

# DETECCIÓN DE FALLAS DE ACTUADOR EMPLEANDO UN OBSERVADOR CON DINÁMICA LINEAL DEL ERROR

E. Schuster<sup>1</sup>      J. Solsona<sup>2</sup>      C. Muravchik<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Instituto Balseiro - e-mail: schuster@ib.cnea.edu.ar*

<sup>2</sup> *Investigador CONICET - GCAyS - Fac. Ingeniería - UNComahue. e-mail: jsolsona@uncoma.edu.ar*

<sup>3</sup> *Investigador CICpBA-Docente UNLP- LEICI - Fac. Ingeniería - UNLP e-mail: carlosm@ing.unlp.edu.ar*

**Resumen:** Se presenta un observador que permite detectar y aislar fallas de actuador en una clase de sistemas no lineales. El método empleado consiste en diseñar un observador con dinámica lineal del error y emplearlo para detectar una falla mediante la discordancia entre los valores medidos de la planta y los que predice el observador. Se estima la firma o comportamiento característico que identifica al tipo de falla. Para ilustrar el funcionamiento de la técnica propuesta, se aplica la misma en un ejemplo y se presentan resultados de simulación.

## ACTUATOR FAULT DETECTION USING A LINEAR DYNAMICS ERROR OBSERVER

**Abstract:** A nonlinear observer aimed at actuator fault detection and isolation is introduced. The class of nonlinear systems considered can be transformed into a particular form that allows designing an observer with linear error dynamics. The difference between the measured plant output and the estimated value predicted by the observer is used to detect a fault. The fault signature is estimated, so that it can be isolated. The proposed technique is applied to an example and simulation results illustrate the behavior of the nonlinear observer.

**Keywords:** **detección de fallas, detector de fallas no lineal, observador adaptivo, observador no lineal**

### 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años ha crecido notoriamente, la demanda por mejorar la confiabilidad en los procesos y equipos industriales. Con el propósito de sat-

isfacer este objetivo, es necesario realizar el monitoreo del funcionamiento de los componentes del proceso durante la operación, pues esto permite diagnosticar el incorrecto funcionamiento de los

mismos. Por este motivo, han aparecido una amplia variedad de métodos para detectar y aislar fallas en actuadores, sensores y componentes de los procesos industriales (ver Frank, 1990 y referencias en ese trabajo). Un buen sistema que permita detectar e identificar fallas, permite diseñar un adecuado curso de acciones para acondicionar el comportamiento del sistema luego que la falla ha ocurrido y ha sido identificada. Un método muy utilizado de redundancia analítica consiste en emplear observadores que permitan generar una señal de alarma cuando ha ocurrido una falla. Diferentes tipos de observadores han sido propuestos para la detección de fallas en sistemas modelados en forma lineal (Ge & Fang, 1988; Tsui, 1994; Magni & Mouyon, 1994; Medvedev, 1996 y Wang & Daley, 1996). Sin embargo, se debe tener en cuenta que los modelos lineales provienen en general, de la linealización de sistemas cuyo comportamiento es esencialmente no lineal. Entonces, pueden ocurrir falsas alarmas originadas en el error que provoca no considerar los términos residuales de alto orden en la linealización. Esto es, obviamente, una característica no deseable en los sistemas de detección. Por este motivo es importante tratar de utilizar técnicas no lineales para el diseño de observadores que permitan detectar las fallas reales.

En este trabajo se propone emplear un observador que permite detectar y aislar fallas en los actuadores en una clase de sistemas no lineales. El método empleado consiste en diseñar un observador con dinámica lineal del error, cuando la clase de sistemas no lineales así lo permite. Cuando el observador detecta que ha ocurrido una falla, procede a estimar su firma o comportamiento característico que la identifica. Esto posibilita el diagnóstico del actuador que falla. El trabajo se encuentra organizado de la siguiente manera. En la sección 2 se presenta el observador para la detección y el aislamiento de las fallas (DAF) de actuador. En la sección 3 se muestran los resultados obtenidos en un ejemplo de aplicación. Finalmente, las conclusiones del trabajo se encuentran en la sección 4.

