

DetECCIÓN Y AISLAMIENTO ROBUSTO DE FALLAS EN TIEMPO FINITO

Efraín Alcorta García^A, Francisco Eduardo López Castillo^A,
Salvador Saucedo Flores^B

^A Universidad Autónoma de Nuevo León, Posgrado en Ingeniería Eléctrica,
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

^B Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y
Eléctrica, Unidad Zacatenco (ESIME Zacatenco)

efrain.alcortagr@uanl.edu.mx.

RESUMEN

Seguridad y confiabilidad en la industria es una prioridad de la actualidad. Una forma de apoyarla es mediante el uso de sistemas de supervisión del desempeño, los cuales incluyen diagnóstico de fallas así como mecanismos de tolerancia de fallas. En este trabajo se propone un algoritmo robusto que converge en tiempo finito para la detección y aislamiento de fallas, permitiendo aumentar la confiabilidad de la detección a partir del tiempo de convergencia, el cual puede ser fijado arbitrariamente. El resultado se logra sin alterar la dinámica propia del residuo. El algoritmo es probado con un modelo de simulación.

PALABRAS CLAVE

Falla, generación de residuos, observadores, sistemas lineales, convergencia.

ABSTRACT

Nowadays, security and reliability in the industry is a priority. A way to support it is by using performance monitoring systems, which include diagnosis and tolerance mechanisms failures. In this work is proposed a robust algorithm that converges in finite time, for failure detection and isolation allowing to increase the reliability of detection from the time of convergence, which can be set arbitrarily. The result is achieved without altering the dynamics of the residue. The algorithm is tested with a simulation model.

KEYWORDS:

Fault, residual generation, observers, linear systems, convergence.

INTRODUCCIÓN

Como una manera de apoyar la mejora de los niveles de seguridad y confiabilidad de procesos industriales, se han desarrollado algoritmos de diagnóstico de fallas, los cuales básicamente pueden ser entendidos como la realización de tres actividades: detección, aislamiento e identificación de fallas. Cada una de estas acciones se ha convertido en un área de investigación importante debido, entre otras cosas, a los efectos que pueden ocasionar fallas en el flujo de producción e inclusive en la generación de paros no programados. Así mismo, la información acerca de ocurrencia de fallas incipientes puede ser

utilizada para realizar mantenimiento predictivo, o bien, reducir los efectos de las fallas, ya sea en el número de paros no programados así como en la duración de estos.

En los algoritmos de diagnóstico de fallas generalmente se requiere de la obtención de señales que dependen de las fallas, llamadas residuos. Los residuos juegan un papel protagónico en el diagnóstico. De las diferentes formas para generar residuos una manera comúnmente utilizada es mediante el uso de observadores de la salida, ver por ejemplos en: P. M. Frank¹, S. X. Ding², C. Chen & R. Patton³ y R. Iserman⁴. La generación de residuos utilizando observadores, a diferencia de otras técnicas, permite ajustar algunas características de desempeño de estos mediante la selección de ganancias del observador o mediante post-filtrado. Una situación asociada al uso de generadores de residuos basados en observadores, es que el hecho de que el efecto de las condiciones iniciales desaparece solo de manera asintótica. Esta situación generalmente se minimiza argumentando que solo hace falta esperar un tiempo suficiente, pero que en la práctica es difícil de estimar con precisión. En contraste, se busca reducir el tiempo de convergencia de los generadores de residuos mediante la selección de la dinámica, como muestran S. X. Ding², C. Chen & R. Patton³ y R. Iserman⁴.

El diseño de la dinámica que reduzca el tiempo de convergencia pudiera comprometer la respuesta esperada, por lo que sería deseable contar con un procedimiento que permita la convergencia del generador de residuos en tiempo arbitrario (y pre-establecido) sin comprometer la dinámica del generador de residuos. Este problema, tal y como se discute previamente, no ha sido planteado. En la literatura existe un procedimiento reportado con características de convergencia en tiempo finito⁵, el cual está fundamentado en un enfoque de orden reducido, el cual puede ser limitante al desempeño de los algoritmos de diagnóstico³.

