



El problema del diagnóstico de fallas: análisis comparativo de observadores de estado de tipo Luenberger y Luenberger con modos deslizantes en un sistema de un cuarto de suspensión para un automóvil

The fault diagnosis problem: comparative analysis of Luenberger and Luenberger state observers with sliding modes in a quarter-suspension system for an automobile

Juan Anzures Marín* , Salvador Ramírez Zavala

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Av. Francisco J. Mujica S/N, Morelia, Michoacán, México.

Historial

Manuscrito recibido: 19 de febrero de 2025

Manuscrito aceptado: 15 de julio de 2025

Manuscrito publicado: agosto 2025

*Autor para correspondencia

Juan Anzures Marín

juan.anzures@umich.mx

ORCID: 0000-0002-6686-3277

Resumen

El presente artículo muestra una metodología aplicada al problema del diagnóstico de fallas en sensores basada en un observador de Luenberger y el observador de Luenberger con modos deslizantes, aplicado en un sistema de un cuarto de suspensión en un automóvil. Esta metodología se basa en analizar señales conocidas como residuos o señales de fallas, las cuales indican una operación consistente o inconsistente del sistema; cuyo principio de funcionamiento es la comparación de la información de la salida medida del sistema con la información de la salida estimada a través del observador de estados, para ello se propone un umbral, con lo cual se toma la decisión respecto a una posible falla en el sistema. Las pruebas realizadas permiten establecer que el diseño de observadores de Luenberger y de Luenberger con modos deslizantes proporciona una herramienta útil para el problema del diagnóstico de fallas en sistemas donde se conoce el modelo.

Palabras clave: Observador de Luenberger, Observador de Luenberger con Modos Deslizantes, Diagnóstico de Fallas, Matlab.

Introducción

Un observador de estado es un sistema dinámico que estima las variables de estado o parámetros a partir de mediciones disponibles. En la actualidad los observadores, también llamados sensores virtuales, son ampliamente utilizados debido a que permiten estimar variables difíciles de medir de un sistema a partir de algoritmos matemáticos y mediciones disponibles, además son adecuados para detectar y localizar fallas en actuadores y sensores. Los observadores tienen un procedimiento de diseño sistemático y sencillo, lo que

Abstract

This paper shows the methodology based on a Luenberger observer and the sliding modes Luenberger observer, to address the fault diagnosis problem in sensors, applied in a $\frac{1}{4}$ suspension in an automobile. This methodology is based on analyzing residual signals or fault signals, which indicate a consistent or inconsistent operation of the system; its operating principle is based on the comparison of the information of the measured output of the system with the information of the estimated output through the state observer. For this, a threshold is proposed, based on which a decision is made regarding a possible system failure. The tests carried out allow to establish that the design of Luenberger observers and Sliding modes Luenberger observer provides a useful tool for the fault diagnosis problem in systems where the model is known.

Keywords: Luenberger Observer, Sliding Modes Luenberger Observer, Fault Diagnosis, Matlab.

facilita su implementación y ejecución en tiempo real.

En la industria automotriz, el confort y la estabilidad son características esenciales para que el modelo de un vehículo cumpla con las especificaciones que demanda el mercado actual. El confort y la estabilidad garantizan las condiciones de comodidad y de seguridad, respectivamente. El sistema de suspensión es el encargado de aislar al chasis del movimiento causado por las irregularidades del terreno y, al mismo tiempo, asegura que las ruedas se mantengan en contacto con la carretera. La calidad de la actuación de la suspensión

no sólo afecta directamente al desempeño del manejo y la comodidad del viaje, sino también la seguridad en la conducción, la maniobrabilidad, la estabilidad y el ahorro de combustible.

El problema del diagnóstico de fallas ha sido estudiado ampliamente desde hace varias décadas, por lo cual podemos encontrar gran cantidad de trabajos relacionados al área, como los mostrados por Hedrick y Rajamani (1994), quienes hacen uso de observadores de estado para sistemas no lineales con el objeto de mejorar la calidad del viaje en una suspensión activa, y observadores de estado para sistemas bilineales para reducir la dinámica de la carga del neumático en una suspensión semi-activa de un vehículo pesado. Azadi y Soltani (2009) presentan un método basado en la transformada Wavelet continua para diagnosticar fallas en un amortiguador. El método analiza la frecuencia natural del sistema y los componentes de frecuencia de la señal con la energía máxima relativa.

Lozoya *et al.* (2012), proponen un sistema de detección de fallas para monitorear el rendimiento del amortiguador, para eso estiman la frecuencia para la carretera basado en la deflexión de la suspensión. Rizvi *et al.* (2013), utilizan el modelo de una suspensión activa del modelo completo del vehículo para diagnosticar fallas en los actuadores. Además, desarrollan un enfoque basado en observadores de entradas desconocidas (Unknown Input Observer) para desacoplar el sistema de las perturbaciones de la carretera y así el residuo generado tan sólo sea sensible a las fallas. Existen más trabajos que se pueden encontrar con enfoques basados en el modelo del sistema como los mostrados por Lin y Singh (2007), Minghu *et al.* (2009), y Weitiany Mehrdad (2006). Así, el estudio realizado en este trabajo para el diagnóstico de fallas se basa en la generación de residuos a través de la comparación entre la salida del sistema respecto a una salida estimada, esto es posible usando un modelo de la planta implementada con un observador de estados.

Metodología

Diagnóstico de fallas basado en observadores.

Los inicios del diagnóstico de fallas basados en el modelo surgen como una aplicación de la teoría de los observadores utilizados en el área de control automático. Aunque la automatización de los sistemas permite reducir la exposición de los operadores humanos al manejo manual, tareas repetitivas y ambientes inseguros, no garantiza la prevención de eventos de falla en los procesos.

La naturaleza física de los sistemas hace que éstos sean vulnerables a fallas en sus componentes, lo cual está asociado a efectos no deseados en los mismos, ya que se puede presentar desde la reducción del desempeño hasta la interrupción total de la actividad. Es importante mencionar que en ocasiones el inicio de una falla no se manifiesta de manera rotunda en el funcionamiento del sistema; sin embargo, la operación prolongada bajo esta situación provoca que la falla se intensifique y por lo tanto el efecto sobre el proceso sea mayor.

