

Tolerancia Activa a Fallas Mediante Control Predictivo

N. Evangelista Charles, E. Alcorta García, G. I. Cantú Garza
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica,
Universidad Autónoma de Nuevo León
efrain.alcortagr@uanl.edu.mx
Teléfono: (52)-81-10523318

Resumen—El control predictivo basado en modelos ha mostrado ser una técnica de control robusta respecto a cierta incertidumbre del modelo. Sin embargo, fallas en el sistema pueden degradar notablemente el desempeño. En este trabajo se propone una estrategia de control activo tolerante a fallas para mejorar el desempeño de los sistemas de control. La propuesta esta basada en la combinación de diagnóstico de fallas y control predictivo. Cuando fallas afectan al sistema, estas son identificadas mediante un algoritmo de diagnóstico y la información resultante es utilizada en el control predictivo (reconfiguración del control) para mejorar el desempeño. La efectividad del algoritmo propuesto es mostrada mediante la aplicación al modelo de un avión a través de simulación.

Palabras clave: Control tolerante a falla, control predictivo, detección de fallas, redundancia analítica, reconfiguración.

I. INTRODUCCIÓN

La capacidad del control predictivo basado en modelos (MBPC, Model-Based Predictive Control o MPC, Model predictive Control, por sus siglas en inglés) para manejar restricciones de la ley de control es una de las principales ventajas de este esquema de control. Además, el MBPC presenta un cierto grado de robustez frente a cambios en el modelo, que le da la característica de tolerancia pasiva a fallas (definiendo una falla como un cambio del valor de los parámetros de un sistema fuera de los límites tolerables). A pesar de la ventaja descrita, la ocurrencia de fallas puede degradar el desempeño del lazo de control dependiendo del tipo y magnitud de la falla en cuestión. Esta degradación del desempeño es indeseable. La idea es evitar, hasta donde sea posible, la degradación del desempeño debida a fallas.

En el MBPC la acción de control se determina a cada instante resolviendo un problema de optimización en un horizonte de predicción que usa como restricción el modelo del sistema. Si dicho modelo se actualiza a partir de la información proporcionada por el sistema de detección e identificación de fallas, la acción de control se calcula teniendo en cuenta el efecto de la falla sobre el sistema. La información de la falla puede ser incluida mediante el cambio del modelo de la dinámica para reflejar cambios en la planta real bajo la falla, así la reconfiguración se llevará a cabo, ver por ejemplo (Kerrigan *et al.*, 2000) y (Lunze y Richter, 2006).

El MPC ha sido aplicado previamente en áreas fuera de procesos industriales, principalmente donde se requiere alguna técnica avanzada de control. Un ejemplo es la implementación de un control de vuelo. En este contexto, se ha investigado la tolerancia a falla del MBPC (Kerrigan *et al.*, 2000), (Maciejowski, 2001) y (Maciejowski, 1993). Esto representa un control pasivo tolerante a falla más parecido al control robusto (Kerrigan *et al.*, 2000) que al control activo tolerante a fallas.

En este trabajo se propone una estrategia de diagnóstico y reconfiguración del control para un sistema en el cual se tiene MBPC como controlador. Para el caso específico en el que mediante la modelación es posible hacer una discriminación de las fallas aditivas y multiplicativas, se propone el uso de observadores con entradas desconocidas para la generación de residuos. Si la falla es aditiva, esta se compensa como una perturbación medible, después de identificarla. En el caso de fallas multiplicativas esta debe de incorporarse para establecer el modelo con falla e incorporarlo en el diseño del MBPC para el siguiente paso, con esto, el MBPC se encargara de compensar de forma óptima el efecto de la falla multiplicativa. El método propuesto es aplicado a un caso de estudio que consiste en el modelo de un avión Cessna citation 500 linealizado sobre una altitud de 5,000 m y una velocidad de 128.2 metros por segundo (Maciejowski y Jones, 2003). La novedad propuesta es la consideración de fallas multiplicativas. Los resultados muestran como se logra mejorar el desempeño en comparación con el que se tendría si no se realiza la reconfiguración.

