



II CAIM 2010
Segundo Congreso Argentino
de Ingeniería Mecánica
San Juan - Noviembre 2010

Adaptación Mecánica y Control de un Vehículo Agrícola Autónomo

Carlos Soria⁽¹⁾, Mario Muñoz⁽¹⁾, Ricardo Carelli⁽¹⁾, Carlos Rodríguez⁽²⁾, Carlos Guevara⁽²⁾

⁽¹⁾ Instituto de Automática - Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional de San Juan
Av. Libertador Gral. San Martín 1109 oeste San Juan – Argentina
Tel/Fax: +54-2644213303 - e-mail:{csoria;mmunoz;rcarelli}@inaut.unsj.edu.ar

⁽²⁾ Instituto de Mecánica Aplicada - Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional de San Juan
Av. Libertador Gral. San Martín 1109 oeste San Juan – Argentina
Tel/Fax: +54-2644210277

RESUMEN

Este trabajo presenta el diseño y desarrollo del sistema de control de un Robot Móvil Todo Terreno (RMTT) construido a partir de un cuatriciclo comercial. Puesto que el vehículo debe seguir siendo manejable por un operador humano el hardware y el software deben adecuarse a esta restricción. Esta restricción será determinante en la forma en que se realizarán las diferentes adaptaciones mecánicas que son necesarias para transformar un vehículo comercial en un RMTT. Se presenta también la descripción de los sistemas de control de dirección, acelerador y freno, además del sistema de control de la velocidad del vehículo; como así también, la sintonía de estos controladores y algunos resultados experimentales que muestran la posibilidad del vehículo de realizar maniobras.

Palabras Claves: vehículo autónomo, control automático, control PID, mecatrónica.

1. INTRODUCCIÓN

La investigación sobre robots móviles rodantes se ha incrementado recientemente debido a su posible uso en diferentes entornos exteriores. A diferencia del caso de la robótica móvil de interior, en la que solamente se consideran terrenos planos, la robótica de exteriores debe tener en cuenta diferentes tipos de terrenos naturales. El entorno no estructurado y la rusticidad del terreno, incluyendo terrenos de difícil circulación, además de obstáculos dinámicos, hacen que el desarrollo de un vehículo autónomo sea un desafío.

A pesar de que algunos de los controladores automáticos de velocidad que aparecen en la literatura se han implementado en vehículos de producción, estos controladores no son directamente aplicables al problema de control del acelerador de un vehículo todo terreno o ATV (All Terrain Vehicle, en inglés). Una de las razones es que el ATV utilizado emplea un carburador para regular el flujo de combustible, a diferencia de la mayoría de los vehículos de producción en serie que utilizan un sistema de inyección de combustible controlado por microprocesador, lo que garantiza máxima eficiencia y potencia del motor en todas las condiciones de uso.

El objetivo de este trabajo es presentar el desarrollo de la adaptación mecánica y el diseño del control de un vehículo todo terreno para usos agrícolas y para una amplia gama de diferentes actividades en ambientes externos. Este vehículo debe ser capaz de operar en esos entornos exteriores con un alto nivel de autonomía. El diseño y desarrollo de un vehículo todo terreno con estas características debe incorporar diferentes tipos de conocimientos provenientes de la ingeniería mecánica, de software, la teoría de control (estabilidad, robustez, robótica en tiempo real estricto) y de robots móviles (planificación de trayectorias, evasión de obstáculos, etc.). Es importante que el vehículo, además de ser autónomo y teleoperado, permita la operación manual de un conductor. Esta dualidad establece una restricción en el diseño mecánico del sistema de accionamiento mediante servo actuadores, para garantizar la reversibilidad de la operación autónoma-manual del vehículo. La arquitectura de hardware y software necesarias para el control deben implementarse de forma sencilla y robusta. Una forma natural para lograr esos requisitos es el diseño de la arquitectura de software multicapas, donde los niveles más altos de abstracción de algoritmos se colocan en las capas superiores de la arquitectura. El control de alto nivel interactuará con el control de medio nivel y este último actuará con los servos controladores de los actuadores lineales montados en el vehículo para ejecutar comandos tales como dirección, frenado o aceleración.

