

## Observador No Lineal de Tres Grados de Libertad en Matlab-Simulink-CarSim Aplicado al Automóvil

SANDOVAL, Sergio\*†, RUIZ, Daniel, TOPETE, Juan y MOLINAR, Jesús

*Tecnológico Nacional de México, Modulo Cd. Guzmán, Departamento de Ingeniería Eléctrica-Electrónica, Av. Tecnológico N°100, Zapotlán El Grande, Jalisco, México.*

Recibido 5 de Abril, 2015; Aceptado 24 de Junio, 2015

### Resumen

En este trabajo, se pretende que la velocidad lateral siga a una maniobra del conductor que es una delta pero en sentido contrario. Se propone que el vehículo se encuentra realizando pruebas de manejo conocidas por normas internacionales ISO 3888-1 e ISO 7401, por ende el seguimiento de la velocidad longitudinal y la estimación de la velocidad lateral se puede realizar mediante un observador no lineal de tres grados de libertad ya que se supone la medición de la velocidad angular de viraje. Los actuadores que integraremos en este artículo serán los frenos ( $M_z$ ) y el sistema frontal activo (AFS, por sus siglas en inglés). En esta investigación se realiza la formalización matemática del observador y se muestran por medio de la simulación de Matlab-Simulink-CarSim a la velocidad lateral, velocidad longitudinal y las perturbaciones de viento aplicadas en el automóvil, además de analizar la estabilidad de errores del observador por medio de una función candidata de Lyapunov.

**Observador, velocidad lateral, velocidad angular de viraje.**

### Abstract

In this paper we aim that the lateral velocity follows to a driver's maneuver called "delta" but in a different direction. It's proposed that the vehicle makes a driving test known for international standards as the ISO 3888-1 and ISO 7401 and therefore the follow up of the longitudinal and lateral velocities can be performed with a no lineal observer with three degrees of liberty since it is supposed the measurement of the yaw velocity. The actuators that we will integrate in this paper will be the brakes ( $M_z$ ) and the Active Front System (AFS). In this investigation we develop the mathematical model of this observer, and also we see the lateral velocity, the longitudinal velocity and the wind disturbances applied to the automobile through simulations in Matlab-Simulink-CarSim. Furthermore the stability in the observer's errors is analyzed using a Lyapunov function.

**Observer, lateral velocity, yaw velocity.**

**Citación:** SANDOVAL, Sergio, RUIZ, Daniel, TOPETE, Juan y MOLINAR, Jesús. Observador No Lineal de Tres Grados de Libertad en Matlab-Simulink-CarSim Aplicado al Automóvil. Revista de Aplicaciones de la Ingeniería 2015, 2-3: 127-138

\* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: ssandoval@itcg.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

El control activo puede establecer una ayuda al conductor en el vehículo, sumando acciones futuras al incrementar la maniobrabilidad y seguridad, especialmente en situaciones críticas. Estas acciones activas incluyen la estabilidad de viraje o por sus siglas en inglés yaw (ver Acosta et al. (2007, 2008), Pan (2014)) y el control integrado del automóvil (Goodarzi et al. (2007), Lam (2010), Zakaria (2014)). Estas acciones de control pueden ser realizadas por un instante, haciendo uso de los actuadores como el sistema frontal activo AFS y el vector de torque trasero (RTV). Estos modifican las dinámicas del vehículo imponiendo fuerzas y momentos en el automóvil (Bianchi et al. (2010), Earl (2013), Tjonnas (2010), Rubin (2013)). La acción de control es usualmente determinada sobre las bases de modelos de aproximación que pueden ser simples para obtener una implementación de un controlador, pero capturando los aspectos principales de la física del problema del vehículo. Las dinámicas de la velocidad lateral y de viraje son usualmente consideradas en la síntesis del control, mientras que otras dinámicas son despreciadas. Por ejemplo las perturbaciones del viento son ignoradas, como en algunos casos de los vehículos que cuentan con controles activos, donde estos disturbios del aire no son analizados y deberían tomarse en cuenta para el diseño del control. En este artículo no se demuestra el control activo con AFS y RTV, pero se deberá diseñar este controlador con las consideraciones de las perturbaciones dinámicas del viento sobre el vehículo y así obtener una acción de control de alta eficiencia. Sin embargo otro problema que es considerado en este trabajo es el factor de algunas variables de estado necesarias para implementar las estrategias de control que no son usualmente medidas, por el costo y espacio de los sensores que se ocupan en el automóvil. Para un instante la velocidad lateral es raramente medida.