El trabajo esta dividido como sigue: en la siguiente sección se repasan las ideas principales del MPC. En la sección III se discuten los conceptos de diagnóstico de fallas empleados. La metodología propuesta es presentada en sección IV. En sección V se discute la aplicación del algoritmo propuesto al modelo de un avión Cesna 500 y en sección VI se dan las conclusiones.

II. CONTROL PREDICTIVO BASADO EN MODELOS

Los aspectos básicos del MPC pueden revisarse en (Maciejowski, 2001). El requerimiento del control activo tolerante a fallas es que las acciones correctivas puedan usar

la reconfiguración en coordinación para poder acomodar el efecto de la falla sobre el sistema al control.

La configuración del control es muy importante, por lo que en esta sección se presentan los principios básicos del MBPC.

II-A. Algoritmo de MBPC

La idea principal del MBPC es la de determinar valores futuros de las entradas de control mediante la optimización de una función de costo, la cual expresa los objetivos de control. La secuencia de las señales $u(k+i)$ de control futuras, para un horizonte de optimización, H_u , de la entrada es determinada por la optimización de la función de costo. Esta generalmente tiene la forma cuadrática siguiente:

$$V(k) = \sum_{i=H_w}^{H_p} \|\hat{z}(k+i|k) - r(k+i|k)\|_{Q(i)}^2 + \sum_{i=0}^{H_u-1} \|\Delta \hat{u}(k+i|k)\|_{R(i)}^2 \quad (1)$$

conforme a las restricciones

$$\Delta u_j(k+i) \in [V_{min}, V_{max}] \quad (2)$$

$$u_j(k+i) \in [U_{min}, U_{max}] \quad (3)$$

$$\hat{z}(k+i|k) \in [X_{min}, X_{max}] \quad (4)$$

donde los incrementos de control se definen mediante $\Delta u_k \triangleq u(k+1) - u(k)$ y \hat{z} es el estimado de las salidas controladas; $z(k)$ son las salidas controladas. $\hat{z}(k+i|k)$ es una predicción de $z(k+i)$ en el tiempo k y $r(k)$ es la trayectoria de referencia para $z(k)$. H_w y H_p son el mínimo y máximo valor de los horizontes de salidas, respectivamente. Se asume que las señales de control son constantes después del final del horizonte de la optimización, sabiendo que $\Delta u(k+i) = 0$ para $i \geq H_u$.

La norma $\|\cdot\|_Q^2$ sin considerar la función de costo es definida como $\|\alpha\|_Q^2 = \alpha^T Q \alpha$. En las desigualdades $u_j(k)$ denota la j 'th componente del vector $u(k)$, etc, y V_{min_j} , V_{max_j} , U_{min_j} , U_{max_j} , X_{min_j} y X_{max_j} son los valores de las restricciones.

La primer suma en (1) contiene el error de control, mientras que la segunda suma contiene el esfuerzo del control. Las matrices Q y R son usadas como ponderaciones para el error de control y las acciones de control respectivamente.

Por cada conjunto de incrementos, predicciones del vector de estado son calculados para un modelo interno lineal. Una vez encontrada la solución óptima, solo el primer valor de la secuencia calculada es aplicada al proceso descartando el resto de la secuencia. En el instante siguiente $k+1$ se repite el cálculo y se aplica sólo el primer valor de la secuencia óptima, y así sucesivamente.

Para discusión de mas detalles del MBPC, el lector es referido al libro (Maciejowski, 2001).

II-B. Obtención del modelo interno

Partiendo del sistema nominal

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) \end{aligned} \quad (5)$$

donde el vector de entradas de control esta dado por u , el vector de salida esta representado por y , x de dimensión n representa el vector de estados, las matrices nominales A , B , C y D son constantes de dimensiones apropiadas. Para el diseño de MPC, hay ciertos parámetros que se seleccionarán para garantizar las propiedades de estabilidad y robustez, como lo son: el tiempo de muestreo T_s , los horizontes de predicción H_p y control H_u , y las matrices de ponderación de la salida y entrada Q y R respectivamente.

