

Detección de Fallas en Sistemas Retroalimentados

A. D. González Yzcoa, E. Alcorta García, C. Elizondo González
Posgrado en Ingeniería Eléctrica
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Universidad Autónoma de Nuevo León, México
danieldeutsch86@gmail.com, efrain.alcortagr@uanl.edu.mx

Resumen—La aplicación de procedimientos de detección de fallas en procesos industriales es una práctica que va en incremento debido a que hoy en día se requiere una mayor seguridad de operación en dichos procesos. En muchas ocasiones se requiere que el diagnóstico de fallas sea realizado con la información disponible, la cual frecuentemente proviene de sistemas que operan en lazo cerrado. En este trabajo se revisa de forma detallada el efecto que tiene el control en lazo cerrado sobre el residuo utilizado en la detección de fallas cuando este se basa en generar un residuo con observadores. Como resultado se caracteriza los tipos de fallas que se ven afectadas por el control en lazo cerrado y se propone una forma de compensar dicho efecto. Los resultados son ilustrados mediante un ejemplo. © AMCA.

Palabras clave: Detección de fallas, Observadores, Retroalimentación, Residuos.

I. INTRODUCCIÓN

El uso de esquemas de detección de fallas en procesos industriales es una práctica que se incrementa con el paso del tiempo. Esto debido a las demandas cada vez más exigentes de calidad, confiabilidad y desempeño que se imponen a la industria. En general es requerido que la detección de fallas se realice en tiempo real, es decir, durante la operación del proceso, la cual es en muchos casos en lazo cerrado. Lo anterior para poder obtener el desempeño requerido. Una pregunta que surge de forma natural es cuando la acción del control puede contravenir la sensibilidad para la detección de fallas. Esta pregunta surge con frecuencia en la comunidad de diagnóstico de fallas, así como el cuestionamiento sobre si la calidad de la detección se ve afectado por la retroalimentación y si en un momento dado, el efecto del control puede evitar que se logre la detección de alguna falla. Hay pocos trabajos reportados en la literatura que analicen esta situación de forma clara y contundente.

Uno de los primeros trabajos considerando el tema fue (Kilsgaard *et al.*, 1996), en donde se discute el diseño simultáneo de controlador y detector de fallas. El tema de detección en lazo cerrado es tratado de manera explícita, aun y cuando no es el tema central del trabajo. Siguiendo estas ideas, en (Niemann y Stoustrup, 1997) se discuten aspectos de robustez del diagnóstico de fallas frente a incertidumbre comparando el caso de lazo abierto y cerrado. Se reporta que no hay diferencia entre ambas situaciones (lazo abierto y cerrado) desde el punto de vista de diagnóstico si no hay incertidumbre. En el caso de incertidumbre se reporta

la necesidad de un compromiso entre desempeño del lazo cerrado y la detección de fallas. Es importante enfatizar que los resultados son obtenidos para fallas aditivas.

Otro trabajo que considera el tema incluyendo incertidumbre y representación aditiva de fallas es (Ding *et al.*, 1998), en donde se reporta que en ambos casos puede llegar a obtenerse el mismo desempeño si se incluye información sobre el control para el diseño del algoritmo de diagnóstico.

La consideración de fallas multiplicativas con esquemas que utilizan observadores no lineales fue realizada en (Alcorta García *et al.*, 1998), pero en lazo abierto. Así mismo, utilizando técnicas de optimización μ mezclada es reportado un procedimiento para el diagnóstico de fallas que considera el diseño simultáneo de control y filtro detector de fallas en (Stoustrup y Niemann, 1999) y (Felício *et al.*, 2002), sin embargo, no se hace incipie en la problemática que puede surgir. El diseño requiere que necesariamente se utilice el procedimiento simultáneo para el control y el diagnóstico. Adicionalmente, se reporta en (Felício y Lourtie, 2005) problemas para aplicar el procedimiento reportado en (Felício *et al.*, 2002) a circuito eléctrico simple (R-L-C).

