

Ejemplo docente de control de motores de un robot móvil de 2+2 ruedas motrices

M. Tresanchez, R. Lupiañez, J. Moreno, D. Martinez, E. Clotet, J. Palacín, *Member, IEEE*

Abstract—En este trabajo se presenta el estudio realizado para desarrollar el control de los motores de un robot móvil para que pueda ser utilizado como ejemplo y como herramienta docente. El sistema motriz del robot incorpora 4 ruedas conectadas a 4 motores DC de bajo coste que le confieren una elevada capacidad de tracción y la posibilidad de transitar por suelos no estructurados. El sistema de control electrónico se ha diseñado con dos puentes en H para controlar la dirección y velocidad de giro para cada par de motores ubicados en cada lado robot; no obstante, cada motor incorpora un codificador de efecto hall que permite obtener información de su velocidad de giro. En este trabajo se ha analizado la respuesta de los motores con dicha configuración utilizando un microcontrolador ARM de 32 bits de alto rendimiento. El sistema de control se ha diseñado para obtener la máxima información de la experiencia de control para que los resultados puedan ser utilizados como ejemplo docente de sistema de control de motores de un robot móvil.

Index Terms—Control de motores, herramienta de aprendizaje, robot móvil, sistema de control.

I. INTRODUCCIÓN

La mejora de la competitividad y el avance en la producción industrial está directamente relacionado con la mejora de los sistemas de automatización [1, 2] siendo el componente humano el responsable último de obtener el máximo partido a la tecnología disponible, por esta razón los experimentos de laboratorio integrados dentro del periodo formativo son una parte fundamental del proceso de aprendizaje ya que permiten aplicar y mejorar la asimilación de conocimientos y conceptos teóricos [3, 4].

En este trabajo se propone monitorizar todo el sistema de control de los motores un robot móvil con el objetivo de ser utilizado como ejemplo docente en asignaturas de Grado en Ingeniería [5, 6, 7]. La Figura 1 muestra una imagen de la estructura del robot móvil que puede incorporar sensores para medir parámetros tales como concentraciones de gas [8] y otros parámetros ambientales [9]. El principal objetivo de la plataforma es permitir la monitorización del proceso de control de las ruedas de los motores con el objetivo de que dicha plataforma pueda ser utilizada como herramienta docente de experimentación y aprendizaje con capacidad de combinar conocimientos de diversas áreas de conocimiento y cuyas conclusiones también puedan ser utilizadas en aplicaciones industriales diversas [10].

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Los materiales y métodos utilizados para el desarrollo del robot móvil como plataforma de experimentación docente son.

M. Tresanchez, R. Lupiañez, J. Moreno, D. Martinez, E. Clotet y J. Palacín son investigadores del Grupo de Procesado de Señal y Robótica de la Universitat de Lleida, C/ Jaume II, 69, 25001 Lleida, España. (e-mails: {mtresanchez, robotica, jmoreno, dmartinez, eclotet, palacin}@diei.udl.cat).

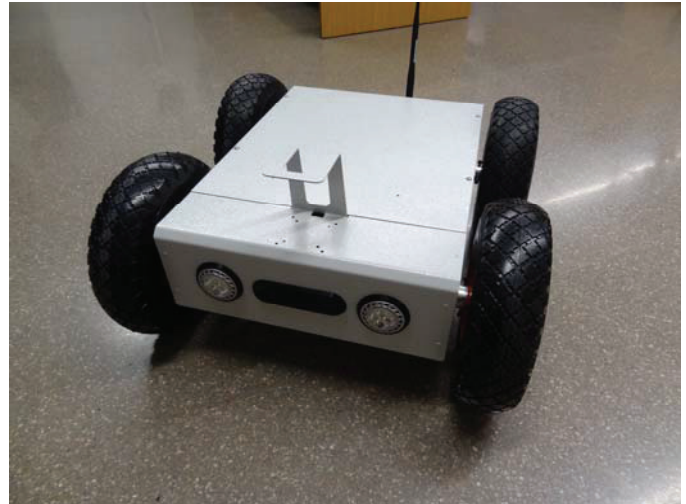


Fig. 1. Robot de aplicación docente.

