

# Localización de fallas en un proceso químico mediante redundancia analítica

Plinio de León Cantón, Efraín Alcorta-García

División de Posgrado, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Universidad Autónoma de Nuevo León, MÉXICO

ealcorta@ieee.org

Oscar Alberto Zanabria Sotomayor, Darci Odloak

Departamento de Ingeniería Química, Escuela Politécnica

Universidad de Sao Paulo, BRASIL

oscar@lscp.pqi.ep.usp.br

## RESUMEN

*En este trabajo se considera el desarrollo de un esquema para el diagnóstico de fallas en los componentes de una Unidad Separadora con Fluido Catalítico (Fluid Catalytic Cracking Unit (FCC)). El algoritmo considerado está basado en una linealización de la unidad FCC no lineal y en un procedimiento que utiliza observadores para el diagnóstico. Se modelan y simulan cuatro fallas en los componentes. El diseño resultante es verificado usando simulación no lineal de la unidad FCC. El desempeño del algoritmo utilizado para el diagnóstico es mostrado mediante simulaciones en los diferentes escenarios de falla. Se muestra que el método lineal basado en observadores es adecuado para la detección y localización de fallas en la unidad FCC, esto a pesar de la característica no lineal del proceso.*

## PALABRAS CLAVE

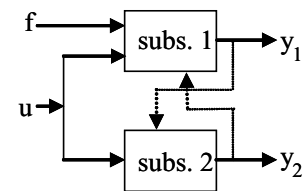
Refinación, redundancia analítica, fallas, observadores, linealización.

## ABSTRACT

*In this work the design of a fault diagnosis schema for the components of a Fluid Catalytic Cracking Unit (FCCU) is considered. The proposed algorithm is based on a linearization of the nonlinear model of the FCCU and observer-based fault detection. Four component faults are modeled and simulated. The proposed design is tested using nonlinear simulation of the FCCU. The performance of the algorithm is shown using simulation results in different fault sceneries. The linear observer-based approach considered could be used effectively in the detection and isolation of faults at the FCCU.*

## KEYWORDS

Refination, analytical redundancy, faults, observers, linearization.



## INTRODUCCIÓN

La mejora del desempeño y seguridad de los procesos industriales reclama cada vez una mayor atención por parte de la comunidad científica. Un ejemplo de esto puede ser encontrado en la industria del petróleo, la cual es una de las más productivas en el mundo. Actualmente el área petroquímica reporta grandes pérdidas debidas a fallas en sus componentes. En estos procesos, debido a las cantidades de materia prima procesadas diariamente, inclusive pequeños incrementos en la eficiencia dan como resultado importantes dividendos económicos.

Uno de los subprocesos más importantes dentro de la industria de refinación es la unidad de separación con fluido catalítico. La separación es un proceso lento, multivariable, fuertemente acoplado y no lineal. La detección y localización oportuna de fallas permite mejorar la seguridad y confiabilidad de los procesos industriales.

Las técnicas de diagnóstico de fallas han sido estudiadas intensamente en los últimos 30 años.<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> Los métodos basados en redundancia analítica hacen uso de mediciones, que se utilizan para el control, y del modelo matemático del proceso.

En este trabajo se considera la unidad Separadora con Fluido Catalítico (FCC) “Kellog Orthoflow F” reactor/regenerador<sup>6</sup> como planta sujeta a estudio, que en el contexto de diagnóstico de fallas ha sido considerada previamente. Se considera un esquema<sup>7</sup> para la versión discretizada del AMOCO Model IV FCC. En este caso se utilizó un filtro de Kalman extendido y se presentó el análisis para dos fallas de los componentes. También en,<sup>8</sup> basado en una metodología causal y heurística, un esquema



de diagnóstico fue aplicado a un proceso piloto FCC. Aquí fue explotado el conocimiento del operador para determinar el origen físico de una falla previamente localizada mediante diagnóstico utilizando gráficas causales. Sólo se consideraron resultados para dos variables medidas: presión en el piloto del *striper* y válvula de regulación de presión en el piloto del *riser*. El modelo IV FCC es un caso de estudio para una W-ASTRA (Wavelet theory-based Adaptive System for Trend Analysis).<sup>9</sup> Note, sin embargo, que sólo se consideraron fallas en los sensores. Una metodología para configurar una red neuronal aplicada a la detección de fallas en una unidad FCC para ESSO ya ha sido propuesta.<sup>10</sup> El resultado correspondiente se muestra en forma de histogramas para fallas simples, dobles y triples (pérdida de catálisis en la reacción del reactor y en el regenerador y pérdida de producción).