Una solución al problema de diagnóstico de fallas multiplicativas para sistemas retroalimentados es propuesto en (Join *et al.*, 2004) utilizando el concepto de planitud y bajo el supuesto de disponibilidad de la salida y sus derivadas temporales, lo cual puede llegar a ser un problema para sistemas sujetos a ruido. Para el caso de métodos de diagnóstico de fallas basados en datos en (McNabb y Qin, 2005) se muestra como la acción de control puede oscurecer el diagnóstico. Una solución basada en desigualdades lineales matriciales fue propuesta en (Henry y Zolghadri, 2005), pero solo considera fallas aditivas. En (Niemann, 2006) se reporta una solución al problema de diagnóstico en lazo cerrado utilizando el concepto de diagnóstico activo de fallas, el cual utiliza señales auxiliares inyectadas al sistema para garantizar la detectabilidad. Un aspecto interesante es que la solución propuesta se mantiene dentro del marco lineal.

Algunos aspectos de análisis de la detectabilidad de fallas paramétricas en lazo cerrado en el dominio de la frecuencia fueron realizadas en (Baikheche *et al.*, 2006). Una idea interesante es propuesta en (Marzat *et al.*, 2009), en donde se utiliza el análisis de la señal de control para el diagnóstico.

A pesar de no utilizarse el modelo en la construcción del generador de residuos, este requiere ser conocido, además, de que el procedimiento no es sistemático.

Así mismo, el problema ha sido pasado por alto frecuentemente en esquemas de control tolerante a fallas que requieren identificar la falla antes de reconfigurar el control, un resumen de métodos de tolerancia a fallas están reportados en el survey paper (Zhang y Jiang, 2008).

En este trabajo se presenta primeramente un análisis del efecto de una ley de control (retroalimentación de estado) en la generación de residuos basado en observadores. Se muestra que el diagnóstico de fallas aditivas no se ve afectado por el control en lazo cerrado cuando no hay incertidumbre. En el caso de fallas multiplicativas se reporta un efecto de la acción de control sobre el generador de residuos. Estos resultados no son completamente nuevos, pero la forma en la que se presentan es novedosa. Segundo, basados en el conocimiento del control se propone una compensación al residuo que permite que como resultado del residuo (con compensación) sea directamente la falla multiplicativa. La solución propuesta es sencilla y novedosa.

El trabajo es organizado como sigue: En la sección 2 se revisa el concepto de diagnóstico basado en modelos; El análisis del efecto del control en el diagnóstico es presentado en la sección 3; Un ejemplo es mostrado en la sección 4; En la sección 5 se presenta la conclusión.

II. DIAGNÓSTICO BASADO EN MODELOS

La detección de fallas basada en modelos se puede realizar siguiendo dos pasos básicos (Frank, 1990): a) Generando señales las cuales se pretende que dependan solamente de las fallas y no de la entrada. Estas señales son llamadas **residuos**. Los cuales idealmente deben de ser cero si no se encuentran bajo la influencia de fallas y diferentes de cero si existe el efecto de alguna falla. b) **Evaluación de residuos**, para extraer la información sobre las fallas, ya sea de magnitud, localización entre otras características, ver figura 1. Eventualmente la evaluación del residuo se hace utilizando una función de evaluación y un valor de umbral, los cuales nos permiten extraer la información requerida de las fallas. Además el valor umbral permite que desviaciones del residuo producidas por incertidumbre o perturbaciones no sean confundidas con las fallas.

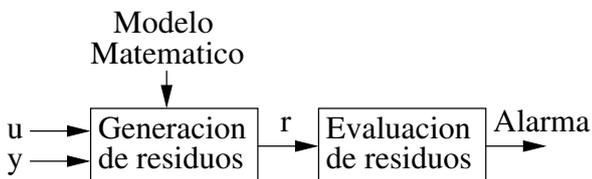


Figura 1. Esquema del diagnóstico de fallas basado en modelos

Considerar un sistema lineal e invariante en el tiempo

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + Ef(t) \\ y(t) &= Cx(t), \quad x(0) = x_0 \end{aligned} \quad (1)$$

donde $u \in \mathbb{R}^p$ es el vector de entradas; $y \in \mathbb{R}^m$ es el vector de salidas; $f \in \mathbb{R}^s$ es el vector de fallas. El primer paso para la detección de fallas es la generación de residuos (Frank, 1990). Para realizar el generador de residuos se puede utilizar un generador de residuos basado en observadores, utilizando observadores de tipo Luenberger (Chen y Patton, 1999), (Ding, 2008):

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}(t) &= A\hat{x}(t) + Bu(t) + L(y(t) - C\hat{x}(t)) \\ r(t) &= -C\hat{x}(t) + y(t) \end{aligned} \quad (2)$$

donde $\hat{x}(t) \in \mathbb{R}^s$ es el vector de estados del generador de residuos.

