

# MÉTODO DE SUPERVISIÓN Y DIAGNÓSTICO DE FALLOS PARA SISTEMAS DINÁMICOS CON INCERTIDUMBRE

Mario García-Sanz  
Pablo Vital  
Javier Villanueva  
Igor Egaña  
Javier Castillejo

Departamento de Automática y Computación  
Universidad Pública de Navarra  
Campus de Arrosadía  
31006 Pamplona  
E-mail: mgsanz@unavarra.es

## Resumen

*El presente trabajo propone un nuevo método de supervisión y diagnóstico de fallos para sistemas dinámicos con incertidumbre que garantice la coherencia del supervisor con el controlador implantado en el proceso. El diseño coherente entre las etapas de supervisión y de control se apoya en la utilización de técnicas de Control Robusto QFT. El método es apto para la detección de fallos en diferentes niveles de alarma, y para su diagnóstico en términos de parámetros físicos.*

**Palabras Clave:** Supervisión, Diagnóstico de Fallos, Dominio Frecuencial, Procesos dinámicos con incertidumbre, Control Robusto, QFT.

## 1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años se han desarrollado numerosos métodos de supervisión y diagnóstico de fallos para sistemas dinámicos [6], siendo las características más comunes el análisis en el dominio temporal, los esquemas basados en modelos, y el diseño del supervisor de modo independiente del controlador.

El concepto de robustez aplicado al diagnóstico de fallos [2] [5] está teniendo un interés creciente debido a la gran demanda de seguridad y fiabilidad existente en las operaciones relacionadas con sistemas dinámicos complejos y con incertidumbre.

Para los esquemas de supervisión basados en modelos, si la dinámica de la planta presenta incertidumbre, la estimación será imprecisa y la generación de residuos nunca se hará nula, ni aun para un punto de operación normal del sistema. Sin la presencia de incertidumbre el problema de detección de fallos puede ser trivial, en cuanto a que

un residuo distinto de cero siempre será asociado a un fallo. Sin embargo, en la práctica siempre va a existir incertidumbre.

El problema del aislamiento es más complejo, incluso en ausencia de incertidumbre, encontrando inevitablemente problemas de falsas o innecesarias alarmas, o haciendo más difícil el diagnóstico de cuándo o dónde ocurrió el fallo.

Los métodos de diseño de supervisores que se pueden encontrar en la literatura actual son, en general, independientes de los esquemas de control que gobiernan las plantas. En contraste, en este trabajo se propone una nueva metodología de diseño de supervisores que garantice la coherencia de los mismos con el controlador implantado en el proceso.

Así, si el sistema dinámico modifica su comportamiento, abandonando el conjunto de modelos matemáticos que definían su evolución y que se habían tenido en cuenta para el diseño previo del controlador, entonces el sistema de control no podrá asegurar el cumplimiento de las especificaciones requeridas por el usuario. En esta situación el supervisor deberá advertir del nuevo contexto.

El diseño coherente entre las etapas de supervisión y de control, desarrollada en el presente trabajo, se apoya en la utilización de técnicas de Control Robusto QFT (Quantitative Feedback Theory) [1], [3] y [4]. A continuación se comentan los detalles de la nueva metodología propuesta.

## 2 FUNDAMENTOS

Las modernas técnicas de Control Robusto QFT, trabajan con modelos que pueden aceptar distintos

tipos de incertidumbre: paramétrica, no paramétrica y mixta. De este modo, se diseña un único controlador que consigue el comportamiento robusto para el conjunto de plantas definidas por dichos modelos.

El presente artículo se fundamenta en dos ideas complementarias: la medida *on-line* de la ganancia y fase del proceso para determinar su punto de funcionamiento actual, y la comparación de dicha información con la familia de plantas consideradas previamente en la etapa de diseño del controlador.

