El modelo cuyos parámetros más se aproximaron a los valores iniciales fue el que se obtuvo con los datos de entrada-salida del primer nivel de potencia, arrojando como resultado las matrices para las ecuaciones de estado del sistema. Al reemplazar los datos obtenidos en la matriz paramétrica A definida en la ecuación 8 pudiendo plantear las siguientes ecuaciones:

$$\frac{R_a}{L_a} = 50012 \quad (14)$$

$$\frac{K_e}{NL_a} = 16.417 \quad (15)$$

$$N \frac{K_T}{J_m} = 150070 \quad (16)$$

$$\frac{B_m}{J_m} = 15.753 \quad (17)$$

Con la respuesta cuyos parámetros más se aproximaron a los valores iniciales, se pudo determinar a partir de la

aproximación de ciertos parámetros y el despeje de los otros en las ecuaciones de estado, reemplazando los valores aproximados en (Zohar, 2007) $L_a = 0.1 \text{ mH}$, $N = 32$, $K_T = K_e$, los siguientes valores para los servomotores:

$$R_a = 5.0012\Omega, \text{despejada} \quad (18)$$

$$L_a = 1\text{mH} \quad (19)$$

$$K_T = 0.5246 \frac{Nm}{A} \quad (20)$$

$$K_e = 0.5246 \frac{V}{rad/s} \quad (21)$$

$$J_m = 2.4589e - 6 \text{Kg}m^2 \quad (22)$$

$$B_m = 3,8745e - 5 \frac{Nm}{rad/s} \quad (23)$$

A. Validación del modelo de caja blanca

Para validar los valores de las ecuaciones 18 a 23, se realizó a través de la herramienta Simulink de Matlab™, un bloque representativo del modelo del motor dado por las ecuaciones 5 y 6, el cual se muestra en la figura 11. Al aplicar una entrada de voltaje a este bloque, que contuviera información sobre los cinco niveles de potencia dados en la tabla 2, a fin de compararla la señal de velocidad angular del motor obtenida en el proceso de adquisición de datos para la identificación (figura 7), se encontraron aproximaciones en las respuestas, en lo que a ganancia y tiempo de establecimiento se refiere, lo cual indico que el modelo de caja blanca arrojó buenos resultados.

La figura 12 presenta estas situaciones. De igual manera se realizó la comparación con los tres modelos de caja negra seleccionados en su proceso de validación; las señales se muestran en la figura 13, en las cuales se puede apreciar respuestas semejantes en las tres estructuras, pero con error de ganancia que justifica el porcentaje de aproximación obtenido con la función “compare”.

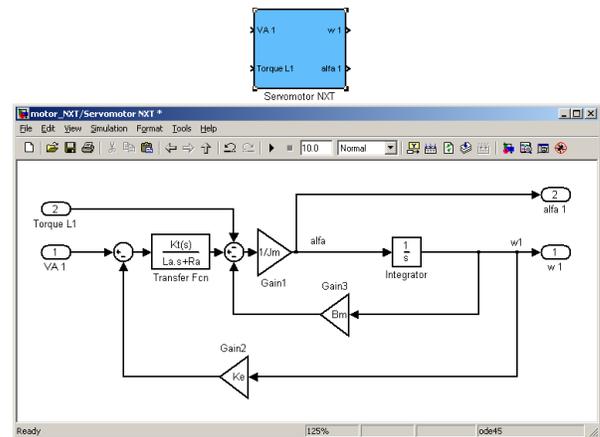


Fig. 11. Bloque del Servomotor NXT® en Simulink®.