Este trabajo presenta el primer paso en la automatización de un vehículo todo terreno, y trata del desarrollo de la capa de nivel más bajo en la arquitectura de control. Este RMTT será utilizado como una plataforma experimental para varios proyectos de investigación, entre los cuales estará su uso en tareas agrícolas.

En la literatura pueden encontrarse trabajos sobre vehículos móviles todo terreno como en [1], [2] y [3]. El resto de este trabajo se organiza de la siguiente manera: en las secciones 2, 3 y 4 se presenta una breve descripción del vehículo utilizado y las modificaciones mecánicas implementadas, además de una visión general de la arquitectura del sistema de control. En la sección 5 se describen los sistemas de control de bajo nivel y los actuadores. Finalmente se presentan en la sección 6 algunos resultados experimentales.



Figura 1: Vehículo todo terreno Mondial FD 250Q.

2. DESCRIPCIÓN DEL VEHÍCULO

El vehículo utilizado en este trabajo es un cuatriciclo del tipo ATV marca Mondial modelo FD 250Q (ver Fig. 1). Este cuatriciclo está provisto con un motor a explosión de 250 cm³ y es un vehículo utilitario diseñado específicamente para uso agrícola, por este motivo está equipado con sendos portabultos en la parte frontal y posterior del mismo, con una capacidad total de carga de 130 kg. Las principales características de este vehículo se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Características mecánicas del cuatriciclo

Motor	250 cm ³ , cuatro tiempos, refrigerado por agua
Tracción	Ruedas traseras
Embrague	Centrífugo
Arranque	Eléctrico
Transmisión	Por cadena
Sistema de freno	Hidráulico, 1 disco trasero y 2 delanteros
Dirección	Tipo Ackermann
Dimensiones [cm]	(Largo x ancho x alto) 206,5x118x124
Peso	250 kg (con tanque vacío)

3. MODIFICACIONES MECÁNICAS

Para transformar el ATV en un robot autónomo, debieron realizarse modificaciones mecánicas. Estas modificaciones consisten en la instalación de tres actuadores lineales: para el control del acelerador, para el control del freno y para el control de la dirección. Las características principales de estos actuadores se muestran en la Tabla 2. Se eligió para el acelerador un actuador de poca fuerza y velocidad para actuar sobre la mariposa del carburador, la cual no tiene una gran masa para mover. En el caso del freno, se eligió uno de mayor velocidad y fuerza moderada para que permita realizar el frenado del vehículo en un tiempo corto. En el caso de la dirección se eligió un actuador de mucha fuerza, ya que es el encargado de mover todo el conjunto de las ruedas delanteras. El actuador de la dirección se eligió de una fuerza superior a la que debe desarrollar para independizar su velocidad de respuesta de las características del terreno y de esta forma conseguir que tenga el mismo tiempo de respuesta en diferentes tipos de terreno. Además se instaló un codificador óptico incremental para medir la velocidad lineal en el piñón de salida de la caja de

velocidades del vehículo. Para lograr una ubicación adecuada de estos actuadores, se debe tener en cuenta que el vehículo también debe poder ser manejado por un operador humano. Utilizando una herramienta de diseño gráfico CAD, se realizó el diseño de los montajes de los distintos actuadores y una vez que se eligieron los diseños finales, se procedió a sus montajes en el cuatriciclo. En las Fig. 2, 3 y 4 se observan los diseños CAD y los montajes de los actuadores en el cuatriciclo.

Tabla 2: Características de los actuadores lineales

Actuador	Desplazamiento [mm]	Velocidad [mm/s]	Fuerza [kg]
Acelerador	101,6	12	25
Freno	101,6	38	100
Dirección	50,8	16	250



Figura 2: Diseño CAD y ubicación del actuador lineal del acelerador.

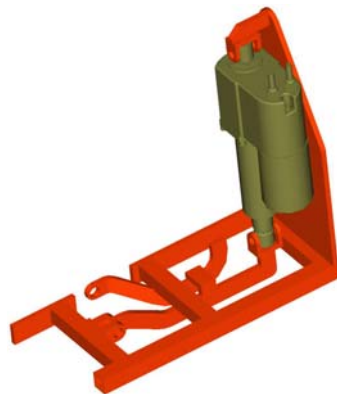


Figura 3: Diseño CAD y ubicación del actuador lineal del freno.

