

Instrumentación, Actuación e Implementación de Control Difuso de Bajo Nivel en Vehículo Terrestre Autónomo de Escala Real

Mauricio Mascaró, Felipe Cabello, Sebastián Isao Parra, Paul Vallejos, Pablo Guerrero, Alejandro Ehrenfeld, Alexis Acuña, Javier Ruiz del Solar, y Marcos Orchard^{1,2}

Resumen

El presente artículo describe los primeros pasos del desarrollo de un prototipo a escala real de vehículo terrestre autónomo, incluyendo las etapas de instrumentación, actuación del automóvil y el diseño de un sistema de control difuso para la velocidad, todo en el marco del trabajo realizado en el grupo de Automatización y Robótica del Centro Avanzado de Tecnología para la Minería (AMTC, por sus siglas en inglés) de la Universidad de Chile. La iniciativa se perfila como un proyecto emblemático que permitirá contar en el corto plazo con una plataforma de verificación y validación de tecnologías orientadas a la automatización, tele-operación y robotización de vehículos y maquinaria minera móvil en ambientes abiertos y no estructurados, tal como es el caso en la minería a rajo abierto. La intervención del vehículo, un automóvil Volkswagen® Tiguan, requiere del diseño y adecuación de un gran número de componentes y sistemas claves con el fin de lograr un prototipo operativo, incluyéndose el sistema de aceleración y frenado, el freno de mano, y la caja de cambios. En este sentido, el artículo detalla algunos de los aspectos más significativos a considerar en este tipo de intervenciones. Adicionalmente, se presenta el diseño de un controlador difuso longitudinal para un amplio rango de velocidades, el cual permite obtener un control de bajo nivel basado en la utilización de los sistemas ACC y Stop & Go del automóvil.

Finalmente se presenta el diagrama de bloques propuesto para la implementación del sistema de navegación autónoma.

¹ Centro Avanzado de Tecnología para la Minería (AMTC), Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, e-mail: morchard@ing.uchile.cl.

² Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

1. INTRODUCCION.

El Centro Avanzado de Tecnología para la Minería (AMTC, por su sigla en inglés), creado en marzo de 2009 y perteneciente a la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, tiene por misión generar investigación multidisciplinaria de clase mundial, transferir nuevas tecnologías y formar capital humano avanzado respondiendo a los desafíos de una minería que asegure el bienestar y el desarrollo de Chile.

Es en este contexto que el área de Automatización y Robótica del AMTC ha focalizado sus esfuerzos en el desarrollo de tecnologías asociadas a la automatización, tele-operación y robotización de vehículos y maquinaria minera móvil. Uno de sus proyectos emblemáticos corresponde a la creación de un prototipo de vehículo autónomo capaz de operar en ambientes similares a los encontrados en minas a rajo abierto, con el fin de servir de plataforma de validación de nuevas tecnologías y conceptos. Esta iniciativa, sin precedentes en Chile, conforma el paso previo a la automatización de otras máquinas que la industria requiere (camiones de transporte de mineral, palas mecánicas, vehículos de transporte de pasajeros, entre otros), permitiendo aumentar la productividad y, por sobre todo, la seguridad y salud de los trabajadores de la principal actividad económica del país. El presente documento resume los hitos fundamentales en el desarrollo del mencionado prototipo, incluyendo las etapas de instrumentación, actuación e implementación de un control difuso de bajo nivel.

El artículo se estructura de la siguiente manera. En la Sección 2 se describen las principales características del vehículo a ser intervenido, mientras que la Sección 3 describe su instrumentación y control. Finalmente, en la Sección 4 se presentan algunas conclusiones y proyecciones de este trabajo.

