

BENCHMARK: DETECCIÓN Y DIAGNÓSTICO DE FALLOS EN UNA TURBINA A GAS, SUBSISTEMA DE INYECCIÓN DE GAS

Teresa Escobet (teresa.escobet@upc.es)
Vicenç Puig (vicenc.puig@upc.es)
Joseba Quevedo (joseba.quevedo@upc.es)
Dept. ESAII-Terrassa
Universitat Politècnica de Catalunya

Resumen

En esta ponencia se describe un benchmark de un sistema de inyección de una turbina a gas destinado a evaluar técnicas de detección y aislamiento de fallos. El proceso propuesto se ha implementado en Simulink y permite simular once tipos distintos de fallos. En la ponencia se introduce brevemente algunas técnicas de detección y aislamiento de fallos, se aplican al benchmark propuesto y se analizan los resultados obtenidos. Dicho benchmark ha sido una de las herramientas de trabajo de una Escuela de Doctorado sobre diagnóstico de fallos impartido conjuntamente por cuatro Universidades Españolas.

Palabras Clave: Benchmark, relaciones de redundancia analítica, detección y diagnóstico de fallos, identificación de modelos.

1 INTRODUCCIÓN

Actualmente el diagnóstico automático de dispositivos es un campo de investigación y desarrollo que se puede abordar desde múltiples perspectivas (desde la Ingeniería de Control, la Inteligencia Artificial, la Estadística,...) y dentro de cada una de ellas con multitud de técnicas (sistemas expertos, redes neuronales, razonamiento basado en casos, observadores, ecuaciones de redundancia analítica, diagnóstico basado en consistencia,...). Es por lo tanto muy complicado para un/a estudiante de doctorado poder abarcar todas estas técnicas en su formación inicial dentro de un único programa de doctorado.

Con el objetivo de formar a todos aquellos profesionales (estudiantes de doctorado o miembros de la industria) interesados en temas de Diagnóstico de sistemas físicos utilizando técnicas de razonamiento basado en modelos, tanto en su aproximación por parte de la comunidad científica de Ingeniería de Control como de la comunidad de la Inteligencia Artificial, en el curso académico actual

se realizó un seminario Inter-universitario denominado: “Escuela de Diagnóstico de Sistemas Físicos: aproximación basada en modelos”. Las universidades implicadas en el mismo fueron: grupo MICE¹ de la Universidad de Girona, el grupo COS² de la Universidad Politècnica de Catalunya, el grupo QUIVIR³ de la Universidad de Sevilla y el grupo GSI⁴ de la Universidad de Valladolid. El seminario se desarrolló a lo largo de 9 días, con ocho horas de docencia (cuatro por la mañana y cuatro por la tarde) diarias. Se contó con la participación de dos profesores invitados que son reconocidas autoridades internacionales en el campo: Marcel Staroswiecki (Universidad de Lille) [1] y Louise Travé-Massuyès⁵ (LAAS-CNRS).

El principal objetivo del seminario fue la presentación a los asistentes de dos de las aproximaciones más conocidas al diagnóstico basado en modelos. Cada aproximación proviene de una comunidad científica: la Ingeniería de Control, conocida como aproximación FDI, y la de la Inteligencia Artificial, conocida como aproximación DX. Un segundo objetivo era la difusión en el ámbito industrial y empresarial en general de este tipo de técnicas⁶.

En el presente artículo se muestra un caso de estudio o benchmark formulado a los alumnos con el objetivo de aplicar técnicas de FDI para la detección y diagnóstico de un subsistema de una turbina de gas, concretamente el subsistema de inyección de gas.

El artículo se estructura de la siguiente manera, en el segundo apartado se introduce el proceso estudiado, componentes fundamentales, posibles fallos del sistema. Seguidamente se introducen brevemente las técnicas de detección basada en modelos, para ser aplicadas al caso de estudio. A continuación, se

¹ <http://mice.udg.es/>

² <http://webesaii.upc.es/>

³ <http://quivir.lsi.us.es:9254/webquivir/jsp/index.jsp>

⁴ <http://www.gsi.infor.uva.es>

⁵ Coordinadora del proyecto BRIDGE,

<http://monet.aber.ac.uk:8080/monet/monetinfo/monetbridge.htm>

⁶ Más información del seminario en: <http://www-esaiiterrassa.upc.es/escuela/>

muestran las herramientas necesarias para la realización de la práctica y los resultados de la misma. Finalizamos con un apartado de conclusiones.

2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO O BECKMARK

2.1 DIAGRAMA SIMPLIFICADO DE UNA TURBINA DE GAS

Una turbina de gas consta de los elementos indicados en la Figura 1.

