

Monitoreo de una suspensión semiactiva a través de un observador adaptable

P. E. Alvarado Méndez* C. M. Astorga Zaragoza*
G. L. Osorio Gordillo* G. V. Guerrero Ramírez*
R. Morales Menéndez** E. Quintero-Mármol Márquez*

* *CENIDET, Internado Palmira s/n, C.P. 62490 Cuernavaca, Mor., México (e-mail: {pedro.alvarado17ea, astorga, gloriaosorio, gerardog, eqm}@cenidet.edu.mx).*

** *ITESM Campus Monterrey, Av. Eugenio Garza Sada 2501 Sur, Tecnológico, C.P. 64849 Monterrey, N.L., México (e-mail:rmm@itesm.mx).*

Resumen. En este artículo, se presenta un método para supervisar el desempeño de una suspensión automotriz semiactiva. Dicho método está basado en el uso de un observador adaptable para sistemas Lipschitz que estima el coeficiente de rigidez de la llanta. El monitoreo de este parámetro es útil para determinar la presión del neumático, indicando así el exceso o falta de aire en el mismo. Se considera un modelo matemático simplificado de la suspensión semiactiva para sintetizar el observador adaptable. La efectividad del método propuesto se demuestra mediante simulaciones numéricas.

Keywords: Suspensión semiactiva, observador adaptable, sistemas no lineales Lipschitz.

1. INTRODUCCIÓN

Con el paso del tiempo los medios de transporte han facilitado las tareas de las personas, tanto para transportarse de un lugar a otro, como para transportar objetos a diferentes partes del mundo. Uno de los medios más usados son los automóviles, que ya son parte de la vida cotidiana de la mayoría de las personas. Un automóvil, es un medio de transporte que tiene la capacidad de realizar una trayectoria, la cual tiene como fin dar al usuario un funcionamiento seguro y duradero. Para esto, los fabricantes han aumentado la cantidad de sistemas de detección de fallas, diseñando sistemas más completos e integrados.

La situación que se presenta, es que las variables: confort y estabilidad, son inversamente proporcionales, teniendo elementos pasivos para frecuencias altas, favoreciendo el confort pero comprometiendo la estabilidad. Es por esto que el vehículo ha ido evolucionando, desde su diseño mecánico hasta sus suspensiones. Una suspensión consta de una serie de elementos, que tienen como fin, unir las masas suspendidas y no suspendidas de un vehículo.

Los beneficios destacables de una suspensión, son la maniobrabilidad y el confort; ya que el desplazamiento vertical de la rueda es regulado, asegurando así el contacto entre el neumático y el terreno; y a su vez el aislamiento del chasis (la masa suspendida y no suspendida) de las irregularidades del terreno, disminuyendo la fuerza transmitida al conductor (Savaresi et al., 2010). De esta forma,

la suspensión pasiva requiere un compromiso para poder cumplir con las dos características, pues para mantener una buena maniobrabilidad en la dirección se requiere una rigidez intermedia, que además evita la reducción de la carrera de trabajo, al incrementar la carga del vehículo, mientras que el confort le proporciona una suspensión suave. En respuesta a este compromiso, muchas veces complicado de resolver, surgen los sistemas de suspensión activa y semiactiva, que tienen propiedades para realizar ambas tareas. Las suspensiones activas y semiactivas, aumentan la seguridad del automóvil, al mejorar la estabilidad en cualquier circunstancia, y a su vez permiten aumentar el confort de los pasajeros, al disminuir el movimiento del vehículo, y aumentar la absorción de los esfuerzos transmitidos por los neumáticos (Sharp and Hassan, 1986).

A menudo ocurre que algunos valores de parámetros de los procesos no están físicamente disponibles para la medición o varían en el tiempo. Es donde surge el uso de los observadores, generalmente conocidos como sensores de software, estos son un sensores virtuales capaces de estimar los estados y variables de interés de un proceso, a partir de mediciones de las entradas y salidas. Los observadores se utilizan para estimar parámetros desconocidos o variables de estado no medibles.