2. DESCRIPCIÓN DEL VEHÍCULO A INTERVENIR

El prototipo de vehículo autónomo corresponde a un automóvil Volkswagen® Tiguan. Este vehículo es una SUV (*Sport Utility Vehicle*) que cuenta con características ideales para su desempeño en terrenos difíciles como tracción en las cuatro ruedas y la última tecnología computacional y sensorial en desarrollo automotriz. Las principales características del vehículo se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Características VW Tiguan 2010

Motor Bencinero de 2.0 [L]
Inyección electrónica
Dirección servoasistida de eje paralelo
Transmisión automática de 7 velocidades
Sistemas de freno anti-bloqueo ABS
Sistema de asistencia para estacionamiento
Freno de mano electrónico
Sistema de comunicación interna a través de 7 CAN (<i>Controller Area Network</i>)
Control Electrónico del Pedal

Algunas de las características y sistemas mencionados resultan críticas a al momento de instrumentar y automatizar la operación del vehículo. A continuación, se procede a detallar dichos sistemas.

2.1. Control Electrónico del Pedal

En los autos tradicionales de la década pasada, la válvula que permite el ingreso de aire al motor está conectada mecánicamente al pedal del acelerador a través de un cable de acero. En el caso del VW Tiguan, el control de esta válvula es electrónico. El pedal del acelerador envía señales análogas a la ECU (*Electronic Control Unit*) central del vehículo indicando que tan presionado se encuentra el acelerador y la ECU en función de otras variables determina cuanta gasolina inyectar y cuanto debe abrir la válvula de entrada de aire del motor.

Al presionar el pedal del acelerador se generan dos señales analógicas de voltaje que le permiten a la ECU determinar qué tan presionado está el pedal. Estas señales están desfasadas para tener redundancia y mayor seguridad en el control de la aceleración, como se observa en la Figura 1.

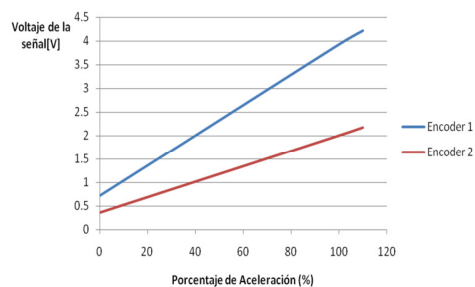


Figura 1. Señales de Voltaje de los codificadores de posición del acelerador

2.2. Asistencia de Estacionamiento en Paralelo

Este sistema permite asistir al conductor en las maniobras de estacionamiento en paralelo. El sistema de asistencia controla la dirección del vehículo a través de la unidad de control, manipulando el eje de la

dirección siempre y cuando la velocidad se mantenga reducida en todo momento.

2.3. Sistema de Frenado

El funcionamiento del sistema de frenos es similar al de otros vehículos de su mismo tipo. Sin embargo, se adicionan características de seguridad que favorecen la automatización del vehículo. Por ejemplo, existe un sistema de seguridad que permite asistir al conductor en caso de emergencia: el vehículo detecta este tipo de situaciones analizando la tasa de cambio en la fuerza del frenado. Si esta sobrepasa cierto umbral el controlador de los frenos entrega la máxima potencia de frenado hasta que se activa el ABS lo que permite detener el vehículo mucho más rápidamente.

El freno de estacionamiento es eléctrico. Con sólo presionar un botón se activan dos actuadores electromecánicos que frenan las ruedas traseras del vehículo con la fuerza necesaria para detener el vehículo en cualquier pendiente menor a 30°.

2.4. Sistema de Dirección Servoasistida de Eje Paralelo

El sistema funciona basado en un motor eléctrico que mueve el eje de la dirección según lo requiera el sistema de control, logrando simplificar la tarea de conducción al ayudar a girar la dirección sin tener que ejercer toda la fuerza requerida para mover las ruedas. Dentro de cada sistema de control de dirección servoasistida, VW programa curvas predefinidas que indican cuanto torque se necesita para mover las ruedas a determinada velocidad.

2.5. Transmisión Automática

El vehículo posee un sistema de transmisión automática de 7 velocidades. A través de la palanca de mando se pueden seleccionar 7 modos distintos de operación:

"Park"; Reversa; Neutro; Directa; Deportivo y "Tiptronic". La palanca de mando está conectada mecánicamente a su vez con el switch multifunción, que convierte las posiciones de la palanca en una secuencia de bits que es leída por la unidad de control de la transmisión.

Adicionalmente a todo esto, el sistema además garantiza el auto frenado a pesar de la pérdida de energía, ya que cuenta con la función de *AUTOHOLD* (auto-sostener) que releva del conductor la tarea de estar frenando constantemente mientras el vehículo está detenido, incluso en pendientes.