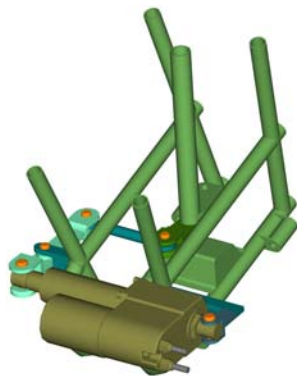


Figura 4. Diseño CAD y ubicación del actuador lineal de dirección.

Cada actuador lineal tiene un sensor potenciométrico de posición, el cual es utilizado para el control de posición del actuador. Como se mencionó anteriormente, todos los actuadores se instalaron de forma que el vehículo siga siendo operable por un conductor humano.

La parte frontal del vehículo fue modificada para colocar un radar láser (LADAR), como puede apreciarse comparando las Figuras 1 y 4.

4. ARQUITECTURA DEL SISTEMA DE CONTROL

Para que el vehículo sea autónomo o teleoperado, se instaló a bordo del mismo una plataforma de hardware que servirá de soporte al software del sistema de control. La arquitectura de control puede dividirse en tres capas diferentes:

- El nivel superior (CPU 2) es un planificador de alto nivel responsable de la planificación de tareas y de las funciones de navegación de rango medio y largo, además de la planificación de trayectorias.
- El nivel medio (CPU 1), es responsable de los controles de dirección y velocidad. Genera y envía las referencias a los controladores de bajo nivel que controlan la posición de cada uno de los actuadores lineales. Debe asegurar la integridad del vehículo frente a inclinaciones peligrosas o vuelcos, evitar obstáculos y evitar accidentes del terreno.
- El nivel inferior (al que se refiere específicamente este trabajo), incluye una interfase entre los comandos del vehículo y el computador que ejecuta el control de nivel medio. Este nivel interactúa con el vehículo a través de las mediciones del ángulo de la dirección, la posición de la mariposa del acelerador, la velocidad de avance del vehículo, etc., e interactúa con el mismo por medio de controladores locales de posición de los actuadores de dirección, acelerador y freno; y sensado de posición de cada uno de ellos. Estos controladores son descriptos en detalle en la Sección 5 de este trabajo.

Para implementar esta arquitectura compleja que incluye tareas de nivel medio y alto, las primeras caracterizadas por una elevada carga computacional, pero con bajas frecuencias de muestreo, y las segundas con tareas más simples, pero con necesidad de un tiempo de respuesta menor; se requiere una arquitectura multicapas y multiprocesador. Utilizando esta arquitectura es posible separar las tareas complejas (navegación en terrenos agrestes, evitación de obstáculos, fusión sensorial, etc.) de las tareas más simples (control de movimiento y servos), y también se separan las tareas que requieren mayor tiempo de muestreo de las que pueden llevarse a cabo con un menor tiempo de muestreo. Además, es deseable que ambas arquitecturas (hardware y software), sean tan modulares como sea posible, de manera de simplificar su actualización y/o reconfiguración.

Las razones expuestas hacen que la elección de una arquitectura multiprocesador sea la más adecuada para esta aplicación. Por otro lado, el sistema de control de navegación necesita un conocimiento completo del estado del vehículo (en términos de la información de los sensores), para poder tomar la mejor decisión de forma autónoma. Esto implica que una gran cantidad de datos debe ser compartida por las diferentes capas del sistema.

El sistema de comunicación elegido es el de bus CAN. Este bus es un sistema de comunicación del tipo serie, con un protocolo que soporta eficientemente y con elevado nivel de seguridad sistemas distribuidos de control en tiempo real. Además, es un protocolo que detecta la presencia de portadora en el bus cuando más de un generador de mensajes intenta comunicarse a la vez [4], [5]. Esto quiere decir que si más de un procesador intenta transmitir datos a la vez, entonces todos los procesadores detectan la colisión, esperan

por un determinado período de tiempo, e intentan nuevamente, repitiendo el proceso hasta que el bus está desocupado. Además para prevenir estas colisiones de mensajes en una forma de operación más eficiente, se puede otorgar prioridad a los mensajes por medio de un identificador.