Durante el procedimiento de cualquier diseño de control QFT se abordan cuatro etapas principales: *templates*, *bounds*, *loop-shaping* y análisis. Básicamente, los *templates* son la respuesta frecuencial del conjunto de plantas del espacio de incertidumbre, representada generalmente en el diagrama de Nichols, NC. Los *bounds* determinan las zonas prohibidas para el proceso controlado. Dichas zonas son calculadas a partir de las especificaciones de comportamiento y de los *templates*. El *loop-shaping* es el proceso en sí de diseño del controlador, y la comprobación y validación del mismo se realiza en la etapa de análisis [1], [3] y [4].

Como ejemplo se presenta en la figura 1 el *template* correspondiente a la planta:

$$\frac{k}{t s + 1}, \text{ con } k \in [0.4; 0.8], \text{ y } t \in [200; 1000], \quad (1)$$

para una frecuencia  $\omega = 0.0628$  rad/s.

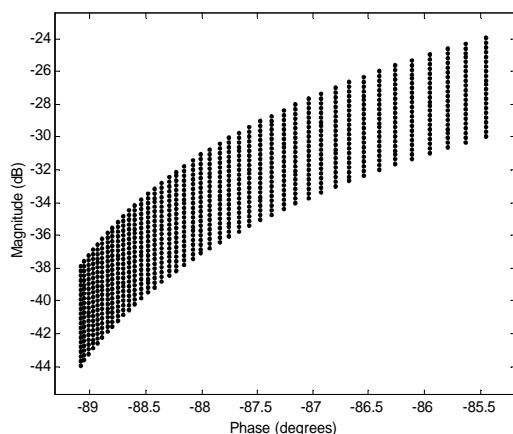


Figura 1: Representación frecuencial de la planta (1) con incertidumbre (*template*).  $\omega = 0.0628$  rad/s.

El controlador QFT se calculará para gobernar todas las plantas representadas en el *template*. Una vez finalizada la etapa de diseño del controlador se procederá al diseño del supervisor.

El fundamento del sistema supervisor consiste en evaluar el punto de funcionamiento actual del sistema y comprobar si se encuentra dentro de los límites definidos por los *templates*, es decir, en la región de funcionamiento para la que el controlador fue diseñado.

Cuando ya se dispone de un cierto historial de puntos de funcionamiento se puede proceder al análisis de la trayectoria que siguen dichos puntos. De esta información pueden extraerse conclusiones acerca de la naturaleza de los posibles fallos. Si la representación frecuencial de la planta, o *template*, se realizó en función de sus parámetros físicos, entonces dichos parámetros se pueden relacionar con la trayectoria real de los puntos de funcionamiento, y así extraerse información acerca de cómo evolucionan en el tiempo. Para ilustrar lo comentado anteriormente véase el apartado 3.3.

### 3 MÉTODO DE SUPERVISIÓN

Básicamente, el procedimiento a seguir consiste en la medición del punto de funcionamiento actual y la comprobación de su ubicación con relación al *template*. Así, si el punto medido es interior al *template* se presumirá funcionamiento normal, si es frontera se generará una alarma, y si es exterior se parará el sistema. A continuación, se muestra un esquema general que ilustra de modo estructurado el método propuesto.