3. INSTRUMENTALIZACIÓN Y CONTROL DEL PROTOTIPO

Para desarrollar e implementar el prototipo del vehículo autónomo es necesario identificar las diferentes aéreas que requieren algún grado de intervención: control de bajo nivel (para el cual se utilizara un Control Difuso), actuadores (los que intervendrán freno, acelerador, caja de cambios, volante y freno de mano) y captura de información del entorno (a través de diversos sensores ópticos y radares). Esta descripción se puede observar en la Figura 2, en donde se muestran cómo y a través de que variables estas unidades interactúan.

3.1. Actuadores y Controladores

La implementación de actuadores sobre el vehículo tiene dos alternativas: dispositivos mecánicos, que realizarían las misma intervención que un humano, o utilizar dispositivos electrónicos que se comuniquen directamente con los controladores internos del vehículo.

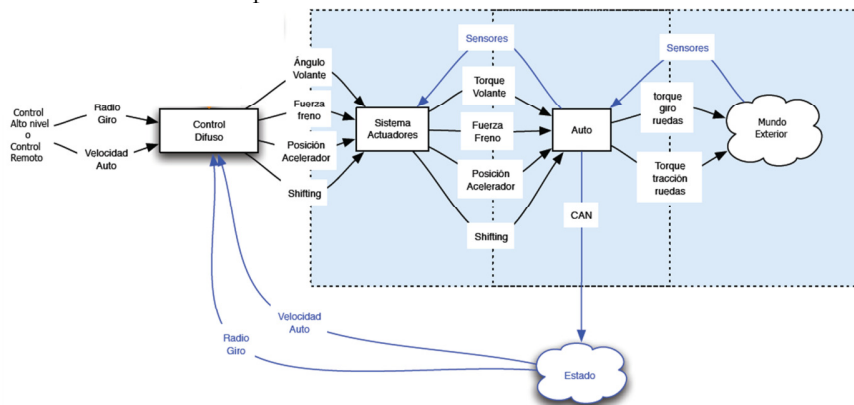


Figura 2: Módulos que componen la automatización.

El principal requerimiento sobre los actuadores es que deben tener al menos la misma capacidad que una persona calificada para conducir, además de no interferir con la conducción normal cuando el sistema de conducción autónoma no sea utilizado y un humano conduzca el vehículo. En base a esto se decidió intervenir electrónicamente el acelerador, la transmisión y el freno de mano (entregando señales electrónicas a la ECU), no así el freno y la dirección, que para mayor seguridad se intervinieron mecánicamente (al no interferir la electrónica del freno o de la dirección, se evita el confundir a la ECU en tareas críticas).

Un resumen de las intervenciones de los actuadores se observa en la Figura 3.

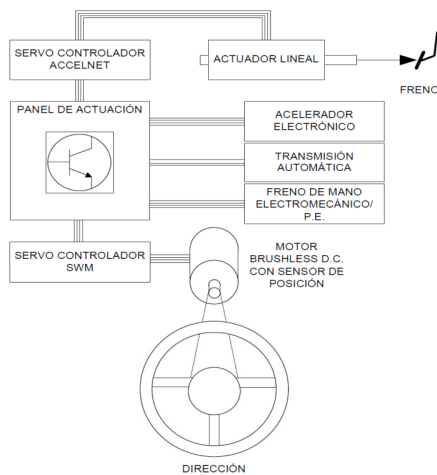


Figura 3. Esquema general del sistema de actuación diseñado, ejemplificado para el caso del actuador del freno.

