

Capítulo 4

Laboratorio Multidisciplinar para la Enseñanza de Mecatrónica con LEGO Mindstorm NXT

M. Ochoa-Giménez, J.L. Zamora-Macho and J. Porrás-Galán

Title—Multidisciplinary laboratory for teaching mechatronics with LEGO Mindstorm NXT.

Abstract— The aim of this paper is to introduce and increase the use of LEGO NXT at Universities, so the students could put together different knowledge that they had learnt. Computer-aided design, mechanical modelling, system identification and multivariable control are some examples. A LEGO Mindstorm NXT robot is used to illustrate this laboratory, but any other mechanic system can be built. The robot is able to keep balance on a sphere. It is very important not only to obtain a good model and control of the robot, but also carry out useful experiments for students. These objectives are achieved by using different computer tools like Solid Edge ST2 and Matlab/Simulink.

Keywords—Education, LEGO, control, modeling

Abstract— El objetivo de este artículo es introducir e incrementar el uso de LEGO NXT en las universidades de forma que los estudiantes puedan integrar en un mismo proyecto diferentes conocimientos que han ido adquiriendo durante la carrera, como pueden ser el diseño por ordenador, el modelado de sistemas mecánicos, la identificación de sistemas, el control multivariable, etc. Para ilustrar este laboratorio se ha utilizado un robot que mantiene el equilibrio sobre una esfera basado en LEGO Mindstorm NXT, aunque se pueden construir otros. Es muy importante no sólo obtener un buen modelo y diseñar un buen control, sino también llevar a cabo ensayos útiles para los alumnos. Los objetivos de este laboratorio se han conseguido mediante el uso de herramientas informáticas como Solid Edge ST2 y Matlab/Simulink.

Keywords— Educación, LEGO, control, modelado

I. INTRODUCTION

ACTUALMENTE, el uso de LEGO Mindstorm NXT en la docencia ha sufrido un rápido aumento. El impacto que tiene el uso de dicha herramienta se ha estudiado

Este trabajo fue presentado originalmente al SAAEI'12

M. Ochoa-Giménez is with the Institute of research in technology, Comillas Pontifical University, Madrid, Spain (phone: +34 91 542 28 00, fax: +34 91 528 31 76, e-mail: miguel.ochoa@iit.upcomillas.es).

J.L. Zamora-Macho is with the Institute of research in technology, Comillas Pontifical University, Madrid, Spain (phone: +34 91 542 28 00, fax: +34 91 528 31 76, e-mail: zamora@iit.upcomillas.es).

J. Porrás-Galán is with the Institute of research in technology, Comillas Pontifical University, Madrid, Spain (phone: +34 91 542 28 00, fax: +34 91 528 31 76, e-mail: jporras@dim.ica.upcomillas.es).

en [1]. A la hora de poner en marcha un laboratorio multidisciplinar en la universidad, se ha escogido la herramienta de LEGO Mindstorm NXT debido a que permite la reducción del tiempo de montaje de prototipos y, como consecuencia, permite un análisis más en detalle sobre el modelado y diseño de reguladores.

La herramienta de LEGO Mindstorm NXT se puede utilizar para construir cualquier tipo de dispositivos móviles. En este caso, se ha construido un robot móvil debido a que los estudiantes de ingeniería están muy interesados en la robótica. La robótica es uno de los campos más importantes y complejos de la ingeniería, donde múltiples disciplinas contribuyen a desarrollar un proyecto común. Gracias a la integración de estas disciplinas se puede encontrar solución a diversos problemas. Además, estas soluciones pueden ser utilizadas por separado en futuras aplicaciones. Por este motivo, el objetivo de este proyecto es que las universidades puedan disponer de una herramienta muy buena para la docencia. Los estudiantes utilizan la herramienta de LEGO no sólo para su proyecto final de carrera sino también en el laboratorio de Regulación Automática en el Grado en Ingeniería Electromecánica. En este laboratorio los estudiantes aplican modelado no lineal, linealización y métodos de discretización, y control por realimentación de estado.

LEGO Mindstorm NXT es un kit de robótica desarrollado por el MIT para la construcción de robots programables. Combina piezas de LEGO, una CPU programable y múltiples componentes electrónicos como motores de corriente continua, sensores, etc. La CPU incorpora un procesador de 48 MHz, de 32-bits, con una memoria RAM de 64KB y una memoria flash de 256KB. Además, dispone de un procesador de 8 bits para controlar los sensores y los actuadores.