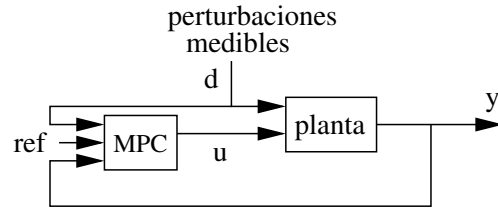


Figura 1. Sistema con MPC

II-C. Restricciones

La definición de las restricciones nos da los límites sobre las entradas y salidas. Una de las cualidades del MPC es precisamente la de incluir dichas restricciones en la formulación del problema. Estas corresponden normalmente a las restricciones en la entrada, en la razón de cambio de la entrada y salidas medibles.

II-D. Selección del horizonte de predicción y control

Otra parte importante en la obtención del modelo interno es la selección del horizonte de predicción y control ya que principalmente afecta al funcionamiento del sistema controlado, pero también puede influenciar en la robustez de este. Un horizonte de predicción largo (H_p), da lugar a un mejor funcionamiento del control del sistema. En general, un horizonte de control (H_u) corto hace que el sistema sea mas robusto a incertidumbres por ejemplo variaciones en los parámetros.

II-E. Selección de las matrices de ponderación

La ponderación del funcionamiento de la salida Q y la matriz del incremento de control R son dos parámetros muy importantes en el diseño. Estos juegan un papel importante en la determinación de la estabilidad y funcionamiento del sistema. La matriz R contiene los incrementos de control y ayuda a mantener las acciones de las entradas de control sin acotaciones, haciendo que el resultado de las acciones de control sean suaves. La matriz Q ayuda a que no sean violadas las restricciones de las salidas.

En general el Hp y Hu y el parámetro de ventana (Hw), junto con las ponderaciones $Q(i)$ y $R(i)$, y la referencia de la trayectoria $r(k+i)$, todas estas afectan el comportamiento de la planta y el MPC en lazo cerrado.

III. DIAGNOSTICO DE FALLAS

Una vez que se sabe que el funcionamiento del sistema planta-MPC es estable y que esta sobre el rango de operación, podemos introducir al sistema de diagnóstico de fallas (Frank, 1990), (Chen y Patton, 1999), (Blanke *et al.*, 2006), (Isermann, 2006) así como (Ding, 2008).

Se considerarán dos tipos de falla en este trabajo: la falla aditiva y la multiplicativa. Sin embargo, solo se considera ocurrencia simple de fallas, es decir, se supone que las fallas no ocurren simultáneamente.

III-A. Falla aditiva

Este tipo de falla actúa como una entrada desconocida y adicional al sistema. Esto se puede representar de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + Ef(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) \end{aligned} \quad (6)$$

donde f es el vector de fallas aditivas. En el contexto de este trabajo se considera que las fallas aditivas solo pueden ocurrir en el contexto del actuador y que la correspondiente matriz de distribución de fallas coincide con la matriz de entradas del sistema, es decir, $E = B$.

III-B. Falla multiplicativa

Consideraremos para la falla multiplicativa, un cambio en el valor numérico de los parámetros del sistema. En este trabajo se considera que estos cambios solo pueden ocurrir en las matrices A y C . Con lo que la representación queda de la siguiente forma:

$$\dot{x}(t) = A(\alpha)x(t) + Bu(t) \quad (7)$$

$$y(t) = C(\alpha)x(t) + Du(t) \quad (8)$$

donde α representan el vector de cambios en los parámetros del sistema.

III-C. Diagnóstico

Una vez descritos los tipos de fallas, procedemos al diagnóstico de estas. Para esto se utilizan métodos basados en modelos y en particular basados en observadores.