3.2. Filosofía de Operación

Dado que el vehículo debe ser capaz de aceptar modos de conducción manual y autónoma, el sistema de actuación considera la existencia de tres estados relevantes de operación, los cuales interactúan de la siguiente manera:

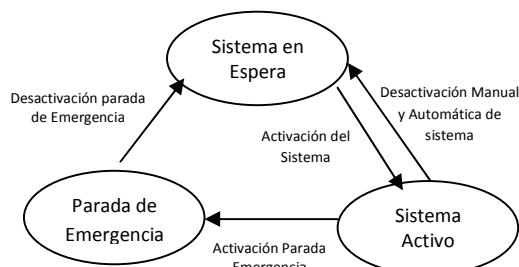


Figura 4. Diagrama de estados del sistema de actuación

- *Sistema en espera:* Cuando el sistema de actuación del vehículo no está activo se encuentra en espera y no interfiere con ninguno de los sistemas de comunicación o actuación del vehículo.
- *Sistema activo:* Corresponde al estado donde el automóvil es controlado a través de los actuadores instalados. En este estado es necesario contar con la alternativa de desactivar el sistema, a través de la parada de emergencia.
- *Parada de emergencia:* La parada de emergencia puede ser activada en cualquier momento a través de software, por señal digital externa, o por hardware (a través del botón de emergencia). En ambos casos el acelerador y el volante quedarán totalmente libres y la transmisión volverá a neutro. Una vez desactivada la parada de emergencia el sistema volverá al modo de espera.

3.3. Diseño de Sistemas de Actuación

3.3.1. Diseño del Sistema de Actuación sobre Acelerador

Para diseñar un sistema que permita actuar electrónicamente sobre la aceleración del vehículo (al cuál denominaremos “acelerador virtual”), primero es necesario caracterizar completamente el sistema de aceleración. Esto se logró midiendo el voltaje y la corriente, de entrada y salida, del sensor de velocidad. Luego, para poder emular dicho sistema se conectaron distintas resistencias en serie y paralelo a un potenciómetro digital, el cual controla ambas señales. Adicionalmente se agrega un filtro pasa-bajo pasivo de primer orden a la salida de cada uno de los sensores de posición virtuales, para mejorar la razón señal/ruido. Finalmente, con esta información, se obtiene el circuito a implementar que se observa en la Figura 5.

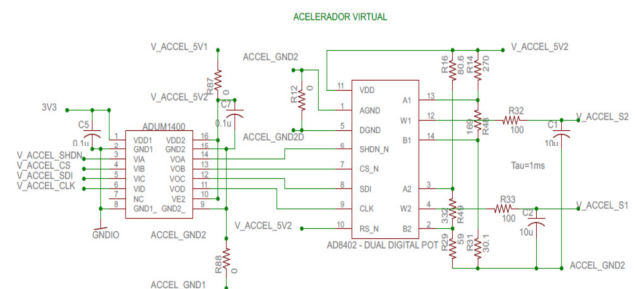


Figura 5. Esquemático del acelerador virtual

Es importante señalar que se debe aislar eléctricamente el circuito del acelerador virtual y el circuito que controla el potenciómetro digital.

3.3.2. Selector de Marchas en Sistema de Transmisión

Para estudiar el sistema automático que selecciona la transmisión del vehículo se realizan pruebas semejantes a las del acelerador. Una vez conocida las señales características que definen la operación del componente, se construye un switch multifunción que entregue dichos valores, según sea requerido, obteniéndose el esquema de la Figura 6.

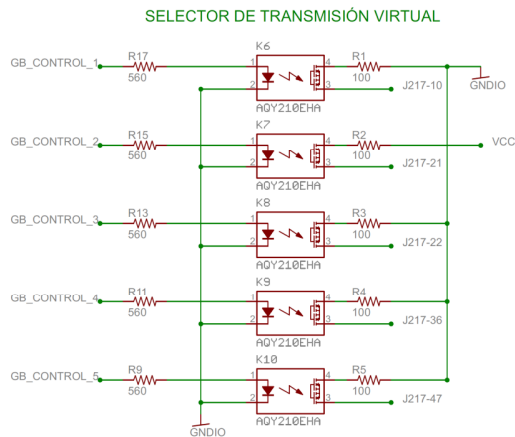


Figura 6. Esquemático del selector de transmisión virtual.