Aunque para obtener un control satisfactorio robusto, esta variable de estado debería ser determinada de otras mediciones tal como la aceleración longitudinal y lateral, velocidad longitudinal, velocidad angular de viraje y ángulo de maniobra del volante del conductor. Para un observador la velocidad lateral es tomada en cuenta para reconstruir las variables que no se pueden medir. Trabajos anteriores sobre observadores, limitados a la estimación de la velocidad lateral, se basan principalmente en técnicas lineales (Mudaliar et al. (2004), Oh (2012)) y en técnicas casi lineales (Ungoren et al. (2004), Yacine (2015)). Un observador no lineal, realizado para la linealidad de los errores dinámicos es propuesto en (Kiencke et al. (1997, 2000), Guo (2013)). Otro observador similar es presentado en (Hiemer et al. (2005)), forzando los términos de errores dinámicos no lineales estimados a los de un sistema de referencia lineal. Los observadores lineales y no lineales usan técnicas de modos deslizantes, los cuales son propuestos en (Baffet et al. (2007), Stephant (2007), Zhao (2014)). Otras propuestas de observadores están basadas en filtros extendidos Kalman (Ray (1995), Suissa (1996), Best et al. (2000), Ren (2014)). También un control activo de un vehículo es realizado en (Ohara et al. (2008)), mediante un controlador para activar el ángulo frontal de la rueda del automóvil, utilizando un modelo de referencia, basado en el método de un observador lineal. El trabajo de Tjonnas et al. (2010), presenta un algoritmo de estabilidad yaw, combinando AFS con un nivel bajo de control del ángulo de deslizamiento longitudinal de la rueda y una ley adaptativa que estima el valor máximo del parámetro del coeficiente de fricción de cada rueda. Bianchi (2010), combina el AFS y RTV en un controlador integrado garantizando la estabilidad del vehículo, haciendo uso de una retroalimentación adaptativa.

Hamzah (2012), presenta un algoritmo de control robusto mediante modos deslizantes, diseñado para mostrar que la conducción y estabilidad del vehículo puede ser mejorada mediante un control activo para la maniobra de las cuatro ruedas del automóvil. Un control de modelo predictivo (Gang 2011), es utilizado para obtener un controlador integrado para el vehículo en AFS y momento de viraje. Con la misma técnica, Di Cairano (2013), utiliza la diferencia de frenado y AFS, para el seguimiento de referencias diseñadas. Finalmente, Rubin (2013), direcciona el problema de control de viraje ó yaw del vehículo, usando un diferencial activo trasero, para minimizar el error de la velocidad angular de viraje y del error para el ángulo de deslizamiento del chasis del automóvil. En algunos de estos trabajos la influencia de las dinámicas de velocidades lateral y longitudinal es considerada para la estimación y control de las variables del vehículo. En lo que concierne al presente trabajo se tiene la siguiente organización. En la parte uno se muestra el modelo matemático del automóvil a utilizar con sus dinámicas de velocidad lateral, velocidad longitudinal y velocidad angular de viraje. En la sección dos se analizan las perturbaciones del viento sobre el automóvil mientras que en la parte tres se diseña el observador. En la sección de resultados se pueden ver las simulaciones en Matlab-Simulink-CarSim del observador no lineal de tres grados de libertad. Concluye el trabajo con anexos requeridos, agradecimientos, conclusiones correspondientes y referencias.

### Modelo Matemático del Vehículo

El modelo matemático del vehículo puede ser en general un cuerpo rígido moviéndose en un espacio libre, de tres grados de libertad, conectado con la superficie terrestre a través de las llantas, el cual otorga un modelo de comportamiento no lineal.

Los actuadores para esta aplicación son los siguientes: (1) conducción frontal activo (AFS, Active Front Steer), o conducción por cable (SbW, Steer by Wire) y (2) frenos activos.

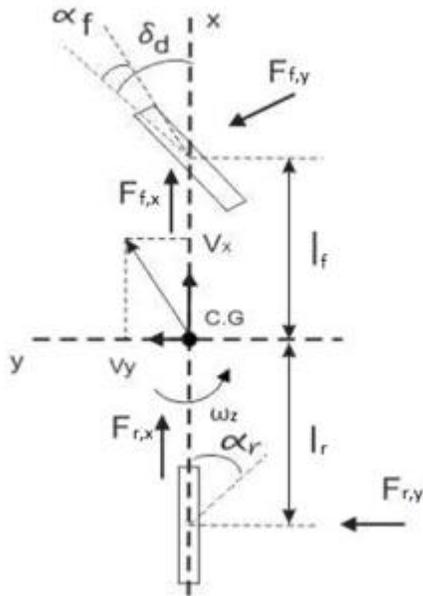
Esta complejidad de los sistemas no lineales puede ser disminuida considerando que para estudiar la estabilidad y/o la maniobrabilidad se revisarán solo las dinámicas de la velocidad lateral,  $v_y$  y la velocidad angular de viraje (yaw)  $[\omega]_z$ .