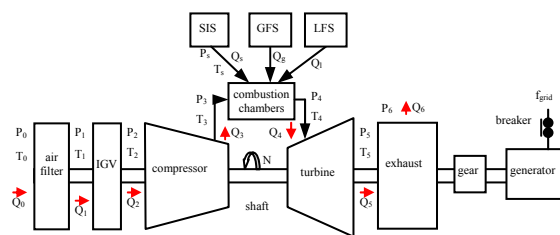


Figura 1: Esquema global de una turbina de gas

Siendo:

- SIS: Steam injection system
- GFS: Gas Fuel System
- LFS: Liquid Fuel System
- P: Pressures
- Q: Flow
- T: Temperature
- N: Speed

El GFS y LFS son complementarios.

2.2 SUBSISTEMA DE INYECCIÓN DE GAS

La parte de estudio corresponde al sistema de inyección de gas GFS (Figura 2).

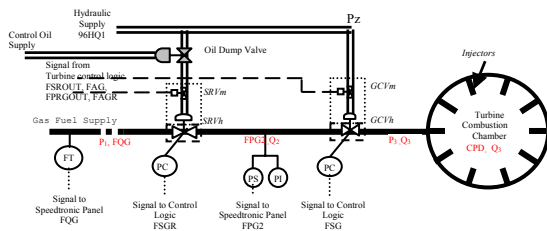


Figura 2: Subsistema de inyección de gas, GFS

Dicho sistema presenta dos lazos de control de posición de las servoválvulas, GCV y SRV, ambos lazos controlados mediante una acción proporcional, y un lazo de control de presión, variable $FPG2$, controlado por una acción Proporcional-Integral.

2.3 ESQUEMA GENERAL DE UNA VÁLVULA MONITORIZADA

Este sistema consta de dos válvulas motorizadas como la utilizada como banco de pruebas en el marco del proyecto DAMADICS⁷. La Figura 3, muestra el sistema de control de este tipo de servo válvulas.

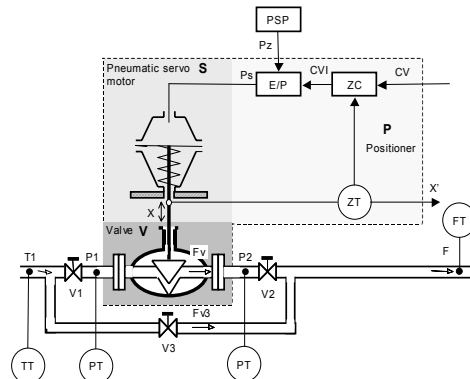


Figura 3: Sistema de control de una válvula monitorizada

En general estas válvulas se controlan mediante un controlador P de posición del vástago, utilizando un transductor capaz de medir el desplazamiento físico del mismo. La salida del controlador, CVI , es una salida de intensidad, generalmente no medida, que actúa sobre un servomotor neumático responsable de aumentar o disminuir la presión en la cámara de la válvula. Un aumento de presión P_s provoca un desplazamiento del vástago, aumentado o disminuyendo (depende del tipo de asiento) el flujo que circula por la tubería.

En el sistema de dosificación de gas, se dispone de dos válvulas, la primera, denominada SRV, tiene por objetivo controlar la presión inter válvulas y la segunda, denominada GCV, tiene como objetivo regular el flujo de gas dosificado.

2.4 MODELIZACIÓN DE CADA UNO DE LOS COMPONENTES Y FALLOS ASOCIADOS

En la Tabla 1 se representa las ecuaciones físicas de cada uno de los componentes del subsistema de inyección de gas teniendo en cuenta los fallos considerados.

El conjunto de variables asociadas al sistema en estudio, se agrupan clasifican según:

- Conjunto de variables observadas: $O = \{T_{FSG}, T_{FSGR}, T_{FQG}, T_{FPG2}, FSROUT, FPRGOUT, CPD\}$

⁷ <http://diag.mchtr.pw.edu.pl/damadics/>

Tabla 1. Lista de relaciones asociada a componentes y fallos (relaciones primarias)

Componente	Relación	Ecuación	Variables exógenas	Fallos asociados
Inyectores	r ₁	$Q_3 = K_{inj} \sqrt{P_3 - CPD}$	CPD	
Gas Control Valve GCV				
GCV _V (Valve)	r ₂	$Q_2 = X_{FSG} \sqrt{FPG2 - P_3}$		
	r ₃	$Q_3 - K_l * Q_2 = 0$		f ₇
GCV _{SP} (Servo y Posicionador)	r ₄	$FSG = f(FSROUT, Pz)$ si $FSG < 100\% * Kb_{FSG}$	P _z , FSROUT	f ₆ , f ₂ , f ₉
GCV _V (Unión Valve y Servo)	r ₅	$FSG - Ke_{FSG} * X_{FSG} = 0$		f ₄
Transductor FSG	r ₆	$FSG - Kt_{FSG} * T_{FSG} = 0$		f ₉
Stop Ratio Valve SRV				
SRV _V (Valve)	r ₇	$FQG = X_{FSGR} \sqrt{P_1 - FPG2}$	P ₁	
	r ₈	$Q_2 - K_l * FQG = 0$		f ₇
SRV _{SP} (Servo y Posicionador)	r ₉	$FSGR = f((FPRGOUT - FPG2), Pz)$ si $FSGR < 100\% * Kb_{FSGR}$	P _z , FPRGOUT	f ₅ , f ₁ , f ₈
	r ₁₀	$FPG2 = f(FPRGOUT, X_{FSG}, X_{FSGR}, CPD)$	CPD, FPRGOUT	f ₅ , f ₁ , f ₈ , f ₁₁ f ₃ , f ₄
SRV _V (Unión Valve y Servo)	r ₁₁	$FSGR - Ke_{FSGR} * X_{FSGR} = 0$		f ₃
Transductor FSGR	r ₁₂	$FSGR - Kt_{FSGR} * T_{FSGR} = 0$		f ₈
Transductor FPG2	r ₁₃	$T_{FPG2} - Kt_{FPG2} * FPG2 = 0$		f ₁₁
Transductor FQG	r ₁₄	$T_{FQG} - Kt_{FQG} * FQG = 0$		f ₁₀