3.3.3. Actuador del Freno

La actuación del freno se realiza mecánicamente, ya que su intervención electrónica resulta muy difícil sin una gran cantidad de información propietaria exclusiva del fabricante del vehículo. Incluso, aunque se contara con dicha información, debido a lo crítico del sistema, se prefiere no intervenir a los agentes involucrados en su funcionamiento (sistema ABS o de parada de emergencia). Por estas razones se decidió utilizar un actuador lineal de accionamiento eléctrico de marca *Copley Controls* (como el mostrado en la Figura 7), el cual ya ha sido usado en la actuación de otros automóviles de características similares.



Figura 7. Actuador Lineal del Freno.

3.3.4. Actuador de la Dirección

La actuación de la dirección se realiza mecánicamente, ya que, además de la dificultad de una intervención electrónica existe el riesgo de dañar o deshabilitar los

sistemas auxiliares de la dirección que permiten una conducción más segura.

Luego, para éste actuador se decidió utilizar un motor *brushless* DC marca Emoteq. Importante señalar es que dentro del motor se encuentra ensamblado un sensor de posición de tipo "resolver".

3.3.5. Parada de Emergencia

El diseño ha considerado un mecanismo de parada de emergencia, a ser utilizado en el caso de que existan fallas críticas en el sistema implementado, como desenergización de equipos o alguna falla en la lógica de control. Ésta se ha implementado utilizando directamente la parada de emergencia incorporada en el vehículo aprovechando la robustez que proporciona como sistema probado por Volkswagen y autorizado para su uso en vehículos comerciales.

3.4. Implementación de Sistemas de Actuación

La conexión al acelerador se realiza detrás del pedal de aceleración, a través de conectores que están diseñados de tal forma que si se quiere realizar un *by-pass* total del sistema de actuación el acelerador se puede conectar directamente a la unidad de control de motor. Igualmente la conexión del switch multifuncional y la botonera del freno de estacionamiento, se realiza con conectores y posee la misma capacidad de realizar un *by-pass*.

El actuador de la dirección se ubica cerca de la columna de dirección, sobre el reposa pies del conductor, sujeto por una plataforma de aluminio reforzado, diseñada especialmente para tales propósitos. Mientras que el actuador del freno se sitúa en el reposa pies del copiloto y a través de un sistema de poleas tira el cable que acciona mecánicamente el pedal del freno.

Finalmente se ubica el botón de parada de emergencia del vehículo sobre el panel central del auto para que sea accesible tanto al conductor como al copiloto.

3.5. Control Difuso de Velocidad de Bajo Nivel

Para el control de bajo nivel de la velocidad, se decidió utilizar lógica difusa, ya que esta tiene la facultad de abstraerse del modelo de la planta, logrando obtener sus parámetros a través de heurísticas y/o experimentación basada en ensayos-error. Esta decisión fue tomada debido a lo complicado de realizar un modelo real del vehículo y por el hecho que un conductor humano tampoco necesita conocer el modelo del automóvil, sino tan solo el cómo manejarlo.

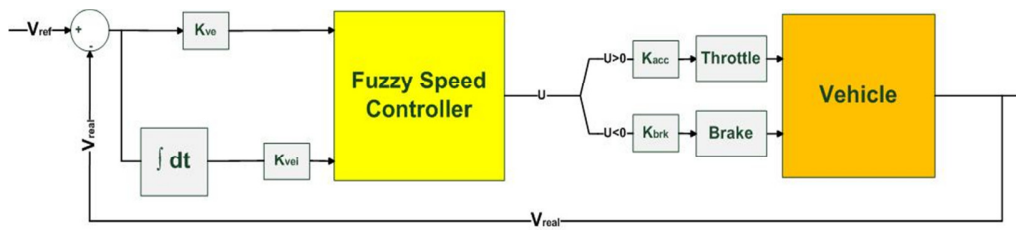


Figura 8. Estructura de Control

3.5.1. Estructura del Sistema de Control de Velocidad

Para controlar la velocidad del vehículo, se propone la estructura que se observa en la Figura 8. Dado que se trabaja con un marco unificado de control para realizar la supervisión de un amplio rango de velocidades, y para diferentes tipos de entornos, se focalizará el diseño en un sistema de control que evite la existencia de controladores independientes para ACC (control crucero adaptable, que corresponde a un asistente de la velocidad para la conducción sobre 40[km/h]) o Stop&Go (concebido para la conducción urbana, para velocidades inferiores a 40[km/h]). Adicionalmente, tampoco se consideran controladores independientes para el acelerador y el freno, por lo que mediante una única señal de salida se determinará que actuador ejercerá la acción de control. Luego, si la señal de control es negativa se utilizará el controlador del freno, mientras que si la señal es positiva se ocupará el acelerador.