El punto de inicio es el sistema con el modelado de las fallas.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + E_1f_1(t) + E_2f_2(t) \quad (9)$$

donde f_1 y f_2 corresponde al vector de falla aditiva y multiplicativa respectivamente. Hay que destacar que el hecho de que f_2 represente una falla multiplicativa implica que la matriz de distribución de fallas es dependiente de estados y entradas al sistema (Alcorta García, 1999)

Para la falla aditiva se propone el uso de un sistema aumentado en donde la falla aditiva se define como el quinto estado, con $\dot{f}_1(t) = 0$, bajo el supuesto de que la falla aditiva es constante o cambia muy lentamente. Mediante un observador del sistema aumentado se obtiene un estimado de la falla aditiva. Este procedimiento se aplicó previamente con éxito en (Alcorta García *et al.*, 2005). Para poder hacer un sistema de diagnóstico completo, se requiere no solo definir un sistema aumentado con la falla aditiva, sino que, además se necesita desacoplar la falla multiplicativa.

Así mismo, es necesario también la obtención de un subsistema robusto a la falla aditiva que permita la identificación de la falla multiplicativa. Para esto es posible determinar un subsistema desacoplado de la entrada desconocida y diseñar un generador de residuos para este subsistema (Hou y Müller, 1994).

Obtención del observador UIO

Primero se transforma el sistema con ambas fallas (9) para obtener subsistemas sensibles a cada falla y robustos a la otra. La forma de desacoplar puede realizarse mediante el procedimiento de (Hou y Müller, 1994), el cual no será descrito por falta de espacio.

En ambos tipos de falla es necesario obtener un estimado de la falla. En el caso de la falla aditiva, debido a que se utiliza un estado extendido, de forma directa se obtiene un estimado de la falla que puede ser utilizado directamente en la reconfiguración del control (tomado en cuenta en el MPC como una perturbación medible). En el caso de la falla multiplicativa es necesario hacer una estimación a partir del residuo. Una posibilidad es mediante el enfoque combinado presentado en (?), en el cual se combina la generación de residuos basada en observadores con un procedimiento de identificación. Una forma simple de enfrentar el problema de estimar la falla multiplicativa es de forma alternativa con el trabajo (Magni, 1995). Una vez estimada la falla multiplicativa es necesario incorporar la información en el modelo utilizado en el MPC para que sea tomado en cuenta en el cálculo del controlador.

IV. RECONFIGURACIÓN DEL CONTROL

En los apartados anteriores se vio como obtener el MPC así como el diagnóstico de las fallas, ahora teniendo información de estas, procedemos a la parte de la reconfiguración del sistema, ya que lo que nos interesa es que el sistema tenga un mejor desempeño ante dicha falla.

IV-A. Índices de desempeño

Como el interés está en mejorar el funcionamiento del sistema, se propone que por medio de índices de desempeño podamos obtener una medición de que tanto se degrada el sistema ante la falla, comparando parámetros con respecto al sistema reconfigurado. Así aseguramos la efectividad del algoritmo propuesto.

IV-B. Reconfiguración

Gracias al MPC podemos resolver el problema de reconfiguración haciendo el proceso más sencillo

comparado con algún otro esquema de control. Consiste en cambiar las entradas y salidas del control así como reajustar la ley de control. Cabe mencionar que en el caso de un control tolerante, los objetivos quedan modificados, esto es formulándose unas condiciones de operación óptimas (planta sin falla) más unas condiciones de operación degradadas (planta con falla). Por lo tanto es donde se hace uso de los índices de desempeño.

Para el caso de la falla aditiva dicha reconfiguración consiste en considerar el valor obtenido del generador de residuos basado en observadores con entradas desconocidas, UIO, (salida correspondiente al estado adicional que contiene el valor de la falla) como una entrada de perturbación medible al MPC, esto para realimentar el sistema y que el control la este considerando en el proceso, resultando una mejor acción de control.