A. Estructura mecánica

La estructura mecánica del robot móvil está fabricada en chapa de hierro gofrada y pintada para evitar la corrosión y garantizar la resistencia del robot móvil en un uso en exteriores. La estructura está formada por chapa de hierro de 2 mm de grosor, las uniones se han realizado con remaches para facilitar su montaje y garantizar la resistencia del conjunto (Fig. 1). La parte motriz está formada por 4 ruedas macizas con cubierta de espuma de poliuretano de 26 cm de diámetro distribuidas en dos pares a cada lado. Cada una de las ruedas está unida directamente al eje de la reductora que de un motor DC de bajo coste de conmutación basada en escobillas. Los motores utilizados son el modelo P205-2S.12.64 fabricados por la empresa Micromotor SRL. Se trata de un motor DC de 12V y con una reductora de 1:64 que puede llegar a soportar una carga máxima de 300N en el eje radial. Cada motor está equipado con un codificador o encoder magnético de bajo coste que incluye un imán y dos sensores magnéticos de efecto hall separados 90° que generan una señal de cuadratura que permita conocer tanto la velocidad como la dirección de giro. El sistema magnético que incorpora el codificador permite generar tres impulsos por cada revolución del motor.

B. Electrónica de control

El robot dispone de una placa electrónica para el procesamiento de datos de sensores y para el control de los motores. La electrónica de control está basada en el microcontrolador STM32F407VGT6 de STMicroelectronics basado en la arquitectura RISC ARMv7-ME dentro del grupo de Cortex-M4F de 32 bits. Este microcontrolador puede llegar a trabajar a una frecuencia interna de 168Mhz con un rendimiento de 210MIPS y con un consumo de 139mW con la máxima carga de procesamiento. Este procesador tiene una memoria interna de 196Kbytes que puede ser utilizada para diferentes propósitos.

Los principales periféricos utilizados en el control de los motores son timers con módulos de comparación de entrada (Input Capture) para las señales procedentes de los encoders y de generación de PWM para el control del voltaje efectivo aplicado a los motores.

La placa electrónica de control incluye dos drivers de puente en H completo VN2SP30 de STMicroelectronics que son utilizados para controlar los motores del robot (dos cada puente). Estos puentes en H completos pueden llegar a soportar alimentaciones de hasta 41V y consumos de 30 A. Cada uno de los puentes dispone de varias líneas de control que permiten controlar la dirección, el freno y la conmutación de los MOSFET de potencia internos hasta una frecuencia de PWM máxima de 20kHz.

La placa electrónica de control incluye conmutadores electrónicos (on/off) que permiten conectar y desconectar diversos sensores que requieren un mayor consumo de batería en modo de reposo: un módulo de comunicaciones inalámbrico (5V, 0.4A), una cámara IP inalámbrica frontal (5V, 300 mA), un LIDAR Hokuyo UTM (12V, 1A) y dos lámparas LED frontales de 5W (12V, 0.4A). Las lámparas LED permiten operar remotamente el robot en zonas sin iluminación.

El robot móvil está diseñado para operar bajo control remoto mediante conexiones de red TCP/IP inalámbricas. Para ello, el robot incorpora un módulo inalámbrico STM32F4DIS-WIFI de STMicroelectronics que va equipado con el módulo inalámbrico SN8200 de Murata que permite establecer conexiones inalámbricas con el estándar 802.11a/b/g. El módulo también permite ser configurado para transmitir y recibir datos por WiFi, lo que se realiza mediante un simple puerto serie que, en este caso, está gestionado por la placa electrónica de control.

C. Control remoto del robot móvil

Actualmente el módulo inalámbrico del robot móvil ha sido preparado para que genere una red TCI/IP configurando el modulo WiFi como punto de acceso (AP) al que se conecta la automáticamente la cámara IP interna y el smartphone con el que se realiza el telecontrol. El control del robot móvil (desplazamiento y activación/desactivación de sensores) se realiza mediante conexiones TCP y UDP. La figura 2 muestra una imagen de la aplicación de telecontrol implementada. En el caso de activarse la cámara IP del robot la aplicación establece automáticamente una conexión y muestra la imagen en la pantalla del smartphone.

D. Alimentación del robot móvil

El robot móvil dispone de dos baterías de plomo de 6 celdas que ofrecen un total de 12V con 7Ah de capacidad. Cada una de las baterías alimenta individualmente un Puente en H que a su vez está conectado a los dos motores DC de un mismo lado del robot. El consumo de la cámara IP (alrededor de 400mA) y el modulo inalámbrico (alrededor de 350mA) juntamente con el consumo de la placa electrónica principal (110mA) ha sido repartido entre las dos baterías. El consumo medio del robot con los cuatro motores operando a un PWM del 50% es aproximadamente 2.5A por batería por lo que la autonomía teórica máxima del robot se estima en unas tres horas (hasta agotar totalmente las baterías).