La CPU dispone de cuatro puertos de entrada para los sensores y tres puertos de salida para los actuadores. Dichos puertos tienen un conector RJ12. Por otra parte, dispone de un puerto USB para la descarga del programa y un puerto Bluetooth para las comunicaciones con el PC. El kit básico de LEGO NXT consiste en 519 piezas de LEGO, 3 motores de continua, 4 sensores (ultrasonidos, pulsador, sensor de luz y sensor acústico), 7 cables para conectarlos a la CPU, un cable USB y una CPU programable. Existen diferentes kits de expansión que tienen diferentes piezas para el montaje de los robots y otros tipos de sensores, como pueden ser los giróscopos.

En este caso, se ha construido un robot y se ha utilizado una esfera como sistema de translación. Este tipo de soporte

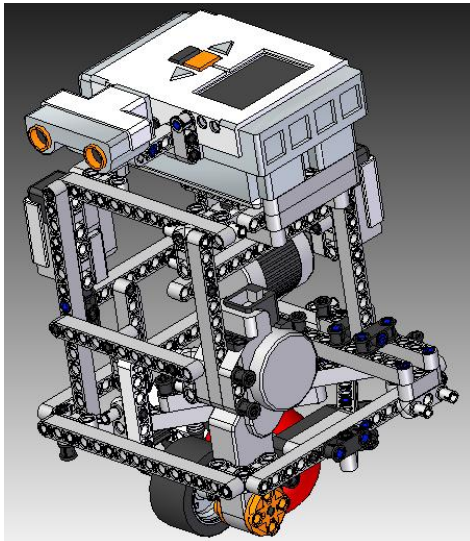


Fig.1: Ensamblaje final del robot en Solid Edge

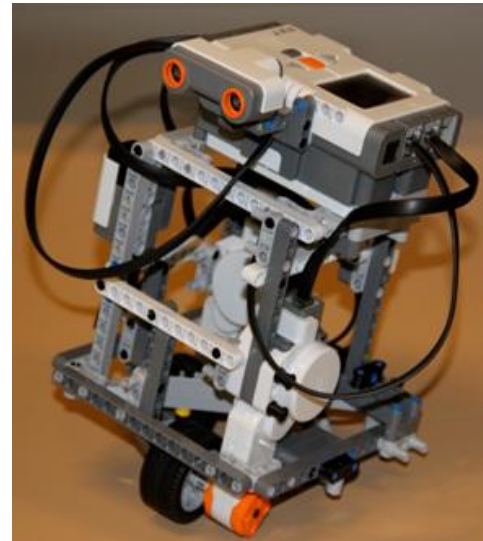


Fig.2: Fotografía del robot real

hace que el robot se comporte como un péndulo invertido. Uno de los ejemplos más famosos de este tipo de comportamiento es el Segway. Sin embargo, el movimiento de inclinación del Segway sólo se define en un único eje al tener una rueda a cada lado del vehículo.

El hecho de tener una esfera como medio de locomoción implica algunas ventajas frente a otros tipos de locomoción de robots. Por ejemplo, el robot humanoide de Honda Asimo [2] requiere de algoritmos mucho más sofisticados y de un equipo que sea capaz de realizar muchos cálculos complejos en poco tiempo. Los robots que se desplazan sobre una esfera pueden ser diseñados muy delgados de forma que puedan acceder a zonas muy estrechas, por lo que son idóneos para su uso en hogares. Además, el robot se puede mover en todas las direcciones sin necesidad de maniobrar. Es capaz de rotar sobre un mismo eje a diferencia de un vehículo de cuatro ruedas que requiere de maniobras. Estas ventajas han provocado que algunas universidades desarrollen sus propios proyectos sobre este tipo de robots como en [3] y [4].

El objetivo principal en este proyecto es la obtención de un modelo preciso del robot y el diseño de un regulador capaz de mantener en equilibrio al robot sobre la esfera. Todos los parámetros del modelo se obtienen mediante el uso de diferentes técnicas que son explicadas en clase. En [5] y [6] se describen dos proyectos sobre robots que se desplazan sobre esferas contruidos con componentes de LEGO NXT. Los actuadores son dos motores de corriente continua colocados uno en perpendicular al otro. Ambos motores tienen incorporado un encoder incremental. Para medir la velocidad de inclinación se utilizan dos giróscopos.

El artículo se estructura de la siguiente forma. En la Sección 2 se detalla la implementación del montaje completo del robot mediante la herramienta Solid Edge ST2. Esta herramienta 3D permite el cálculo de los diferentes parámetros físicos como son los momentos de inercia y la posición del centro de masas. Las piezas de LEGO se han implementado en la herramienta teniendo en cuenta su tamaño y peso. En la Sección 3, se explica la metodología para la obtención del modelo matemático de los actuadores, la cuál incluye diferentes ensayos. En [7] se presenta un método alternativo para la obtención de dichos parámetros. En la Sección 4 se describe el modelo del robot. En la

Sección 5 se presentan los resultados experimentales obtenidos al implementar el regulador diseñado.

II. CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS MEDIANTE SOLID EDGE

En esta sección se describe cómo se ha realizado la implementación del robot en una herramienta CAD 3D llamada Solid Edge. Esta herramienta es muy útil para la obtención de los diferentes parámetros del robot como sus dimensiones, peso, momentos de inercia y centro de masas. El diseño del robot está basado en [8]. Para obtener dichos parámetros correctamente es necesario crear todas las piezas de LEGO en la herramienta de Solid Edge. Por este motivo, se ha creado una librería con todas las piezas necesarias de LEGO, la cuál podrán utilizar los estudiantes durante el curso. Cada pieza se ha medido y pesado para incorporarlas al Solid Edge con la mayor precisión posible. La densidad de la pieza se puede calcular mediante:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

donde ρ es la densidad, m es la masa y V es el volumen.

A continuación, una vez creada la librería, se procede al montaje del robot en Solid Edge, dividiendo el proceso en diferentes ensamblajes. Gracias a este método, cualquier modificación en las piezas o en los ensamblajes será actualizado automáticamente en todos los ensamblajes que los utilicen. El ensamblado final del robot en Solid Edge se puede ver en la Figura 1. Solid Edge es capaz de determinar el centro de masas y los momentos de inercia del robot. Estos parámetros se utilizarán en las ecuaciones que modelan el robot descritas en la Sección 4. La Figura 2 muestra una fotografía del robot real montado con piezas de LEGO NXT.

Alguno de los parámetros se pueden comprobar con el robot real. El peso del robot obtenido en Solid Edge es de 678.84 gramos. Este valor se puede comprobar al pesar el robot con una báscula de precisión, la cuál indica un valor de 682.2 gramos. Esto supone que Solid Edge tiene un error menor del 1%. De igual modo, el centro de masas se puede localizar en el robot real. Esto se puede conseguir sujetando el robot mediante una barra que le atraviese de lado a lado. Al equilibrarse el robot, el centro de masas tiene que situarse

TABLA I
MOMENTOS DE INERCIA DEL ROBOT [GR·MM³]

I_{xx}	$3.53 \cdot 10^6$	I_{yy}	$1.58 \cdot 10^6$	I_{zz}	$3.48 \cdot 10^6$
I_{xy}	$5.12 \cdot 10^4$	I_{yz}	$1.04 \cdot 10^5$	I_{xz}	$1.31 \cdot 10^5$

El eje y es perpendicular a la superficie.

en un punto a lo largo de la vertical. Esta línea imaginaria se puede marcar con un hilo y el proceso se puede repetir cambiando de sitio la barra.

La intersección de los dos hilos determina la posición del centro de masas. La distancia desde el centro de masas al centro de la esfera es de 125 mm. El valor obtenido mediante Solid Edge es de 123 mm, produciendo un error en la estimación de dicho punto menor del 2%. Como consecuencia, con Solid Edge se pueden obtener valores suficientemente precisos para utilizarlos en el modelo. Además, se confirma que las piezas creadas en la librería son suficientemente precisas para que los estudiantes puedan utilizarlas sin problemas. En este caso, se han utilizado piezas de LEGO NXT para construir este robot, pero la misma metodología se podría utilizar para piezas de otros materiales.

Es importante destacar que el movimiento del robot se puede separar en dos movimientos independientes en dos ejes perpendiculares. Esta hipótesis se puede adoptar debido a que los momentos de inercia principales son más de cien veces mayores que los momentos de inercia entre ejes como se puede ver en la Tabla I. Se ha considerado que dichos momentos de inercia son correctos. En la Sección 3 se describe el modelo de los actuadores.

III. MODELO DE LOS MOTORES DE LEGO NXT

Se han realizado diferentes ensayos para poder determinar los parámetros del motor. Todos estos ensayos pueden realizarlos fácilmente los estudiantes. Los motores de corriente continua se pueden modelar como una parte eléctrica y otra mecánica. El esquema de dichos modelos se puede ver en la Figura 3 y Figura 4 respectivamente. La variable de entrada es la tensión del motor y la variable de salida es el ángulo girado. Las ecuaciones del modelo son:

$$u(t) = R_m \cdot i_L + L_m \cdot \frac{di_L(t)}{dt} + e(t) \quad (2)$$

$$T_m(t) - T_r(t) = J_m \cdot \frac{d\omega(t)}{dt} + D_m \cdot \omega(t) \quad (3)$$

donde $u(t)$ es la tensión del motor, i_L es la corriente del motor, R_m es la resistencia eléctrica, L_m es la inductancia, $e(t)$ es la fuerza electromotriz, T_m es el par motor, T_r es el par resistente, J_m es la inercia, D_m es la fricción viscosa y $\omega(t)$ es la velocidad angular del motor. Además, (4) y (5) establecen la relación entre la parte mecánica y la parte eléctrica:

$$e(t) = K_e \cdot \omega(t) \quad (4)$$

$$T_m(t) = K_t \cdot i_L(t) \quad (5)$$

donde K_e y K_t son las constantes del motor.