III. ANÁLISIS DE FALLAS EN SISTEMAS RETROALIMENTADOS

El análisis de fallas en sistemas retroalimentados depende del tipo de modelo de la falla que se utiliza para cada una de las diferentes situaciones: fallas en sensor, actuador o componente, falla aditiva o multiplicativa. Con la finalidad de mantener un mismo marco para las diferentes situaciones se considera que el sistema y el observador que forma al residuo son retroalimentados por $u(t) = w(t) - Kx(t)$, considerando $w(t)$ como referencia. Para mostrar los efectos generados por la retroalimentación en cada tipo de falla por separado se considera solo una falla. Es importante destacar que si se desea hacer localización de fallas, es posible aplicar primero algún procedimiento de desacoplo y después el análisis que se presenta a continuación vuelve a ser válido.

III-A. Modelo de Fallas Aditivas

Una falla aditiva se representa como un cambio en la entrada (para el caso de actuador) o la salida (para el caso de sensor) del modelo del sistema.

III-A.1. Fallas en Actuador: Un sistema dinámico que presenta fallas aditivas en actuador es modelado de manera general:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A_0x(t) + B_0u(t) + Ef_A(t) \\ y(t) &= C_0x(t) \end{aligned} \quad (3)$$

donde E representa el vector de distribución de fallas y $f_A(t)$ representa la fallas aditiva de actuador / componente. Realizando las debidas operaciones se obtiene la matriz función de transferencia que describe al residuo:

$$R(s) = C_0(sI - A_0 + LC_0)^{-1}Ef_A(s) \quad (4)$$

El efecto del controlador en la detección de fallas resulta nulo, pues como la entrada es aplicada tanto al sistema así como al observador, al obtener la dinámica del error el efecto del control se anula. La falla aditiva, que es una entrada adicional al sistema mantiene su efecto sobre el residuo, a pesar de que este efecto de la falla pueda ser atenuada en la salida del sistema.

III-A.2. Falla en el sensor: Un sistema dinámico que presenta fallas aditivas en sensor es modelado de manera general:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= A_0x(t) + B_0u(t) \\ y(t) &= C_0x(t) + Ff_s(t)\end{aligned}\quad (5)$$

se genera el residuo a partir del observador y la ecuación dinámica del error:

$$R(s) = C_0(I - (sI - A + LC_0)^{-1}LC_0)f_s(s) \quad (6)$$

Debido a que la falla aditiva en el sensor funciona como una señal aditiva a la salida, y la manera en la que el generador de residuos se construye, el efecto de la ley de control es cancelado nuevamente en la dinámica del error de estimación, gracias a la desconexión que existe entre la falla y la entrada de control.

III-B. Modelo de Fallas Multiplicativas

Fallas multiplicativas corresponden a cambios en parámetros del sistema, lo que implica que finalmente la falla queda multiplicada por una señal interna del sistema o bien por una externa (la entrada). Esto hace que el manejo de las fallas multiplicativas resulte más elaborado que el correspondiente al de las fallas aditivas.

III-B.1. Fallas en Actuador: Un sistema dinámico que presenta fallas modeladas como multiplicativas en actuador, es representado como (Alcorta García, 1999):

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= A_0x(t) + B_0u(t) + E(x(t), u(t))\Delta\theta(t) \\ y(t) &= C_0x(t)\end{aligned}\quad (7)$$

tomando en cuenta que $B = B_0(1 + \Delta\theta(t))$. El residuo generado está descrito por:

$$R(s) = C_0(sI - A_{0C})^{-1}B_0\kappa(s)\Delta\theta(s) \quad (8)$$

con $A_{0C} = A_0 - LC_0$, $\kappa(s) \triangleq W(s) - KX(s)$ y la matriz función de transferencia que determina la evolución de los estados $X(s)$ esta dada por

$$X(s) = (sI - A_0 + BK)^{-1}BW(s) \quad (9)$$

Debido a que el control afecta la evolución de los estados y estos repercuten en el calculo del residuo; por lo que la retroalimentación si afecta la construcción del residuo cuando la falla es modelada multiplicativa de actuador. Esto implica que la acción de control puede disminuir o aumentar el efecto de la falla sobre el residuo.