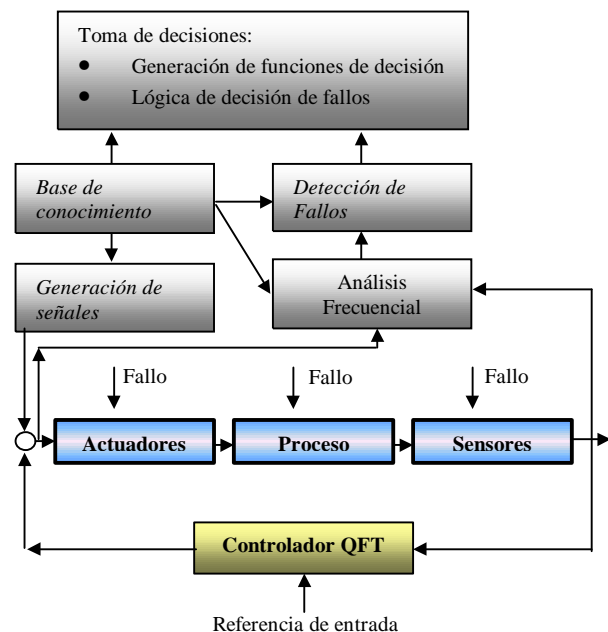


Figura 2: Esquema de supervisión cuantitativa de fallos basada en modelo

De modo secuencial, las tareas a realizar son las siguientes:

- generación de señales de excitación,
- toma de datos de la salida de los sensores,
- interpretación de tales datos: magnitud y fase,
- ubicación del punto obtenido en el *template*,
- generación de señal de alarma o parada, si procede.

### 3.1 DIVISIÓN DE TAREAS: *on-line* / *off-line*

Para la aplicación de esta metodología a una planta real es muy recomendable reducir en la medida de lo posible las operaciones a efectuar *on-line*, es decir, mientras el proceso a supervisar está en ejecución. Esto es interesante porque permite estructurar de un modo más comprensible los pasos a seguir, y sobre todo, porque se reduce la velocidad de cálculo necesaria. Este punto es clave en sistemas que precisan periodos de muestreo muy pequeños.

#### 3.1.1 Tareas *off-line*

- Cálculo de los errores de los filtros empleados. Para calcular el módulo y la fase de la señal de salida del sensor es necesario filtrarla a una frecuencia determinada, que se corresponderá con la frecuencia a la que se calcula el *template*. Los filtros empleados van a aportar ganancia y fase a la señal, introduciendo un error. Este error es conocido y puede calcularse. En cualquier caso, es recomendable utilizar filtros del orden más bajo posible.

- Niveles de alarma paramétricos. Dado que es difícil establecer la frontera entre modo de funcionamiento normal y anormal, se introduce un nivel intermedio de aviso o alarma. Para ello se calcula un *template* interior al original reduciendo un cierto porcentaje el espacio de parámetros. Este porcentaje estará relacionado con la precisión del modelo de la planta y con la precisión de la estimación de la incertidumbre, y será mayor cuanto más conservador se desee que sea el sistema supervisor.

- Niveles de alarma no paramétricos. Para obtener una señal de salida a una frecuencia determinada, es preciso excitar el sistema a esa frecuencia, lo que implica un compromiso entre detectabilidad e impacto sobre el sistema. Este punto se resolverá para cada caso particular. Además existe otro compromiso en relación con la influencia del ruido. En general, cualquier sistema físico tiene sus propios modos de excitación. Se puede estimar la componente frecuencial en vacío de la respuesta de la planta  $y_0(\omega_i)$ . De este modo, suponiendo que existe linealidad en el sistema, la salida que esté presente ante una excitación sinusoidal  $u(\omega_i)$  estará compuesta por la respuesta proporcional a la excitación y la respuesta en vacío:

$$y(\omega_i) = P(j\omega_i) \cdot u(\omega_i) + y_0(\omega_i) \quad (2)$$

Así, la planta estimada es:

$$P_{\text{estimada}}(j\omega_i) = (P(j\omega_i) + y_0(\omega_i)/u(\omega_i)) \quad (3)$$

El segundo término se corresponde con un error en la estimación que puede ser asimilado con un radio de incertidumbre no paramétrico. Nótese que el error en la medida  $y_0(\omega_i)/u(\omega_i)$  se reduce cuando aumenta la excitación  $u(\omega_i)$ , con lo que la estimación es más precisa conforme aumenta la relación señal/ruido.