Por lo tanto, tomando en cuenta la Figura 1, y las dinámicas no lineales del vehículo que se generan en el llamado modelo de la bicicleta (Rajamani et al. (2006), Pacejka (2005)):

$$m(\dot{v}_x - v_y \omega_z) = m a_x + F_{dx} \quad (1)$$

$$m(\dot{v}_y + v_x \omega_z) = \mu [F_{f,y}(\delta_c + \delta_d, x, \alpha_f) + F_{r,y}(x, \alpha_r)] + F_{dy} \quad (2)$$

$$J \dot{\omega}_z = \mu [l_f F_{f,y}(\delta_c + \delta_d, x, \alpha_f) - l_r F_{r,y}(x, \alpha_r)] + \mu M_z + M_{dz} \quad (3)$$



**Figura 1** Modelo no lineal del vehículo (modelo de la bicicleta).

Donde:

- $m$  Masa del vehículo [kg].
- $J$  Momento de inercia del vehículo [ $\text{kg m}^2$ ].
- $l_f, l_r$  Longitud desde el centro del vehículo hacia la llanta frontal y trasera [m].
- $v_x$  Velocidad longitudinal del vehículo [m/s].
- $v_y$  Velocidad lateral del vehículo [m/s].
- $\omega_z$  Velocidad angular de viraje [rad/s].
- $x = [v_y, \omega_z]$  Vector compacto del estado del vehículo.
- $\alpha_{f,o}$  Ángulo de deslizamiento de la llanta frontal [rad].

- $\alpha_f$  Ángulo de deslizamiento de la llanta frontal con control activo [rad].
- $\alpha_r$  Ángulo de deslizamiento de la llanta trasera [rad].
- $\delta_c$  Componente del ángulo de la llanta impuesto por el controlador [rad].
- $\delta_d$  Componente del ángulo de la llanta impuesto por el conductor [rad].
- $M_z$  Momento de viraje resultado de los frenos activos [N·m].
- $\mu$  Coeficiente de fricción entre el suelo y el neumático.
- $F_{f,y}, F_{r,y}$  Fuerza lateral frontal y trasera de las llantas [N].
- $F_{f,x}, F_{r,x}$  Fuerza longitudinal frontal y trasera de las llantas [N].
- $F_{d,x}, F_{d,y}$  Fuerza aerodinámica longitudinal y lateral [N].
- $M_{dz}$  Momento aerodinámico de viraje [N·m]

Y donde la fuerza lateral  $F_{(f,y)}, F_{(r,y)}$  son funciones del ángulo impuesto a la llanta frontal,  $[\delta = \delta_d + \delta_c]$ , a los ángulos de deslizamiento lateral de las llantas definidos de la siguiente manera:

$$\alpha_f = \delta_c + \alpha_{f,o} = \delta_c + \delta_d - \frac{v_y + l_f \omega_z}{v_x} \tag{4}$$

$$\alpha_r = - \frac{v_y - l_r \omega_z}{v_x} \tag{5}$$

La fuerza lateral puede ser definida utilizando la conocida fórmula Mágica de Pacejka:

$$F_{j,y} = D_{j,y} \sin(C_{j,y} \arctan B_{j,y} \alpha_j). \quad (6)$$

Con  $j = f, r$ . Las constantes  $B_{j,y}$ ,  $C_{j,y}$ ,  $D_{j,y}$  en (2) y (3) son determinadas experimentalmente.

### Perturbaciones del viento externas

Las perturbaciones externas del aire son usualmente realizadas por el viento, las cuales pueden determinar situaciones peligrosas (Bosh (1996), Rajamani (2006)). En este artículo se proponen disturbios externos, los cuales pueden ser separados en tres dinámicas diferentes,  $F_{dx}$ ,  $F_{dy}$ ,  $M_{dz}$  afectando el eje longitudinal, lateral y angular de viraje del automóvil. Las perturbaciones externas afectan la estabilidad del vehículo, mientras este se mueve con respecto a una fuerza longitudinal ( $F_x$ ), existiendo la fuerza de perturbación del viento  $F_{dx}$  en sentido contrario y con respecto a la fuerza lateral ( $F_y$ ), también se aplica inversamente una fuerza  $F_{dy}$ . Dependiendo del punto de aplicación de la perturbación del viento, el disturbio del aire también crea un momento de viraje  $M_{dz}$ . Entonces con esta introducción de las perturbaciones del viento el modelo matemático en ecuaciones (1), (2), y (3), puede ser expresado de la siguiente manera:

$$\dot{v}_x = v_y \omega_z + \frac{\mu}{m} (F_{f,x}(x, \delta, \alpha_f) + F_{r,x}(x, \alpha_r)) + \frac{F_{dx}}{m} \quad (7)$$

$$\dot{v}_y = -v_x \omega_z + \frac{\mu}{m} (F_{f,y}(x, \delta, \alpha_f) + F_{r,y}(x, \alpha_r)) + \frac{F_{dy}}{m} \quad (8)$$

$$\dot{\omega}_z = \left(\frac{\mu}{I}\right) (l_f F_{f,y}(x, \delta, \alpha_f) - l_r F_{r,y}(x, \alpha_r)) + \left(\frac{\mu}{J}\right) M_z + \frac{M_{dz}}{J} \quad (9)$$