III-B.2. Falla en el sensor: Un sistema dinámico que presenta fallas multiplicativas en sensor, es representado como:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= A_0x(t) + B_0u(t) \\ y(t) &= C_0x(t) + F(x(t))\Delta\theta(t)\end{aligned}\quad (10)$$

tomando en cuenta que $C = C_0(1 + \Delta\theta(t))$. El residuo generado está descrito por:

$$R(s) = C_0(I - (sI - A_{0C})^{-1}LC_0)X(s)\Delta\theta(s) \quad (11)$$

con $A_{0C} = A_0 + LC_0$ y la matriz función de transferencia que determina la evolución de los estados $X(s)$ esta determinada por:

$$X(s) = (sI - A_0 + B_0K)^{-1}B_0W(s) \quad (12)$$

Debido a que el control afecta la evolución de los estados y estos repercuten en el calculo del residuo; por lo que la retroalimentación si afecta la construcción del residuo cuando la falla es modelada multiplicativa de sensor.

IV. DIAGNÓSTICO DE FALLAS MULTIPLICATIVAS COMPENSANDO EL EFECTO DEL CONTROL

La idea es buscar una manera de que el residuo no se vea afectado por los cambios en el control. Inspirados en las ecuaciones (8) y (11) la forma general del residuo $R(s)$ que esta descrita por la ecuación (13), es decir, del generador de residuos cuando fallas multiplicativas están presentes:

$$R(s) = G_{R,\Delta\theta}(s)\Delta\theta(s) \quad (13)$$

donde $G_{R,\Delta\theta}(s)$ representa la dinámica del residuo. Una idea de la forma en la que el generador de residuos tiene que ser compensado para permitir el diagnóstico de fallas multiplicativas suprimiendo el efecto del control (ya que en casos extremos este puede atenuar el residuo de tal manera que se vuelva indetectable) es mediante un post-filtro $\phi(s)$ descrito por:

$$\phi(s) = H(s)G_{R,\Delta\theta}^{-1}(s) \quad (14)$$

debido a que el inverso de $G_{R,\Delta\theta}(s)$ puede resultar en una función de transferencia impropia, se utiliza una función de transferencia $H(s)$ la cual nos convierta a esta inversa en una función de transferencia propia, de manera que aplicando el filtro $\phi(s)$ al residuo $R(s)$ se obtiene un residuo filtrado $R_{pf}(s)$ que cancela descrito por:

$$R_{pf}(s) = H(s)\Delta\theta(s) \quad (15)$$

compensando el efecto del control sobre el residuo. La solución propuesta del filtro requiere que la inversa de $G_{R,\Delta\theta}(s)$ exista y sea estable. Alternativamente, es posible hacer una factorización *inner-outer* para invertir lo que se pueda y coexistir con lo que no se pueda invertir manteniendo estabilidad.

Observación 1 La solución propuesta tiene dos situaciones susceptibles a mejora: La primera es el requerimiento de invertibilidad, el cual puede ser manejado y cuyos requisitos son bien conocidos. El manejo puede hacerse de manera similar al utilizado por (Frank y Ding, 1994), es decir, factorizando la matriz que se requiere invertir mediante una factorización *inner-outer*. Segunda, es que la solución propuesta tiene una dependencia en el controlador, sin embargo en un sistema real el controlador no siempre es conocido debido a que se puede instalar un controlador dinámico además del hecho de que se puede considerar un controlador que se sintonice cambiando así sus características. Este último punto esta siendo estudiado y una solución independiente del control será propuesta en un trabajo futuro.

V. EJEMPLO DE APLICACIÓN

Con la finalidad de mostrar los resultados obtenidos (compensar el efecto de la ley de control para tener acceso al residuo sin los efectos del control) se utilizará un sistema sencillo ya reportado en trabajos previos (Felicio y Lourtie, 2005). Los valores numéricos utilizados son de finalidad demostrativa, sin embargo se utilizaran valores de resistencia, capacitancia e inductancia que son comerciales.

V-A. Circuito RLC

Considerar un circuito RLC conectados en serie, excitados por una fuente de voltaje V y considerando como salida el voltaje del capacitor. Ver figura 2.