Aquí se propone un algoritmo robusto para la detección y aislamientos de fallas para sistemas con entradas desconocidas, el algoritmo propuesto cuenta con la propiedad de convergencia en tiempo finito. El algoritmo propuesto además de ser robusto es de orden completo y converge en tiempo finito. El resultado propuesto aquí está basado en el esquema introducido en *A Continuous-Time Observer Which Converges in Finite Time*⁶ tal y como lo hacen en *A Finite Time Unknown Input Observer For Linear Systems*⁵, pero utilizando un observador de orden completo con entradas desconocidas. El algoritmo propuesto permite la convergencia en tiempo finito arbitrario, la dinámica independiente del generador de residuos, así como un espectro amplio para el diagnóstico de fallas, como se muestra en los ejemplos planteados por S. X. Ding², C. Chen³ y R. Iserman⁴.

PRELIMINARES

En esta sección se revisan los antecedentes que son utilizados para el desarrollo del algoritmo de diagnóstico y aislamiento de fallas propuesto. La base se encuentra en el diseño de observadores con convergencia de tiempo finito, así como en los observadores (robustos) con entradas desconocidas.

Observadores con convergencia de tiempo finito

La convergencia en tiempo finito de observadores de Luenberger lineales es tomada de R. Engel et al.⁶ Se considera un sistema lineal invariante en el tiempo dado por

$$\begin{aligned} \frac{dx(t)}{dt} &= Ax(t) + Bu(t) + Ed(t) + Ff(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (1)$$

donde $x \in \mathfrak{R}^n$, $u \in \mathfrak{R}^m$ y la salida $y \in \mathfrak{R}^p$. Considera que el par (A, C) es observable (detectable al menos). Después se define dos observadores identidad para el sistema (1) con $f(t)=d(t)=0$, es decir,

$$\begin{aligned} \frac{dz_1(t)}{dt} &= (A - H_1C)z_1(t) + H_1y(t) + Bu(t) \\ \frac{dz_2(t)}{dt} &= (A - H_2C)z_2(t) + H_2y(t) + Bu(t) \end{aligned} \quad (2)$$

Se definen las siguientes matrices como:

$$\begin{aligned} \mathfrak{S} &:= \begin{pmatrix} A - H_1C & 0 \\ 0 & A - H_2C \end{pmatrix}; \quad z(t) := \begin{pmatrix} z_1(t) \\ z_2(t) \end{pmatrix} \\ H &:= \begin{pmatrix} H_1 \\ H_2 \end{pmatrix}; \quad G := \begin{pmatrix} B \\ B \end{pmatrix}; \quad T := \begin{pmatrix} I_n \\ I_n \end{pmatrix}; \end{aligned}$$

Asignando H y el retraso de tiempo D tal que \mathfrak{S} es estable, y $|T - e^{\mathfrak{S}D}T| \neq 0$ el estimado \hat{x} de x está dado por

$$\begin{aligned} \hat{x} &= K[z(t) - e^{\mathfrak{S}D}z(t-D)] \\ \text{con} \\ \frac{dz(t)}{dt} &= \mathfrak{S}z(t) + Hy(t) + Gu(t) \\ K &= [I_n \quad 0][T - e^{\mathfrak{S}D}T]^{-1} \end{aligned}$$

Como es destacado en R. Engel et al.⁶, teóricamente es posible hacer converger al observador en un instante muy corto de tiempo D . La ecuación del estimado de \hat{x} es obtenida del hecho de que el error de estimación satisface un sistema de ecuaciones diferenciales lineales, como es:

$$\frac{d}{dt}(T\hat{x}(t) - z(t)) = \mathfrak{S}(T\hat{x}(t) - z(t))$$

De donde se deduce que la siguiente relación es válida:

$$T\hat{x}(t) - z(t) = e^{\mathfrak{S}D}(T\hat{x}(t-D) - z(t-D))$$

y que es de donde se obtiene el resultado reportado en R. Engel et al.⁶, la cual representa una forma ingeniosa de resolver el problema de convergencia finita del observador.

