

Sistema embebido de 16 bits para el control de un robot tipo PUMA

F. A. Ramírez-Aparicio^{1,2}, J. C. Miranda-Herrera², F. Aguilar-Acevedo³

¹Universidad Marista (UMA)

Av. Gral. Leandro Valle No. 928, Col. Del Mar, C.P. 13270, Del. Tláhuac, México D.F., México
Teléfono: (52)-55-50633070

²Centro Nacional de Actualización Docente (CNAD)

Estanislao Ramírez S/N, Col. Selene, C.P. 13420, Del. Tláhuac, México D.F., México
Teléfono: (52)-55-58411432

³Universidad Politécnica de Guanajuato (UPG)

Av. Universidad Norte S/N, Comunidad Juan Alonso, C.P. 38483, Cortazar, Guanajuato, México
aguilar.afco@gmail.com
Teléfono: (55)-46-14414300

Resumen—Este artículo presenta el desarrollo de un sistema embebido de bajo costo para el control de un robot tipo PUMA (*Programmable Universal Manipulator for Assembly*) de tres grados de libertad (gdl). El sistema electrónico está basado en un Controlador Digital de Señales (DSC, *Digital Signal Controllers*) de 16 bits. Se presenta un sistema mecánico de prueba y se muestran los aspectos de hardware y software relevantes del sistema de control. Finalmente, se exhiben los resultados de la implementación de un algoritmo PID (Proporcional-Integral-Derivativo) para el control de posición del robot.

Palabras clave: Sistema embebido, controlador digital de señales, algoritmo de control PID, robot tipo PUMA.

I. INTRODUCCIÓN

El aumento en las prestaciones de microcontroladores de bajo costo, ha permitido sugerir su empleo en sistemas de control complejos, que son dependientes de hardware y software que normalmente no son producidos en México (Bautista et al., 2010). Por su parte, el uso de lenguajes como C en la programación de microcontroladores, ha popularizado el desarrollo de aplicaciones, mientras la rapidez en la ejecución de los programas se ha mostrado favorecida en comparación con el tradicional uso de intérpretes (Bräunl, 2006).

Los DSC, llamados comúnmente dsPIC, son dispositivos que combinan la arquitectura y la programación de los microcontroladores PIC (*Peripheral Signal Processor*) de 16 bits de tecnología RISC (*Reduced Instruction Set Compute*, Computadora con Conjunto de Instrucciones Reducidas), con los recursos de hardware y software necesarios para cubrir las principales prestaciones de un Procesador Digital de Señales (Angulo, 2006).

Bajo este panorama, este artículo presenta el desarrollo de

un sistema electrónico basado en un DSC modelo dsPIC30F4011, para la adquisición, procesamiento de datos y control de un robot tipo PUMA. Se muestran detalles sobre el sistema electrónico y la programación de un algoritmo de control PID, así como su validación a través de pruebas de movilidad del robot.

II. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA MECÁNICO

En la Figura 1, se ilustra el sistema mecánico empleado para validar el sistema electrónico en cuestión. El mecanismo se agrupa en cuatro sub-ensambles: base, cintura, brazo y antebrazo. La construcción del sistema mecánico se basa en la arquitectura del PUMA *Gorgorito* desarrollado por (Jiménez y Ramírez, 2005).

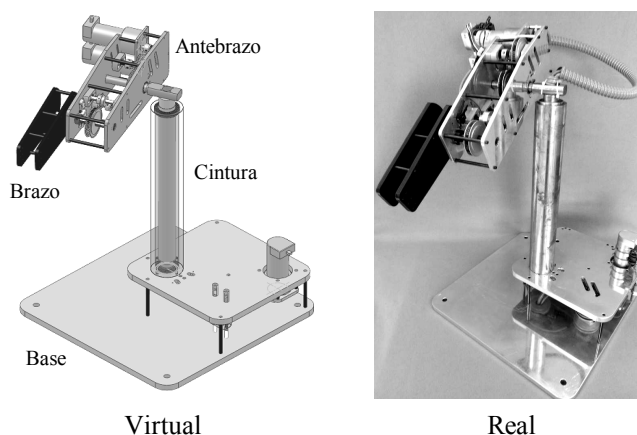


Figura 1. Robot PUMA.