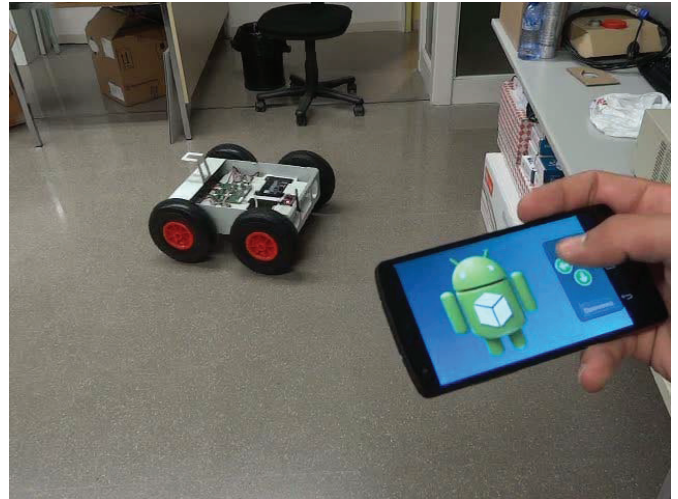


Fig. 2. Detalle del telecontrol del robot.

Las baterías son cargadas mediante dos placas electrónicas, una para cada batería, las cuales incluyen el integrado UC3906 de Texas Instruments que se encarga de gestionar automáticamente la carga. La placa de baterías también incluyen una sistema de monitorización interno mediante el integrado ZXCT1041 que envía el voltaje y corriente consumida o de carga de la batería a la placa de control.

Asimismo la placa de baterías permite simultáneamente la utilización del robot y la carga de las baterías gracias a un convertor interno AC/DC 220V/12V y 5 A de corriente máxima. Los resultados experimentales presentados en este artículo se han obtenido en condiciones de carga máxima de la batería para permitir comparar los resultados de control en las mismas condiciones de funcionamiento.

III. APLICACIÓN COMO HERRAMIENTA DOCENTE

La Figura 3 muestra una imagen del robot móvil utilizado como herramienta docente. El robot permite monitorizar y experimentar con las configuraciones de los puentes de control de motores así como capturar la información de velocidad de los motores y otros parámetros de control durante un espacio de tiempo predefinido para su análisis posterior.



Fig. 3. El robot móvil utilizado como herramienta docente por un estudiante del Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática.

La información de funcionamiento capturada se almacena en la memoria interna del microcontrolador de control y puede ser accedida fácilmente mediante la conexión de un cable USB entre la placa de control de motores y un ordenador personal. La conexión USB del microcontrolador utiliza una clase RS232 por lo que los datos están disponibles en cualquier entorno de programación que permita abrir y acceder a un puerto serie convencional.

A. Configuración y utilización de los puentes en H

La Figura 4 muestra el detalle de la conexión electrónica de uno de los puentes en H utilizados por el control de motores en el robot móvil. La salida del driver se encuentra conectada a dos motores DC P205-2S.12.64 conectados en paralelo (líneas M1_O1/M2_O2) por lo que el voltaje aplicado a cada par de motores va a ser siempre el mismo. Las líneas M1_IN1, M1_IN2 son entradas digitales para controlar la dirección y freno, y M1_PWM es la línea de PWM de entrada que gestiona la conexión y desconexión de los MOSFETS del puente en H. En esta aplicación se han utilizado líneas digitales provenientes directamente del microcontrolador Cortex-M, operando con tensiones de 3.3V. Adicionalmente, se dispone de una línea de activación general del puente (M1_ENA) y otra línea de salida analógica (M1_CS) que ofrece un voltaje proporcional al consumo instantáneo de los motores conectados al driver de motores.

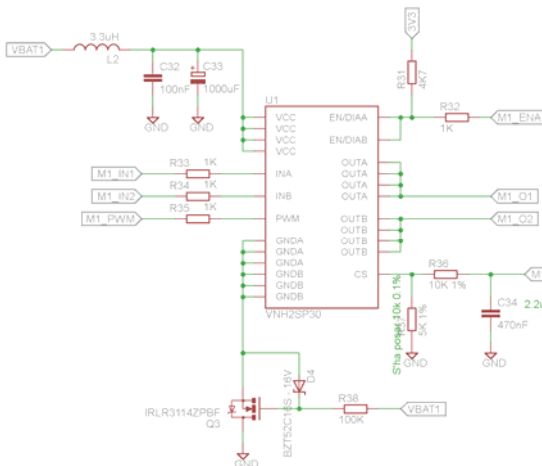


Fig. 4. Esquema eléctrico de la conexión del controlador de motores VN12SP30 para los dos motores del lado izquierdo.