### Diseño del Observador

Se supone ahora que  $\mathbf{a}_x$ ,  $\mathbf{a}_y$ ,  $\boldsymbol{\omega}_z$ ,  $\mathbf{v}_x$ , son medidas. Esta es una hipótesis aceptable en vehículos modernos, usualmente equipados con los sensores necesarios. La propuesta del observador no lineal se realiza como una copia de la planta en ecuación (1) y (2):

$$\dot{\hat{v}}_x = \hat{v}_y \omega_z + \mathbf{a}_x + k_{o1} (v_x - \hat{v}_x) + \frac{F_{dx}}{m} \quad (10)$$

$$\dot{\hat{v}}_y = -\hat{v}_x \omega_z + \mathbf{a}_y + (k_{o2} - \omega_z) (v_y - \hat{v}_y) + \frac{F_{dy}}{m} \quad (11)$$

En donde,  $k_{o1}$  y  $k_{o2}$  son las ganancias del observador, que son determinadas utilizando la ecuación (7), (8) y (10), (11), mediante la estimación de los errores;

$$e_{vx} = v_x - \hat{v}_x \quad (12)$$

$$e_{vy} = v_y - \hat{v}_y \quad (13)$$

Siendo fácilmente calculados como:

$$\dot{e}_{vx} = -k_{o1} e_{vx} + \omega_z e_{vy} \quad (14)$$

$$\dot{e}_{vy} = -k_{o2} e_{vx} \quad (15)$$

Para las ecuaciones (14) y (15), es lineal y variante en el tiempo el término  $\omega_z$ . A continuación se mostrará cómo determinar las ganancias,  $k_{o1}$  y  $k_{o2}$ , en (10) y (11).

Se debe además asegurar la convergencia exponencial de la estimación de error asumiendo que la velocidad angular de viraje  $\omega_z \neq 0$ , considerando  $|\omega_z| \leq \omega_{z,max}$  y un cierto valor máximo  $[(\omega)]_{z,max}$ , para todo tiempo en un instante  $t \geq 0$ . Estas consideraciones físicas, son razonables, porque el vehículo es un sistema de energía finita, donde la máxima velocidad angular de viraje es acotada. Por lo tanto el diseño de este observador se considera, para  $|\omega_z| > 0$ . Además durante la maniobra de volanteo del automóvil,  $\omega_z$  puede pasar a través del cero, pero no puede ser cero, en un intervalo finito de tiempo, siempre y cuando las fuerzas laterales no sean cero, mencionando con esto que el vehículo está estacionario. El diseño de las ganancias  $k_{o1}$ ,  $k_{o2}$  en (10) y (11), se obtiene utilizando la siguiente función candidata de Lyapunov;

$$V(t, e) = \frac{1}{2} (\gamma_1 e_{vx}^2 + e_{vy}^2) - \kappa_1 \text{sign}(\omega_z) e_{vx} e_{vy} \tag{16}$$

Con  $\gamma_1 > \kappa_1^2 > 0$ ,  $\kappa_1 \neq 0$ , y  $\text{sign}(\cdot)$  la función signum:

$$\text{sign}(\omega_z) = \begin{cases} 1 & \text{si } \omega_z > 0 \\ 0 & \text{si } \omega_z = 0 \\ -1 & \text{si } \omega_z < 0 \end{cases}$$

Derivando la función candidata de Lyapunov en (16), usando los errores dinámicos de (14) y (15), se obtiene;

$$\begin{aligned} \dot{V}(t, e) = & \gamma_1 e_{vx} (-k_{o1} e_{vx} + \omega_z e_{vy}) + e_{vy} (-k_{o2} e_{vx} - \kappa_1 \text{sign}(\omega_z) e_{vx} (-k_{o2} e_{vx}) - \kappa_1 \text{sign}(\omega_z) e_{vy} (-k_{o1} e_{vx} + \omega_z e_{vy}) - 2\kappa_1 \delta_D(\omega_z) \dot{\omega}_z e_{vx} e_{vy}. \end{aligned} \tag{17}$$

Donde la derivada,  $\frac{d}{dt} \text{sign}(\omega_z) = 2\delta_D(\omega_z) \dot{\omega}_z$  siendo  $\delta_D(\omega_z)$  la distribución de Dirac que para  $|\omega_z| > 0$  se tiene  $\delta_D(\omega_z) = 0$ .

Se obtiene así:

$$\dot{V}(t, e) = (-k_{o1} \gamma_1 + \kappa_1 k_{o2} \text{sign}(\omega_z)) e_{vx}^2 - \kappa_1 |\omega_z| e_{vy}^2 + (\gamma_1 \omega_z - k_{o2} + \kappa_1 k_{o1} \text{sign}(\omega_z)) e_{vx} e_{vy}. \tag{18}$$

La ecuación (18) se resuelve por el método de Cramer para determinar las ganancias del observador;

$$k_{o1} = \frac{\kappa_1 \omega_{z,max} + \kappa_1 \gamma_1 |\omega_z|}{\gamma_1 - \kappa_1^2} \tag{19}$$

$$k_{o2} = \frac{\kappa_1^2 \text{sign}(\omega_z) \omega_{z,max} + \gamma_1^2 \omega_z}{\gamma_1 - \kappa_1^2} \tag{20}$$