Observador robusto a entradas desconocidas

Los resultados del observador robusto de orden completo con entradas desconocidas son tomados de M. Darouach ⁷. Considerando al sistema (1) con $f(t)=0$. Un observador con entradas desconocidas robusto a $d(t)$ es dado por:

$$\begin{aligned} \frac{d\zeta(t)}{dt} &= M\zeta(t) + Hy(t) + Gu(t) \\ \hat{x}(t) &= \zeta(t) - \Gamma y(t) \end{aligned} \quad (3)$$

con:

$$\begin{aligned} \Gamma &= -E(CE)^+ + W(I_p - (CE)(CE)^+) \\ (CE)^+ &= \{(CE)^T (CE)\}^{-1} (CE)^T \\ P &= I_n + \Gamma C \\ M &= PA - K_r C \\ H &= K_r - M\Gamma \\ G &= PB \end{aligned} \quad (3a)$$

Donde W es una matriz de ponderación arbitraria, la cual puede ser cero; M debe ser estable (con valores propios con parte real negativa, lo cual se puede garantizar si el par $[PA, C]$ es detectable al menos o bien observable).

Note que mediante la definición (o la redefinición) de las matrices E y F es posible la manipulación de la sensibilidad del estimado a las entradas desconocidas, las cuales pudieran ser fallas. Las condiciones de existencia se pueden resumir como sigue:

Teorema 1. Para el sistema (1) con $f(t)=0$, existe un observador (3) si y solo si las siguientes condiciones se verifican (M. Darouach et al.⁷):

1. $\text{Rango}(CE) = \text{Rango}(E)$

2. $\text{rango} \begin{pmatrix} sP - PA \\ C \end{pmatrix} = n, \forall s \in C \text{ y } \text{Re}(s) \geq 0$ *

ALGORITMO PROPUESTO PARA LA DETECCIÓN Y DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN TIEMPO FINITO

Un procedimiento de diagnóstico de fallas generalmente consta de los siguientes pasos (P. M. Frank ¹):

1. **Generación de residuos.** Es una señal que idealmente depende solo de las fallas. En la práctica los residuos se pueden ver afectados por incertidumbre y están solo cercanos a cero.
2. **Evaluación de residuos.** Aquí se extrae la información sobre la ocurrencia de fallas. Principalmente se utiliza una función de evaluación y una comparación con un umbral.
3. **Identificación de fallas.** Se extrae de los residuos la información sobre magnitud y tiempo de ocurrencia de una falla.

Se deja fuera de consideración a la identificación de fallas, examinando sólo el problema de detección y aislamiento de estas. Note que un aspecto central para su diagnóstico y aislamiento es el diseño de generadores de residuos.

Generación de residuos

Dentro de las diferentes variantes de generación de residuos disponibles en la literatura (consultar los libros: *Robust Model-Based Fault Diagnosis for Dynamic Systems*³, *Fault-Diagnosis Systems An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance*⁴ y *Diagnosis and Fault-Tolerant Control*⁸), se pueden resumir en tres grandes grupos: espacio de paridad, observadores, así como métodos basados en identificación. Entre los dos primeros existe una cierta relación de equivalencia así como un diseño unificado². Entre los dos primeros y el tercero existe una relación de complementariedad⁹.

Dada la enorme variedad de métodos de diseño con entradas desconocidas se estudia el enfoque basados en observadores, se dispone también de una gran variedad de métodos de diseño para generadores de residuos. Los cuales pueden ser burdamente catalogados como enfoques de orden completo y de orden reducido.