- Aproximación continua del *template*. Para determinar si un punto de funcionamiento es interior o exterior a un *template*, es necesario disponer de una aproximación continua de éste. Los *templates* de QFT son calculados haciendo un mallado en el espacio de parámetros y proyectando cada punto sobre el diagrama de Nichols. Así resulta una nube de puntos, que complica el problema de determinar si un punto pertenece o no al *template*. Para ello, es necesario desarrollar un algoritmo que delimite el contorno de dicho *template*. Matlab® dispone de un algoritmo que resuelve este problema, pero devuelve únicamente el contorno convexo. Las concavidades del *template* plantean un problema de cálculo del contorno que no tiene solución única. Para resolverlo, se ha desarrollado un nuevo algoritmo que extrae el contorno real, y cuyo funcionamiento queda ilustrado en la figura 3.

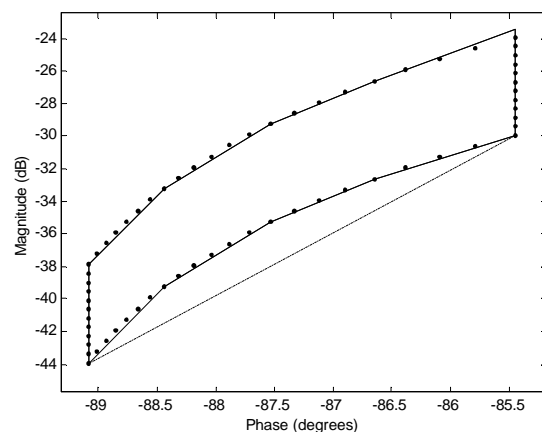


Figura 3: Cálculo del contorno del *template* correspondiente a la planta (1),  $\omega = 0.0628$  rad/s.

Con línea discontinua se ha representado el contorno convexo (calculado por Matlab®) y con línea continua el contorno calculado por el nuevo algoritmo. Se observa una mayor precisión en la zona de la concavidad del nuevo algoritmo con respecto al genérico de Matlab®.

### 3.1.2 Tareas *on-line*

En la figura 4 se muestra un diagrama de bloques esquemático de Simulink® utilizado para simular el proceso. Las tareas *off-line* citadas en el apartado anterior están implícitas dentro de los bloques correspondientes (cálculo de los *templates*, niveles de alarma, etc.). Aquí se simulan únicamente las tareas *on-line*, que son:

- Filtrado de la señal de salida para la frecuencia considerada. Los errores introducidos por el filtro ya se han tenido en cuenta.
- Cálculo de la FFT de la señal para obtener la ganancia del sistema.
- Cálculo de los cruces por cero de las señales de entrada y de salida. Se compara la excitación senoidal de referencia con la salida senoidal resultante (filtrada a la frecuencia de la primera senoidal), y se obtiene la fase de la señal de salida.
- Comprobación del punto de funcionamiento obtenido (interior, alarma, exterior). Con la ganancia y la fase queda definido un punto en el diagrama de Nichols. Su condición interior, frontera o exterior se determina con un algoritmo específico (figura 3).
- Toma de decisiones. Fundamentalmente se generarán tres tipos de señal de salida: alarma, parada o ninguna (funcionamiento normal). También pueden extraerse otras conclusiones referentes a la evolución del estado del sistema mediante un análisis de trayectorias. Véase apartado 3.3.

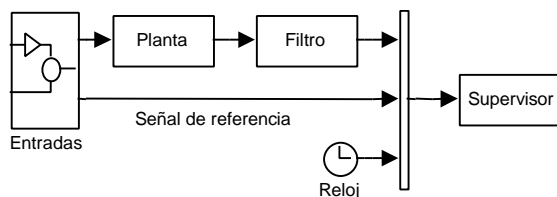


Figura 4: Diagrama de bloques de tareas *on-line*

### 3.2 POSIBLES FUENTES DE ERROR Y SU TRATAMIENTO.

Las principales fuentes de error que podrían aparecer siguiendo el método propuesto son:

- Filtrado de las señales: modificación de la ganancia y la fase estimadas. Se corrige conociendo el funcionamiento frecuencial del filtro utilizado.
- Períodos de muestreo inadecuados: se detecta por un retardo sistemático de la fase del

sistema. Hay que disminuir el periodo de muestreo.