En este trabajo se aplica un algoritmo de diagnóstico basado en observadores para la localización de fallas de la unidad FCC “Kellog Orthoflow F” reactor/regenerador considerando cuatro fallas. Se utilizan residuos estructurados para el modelo linealizado para detectar y localizar las cuatro fallas en cuestión. Los resultados obtenidos permiten detectar y localizar todas las fallas en los componentes estudiados lo que representa un avance con respecto a los resultados existentes en la literatura.<sup>7, 8, 9 y 10</sup>

## DIAGNÓSTICO DE FALLAS MEDIANTE MÉTODOS BASADOS EN OBSERVADORES

Los métodos de diagnóstico basados en observadores pertenecen al grupo de procedimientos basados en modelos y básicamente utilizan redundancia analítica para detectar y localizar fallas. El diagnóstico de fallas se lleva a cabo en dos pasos<sup>11</sup>:

- Primero se obtienen señales que dependen solamente de las fallas, las cuales son llamadas residuos. Un residuo debe de ser idealmente cero en ausencia de fallas y diferente de cero en otros casos.
- Se realiza una evaluación de los residuos generados previamente. Esto con la finalidad de poder determinar si una falla está presente y dónde se encuentra.

Aún y cuando existen diferentes formas de calcular los observadores requeridos para la generación de residuos, la idea puede ser resumida como se muestra en la figura 1.

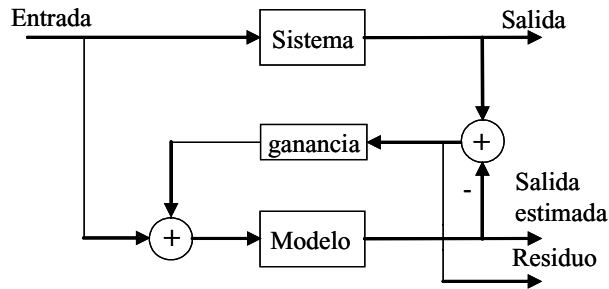


Fig. 1. Idea básica del generador de residuos.

Para la localización de fallas se requiere diseñar el residuo sensible a una falla e insensible a otras fallas. A este tipo de diseño se le denomina residuo estructurado.<sup>4, 11, 3</sup>

### Diseño de residuos estructurados

La sensibilidad a ciertas fallas requerida en los residuos se puede obtener mediante el uso de observadores con entradas desconocidas (UIO).<sup>4, 12</sup> En este trabajo fue aplicado el método reportado por Hou.<sup>12</sup>

Considerar un sistema lineal e invariante en el tiempo descrito por

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

donde  $x \in \mathbb{R}^n$  es el vector de estado,  $u \in \mathbb{R}^p$  es el vector de entrada,  $y \in \mathbb{R}^m$  es el vector de salida,  $f$  corresponde al vector de fallas y  $A, B, C, D$  y  $E_a$  son matrices constantes de dimensiones apropiadas.

El UIO se diseña en dos pasos: primero se transforma el sistema original para separar el efecto de las fallas. Como resultado se tienen dos subsistemas: uno con la conexión directa a las fallas indeseables y otro libre de éstas. La parte del estado en el segundo subsistema perteneciente al primero debe de ser obtenido de la salida. De ser así, el segundo subsistema puede ser representado

en términos de variables de entrada conocidas a excepción quizá de las fallas a ser detectadas (figura 2). En caso de que la salida no proporcione toda la información sobre los estados perturbados del primer subsistema, se requiere aplicar recursivamente el procedimiento descrito por Hou.<sup>12</sup>

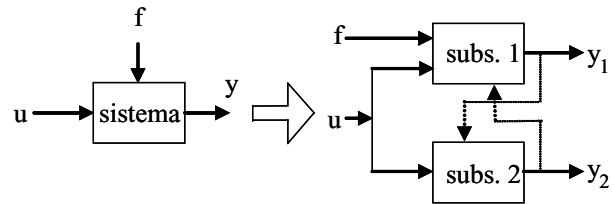


Fig. 2. Desacoplo

Una representación esquemática del generador de residuos estructurado se presenta en la figura 3.