Tabla 2: Lista de fallos

Fallo	Descripción	Parámetro-Relación	Tipo de incidencia
f ₁	Bloqueo de la válvula SRV	r ₉ : Kb_{FSGR} r ₁₀	- fallo aditivo que puede ser observado o no en función del estado del sistema
f ₂	Bloqueo de la válvula CGV	r ₄ : Kb_{FSG}	- fallo aditivo que puede ser observado o no en función del estado del sistema
f ₃	Erosión en la válvula SRV	r ₁₁ : Ke_{FSRG}	- fallo aditivo
f ₄	Erosión en la válvula CGV	r ₅ : Ke_{FSG}	- fallo aditivo
f ₅	Incremento de la fricción de la válvula SRV	r ₉ r ₁₀	- fallo multiplicativo (parámetros de la relación)
f ₆	Incremento de la fricción de la válvula CGV	r ₄	- fallo multiplicativo (parámetros de la relación)
f ₇	Perdidas en las tuberías	r ₃ y r ₈ : Kl	- fallo aditivo
f ₈	Fallo en el transductor de posición de la válvula SRV	r ₁₂ : Kt_{FSGR}	- fallo aditivo
f ₉	Fallo en el transductor de posición de la válvula CGV	r ₆ : Kt_{FSG}	- fallo aditivo
f ₁₀	Fallo en el transductor de caudal	r ₁₄ : Kt_{FOG}	- fallo aditivo
f ₁₁	Fallo en el transductor de presión	r ₁₃ : Kt_{FPG2}	- fallo aditivo

- Conjunto de variables no observadas: $X = \{Q_3, Q_2, FQG, P_3, FPG2, FSG, FSGR, X_{FSG}, X_{FSGR}\}$ ⁸

- Conjunto de fallos: $F = \{f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, f_7, f_8, f_9, f_{10}, f_{11}\}$

⁸ Las variables no observadas X_{FSG} y X_{FSGR} , representan el tamaño real del orificio por donde circula el flujo. Obsérvese que en caso de presentarse una erosión en la válvula, la posición del vástago mediada, no coincidiría con el tamaño real del orificio.

Los tipos de fallos que se pretenden detectar en este sistema y su efecto sobre las relaciones se indican en la Tabla 2.

2.5 SIMULACIÓN DEL SUBSISTEMA DE INYECCIÓN DE GAS

Al tratarse de un benchmark con el cual probar distintas técnicas de diagnóstico, se ha construido un simulador del subsistema a estudiar. Para ello se ha utilizado el programa SIMULINK. Este simulador incorpora las ecuaciones no lineales del sistema y permite introducir los fallos descritos en la tabla 2. La Figura 4, muestra el modelo desarrollo denominado *pract_sheba_fallos.mdl*. Todos los ficheros, descritos en esta ponencia son accesibles en <http://www-esaiiterra.upc.es/escuela/> (descarga de material, prácticas UPC).

El tipo de fallo considerado es abrupto y se aplica en el instante 1500 seg del inicio de la simulación.

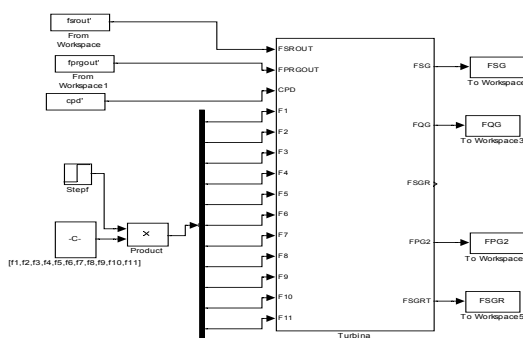


Figura 4. Simulación del subsistema de inyección de gas

3 DIAGNÓSTICO DE FALLOS BASADOS EN MODELOS

3.1 INTRODUCCIÓN AL DIAGNÓSTICO DE FALLOS BASADOS EN MODELOS

El problema de diagnóstico de fallos tal y como se ha formulado en [4], consiste en que a partir de una secuencia de entradas U y salidas Y obtenidas a partir de los sensores instalados en el proceso determinar la presencia de un fallo f del conjunto de fallos posibles F .