A partir de una secuencia de entradas y salidas obtenidas de los sensores en el proceso, el objetivo de la detección de fallas es verificar la consistencia con el comportamiento del modelo, de esta manera la detección de una inconsistencia es un indicativo de la presencia de una falla en el sistema. Una forma de verificar dicha consistencia entre el modelo y las mediciones entrada-salida ($u(t), y(t)$) es generar una estimación de las salidas ($\hat{y}(t)$). La consistencia entre el sistema real y el modelo se evalúa a cada instante de tiempo mediante la diferencia (1), conocida como residuo.

$$r(t) = y(t) - \hat{y}(t) \quad (1)$$

Idealmente, en un sistema libre de fallas, el valor absoluto del residuo $r(t)$ debe estar suficientemente cerca de cero y naturalmente desviarse de cero cuando una falla $d(t)$ ocurre en el sistema; de esta forma, se usa esta propiedad del residuo para determinar si se presenta o no una falla en el sistema, es decir, se cumple la condición (2).

$$\begin{aligned} \text{si } |r(t)| \in \text{Zero} & \quad \text{no hay falla } (d(t) = 0) \\ \text{si } |r(t)| \in \text{No Zero} & \quad \text{hay falla } (d(t) \neq 0) \end{aligned} \quad (2)$$

Por lo tanto, se puede decir que los residuos son sensibles a fallas específicas. En este sentido una propiedad deseable es que el residuo sea insensible o poco sensible a variaciones paramétricas en una vecindad de valores nominales; es decir, las variaciones paramétricas no deben ser confundidas con fallas, los residuos deben ser robustos ante dichos efectos. Dicha robustez en la detección de fallas se puede lograr en la generación de residuos o en la fase de toma de decisión. De esta manera, la idea generalmente aceptada para el diagnóstico de fallas es que se puede dividir dos etapas básicas usando una estructura como se muestra en la **Figura 1**, y se describen a continuación:

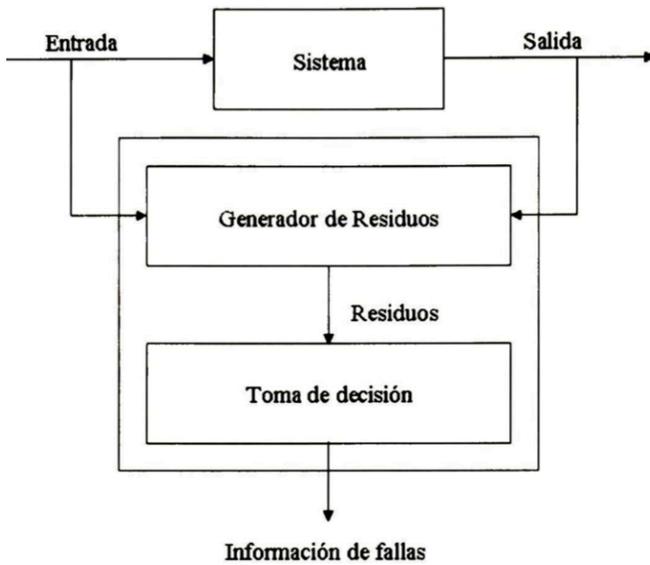


Figura 1. Estructura general del sistema de diagnóstico de fallas

Generación de residuos. Su propósito es generar la señal de diagnóstico conocida como residuo, la cual sólo depende de las fallas y no de la entrada.

Toma de decisión. El propósito de esta etapa, también conocida como evaluación de residuo, es examinar el residuo y extraer información sobre las fallas.

Observador de Luenberger.

Los observadores son llamados sensores virtuales debido a que su algoritmo de programación tiende a realizar la misma función que un sensor físico. Sin embargo, el diseño de un observador implica que el sistema sea observable (Cristina *et al.* 2013). La aproximación basada en observadores necesita de un modelo del sistema dado por (3) para operar de forma paralela con el proceso en

lazo abierto (Cristina *et al.* 2013), por lo cual se garantiza el conocimiento pleno del comportamiento del sistema. La diferencia entre la medición de salida y la señal estimada por el observador es diferente de cero cuando ocurre un error (Guillermo *et al.* 2012).

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) \end{aligned} \tag{3}$$

Si por restricciones físicas no tenemos acceso para medir a las variables del sistema, se pueden estimar, y para ello se recomienda construir un observador de estado, basado en mediciones de entradas y salidas, lo cual permitirá generar las señales de falla o residuos y con ello detectar fallas en el sistema. Como se puede apreciar de la **Figura 2**, de donde se puede obtener (4).

$$y(t) - \hat{y}(t) = Cx(t) - C\hat{x}(t) = C\tilde{x}(t) \tag{4}$$

La ecuación para el observador se muestra en (5) y (6).

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L[y(t) - \hat{y}(t)] \tag{5}$$

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L[Cx(t) - C\hat{x}(t)] \tag{6}$$

El objetivo del observador es hacer que el error de estado $e(t)$ en (7) tienda a cero conforme t tiende a infinito, para lo cual es importante conocer la dinámica del error, desarrollada en (8).

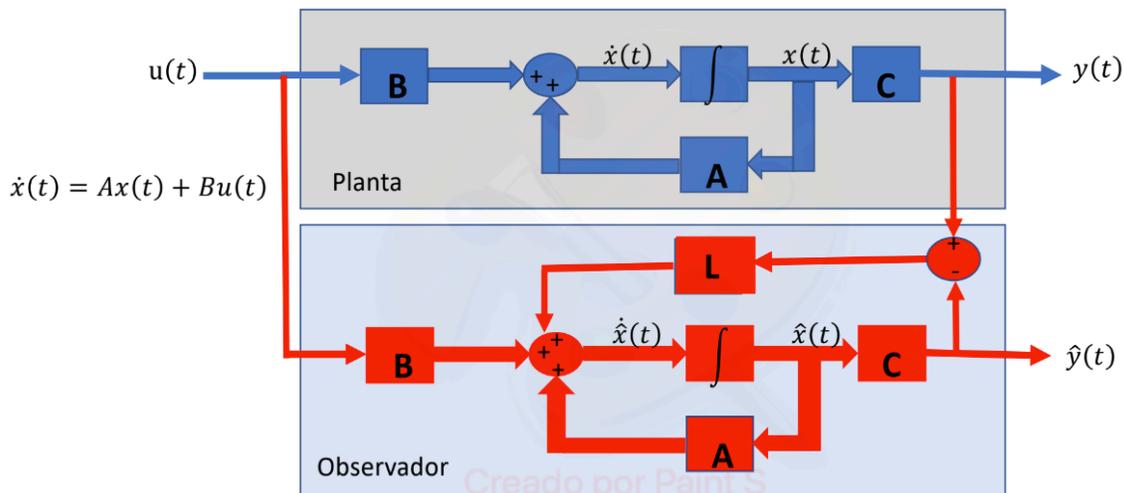


Figura 2. Estructura de un observador de estado acoplado a la planta o sistema.