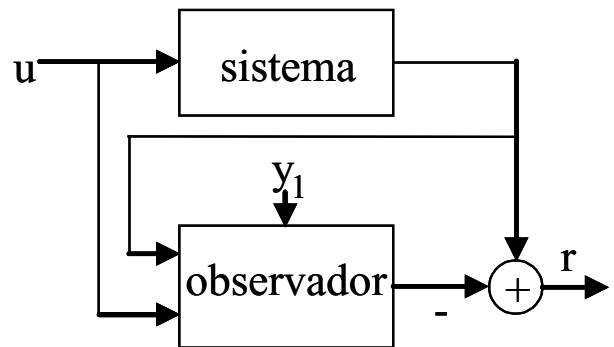


Fig. 3. Generador de residuos estructurado.

### Evaluación de residuos

Para el segundo paso, se requiere de una función de evaluación de residuos,<sup>13</sup> así como un valor de umbral. Una manera de definir una función de evaluación es mediante el uso de normas de señales.<sup>13</sup> El resultado de la función de evaluación se compara con un valor de umbral para decidir cuando una falla está presente. En este trabajo la evaluación de residuos se hace usando la sumatoria ponderada del valor absoluto de las muestras en una ventana de tiempo de longitud  $\nu$ :

$$\Omega(r_k) = T \sum_{i=1}^{\nu} \omega_{k-i} |r_{k-i}|$$

donde  $T$  es el periodo de muestreo y  $\omega$  una

ponderación del residuo. La idea de ponderar la contribución de los residuos en cada instante  $k$  es para dar mayor valor a los residuos recientes. Lo anterior es para poder regular la sensibilidad a cambios en el residuo.

Además de la función de evaluación  $\Omega(\circ)$  se requiere también definir un valor de umbral.<sup>13</sup> La dimensión del sistema bajo consideración dificulta la aplicación de un procedimiento analítico. En lugar de éste, se utilizó el valor más grande de la función de evaluación con residuos nominales (caso libre de fallas) para evitar falsas alarmas. En éste trabajo se utilizó una ventana de tiempo con longitud de  $u=10$  muestras. En donde una asignación pequeña de  $u$  se acerca al valor instantáneo del residuo  $r_k$  y un valor muy grande de  $u$  resulta en un residuo con una reacción lenta a cambios.

## LA UNIDAD DE SEPARACIÓN CON FLUIDO CATALÍTICO

En general la unidad de Separación con Fluido Catalítico (FCC) juega un papel clave en la refinación como un proceso de conversión primario. La unidad recibe múltiples alimentaciones consistentes de componentes de alto punto de ebullición (gas oil) de otra unidad de proceso de refinación y separa este fluido en componentes ligeros. Una representación esquemática de la unidad FCC Kellogg Orthoflow F reactor/regenerador se muestra en la figura 4.

Como inicio del ciclo se alimenta combustible pre-calentado, de bajo valor, y se mezcla con vapor para ser inyectado en el *riser* del reactor. Una vez adentro se mezcla este fluido con catalizador caliente regenerado. El catalizador caliente provee el calor sensible, calor de vaporización y calor de reacción necesario para la reacción de separación endotérmica. Un material con carbono (coke) se deposita sobre la superficie del catalizador como resultado de la reacción de separación. El carbón coke desactiva al catalizador, por lo que se requiere una regeneración continua del catalizador. El catalizador utilizado pasa a través de una zona de recuperación, donde se inyecta vapor para remover hidrocarburos depositados. En el regenerador se quema el coke dejando activo el catalizador para ser utilizado nuevamente. El catalizador regenerado fluye a través de una válvula de control al *riser*. Una descripción