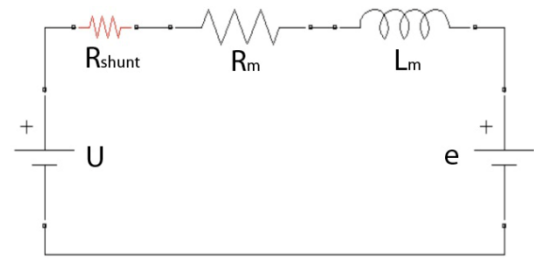


Fig.3: Esquema eléctrico del motor

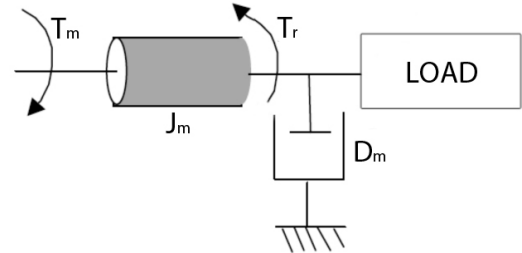


Fig.4: Esquema mecánico del motor

Como consecuencia, es necesario calcular varios parámetros. Dichos parámetros se pueden obtener realizando medidas durante diferentes ensayos. Para ello, se han pelado los cables que conectan los motores a la CPU de LEGO. La información que se transmite por los cables se puede ver en [8]. Parte de la información son la tensión del motor y los pulsos del encoder.

A. Resistencia eléctrica del motor R_m

La resistencia del motor se puede determinar midiendo con un multímetro entre los terminales del motor sin carga. El valor obtenido es de 4.5 ohms.

B. Constantes eléctrica y mecánica del motor K_e y K_t

Como se describe en [8], la tensión del motor es controlada mediante un convertidor DC-DC. Se han realizado varias medidas en régimen permanente con distintos valores del factor de servicio (denominado D). Es importante tener en cuenta que la ecuación (2) en régimen permanente se reduce a:

$$u(t) = R_m \cdot i_L + e(t) \quad (6)$$

Los resultados de este ensayo se muestran en la Tabla II. Se ha utilizado una regresión lineal para obtener un valor único de la constante K_e . La Figura 5.a muestra dicha regresión lineal. El valor final que se ha obtenido es $0.4723 \text{ v} \cdot \text{s/rad}$, con un valor de offset de 0.0314. Utilizando el sistema internacional de unidades, K_e y K_t tienen el mismo valor (K_t in $\text{N} \cdot \text{m/A}$).

TABLA II
MEDIDAS EXPERIMENTALES DEL ENSAYO DEL MOTOR

D[%]	U[V]	I[A]	e[V]	$\omega[\text{rad/s}]$	K_e
10	0.0665	0.024	0.557	0.3753π	0.4724
30	2.02	0.03	1.885	1.234π	0.4862
50	3.44	0.038	3.269	2.136π	0.4871

K_e está en unidades del sistema internacional

C. Inductancia del Motor L_m

Para calcular el valor de la inductancia del motor se ha conectado en serie una resistencia. Dicha resistencia debe tener un valor pequeño comparado con el valor de la resistencia del motor. En este caso, se ha escogido un valor de 0.47 ohmios. La corriente por el motor (que se mide como la tensión en la resistencia) se ha medido con un osciloscopio. Gracias a esta medida se puede obtener el valor de la inductancia utilizando la pendiente de la corriente por el motor. Teniendo en cuenta (2), se puede despejar el valor de L_m ya que es el único parámetro desconocido en dicha ecuación. Este proceso se ha repetido para diferentes valores de ciclo de trabajo para contrastar los valores de inductancia obtenidos. Finalmente, el valor de la inductancia es 4.5 mH.

D. Fricción Viscosa del Motor D_m

En régimen permanente, (3) se puede reducir a:

$$T_m(t) - T_r(t) = D_m \cdot \omega(t) \quad (7)$$

Teniendo en cuenta (7), el par motor T_m se puede calcular utilizando diferentes valores de D . Se ha utilizado una regresión lineal nuevamente para obtener un valor único de D_m . La Figura 5.b muestra los resultados de dicha regresión lineal. El valor final que se ha obtenido es 0.001 [N·m/rad]. El offset de esta regresión es el par resistente T_R y su valor es 0.01 [N·m].