$$e(t) = x(t) - \hat{x}(t) \quad (7)$$

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

$$\dot{e}(t) = Ax(t) + Bu(t) - A\hat{x}(t) - B\hat{u}(t) - L[Cx(t) - C\hat{x}(t)]$$

$$\dot{e}(t) = A[x(t) - \hat{x}(t)] - LC[x(t) - \hat{x}(t)]$$

$$\dot{e}(t) = (A - LC)e(t) \quad (8)$$

Es fácil notar que:

$$e(t) \rightarrow 0. \quad \text{conforme} \quad t \rightarrow \infty$$

Si la matriz del error en lazo cerrado $(A - LC)$ es Hurwitz; es decir que sus valores propios tengan la parte real negativa y por lo tanto se podrán asignar polos $\alpha(S)$, de la siguiente manera:

$$\det(SI - A + LC) = \alpha(S) = S^n + \alpha_1 S^{n-1} + \dots + \alpha_n$$

si y sólo si, el sistema es observable. La matriz de ganancias L se puede obtener como en (9).

$$L = \alpha(A)O^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \dots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Donde $\alpha(A)$ es el polinomio propuesto evaluado en la matriz de estados A y O^{-1} , es la inversa de la matriz de observabilidad.

Por otro lado, la estabilidad y las características de respuesta transitoria se determina mediante los valores característicos de la matriz $(A-LC)$. Si se elige la matriz L en forma adecuada, la matriz $(A-LC)$ se convierte en una matriz asintóticamente estable y para todo $e(t) \neq 0$ es posible hacer que $\dot{e}(t)$ tienda a 0 conforme t tienda a infinito (Luenberger, 1971).

El diseño del observador a través de la retroalimentación de estados observados se basa en la asignación de polos haciendo uso de (9) para encontrar la matriz de ganancias L mediante un análisis previo de observabilidad del sistema, recordando que dicha técnica se basa en la dinámica del sistema.

Observador de Luenberger con modos deslizantes

Sea el Observador de Luenberger definido en (6) al agregar un término discontinuo de modos deslizantes queda representado por (10) (Anzures-Marin y Castillo-Toledo, 2006).

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L[y(t) - \hat{y}(t)] + \varphi(t) \quad (10)$$

$$\hat{y}(t) = C\hat{x}(t) + Du(t)$$

donde, $\varphi(t)$ es el vector discontinuo de modos deslizantes definido por (11).

$$\varphi(t) = M_o \text{sign}(e(t)^T P) \quad (11)$$

Donde $\text{sign}(\cdot)$ representa la función signo cuya definición se muestra a continuación:

$$\text{sign}(e(t)^T P) = \frac{e(t)^T P}{\|e(t)^T P\|}$$

Para el análisis de la convergencia, el error de estimación de (7) y su dinámica quedaría como en (13).

$$\begin{aligned} \dot{e}(t) &= Ax(t) + Bu(t) - A\hat{x}(t) - B\hat{u}(t) \\ &\quad - L[Cx(t) - C\hat{x}(t)] - \varphi(t) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{e}(t) &= A[x(t) - \hat{x}(t)] \\ &\quad - LC[x(t) - \hat{x}(t)] - \varphi(t) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\dot{e}(t) = (A - LC)e(t) - M_o \text{sign}(e(t)^T P) \quad (13)$$

De esta manera, el análisis de estabilidad de $\dot{e}(t)$ descrito en (13), debe cumplir que $M_0 > 0$ sea una constante positiva y que $P > 0$, definida positiva satisfaga la ecuación de Lyapunov (14) (Kailath, 1980). Es decir, para una $Q > 0$ definida positiva dada, encontrar una $P > 0$ y simétrica que satisfaga (14).

$$A^T P + PA = -Q \quad (14)$$

Modelado del sistema de un cuarto de suspensión de un automóvil

El caso de estudio que se desarrolla en el presente trabajo es un sistema de suspensión de un cuarto de un automóvil, el sistema de suspensión proporciona características de buen desempeño y confort en la conduc-

ción. La principal aplicación del sistema es controlar el movimiento vertical excesivo de la rueda para eliminar las fallas de contacto entre el neumático y la carretera, mantener buenas características de conducción y evitar daños a la suspensión.

El modelo de un cuarto de automóvil (Hrovat, 1990), el cual representa adecuadamente el problema del control de las variaciones de carga sobre las ruedas del vehículo y las fuerzas que intervienen en el sistema de suspensión, como se muestra en la **Figura 3**, donde los resortes tienen fuerzas iniciales en posición de equilibrio dadas por (15).

$$\begin{aligned}
 F_u &= (m_s + m_u)g \\
 F_s &= (m_s)g
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

Donde g representa la aceleración de la gravedad.

Aplicando la segunda ley de Newton, a la masa suspendida (chasis) y no suspendida (neumático) se obtiene (16) y (17).

$$\begin{aligned}
 m_s \ddot{x}_s &= F_a - c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_u) \\
 &\quad - (-F_s + k_s (x_s - x_u)) - m_s g
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

$$\begin{aligned}
 m_u \ddot{x}_u &= -F_a - c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_u) + (-F_s + k_s (x_s - x_u)) \\
 &\quad - m_u g - c_u (\dot{x}_u - \dot{x}_r) - (-F_u + k_u (x_u - x_r))
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

Simplificando las ecuaciones (16) y (17) y, considerando (15) se obtiene (18) y (19).

$$m_s \ddot{x}_s = F_a - c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_u) - (-k_s (x_s - x_u))
 \tag{18}$$

$$\begin{aligned}
 m_u \ddot{x}_u &= -F_a + c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_u) + (k_s (x_s - x_u)) \\
 &\quad - c_u (\dot{x}_u - \dot{x}_r) - (k_u (x_u - x_r))
 \end{aligned}
 \tag{19}$$

Donde: x_r es el desplazamiento por las irregularidades del camino en metros (m); x_u es el desplazamiento vertical del neumático en metros (m); x_s es el desplazamiento vertical del chasis en metros (m); F_a es la fuerza del actuador en Newton (N); F_u y F_s son las fuerzas iniciales de los resortes en Newton(N).