La Figura 5 muestra las tensiones de salida del puente en H (M1_O1/ M2_O2) referenciadas a masa con un periodo de activación o duty del 70% en condiciones de funcionamiento normal. Se puede ver que una parte de los MOSFETS internos del puente conectan la salida M1_O1 siempre a la tensión positiva de la batería mientras que la salida M1_O2 se conecta un 70% del tiempo a masa mediante la activación de uno de los MOSFETS del puente y otro 30% del tiempo a la tensión positiva mediante la activación de otro de los MOSFETS del puente. El efecto combinado de estas activaciones es que el motor está conectado el 70% del tiempo entre un polo positivo y un polo negativo de la batería y que el 30% del tiempo restante está conectado al mismo polo positivo de la batería (en modo cortocircuito). En este ejemplo, el efecto combinado de ambas acciones es como si el motor de corriente continua funcionase a una tensión de 8,4 Volts.

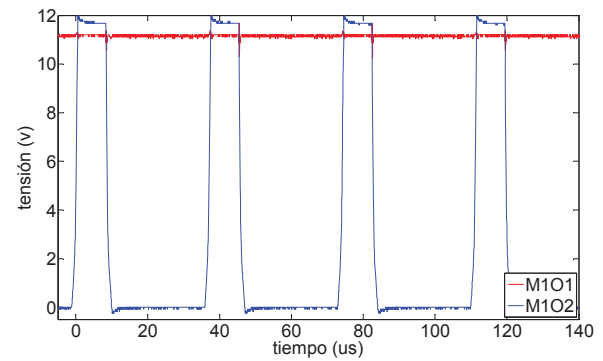


Fig. 5. Ejemplo de tensiones de salida de un puente en H del robot al aplicar un PWM con un duty del 70%.

B. Generación de la señal de PWM

El microcontrolador STM32F407VGT6 proporciona un conjunto de timers que pueden ser utilizados para generar señales PWM. En este artículo se ha utilizado el timer 1 (TIM1) que es de 16 bits y tiene una frecuencia máxima de operación de 168Mhz, ajustable con un preescaler. Este timer puede controlar directamente cuatro canales de captura, comparación y PWM. En este trabajo solamente se han utilizado los canales TIM1_CH3 y TIM1_CH4 en modo de PWM, uno para cada puente en H.

Según la hoja de características del driver, la frecuencia del PWM máxima recomendada por el fabricante es de 20 kHz. En la Figura 6 se presenta el comportamiento del motor con diferentes frecuencias de PWM. Se ha realizado un experimento que consiste en ir incrementando el duty hasta llegar a un valor en que los motores empiezan a moverse. Este experimento se ha probado para frecuencias entre 5 kHz y 50 kHz. La Figura 6 muestra que, para el motor DC utilizado, la frecuencia de PWM con menor duty de arranque es de 27kHz.

La diferencia de comportamiento entre el Puente en H izquierdo y derecho radica en que para que el robot se mueva hacia delante los motores DC conectados al puente derecho deben girar en sentido horario y los conectados al puente izquierdo en sentido antihorario. En general se observan grandes diferencias en el funcionamiento de los motores dependiendo del sentido de giro, diferencias probablemente originadas por el bajo coste de los motores utilizados. Estas diferencias van a dificultar el control de la trayectoria y desplazamientos del robot móvil.

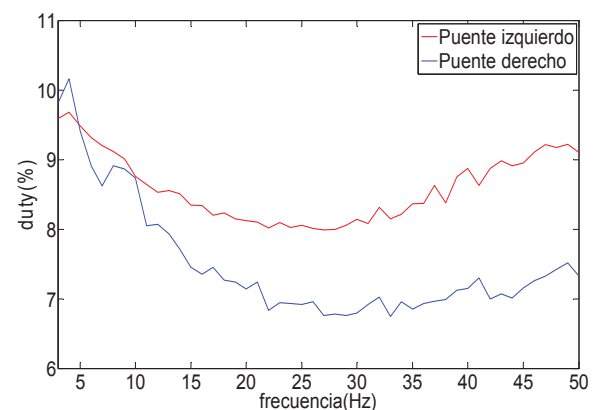


Fig. 6. Duty mínimo para que un motor empiece a girar para diferentes frecuencias de PWM.

C. Lectura de velocidad de los motores

Tal y como se ha comentado anteriormente, el robot móvil incorpora motores equipados con un codificador de efecto hall de dos fases que permite medir la rotación del motor. Los codificadores están formados por dos sensores de efecto hall U18 de Unisonic Technologies CO separados a 90° respecto un imán circular con 3 polos alternados concéntricos que se encuentran fijos al eje del motor (Fig. 7). El sensor de efecto hall U18 tiene un rango de alimentación de 2,5 a 20V y una alta temperatura de funcionamiento que va entre -20 y 125°C. En esta aplicación los sensores han sido alimentados a 5V mientras que a las señales de salida se han conectado con una resistencia pull-up de 4,7K Ω a 3V para poder ser utilizadas directamente por el microcontrolador de la placa de control (Fig. 8).