Estableciendo las ganancias de las ecuaciones (19) y (20), en la derivada de la función candidata de Lyapunov (18);

$$\dot{V}(t, e) = -\kappa_1 \omega_{z,max} e_{vx}^2 - \kappa_1 |\omega_z| e_{vy}^2 \tag{21}$$

Donde se proponen los siguientes valores para ecuación (21);

$$\kappa_1 = \frac{1}{\omega_{z,max}} \lambda_s \tag{22}$$

$$\lambda_s > 0 \tag{23}$$

Acotando en (21), con las condiciones de (22) y (23), la derivada de la función de Lyapunov será estable:

$$\dot{V}(t, e) \leq -\lambda_s (e_{v_x}^2 + e_{v_y}^2) < 0 \tag{24}$$

Por lo tanto, el sistema de errores en (14) y (15) tiene el origen exponencialmente estable y la estimación de errores (12) y (13) tiende exponencialmente a cero con una constante de tiempo,  $\tau = 1/\lambda_s$  propuesta por el diseñador. Además para el observador (10) y (11) con las ganancias en (19) y (20), asegura globalmente la conversión exponencial a cero la estimación de los errores.

**Resultados**

**Maniobra doble volanteo**

La Figura (2a) muestra la señal delta  $\delta_d$  del conductor para una maniobra ISO 3888-1 con coeficiente de fricción neumático-suelo  $\mu = 0.9$  (superficie seca) y  $\mu = 0.5$  (superficie mojada), a los 3.5 segundos (ver Figura 2). Además las Figuras 3 y 4 muestran los resultados obtenidos con  $k_{o1}, k_{o2}$  en (10) y (11) considerando  $\gamma_1 = 100, \lambda_s = 10$  en (19) y (20). Las perturbaciones de viento se muestran en la Figura 5.

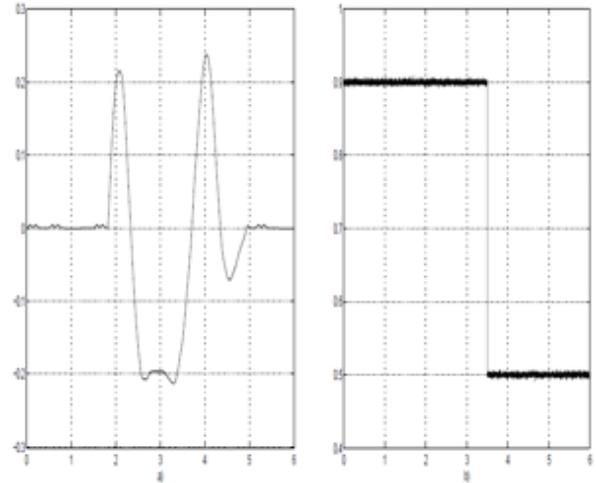


Figura 2 a) Señal  $\delta_d$  delta del conductor [rad/s]; b) Coeficiente de fricción  $\mu$ .

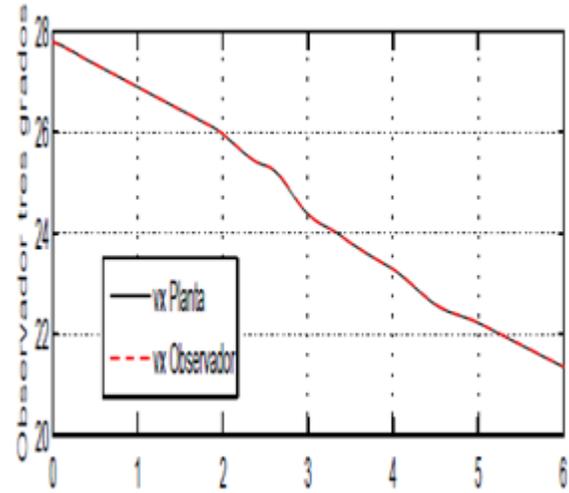
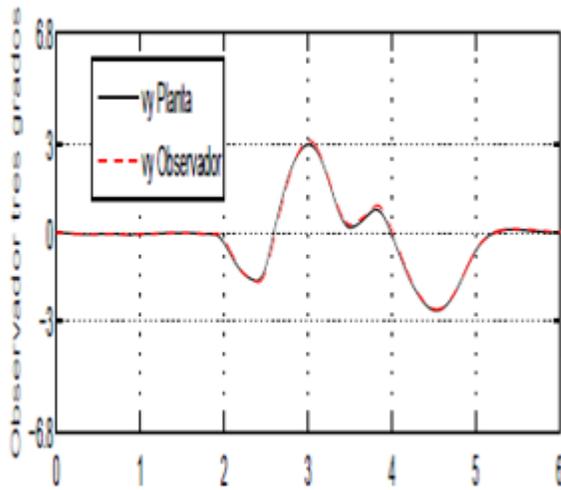
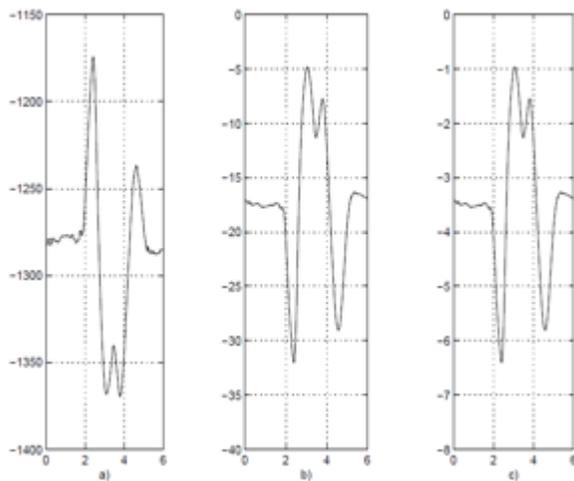