## 2. OBSERVADOR PARA DAF

Se considera un sistema no lineal o planta dado por

$$\dot{\xi} = f(\xi) + G(\xi)s(t)u(t) \quad (1)$$

$$y = h(\xi) \quad (2)$$

con índices de observabilidad  $l_j$ ,  $\sum l_j \leq n$  y donde  $\xi \in R^n$ ,  $u \in R^m$ ,  $y \in R^m$ ,  $s(t)$  es una matriz de dimensión  $m \times m$  que representa la ganancia de los actuadores conectados a  $u$ . Si el sistema dado por (1) y (2) satisface adecuadas condiciones existe una transformación  $x = T(\xi)$  que lo lleva a la forma (ver Solsona *et al.*, 1991; Marino &

Tomei, 1995)

$$\dot{x} = Ax + Bs(t)u(t) + k(y) \quad (3)$$

$$y = Cx \quad (4)$$

donde  $(C, A)$  es observable y está en la forma dual Brunovsky (u observador). Si la transformación es local, el sistema en coordenadas transformadas representa en forma local y exacta al sistema dado en (1) y (2). Si la transformación es global, el sistema en coordenadas transformadas es globalmente exacto con respecto al sistema en coordenadas originales. Cuando no existe falla,  $s(t)$  toma un valor que indica que el sistema está funcionando sin falla, por ejemplo la matriz identidad o algún otro valor conocido. Se puede construir el siguiente observador para el sistema dado por (3) y (4):

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + B\hat{s}(t)u(t) + k(y) + G(y - C\hat{x}) \quad (5)$$

$$\hat{y} = C\hat{x} \quad (6)$$

donde el estimador de la matriz de falla  $\hat{s}$  se deduce más adelante.

Definiendo al error de estimación como  $e = x - \hat{x}$ , la dinámica del error de estimación está dada por:

$$\dot{e} = (A - GC)e + B\hat{s}(t)u(t) \quad (7)$$

$$\hat{s} = s - \hat{s} \quad (8)$$

$$r = Ce \quad (9)$$

donde  $r$  es el residuo o discordancia entre la predicción del observador y lo sensado sobre la planta. A partir de las ecuaciones (7) y (9) puede establecerse la siguiente condición para detectar una falla:

$$\begin{cases} \|r(t)\| < \mu & \text{no hay evidencia de falla} \\ \|r(t)\| \geq \mu & \text{ha ocurrido una falla} \end{cases} \quad (10)$$

donde  $\mu$  es un umbral preespecificado, posiblemente establecido a partir de consideraciones probabilísticas. El instante  $t_f$  en que se detecta la falla es cuando se cumple la condición  $\|r(t_f)\| \geq \mu$ . Una vez que la falla ha sido detectada es necesario proceder a aislar la misma, es decir, ubicar en qué lugar se ha producido.

La falla de actuador es modelada por (3) de modo que la matriz  $s(t)$  toma el valor  $S = S_s$  constante cuando el funcionamiento es correcto (actuador sano) y cambia al valor  $S = S_f$  cuando el actuador falla. Puede entonces utilizarse un observador extendido para *estimar* el valor de  $S_f$  y aislar la falla. El modelo extendido viene dado por:

$$\dot{x} = Ax + BSu(t) + k(y) \quad (11)$$

$$\dot{S} = 0 \quad (12)$$

$$y = Cx \quad (13)$$

Esto sugiere considerar el siguiente observador:

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + B\hat{S}u(t) + k(y) + G(y - C\hat{x}) \quad (14)$$

$$\hat{y} = C\hat{x} \quad (15)$$

donde  $\hat{S}$  debe ser estimado. La ley de estimación debe garantizar la convergencia de los estados estimados a los verdaderos. La dinámica del error viene dada por la siguiente ecuación:

$$\dot{e} = (A - GC)e + B\tilde{S}u(t) \quad (16)$$

$$\dot{\tilde{S}} = S - \hat{S} \quad (17)$$

$$r = Ce \quad (18)$$

Es posible aplicar técnicas de Lyapunov (Hahn, 1967) para calcular una ley de adaptación que permita estimar el valor de los estados y el de la firma  $S$ . En efecto, la siguiente forma cuadrática es una función candidata de Lyapunov

$$V = e^T P e + \sum_{i=1}^m \tilde{S}_i^T \Gamma^{-1} \tilde{S}_i \quad (19)$$

donde  $P$  y  $\Gamma^{-1}$  son matrices definidas positivas y  $\tilde{S}_i$  es la  $i$ -ésima columna de la matriz  $\tilde{S}$  definida en (17). Entonces la derivada a lo largo de las trayectorias está dada por:

$$\dot{V} = \dot{e}^T P e + e^T P \dot{e} + \sum_{i=1}^m \dot{\tilde{S}}_i^T \Gamma^{-1} \tilde{S}_i + \sum_{i=1}^m \tilde{S}_i^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{S}}_i \quad (20)$$