En general, el diagnóstico de fallos consiste en dos etapas:

- la detección del fallo: decisión de si existe o no un fallo así como determinación su instante de aparición;
- y el aislamiento del fallo: localización del componente en el cual se ha producido el fallo.

En el caso *detección de fallos basados en modelos* (MBD), el problema queda formulado como a partir de una secuencia de entradas U y salidas Y obtenidas de los sensores instalados en el proceso a

monitorizar, se trata de verificar la consistencia con el comportamiento modelado. Las relaciones o ecuaciones que incluyen solo variables medidas se las conoce como *relaciones de redundancia analítica* (ARR).

La Figura 5 ilustra un esquema sencillo de cómo utilizar modelos en la detección de fallos. Son varios los problemas asociados a los modelos:

- Cuales son las relaciones de redundancia analítica de un sistema y como encontrarlas, en la bibliografía se proponen algoritmos que permiten determinar las ARR [1],[5] y [7];
- Difícilmente un modelo es una representación exacta del comportamiento del sistema, debido a dinámicas no modeladas, ruido y/o perturbaciones externas el test o umbral de detección debe ser robusto, en la bibliografía se proponen una gran variedad de métodos y técnicas de detección robustas [4].

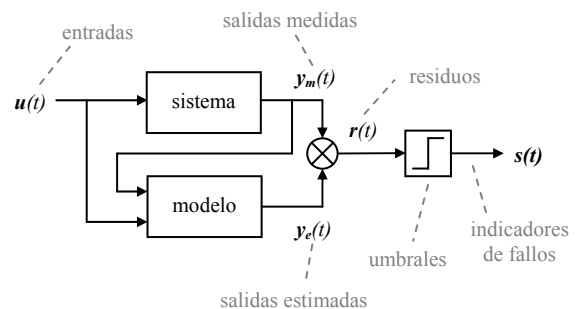


Figura 5. Esquema de detección de fallos basado en modelos

Una vez detectada la presencia de un fallo, es necesario determinar aislar el fallo. Este tipo de análisis puede realizarse siguiendo dos metodologías distintas, ya sea utilizando [2]:

- matriz de firmas de fallo (enfoque FDI o de Ingeniería de Control), o bien,
- el diagnóstico basado en consistencia (enfoque DX o de Inteligencia Artificial)

3.2 DETERMINACIÓN DE LAS ARR

Teniendo en cuenta las variables medidas y utilizando herramientas de generación de relaciones de redundancia analítica [7], se obtienen los resultados de la Tabla 3, deduciéndose a partir de ella una posible estructura causal (Figura 6). La nomenclatura utilizada en la tabla es la siguiente:

- '0' indica que el soporte no pertenece a la ARR
- '1' y '2' indican que el soporte si pertenece a la ARR y, a demás, indican la causalidad de la relación entradas y salida respectivamente.

Tabla 3. Relaciones de redundancia analítica mínimas

ARRs	Estructura / Soporte sensor									Soporte componente										
	CPD	FSROUT	Pz	TFSG	P1	FPRGOUT	TFSGR	TFQG	TFPG2	r ₁	r ₂	r ₃	r ₄	r ₅	r ₇	r ₈	r ₉	r ₁₀	r ₁₁	
ARR ₁	0	1	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	
ARR ₂	1	0	0	1	0	1	1	0	2	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	
ARR ₃	0	0	1	0	0	1	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
ARR ₄	1	0	0	1	0	0	0	2	1	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0	
ARR ₅	0	0	0	0	1	0	1	2	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	

Se obtienen cinco relaciones de redundancia analítica mínimas. Estas cinco relaciones se deducen combinando entre sí algunas de las relaciones de los componentes o relaciones primarias. Las relaciones ARR₂ y ARR₃ tienen en común que prescindiendo de las variables exógenas, $Estructura_ARR_2 \subset Estructura_ARR_3$, impidiendo por tanto que puedan ser evaluadas de forma independiente, siendo por lo tanto el soporte de ambas la unión de las dos. Este hecho incide directamente en los fallos considerados a cada ARR, en este caso serán los mismos.

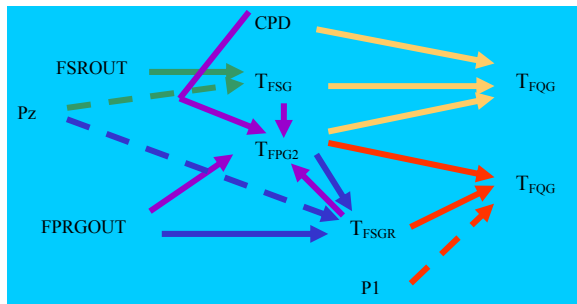


Figura 6. Grafo causal de relación entre variables (notaciones: ARR₁, ARR₂, ARR₃, ARR₄ y ARR₅)

3.3. ESTUDIO DEL GRADO DE ISOLABILIDAD DEL SISTEMA

Utilizando los resultados de la Tabla 3 y los fallos vinculados a cada una de las relaciones primarias (Tabla 2) es posible construir la matriz de firma de fallos (ver Tabla 4).