- Presencia de transitorios: se detecta porque el cálculo de la ganancia es sistemáticamente inferior al valor real. Deben eliminarse tales transitorios antes de calcular la FFT.
- Ruidos: se disminuye su influencia aumentando el margen de alarma no paramétrico.
- Imprecisión del modelo de la planta empleado: se disminuye su influencia aumentando el margen de alarma paramétrico.

El método descrito anteriormente incluye el tratamiento de estos errores.

### 3.3 ANÁLISIS DE TRAYECTORIAS

El estudio del historial de puntos de funcionamiento, o análisis de trayectorias, pretende extraer conclusiones acerca de la naturaleza de los fallos que se hayan producido. Este procedimiento ha dado resultados aceptables en simulación aplicándose a plantas muy concretas y conocidas, pero resulta difícil dar con una metodología válida para cualquier sistema. Se trata por tanto de un tema en desarrollo.

El método consiste en implementar un algoritmo para extraer direcciones concretas de las trayectorias calculadas y tratar de asimilarlas a las direcciones de variación, conocidas a priori, de alguno de los parámetros del sistema, o combinación de éstos. El primer problema que surge es el hecho de que el *template* es una representación gráfica de dos dimensiones, y el espacio de parámetros tendrá, en general,  $n$ -dimensiones. Por consiguiente, cualquier trayectoria dentro del *template* podrá darse como combinación de dos o más parámetros. Así, las afirmaciones nunca podrán ser categóricas, a menos que se encuentren simplificaciones o una información adicional del funcionamiento del sistema.

Por el lado positivo se encuentra el hecho de que existen infinitas direcciones de variación y es esperable que cada parámetro físico del sistema considerado quede reflejado de un modo diferente en el *template*, siendo así posible comparar sus influencias sobre éste con las trayectorias descritas por el proceso en ejecución.

El estudio de trayectorias en *templates* es extensible a los *bounds* (representación gráfica en el diagrama de Nichols de las especificaciones) [1] y [4], para chequear no sólo si el punto de funcionamiento es normal o no, sino para determinar cómo de cerca está el proceso de incumplir una especificación

concreta. Asimismo, el estudio del punto de funcionamiento a diferentes frecuencias (diferentes *templates*) delimita de modo más claro las trayectorias.

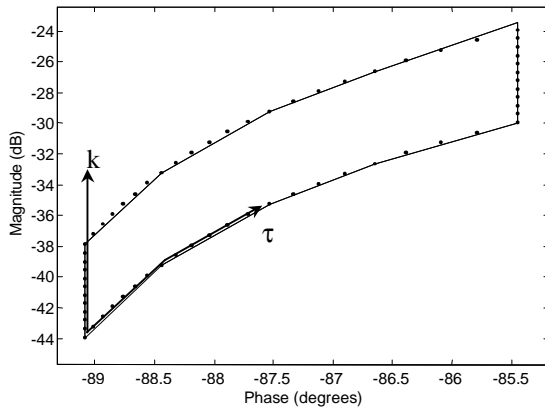


Figura 5: Direcciones principales del *template* correspondiente a la planta (1),  $\omega = 0.0628$  rad/s.

La figura 5 muestra las direcciones principales del *template* que corresponde a la planta (1). Se observa que la representación obtenida es la proyección de un espacio de parámetros ortogonal de dos dimensiones ( $k$  y  $t$ ). Si los parámetros con incertidumbre aumentan, se obtendrá una proyección de un espacio  $n$ -dimensional, que complicará la identificación de las direcciones principales.