Para la falla multiplicativa, debido a que es como es un cambio en el valor numérico de los parámetros se considera como un sistema con falla, por lo tanto se tendrían dos sistemas diferentes el nominal y el de falla. Lo que corresponde a la reconfiguración en este caso, es cambiar de modelo interno que actuará en el MPC, así al presentarse dicha falla se hará un cambio de sistema. El control retomara el funcionamiento con el nuevo sistema haciendo que este tenga un mejor desempeño, pues la predicción y consecuentemente la acción de control serán diseñadas para el sistema con la falla multiplicativa.

V. CASO DE ESTUDIO

Como caso de estudio se considero el modelo de avión Cessna citation 500 linealizado sobre una altitud de 5,000 metros sobre el nivel del mar y una velocidad de 128.2 mts./seg, el cual fue tomado de (Maciejowski y Jones, 2003). La entrada del sistema es el ángulo del elevación (en grados) y las salidas son el ángulo de cabeceo (en grados), la altitud (en metros) y la velocidad de cambio de altitud (en metros por segundo).

Existen una serie de restricciones impuestas por el diseño del equipamiento y que no pueden ser excedidas, como son que el ángulo del elevador permanezca entre un valor predeterminado de grados y una velocidad de cambio m/s. Otras restricciones menos críticas son las relacionadas con el confort de los pasajeros, donde el ángulo de cabeceo debe de encontrarse entre un intervalo predeterminado de grados.

Las referencias a seguir por las distintas salidas del sistema son de 0 grados, 400m y 0 m/s respectivamente para el ángulo de cabeceo, la altitud y su velocidad de cambio. El período de muestreo del sistema se ha escogido de 0.5 segundos y los parámetros de control se han establecido a $Hw = 1$ y $Hp = 10(5 \text{ s})$ para todas las salidas y $Hu = 3(1.5\text{s})$.

Considerando el sistema nominal (5) las matrices del

sistema resultan:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -1.28 & 0 & 0.98 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -5.43 & 0 & -1.83 & 0 \\ -128.2 & 128.2 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} -0.3 \\ 0 \\ -17 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -128.2 & 128.2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

La respuesta del sistema nominal con el MPC es presentada en la figura 2

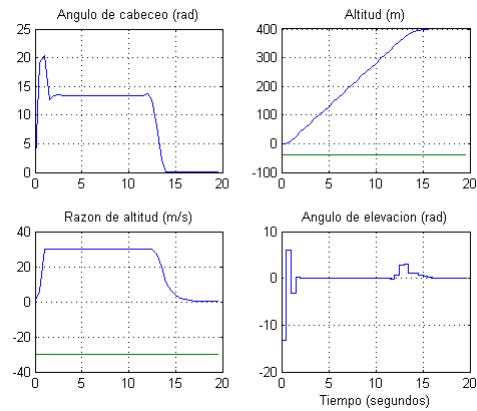


Figura 2. Respuesta de la planta nominal con MPC

Sabiendo que efectivamente el sistema planta-MPC es estable, procedemos a la introducción de la falla al sistema. Como se menciona en el documento primero consideraremos la falla aditiva y después la multiplicativa, presentándose una a la vez para el caso de análisis.

V-A. Caso 1: Falla aditiva

Primeramente se consideró una falla aditiva afectando directamente los canales de entrada del sistema, es decir, $E = B$ y para la falla f se utiliza un escalamiento de la señal de control. El sistema aumentado a utilizar quedo de la siguiente forma:

$$\dot{\bar{x}} = \begin{bmatrix} A & B \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \bar{x} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} E_2 \\ 0 \end{bmatrix} f_2$$

donde :

$$\mathbf{E}_1 = \mathbf{B} = \begin{bmatrix} -0.3 \\ 0 \\ -17 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{E}_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 128.2 \end{bmatrix}$$

La aplicación del esquema propuesto permite detectar e identificar la falla. Los resultados de simulación sobre el diagnóstico se pueden apreciar en la figura 3.