Tabla 4. Matriz de firma de fallos

ARR	Fallos asociados										
	f ₁	f ₂	f ₃	f ₄	f ₅	f ₆	f ₇	f ₈	f ₉	f ₁₀	f ₁₁
ARR ₁		1				1			1		
ARR ₂	1		1	1	1			1	1		1
ARR ₃	1		1	1	1			1	1		1
ARR ₄				1			1		1	1	1
ARR ₅			1				1	1		1	1

La matriz de firma de fallos, permite deducir que fallos serán aislables y cuales. En nuestro caso, los

conjuntos de fallos aislables son: $\{f_1, f_5\}$, $\{f_2, f_6\}$, $\{f_3, f_8\}$, $\{f_7, f_{10}\}$, f_9, f_{11} .

4 DIAGNÓSTICO DE FALLOS

4.1 MODELOS DE DETECCION

Las ARR obtenidas permiten observar las relaciones que pueden establecerse entre las variables mediadas. Para ser utilizadas en la detección de fallos, será necesario disponer de un modelo operacional, es decir definir la estructura del modelo y estimar sus parámetros. Para ello se han utilizado herramientas de identificación de sistemas dinámicos [3]. Como resultado de considerar las variables exógenas, P1 y Pz, constantes, los modelos identificados junto con el valor de sus parámetros se muestran en la Tabla 5. El fichero utilizado para estimar los parámetros se denomina: *Estimacion_parametros.m* y los datos utilizados son los del fichero *escenario1.mat*.

Cada uno de los modelos operacionales, GFS_{opi}, esta vinculado con su correspondiente ARR_i. Obsérvese que en GFS_{op2}, no aparecen las variables: $\{T_{FSGF}, T_{FSG}, CPD\}$, ello es debido a que trata de un lazo de control con una dinámica rápida y no puede ser observada al utilizarse un periodo de muestreo de 1 segundo.

Los modelos estimados se han validado utilizando los datos del *escenario2.mat* (también en condiciones de operación sin fallo). La simulación y validación de los modelos estimados se puede hacer mediante el fichero *pact_sheba_deteccion_fallos.mdl*⁹. El fichero permite introducir los datos para validar los modelos y analizar los residuos. Dos de los residuos observados se muestran en las Figuras 7 y 8.

⁹ Antes de iniciar la simulación comprobar que no haya ningún fallo seleccionado y definir $n=size(fsg)$

Tabla 5. Modelos operacionales: estructura del modelo y parámetros sintonizados¹⁰

Relación de detección	Estructura del modelo	Parámetros estimados
GFS_op1	$T_{FSG}(t) = K_{GFS1} * FSROUT(t)$	$K_{GFS1} = 1.0151$
GFS_op2	$T_{FPG2}(t) = K_{GFS2} * FPRGOUT(t)$	$K_{GFS2} = 1.0000$
GFS_op3	$T_{FSGR}(t) = T_{FSGR}(t-1) + K1_{GFS3} * (FPRGOUT(t-1) - T_{FPG2}(t-1)) + K2_{GFS3}^{11}$	$K1_{GFS3} = 1.0497$
GFS_op4	$T_{FQG}(t) = K1_{GFS4} * T_{FQG}(t-1) + K2_{GFS4} * T_{FSG}(t-8) + K3_{GFS4} * T_{FPG2}(t-8) + K4_{GFS4} * CPD(t-8) + K5_{GFS4}^{10}$	$K1_{GFS4} = 0.5990$ $K2_{GFS4} = 0.0209$ $K3_{GFS4} = 0.0353$ $K4_{GFS4} = -0.0922$
GFS_op5	$T_{FQG}(t) = K1_{GFS5} * T_{FQG}(t-1) + K2_{GFS5} * T_{FSGR}(t-8) + K3_{GFS5} * T_{FPG2}(t-8) + K4_{GFS5}^{10}$	$K1_{GFS5} = 0.8903$ $K2_{GFS5} = 0.0048$ $K3_{GFS5} = 0.0015$

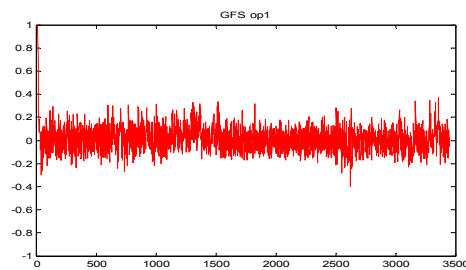


Figura 7. Residuo que compara el modelo simulado GFS_op1 con los datos reales

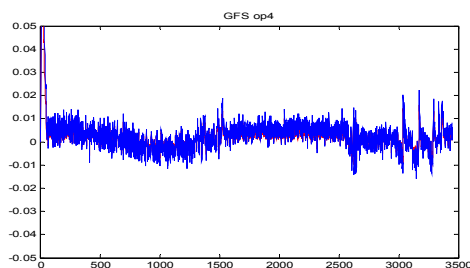


Figura 8. Residuo que compara el modelo simulado GFS_op4 con los datos reales

Como resultado de comparar las Figuras 7 y 8, puede observarse el error de comparación no es nulo. En el caso de GFS_op1 el residuo es prácticamente una señal aleatoria, mientras que en el caso de GFS_op4, el residuo presenta una dinámica lenta no modelizada, como resultado de considerar una relación lineal