#### 4 EJEMPLO

A continuación se muestra un ejemplo de la metodología descrita. En la figura 6 se representa el contorno del *template* correspondiente a la planta (1), y otro interior a él, que corresponde a la misma planta con un espacio de incertidumbre paramétrica reducido,  $k \in [0.46; 0.74]$ ,  $t \in [320; 880]$ .

El propósito del *template* interior es establecer un nivel de alarma que dependa de los parámetros con incertidumbre. Así, se aumenta el nivel de seguridad de la supervisión ante posibles imprecisiones del modelo de la planta o de la estimación de la incertidumbre.

La línea continua de la figura 6 señala la trayectoria teórica de los puntos de funcionamiento de la planta, y los puntos se corresponden con la trayectoria medida en la simulación. Estas trayectorias se han obtenido variando los parámetros de la planta (1) del siguiente modo: se empieza con  $k = 0.45$  y  $t = 580$  (punto inferior izquierdo) y se va disminuyendo  $t$  hasta 480 manteniendo  $k$  constante. Después se mantiene  $t = 480$  constante y se va aumentando  $k$  desde 0.45 hasta 0.95, obteniéndose una línea vertical ( $k$  es la

ganancia, luego no aporta fase). A partir de  $k = 0.8$  estamos fuera del espacio de incertidumbre, y el punto medido cae fuera del *template*. La inexactitud de la medida motiva la existencia de los niveles de alarma previamente explicados.

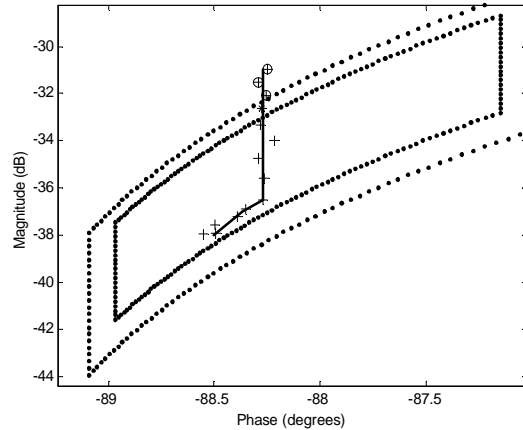


Figura 6: Comparación entre la trayectoria de puntos de funcionamiento teórica y la medida

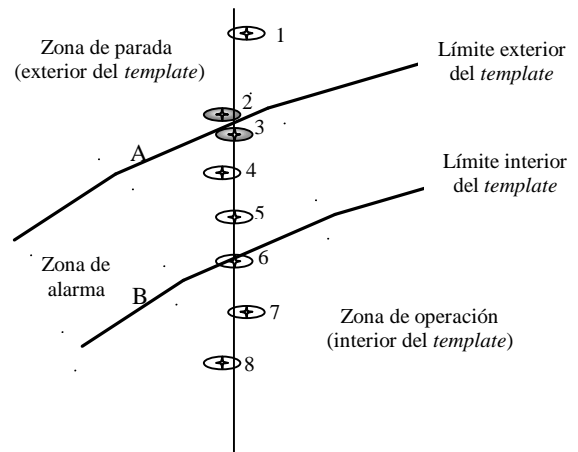


Figura 7: Ampliación de la zona frontera superior del *template* de la figura 6.

La figura 7 muestra una ampliación de la zona frontera en la que se aprecian tres zonas: operación, alarma y parada. A su vez, la zona de alarma tiene tres regiones, que son las cercanías de las líneas de los *templates* interior y exterior, delimitadas por las rayas de puntos, y la zona intermedia. Las líneas de puntos vienen dadas por el radio de incertidumbre no paramétrica, mientras que la separación entre las líneas de los *templates* (líneas continuas) viene dada por el radio de incertidumbre paramétrica.

La figura 8 muestra un detalle de cómo el radio de incertidumbre no paramétrica afecta en la frontera de los *templates*. Este radio viene de posibles ruidos que falsean las medidas, lo que impide conocer con exactitud la posición real del punto. Así, se estima

un radio que depende del ruido y se comprueba la condición interior-exterior para los puntos del círculo que resulta. De esta comprobación surgen tres niveles de alarma: cuando todos los puntos del círculo son exteriores, cuando lo son algunos y cuando no lo es ninguno.