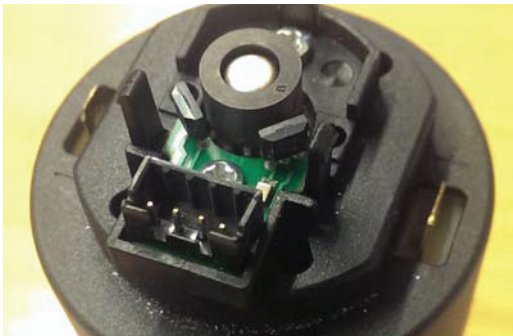


Fig. 7. Imagen del codificador que incorporan los motores utilizados en este trabajo con el imán central y los dos sensores de efecto hall U18.

De esta forma, cuando el motor gira el imán produce cambios alternados de polos y que los sensores hall generen una señal de cuadratura de 3 impulsos por vuelta (Fig. 8). El uso de este tipo de codificadores de bajo coste dificulta la lectura de velocidad del motor debido al reducido número de pulsos generado en cada vuelta del motor; para aumentar la resolución de la medición se propone capturar el intervalo de tiempo entre flancos de subida de la señal del encoder.

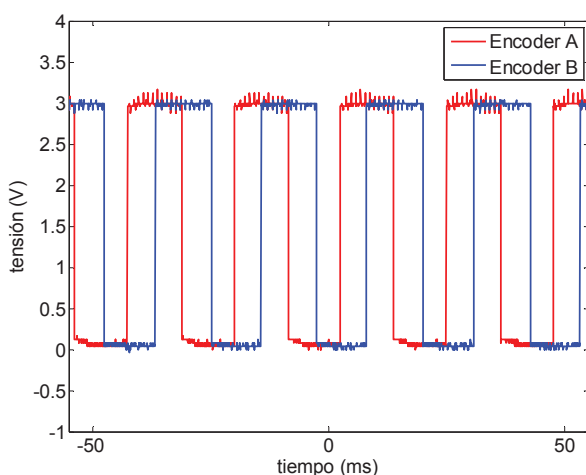


Fig. 8. Ejemplo de señales de cuadratura medidas por los codificadores magnéticos.

Para la implementación de la lectura de la velocidad de los motores se ha utilizado el hardware de captura de señales de que disponen los timers del microcontrolador. Cada timer permite configurar un capturador para que cada vez que se produzca un flanco de subida en una entrada del timer se ejecute una rutina de interrupción mediante la que puedan

leerse los pulsos acumulados o counts (Fig. 9) en el timer y así obtener el tiempo entre flancos (Fig. 11). El tiempo necesario para generar las tres últimas interrupciones es el tiempo que tarda el eje del motor en dar una vuelta completa. La otra señal del encoder se utiliza simplemente como señal de cuadratura para indicar la dirección de giro del motor. La Figura 10 muestra un detalle de los valores de lectura de pulsos del timer mostrados anteriormente en la Figura 9. En este caso en particular en el que el motor gira a una velocidad estacionaria es interesante observar que el bajo coste de fabricación del encoder origina una asimetría en la duración de los pulsos con una periodicidad de 3. También debe destacarse que la velocidad del motor únicamente se puede estimar a partir de que se produzca la primera interrupción del encoder por lo que no se tendrá realmente un dato válido hasta que se produzca la segunda interrupción.

A modo de ilustración, en la Fig. 11 se muestra el tiempo entre pulsos del codificador en el arranque y parada de los cuatro motores con el mismo duty del 40% para el caso de que el robot no tenga las ruedas en contacto con el suelo. Se observa que hay una gran diferencia en el comportamiento de cada uno de los motores.

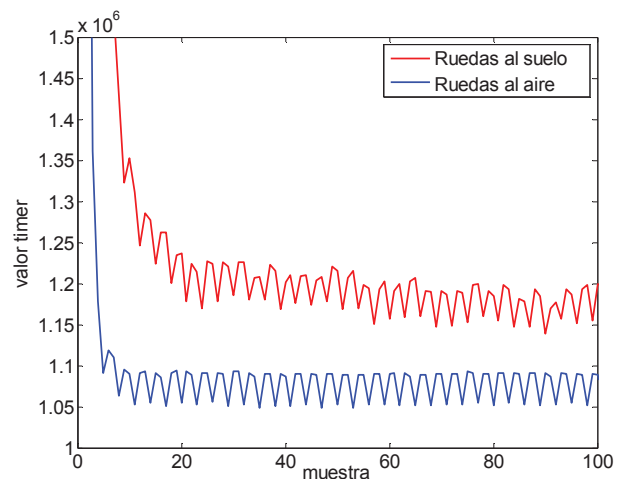


Fig. 9. Valor del registro del timer medido entre interrupciones de los encoders para un duty fijo del 40% y un mismo motor en los casos del robot en contacto y sin contacto con el suelo (ruedas al aire).