A. Inercia del Motor J_m

Para la obtención del valor de la inercia del motor es necesario utilizar la respuesta transitoria de la velocidad del motor. Por este motivo, se ha realizado un registro en tiempo real del ensayo mediante el puerto de comunicaciones Bluetooth del que dispone la CPU de LEGO. El tiempo, el factor de servicio y la cuenta del encoder son enviados. Este registro se guarda en el Workspace de Matlab. La relación matemática entre la cuenta del encoder y el ángulo girado se puede encontrar en [9]. El único parámetro desconocido es J_m , ya que todos los demás ya han sido previamente obtenidos. Para este ensayo es necesario configurar el convertidor del motor en modo *coast/float*. En este modo, el motor es desconectado completamente de la batería en la fase de frenado. Como consecuencia, el par motor es igual a cero y (3) se reduce a:

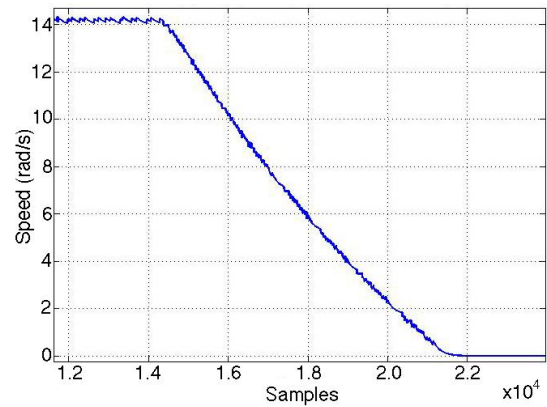


Fig.6: Respuesta del motor en modo coast/float

$$J_m \cdot \frac{d\omega(t)}{dt} + D_m \cdot \omega(t) + T_r(t) = 0 \quad (8)$$

El motor es acelerado hasta llegar a régimen permanente y después es desconectado. La Figura 6 muestra el transitorio obtenido con el ensayo. El valor final obtenido de J_m es $3.38 \cdot 10^{-3} \text{kgm}^2$. También se ha realizado otro tipo de ensayo para contrastar el valor de la inercia. En este caso, la variable de entrada, que es la tensión del motor, se ha utilizado como señal de entrada a un algoritmo basado en mínimos cuadrados lineales. Dicho algoritmo minimiza el error que se obtiene entre el ensayo registrado y la simulación con el modelo del motor. La inercia del motor y la constante del motor se dejan como grados de libertad. Como consecuencia de este método se han obtenido valores muy similares a los obtenidos anteriormente.

Finalmente se ha diseñado e implementado un control PID para comprobar los resultados. Se ha utilizado la librería de Matlab ECRobot, la cual se encuentra detallada en [10]. La Figura 7 y 8 muestran la comparación entre la simulación y el ensayo de la velocidad angular y el ángulo girado del motor. Como se puede ver, el modelo obtenido responde de forma similar al motor real.

A continuación, en la Sección 4 se describe en detalle el modelo del robot.

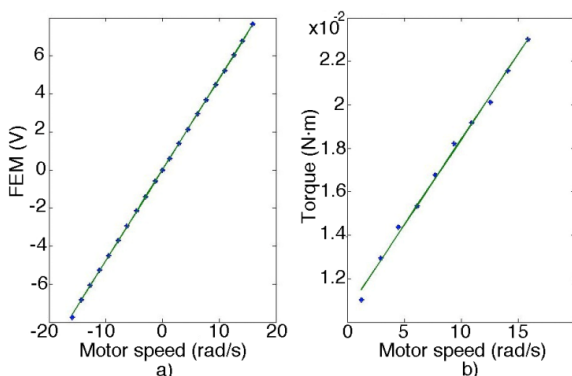


Fig.5: Regresión lineal para a) K_e y K_t y b) fricción viscosa. Se han utilizado velocidades positivas y negativas

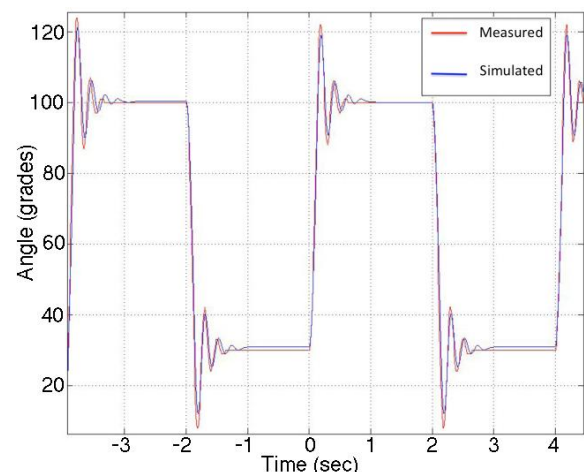


Fig.7: Comparación entre ensayo y simulación para el ángulo girado del motor.