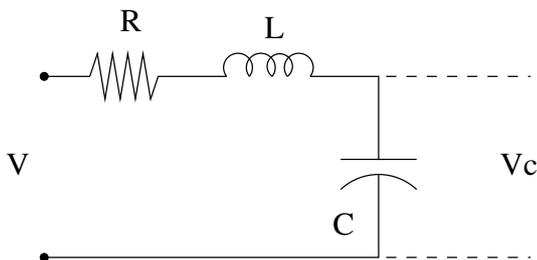


Figura 2. Circuito RLC

Las ecuaciones que rigen al sistema RLC de la figura (2) pueden ser obtenidas mediante el análisis de malla. Se proponen los valores $\frac{1}{LC} = 10000$ y $\frac{R}{L} = 220$, los cuales corresponden a valores físicos obtenidos. La representación en espacio de estado queda:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -10000 & -220 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 10000 \end{bmatrix} u(t) \\ y(t) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (16)$$

se utilizan las ecuaciones (4), (6), (8) y (11) para determinar $G_{R,\Delta\theta}(s)$ en cada uno de los casos. El diseño del generador de residuos es simple, la ganancia se selecciona como $L = \begin{bmatrix} 29.9 \\ 159.9 \end{bmatrix}$. Esto ocasiona un generador de residuos con polos ubicados en $\{-150, -200\}$. Se propone que $H(s) = \frac{1}{s^2 + 2s + 1}$ (debido a que esta $H(s)$ cumple en el caso de fallas aditivas y multiplicativas con la propiedad de que $H^{-1}(s)G_{R,\Delta\theta}(s)$ debe ser invertible). Las fallas simuladas en cada caso son seleccionadas como: falla aditiva en actuador $f_A(t) = 1$, falla aditiva en sensor $f_S(t) = 1$ y falla multiplicativa (en actuador y sensor) $\Delta\theta(t) = 1$, donde las fallas anteriormente propuestas ocurren en un tiempo de $t = 5 \text{ seg}$. Para todos los resultados de simulación el eje horizontal es el tiempo en segundos.

V-A.1. Fallas aditivas en actuador: Se utiliza la ecuación (4) para calcular la dinámica del residuo para los 2 casos, se obtiene :

$$R(s) = \frac{1}{s^2 + 9s + 20} f_{A/C}(s) \quad (17)$$

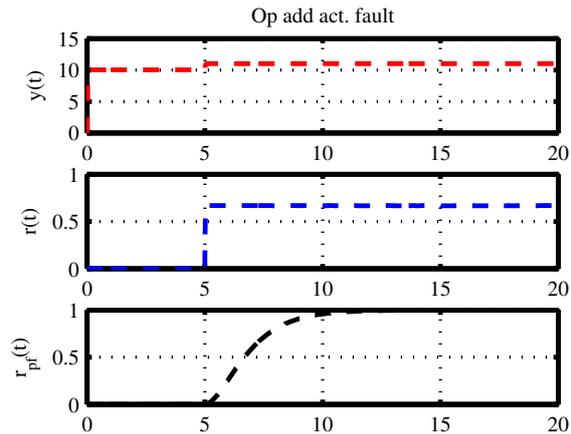


Figura 3. Fallas aditivas en actuador, ley de control 1

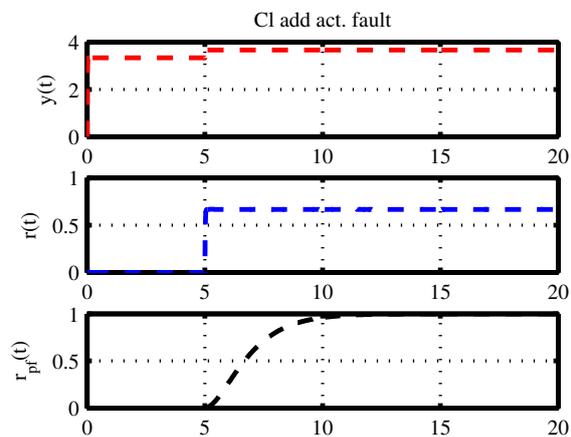


Figura 4. Fallas aditivas en actuador, ley de control 2

En las figuras (3) y (4) muestra la acción del post-filtro al residuo obtenido en lazo abierto (ley de control 1) y lazo cerrado (ley de control 2) respectivamente. De las figuras resulta que se verifica el resultado previsto de la no influencia de los cambios en el control sobre el efecto de las fallas en el generador de residuos cuando estas son aditivas. El post-filtro se puede diseñar sin dificultades para solucionar el problema planteado.