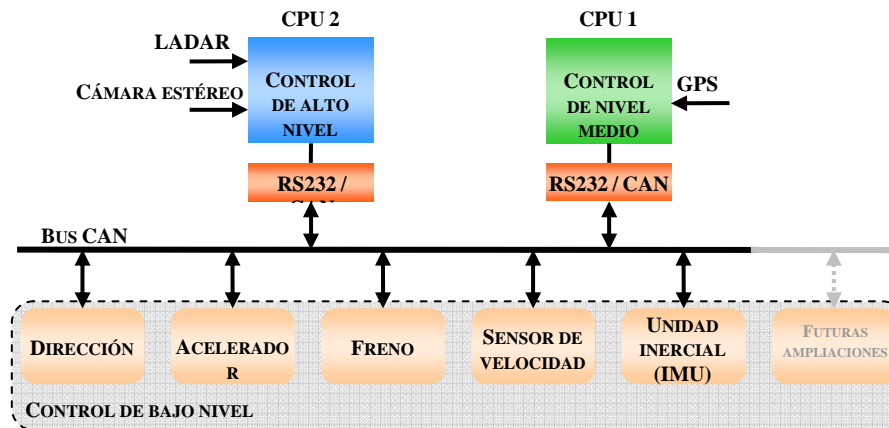


Figura 5: Diagrama funcional de la arquitectura de controladores.

La arquitectura de hardware de tres capas elegida para esta aplicación es la que se muestra en la Fig. 5. Esta arquitectura consiste de:

- Una PC de alto nivel (CPU 2) para implementar los algoritmos de alto nivel: visión, percepción del terreno, localización y mapeo, evasión de obstáculos, etc., además de la navegación de rango largo y medio, planificación de trayectorias, etc. La PC elegida para realizar estas tareas está contenida en una placa madre del tipo Mini-ITX, con procesador Intel Atom Dual Core de 1,6 GHz y 2 GB de memoria RAM. El sistema operativo utilizado es Linux Slax-RTAI. Esta computadora tiene una conexión Ethernet Wi-Fi con una estación base y también está conectada al bus CAN.
- Una PC de nivel medio (CPU 1) conectada al bus CAN para realizar las tareas control de velocidad y dirección con un período de muestreo de 100 mS. Además esta PC es la encargada de generar las referencias de ángulo de dirección, posición de acelerador y freno, y de enviarlas a los controladores de bajo nivel. La PC elegida para estas tareas está formada por una placa madre del tipo Mini-ITX con procesador Atom Dual Core de 1,6 GHz, 1 GB de RAM. El sistema operativo para esta PC es QNX, debido a su robustez y confiabilidad. Además la elección de una PC del tipo Mini-ITX es un buen compromiso entre los requerimientos de tiempo real y la posibilidad de programación en alto nivel. Esta PC también tiene una conexión al bus CAN.
- El control de bajo nivel está formado por varios (5 actualmente) microcontroladores PIC 18F258 de la empresa Microchip, con capacidad de comunicación CAN. Estos microcontroladores son los encargados de controlar cada uno de los actuadores lineales, obtener la velocidad del codificador óptico, y los datos de la Unidad Inercial (IMU).

5. CONTROL DE BAJO NIVEL

Para controlar cada actuador lineal, se utiliza un microcontrolador PIC 18F258 de Microchip [6], como se observa en el esquema de la Fig. 6.

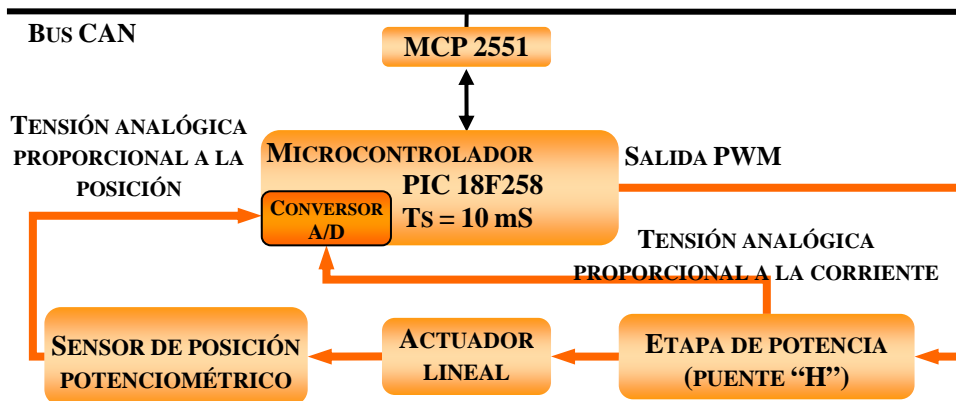


Figura 6: Control de los actuadores lineales (bajo nivel)