Trabajos recientes en el diseño de observadores adaptables permiten obtener la estimación de parámetros de un proceso. Un observador adaptable es un algoritmo recursivo para la estimación conjunta de parámetros de estado de sistemas de espacio de estado parametrizados. Frecuentemente, el diseño de observadores adaptables se

basa en cambios variables que transforman el sistema original en alguna forma canónica en la que la presencia de los parámetros desconocidos se simplifica (Bastin and Gevers, 1988). Los observadores adaptables para sistemas no lineales Lipschitz se han aplicado con éxito a una amplia variedad de sistemas dinámicos, por ejemplo, para la estimación de: coeficiente de transferencia de calor global de un intercambiador de calor (Astorga-Zaragoza et al., 2007), biorreactores (Perrier et al., 2000), la reacción cinética en reactores de polimerización (Astorga et al., 2002), la presión parcial de hidrógeno en el canal del ánodo de las celdas de combustible (Arcak et al., 2004). Los trabajos anteriores sobre observadores adaptativos globalmente convergentes consideran parámetros desconocidos en las ecuaciones de estado o en las ecuaciones de salida, pero no en ambas. Esta forma enfatiza las propiedades que permiten una estimación del estado asintótico a pesar de los parámetros desconocidos, así como propiedades adicionales que permiten la estimación de parámetros. A modo de ejemplo, en (Li et al., 2011) se muestra cómo se puede diseñar un observador adaptable para una clase de sistemas afines al estado.

En este artículo se presenta una aplicación de observadores adaptables para la estimación del parámetro de rigidez de la llanta. Una variación en este parámetro puede ser indicio de una posible falla. Al poder detectarla se pueden prevenir daños totales en el sistema de la suspensión.

Tabla 1. Definición de Variables.

| Variable | Descripción | Unidades |
|-----------------------------|--|----------|
| ρ_1 | Histéresis del amortiguador | |
| a_i | Zona pre-esfuerzo de F_{MR} | $(Ns)/m$ |
| b_i | Zona post-esfuerzo de F_{MR} | $(Ns)/m$ |
| f_c | Fuerza del amortiguador MR | N/A |
| F_{MR} | Fuerza del amortiguador MR | N |
| F_δ | Falla aditiva en la fuerza MR | N |
| I | Corriente eléctrica | mA |
| k_s | Coefficiente de rigidez del resorte | N/m |
| k_t | Coefficiente de rigidez se la llanta | N/m |
| m_s, m_{us} | Masa suspendida y no suspendida | kg |
| z_{def} | Posición del pistón | m |
| \dot{z}_{def} | Velocidad del pistón | m/s |
| z_r | Perfil del suelo | m |
| z_s, z_{us} | Desplazamiento vertical de m_s, m_{us} | m |
| \dot{z}_s, \dot{z}_{us} | Velocidad vertical de m_s, m_{us} | m/s |
| $\ddot{z}_s, \ddot{z}_{us}$ | Aceleración vertical de m_s, m_{us} | m^2/s |

La estructura de este artículo es la siguiente: a continuación se presenta el planteamiento del problema, donde en la subsección 2.1 se describe el sistema adaptable, en la subsección 2.2 se presenta el observador adaptable diseñado y en la subsección 2.3 se presenta el análisis de estabilidad. La sección 3 muestra los resultados en simulación, la sección 4 observamos las conclusiones obtenidas. Todas las variables utilizadas en el artículo se definen en la Tabla 1, y los parámetros se definen en la Tabla 2.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En esta sección se presenta el modelo clásico de una suspensión semiactiva de un cuarto de automóvil, el cual corresponde a la parte frontal derecha de un automóvil, como se muestra en la Figura 1.

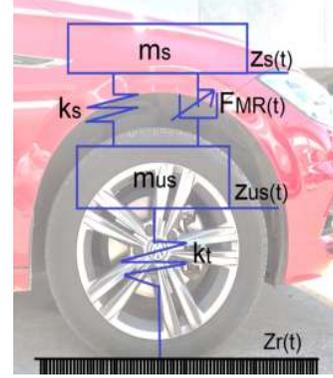


Figura 1. Diagrama de una suspensión semiactiva

Este sistema el amortiguamiento está formado por un amortiguador Magnetoreológico (MR), el modelo matemático que lo describe es (Guo et al., 2006):

$$m_s \ddot{z}_s(t) = -k_s(z_s(t) - z_{us}(t)) - F_{MR}(t) \quad (1)$$

$$m_{us} \ddot{z}_{us}(t) = k_s(z_s(t) - z_{us}(t)) - k_t(z_{us}(t) - z_r(t)) + F_{MR}(t) \quad (2)$$

las salidas están dadas por:

$$y_1(t) = \dot{z}_s(t) \quad (3)$$

$$y_2(t) = \dot{z}_{us}(t) \quad (4)$$

$$y_3(t) = z_s(t) - z_{us}(t) = z_{def}(t) \quad (5)$$

La descripción del comportamiento dinámico de la fuerza de amortiguamiento semiactiva (F_{MR}) de un amortiguador magnetoreológico, con la inclusión de una señal de manipulación (corriente eléctrica) se representa de la siguiente forma:

$$F_{MR}(t) = I f_c \rho_1(t) + b_1 \dot{z}_{def}(t) + b_2 z_{def}(t) + F_\delta(t), \quad (6)$$

donde $F_\delta(t)$ representa una falla aditiva en la fuerza de amortiguamiento y $\rho_1(t)$ es la parte no-lineal que representa la histéresis de la fuerza proporcionada por el amortiguador magnetoreológico (Martínez et al., 2016). Dicha no linealidad se describe de la siguiente forma:

$$\rho_1(t) = \tanh(a_1 \dot{z}_{def}(t) + a_2 z_{def}(t)). \quad (7)$$

Sustituyendo la ecuación (6) en el sistema conformado por las ecuaciones (1) y (2) y considerando $z_{def} = z_s - z_{us}$ se obtiene las siguientes expresiones:

$$m_s \ddot{z}_s(t) = -k_s(z_s(t) - z_{us}(t)) - I f_c \rho_1(t) - b_1 \dot{z}_{def}(t) - b_2 z_{def}(t) - F_\delta(t) \quad (8)$$

$$m_{us} \ddot{z}_{us}(t) = k_s(z_s(t) - z_{us}(t)) - k_t(z_{us}(t) - z_r(t)) + I f_c \rho_1(t) + b_1 \dot{z}_{def}(t) + b_2 z_{def}(t) + F_\delta(t) \quad (9)$$

La problemática es diseñar un observador adaptable Lipschitz para el sistema de suspensión de las ecuaciones (1)

y (2), capaz de estimar el coeficiente de rigidez de la llanta $k_t(t)$ en la masa no suspendida para poder detectar cuando la llanta se encuentre en un nivel fuera de lo deseado.

2.1 Diseño sistema no lineal en forma adaptable

Considerando el siguiente cambio de variable:

$$\begin{aligned} x_1(t) &= \dot{z}_s(t) = \dot{x}_2(t) & x_3 &= \dot{z}_{us}(t) = \dot{x}_4(t) \\ \dot{x}_1(t) &= \ddot{z}_s(t) & \dot{x}_3(t) &= \ddot{z}_{us}(t) \\ x_2(t) &= z_s(t) & x_4(t) &= z_{us}(t) \end{aligned}$$

el modelo de las ecuaciones (1) y (2) se puede reescribir de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) &= -\frac{b_1}{m_s}x_1(t) - \frac{b_2 + k_s}{m_s}x_2(t) + \frac{b_1}{m_s}x_3(t) + \\ &\quad \frac{b_2 + k_s}{m_s}x_4(t) - \frac{f_c\rho(t)}{m_s}I(t) - \frac{1}{m_s}F_\delta(t) \\ \dot{x}_3(t) &= x_4(t) \\ \dot{x}_4(t) &= \frac{b_1}{m_{us}}x_1(t) + \frac{b_2 + k_s}{m_{us}}x_2(t) - \frac{b_1}{m_{us}}x_3(t) - \\ &\quad \frac{b_2 + k_s + k_t}{m_{us}}x_4(t) + \frac{f_c\rho(t)}{m_{us}}I(t) + \frac{1}{m_{us}}F_\delta(t) + \\ &\quad \frac{k_t}{m_{us}}z_r(t) \end{aligned} \quad (10)$$

El cual se puede representar en Ekramian et al. (2013):

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + \Psi(y(t), u(t)) + \Phi(x(t), \theta(t), u(t)) \\ y(t) &= Cx(t) \\ \Phi(x(t), \theta(t), u(t)) &= \Phi_1(x(t), u(t)) + B\Phi_2(x(t), u(t))\theta(t) \end{aligned} \quad (11)$$

Considerando:

$$x(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \end{bmatrix}, \quad y(t) = \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ y_3(t) \end{bmatrix}, \quad u(t) = \begin{bmatrix} F_\delta(t) \\ I(t) \\ z_r(t) \end{bmatrix}$$

donde $y_1(t)$ es la velocidad del chasis, $y_2(t)$ es la velocidad de la llanta y $y_3(t)$ es la diferencia de posiciones.