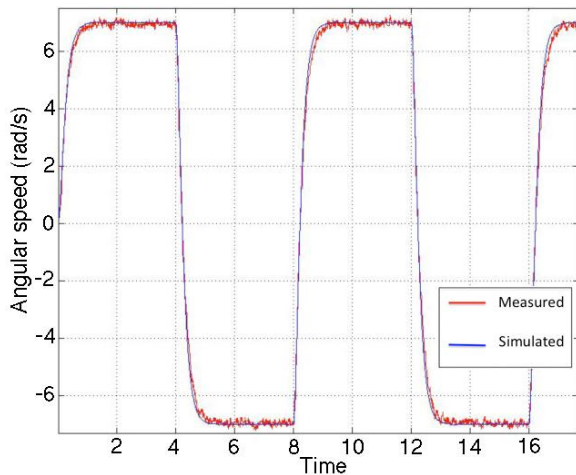


Fig.8: Comparación entre ensayo y simulación para la velocidad angular del motor.

IV. MODELO DEL ROBOT

El comportamiento del robot es como un péndulo invertido en dos dimensiones. Como se ha comentado previamente en la Sección 2, se ha asumido que los dos ejes en los que se puede dividir el movimiento son independientes. Por tanto, el modelo que se describe a continuación es unidimensional y será duplicado para el otro eje.

Por otro lado, se asume que la fricción que existe entre la esfera y la superficie es muy alta, por lo que no existe deslizamiento. Esto implica que la velocidad lineal se puede calcular como el producto del ángulo girado por el radio de la esfera. De igual modo, se puede asumir que la fricción entre la parte inferior del chasis del robot y la esfera es prácticamente nula y, por tanto, se puede despreciar en el modelo.

Las ecuaciones de dinámica de Newton-Euler se han utilizado en este caso. Sin embargo, se pueden utilizar otro tipo de ecuaciones para modelar el robot como en el caso de [6], en el que se utilizan las ecuaciones de Euler-Lagrange. La Figura 9 muestra el esquema de la dinámica y cinemática del robot.

Las ecuaciones del robot obtenidas a partir de este esquema son:

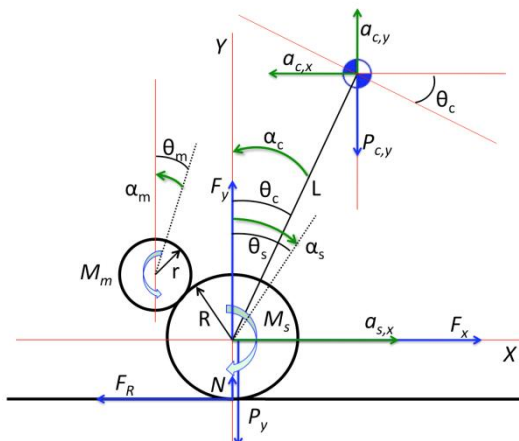


Fig.9: Esquema de la dinámica y cinemática del robot

$$F_x = m_c \cdot a_{c,x} \quad (9)$$

$$F_y - m_c \cdot g = m_c \cdot a_{c,y} \quad (10)$$

$$-M_z + F_x \cdot L \cdot \cos\theta_c + F_y \cdot L \cdot \sin\theta_c = I_c \cdot \alpha_c \quad (11)$$

donde m_c es la masa del robot, a_c es la aceleración lineal del centro de masas, M_s es el par alrededor del centro de la esfera, I_c es el momento de inercia del robot, L es la distancia desde el centro de masas al centro de la esfera y θ_c es el ángulo de inclinación. Es importante tener en cuenta la dirección de rotación del motor en el esquema. De igual modo, las ecuaciones de la esfera y de la rueda se pueden escribir como:

$$F_x - F_r = m_s \cdot a_{s,x} \quad (12)$$

$$F_y + m_s \cdot g - N = 0 \quad (13)$$

$$M_s + F_r = I_s \cdot \alpha_s = \frac{I_s}{R} \cdot a_{s,x} \quad (14)$$

donde m_s es la masa de la esfera, a_s es la aceleración lineal de la esfera, F_r es la fuerza de rozamiento entre la esfera y la superficie de apoyo, R es el radio de la esfera y I_s es la suma de los momentos de inercia de la esfera, del motor y de la rueda alrededor del centro de la esfera. Finalmente, la cinemática del sistema se puede escribir como:

$$a_{c,x} = a_{s,x} - \alpha_c \cdot L \cdot \cos\theta_c - \omega_c^2 \cdot L \cdot \sin\theta_c \quad (15)$$

$$a_{c,y} = \alpha_c \cdot L \cdot \sin\theta_c - \omega_c^2 \cdot L \cdot \cos\theta_c \quad (16)$$

V. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En esta sección se presentan los resultados experimentales obtenidos de un ensayo con el robot real para validar el modelo obtenido anteriormente. Sin embargo, un ensayo en lazo abierto no se puede realizar al ser una planta inestable. Por este motivo, es necesario diseñar e implementar un regulador en lazo cerrado para poder comparar el sistema real con una simulación del modelo. En este caso, se ha escogido un control por realimentación de estado, aunque también podrían utilizarse otros algoritmos de control. Se han fijado los polos de lazo cerrado y se han despejado los valores de las ganancias para las variables realimentadas. Las variables de estado son el ángulo de inclinación, la velocidad de inclinación y la velocidad lineal. Los polos se han fijado inicialmente en una configuración Butterworth. Una vez comprobado con el robot real que se mantiene en equilibrio, el regulador se ha modificado para mejorar el comportamiento del robot. Finalmente, el amortiguamiento ζ de los dos polos dominantes se ha fijado en 0.8 y la pulsación natural se ha establecido en 0.4 veces la pulsación del polo más rápido de la planta.

Todas las señales relevantes para el análisis se han registrado y enviado en tiempo real mediante la conexión Bluetooth del que dispone la CPU de LEGO. La Figura 10 muestra la respuesta del ángulo de inclinación en grados durante el ensayo. El robot ha sido ligeramente perturbado con dos golpes para comprobar su rechazo frente a perturbaciones. En régimen permanente, el ángulo está

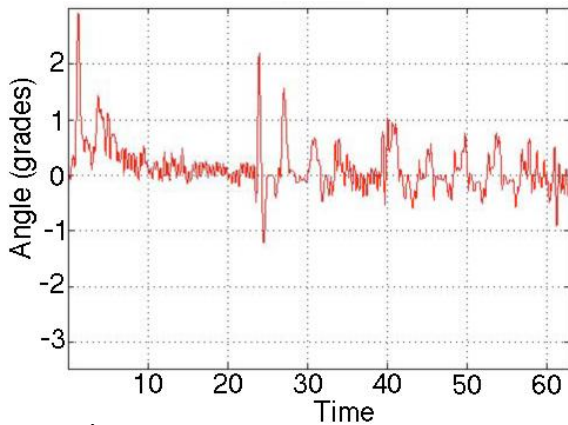


Fig.10: Ángulo de inclinación durante el ensayo con el control por realimentación de estado. Las perturbaciones se han aplicado a los 25 y 40 segundos

siempre en torno a cero y el robot es capaz de volver a su estado correctamente después de las perturbaciones. Se han llevado a cabo otro tipo de ensayos para comprobar su comportamiento frente a otro tipo de perturbaciones y frente a cambios en el modelo. A modo de ejemplo, se ha puesto el robot sobre una superficie inclinada y se ha colocado un peso sobre el robot para modificar su centro de masas y su peso. Finalmente, la Figura 11 muestra la comparación entre el robot real y el simulado frente a un cambio en la referencia de velocidad lineal.

VI. CONCLUSIONES

En este artículo se ha propuesto la puesta en marcha de un laboratorio multidisciplinar basado en el uso del LEGO Mindstorm NXT. Para ilustrar el laboratorio se ha estudiado un robot que mantiene el equilibrio sobre una esfera. Sin embargo, la herramienta de LEGO NXT permite el montaje de cualquier tipo de dispositivo móvil. Los estudiantes pueden aplicar diferentes metodologías, conocimientos y herramientas informáticas en un mismo proyecto. Además, los estudiantes pueden diseñar su propio robot, implementarlo en Solid Edge con las librerías de piezas de LEGO, obtener tanto las ecuaciones del modelo como los parámetros físicos del robot, diseñar e implementar algoritmos de control y finalmente realizar ensayos con el sistema real para comparar los resultados con los obtenidos por simulación. Como trabajo futuro se pretende mejorar el tiempo de muestreo de las señales a través del Bluetooth para obtener datos más precisos durante los ensayos.