Este microcontrolador posee un convertor A/D de 10 bits usado para digitalizar las señales de posición proveniente del potenciómetro del actuador, y la señal proporcional a la corriente del actuador que entrega el módulo de potencia. Además contiene un generador PWM que proporciona la señal que se envía al módulo de potencia para controlar el desplazamiento del actuador. El controlador usado es un PID que se programó en lenguaje "C", con un tiempo de muestreo de 10 mS. Para conectar el microcontrolador al bus CAN se utilizó un chip MCP 2551.

Para sensar la velocidad del vehículo, se instaló un codificador óptico vinculado al engranaje de salida de la caja de cambios. Este codificador está conectado a otro microcontrolador PIC 18F258, lo que permite disponer de la velocidad lineal de desplazamiento del vehículo en el bus CAN.

Para simplificar el mantenimiento y la instalación y a pesar de que los requerimientos de potencia son diferentes, los módulos que controlan los actuadores de freno, acelerador y dirección se fabricaron idénticos. Cada uno de estos módulos consta de un microcontrolador PIC 18F258, una etapa de potencia en base a un puente H del tipo MOSFET y el convertor de nivel para bus CAN (MC2551). Estos módulos servo controladores reciben la referencia de posición generada por la PC de nivel medio (CPU 1), y el controlador PID implementado en el PIC se encarga de que el actuador lineal correspondiente alcance esta referencia. Los controladores implementados son del tipo PID discreto [7], con anti wind-up para prevenir la saturación integral, y su expresión es la siguiente:

$$u(k) = K_p e(k) + K_i \sum_{j=0}^k e(j) + K_d [e(k) - e(k-1)] \quad (1)$$

donde: $K_i = \frac{K_p T_s}{T_i}$; $K_d = \frac{K_p T_d}{T_s}$;

T_s = Período de muestreo

El ajuste de las constantes de los controladores se hizo teniendo en cuenta que la respuesta temporal sea lo más rápida posible, pero sin sobre-elongación. Esta restricción es muy importante para prevenir daños en la estructura mecánica de los actuadores cuando operan en los límites extremos de los mismos. Para normalizar el desplazamiento de todos los actuadores lineales, se considera que es 0 % cuando están totalmente retraídos y 100 % cuando están completamente extendidos. En la Fig. 7 se muestra la respuesta del actuador lineal del freno cuando recibe una referencia tipo escalón del 50 % (vehículo totalmente frenado) en el instante $t = 2,5$ s, con una condición inicial del 10 % (vehículo sin freno).

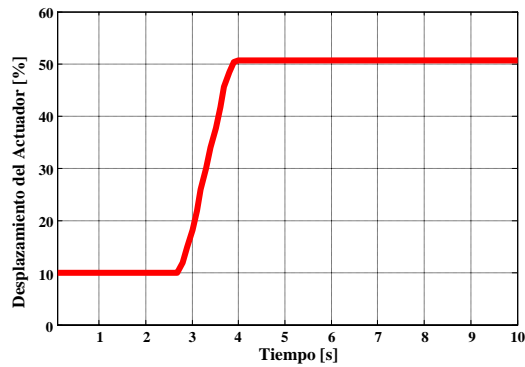


Figura 7: Respuesta a entrada escalón del actuador del freno.