V-A.2. Fallas aditivas en sensor: Se utiliza la ecuación (6) para calcular la dinámica del residuo; que esta descrita por la siguiente ecuación

$$R(s) = \frac{s^2 + 2s + 1}{s^2 + 9s + 20} f_S(s) \quad (18)$$

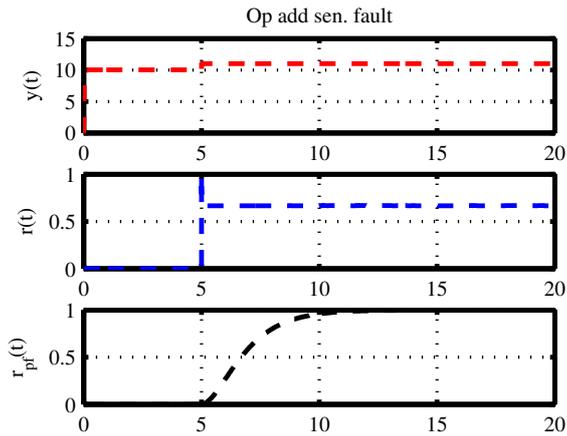


Figura 5. Fallas aditivas en sensor, Ley de control 1

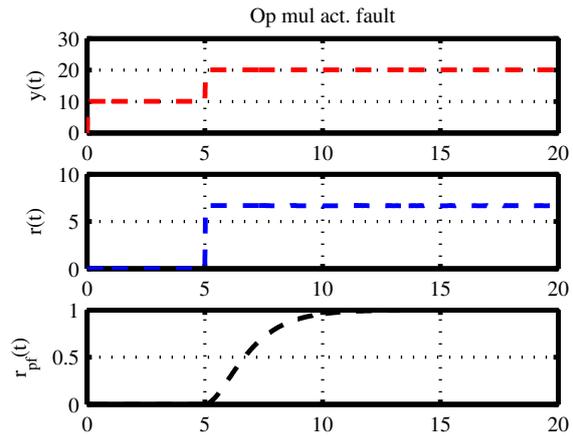


Figura 7. Fallas multiplicativas en actuador, ley de control 1

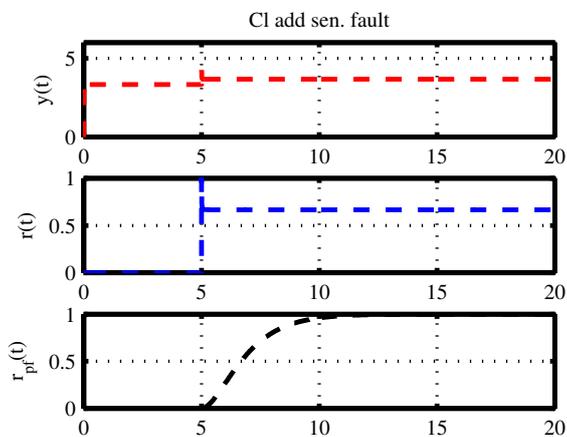


Figura 6. Fallas aditivas en sensor, ley de control 2

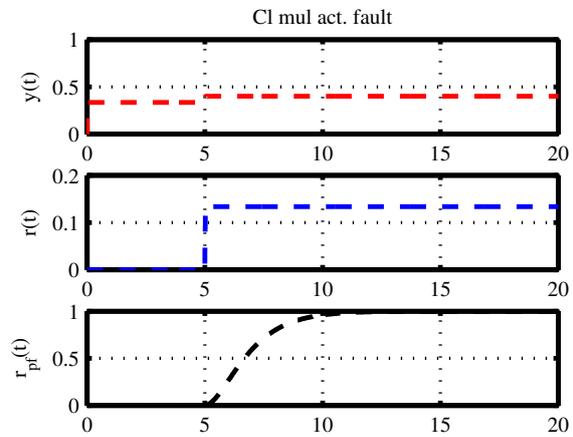


Figura 8. Fallas multiplicativas en actuador, ley de control 2

En las figuras (5) y (6) muestra la acción del post-filtro al residuo obtenido en lazo abierto (ley de control 1) y lazo cerrado (ley de control 2) respectivamente. Nuevamente se verifican los resultados previamente obtenidos: el generador de residuos no se ve afectado por la ley de control cuando las fallas en los sensores son aditivas. Así mismo, se puede diseñar un posfiltro que permita determinar el valor de las fallas en estado estacionario.