Reescribiendo las ecuaciones (10), en la forma del sistema adaptable (11), se obtiene el siguiente sistema:

$$\begin{aligned} \underbrace{\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \\ \dot{x}_4(t) \end{bmatrix}}_{\dot{x}(t)} &= \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{b_1}{m_s} & -\frac{b_2 + k_s}{m_s} & \frac{b_1}{m_s} & \frac{b_2 + k_s}{m_s} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{b_1}{m_{us}} & \frac{b_2 + k_s}{m_{us}} & -\frac{b_1}{m_{us}} & -\frac{b_2 + k_s}{m_{us}} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}}_A \underbrace{\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \end{bmatrix}}_{x(t)} \\ &+ \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{f_c\rho_1}{m_s} \\ 0 \\ \frac{f_c\rho_1}{m_{us}} \\ 0 \end{bmatrix}}_{\Psi(y(t), u(t))} I(t) + \underbrace{\begin{bmatrix} 1 \\ -\frac{m_s}{0} \\ 1 \\ -\frac{m_{us}}{0} \end{bmatrix}}_{\Phi_1(x(t), u(t))} F_\delta(t) + \\ &\underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}}_B \underbrace{\begin{bmatrix} z_r(t) - x_4(t) \\ \frac{1}{m_{us}} \end{bmatrix}}_{\Phi_2(x(t), u(t))} \underbrace{\theta(t)}_{k_y(t)} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ y_3(t) \end{bmatrix}}_{y(t)} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}}_C \underbrace{\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \end{bmatrix}}_{x(t)} \quad (13)$$

Las funciones no lineales $\Phi_1(x, u)$ y $\Phi_2(x, u, t)$ satisfacen las condiciones Lipschitz con respecto a las variables de estado. En consecuencia para un valor acotado de $\theta(t)$, la función no lineal $\Phi(x, \theta, u, t)$ satisface la condición de Lipschitz:

$$\|\Phi(x, \theta, u, t) - \Phi(\hat{x}, \theta, u, t)\| \leq \alpha \|x(t) - \hat{x}(t)\| \quad (14)$$

siendo α la constante Lipschitz.

2.2 Diseño de un observador adaptable para sistemas no lineales Lipschitz

En base a (Ekramian et al., 2013) un observador de estado adaptable para el sistema (11) queda de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}(t) &= A\hat{x}(t) + \Psi(u, t) + \Phi(\hat{x}, \hat{\theta}, u, t) - L(y(t) - C\hat{x}(t)) \\ \dot{\hat{\theta}}(t) &= \Gamma\Phi_2^T(\hat{x}, u, t)K(y(t) - C\hat{x}(t)); \quad \Gamma > 0 \end{aligned} \quad (15)$$

El observador (15) se emplea para estimar simultáneamente las variables de estado y los parámetros desconocidos $\theta(t)$, siempre y cuando la función $\Phi(x, \theta, u, t)$ sea Lipschitz.

Para el diseño del observador del sistema (11), se verifica que la función $\Phi(x, \theta, u, t)$ sea Lipschitz, o bien, que las funciones $\Phi_1(x(t), u(t))$ y $\Phi_2(x(t), u(t))$ sean Lipschitz obteniendo la norma de sus Jacobianos, como se muestra a continuación:

$$\frac{\partial \Phi_1(x(t), u(t))}{\partial x} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\Phi_2(x(t), u(t)) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{m_{us}} \end{bmatrix}$$

$$\left\| \frac{\partial \Phi_1(x(t), u(t))}{\partial x} \right\|_1 = 0 \quad \left\| \frac{\partial \Phi_2(x(t), u(t))}{\partial x} \right\|_1 = \frac{1}{m_{us}}$$

Debido a que la norma del Jacobiano con respecto al vector de estados x de $\Phi_1(x, u)$ y $\Phi_2(x, u, t)$, son acotadas y si además se asume que $F_\delta(t)$ es una función suave (i.e. $F_\delta(t) \in C^\infty$), entonces el sistema (15) es Lipschitz.