Para poder apreciar la mejora se consideró un índice para medir el desempeño el cual esta dado por la integral del cuadrado del error:

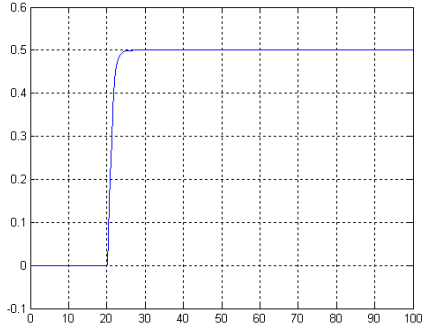


Figura 3. Detección e identificación de la falla aditiva

$$I(y_i(t)) = \int_0^t (y_i(\tau) - r_i(\tau))^2 d\tau \quad (10)$$

donde el subíndice i representa el i -ésimo elemento ya sea del vector de salidas o el de referencias. En este caso se define una referencia a seguir por cada salida de control.

Los resultados de la reconfiguración son resumidos en la tabla I.

Índices	Nominal	Sin reconf.	Con reconf.
$I(y_1)$	0.38	2,915	0.9348
$I(y_2)$	407.2	4,711,800	409,060
$I(y_3)$	5,747.1	42,443	16,777

TABLA I

ÍNDICES DE DESEMPEÑO PARA CASO DE FALLA ADITIVA

Como se observa en la tabla I, la columna correspondiente al comportamiento nominal muestra cuales serían los valores de los índices cuando no ocurre falla. En la columna sin reconfiguración se muestra el valor de los índices si al presentarse la falla no se hiciera corrección al controlador. En la última columna (con reconfiguración) se muestran los índices una vez realizada la reconfiguración.

Se aprecia que al ocurrir una falla el desempeño del sistema se ve afectado significativamente. Al aplicar el procedimiento de reconfiguración (última columna a la derecha) se ve que aunque no se obtiene el mismo desempeño que el nominal debido al retraso en aplicar la reconfiguración, estos índices son bastante mejores a los que se tienen cuando no se hace la reconfiguración (columna con falla aditiva). Las trayectorias del sistema cuando se presenta la falla aditiva se puede ver en la figura 4.

V-B. Caso 1: Falla multiplicativa

La falla multiplicativa considerada fue tomada de (Maciejowski y Jones, 2003) en la cual un componente se modifica afectando los componentes $A(4,1)$, $A(4,2)$, $C(3,1)$ y $C(3,2)$. La falla consiste en una variación del 10% del valor nominal de los parámetros.

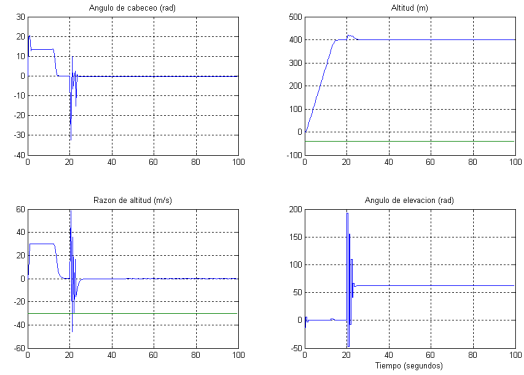


Figura 4. Trayectorias bajo reconfiguración para falla aditiva

Los resultados obtenidos de la reconfiguración son resumidos en la tabla II.

Índices	Nominal	Sin reconf.	Con reconf.
$I(y_1)$	0.38	104,140	1,555.8
$I(y_2)$	407.2	$1,7554 \times 10^{11}$	410,280
$I(y_3)$	5,747.1	$7,3252 \times 10^8$	6,008.7

TABLA II

ÍNDICES DE DESEMPEÑO EN EL CASO DE FALLA MULTIPLICATIVA

En la tabla II se muestra como la reconfiguración ayuda significativamente a mantener el desempeño del sistema en valores razonables. La trayectoria de los estados se cuando ocurre una falla multiplicativa se pueden encontrar en la figura 5.