Figura 3 Velocidad longitudinal  $v_x$  (sólida) y  $\hat{v}_x$  (interlínea) [m/s vs s].



**Figura 4** Velocidad lateral  $v_y$  (sólida) y  $\hat{v}_y$  (interlínea) [m/s vs s].



**Figura 5** a) Fuerza de perturbación  $F_{dx}$  [N vs s]; b) Fuerza de perturbación  $F_{dy}$  [N vs s]; c) Momento de perturbación  $M_{dz}$  [N·m vs s].

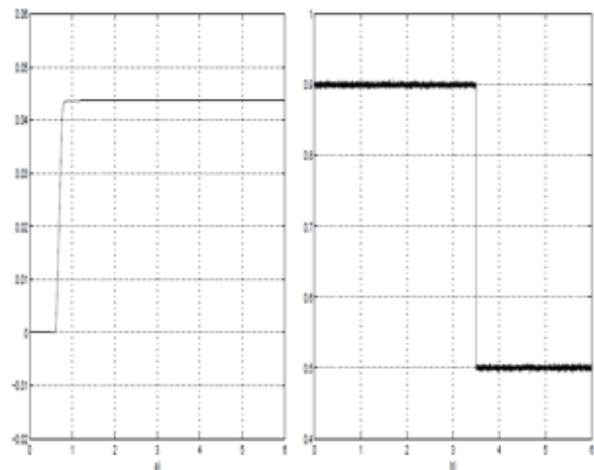
**Maniobra en una dirección.**

Por lo tanto considerando los valores de las ganancias anteriores, también se simula el observador con una maniobra ISO-7401/2011 con un coeficiente de fricción neumático-suelo  $\mu = 0.9$  (superficie seca) y  $\mu = 0.5$  (superficie mojada) a los 3.5 segundos (ver Figura 6).

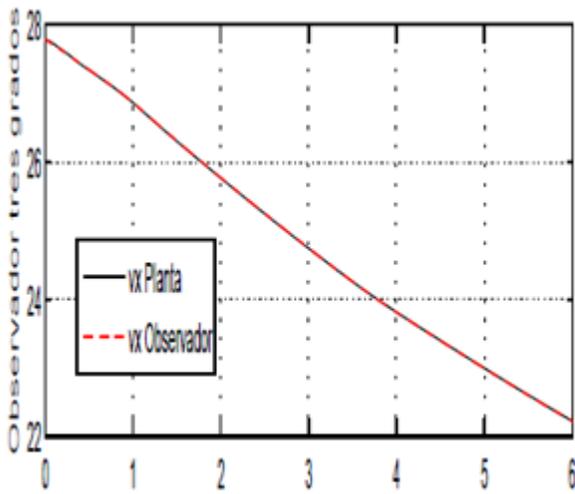
Obteniéndose así las Figuras 7 y 8 donde se puede ver el seguimiento correcto del observador, mostrándose un desempeño adecuado con respecto a las variaciones del sistema de la planta, en particular al coeficiente de fricción neumático-suelo, donde no se tiene una relevancia dependiente crucial de este parámetro.

Analizando la velocidad longitudinal del observador  $\hat{v}_x$ , con respecto a la velocidad longitudinal controlada del automóvil  $v_x$  en la Figura 7, se puede visualizar un error  $e_{vx}$  de aproximadamente cero, muy similar al error  $e_{vy}$  de la velocidad lateral del observador  $\hat{v}_y$  contra la velocidad lateral  $v_y$ , en la Figura 8.

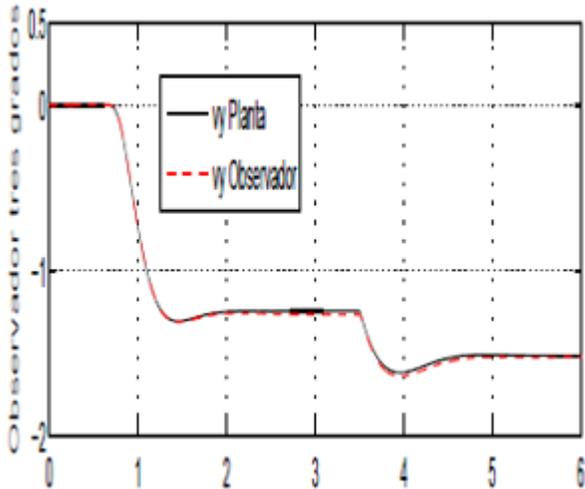
Se determina así que el observador no lineal de tres grados de libertad propuesto funciona correctamente aún con las perturbaciones de viento  $F_{dx}, F_{dy}, M_{dz}$ , vistas en la Figura 9.