Considerando que el parámetro a estimar es el coeficiente de rigidez del resorte $k_t(t)$, entonces el observador (15) para el sistema (11) es:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}_1(t) \\ \dot{\hat{x}}_2(t) \\ \dot{\hat{x}}_3(t) \\ \dot{\hat{x}}_4(t) \end{bmatrix}}_{\dot{\hat{x}}(t)} = \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{b_1}{m_s} & -\frac{b_2 + k_s}{m_s} & \frac{b_1}{m_s} & \frac{b_2 + k_s}{m_s} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{b_1}{m_{us}} & \frac{b_2 + k_s}{m_{us}} & -\frac{b_1}{m_{us}} & -\frac{b_2 + k_s}{m_{us}} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}}_A \underbrace{\begin{bmatrix} \hat{x}_1(t) \\ \hat{x}_2(t) \\ \hat{x}_3(t) \\ \hat{x}_4(t) \end{bmatrix}}_{\hat{x}(t)} + \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{f_c \rho_1(t)}{m_s} \\ 0 \\ \frac{f_c \rho_1(t)}{m_{us}} \\ 0 \end{bmatrix}}_{\Psi(y, u)} I(t) + \underbrace{\begin{bmatrix} 1 \\ \frac{m_s}{1} \\ \frac{m_{us}}{0} \end{bmatrix}}_{\Phi_1(\hat{x}(t), u(t))} F_\delta(t) + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}}_B \underbrace{\begin{bmatrix} z_r(t) - \hat{x}_4(t) \\ m_{us} \end{bmatrix}}_{\Phi_2(\hat{x}(t), \theta(t), u(t))} \hat{\theta}(t) - L(y(t) - C\hat{x}(t)) \quad (16)$$

$$\dot{\hat{\theta}}(t) = \Gamma \left[\frac{z_r(t) - \hat{x}_4(t)}{m_{us}} \right] K(y(t) - C\hat{x}(t)) \quad (17)$$

$\Gamma > 0$

Las matrices L y K son las ganancias del observador y deben seleccionarse para garantizar la convergencia de los estados y parámetros estimados a los reales.

El único requisito para elegir la ganancia Γ es que debe ser un escalar positivo. En este caso se elige $\Gamma = 150$, debido a que este valor permite un tiempo de convergencia

adecuado del observador. Mientras mayor sea el valor de Γ , menor es el tiempo de convergencia, pero a la vez se incrementa la sensibilidad del observador al ruido de medición.

2.3 Análisis de estabilidad

Las ecuaciones del error de estimación de $x(t)$ y $\theta(t)$ son dadas como:

$$e_x(t) = x(t) - \hat{x}(t) \quad (18)$$

$$e_\theta(t) = \theta(t) - \hat{\theta}(t) \quad (19)$$

donde la dinámica del error de estimación (18) y (19) son:

$$\dot{e}_x(t) = \dot{x}(t) - \dot{\hat{x}}(t) \quad (20)$$

$$\dot{e}_\theta(t) = \dot{\theta}(t) - \dot{\hat{\theta}}(t) \quad (21)$$

Sustituyendo $\dot{x}(t)$ y $\dot{\theta}(t)$ en (20) y (21) se obtiene:

$$\begin{aligned} \dot{e}_x(t) &= Ax(t) + \Psi(u, t) + \Phi_1(x, u) + B\Phi_2(x, u, t)\theta(t) \\ &\quad - [A\hat{x}(t) + \Psi(u, t) + \Phi_1(\hat{x}, u) + B\Phi_2(\hat{x}, u, t)\hat{\theta}(t) \\ &\quad - LC(x(t) - \hat{x}(t))] \\ &= Ax(t) + B\Phi_2(x, u, t)\theta(t) + (\Phi_1(x, u) - \Phi_1(\hat{x}, u)) \\ &\quad - A\hat{x}(t) - B\Phi_2(\hat{x}, u, t)\hat{\theta}(t) + LC(x(t) - \hat{x}(t)) \\ &= (A + LC)(x(t) - \hat{x}(t)) + (\Phi_1(x, u) - \Phi_1(\hat{x}, u)) \\ &\quad + B\Phi_2(x, u, t)(\theta(t) - \hat{\theta}(t)) \\ &= (A + LC)e_x(t) + (\Phi_1(x, u) - \Phi_1(\hat{x}, u)) \\ &\quad + B\Phi_2(x, u, t)e_\theta(t) \end{aligned} \quad (22)$$

considerando que $\theta(t)$ se mantiene constante en θ_0 , se tiene que $\dot{\theta}(t) = 0$, por lo tanto

$$\begin{aligned} \dot{e}_\theta(t) &= -\Gamma\Phi_2(x, u, t)KC(x(t) - \hat{x}(t)) \\ \dot{e}_\theta(t) &= -\Gamma\Phi_2(x, u, t)KCe_x(t) \end{aligned} \quad (23)$$