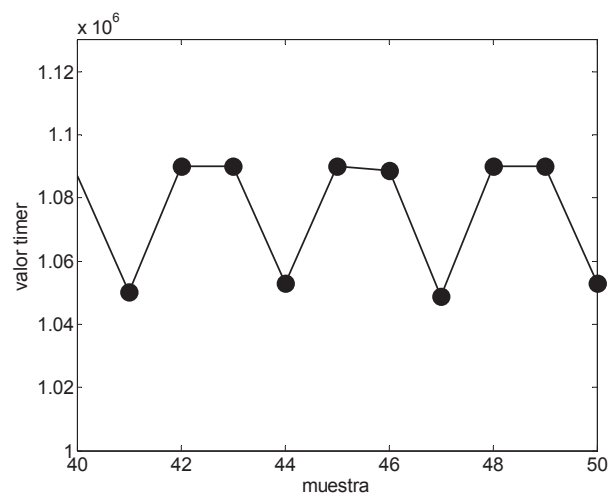


Fig. 10. Detalle de la evolución del valor del registro del timer de captura de velocidad de motor para un duty fijo del 40% y velocidad estacionaria en el caso del robot sin contacto con el suelo (ruedas al aire).

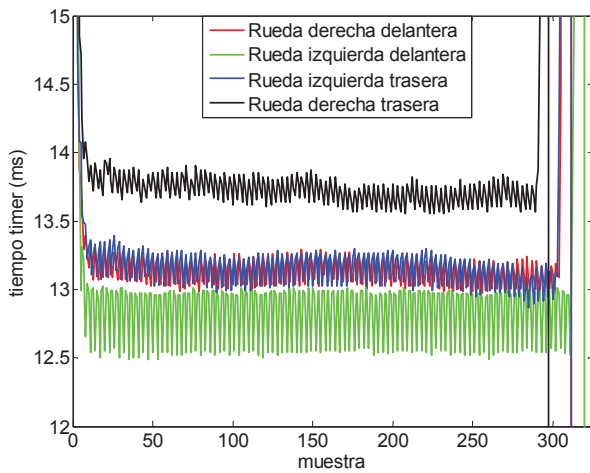


Fig. 11. Tiempo entre interrupciones de los encoders para un duty fijo del 40% medido en los cuatro motores DC del robot en el caso sin contacto con el suelo (ruedas al aire).

D. Control no realimentado de la velocidad

El control no realimentado implica aplicar directamente un duty a la señal PWM aplicada a los motores. La Figura 12 muestra la evolución de la velocidad de una rueda del robot durante un experimento de arranque en el que se han aplicado dutys de 10% hasta 100% con incrementos del 10%. Se observa que la densidad de información disponible aumenta conforme aumenta la velocidad de giro del motor y que el número de muestras disponibles antes de que el motor alcance una velocidad estacionaria es muy reducido. Este experimento ha permitido calibrar la constante de conversión directa de rpm a duty, K_{RPM} , de los motores que se utilizará en la implementación del control no realimentado directo de los motores; el valor aproximado de esta constante es 0.6 %/rpm.

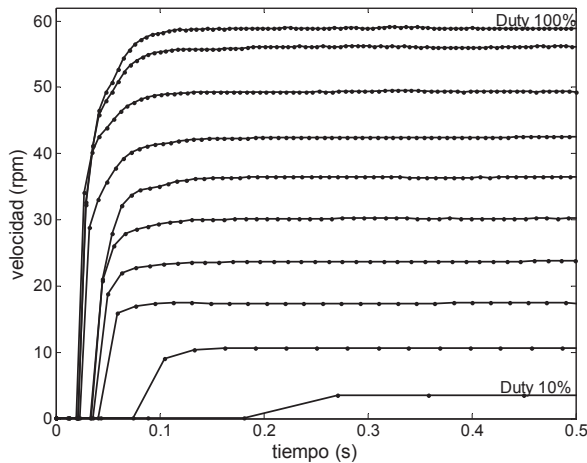


Fig. 12. Evolución de la velocidad de una de las ruedas del robot para dutys de 10 hasta 100% con incrementos del 10% (ruedas al aire).

E. Control realimentado proporcional

Las Figuras 13 y 14 muestran las señales implicadas en un control proporcional de la velocidad de giro de una de las ruedas del robot. Las figuras muestran la velocidad de referencia o de consigna (verde), la velocidad de rotación del motor obtenida directamente en el encoder (azul), la velocidad del motor muestreada a la velocidad de funcionamiento del control realimentado (en este caso 50 ms) (rojo) y la señal obtenida tras la acción proporcional P (en este caso la

constante, K_P , es 1) (negro) que será posteriormente convertida en duty del PWM aplicado al motor. Las figuras muestran el típico comportamiento esperado de un controlador proporcional en la que al principio el motor alcanza una velocidad superior a la de consigna para posteriormente estabilizarse en una velocidad de equilibrio. Se observa que al aumentar el valor de la constante se reduce la diferencia entre la velocidad de equilibrio y la de consigna.