El prototipo se encuentra fabricado en su mayor parte en aluminio debido a las propiedades mecánicas del material. La cintura y eje del hombro fabricadas en acero (*cold rolled*), aportando rigidez a la estructura. El antebrazo se encuentra elaborado en un polímero (nylamid). El mecanizado de

piezas se realizó en maquinas convencionales y de control numérico (Rodríguez et al., 2010).

Los actuadores empleados son servo moto-reductores de corriente directa de 24V Pittman GM9236S015. La transmisión de movimiento es realizada mediante mecanismos de polea-banda dentada.

I. SISTEMA ELECTRÓNICO DE CONTROL

En la Figura 2 se esquematiza la interacción del sistema electrónico con el mecanismo y la interfaz de computadora.

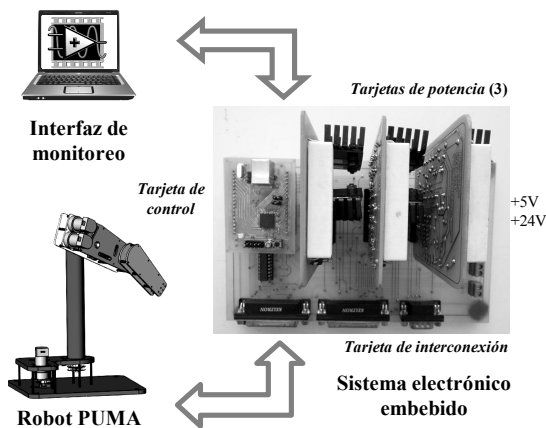


Figura 2. Diagrama a bloques del sistema.

A) Hardware de control

El sistema de electrónica se encuentra conformado por tres tipos de tarjetas electrónicas: potencia, interconexión (a manera de tarjeta madre) y control. La tarjeta de interconexión cuenta con conectores tipo *edge card*, para la integración de cuatro tarjetas de potencia.

Las tarjetas de potencia se basan en transistores de potencia TIP35 y TIP36 en una configuración de puente H, cuyo manejo de corriente continua de colector es de 25A. En la Figura 3 se muestra la implementación de dichas tarjetas.

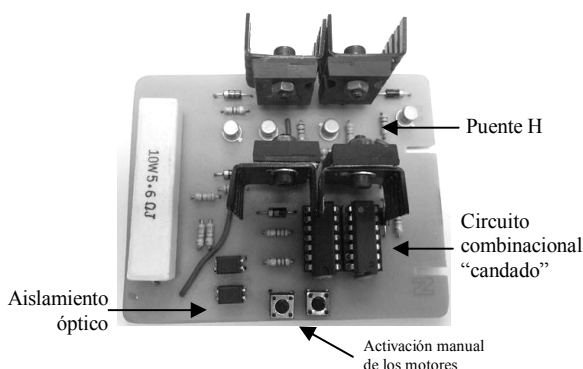


Figura 3. Tarjeta de potencia.

En la Figura 4 y 5 se muestra un diagrama a bloques de la tarjeta de control y su implementación respectivamente.

La unidad central de procesamiento está compuesta por un dsPIC30F4011 operable a 30 MIPS (Millones de instrucciones por segundo), el cual pertenece a los modelos

alimentación (Angulo, 2006). El dsPIC30F4011 cuenta con 48K de memoria FLASH, 2048 bytes de SRAM, 1024 bytes de EEPROM, 6 canales (complementarios) de modulación de ancho de pulso PWM para el control de motores, 4 PWM estándar, 5 temporizadores de 16 bits, 2 recursos de transmisión serial UART (*Universal Asynchronous Receiver Transmitter*), 3 interrupciones externas, entre otros recursos. La velocidad de procesamiento del dsPIC se estableció en 29.48 MIPS.