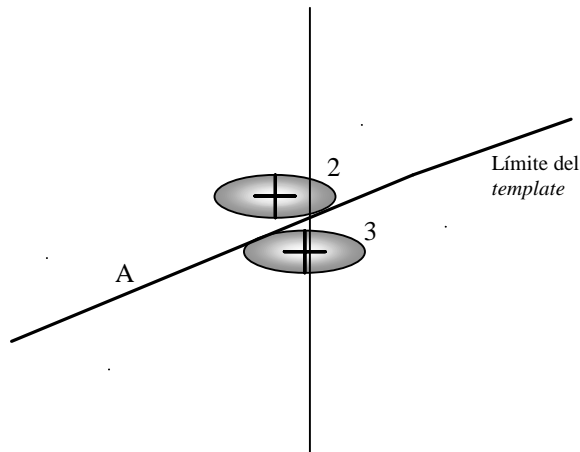


Figura 8: Detalle ampliado de la influencia del radio no paramétrico en las figuras 6 y 7.

Finalmente, en la etapa de toma de decisiones, se podrán generar señales de alarma o parada. Además, se puede analizar fácilmente el historial de los puntos de funcionamiento. Si se compara la figura 5, que muestra las direcciones principales del *template* de nuestro ejemplo, con la figura 6, se observa que la trayectoria sigue primero una línea inclinada coincidente con la dirección de variación de  $t$ , y después una vertical según  $k$ . De esta comparación se puede concluir que primero cambió  $t$  a lo largo de ciertos valores concretos, y después se mantuvo constante y fue la ganancia  $k$  la que aumentó hasta llevar el sistema a un punto de operación no permitido.

## 5 CONCLUSIONES

El presente trabajo ha propuesto un nuevo método de supervisión y diagnóstico de fallos para sistemas dinámicos con incertidumbre, que garantiza la coherencia del supervisor con el controlador implantado en el proceso.

El diseño coherente entre las etapas de supervisión y de control se apoya en la utilización de técnicas de Control Robusto QFT (Quantitative Feedback Theory).

El método es apto para la detección de fallos en diferentes niveles de alarma, y en algunos casos para su identificación en términos de parámetros físicos. Finalmente se han analizado también las posibles fuentes de error, tanto en el proceso de cálculo como en las mediciones (ruidos, transitorios, incertidumbre, etc.), se han sugerido las

soluciones, y se ha presentado un ejemplo ilustrativo.

## Agradecimientos

Los autores agradecen la colaboración de la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT), con motivo del proyecto TAP'97-0471.

## Referencias

- [1] Borghesani, C., Chait, Y. and Yaniv, O., (1995). *Quantitative Feedback Theory Toolbox – For use with Matlab*. 1st Edition. The Mathworks Inc.
- [2] Chen, J. and Patton, R. J., (1994). *A Reexamination of Fault Detectability and Isolability in Linear Dynamic Systems*. Proc. of IFAC/IMACS Symposium Safeprocess, Finland.
- [3] Horowitz, I. and Sidi, (1972). *Synthesis of feedback systems with large plant ignorance for prescribed time-domain tolerances*. Int. J. Control, Vol. 16 (2), pp. 287-309.
- [4] Horowitz, I., (1991). *Survey of Quantitative Feedback Theory*. Int. J. Control, Vol 53 (2). 255-291.
- [5] Isermann, R. (1994). *Integration of Fault Detection and Diagnosis Methods*. IFAC Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes, Espoo, Finland, pp. 575-590.
- [6] Patton, Ron J., (1994). *Robust Model-Based Fault Diagnosis: The State of the Art*. IFAC Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes, Espoo, Finland, pp. 1-25.