Los diseños que están basados en observadores de orden reducido pueden encontrar problemas que son de otra forma (con observadores de orden completo) solubles. Esto queda de manifiesto cuando se utiliza el esquema de orden reducido presentado por Y. Guan and M. Saif¹⁰ con el sistema demostrado por Luan, J.H.,¹¹ el cual tiene un problema cuando el subsistema calculado robusto a las perturbaciones es inestable y la ley de control nominal no logra estabilizarlo. En este caso es bien sabido que no se puede hacer diagnóstico de fallas M. Kinnaert et al.¹². Esta situación se verá ejemplificada más adelante mediante un modelo presentado por Luan, J.H.¹¹ y retomado en este trabajo.

Considerar el sistema con fallas y perturbaciones dado por (1), se tiene el siguiente resultado:

Teorema 2. *El sistema (C. Chen & R. Patton³):*

$$\begin{aligned} \frac{d\zeta(t)}{dt} &= M\zeta(t) + Hy(t) + Gu(t) \\ r(t) &= L_1y(t) + L_2\zeta(t) - L_2\Gamma y(t) \end{aligned} \quad (4)$$

Representa un generador de residuos de orden completo y robusto a las perturbaciones $d(t)$, si se satisfacen las ecuaciones (3a) y la siguiente condición se cumple:

$$L_1C + L_2 = 0$$

Nota 1. El proceso para determinar la aparición de una falla requiere, en general, del diseño de un valor de umbral, con la finalidad de evitar falsas alarmas. El diseño de umbrales para la detección no es discutido en este trabajo, el lector interesado es remitido a literatura especializada, como ejemplifican S. X. Ding² y M. Blanke et al.⁸

Nota 2. Las fallas investigadas en este trabajo se considera que se manifiestan francas en el residuo y el mínimo nivel de falla que puede ser detectado, está en función del nivel de incertidumbre y el valor de umbral que se seleccione.

La idea consiste en hacer converger al generador de residuos robusto (3) en tiempo finito siguiendo las ideas presentadas por R. Engel et al.⁶ y descritas brevemente en los preliminares. Para esto se requieren dos conjuntos de valores propios (estables, es decir, con parte real negativa), a ser asignados. Los demás pasos se volverán a describir aquí, pero aplicados al observador de orden completo con entradas desconocidas.

Propuesta 1. *Dado un sistema (1) y se supone que las condiciones de los teoremas 1 y 2 se satisfacen. Asignando $D>0$ y una selección adecuada de las matrices H_1 y H_2 . Entonces el sistema (2) construido para el sistema (3) es un generador de residuos robusto que converge en tiempo finito predeterminado por el valor D .**

Prueba. Asumiendo que las condiciones de existencia para los teoremas 1 y 2 se satisfacen, se procede a construir un generador de residuos (3), robusto a las variables representadas por $d(t)$ en (1). El diseño del generador de residuos con convergencia en tiempo finito se sigue de la observación de la obtención de dos ecuaciones dinámicas para el generador de residuos de orden completo y robusto a las perturbaciones $d(t)$ mediante:

$$\begin{aligned} \frac{d\zeta_1(t)}{dt} &= M_1\zeta_1(t) + H_1y(t) + \bar{G}u(t) \\ \frac{d\zeta_2(t)}{dt} &= M_2\zeta_2(t) + H_2y(t) + \bar{G}u(t) \\ \text{con} \\ \Gamma &= -E(CE)^+ + W(I_p - (CE)(CE)^+) \\ (CE)^+ &= \{(CE)^T(CE)\}^{-1}(CE)^T; \quad P=I_n + \Gamma C \\ M_1 &= PA - K_{r1}C; \quad M_2 = PA - K_{r2}C \\ H_1 &= K_{r1} - M_1\Gamma; \quad H_2 = K_{r2} - M_2\Gamma; \quad \bar{G} = PB \end{aligned}$$