Se propone la siguiente función cuadrática de Lyapunov:

$$V(t) = e_x^T(t)Pe_x(t) + e_\theta^T(t)Qe_\theta(t) \quad (24)$$

con $P > 0$ y $Q > 0$

cuya derivada resulta como:

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &\leq e_x^T(t)P\dot{e}_x(t) + \dot{e}_x^T(t)Pe_x(t) + e_\theta^T(t)Q\dot{e}_\theta(t) \\ &\quad + \dot{e}_\theta^T(t)Qe_\theta(t) \\ \dot{V}(t) &\leq 2e_x^T(t)P(A + LC)e_x(t) + 2e_x^T(t)Pe_{\Phi_1}(x, u, t) \\ &\quad + 2e_x^T(t)PB\Phi_2(x, u, t)e_\theta(t) + 2e_\theta^T(t)Q\dot{e}_\theta(t) \end{aligned} \quad (25)$$

se considera que $B^T P C^T = 0$, esto implica que existe una matriz K , tal que $B^T P = KC$ y que $\dot{e}_\theta = -\hat{\theta}$, se obtiene:

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &\leq e_x^T(t)[(A + LC)^T P + P(A + LC)]e_x(t) \\ &\quad + 2e_x^T(t)Pe_{\Phi_1}(x, u, t) \end{aligned} \quad (26)$$

considerando

$$L := -\xi P^{-1} C^T, \quad \xi > 0 \quad (27)$$

obtenemos:

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &\leq e_x^T(t)[(A - \xi P^{-1} C^T C)^T P \\ &\quad + P(A - \xi P^{-1} C^T C)]e_x(t) + 2e_x^T(t)Pe_{\Phi_1}(x, u, t) \end{aligned} \quad (28)$$

$P > 0$ y $Q > 0$, entonces, la estabilidad del observador se garantiza, al asegurar que $\dot{V}(t) < 0$ (Ekramian et al., 2013).

3. SIMULACIONES

En la Tabla 2 se muestra el valor de los parámetros de la suspensión semiactiva con amortiguador magnetoreológico F_{MR} (Martínez et al., 2016).

Tabla 2. Tabla de parámetros.

| Constante | Valor |
|-----------|-----------|
| m_s | 470kg |
| m_{us} | 110kg |
| k_s | 86378N/m |
| k_t | 270000N/m |
| f_c | 600.95 |
| a_1 | 37.8 |
| a_2 | 22.15 |
| b_1 | 2830.86 |
| b_2 | -7897.21 |

La simulación se implementó en el programa MATLAB/Simulink 2017b, con un tiempo de simulación de 15 segundos. El método de integración de las ecuaciones diferenciales fue el de Euler con un paso de integración de 0.0015s. Las condiciones iniciales del sistema fueron: $x_1(0) = 0$, $x_2(0) = 0$, $x_3(0) = 0$, $x_4(0) = 0$. Las condiciones iniciales del observador fueron: $\hat{x}_1(0) = 0.04$, $\hat{x}_2(0) = 0.03$, $\hat{x}_3(0) = 0.04$, $\hat{x}_4(0) = 0.01$.

Se asume un perfil de suelo paso de dos topes consecutivos (z_r) como se muestra en la Fig. 2. Este perfil de suelo es la entrada $u(t)$.

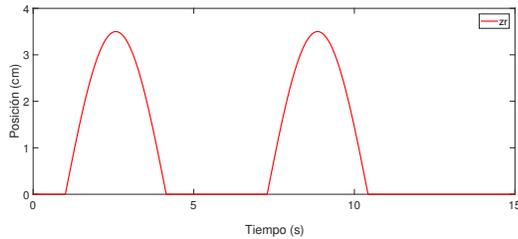


Figura 2. Perfil del suelo.