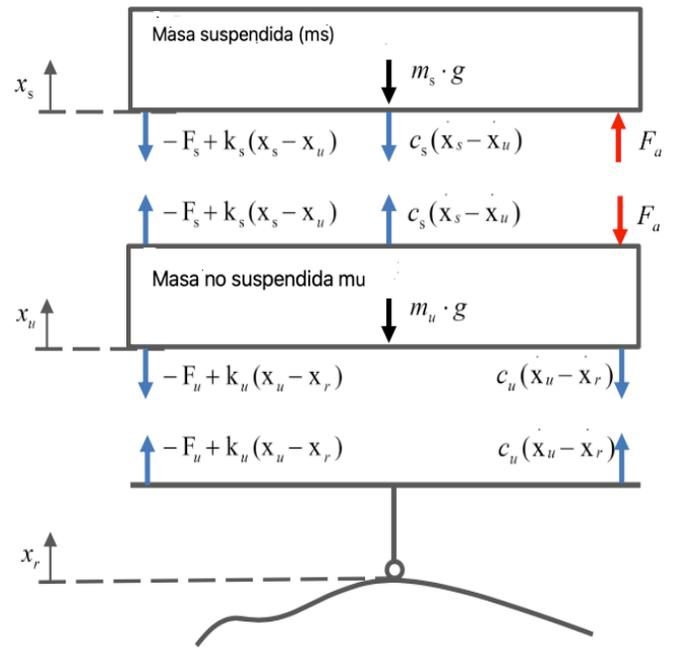


Figura 3. Esquema de un modelo de un cuarto de vehículo.

De esta manera, (18) y (19) representan el modelo de la masa suspendida y de la masa no suspendida, respectivamente. Estas ecuaciones describen el comportamiento de dichas masas cuando se analiza la cuarta parte de un vehículo.

Para determinar el sistema de ecuaciones de estado, primero se define:

Variables de estado	Entradas	Salidas
$ x = \begin{bmatrix} x_s - x_u \\ \dot{x}_s \\ x_u - x_r \\ \dot{x}_u \end{bmatrix} $	$ u = \begin{bmatrix} \dot{x}_r \\ F_a \end{bmatrix} $	$ y = \begin{bmatrix} x_s - x_u \\ \ddot{x}_s \end{bmatrix} $

Donde cada término: $(x_s - x_u)$ es la deflexión de la suspensión; \dot{x}_s es la velocidad vertical del chasis; $(x_u - x_r)$ es la deflexión del neumático; \dot{x}_r es la velocidad vertical del camino; \dot{x}_u es la velocidad vertical del neumático y \ddot{x}_s es la aceleración vertical del chasis.

Así el modelo en espacio de estado que representa la dinámica del sistema se puede escribir como (3) donde:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & -1 \\ -\frac{k_s}{m_s} & -\frac{c_s}{m_s} & 0 & \frac{c_s}{m_s} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_s}{m_u} & \frac{c_s}{m_u} & -\frac{k_u}{m_u} & -\frac{c_u + c_s}{m_u} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{m_s} \\ -1 & 0 \\ \frac{c_u}{m_u} & -\frac{1}{m_u} \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{k_s}{m_s} & -\frac{c_s}{m_s} & 0 & \frac{c_s}{m_s} \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{m_s} \end{bmatrix}$$

Resultados

Primeramente, se comprueba que el sistema sea observable y que el observador de Luenberger diseñado proporcione el mismo comportamiento que el modelo matemático del sistema del amortiguador del automóvil, a una entrada aleatoria pulsante que simula las irregularidades del suelo; esta respuesta se puede ver en la **Figura 4**.

Después de comprobar la efectividad de los observadores diseñados, se realiza el diagrama para el diagnóstico de fallas dado por la **Figura 5**, donde el bloque llamado observador se reemplaza para la prueba de ambos observadores diseñados (Luenberger y Luenberger con modos deslizantes) y obteniéndose los residuos de acuerdo a (1); primero se establece un umbral para la señal del residuo, el tiempo de simulación fue de 30s en cuatro escenarios, los escenarios son:

1. *Sistema libre de fallas*: El comportamiento de los residuos cuando el sistema se encuentra libre de fallas se muestra en la **Figura 6**, para ambos observadores. Se observa que no hay presencia de residuos, como se esperaba, lo que indica la ausencia de falla en el sistema en ambos casos de los observadores diseñados.

2. *Sistema con fallas*: La segunda prueba consiste en agregar una falla abrupta mediante una entrada externa de tipo ruido en el sensor 2 en el segundo 10. En la **Figura 7** se puede apreciar que el residuo sobrepasa el umbral permitido por lo que la falla que aparece es provocada por el sensor 2. El residuo en el sensor 1 se puede observar en la figura 7, aunque se aprecia un valor

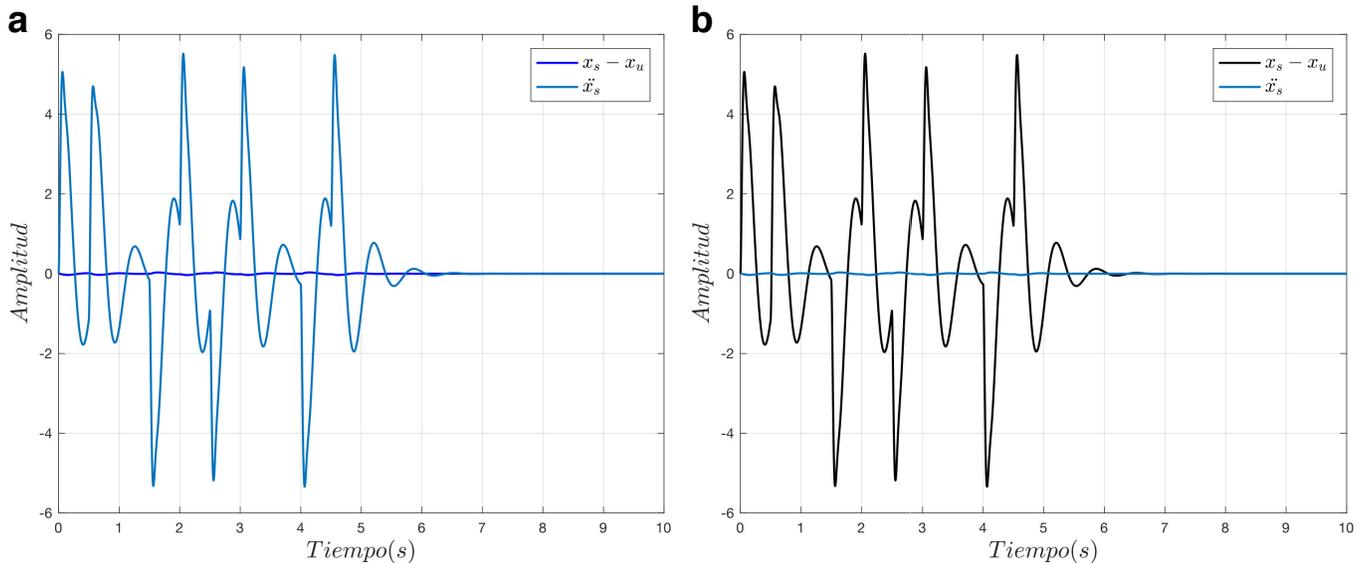


Figura 4. Salida real y estimada del sistema ante una entrada $u(t)$. **a)** Salida real del sistema, **b)** Salida estimada del sistema.