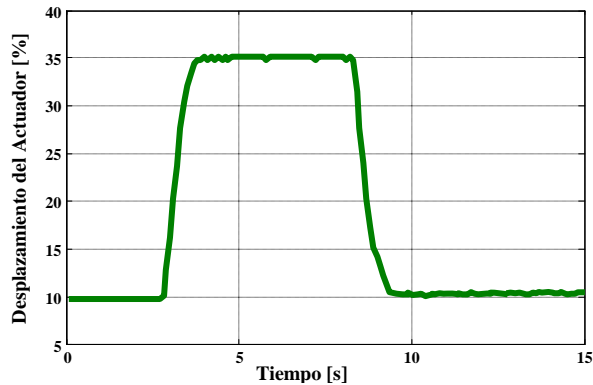


Figura 8: Respuesta del actuador del acelerador.

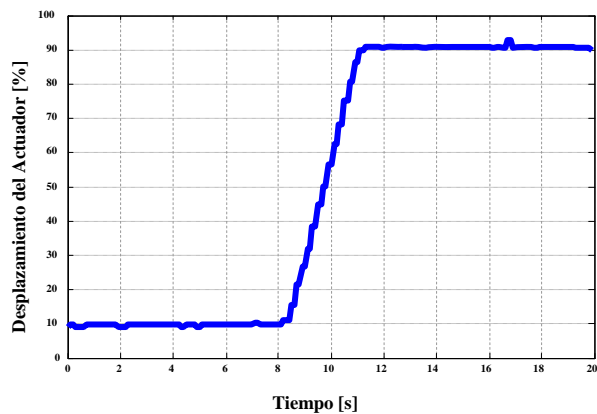


Figura 9: Respuesta del actuador de dirección.

La Fig. 8 muestra la respuesta del actuador del acelerador cuando recibe una referencia del 35 % en el instante $t = 2,5$ s, con una condición inicial del 10 % (vehículo detenido), y en el instante $t = 7$ s, la referencia es nuevamente 10 %.

La Fig. 9 muestra la respuesta del actuador del sistema de dirección cuando recibe una referencia del 90 % (ángulo de dirección - 20 grados) en el instante $t = 8$ s, con una condición inicial del 10 % (ángulo de dirección 20 grados). La posición central (ángulo de dirección 0 grados) corresponde a un desplazamiento del 50 % del actuador.

La Fig. 10 muestra al RMTT con todos los componentes montados a bordo. En esta figura se pueden ver tres cajas de baterías: una para alimentar los actuadores, otra para alimentar la PC de nivel medio, los microcontroladores el sistema GPS y el router inalámbrico, y la tercera para alimentar la PC de alto nivel, el LADAR y la cámara estéreo. La computadora de alto nivel está montada en el portabultos delantero, y la computadora de nivel medio en el trasero.



Figura 10: Robot móvil todo terreno.

6. EXPERIMENTOS

Los experimentos que se presentan son los llevados a cabo para ajustar las ganancias de los controladores PID de la computadora de nivel medio de forma que el robot pueda desplazarse a una velocidad determinada en un terreno no homogéneo al aire libre, sin utilizar el actuador de freno. Los parámetros adoptados para el controlador PID fueron: $K_p = 0.001$, $K_d = 0.008$ y $K_i = 0.0005$. En las figuras 11, 12 y 13 se muestra la evolución de la velocidad lineal y la posición del actuador del acelerador para velocidades de referencia de 1000, 2000 y 3000 mm/s respectivamente.

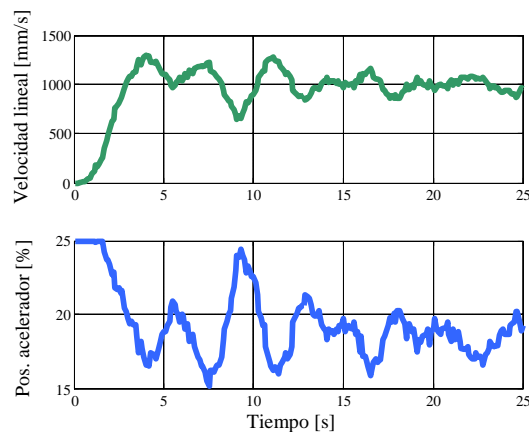


Figura 11: Evolución de la velocidad del robot y posición del acelerador para una velocidad de referencia de 1000 mm/s.