3.5.2. Controlador Difuso de Velocidad.

Para el diseño del controlador se consideraron dos entradas: el error de velocidad (v_e) y la integral del error (v_{ei}) definidas como:

$$v_e = v_{ref} - v_{real}$$

$$v_{ei} = \int_{t=0}^T v_e dt$$

La selección de las variables de entrada es un asunto de vital importancia en el diseño de la estrategia de control, y en este caso se seleccionaron pensando en reducir al máximo el error de la velocidad al alcanzar el régimen permanente. La salida del controlador en este caso es el porcentaje de apertura del pedal de aceleración o el de freno, dependiendo del signo de la señal de salida como se aprecia en la Figura 8.

Las funciones de pertenencia escogidas para todas las variables son triangulares, dado que éstas son fácilmente implementables, sencillas de ajustar y de optimizar. Además, se escogieron cinco conjuntos difusos para el error de velocidad y la salida del controlador, estos son 2 positivos, 2 negativos y un tercero centrado en cero. Mientras que para la integral del error fueron 7 (agregándose una a cada extremo). Es importante considerar que la variable centrada en cero debe traslapar con las variables contiguas, esto es necesario para evitar que haya constantes cambios de signos en la señal de salida, lo que se traduciría en alternar frecuentemente entre el acelerador y el freno, lo que no correspondería a una conducción natural. Este diseño de las funciones de pertenencia, en conjunto con la utilización de zonas muertas permitirán que el freno sólo se utilice al ser estrictamente necesario, mientras que la regulación de pequeñas variaciones de velocidad se realizarán sólo con el acelerador.

Finalmente, la base de reglas para el caso del control de velocidad, queda compuesta por 35 reglas simples, como se visualiza en la Tabla 2. Estas reglas cuales apuntan a lograr un correcto seguimiento de velocidad.

Tabla 2 Base de reglas del controlador difuso de velocidad: NL (negative large), NM (negative medium), ZE (zero), PM (positive medium) y PL (positive large); NS (negative small) y PS (positive small).

		v_{ei}						
		NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
v_e	NL	NL	NL	NL	NL	NL	NM	ZE
	NM	NL	NL	NM	NM	NM	ZE	PM
	ZE	NM	NM	ZE	ZE	ZE	PM	PM
	PM	NM	ZE	PM	PM	PM	PL	PL
	PL	ZE	PM	PL	PL	PL	PL	PL

Para el diseño del controlador se utilizó la inferencia de Mamdani, considerándose la función “MAX” para

la combinación de los consecuentes y el método del centro de gravedad para el proceso de defusificación.

3.5.3. Resultados del Controlador de Velocidad

Para comprobar la coherencia del controlador difuso de velocidad, se realizaron dos pruebas diferentes:

- Seguimiento de una referencia de velocidad.
- Seguimiento de una referencia de velocidad limitando la apertura de los pedales.

Para poder realizar las pruebas se construyó un simulador, en ambiente de Simulink de Matlab®, consistente en las ecuaciones dinámicas de un vehículo modelado como bicicleta, utilizando los parámetros reales del automóvil [9]. Adicionalmente para todas estas pruebas se consideró que el vehículo se movía en línea recta durante toda la simulación.

En la Figura 9 se muestra el desempeño del controlador diseñado siguiendo una referencia y también la salida del controlador con limitación del pedal. Se puede observar que se obtiene un muy buen desempeño del controlador para las distintas referencias de velocidad, ya que el controlador sigue muy bien los cambios de referencia, manteniéndose siempre un error permanente inferior a 1[km/h]. Teniendo en cuenta esto se puede ver que el marco unificado de control de velocidad propuesto resulta efectivo, siendo válida la estrategia de control propuesta tanto para altas velocidad (conducción ACC) como para velocidades bajas (conducción Stop&Go).