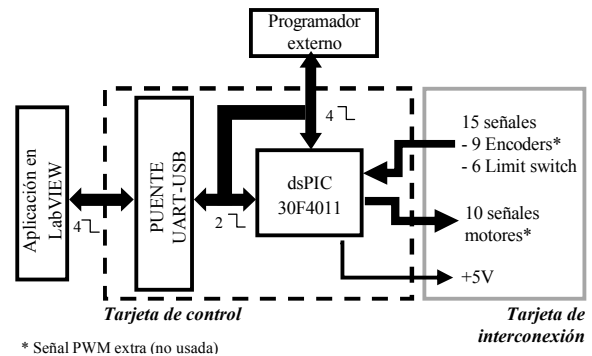


Figura 4. Diagrama a bloques del sub-sistema de control.

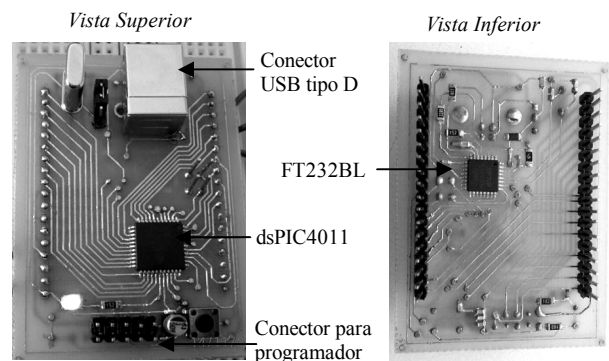


Figura 5. Tarjeta de control.

El intercambio de datos con la interfaz de computadora es realizado a través de un dispositivo puente UART-USB (FT232BL). La tarjeta de control cuenta con conexiones para la programación del dsPIC. Los encoders de tres canales poseen una resolución de 500 Cuentas Por Revolución (CPR). Tres pares de sensores de fin de carrera son asociados a los límites mecánicos de cada grado de libertad. Las señales de actuación conforman grupos para el paro, la habilitación y el encendido de cada motor.

En la Tabla 1 se presenta una estimación del costo de los materiales empleados en la manufactura del sistema electrónico.

Tabla 1. Costo estimado del sistema electrónico.

Tarjeta	Componentes	Costo	Total
Control	33	\$500.00	\$500.00
Madre	43	\$200.00	\$200.00
Potencia (3)	35	\$350.00	\$1050.00
			\$1750.00

B) Software de control

La tarea de control se asocio a la implementación de algoritmos de control PID independientes (uno por grado de libertad). Si bien, un controlador PID no requiere conocer la dinámica del proceso (Chen, 1993), el diseño adecuado del controlador requiere el conocimiento del modelo del robot (Kelly y Santibañez, 2003), el cual no es abordado en el presente trabajo.

La ausencia de una arquitectura de procesamiento paralelo, dio motivo a un retardo entre señales de control de 90us.

El algoritmo PID emplea una aproximación rectangular de la integral (hacia adelante). La ecuación 1 muestra el modelo práctico empleado (Dorf y Bishop, 2005).

$$u[k] = \left(K_P + K_I T + \frac{K_D}{T} \right) \cdot e[k] - \left(\frac{K_D}{T} \right) \cdot e[k-1] + K_I \cdot u[k-1] \quad (1)$$

donde el periodo de muestro T es establecido 20ms, en razón al tiempo empleado por la interfaz de computadora para la presentación de datos y animaciones.

El software asociado al sistema de control se desarrollo bajo el compilador C30 de Microchip. En la Figura 6 se exhibe el comportamiento del software mediante máquina de estados finita, lo cual resulta una forma adecuada de representar el comportamiento del software en sistemas embebidos (Zambada, 2005). El programa permite la inicialización del sistema, el procesamiento del algoritmo de control y el envío de datos a la interfaz de computadora mediante el recurso de transmisión serial UART a 115200 baudios.

La adquisición de datos se llevó a cabo mediante el empleo de tres recursos de interrupción externa del DSC, las salidas en el controlador corresponden a señales de modulación de ancho de pulso PWM de 20 Khz.