¹⁰ Para simplificar la notación tanto los datos de los escenarios como en los ficheros proporcionados para la realización de la práctica, se considera $f_{qg} = T_{FQG}$, $f_{sg} = T_{FSG}$, $f_{sgr} = T_{FSGR}$ y $f_{pg2} = T_{FPG2}$.

¹¹ Parámetros utilizados solo en el caso de umbrales adaptativos

entre señales de entrada y salida, siendo en este caso el modelo real fuertemente no lineal.

4.2 DETERMINACIÓN DE LOS UMBRALES DE DETECCIÓN

En este apartado se propone un primer resultado con un umbral estático. Para ello se ha realizado un análisis estadístico de la media y la desviación estándar de cada una de las señales, obteniéndose como resultados los mostrados en la Tabla 6.

Tabla 6. Caracterización del residuo: media y desviación estándar (std)

Relación de detección	Ecuaciones de paridad		Observadores	
	media	std	media	std
GFS_op1	-0.0055	0.0618		
GFS_op2	0.0120	0.0931		
GFS_op3	0.0126	0.0978	0.0343	0.2347
GFS_op4	0.0017	0.0034	0.0012	0.0049
GFS_op5	0.0012	0.0017	0.0019	0.0028

Teniendo en cuenta la desviación estándar del residuo se pueden fijar unos límites fijos que incluyan la incertidumbre del modelo.

El fichero *Analisis_resultados.m* permite visualizar los resultados de simulación y los límites de validez de dicho modelo. La Figura 9 muestra uno de los resultados, con los umbrales fijos. Nótese que el tramo inicial es debido a la inicialización del estado del sistema.

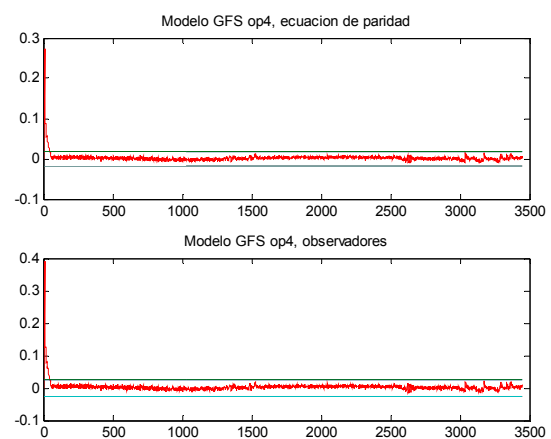


Figura 9. Resultado del modelo GFS_op4 con umbrales fijos

4.3 DETECCIÓN DE FALLOS

Mediante el modelo SIMULINK desarrollado se ha procedido a analizar el comportamiento de los residuos ante la presencia de un fallo en el sistema. Las Figuras 10 y 11, muestran como el fallo aditivo

f_7 repercute en los distintos residuos. Tal y como era de esperar el fallo f_7 solo repercute en los residuos de los modelos GFS_op4 y GFS_op5. Al ser un fallo aditivo, el tipo de modelo utilizado (ecuaciones de paridad o observadores) no incide sobre el resultado y ambos modelos detectan el fallo al cabo de un instante de muestreo.

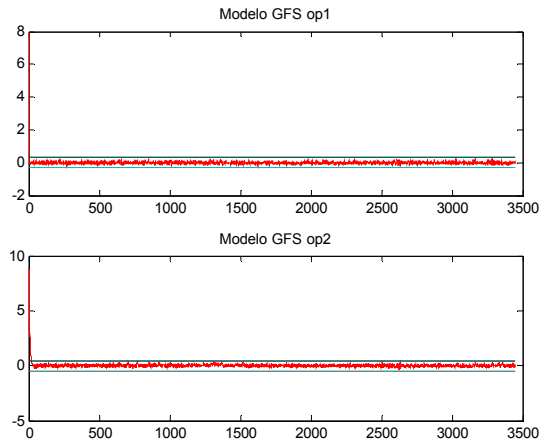


Figura 10. Residuos evaluados a partir de los modelos GFS_op1 y GFS_op2, respectivamente.