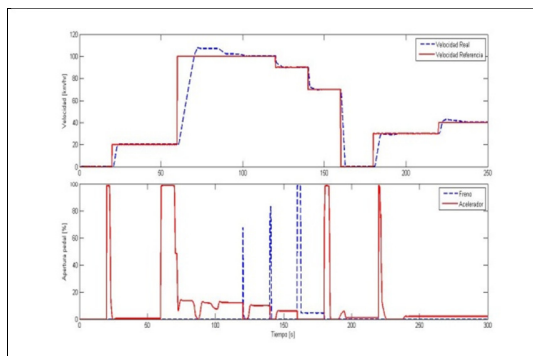


Figura 9. (a) Seguimiento de velocidad y (b) salida del controlador limitando la apertura de los pedales

La salida del controlador de velocidad es congruente con lo esperado, limitando al máximo el intercambio entre acelerador y freno, ocupándose este exclusivamente cuando se debía disminuir considerablemente la velocidad.

4. CONCLUSIÓN.

En este documento, se desarrolló un sistema que permite actuar sobre el acelerador, la dirección, transmisión automática y frenos del vehículo intervenido de forma satisfactoria. Además el enfoque utilizado minimiza las intervenciones físicas, al utilizar intervenciones electrónicas de las señales de control del vehículo.

El sistema contempló diversos sistemas de protección y seguridad que permiten impedir y/o controlar diversas fallas que pudieran ocurrir durante la operación del sistema, siendo esto fundamental para el tipo de aplicación diseñado

Para realizar el control de velocidad de bajo nivel en el vehículo, se propuso un controlador difuso que actúa sobre el acelerador y el freno, sin la necesidad de tener controladores separados para cada actuador. Se logró diseñar un controlador que unificadamente permite realizar un control crucero y también un control Stop&Go, sin la necesidad de tener dos controladores independientes para cada caso, como sucede en los sistemas de control actuales, barriendo así un amplio rango de velocidades. El diseño del controlador fue verificado mediante simulaciones, mostrando ser efectivo en el seguimiento de las referencias de velocidad con un mínimo error permanente y robusto ante los cambios de punto de operación y ruido en las señales.

AGRADECIMIENTOS.

Los autores desean agradecer al Centro Avanzado de Tecnología para la Minería (AMTC) de la Universidad de Chile.

5. REFERENCIAS

- [1] Dittmer, M. et al, Team-LUX DARPA Urban Challenge 2007 Technical Paper, Junio 2007.
- [2] Volkswagen AG, "Self-Study Programme 210: Electronic Power Control – Design and Function", Alemania.
- [3] Volkswagen AG, "Self-Study Programme 309: 6-speed Automatic Gearbox 09G/09K/09M", Alemania.
- [4] Volkswagen AG, "Self-Study Programme 404: The Tiguan 2008", Alemania.

- [5] SOBRECOCHEs, Novedades / Volkswagen (2008). Disponible en: http://www.sobrecoches.com/coches/volkswagen/tiguan/novedad_gama_2008/imagenes
- [6] Kodagoda, K.R.S.; Wijesoma, W.S.; Teoh, E.K.; "Robust Un-coupled Fuzzy Controller for Longitudinal and Lateral Control of an AGV", Computational Intelligence, Lectures Notes in Computer Science, Volume 1625, pp. 370-381, 1999.
- [7] Ching-Chih,T.; Shih-Min, H.; Chien-Tzu, C.; "Fuzzy Longitudinal Controller Design and Experimentation for Adaptive Cruise Control and Stop&Go", JOURNAL OF INTELLIGENT & ROBOTIC SYSTEMS,Volume 59, Number 2, 167-189, Enero 2010.
- [8] Naranjo, J.E.; Gonzalez, C.; Garcia, R.; de Pedro, T.; "ACC+Stop&go maneuvers with throttle and brake fuzzy control", Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on , vol.7, no.2, pp. 213- 225, June 2006
- [9] Freund, E. and Mayr, R. "Nonlinear Path Control in Automated Vehicle Guidance" IEEE transactions on robotics and automation, vol. 13, no. 1, february 1997