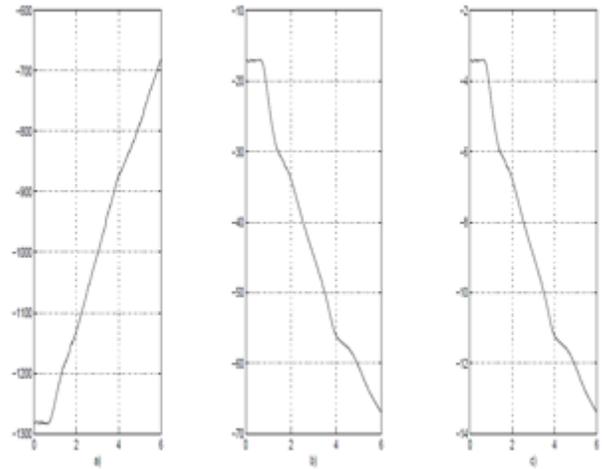
**Figura 6** a) Señal  $\delta_d$  delta del conductor [rad/s]; b) Coeficiente de fricción  $\mu$ .



**Figura 7** Velocidad longitudinal  $v_x$  (sólida) y  $\hat{v}_x$  (interlínea) [m/s vs s].



**Figura 8** Velocidad lateral  $v_y$  (sólida) y  $\hat{v}_y$  (interlínea) [m/s vs s].



**Figura 9** a) Fuerza de perturbación  $F_{dx}$  [N vs s]; b) Fuerza de perturbación  $F_{dy}$  [N vs s]; c) Momento de perturbación  $M_{dz}$  [N·m vs s].

**Agradecimiento**

Se agradece al Dr. C. Acosta Lúa del Centro Universitario de la Ciénega Modulo Ocotlán, Jalisco, México, por todos los conceptos obtenidos en la utilización del Software CarSim.

**Conclusiones**

Este trabajo se realiza con la finalidad de proponer un observador para el automóvil con velocidad lateral, partiendo del modelo matemático de la bicicleta, estableciendo las consideraciones antes mencionadas. El objetivo del observador será buscar la estimación de la velocidad longitudinal y velocidad lateral del vehículo. El algoritmo se diseña para establecer ganancias, las cuales, también se pueden cambiar para ampliar o disminuir la estimación de las dinámicas del observador, además está se puede proponer para algún controlador en el cual se necesita la dinámica de la velocidad lateral y no se puede medir, teniendo la robustez de trabajar correctamente a partir de un coeficiente de fricción variable como se puede ver en los resultados de este artículo de investigación.

Por lo tanto analizando las simulaciones de diferentes señales de entrada del conductor (ISO 3888-1, ISO 7401/2011), se puede mencionar que la estimación de la velocidad lateral y longitudinal utilizando el observador propuesto no lineal de tres grados de libertad trabaja en condiciones aceptables.

## Referencias

- C. Acosta Lúa, B. Castillo Toledo, S. Di Gennaro, A. Toro., (2007). Nonlinear Robust Regulation of Ground Vehicle Motion, Proceedings of the [46] ^th IEEE Conference on Decision and Control, pp. 3871-3876.
- C. Acosta Lúa, B. Castillo Toledo, S. Di Gennaro., (2008). Nonlinear Output Robust Regulation of Ground Vehicle in Presence of Disturbances and Parameter Uncertainties, Proceedings of the [17] ^th IFAC World Congress, pp. 141-146.
- G. Baffet, A. Charara, G. Dherbomez., (2007). An Observer of Tire-Road Forces and Friction for Active Security Vehicle Systems, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 12, No. 6, pp. 651-661.
- M. C. Best, T. J. Gordon, P. J. Dixon., (2000). An Extended Adaptive Kalman Filter for Real-Time State Estimation of Vehicle Handling Dynamics, Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, Vol. 34, No.1, pp. 57-75.
- D. Bianchi, A. Borri, G. Burgio, S. Di Gennaro., (2010). Adaptive Integrated Vehicle Control Using Active Front Steering and Rear Torque Vectoring, International Journal of Vehicle Autonomous Systems, Special Issue on: "Autonomous and Semi-Autonomous Control for Safe Driving of Ground Vehicles, Vol. 8, No. 2/3/4, pp. 85-105.
- R. Bosch., (1996). Automotive Handbook Robert Bosh GmbH, Stuttgart, Germany, 4<sup>th</sup> edition, 1996.
- S. Di Cairano, H.E. Tseng, D. Bernardini, A. Bemporad., (2013). Vehicle Yaw Stability Control by Coordinated Active Front Steering and Differential Braking in the Tire Sideslip Angles Domain, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 21, No. 4, pp. 1236-1248.
- C. Earl Beal, J. Christian Gerdes., (2013). Model Predictive Control for Vehicle Stabilization at the Limits of Handling, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 21, No. 4, pp. 1258-1269.
- Li Gang, Zong Chang-fu, Zheng Hong-yu, Hong Wei., (2011). Vehicle Active Front Steering and Yaw Moment Integrated Control, 2011 International Conference on Transportation, Mechanical and Electrical Engineering (TMEE), Changchun, China, pp. 787-790.
- A. Goodarzi, E. Esmailzadeh., (2007). Design of a VDC System for All-Wheel Independent Drive Vehicles, IEEE/ ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 12, No. 6, pp. 632-639.
- H. Guo, H. Chen, D.Cao, W. Jin., (2013). Design of a reduced- order non- linear observer for Vehicle Velocities Estimation, IET Control Theory and Applications, Vol. 7, Iss. 17, pp. 2056-2068.
- N. Hamzah, Y.M. Sam, H. Selamat, M.K. Aripin, M.F. Ismail., (2012). Yaw Stability Improvement for Four- Wheel Active Steering Vehicle using Sliding Mode Control, 2012 IEEE 8th International Colloquium on Signal Processing and its Applications (CSPA), pp. 127-132.