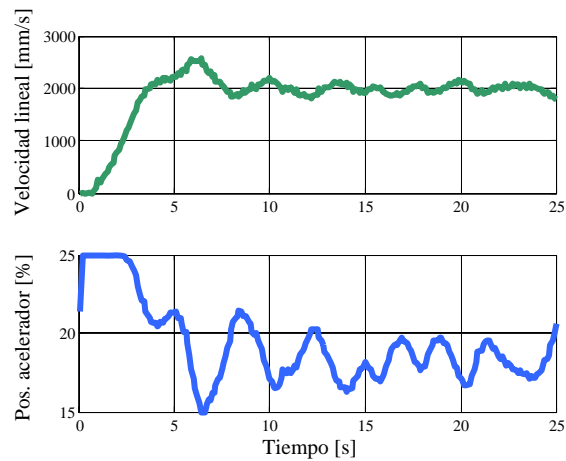


Figura 12: Evolución de la velocidad del robot y posición del acelerador para una velocidad de referencia de 2000 mm/s.

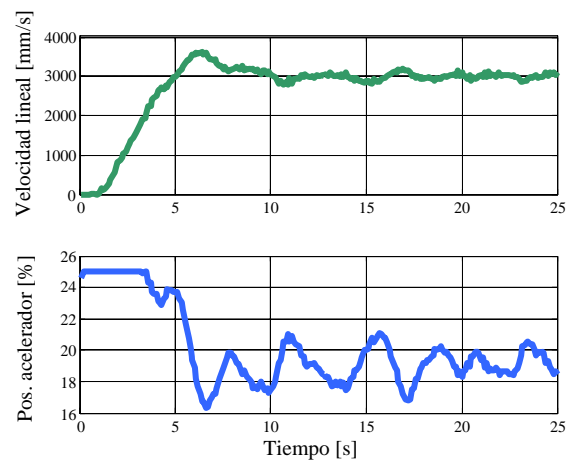


Figura 13: Evolución de la velocidad del robot y posición del acelerador para una velocidad de referencia de 3000 mm/s

7. CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta el sistema de control de bajo nivel para un robot móvil todo terreno. Se presentan además las modificaciones mecánicas que debieron realizarse sobre el vehículo original, para implantarle los actuadores lineales, el sensor de velocidad y el LADAR, todas ellas realizadas manteniendo intacta la posibilidad de que el vehículo sea operado por un humano.

Los controladores PID de los actuadores lineales muestran un buen desempeño y demuestran que son capaces de realizar maniobras seguras con el vehículo. El controlador PID de velocidad que corre sobre la PC de nivel medio se ajustó para navegar a bajas velocidades (hasta 3000 mm/s).

8. REFERENCIAS

- [1] R. Lenain, B. Thuilot, C. Cariou, and P. Martinet. "A nonlinear control for vehicle in sliding conditions: applications to automatic guidance of farm vehicles using RTK GPS," in International Conference on Robotics and Automation, ICRA, New Orleans, April/May, 2004.
- [2] L. Cremean, T. Foote, J. Gillula, G. Hines, D. Kogan, K. Kriechbaum, J. Lamb, J. Leibs, L. Lindzey, C. Rasmussen, A. Stewart, J. Burdick and R. Murray. "Alice: An Information-Rich Autonomous Vehicle for High-Speed Desert Navigation" Journal of Field Robotics, 23(9), 777–810, 2006.
- [3] Baek W., S. Jang, H. Song, S. Kim, B. Song and D. Chwa. "A CAN-based Distributed Control System for Autonomous All-Terrain Vehicle," Proceeding of the 17th World Congress, IFAC, Seoul, Korea, July 6-11, pp. 9505-9510, 2008.

- [4] R. Tindell, A. Burns, and A. J. Welling. "Calculating controller area network (CAN) message response times" Control Eng. Practice, volume3, no.8, pages 1163-1169, 1995.
- [5] S.Corrigan. "Introduction to the controller area network (CAN)," Application Report SLOA 101, Texas Instrument, 2002.
- [6] Microchip. 18FXX8 Data Sheet, 2006.
- [7] K. Ogata. Discrete-Time Control Systems, Prentice-Hall International, Inc., ISBN 0-13-328642-8, 1995.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por el proyecto PICT 07 N° 00513 Préstamo BID - CONICET.