Por lo tanto:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= (e^T A_c^T + u^T \tilde{S}^T B^T) P e + \\ &+ e^T P (A_c e + B \tilde{S} u) + \\ &+ \sum_{i=1}^m \dot{\tilde{S}}_i^T \Gamma^{-1} \tilde{S}_i + \sum_{i=1}^m \tilde{S}_i^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{S}}_i \end{aligned} \quad (21)$$

donde  $A_c = A - GC$  es una matriz de dimensión  $n \times n$ . Puesto que el par  $(C, A)$  es observable, se pueden asignar los  $n$  autovalores de  $A_c$  arbitrariamente cambiando  $G$ .

En consecuencia, si se llevan todos los autovalores de  $A_c$  a tener parte real negativa (matriz Hurwitz), entonces dada  $Q$  una matriz simétrica, positiva definida, existe  $P$  también simétrica y positiva definida, tal que

$$P A_c + A_c^T P = -Q \quad (22)$$

Además, si  $C(j\omega I - A_c)B$  es real positiva, es posible satisfacer la condición adicional,  $B^T P = C$  (lema de Kalman, Meyer y Yakubovich). Entonces, empleando la ley de adaptación:

$$\dot{\tilde{S}}_i = -\Gamma r u_i \quad i = 1, \dots, m \quad (23)$$

la derivada de la función candidata de Lyapunov es negativa y la convergencia a cero de  $\tilde{S}$  queda asegurada. Debe considerarse la condición de excitación persistente para lograr que el cero sea uniformemente asintóticamente estable (Söderstrom & Stoica, 1995).

Puesto que se considera a la matriz  $S$  constante,  $\dot{\tilde{S}} = -\hat{S}$  de modo tal que la ley dada por (23) en forma matricial para  $\hat{S}$  es:

$$\dot{\hat{S}} = \Gamma r u^T \quad (24)$$

### 3. EJEMPLO DE APLICACIÓN

A continuación se presenta un ejemplo donde se aplica la técnica propuesta para estimar una falla de actuador. Se considera el sistema

$$\dot{x}_1 = 3x_2 + su \quad (25)$$

$$\dot{x}_2 = -2x_1 - x_2 + 2x_3 - \sin(x_1) \quad (26)$$

$$\dot{x}_3 = x_4 \quad (27)$$

$$\dot{x}_4 = 2x_1 - x_3 - 3x_4 \quad (28)$$

$$y = x_1 \quad (29)$$

La entrada  $u$  es un escalón unitario. Se propone el siguiente observador para estimar los estados y la firma de la falla

$$\dot{\hat{x}}_1 = 3\hat{x}_2 + \hat{s}u + g_1(y - \hat{y}) \quad (30)$$

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_2 &= -2\hat{x}_1 - \hat{x}_2 + 2\hat{x}_3 - \sin(\hat{x}_1) + \\ &+ g_2(y - \hat{y}) \end{aligned} \quad (31)$$

$$\dot{\hat{x}}_3 = \hat{x}_4 + g_3(y - \hat{y}) \quad (32)$$

$$\dot{\hat{x}}_4 = 2\hat{x}_1 - \hat{x}_3 - 3\hat{x}_4 + g_4(y - \hat{y}) \quad (33)$$

$$\hat{y} = \hat{x}_1 \quad (34)$$

$$\dot{\hat{s}} = \gamma u(y - \hat{y}) \quad (35)$$

El vector de ganancia es  $G^T = [g_1, g_2, g_3, g_4]^T = [2.3, -1.53, 0.05, 2.133]^T$ , lo que asigna los autovalores de  $A_c$  a  $\lambda_1 = -1$ ,  $\lambda_2 = -1.5$ ,  $\lambda_3 = -1.8$ ,  $\lambda_4 = -2$ . El valor de  $\gamma$  es 1.3. Los resultados de simulación consideran dos casos. En el primero, en  $t = 10$  seg se simula una falla de actuador haciendo que el valor de  $s$  cambie de 1 a 0.5. En el segundo, se simula una falla de actuador distinta que lleva el valor de  $s$  de 1 a 1.5, también abruptamente en  $t = 10$  seg. El vector de condiciones iniciales de los estados es:  $[0.2, -0.1, 0.3, -0.2]^T$ . Las figuras 1-4 muestran las señales de error en los estados  $(x_i - \hat{x}_i, i = 1, \dots, 4)$  y la figura 5 la del error en la firma  $(s - \hat{s})$  para el primer caso. Mientras que las figuras 6-9 y 10 lo hacen para el segundo. Claramente puede verse que los errores de estimación convergen a cero en ambos casos.