El estimado de $\zeta(t)$ con convergencia en tiempo finito D está dado por:

$$\hat{\zeta}(t) = K[\zeta(t) - e^{3D}\zeta(t-D)] \tag{5}$$

El cual se logra con la definición de las matrices:

$$\begin{aligned} \mathfrak{S} &:= \begin{pmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_2 \end{pmatrix}; \quad \zeta(t) := \begin{pmatrix} \zeta_1(t) \\ \zeta_2(t) \end{pmatrix} \quad H := \begin{pmatrix} H_1 \\ H_2 \end{pmatrix}; \quad G := \begin{pmatrix} \bar{G} \\ \bar{G} \end{pmatrix}; \\ T &:= \begin{pmatrix} I_n \\ I_n \end{pmatrix}; \end{aligned}$$

Asignando H_1 y H_2 , de tal forma que junto con el retraso de tiempo $D>0$, se tiene que $|T - e^{3D}T|$ y dado que \mathfrak{S} es seleccionado estable. El generador de residuos resulta entonces de utilizar (5) en:

$$r(t) = L_1y(t) + L_2\zeta(t) - L_2\Gamma y(t)$$

La propiedad de robustez de los observadores frente a la perturbación se obtiene del teorema 1; mientras que la propiedad de ser generador de residuos de la condición adicional dada en el teorema 2 y la convergencia en tiempo finito al aplicar el algoritmo de R. Engel. ⁶

Nota 3. Una versión antigua de la propuesta 1 ha sido previamente presentada por E. Alcorta Garcia et al.¹³ La diferencia básicamente consiste en que ahora se puede garantizar que la matriz $\begin{bmatrix} T & e^{SD}T \end{bmatrix}$, no será singular para algún valor de D siempre que H_1 y H_2 sean seleccionadas de tal forma que las matrices $A-H_1C$ y $A-H_2C$ tengan valores propios suficientemente distintos para alguna $D>0$.

EJEMPLO DE APLICACIÓN

Con la finalidad de mostrar el procedimiento propuesto, se considera el modelo linealizado del sistema de control de posición de una aeronave, el cual ha sido previamente utilizado por Luan, J.H.¹¹ y tomado como ejemplo en E. Alcorta Garcia et al¹³.

MODELO Y CONTROL

Considerar el siguiente sistema lineal

$$\begin{aligned} \frac{dx(t)}{dt} &= Ax(t) + Bu(t) + Ed(t) + Ff(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (6)$$

Donde

$$x^T(t) = [\dot{\phi}(t) \quad \dot{\theta}(t) \quad \dot{\psi}(t) \quad \phi(t) \quad \theta(t) \quad \psi(t)]$$

Es el vector de estado donde ϕ, θ y ψ representan los ángulos de guiada, balanceo y cabeceo respectivamente $\dot{\phi}, \dot{\theta}$ y $\dot{\psi}$ las correspondientes velocidades angulares; la entrada de control consta de tres elementos asociados con fuerzas en cada dirección: $u^T = [L_x \ L_y \ L_z]$; la incertidumbre $d(t)$ consiste en incertidumbre del modelo:

$$d(t) = [1 \times 10^{-4} \quad 2 \times 10^{-4} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]x(t)$$

Y las matrices del sistema:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 2.5 \times 10^{-4} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1.43 \times 10^{-4} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} 0.0125 & 0 & 0 \\ 0 & 0.011 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0143 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad E = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad F = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix};$$

F es igual a la primer columna de B y C es la matriz identidad de orden 6 (todos los estados están disponibles para medición. Este sistema es inestable en lazo abierto, con lo que para poder realizar la tarea de diagnóstico es necesario primero estabilizarlo mediante una retroalimentación de estado dada por: $u(t) = K_x x(t) + K_{ref} r(t)$; con:

$$K_x = \begin{bmatrix} 260 & 0 & 0.02 & 200 & 0 & 0 \\ 0 & 295.4 & 0 & 0 & 204.5 & 0 \\ -0.006 & 0 & 227.3 & 0.0045 & 0 & 183.6 \end{bmatrix}$$

$$K_{ref} = \begin{bmatrix} 200 & 0 & 0 \\ 0 & 204.5 & 0 \\ 4.88 \times 10^{-3} & 0 & 183.6 \end{bmatrix}$$