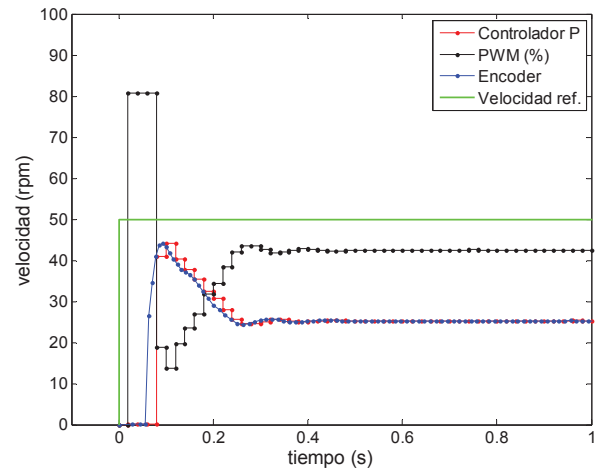


Fig. 13. Arranque de uno de los motores con la constante proporcional igual a 1, velocidad de consigna de 50 rpm y tiempo de muestreo de 20ms.

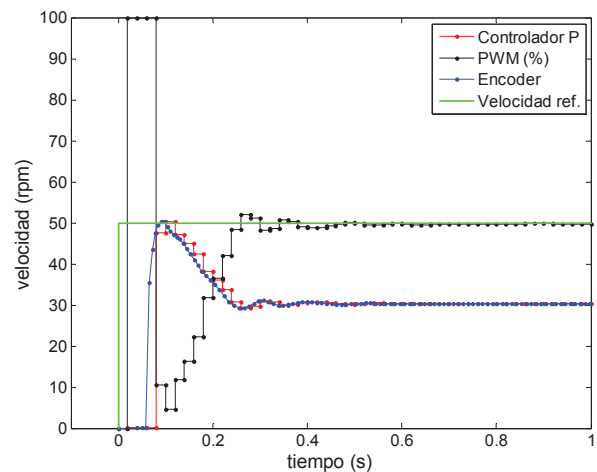


Fig. 14. Arranque de uno de los motores con la constante proporcional igual a 1.5, velocidad de consigna de 50 rpm y tiempo de muestreo de 20ms.

F. Control realimentado integral (I)

Finalmente, las Figuras 15 y 16 muestran las señales implicadas en un control proporcional de la velocidad de giro de una de las ruedas del robot. Las figuras muestran el típico comportamiento esperado de un controlador integral en la que al principio el duty del PWM aplicado al motor va aumentando progresivamente para acelerar el motor y luego evoluciona hasta igualar la velocidad de giro del motor con la de consigna. En este caso se observa que al aumentar el valor de la constante integral se aumenta la velocidad de respuesta del sistema realimentado.

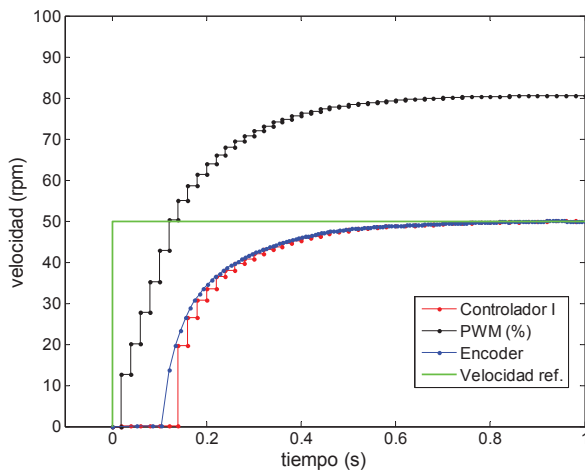


Fig. 15. Arranque de uno de los motores con la constante integral igual a 5, la velocidad de consigna de 50 rpm y tiempo de muestreo de 20ms.