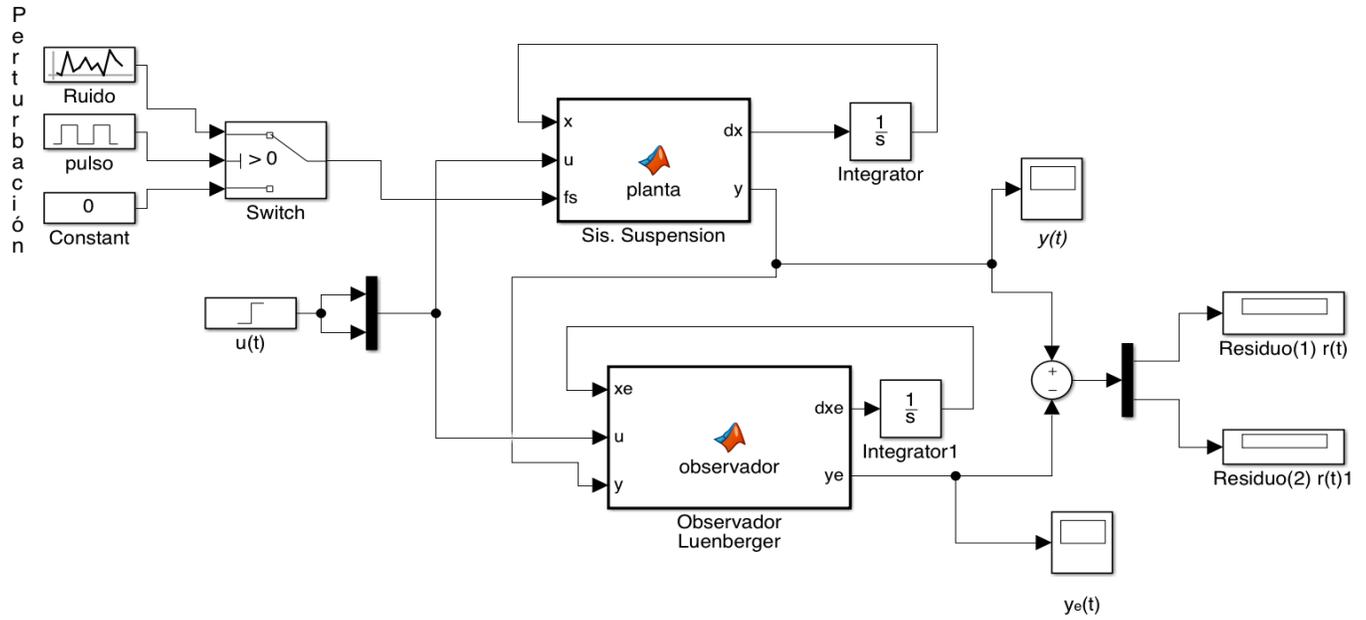


Figura 5. Esquema completo del observador de Luenberger

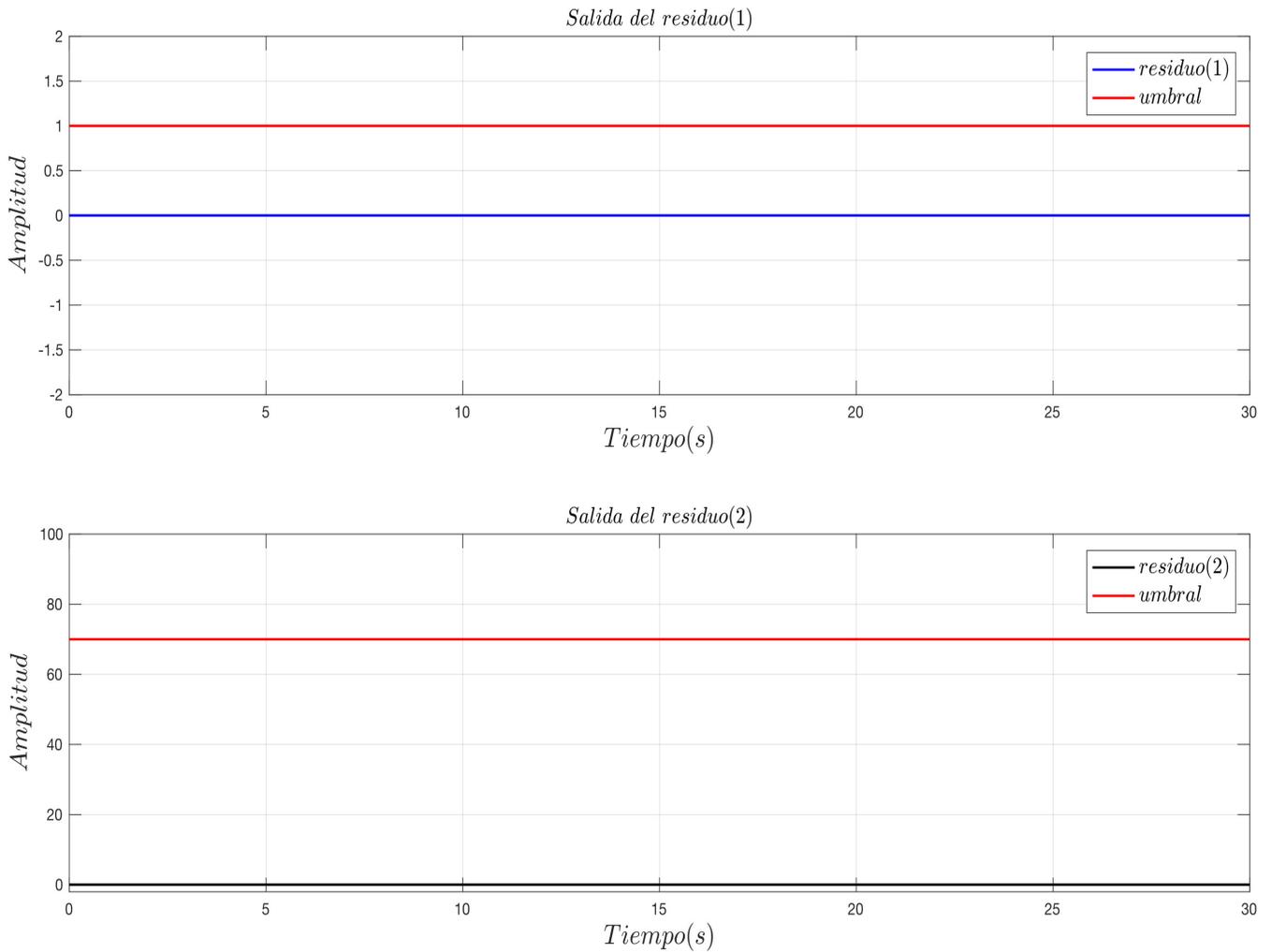


Figura 6. Comportamiento del residuo para un sistema libre de fallas