Las ganancias anteriores permiten una ubicación de polos en $\{-2,-1.25,-1.75,-1.5,-2.5,-1\}$ para una referencia dada con fines de mostrar el algoritmo $r^T(t) = r^T = [-0.5 \ 0.5 \ 1]$ para las posiciones angulares. El comportamiento nominal del sistema (con $f(t)=0$) puede verse en la figura 1.

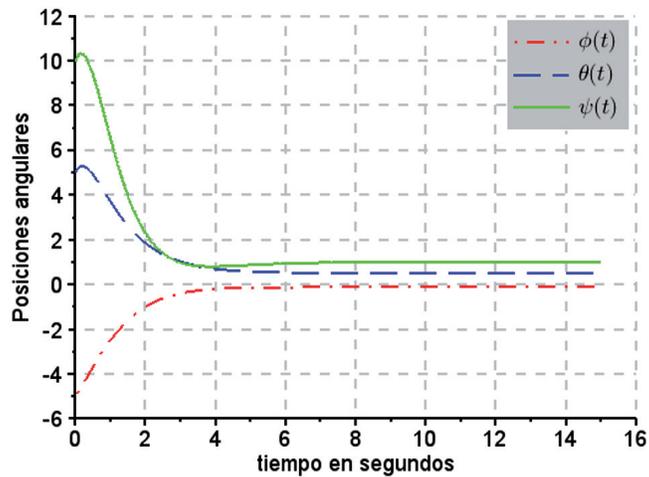


Fig. 1. Evolución de los ángulos del sistema en lazo cerrado.

DISEÑO DEL GENERADOR DE RESIDUOS

Primeramente se verifican las condiciones de existencia. La primera condición se cumple sin problemas y la segunda es equivalente a que el par (PA, C) sea observable. Construyendo P utilizando $W=0$. Se verifica la observabilidad y por lo tanto la existencia del generador residual robusto.

$$M_1 = \begin{bmatrix} -3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -3.1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -3.2 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -3.3 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -3.4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -3.5 \end{bmatrix}$$

$$K_{r1} = \begin{bmatrix} 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3.1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.00025 & 0 & 3.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3.3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3.4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3.5 \end{bmatrix}$$

$$\bar{G} = \begin{bmatrix} 0.0125 & 0 & 0 \\ 0 & 0.011 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$H_1 = \begin{bmatrix} 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3.1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.00025 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3.3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3.4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 3.5 \end{bmatrix}$$

Seleccionando $D=0.1$. Las demás matrices se obtienen directamente a partir de las fórmulas antes mencionadas.

Resultados de simulación

Los resultados pueden apreciarse en la figura 2, donde se presentan las respuestas de los generadores de residuos con convergencia asintótica y en tiempo finito.

En la figura 3 se presenta la respuesta de ambos observadores generadores de residuos cuando se presenta una falla en $t=0.5$ s. Como se puede apreciar, en los residuos con convergencia asintótica, la manifestación de la falla en el residuo cuando el efecto de las condiciones iniciales no ha desaparecido, obscurece la posibilidad de reconocer que la falla ha ocurrido. Note que a pesar de seleccionar un radio de convergencia arbitrario, el tiempo que tarda el residuo en que desaparezca el efecto de las condiciones iniciales no se puede determinar de forma exacta, pues depende también del valor de la condición inicial. En la misma figura se puede apreciar que en el caso de la convergencia en tiempo finito, es claro a partir de qué momento el residuo es confiable. Esto da una ventaja en cuanto al aspecto práctico y de confiabilidad de los algoritmos utilizados para la detección y aislamiento de fallas.