- M. Hiemer, A. VonVietinghoff, U. Kiencke, T. Matsunaga., (2005). Determination of Vehicle Body Slip Angle with Non-Linear Observer Strategies, Proceedings of the SAE World Congress, Paper No. 2005-01-0400.
- U. Kiencke, A. Daiss., (1997). Observation of Lateral Vehicle Dynamics, Control Engineering Practice, Vol. 5, No. 8, pp. 1145-1150.
- U. Kiencke, L. Nielsen., (2000). Automotive Control Systems, Springer, Berlin.
- T. L. Lam, H. Qian, Y. Xu., (2010). Omnidirectional Steering Interface and Control for a Four-Wheel Independent Steering Vehicle, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 15, No. 3, pp. 329-338.
- N. Mudaliar, D. Leblanc, H. Peng., (2004). Linear Estimator for Road Departure Warning Systems, Proceeding of the 2004 American Control Conference Boston, pp. 2104-2109.
- Jiwon J. Oh, Seibum B. Choi., (2012). Vehicle Velocity Observer Design Using 6-D IMU and Multiple-Observer Approach, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 13, No. 4, pp. 1865-1879.
- H. Ohara, T. Murakami., (2008). A Stability Control by Active Angle Control of Front-Wheel in a Vehicle System, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, No. 3, pp. 1277-1285
- H. B. Pacejka., (2005). Tyre and Vehicle Dynamics, Elsevier Butterworth.
- H. Pan, Y. Zhang, W. Sun., (2014). Robust Tracking Control for Vehicle Lateral Dynamics with Uncertain Parameters and External Nonlinearities, Shock and Vibration, Vol. 2014, pp. 12.
- R. Rajamani., (2006). Vehicle Dynamics and Control, Springer, New York.
- L. R. Ray., (1995). Nonlinear State and Tire Force Estimation for Advanced Vehicle Control, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 3, No. 1, pp. 117-124.
- H. Ren, S. Chen, G. Liu, K. Zheng., (2014). Vehicle State Information Estimation with the Unscented Kalman Filter, Advances in Mechanical Engineering, Vol. 2014, pp.11-20.
- D. Rubin, S. Arogeti., (2013). Vehicle Yaw Stability Control Using Rear Active Differential via Sliding Mode Control Methods, 2013 [21] ^st Mediterranean Conference on Control & Automation (MED), pp. 317-322.
- J. Stephant, A. Charara, D. Meizel., (2007). Evaluation of Sliding Mode Observer for Vehicle Sideslip Angle, Control Engineering Practice, Vol. 15, pp. 803-812.
- A. Suissa, Z. Zomotor, F. Bttiger., (1996). Method for Determining Variables Characterizing Vehicle Handling, Patent US 5557520.
- J. Tjonnas, T. A. Johansen., (2010). Stabilization of Automotive Vehicles Using Active Steering and Adaptive Brake Control Allocation, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 18, No. 3, pp. 545-558.
- A. Y. Ungoren, H. Peng, H. Tseng., (2004). A Study on Lateral Speed Estimation Methods, International Journal on Vehicle Autonomous Systems, Vol. 2, pp. 126-144.

Z.Yacine, D. Ichalal, N. Ait-Oufroukh, S. Mammam, S. Djennoune., (2015). Takagi-Sugeno Observers: Experimental Application for Vehicle Lateral Dynamics Estimation, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 23, No. 2, pp. 754-760.

M. Zakaria, A. Dwijotomo, M. Azman Abdullah, N. Tamaldin., (2014). Development Motor Control Unit for Electronic Steering System Test Rig, 2014 IEEE 10th International Colloquium on Signal Processing and its Applications (CSPA), pp. 42-47.

L. Zhao, Z. Liu., (2014). Vehicle State Estimation with Friction Adaptation for Four-Wheel Independent Drive Electric Vehicle, Proceeding of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation, pp. 4527-4531.