### 4. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó un método para construir un observador que permite detectar y aislar fallas de actuador en una clase de sistemas no lineales. La aislación de fallas es posible a través de la estimación de una matriz de firma característica de cada falla.

En el ejemplo se obtuvieron resultados de simulación que muestran el correcto funcionamiento del esquema. Parece posible aplicar una metodología similar para el diseño de un observador para detectar fallas de actuador, ampliando la clase de sistemas no lineales a la cual se le puede aplicar el esquema propuesto.

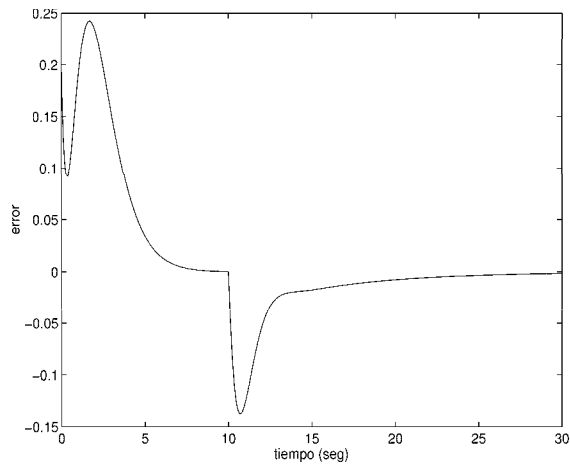


Figura 1: Error  $(x_1 - \hat{x}_1)$  para una falla de actuador en  $t = 10\text{seg}$ ,  $s$  cambiando de 1 a 0.5.

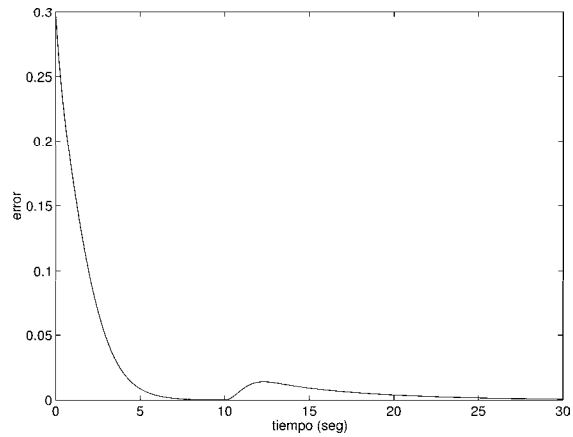


Figura 3: Error  $(x_3 - \hat{x}_3)$  para una falla de actuador en  $t = 10\text{seg}$ ,  $s$  cambiando de 1 a 0.5.

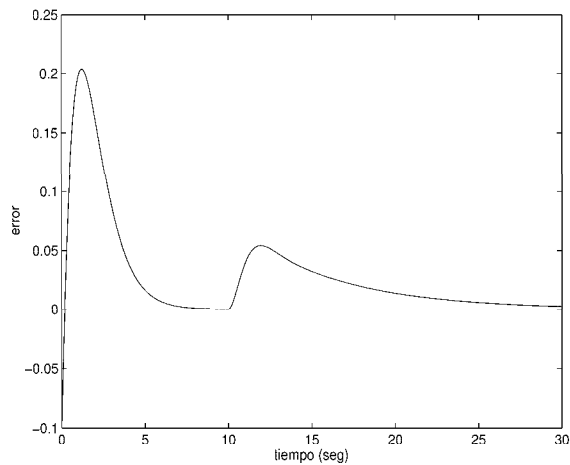


Figura 2: Error  $(x_2 - \hat{x}_2)$  para una falla de actuador en  $t = 10\text{seg}$ ,  $s$  cambiando de 1 a 0.5.