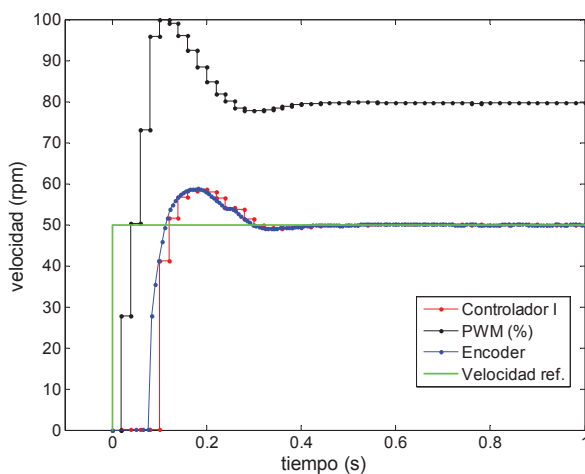


Fig. 16. Arranque de uno de los motores con la constante integral igual a 15, la velocidad de consigna de 50 rpm y tiempo de muestreo de 20ms.

IV. CONCLUSIONES

En este artículo se presenta el trabajo realizado para desarrollar un robot móvil que pueda ser utilizado como ejemplo y como herramienta docente de control de motores de corriente continua de bajo coste. El sistema permite variar la configuración de los puentes en H encargados de controlar los motores y también monitorizar la velocidad de giro de las ruedas o de los motores, el duty cycle del PWM aplicado a los motores y otros parámetros de control; dichas señales pueden ser almacenadas en el microcontrolador del robot móvil para ser posteriormente analizadas. En el desarrollo de este trabajo se han enfatizado las características prácticas que permiten la utilización docente del robot móvil como ejemplo de sistema de control y se han mostrado algunos resultados obtenidos al realizar el control directo sin realimentar de los motores y al realizar el control realimentado de los motores mediante un control proporcional y otro integral.

Como trabajo futuro se pretende continuar el desarrollo del sistema como herramienta docente mediante nuevos ejemplos de funcionamiento, utilizar la información obtenida para preparar material docente así como añadir la monitorización del consumo de corriente de los motores durante los experimentos. También se explorará la posibilidad de acceder a la información de los experimentos mediante la conexión WiFi para que de esta forma no sea necesario conectar el

robot a un ordenador para monitorizar los datos de funcionamiento de los motores.

REFERENCIAS

- [1] S. Kock, T. Vittor, B. Matthias, H. Jerregard, M. Kallman, I. Lundberg, R. Mellander, M. Hedelind, "Robot concept for scalable, flexible assembly automation: A technology study on a harmless dual-armed robot," in *IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing (ISAM)*, Finland, 2011, pp.1-5, 25-27.
- [2] A. Nagehaudhuri, "Robotics and machine vision for introduction to flexible automation to engineering undergraduates," *Frontiers in Education*, 2002. vol.1, pp. T2D-23- T2D-28, 2002.
- [3] A. Emin, G. Erdemir, "Development of a web-based control and robotic applications laboratory for control engineer education," *Information Technology and Control*, 2011, vol. 40, no.4, pp. 352-7, 2011.
- [4] T. Bojko, "Educational Cartesian robot based on linear drives," in *Proceedings of the Fourth International Workshop on Robot Motion and Control*, 2004, pp. 203- 208.
- [5] J. Moreno, D. Martinez, M. Tresanchez, T. Palleja, M. Teixido, D. Font, J. Palacin, "ROFU, un robot futbolista de uso docente basado en un Smartphone Android," in *Seminario Anual de Automatica, Electronica Industrial e Instrumentacion (SAAEI 2013)*, Madrid, España, Jul, 2013.
- [6] J. Moreno, M. Tresanchez, T. Palleja, M. Teixido, D. Font, J. Palacin, "Desarrollo de un robot cartesiano de uso docente con 5 grados de libertad y una camara en la pinza," in *Seminario Anual de Automatica, Electronica Industrial e Instrumentacion (SAAEI 2013)*, Madrid, 2013.
- [7] T. Palleja, M. Teixido, D. Font, M. Tresanchez, J. Palacin, "Project-Based Learning Example: Controlling an Educational Robotic Arm with Computer Vision," *IEEE Revista Iberoamericana de Tecnologías del Aprendizaje*, vol. 8, pp. 135-141, Jul. 2013.
- [8] T. Palleja, R. Balsa, M. Tresanchez, J. Moreno, M. Teixido, D. Font, S. Marco, V. Pomareda, J. Palacin, "Corridor Gas-Leak Localization Using a Mobile Robot with a Photo Ionization Detector Sensor," *Sensor Letters*, vol. 12, pp. 974-977, Jun. 2014.
- [9] D. Martinez, M. Teixido, D. Font, J. Moreno, M. Tresanchez, S. Marco, J. Palacin, "Ambient Intelligence Application Based on Environmental Measurements Performed with an Assistant Mobile Robot," *Sensors*, vol. 14, pp. 6045-6055, March 2014.
- [10] D.A. Anisi, J. Gunnar, T. Lillehagen, C. Skourup, "Robot automation in oil and gas facilities: Indoor and onsite demonstrations," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Norway, 2010, pp.4729-4734.