Lo anterior sugiere que el aspecto de convergencia en tiempo finito debe ser considerado como necesario en el diseño e implementación de algoritmos para este fin.

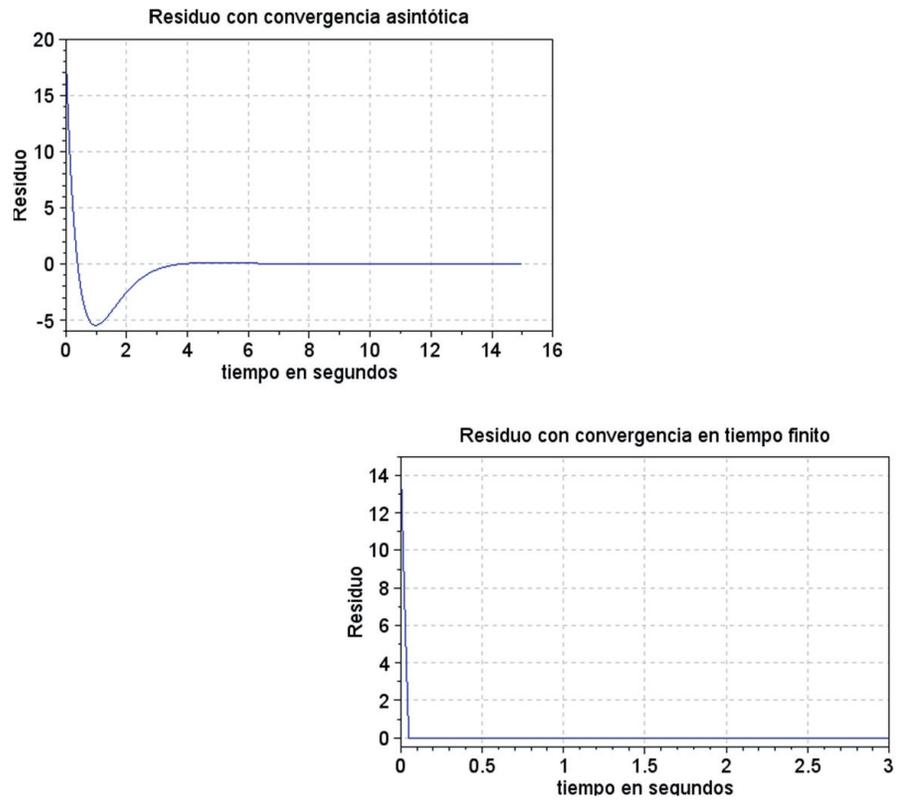


Fig. 2. Evolución de los residuos tanto asintótico como el que converge en tiempo finito.