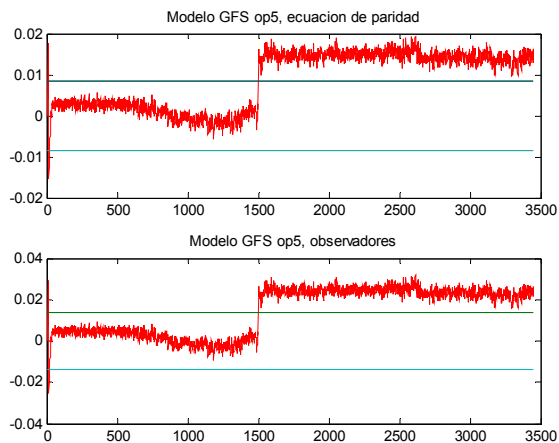


Figura 11. Residuos evaluados con GFS_op5

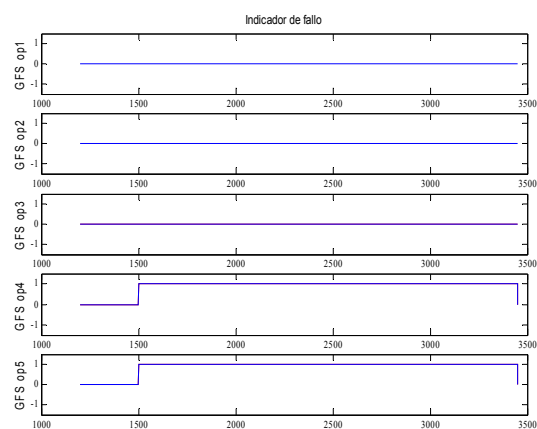


Figura 12. Indicador de fallo en el caso de producirse el fallo f_7

La Figura 12 muestra la activación del indicador de fallo en el caso de producirse el fallo f_7 en el proceso estudiado. La firma de fallos en este caso vendrá dada por: $\{0\ 0\ 0\ 1\ 1\}$. Comparando esta firma con la los datos de la matriz de fallo, Tabla 4, el diagnóstico asociado sería un fallo en f_7 o en f_{10} .

Las Figuras 13 y 14, muestran como el fallo multiplicativo f_5 repercute en los distintos residuos. Tal y como era de esperar el fallo f_5 afecta los residuos de los modelos GFS_op2 y GFS_op3 transitoriamente, siendo más sensible el modelo con observadores que ecuaciones de paridad (Figura 13). El problema asociado a este fallo, al igual que otros tal y como se verá en el siguiente apartado, es que los residuos de los modelos operacionales GFS_op4 y GFS_op5 no deberían ser sensibles a este fallo, pero debido a errores de modelización se observa que el indicador no es robusto (Figura 14).

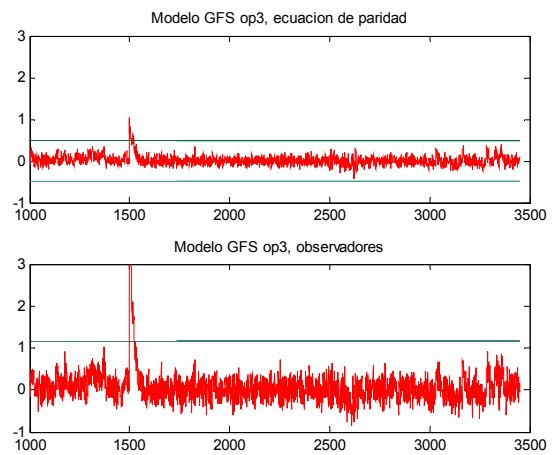


Figura 13. Residuos evaluados con GFS_op3

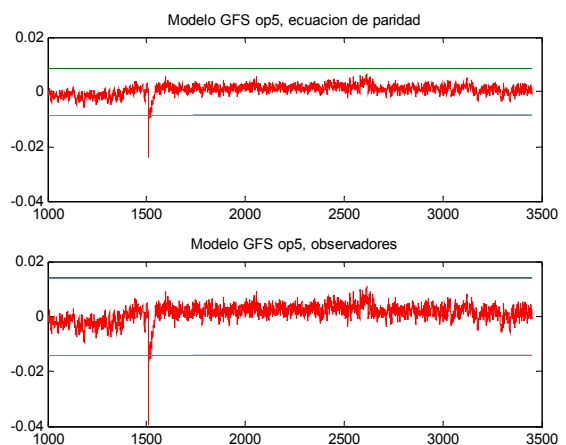


Figura 14. Residuos evaluados con GFS_op5

La Figura 15 muestra la activación del indicador de fallo en el caso de producirse el fallo f_5 en el proceso estudiado. La signatura de fallos en este caso vendrá dada por: $\{0\ x\ x\ x\ x\}$. Donde 'x' indica que el fallo

no es persistente. Comparando esta firma con los datos de la matriz de fallo, Tabla 4, el diagnóstico asociado sería un fallo erróneo en f_{11} .