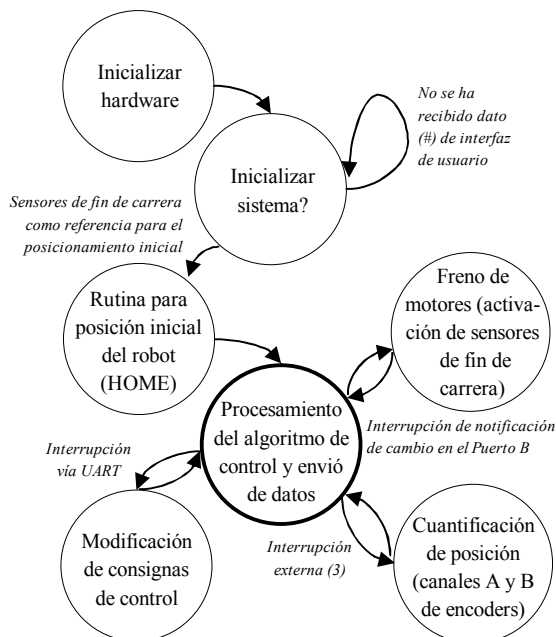


Figura 6. Diagrama de maquina de estados del software de control.

II. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Como tarea complementaria se implementó una interfaz gráfica en el paquete comercial LabVIEW bajo un sistema operativo Windows. El instrumento virtual tiene como objetivos monitorear las variables articulares y modificar las consignas de control (véase Figura 6). En la Figura 7 se muestra una sección de código correspondiente a la interfaz.

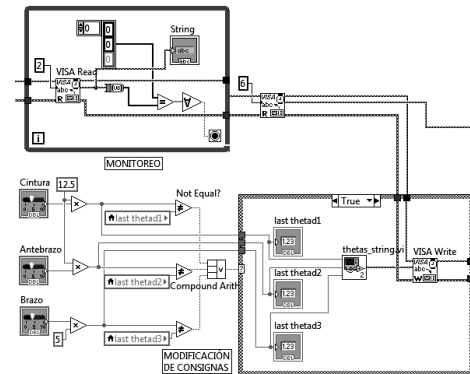


Figura 7. Sección de código de interfaz de computadora.

Las pruebas del sistema, contemplaron los movimientos individuales y combinados de cintura, antebrazo y brazo. La especificación de la trayectoria en el espacio de trabajo, corresponde a un control punto a punto, a partir de una señal de referencia tipo escalón (Ollero, 2001). Al momento, la sintonía de los controladores implementados corresponde a un desarrollo empírico.

En la Figura 8 se observa el resultado de un movimiento individual de la cintura de 44° a 0°. Se observa un tiempo de establecimiento de 1.9 s, un sobre-impulso menor a 4° y un error en estado estable de 0.2°. Las variables articulares restantes no mostraron cambio respecto a este movimiento.

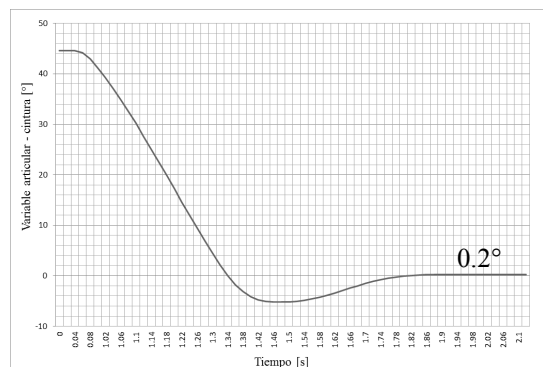
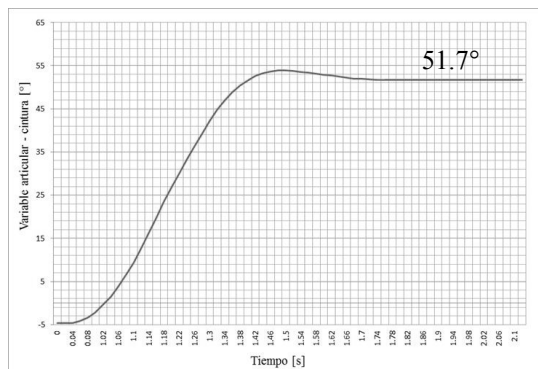
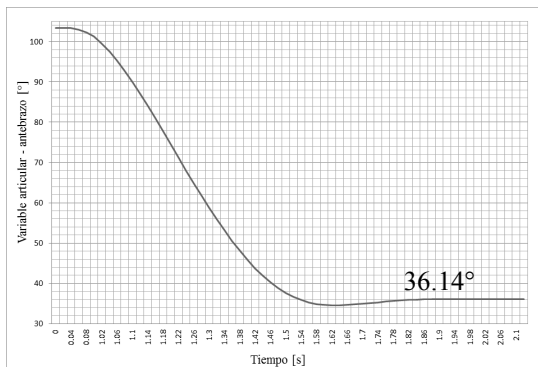