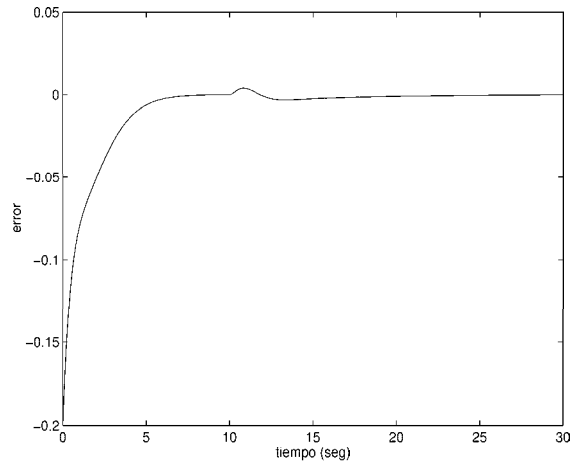


Figura 4: Error  $(x_4 - \hat{x}_4)$  para una falla de actuador en  $t = 10\text{seg}$ ,  $s$  cambiando de 1 a 0.5.

## REFERENCIAS

- P. Frank (1990). Fault Diagnosis in Dynamic Systems Using Analytical and Knowledge-based Redundancy - A Survey and Some New Results. *Automatica*, **26**, 459-474.
- W. Ge and C.Z. Fang (1988). Detection of faulty components via robust observation. *Int. J. Control*, **47**, 581-599.
- C.C Tsui (1994). A general failure detection, isolation and accomodation system with model uncertainty and measurement noise. *IEEE Trans. on Aut. Cont.*, **39**, 2318-2321.
- J.F. Magni and P. Mouyon (1994). On residual generation by observer and parity space approaches. *IEEE Trans. on Aut. Cont.*, **39**, 441-447.
- A. Medvedev (1996). Fault detection and isolation by functional continuous deadbeat observers. *Int. J. Control*, **64**, 425-439.
- H. Wang and S. Daley (1996). Actuator fault diagnosis: An adaptive observer-based technique. *IEEE Trans. on Aut. Cont.*, **41**, 1073-1078.
- J. Solsona, D. Kleiman y C. Muravchik (1991). Observadores con dinámica lineal del error para sistemas no lineales de control. *IV Reunión de Trab. en Procesam. de la Inform. y Cont. (RPIC'91)*, Bs. As, Argentina, 493-500.
- R. Marino and P. Tomei (1995). *Nonlinear Control Design. Geometric, adaptive and Robust*. Prentice-Hall, UK.
- W. Hahn (1967). *Stability of Motion*, Springer-Verlag.
- T. Söderstrom and P. Stoica (1995). *System Identification*, Prentice-Hall.

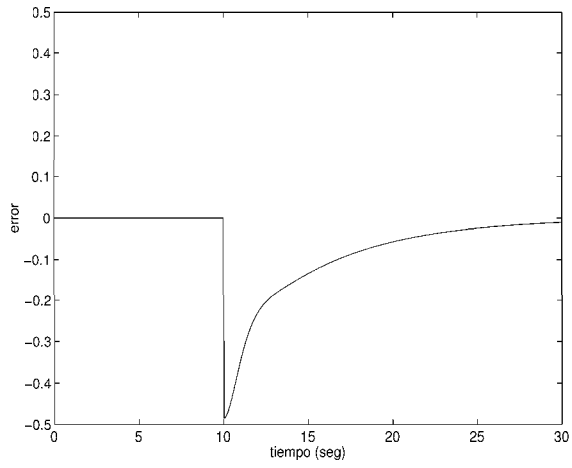


Figura 5: Error en la firma ( $s - \hat{s}$ ) para una falla de actuador en  $t = 10\text{seg}$ ,  $s$  cambiando de 1 a 0.5.

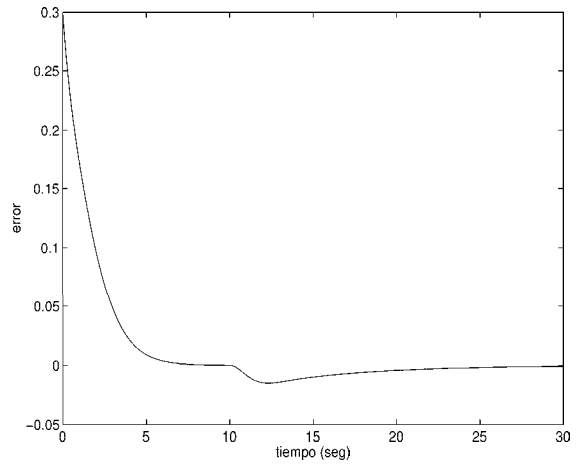


Figura 8: Error ( $x_3 - \hat{x}_3$ ) para una falla de actuador en  $t = 10\text{seg}$ ,  $s$  cambiando de 1 a 1.5.