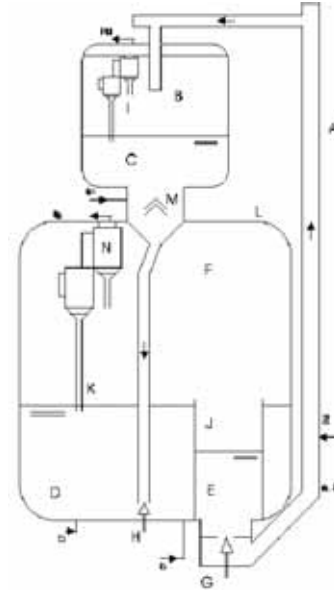


Fig. 4. FCC Kellogg Orthoflow F reactor/regenerador.<sup>6</sup> A, Riser (reactor tubular); B, Tanque del reactor; C, Cama del reactor (catalizador utilizado); D, Primer estado del regenerador fase densa; E, Segundo estado del regenerador fase densa; F, Fase diluida general; G, Válvula de catalizador regenerado; H, Válvula de catalizador utilizado; I, Ciclones del reactor; J, Fase diluida segundo estado; K, Fase diluida primer estado; L, Regenerador; M, Stripper; N, Ciclones del regenerador.

detallada del modelo lo presenta Lautenschlager.<sup>6</sup> El modelo presentado está constituido por 26 ecuaciones diferenciales no lineales acopladas.

El código de simulación para este sistema está escrito en lenguaje C y fue implementado en MATLAB/SIMULINK.<sup>6</sup> El modelo incluye un controlador PID para la presión del reactor, el nivel del catalizador en el reactor y la presión diferencial del regenerador/reactor. El sistema tiene la siguiente forma general:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= g(x, u) \\ y &= h(x)\end{aligned}$$

donde  $x \in \mathcal{R}^n$  es el vector de estado,  $u \in \mathcal{R}^p$  es el vector de entradas y  $y \in \mathcal{R}^m$  es el vector de salidas. En este caso se consideraron 26 estados, 9 entradas y 9 salidas. La planta opera en lazo cerrado. Se utiliza un control predictivo similar al presentado por Rodríguez.<sup>14</sup> Se regulan cuatro salidas (temperatura del primer estado del regenerador en fase densa, temperatura del segundo estado del regenerador en fase densa, estimado de la severidad de la reacción de

separación, temperatura de la mezcla de separación en el *riser*) utilizando cuatro entradas (radio de flujo de aire al regenerador, señal de la válvula de control de temperatura, radio del flujo de alimentación total y temperatura en la entrada del *riser*) del sistema.

### Linealización

La linealización se realizó con ayuda del software simbólico de MATLAB para hacer una expansión en series de Taylor y truncarla en la parte lineal.

$$g \approx \underbrace{\frac{\partial g(x, u)}{\partial x}}_A \bigg|_{x_0, u_0} \Delta x + \underbrace{\frac{\partial g(x, u)}{\partial u}}_B \bigg|_{x_0, u_0} \Delta u$$

$$h \approx \underbrace{\frac{\partial h(x)}{\partial x}}_C \bigg|_{x_0, u_0} \Delta x$$

Entonces el sistema linealizado puede escribirse como:

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x + B \Delta u$$

$$y = C \Delta x$$

Para probar el modelo obtenido los dos sistemas (el no lineal y el linealizado) se utiliza un cambio en el flujo de alimentación en el tiempo  $t=200$  minutos. Además se agregó ruido blanco en las variables de la relación de flujo de aire al regenerador, la temperatura de entrada al *riser* y la señal de la válvula para el control de temperatura. Los resultados muestran que todas las salidas del modelo linealizado están cercanas a las correspondientes del modelo no lineal. Las desviaciones son menores al 3%.

### Modelado de fallas

Tanto el tipo como la intensidad de las fallas fueron sugeridos por trabajadores de una Unidad FCC. Se ponen a consideración cuatro diferentes escenarios:

- Falla 1: Incremento del 10% en la densidad del catalizador  $\gamma$ . Cambios en las propiedades físicas del catalizador pueden ocasionar problemas de circulación. Una falla mecánica puede ocasionar pérdida de finura o densidad del catalizador. El indicador más obvio de que hay un problema con la circulación del catalizador es un cambio dramático en la presión en las válvulas.
- Falla 2: Decremento en 15% de la constante de estancamiento entre primer y segundo estado ( $K$ ).

- Falla 3: Decremento de 10% de la constante de la relación  $CO_2/CO$  ( $K_{reo}$ ). La unidad FCC opera en balance de calor. La fuente primaria de energía en la unidad FCC es el coque. La combustión del coque en el regenerador de la unidad FCC proporciona la energía para realizar el proceso de separación. La relación entre  $CO$  y  $CO_2$  es un factor importante en el calor de la combustión de coque en el regenerador.
- Falla 4: Incremento del 5% del catalizador retenido en el reactor ( $H_{ra}$ ). El catalizador retenido en el reactor es función de la relación de regeneración y flujo de catalizador usado.