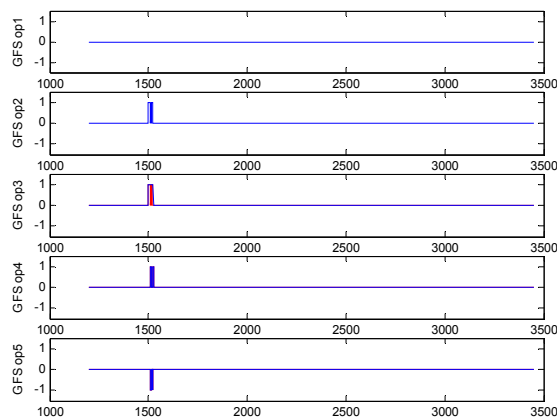


Figura 15. Indicador de fallo en el caso de producirse el fallo f_5

4.3 AISLAMIENTO DE FALLOS. VALIDACIÓN DE LA MATRIZ DE FIRMAS DE FALLOS

Como resultado de testear cada uno de los fallos propuestos, la matriz de fallo resultante de utilizar los indicadores propuestos se muestra en la tabla 7. En ella se indican cuales de los indicadores coinciden con los teóricos (marcados en negro), cuales de los indicadores son persistentes en el tiempo ‘1’ y cuales son transitorios ‘x’.

Tabla 7. Matriz de firma de fallos utilizando los indicadores de fallos estáticos

FSG_op	Fallos asociados										
	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8	f_9	f_{10}	f_{11}
FSG_op1		1				-1			1		
FSG_op2	1	x	x	x	x			x	x		-1
FSG_op3	1	x	x	x	x			x	x		-1
FSG_op4	1	x	x	-1	x	x	1	x	1	1	-1
FSG_op5	-1	x	1	x	x		1	1	x	1	1

Comparando los resultados con la matriz teórica de firma de fallos se observa:

- los modelos que incluyen un control PI, caso de FSG_op2 y FSG_op3, la mayoría de los fallos solamente son visibles en los transitorios;
- los fallos multiplicativos dentro de un lazo de control P, GFS_op1, son visibles y permanentes en el tiempo;
- los modelos operacionales estimados son deficientes, ya que se ven afectados por un transitorio;

- el signo con que un fallo afecta al modelo operacional puede ser también una información importante para discriminar fallos.

Los resultados validan un estudio realizado por Quevedo [6], en el que se estudiaba la incidencia de los fallos en los lazos de control.

5 CONCLUSIONES

Se ha presentado un benchmark que se corresponde con un proceso real de inyección de gas en una turbina industrial. En él se han definido varios tipos de fallos, desde fallos aditivos que pueden presentarse en los equipos de medida, a fallos multiplicativos que afectan, en este caso, sobre los actuadores o servoválvulas. El objetivo del benchmark es el de disponer de un banco de pruebas para testar tanto técnicas de detección de fallos como técnicas de aislamiento de fallos.

En el artículo presentado, se han mostrado los resultados de utilizar modelos lineales y aplicar umbrales fijos en la detección de fallos. En el benchmark presentado a los alumnos, se les propuso probar técnicas de umbrales adaptativos utilizando modelos con parámetros inciertos y utilización de modelos no lineales. Se les brindó un algoritmo para la identificación de los parámetros intervalares y para su simulación (todo ello es material disponible en la web del curso).

Agradecimientos

Este trabajo forma parte de un proyecto de investigación subvencionado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología del Estado Español (MCYT, ref. DPI2002-03500) y por la comunidad europea EC RTN DAMADICS (contrato RTN-1999-00392). Los autores del trabajo son miembros del grupo de investigación “Sistemes Avançats de Control” (SAC) subvencionado por la Generalitat de Catalunya (ref. 2001SGR00236).

Referencias

[1] Blanke, M., Kinnaert, M., Lunze, J., Staroswiecki, M. Diagnosis and Fault-Tolerant Control. Springer. 2003

[2] Cordier, M.O., Dague, P., Dumas, M., Lévy, M., Montmain, J., Staroswiecki, M. & Travé-Massuyès, L. (2002). Comparative analysis of AI and control theory approaches to model-based diagnosis. 14th European Conference

on Artificial Intelligence (ECAI'2000), Berlin (Alemania), pp. 274-279.

- [3] L.Ljung. System identification – Theory for the user, Prentice Hall, 1987.
- [4] V. Puig, J. Quevedo, T. Escobet, B. Morcego, C. Ocampo, Tutorial Control Tolerante a Fallos (Parte I): Fundamentos y Diagnóstico de Fallos. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial. Número 1, Volumen 1, Abril 2004.
- [5] Pulido, B. and Alonso, C. (2002). Possible conflicts, ARRs, and conflicts. In 13th International Workshop on Principles of Diagnosis (DX-02), pages 122–128, Semmering, Austria.
- [6] J. Quevedo, V. Puig y T. Escobet. Model fault detection of feedback systems: how and why to use the output of PID controller?. IFAC Workshop on Digital Control. Past, present and future of PID Control, Terrassa 5-7 April, 2000.
- [7] Travé-Massuyès, L., Escobet, T. & Spanache, S. (2003). Diagnosability analysis based on component supported analytical redundancy relations. 5th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes (SAFEPROCESS'2003), Washington (USA), 9-11 Jun 2003, pp.897-90