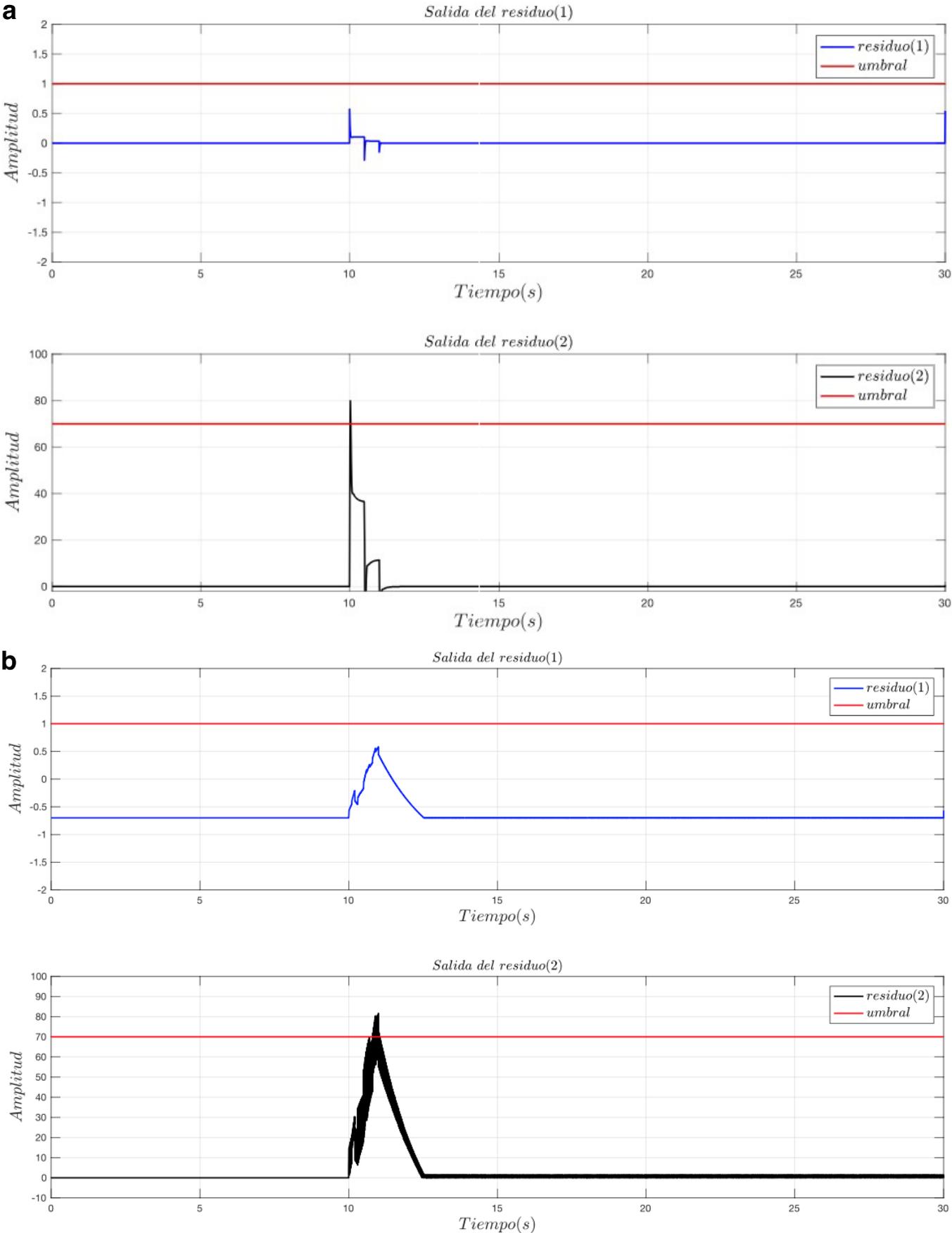


Figura 7. Comportamiento del residuo 1 y 2 ante una falla a) Observador de Luenberger b) Observadores con Modos Deslizantes