Para el modelado de fallas en los componentes, el programa original fue modificado de tal forma que se incluyeran las fallas multiplicativas antes mencionadas. Sin embargo, para el diseño del esquema de diagnóstico se utilizó una representación aditiva de fallas.

### Escenarios de falla

En este trabajo se considera que sólo una falla puede ocurrir a la vez. Cada falla ocurre en  $t=200$  minutos con la magnitud descrita en la sección de fallas.

### DISEÑO DE RESIDUOS

Basados en la información sobre el número de fallas y el tipo de residuos estructurados, se requiere diseñar cuatro residuos. El primero será insensible a  $\gamma$ , pero sensible a las otras tres fallas. El segundo será sensible a  $\gamma$ ,  $K_{reo}$  y  $H_{ra}$  pero insensible a  $K_w$ . El tercero se diseña sensible a  $\gamma$ ,  $K_w$  y  $H_{ra}$  pero insensible a  $K_{reo}$ . El último debe ser insensible a  $H_{ra}$  y sensible a las demás fallas, como se aprecia en la tabla 1, en donde X significa insensible y  $\checkmark$  sensible. Cada residuo está formado mediante el diseño de un observador de orden 25. El diseño de los residuos fue realizado en tiempo continuo, sin embargo fueron simulados en tiempo discreto para hacer el tiempo de simulación más corto. El periodo de muestreo utilizado en la discretización fue  $t=1$  min. La escala de tiempo mostrado en las simulaciones está dada en minutos. Los polos de los observadores fueron asignados como los elementos del vector siguiente: [-1, -2, ..., -25] para todos los casos.

Tabla I. Sensibilidad de los residuos diseñados.

Residuo	$\gamma$	$K_w$	$K_{rec}$	$H_{ra}$
1	X	✓	✓	✓
2	✓	X	✓	✓
3	✓	✓	X	✓
4	✓	✓	✓	X

**Resultados de simulación**

En todas las graficas el eje horizontal representa al tiempo y está dado en minutos mientras que el vertical corresponde a la salida de la función de evaluación.

En la figura 5, se muestra la evaluación de los residuos cuando aparece una falla en  $\gamma$  (escenario 2). La función de evaluación del residuo 1  $\Omega(r_1)$  es menor que el valor de umbral (fijo en 0.8). En este caso con un umbral fijo de 0.8 la falla en  $\gamma$  puede ser detectada claramente.

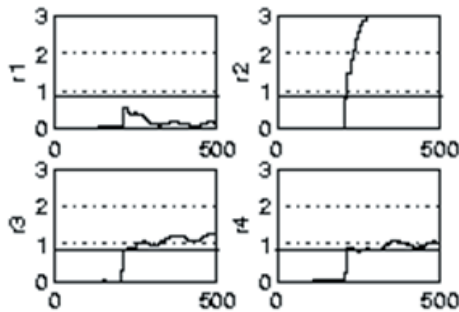


Fig. 5. Función de evaluación para el escenario 2 (falla en  $\gamma$  en  $t=200$  min.)

La función de evaluación para los residuos cuando la falla en  $K_w$  de 15% (escenario 3) está presente se muestra en la figura 6.  $\Omega(r_2)$  es menor que el valor de umbral. Con esto se puede detectar la falla de cambio en  $K_w$ . A medida que el tiempo transcurre, el residuo 2 también sobrepasa el valor de umbral. Esto es debido a la acción “correctiva” del control.

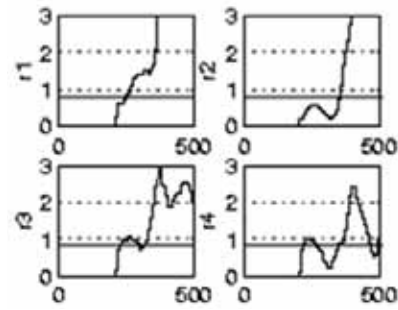


Fig. 6. Función de evaluación para el escenario 3 (falla en  $K_w$  en  $t=200$  min).

El caso en el que la falla en  $K_{rec}$  de 10% está presente (escenario 4) se muestra en la figura 7. La función de evaluación correspondiente al residuo 3 es menor al umbral.