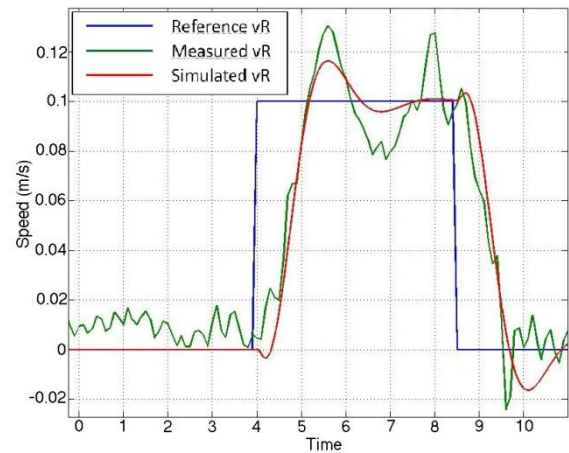


Fig.11: Comparación entre simulación y ensayo de la velocidad lineal del robot V_r

REFERENCIAS

- [1] Panadero, C. F and Román, J. V and Kloos, C. D. Impact of learning experiences using LEGO Mindstorms® in engineering courses. Education Engineering (EDUCON), 2010 IEEE, pages 503-512, 2010.
- [2] Chestnutt, J. and Lau, M. and Cheung, G. and Kuffner, J. and Hodgins, J. and Kanade, T. Locomotion among dynamic obstacles for the Honda ASIMO. Conference on Intelligent Robots and Systems, San Diego, November, pages 629-634, 2007.
- [3] Lauwers, T. B. and Kantor, G. A and Hollis, R. L. A dynamically stable single-wheeled mobile robot with inverse mouse-ball drive. International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006. Proceedings 2006 IEEE, pages 2884-2889, 2006.
- [4] ETH Zurich Rezero. Focus Project Ballbot. <http://www.rezero-ethz.ch>, 2010.
- [5] Fong, J., Uppill, S. and Cazzolato, B. Design and build a ballbot. Faculty of Engineering, computer and mathematical sciences. Mechatronics Honours Project. University of Adelaide, Australia.
- [6] Yamamoto, Y. NXT Ballbot Model-based Design. Applied Systems First Division, Cybernet Systems Co.14, Japan, 2009.
- [7] Gonçalves, J. and Lima, J. and Malheiros, P. and Costa, P. Sensor and actuator stochastic modeling of the Lego mindstorms NXT educational kit. 2010.
- [8] Yamamoto, Y. NXT Ballbot Building Instructions. Applied Systems First Division, Cybernet Systems Co.14, Japan, 2009.
- [9] Gasperi, M., Hurbain, P., Hurbain, I. Extreme NXT: Extending the LEGO Mindstorms NXT to the next level. Technology in action press, Berkeley, 2007.
- [10] Chikamasa, T. Embedded Coder Robot NXT Instruction Manual. Applied Systems First Division, Cybernet Systems Co.14, Japan, 2008.



M. Ochoa-Giménez nació en Madrid en 1986. En 2009 obtuvo el título de Ingeniero Técnico Industrial, especialidad de Electrónica Industrial, y en 2011 el título de Ingeniero en Automática y Electrónica Industrial, ambos por la Universidad Pontificia Comillas de Madrid. Desde Noviembre de 2011 trabaja como Investigador en Formación en el Instituto de Investigación Tecnológica (IIT) de la Universidad Pontificia de Comillas de Madrid. Sus áreas de estudio son los sistemas de control aplicadas a la electrónica de potencia y a la robótica, la identificación de sistemas, el modelado de sistemas y el procesamiento de señales.



J.L. Zamora-Macho nació en Badajoz (España) en 1967. En 1991 obtuvo el título de Ingeniero Industrial, especialidad de Electrónica, por la Universidad Pontificia Comillas de Madrid (Comillas). De 1991 a 1997 fue Investigador en Formación del Instituto de Investigación Tecnológica (IIT). En 1997 se doctoró en Ingeniería Industrial por la Universidad Pontificia Comillas. Actualmente, es Investigador del IIT y Profesor del Departamento de Electrónica y Automática. Sus áreas de estudio son el control, la identificación de sistemas, la electrónica y el

procesamiento de señal.



J. Porras-Galán nació en Madrid (España) en 1972. Es Ingeniero Industrial del ICAI (1996) y Doctor Ingeniero Industrial (2001) por la Universidad Pontificia Comillas de Madrid. En 1996 se acogió a una beca de doctorado y formación docente en el Dpto. de Ingeniería Mecánica, finalizando su doctorado en Noviembre de 2001. Entre 2000 y 2001 trabajó como profesor por horas en el Dpto. de Ingeniería Mecánica. Actualmente es profesor del Dpto. de Ingeniería Mecánica del ICAI y miembro del IIT. Sus áreas de estudio son

Las técnicas de fabricación, la robótica, el diseño mecánico, la inteligencia artificial y la acústica.