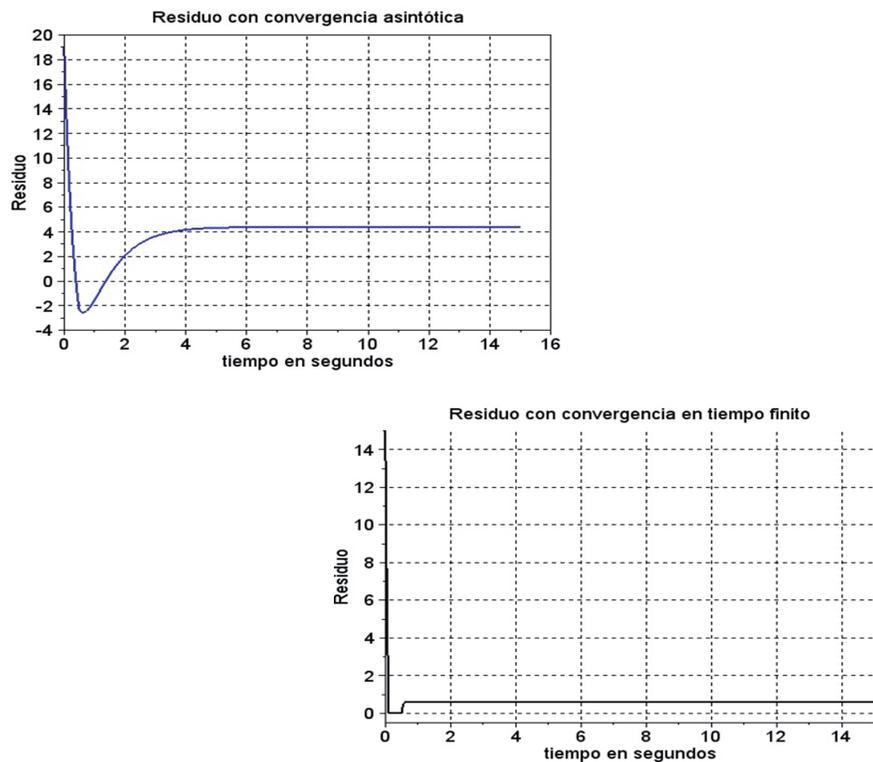


Fig. 3. Evolución de los residuos en la presencia de fallas.

CONCLUSIONES

La detección y aislamiento de fallas se puede hacer de forma robusta y con tiempo de convergencia arbitrariamente corto. Esto sin la necesidad de recurrir a técnicas no lineales como en el caso de los modos deslizantes o bien, al uso de discontinuidades. El enfoque propuesto considera una estructura de orden completo que permite la solución de problemas que no se pueden resolver con esquemas de orden reducido.

REFERENCIAS

- 1 Frank P. M. *Fault Diagnosis in Dynamic Systems using Analytical and Knowledge-Based Redundancy - A Survey and some New Results* Nueva York: Automatica, Vol. 26, No. 3, pp. 459 - 474, 1990.
- 2 Ding S. X. *Model-based fault diagnosis techniques*, Londres; Nueva York: Springer, 2013.
- 3 Chen C., Patton R. , *Robust Model-Based Fault Diagnosis for Dynamic Systems*, Boston: Kluwer Academic Publisher, 1999.
- 4 Iserman R. *Fault-Diagnosis Systems An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance*, Berlin ; New York: Springer 2006.
- 5 Raff T., Lachner F., Allgower F. *A Finite Time Unknown Input Observer For Linear Systems*, Italia, Conferencia: MED '06. 14th Mediterranean Conference on Control and Automation, 2006.
- 6 Engel R., Kreisselmeier G. *A Continuous-Time Observer Which Converges in Finite Time*, Nueva York: IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 47, No. 7, July 2002.
- 7 Darouach M., Zasadzinski M., Xu, S. J. *Full order observers for linear systems with unknown inputs*, Nueva York: IEEE Transactions on Automatic Control, 39 (3), pp.606-609, 1994.
- 8 Blancke M., Kinnaert M., Lunze J., Staroswiecky M. *Diagnosis and Fault-Tolerant Control*, Nueva York: Springer 2006.
- 9 Alcorta-García, E., Frank P. M. *On the relationship between observer-based and identification based approaches*, San Francisco, CA. USA: IFAC World Congress, 1996.
- 10 Guan Y., Saif M. *A Novel Approach to the Design of Unknown Input Observers*, Nueva York: IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 36, No. 5, May 1991.
- 11 Luan, J. H., Zhao, T. D. *Novel design of actuator fault reconstruction*, Bradford, England: International Journal of Aircraft Engineering and Aerospace Technology 80, pp.44–50, 2008.
- 12 Kinnaert M., Hanus R., Arte P. *Fault detection and isolation for unstable linear systems*, Nueva York: IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 40, Iss. 4, p.740-742, 1995.
- 13 Alcorta García E., López Castillo F. E., Díaz Romero D. A. *Generación residual con convergencia en tiempo finito basada en observadores*, México: IEEE CINDET 2015. Cuernavaca Morelos, 2015..