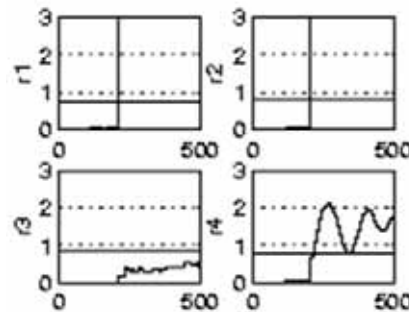


Fig. 7. Función de evaluación para el escenario 4 (falla en  $K_{rec}$  en  $t=200$  min)

La última falla es un cambio de 5% en  $H_{ra}$  en  $t=200$  minutos (escenario 5). La función de evaluación de los residuos se muestra en la figura 8. También en este caso la falla puede ser detectada y localizada con el valor de umbral seleccionado.

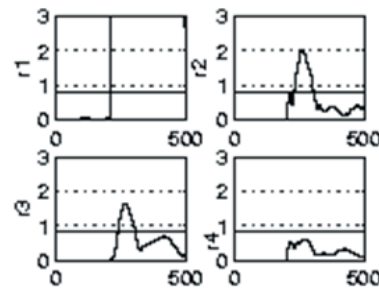


Fig. 8. Función de evaluación para el escenario 2 (falla en  $H_{ra}$  en  $t=200$  min)

## CONCLUSIONES

Los resultados muestran que el esquema de residuos y evaluadores de residuos propuesto permite la detección y localización de las cuatro fallas estudiadas. A diferencia de resultados previos de la literatura en los que sólo se logra detectar dos.

Trabajos futuros incluyen el uso de señales medidas (aplicación a una planta piloto) para los residuos, el diseño para localizar fallas simultáneas, la consideración de un número mayor de fallas en los componentes así como la comparación de diferentes estrategias para diagnóstico.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado parcialmente por el CONACYT-México así como por FAPESP-Brasil (Proceso N 02/08119-2).

## BIBLIOGRAFIA

1. M. Basseville. Information criteria for residual generation and fault detection and isolation. *Automatica*, 33(5):783-803, 1997.
2. P. M. Frank, S. X. Ding, and B. Köppen-Seliger. Current developments in the theory of FDI. In IFAC conference on SAFEPROCESS 2000, pages 15-27, 2000.
3. J. Gertler. Analytical redundancy methods in fault detection and diagnosis. In IFAC / IMACS Symp. SAFEPROCESS, Baden-Baden, Germany, pages 9-21, 1991.
4. J. Chen and R. Patton. Robust model-based fault diagnosis for dynamic systems. Kluwer Academic publishers, Boston, 1999.
5. R. Patton, P. Frank, and R. Clark. Issues of fault diagnosis for dynamic systems. Springer, 2000.
6. L. F. Lautenschlager Moro and D. Odloak. Constrained multivariable control of uid catalytic cracking converters. *Journal of Process Control*, 5(1):29-39, 1995.
7. Y. Huang S. Dash G. V. Reklitis V. Venkatasubramanian. EKF based estimator for FDI in the model IV FCCU. In IFAC conference SAFEPROCESS 2000, June 2000.
8. B. Heim, S. Cauvin, and S. Gentil. FCC process diagnosis based on a causal and heuristic approach. In 4th IFAC Workshop on on-line fault detection and supervision in chemical process, CHEMFAS-4, 2001.
9. H. Vedam and V. Venkatasubramanian. A wavelet theory-based adaptive trend analysis system for process monitoring and diagnosis. In American Control Conference, pages 309-313, June 1997.
10. S. Sengupta and Hema Khurana. Neural network application for fault diagnosis in fccu. In IEEE/IAS International Conference on Industrial Automation and Control, pages 445-450, 5-7 June 1995.
11. P. M. Frank. Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy - a survey. *Automatica*, 26:459-474, 1990.
12. M. Hou and P. C. Müller. Fault detection and isolation observers. *Int. J. of Control*, 60 : 827-846, 1994.
13. X. Ding and P. M. Frank. Frequency domain approach and threshold selector for robust model-based fault detection and isolation. In IFAC/IMACS Symp. SAFEPROCESS, pages 307-312, 1991.
14. Marco A. Rodrigues and Darci Odloak. MPC for stable linear systems with model uncertainty. *Automatica*, 39(4):569-583, July 2003.