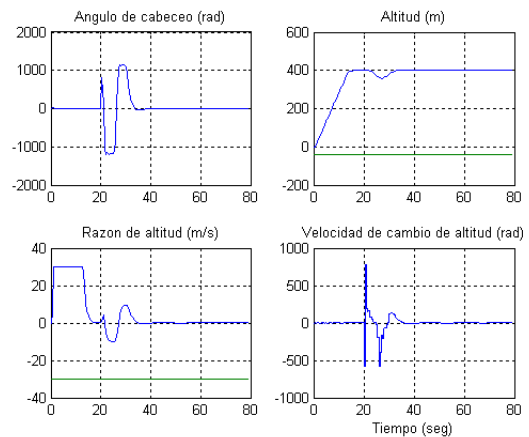


Figura 5. Trayectorias con falla multiplicativa

Como se puede apreciar, el algoritmo propuesto muestra ser efectivo para recobrar el desempeño ante fallas multiplicativas también.

VI. CONCLUSIONES

La reconfiguración del control en sistemas en lazo cerrado tiene implicaciones que van más lejos que los casos más dramáticos, como estabilización o recobro de maniobrabilidad. En este trabajo se muestra con un ejemplo simple que una falla puede degradar notoriamente el desempeño del sistema con impactos importantes en cuanto al desgaste de los componentes implicados, al mayor consumo de combustible (o de energía) en busca de mantener los objetivos de control.

En este trabajo se discutió una forma de incluir la reconfiguración de la ley de control en el contexto de MBPC. Primero se propone una metodología para el desarrollo de sistemas tolerantes a fallas. El esquema propuesto se aplica al modelo linealizado de un avión Cessna Citation 500 para ser verificado y probado.

Los resultados muestran que el método propuesto efectivamente permite disminuir la degradación de desempeño del lazo de control en la presencia de fallas. Se mostró como nuestra propuesta puede manejar tanto fallas aditivas como multiplicativas.

Un aspecto interesante es que si el sistema cuenta con MBPC, la implementación de un sistema tolerante a fallas puede hacerse sin la necesidad de modificar sustancialmente el control nominal. Esto hace la propuesta doblemente atractiva para aplicaciones industriales.

VII. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado parcialmente por el CONACYT (primer autora) así como por el proyecto PAICYT IT287-09 por parte de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

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., P. De Leon Canton, O. A. Z. Sotomayor y D. Odloak (2005). Actuator and component fault isolation in a fluid catalytic cracking unit. En: *IFAC World Congress*.
- Blanke, M., M. Kinnaert y J. Lunze M. Staroswiecki (2006). *Diagnosis and fault-tolerant control*. 2nd ed. Springer. Berlin Germany.
- 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.
- Frank, P. M. (1990). Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy - a survey. *Automatica* **26**, 459–474.
- Hou, M. y P. C. Müller (1994). Fault detection and isolation observers. *International Journal of Control* **60**(5), 827–846.
- Isermann, R. (2006). *Fault-diagnosis systems: An introduction from fault detection to fault tolerance*. 1 ed. Springer.
- Kerrigan, E. C., A. Bemporad, D. Mignone, M. Morari y J. Maciejowski (2000). Multiobjective prioritisation and reconfiguration for the control of constrained hybrid systems. En: *American Control Conference*. Vol. 3. pp. 1694–1698.
- Lunze, J. y J. Richter (2006). Control reconfiguration: survey of methods and open problems. Reporte técnico. Institute of Automation and Computer Control, Ruhr University Bochum, Germany.
- Maciejowski, J. (1993). Controlling systems in the face of faults. En: *IEEE Colloquium on Fault Diagnosis and Control System Reconfiguration*.
- Maciejowski, J. (2001). *Predictive control with constraints*. Prentice Hall.
- Maciejowski, J. y C. Jones (2003). MPC fault tolerant flight control case study: Flight 1862. En: *5th IFAC Symposium on Fault Detection and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS)*. Washington, D. C., USA. pp. 121–126.
- Magni, J.-F. (1995). On continuous-time parameter identification by using observers. *IEEE Transactions on Automatic Control* **40**, 1789–1792.