V-A.3. *Fallas multiplicativas en actuador:* Se utiliza, como antes, la ecuación (8) para calcular la dinámica del residuo, pero con la falla multiplicativa descrita anteriormente. Como resultado se muestra la transferencia de la falla al residuo:

$$R(s) = \frac{(s^2 + 2s + 1)\Delta\theta(s)}{(s^2 + 9s + 20)(s^2 + (11k_2 + 2)s + 11k_1 + 1)} \quad (19)$$

Se aprecia en las figuras (V-A.3) y (V-A.3) que el residuo $r(t)$ para el caso 1 (en lazo abierto) y 2 (en lazo cerrado), la escala de su valor difiere en cada caso; además la salida $y(t)$ es afectada por el control; demostrando el hecho que la entrada y por consecuencia el control afecta la dinámica del residuo visto en la sección III-B.1. Además es mostrado el residuo post-filtro el cual es el mismo en ambos casos.

V-A.4. *Fallas multiplicativas en sensor:* Así mismo, se utiliza la ecuación (11) para obtener el residuo:

$$R(s) = \frac{(s^2 + 2s + 1)\Delta\theta(s)}{(s^2 + 9s + 20)(s^2 + (k_2 + 2)s + k_1 + 1)} \quad (20)$$

Como se aprecia en la figura (9) y (10) que el residuo $r(t)$ para el caso 1 (en lazo abierto) y 2 (en lazo cerrado) difiere su escala en el valor dependiendo del caso; a parte la salida $y(t)$ es afectada por el control; mediante esta simulación quedo demostrado lo descrito por la sección III-B.2 que indica. Además es mostrado el residuo post-filtro el cual es el mismo en ambos casos.