Utilizando las siguientes entradas:

$$I(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t < 0.5 \\ 1.3mA & 0.5 \leq t < 4 \\ 0 & 4 \leq t < 7 \\ 1.3mA & 7 \leq t < 10.5 \\ 0 & t \geq 10.5 \end{cases}$$

$$F_\delta(t) = \begin{cases} 400N & t \geq 0 \end{cases}$$

Tomando los valores de las entradas y el perfil de suelo Fig. 2, se sustituyen en las Ecs. de nuestro observador adaptable (16) y (17), obteniendo la estimación del coeficiente de rigidez de la llanta $k_t(t)$, teniendo como resultado el siguiente:

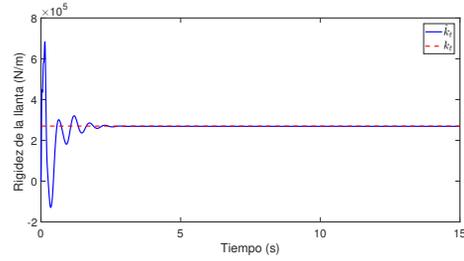


Figura 3. Rigidez de la llanta

En la Fig. 4 se observa la estimación de la posición del chasis y de la llanta, por parte del observador adaptable Lipschitz con una condición inicial de $\hat{x}_2 = 3$ cm y $\hat{x}_4 = 3$ cm, comparándola con la posición del chasis y de la llanta nominal x_2 y x_4 . Se observa la convergencia de las dos señales, en donde el error de estimación se va reduciendo a lo largo del tiempo.

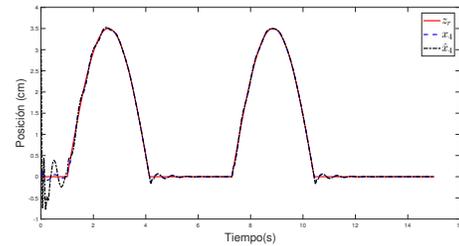
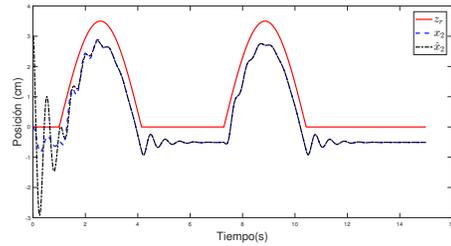


Figura 4. Comparación de posiciones

Simulación de una llanta que pierde rigidez.

Objetivo: Determinar si una llanta se encuentra en buenas condiciones o presenta una falla de falta de aire. Tomando en cuenta el mismo perfil de suelo mostrado en la Fig. 2, se lleva a cabo la simulación de una llanta pochada variando el coeficiente de rigidez de la llanta $k_t(t)$. El valor nominal de este coeficiente se considera de $k_t = 270,000$; N/m. A partir de $t = 3$ s, se considera que la llanta empieza a desinflarse. Esto se simula disminuyendo gradualmente el coeficiente de rigidez hasta un valor de $k_t = 219,000$ N/m, el parámetro k_t tiene una condición inicial de $150,000$ N/m.

En la Fig. 6 observamos la respuesta de las posiciones verticales del sistema y su valor estimado por el observador.

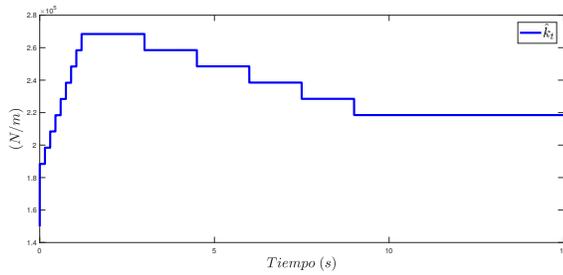


Figura 5. Rigidez de la llanta

Las oscilaciones que presenta el observador (línea roja discontinua) durante los primeros 2 segundos, corresponden al tiempo de convergencia inicial.

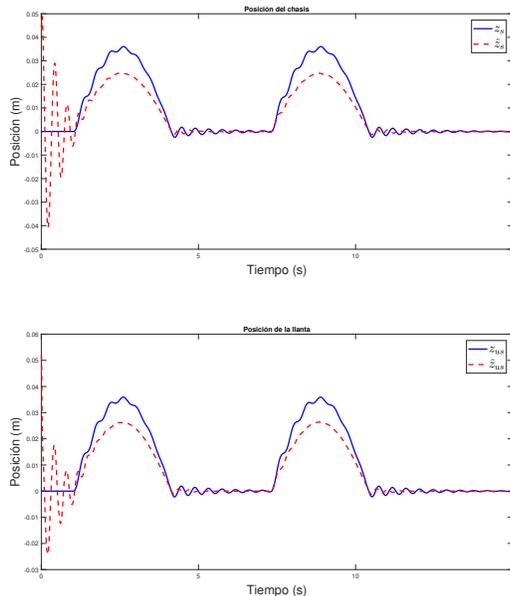


Figura 6. Comparación de posiciones

Se visualiza que el observador le toma un segundo converger con el sistema nominal, al ir perdiendo aire ocasiona un decremento en la posición de la llanta, al pasar cada uno de los topes, ya que necesita más esfuerzo para pasar, por el nuevo $k_t(t)$ que afecta al observador al finalizar el paso de los topes continúa oscilando en un perfil recto.