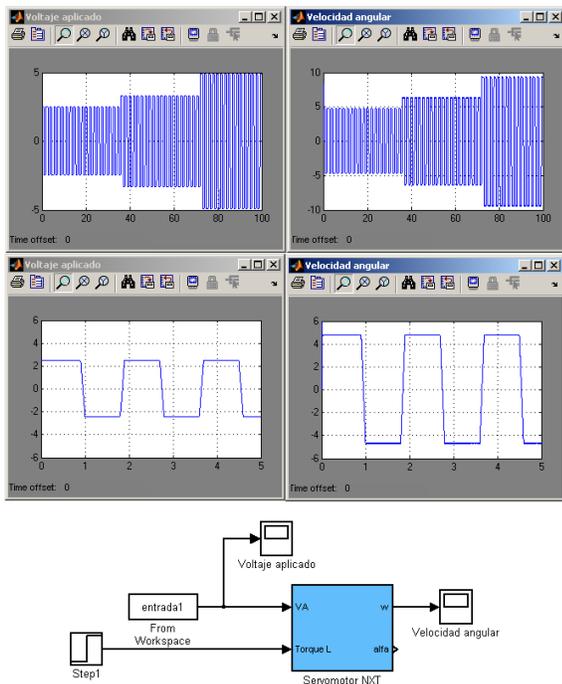


Fig. 12 Señales de entrada y salida del modelo propuesto para el Servomotor NXT®

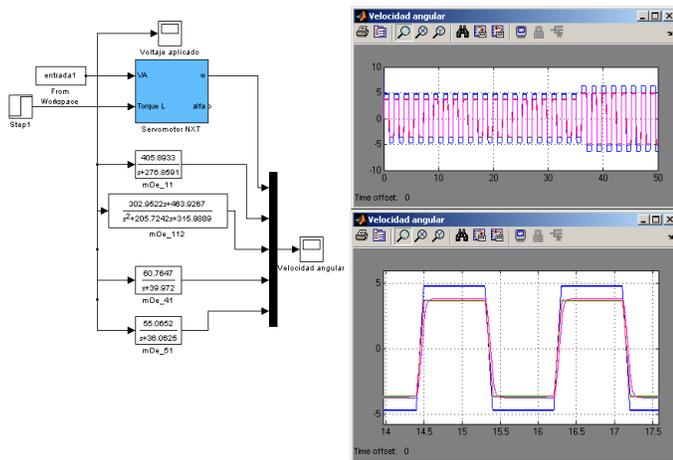


Fig. 13. Señales de entrada y salida de los modelos obtenidos con ISIS

VI. CONCLUSIONES

El proceso de identificación requiere que los datos utilizados para tal fin, contengan información significativa sobre el sistema, lo cual implica un cuidadoso diseño del experimento para la adquisición de datos y la toma de una serie de decisiones respecto a las señales que deben ser medidas, el periodo de muestreo a utilizar, el tipo de entrada más adecuada, el número de datos a almacenar, etc. Para el caso, la información adquirida sobre los datos de entrada-salida no fue lo suficientemente adecuada para obtener porcentajes de aproximación mayores en los modelos determinados y sus respuestas comparadas con las señales reales de voltaje aplicado y velocidad angular. Sin embargo, se experimentó de forma didáctica con un sistema de aplicación robótica combinándolo con teorías y técnicas que

prometen buenos resultados y procedimientos claros para el modelamiento de robots móviles.

Gracias a la herramienta Simulink se pudo establecer que el método de caja blanca arrojó mejores resultados en la identificación del modelo del servomotor, ya que no solo mezcla los datos de entrada-salida del sistema adquiridos con el sensor de velocidad con las estructuras del toolbox de identificación de Matlab™ sino que permite incluir la información que describe el comportamiento del motor mediante una ecuación de estado y ciertas condiciones iniciales que se basan en otros estudios ya realizados para determinar los parámetros del servomotor. Es la mejor combinación entre un modelado teórico que se aplica de forma general con ciertos experimentos que contienen información específica del sistema.

Los kits didácticos para sistemas robóticos como los sistemas LEGO DACTA® y MINDSTORMS® NXT®, además de ofrecer aproximaciones reales en el diseño, construcción, y programación de diversos prototipos robóticos móviles y articulados; también colaboran en el estudio, modelamiento, planteamiento y aplicación de esquemas de control, si se utilizan con programas de adquisición de datos y simulación de sistemas dinámicos.

REFERENCIAS

- AllDdatasheets Lb1930 (2007).** Lb1930 single-channel low saturation voltage forward/reverse motor driver-sanyo semicon device. Extraído del World Wide Web: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/40594/SANYO/LB1930.html>.
- AllDdatasheets Lb1836m (2007).** Lb1836m low-saturation, bidirectional motor driver for low voltage applications-sanyo semicon device. Extraído del World Wide Web: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/40548/SANYO/LB1836M.html>.
- Guillen M. (2006).** Identificación de Sistemas: Aplicación al modelado de un motor de continua. Departamento de Electrónica, Universidad de Alcalá. Extraído del World Wide Web: http://www.depeca.uah.es/docencia/ING-ECA/ctr_avz/Identif.PDF.
- Grupo LEGO (2006).** MINDSTORMS NXT REME. Extraído del World Wide Web: <http://mindstorms.lego.com/Overview/NXTreme.aspx>.
- Hurbain P., Hurbain P. y Gasperi M. (2006).** Lego® 9V Technic Motors compared characteristics. The international Fan-Created Lego® Users Group Network. Extraído del World Wide Web: <http://www.philohome.com/motors/motorcomp.htm>.
- Hurbain P., Hurbain P. y Gasperi M. (2007).** NXT Motor. The international Fan-Created Lego® Users Group Network. Extraído del World Wide Web: http://web.mac.com/ryo_watanabe/iWeb/Ryo%27s%20Holiday/NXT%20Motor.html.
- LEGO Education (2006).** Get Excited About NXT: Driving Straight Lines With Ease MINDSTORMS® Education NXT. Extraído del World Wide Web: http://legoeducation.typepad.com/blog/2006/02/get_excited_abo.html.
- Ollero, A. (2001).** Robótica. Manipuladores y robots móviles. Marcombo Boixareu, Madrid.
- Zohar, I. (2007).** NXT Motor. The international Fan-Created Lego® Users Group Network. Extraído del World Wide Web: http://web.mac.com/ryo_watanabe/iWeb/Ryo/27s/20Holiday/NXT/20Motor.html.