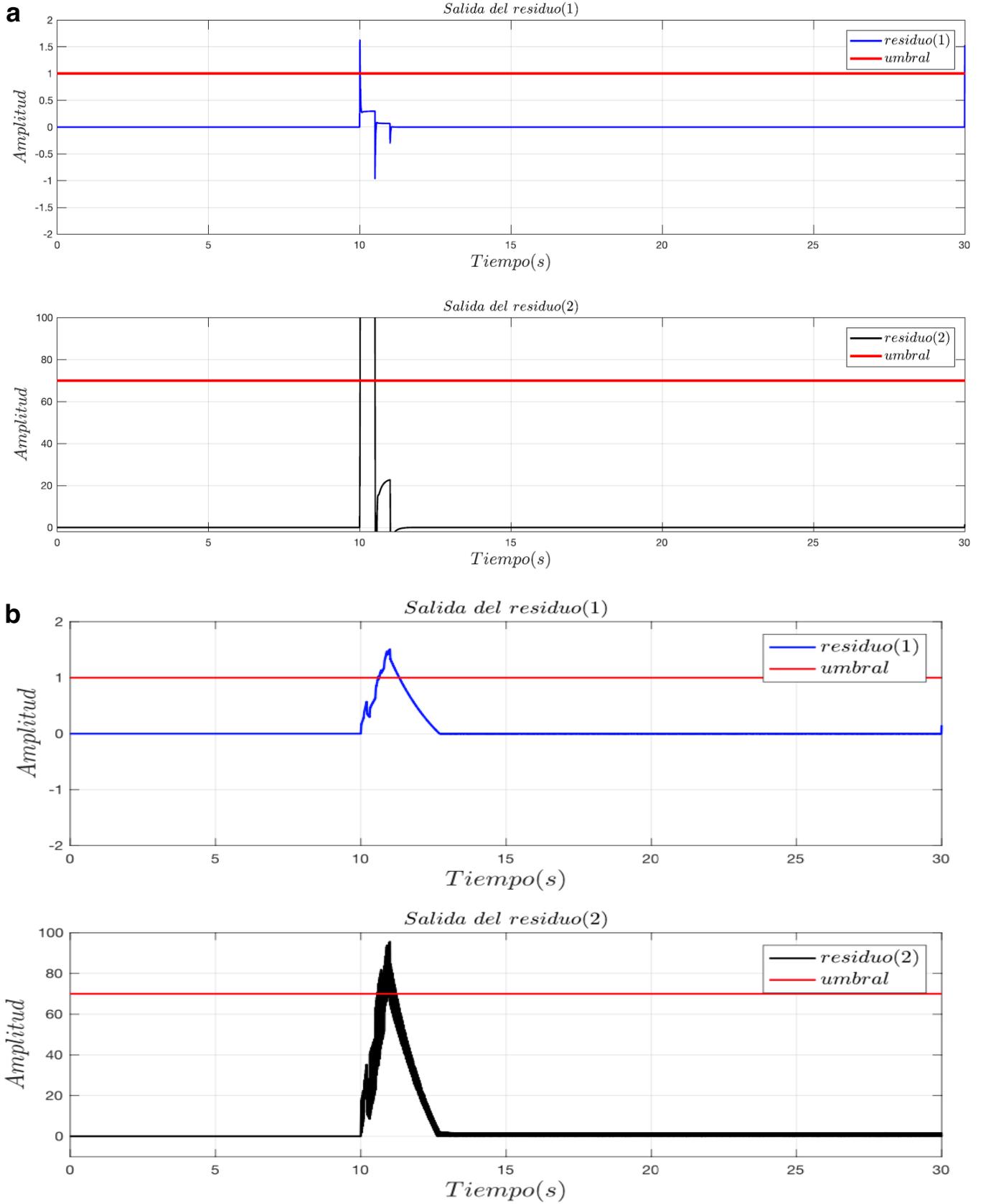


Figura 8. Comportamiento de residuo 1 y 2 ante la presencia de dos fallas a) Observador de Luenberger b) Observadores con Modos Deslizantes

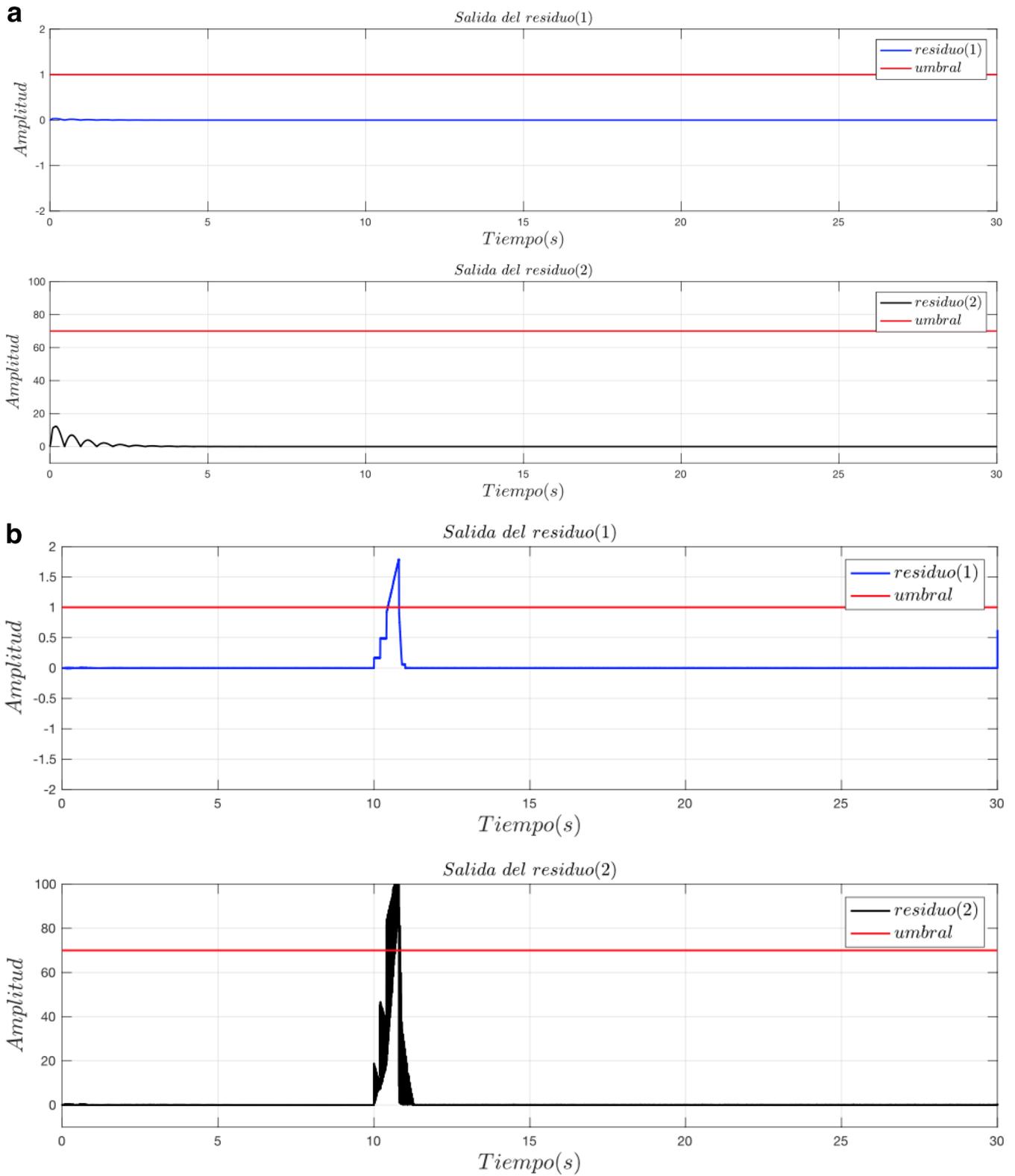


Figura 9. Comportamiento de residuo ante un cambio en los parámetros a) Observador de Luenberger b) Observador de Modos Deslizantes.

diferente de cero no sobrepasar el umbral permitido en ambos observadores diseñados.