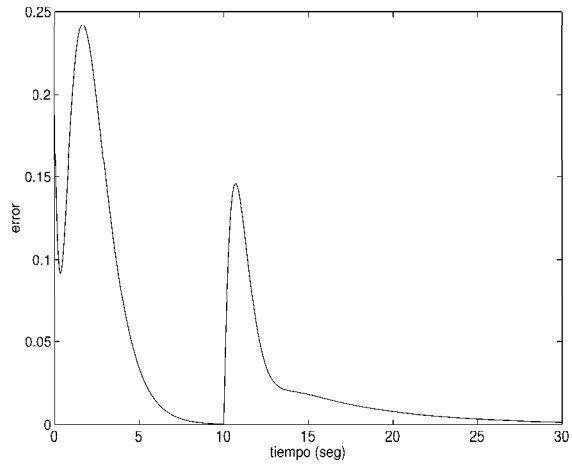


Figura 6: Error ( $x_1 - \hat{x}_1$ ) para una falla de actuador en  $t = 10\text{seg}$ ,  $s$  cambiando de 1 a 1.5.

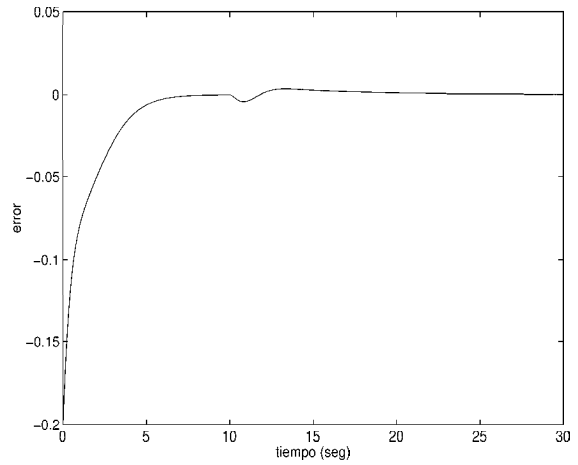


Figura 9: Error ( $x_4 - \hat{x}_4$ ) para una falla de actuador en  $t = 10\text{seg}$ ,  $s$  cambiando de 1 a 1.5.

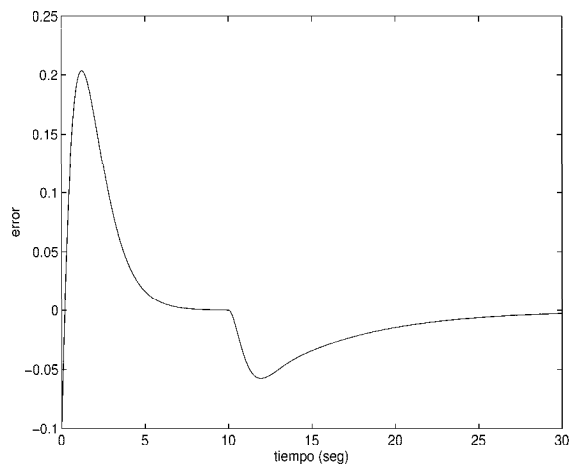


Figura 7: Error ( $x_2 - \hat{x}_2$ ) para una falla de actuador en  $t = 10\text{seg}$ ,  $s$  cambiando de 1 a 1.5.

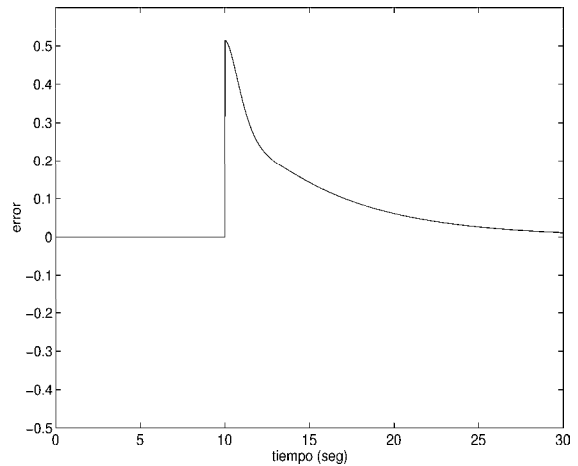


Figura 10: Error en la firma ( $s - \hat{s}$ ) para una falla de actuador en  $t = 10\text{seg}$ ,  $s$  cambiando de 1 a 1.5.