Figura 8. Movimiento de la cintura de 44° a 0°.

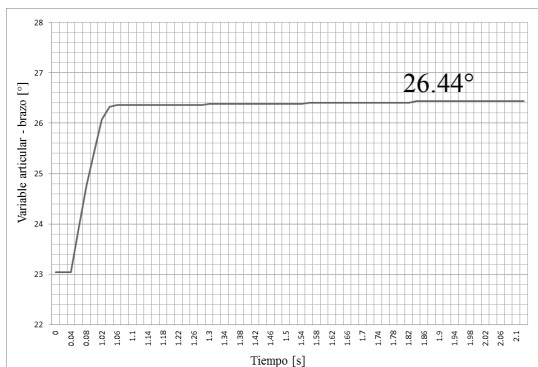
En la Figura 9 se muestran los resultados de un movimiento combinado: de -5° a 50° para la cintura, de 103° a 35° para el antebrazo y de 23° a 28° para el brazo. El tiempo de establecimiento observado es alrededor de 1.9 s, con errores en estado estable de 1.7°, 1.14°, 1.56° para cintura, antebrazo y brazo respectivamente. Se observan sobre-impulsos no mayores a 3° en cintura y antebrazo.



Movimiento de cintura de -5° a 50° .



Movimiento de antebrazo de 103° a 35° .



Movimiento de brazo de 23° a 28° .

Figura 9. Gráficos de movimiento combinado.

En la Figura 10, se observa la posición inicial y final del robot. En la Figura 11 se muestra una representación *en línea* del movimiento, generada mediante la interfaz de computadora.



Posición inicial



Posición final

Figura 10. Movimiento combinado real.

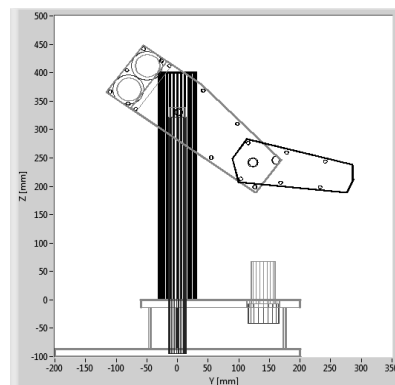


Figura 11. Representación *en línea* del movimiento generada mediante la interfaz en LabVIEW.

III. CONCLUSIONES

Trabajos como los de (Hernández, 2005) y (Bautista et al., 2010) han mostrado la viabilidad del uso de sistemas embebidos de bajo costo en tareas de control automático. En este artículo se presentó el diseño, implementación y validación de un sistema electrónico para el control de un robot tipo PUMA de 3 gdl. El DSC empleado muestra las bondades de programación de un microcontrolador y las características del procesamiento a 16 bits. De los trabajos realizados se pueden mencionar las siguientes aportaciones:

- Los sensores de fin de carrera al momento han permitido situar el robot en un punto inicial (HOME). La inclusión de estas señales como elemento de seguridad, permitirá evitar colisiones mecánicas durante la operación del robot, conservando así la integridad del mismo.
- Los resultados presentados revelan la viabilidad del sistema embebido en una tarea compleja de control.
- El sistema de electrónica muestra versatilidad, robustez, portabilidad y bajo costo (véase Tabla 1).
- Los gráficos de movimiento muestran un desempeño adecuado del algoritmo de control utilizado, no obstante la naturaleza no lineal y multivariable del sistema. Los sobre-impulsos observados sugieren considerar la velocidad como un elemento del algoritmo de control.
- Dados los resultados obtenidos y las características de la plataforma de 16 bits empleada, resulta adecuado explorar el empleo de algoritmos robustos, adaptables o inteligentes apropiados al control de un robot.
- La interfaz de usuario facilitó el monitoreo del sistema. El uso de la interfaz en tareas de configuración de parámetros del controlador o de consignas de control en tiempo real, requiere de su exportación a un sistema operativo de tiempo real, o bien el uso de un gestor de tiempo real bajo el mismo ambiente LabVIEW.

Dentro de los trabajos futuros se encuentran el uso de trayectorias de referencia LSPB (*Linear Segments with Parabolic Blends*), el control de trayectoria continua y el incremento en las prestaciones de la interfaz y el software de control.

IV. AGRADECIMIENTOS

El prototipo citado ha sido producto del trabajo de Especialidad en Ingeniería Mecatrónica titulado “Diseño, construcción y control de un robot puma de tres grados de libertad” desarrollado de Julio a Diciembre del 2010, en el Centro Nacional de Actualización Docente (CNAD) perteneciente a la DGETI. Los becarios participantes fueron los ingenieros: Claudio Rodríguez Carlos, Asdrúbal Hernández Banda, Felipe Ángel Ramírez Aparicio, José Cruz Miranda Herrera y Juan Gerardo Jalpa Villanueva.

REFERENCIAS

- Bautista R., Domínguez R. E. y Domínguez J. C. (2010). ¿El uso de microcontroladores de 8-bits es una opción práctica en sistemas de control automático relativamente complejos?. Memorias del Congreso Anual 2010 de la AMCA. Puerto Vallarta. Pp. 345-350.
- Bräunl T. (2006). EMBEDDED ROBOTICS. Mobile Robot Design and Applications with Embedded Systems. Second Edition. Springer. Germany. Pp. 7-10.
- Angulo, J. (2006). dsPIC Diseño Práctico de Aplicaciones. McGraw Hill. España.
- Jiménez D., y Ramírez J. (2005). Construcción de un brazo robótico de tres GDL y su control mediante el núcleo híbrido de transición de estados. Tesis de Maestría. Cenidet. Cuernavaca, México.
- Rodríguez C., Hernández A., Ramírez F. A., Miranda J. C. y Jalpa J. (2010). Diseño, construcción y control de un robot puma de tres grados de libertad. Tesis de Especialidad. CNAD, Distrito Federal.
- Chen C.-T. (1993). Analog and Digital Control System Design. Saunders College Publish, Fort Worth. Pp. 551-566.
- Kelly R. y Santibáñez V. (2003). Control de Movimiento de Robots Manipuladores. Pearson Educación. Madrid. Pp. 121-125.
- Dorf R., Bishop R. (2005). Sistemas de control moderno. Pearson Educación S.A., Madrid. Pp. 812-813.
- Ollero A. (2001). Robótica; Manipuladores y robots móviles. Marcombo S.A., Barcelona. P. 304.
- Zambada J. (2005). Sinusoidal Control of PMSM Motors with dsPIC30F DSC, Application Note 1017. Microchip Technology Inc.
- Hernandez C., Femat R., Ruiz E. and Solís G. (2005), A standard microcontroller based discrete-time PI for controlling the motion of a DC-gearmotor. Journal of Applied Research and Technology. Vol. 1, No.1, pp. 44-52.
- Hernandez C., Femat R., Quiroz G., (2006). Make a PI controller on an 8-bit micro. EE Times-India. January, pp. 1-7.
- Microchip Technology Inc. (2005). dsPIC30F3011/4012 Data sheet. Microchip.
- Sciavicco, L., & B. Siciliano (2005). Modelling and Control of Robot Manipulators. Springer. Great Britain. Pp. 73-74.