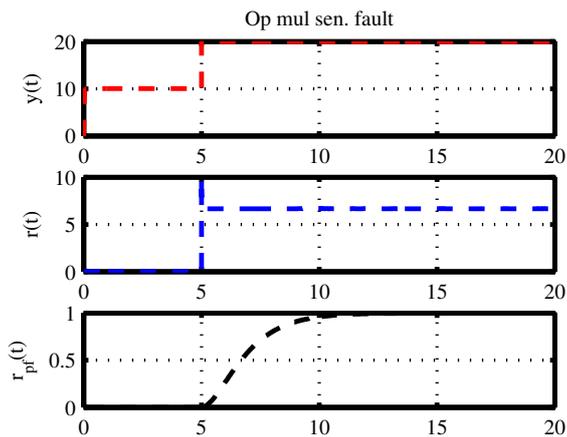


Figura 9. Fallas multiplicativas en sensor, ley de control 1

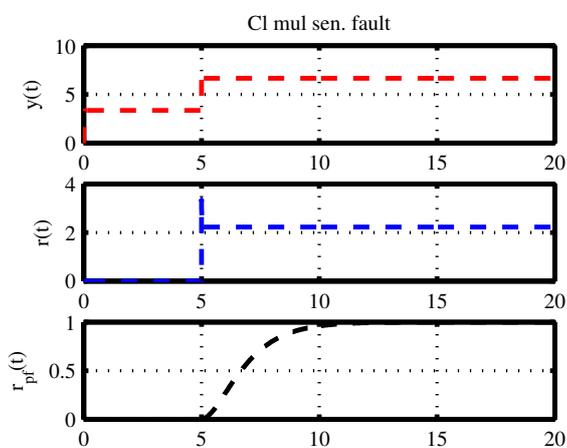


Figura 10. Fallas multiplicativas en sensor, ley de control 2

VI. CONCLUSIONES

El control retroalimentado no produce un efecto en los generadores de residuos utilizados para la detección de fallas siempre y cuando estas sean aditivas. Como consecuencia, la detección de fallas en lazo cerrado y lazo abierto tiene el mismo resultado desde el punto de vista de la calidad de la detección. Sin embargo, cuando las fallas afectando al sistema son de naturaleza multiplicativa, en un esquema retroalimentado, este control afecta la transferencia de la falla al residuo, lo que produce cambios en la generación del residuo. En estos casos el ajuste del control puede mejorar o empeorar el efecto de la falla sobre el residuo. Aquí, se desea que el control no tenga un efecto en el diagnóstico. Para este fin se propone el uso de un post-filtro que compensa la acción del control con la finalidad de que el efecto de la falla sobre el residuo sea equivalente a la que se tendría si el sistema no estuviera retroalimentado y que el valor en estado estacionario corresponda al de la falla.

VII. AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece el apoyo de CONACYT. Los autores agradecen el financiamiento del trabajo a través del proyecto PAICYT-UANL.

REFERENCIAS

- Alcorta García, E. (1999). Modelgestützte Residuengenerierung für die Diagnose von additiven and multiplicativen Fehler in dynamischen Systemen (in german). Tesis de doctorado. Gerhard-Mercator University of Duisburg (Duisburg-Essen Universität), Germany.
- Alcorta García, E., R. Seliger y P. M. Frank (1998). Nonlinear decoupling approach to fault isolation in linear systems. En: *Oriceedings of the American Control Conference 98*. Philadelphia, USA. pp. 2867–2871.
- Baikeche, H., B. Marx, D. Maquin y J. Ragot (2006). On parametric and nonparametric fault detection in linear closed loop systems. En: *Conference on Advanced Control and Diagnosis 2006*.
- Chen, J. y R. J. Patton (1999). *Robust model-based fault diagnosis for dynamic systems*. Kluwer.
- Ding, S. X. (2008). *Model-based fault diagnosis techniques*. Springer.
- Ding, S. X., E. L. Ding y T. Jeinsch (1998). Study on observer based fault detection methods for feedback control systems. En: *Proceedings of the 9th Symposium on Information, Control in Manufacturing, INCOM98*. Metz-Nancy, France.. pp. 411–416.
- Felício, P., J. Stoustrup, H. Niemann y P. Lourtie (2002). Applying parametric fault detection to a mechanical system. En: *Proceedings of the American Control Conference*. p. 4537–4542.
- Felício, P. y P. Lourtie (2005). Testing parametric fault detection method. En: *Proceedings of the 2005 IEEE International Symposium on Intelligent Control*. p. 849 – 854.
- Frank, P. M. (1990). Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy - a survey. *Automatica* **26**, 459–474.
- Frank, P. M. y S. X. Ding (1994). Frequency domain approach to optimally robust residual generation and evaluation for model based fault diagnosis. **30**(5), 789 – 804.
- Henry, D. y A. Zolghadri (2005). Design and analysis of robust residual generators for systems under feedback control. **41**, 251–264.
- Join, C., M. Fliess y H. Sira-Ramírez (2004). Fault diagnosis of closed loop linear systems with parametric uncertainties. En: *Proceedings of the 15th International Workshop on Principles of Diagnosis*.
- Kilsgaard, S., M. L. Rank, H. H. Niemann y J. Stoustrup (1996). Simultaneous design of controller and fault detector. *35 CDC'96* -, 628–629.
- Marzat, J., H. Piet-Lahanier, F. Damongeot y E. Walter (2009). A new model free method performing closed loop fault diagnosis for an aeronautical system. En: *7th Workshop on Advances Control and Diagnosis. Zielona, Gora.*
- McNabb, Ch. A. y S. J. Qin (2005). Fault diagnosis in the feedback invariant subspace of closed loop systems. **44**, 2359 – 2368.
- Niemann, H. (2006). A setup for active fault diagnosis. **51**(9), 1572 – 1578.
- Niemann, H. H. y J. Stoustrup (1997). Robust fault detection in open loop vs. closed loop. En: *Proceedings of the 36th Conference on Decision and Control*. San Diego, California, U. S. A.. pp. 4496–4497.
- Stoustrup, J. y H. Niemann (1999). Fault detection and isolation in systems with parametric faults. En: *Proceedings of the IFAC World Congress 1999. IFAC*. Bejin, China.
- Zhang, Y. y J. Jiang (2008). Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems. *Annual Reviews in Control* **32**, 229–252.