En la Fig. 7 observamos la respuesta del observador, comparando las dos posiciones verticales, se visualiza que el observador al tener contacto con el decremento de k_t , no se mantiene en cero, ya que al pasar cada uno de los topes sufren un desplazamiento negativo como se puede apreciar, las posiciones no se mantienen en sus condiciones originales, sufren un decremento ocasionado por dicha pérdida afectando al pistón del amortiguador.

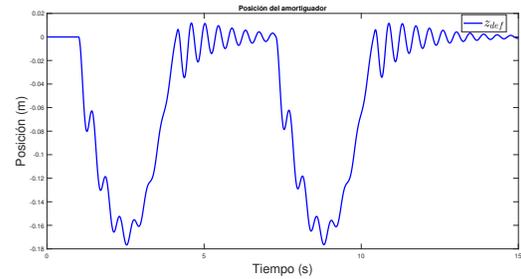


Figura 7. Rigidez de la llanta

4. CONCLUSIONES

En este trabajo, se desarrolló un observador adaptable para sistemas Lipschitz para supervisar el deterioro de una suspensión semiactiva. Basándose en las mediciones de las posiciones, el observador estima el coeficiente de rigidez de la llanta k_t . Por ejemplo, una disminución en k_t implica una disminución de la presión de la llanta. Por lo tanto, la supervisión de este parámetro, podría utilizarse para verificar el estado de deterioro en que se encuentra la suspensión (en este caso, la presión de la llanta). En trabajos posteriores, se pretende estimar otros parámetros que representen el estado de deterioro de otros componentes de la suspensión.

REFERENCIAS

- Arcak, M., Gorgun, H., Pedersen, L.M., and Varigonda, S. (2004). A nonlinear observer design for fuel cell hydrogen estimation. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 12(1), 101–110.
- Astorga, C.M., Othman, N., Othman, S., Hammouri, H., and McKenna, T.F. (2002). Nonlinear continuous–discrete observers: application to emulsion polymerization reactors. *Control Engineering Practice*, 10(1), 3–13.
- Astorga-Zaragoza, C.M., Zavala-Río, A., Alvarado, V., Méndez, R.M., and Reyes-Reyes, J. (2007). Performance monitoring of heat exchangers via adaptive observers. *Measurement*, 40(4), 392–405.
- Bastin, G. and Gevers, M.R. (1988). Stable adaptive observers for nonlinear time-varying systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 33(7), 650–658.
- Ekramian, M., Sheikholeslam, F., Hosseinnia, S., and Yazdanpanah, M.J. (2013). Adaptive state observer for Lipschitz nonlinear systems. *Systems & Control Letters*, 62(4), 319–323.
- Guo, S., Yang, S., and Pan, C. (2006). Dynamic modeling of magnetorheological damper behaviors. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 17(1), 3–14.
- Li, X., Zhang, Q., and Su, H. (2011). An adaptive observer for joint estimation of states and parameters in both state and output equations. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 25(9), 831–842.
- Martínez, J.C.T., Varrier, S., Menéndez, R.M., and Sename, O. (2016). Control tolerante a fallas en una suspensión automotriz semi-activa. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 13(1), 56–66.
- Perrier, M., De Azevedo, S.F., Ferreira, E., and Dochain, D. (2000). Tuning of observer-based estimators: theory and application to the on-line estimation of kinetic parameters. *Control Engineering Practice*, 8(4), 377–388.
- Savaresi, S.M., Poussot-Vassal, C., Spelta, C., Sename, O., and Dugard, L. (2010). *Semi-active suspension control design for vehicles*. Elsevier.
- Sharp, R. and Hassan, S. (1986). The relative performance capabilities of passive, active and semi-active car suspension systems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Transport Engineering*, 200(3), 219–228.