3. La prueba tres, consiste en provocar dos fallas de manera simultánea; es decir, la medición de los sensores presenta errores en la lectura, al igual que las simulaciones anteriores se observa el comportamiento de residuo, a partir del segundo 10. En la **Figura 8** se presenta la comparación de los residuos con el umbral permitido en ambos observadores diseñados.

4. El cuarto escenario de prueba consiste en la modificación de los parámetros de la planta mediante el cambio de los valores del modelo de la planta (matrices A y B). En la figura 9 se muestra el comportamiento de los residuos del sistema como resultado de esta prueba. Se observa que los residuos tienen pequeños cambios, en el comportamiento del Observador con Modos Deslizantes desde este punto de vista es robusto ante una variación en los parámetros a diferencia que un Observador de Luenberger que afectan el cambio de los parámetros.

Conclusiones

Se realizó un análisis sobre el diseño de diferentes observadores, como son: el Observador de Luenberger y Luenberger con modos deslizantes, para estudiar su eficiencia en el diagnóstico de fallas aplicado a un sistema conformado por resortes y amortiguadores los cuales son los encargados de absorber las vibraciones generadas por las irregularidades del terreno o vía, mientras mantiene los neumáticos siempre en contacto con la superficie lo que garantiza la seguridad del usuario. Así, los esquemas implementados para la detección de fallas o perturbaciones en las mediciones obtenidas por los sensores con los observadores cumplen con las condiciones deseadas cuyo objetivo es realizar el diagnóstico de fallas.

De las gráficas de respuesta se puede observar que la falla en los sensores es detectada directamente por el sensor afectado, como se muestra numéricamente en la **Tabla 1** y **Tabla 2**, donde se describen los valores pico de los residuos que sobrepasan los umbrales definidos, para una falla y fallas simultáneas respectivamente. El esquema basado en observadores propuesto presenta ventajas al momento de analizar las fallas en el sistema, puesto que tendrá el valor exacto de la misma. También se demostró que al variar los parámetros de la planta el observador de Luenberger con modos deslizantes muestra una respuesta robusta a diferencia del observador de Luenberger clásico en el proceso de detección de fallas, puesto que el residuo es insensible a la variación

de parámetros de la planta y al mismo tiempo sensibles a las fallas, como se muestra numéricamente en la **Tabla 3**. En base al desarrollo de este trabajo, se puede mencionar que el problema del diagnóstico de fallas aún está abierto, la técnica o herramienta a utilizar para la solución depende de la naturaleza del sistema.

Con base en los resultados obtenidos, los autores del presente trabajo realizan la siguiente discusión técnica: El observador con modos deslizantes mostró mejor desempeño ante variación de parámetros, manteniendo menor error de estimación y generando residuos más sensibles a fallas, evitando falso positivos, lo cual puede ser crítico en aplicaciones sensibles. Aunque el observador con modos deslizantes requiere una mayor capacidad de cómputo, su implementación sigue siendo factible en plataformas embebidas típicas del dominio automotriz. Este enfoque representa una alternativa sólida y clara frente a técnicas más complejas como el diagnóstico basado en aprendizaje automático, especialmente en escenarios con disponibilidad limitada de datos históricos.

Tabla 1. Comparativa de residuos numéricos con una falla

Observador	Residuo 1 (th=1)	Residuos 2 (th=70)
Luenberger	0.7	80
Luenberger con modos deslizantes	0.6	84

Tabla 2. Comparativa de residuos numéricos con dos fallas

Observador	Residuo 1 (th=1)	Residuos 2 (th=70)
Luenberger	1.75	100
Luenberger con modos deslizantes	0.62	82

Tabla 3. Comparativa de residuos numéricos con variación de parámetros

Observador	Residuo 1 (th=1)	Residuos 2 (th=70)
Luenberger	1.80	100
Luenberger con modos deslizantes	No pasa el umbral	No pasa el umbral

Referencias

Anzures-Marín J, Castillo-Toledo B (2006). The fault diagnosis problem: sliding mode fuzzy dedicated observers approach. In: 2006 IEEE International Conference on Fuzzy Systems, 16-21 July 2006. pp 1322-1328. doi:10.1109/FUZZY.2006.1681881

Azadi S, Soltani A (2009). Fault detection of vehicle suspension

system using wavelet analysis. *Vehicle System Dynamics* 47(4):403-418. doi:10.1080/00423110802094298

Cristina V, Gentil S, Morales-Méndez R (2013). Monitoreo y diagnóstico automático de fallas en sistemas dinámicos. México D.F.: Trillas.

Guillermo R, Bocero HD (2012). Turbinas eólicas: Optimización en el pre-diagnóstico de fallas en el generador. *Información Tecnológica* 23(1):153-162

Hedrick JK, Rajamani R, Yi K (1994) Observer Design for Electronic Suspension Applications*. *Vehicle System Dynamics* 23(1):413-440. doi:10.1080/00423119408969068

Hrovat D (1990). Optimal active suspension structure for quarter-car vehicle models. *Automata* 5(25):845-860.

Kailath T (1980). Linear systems (Vol. 1) Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall

Lozoya-Santos J, Tudon-Martínez JC, Morales-Menendez R, Ramírez-Mendoza R, Molina Gutierrez A (2012) Fault Detection for an Automotive MR Damper. *IFAC Proceedings Volumes* 45(6):1023-1028. doi:10.3182/20120523-3-RO-2023.00247

Lin PP, Singh H (2007). *Intelligent model-free diagnosis for multiple faults in a nonlinear dynamic system*. In: 2007 IEEE/ASME international conference on advanced intelligent mechatronics, 4-7 Sept. 2007. pp 1-6. doi:10.1109/AIM.2007.4412526

Luenberger D (1971). An introduction to observers. *IEEE Transactions on Automatic Control* 16(6):596-602. doi:10.1109/TAC.1971.1099826

Minghu Z, Dehu W, Shijun L, Yuxi S, Hong L, Shaojie C (2009). Application on Virtual Instrument and Neural Networks in the Fault Diagnosis. In: 2009 Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, 10-11 Oct. 2009. pp 317-320. doi:10.1109/ICICTA.2009.312

Rizvi SMH, Abid M, Qayyum Khan A (2013). Actuator fault diagnosis and isolation in vehicle active suspension system. In: 2013 IEEE 9th International Conference on Emerging Technologies (ICET), 9-10 Dec. 2013 2013. pp 1-6. doi:10.1109/ICET.2013.6743503

Weitian C, Saif M (2006). Fault detection and isolation based on novel unknown input observer design. In: 2006 American Control Conference, 14-16 June 2006 2006. p 6. doi:10.1109/ACC.2006.1657536