



ScienceDirect
Disponible en www.sciencedirect.com



Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial 13 (2016) 186–195

www.elsevier.es/RIAI

Introducción a la Diagnóstico de Fallos basada en Modelos mediante Aprendizaje basado en Proyectos

Ramon Costa Castelló*, Vicenç Puig, Joaquim Blesa

Departament d'Enginyeria de Sistemes Automàtica i Informàtica Industrial (ESAI); Universitat Politècnica de Catalunya (UPC); Pau Gargallo, 5; 08028 Barcelona.

Resumen

La diagnosis de fallos basada en modelos es hoy en día un campo maduro dentro de la ingeniería de control que empieza a formar parte de los planes de estudios de grado y postgrado. Sin embargo, la falta de buenos materiales pedagógicos dificulta el proceso de enseñanza / aprendizaje. En este trabajo se muestra cómo una metodología de aprendizaje basada en proyectos se ha utilizado en las sesiones de laboratorio del curso de *Diagnóstico y Control Tolerante a Fallos del Máster en Automática y Robótica* de la UPC utilizando un sistema real de tres depósitos. Los métodos de detección de fallos basados en observadores y la utilización de residuos estructurados para el aislamiento de fallos son introducidos a los estudiantes desde un punto de vista práctico, por medio de un conjunto de ejercicios que se proponen para alcanzar un conjunto de objetivos de aprendizaje.

Palabras Clave: Detección, Diagnóstico, Residuos, Fallo, Aprendizaje basado en Proyectos.

1. Introducción

La teoría de control es hoy en día una materia presente en la mayoría de planes de estudios de grado y máster en el ámbito de la ingeniería. Los estudiantes aprenden desde los conceptos básicos de modelado de sistemas dinámicos hasta los más recientes algoritmos de control avanzado. Sin embargo, la diagnosis de fallos en sistemas dinámicos, aunque es un campo maduro y activo en la comunidad científica, raramente se encuentra incluido en dichos planes de estudios. Con el aumento del nivel de automatización de procesos y sistemas industriales, el nivel de complejidad de las tareas de supervisión también se ha incrementado. En la mayoría de las plantas, esta tarea está siendo realizada por operadores humanos a través de los sistemas SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition). Los operadores deben reaccionar cuando alguna variable excede los niveles de seguridad establecidos tomando acciones correctivas apropiadas. Los sistemas de supervisión automáticos que incluyen mecanismos de diagnóstico de fallos podrían ser muy útiles en estas instalaciones complejas para ayudar a los operadores a tomar las medidas correctivas lo más adecuadas posibles. Sin embargo, todavía existe una brecha

entre el mundo científico y la industria que hace que el uso de los sistemas de diagnosis de fallos aún no se hayan extendido como se esperaba de acuerdo con el desarrollo conceptual llevado a cabo durante los últimos años. Esto se debe en parte a que los estudiantes de ingeniería no son conscientes de la existencia de metodologías para el desarrollo de sistemas de diagnosis de fallos.

Entre las diferentes metodologías de diagnosis de fallos, los métodos basados en modelos matemáticos son los que más se han desarrollado teóricamente y los que están más relacionados con los contenidos de las materias de teoría de control a las que están familiarizados los estudiantes. Por esta razón, la diagnosis de fallos basada en modelos matemáticos es el núcleo del curso *Diagnóstico y Control Tolerante a Fallos* en el *Máster en Robótica y Automática* de la UPC.

La diagnosis de fallos en sistemas dinámicos mediante modelos se basa en comprobar la consistencia de los comportamientos observados (mediante las medidas de los sensores) con los estimados mediante modelos (*redundancia analítica*). Dicha consistencia se basa en el cálculo de la diferencia entre el valor predicho a partir del modelo y el valor real medido por los sensores. Esta diferencia, conocida como *residuo*, se compara con un valor umbral (cero en el caso ideal). Cuando el residuo es mayor que el umbral, se determina que hay un fallo en el sistema. De lo contrario, se considera que el sistema está funcionando correctamente. Una vez detectado un fallo, se proce-

* Autor en correspondencia

Correos electrónicos: ramon.costa@upc.edu (Ramon Costa Castelló), vicenc.puig@upc.edu (Vicenç Puig), joaquim.bleesa@upc.edu (Joaquim Blesa)

de al aislamiento de dicho fallo para poder determinar cual de los posibles fallos que pueden afectar al sistema ha producido la inconsistencia observada. Aunque para detectar fallos sólo es necesario un residuo, para efectuar el aislamiento del fallo se requiere un conjunto (o un vector) de residuos (Gertler, 1998). Si un fallo es distinguible de otros fallos utilizando un conjunto de residuos, se dice que este fallo es aislable.

La diagnosis de fallos basada en modelos matemáticos comenzó con los trabajos pioneros de Clark (Clark et al., 1975) entre otros. Desde entonces, se ha desarrollado una gran cantidad de investigación en este área. Como resultado, hoy en día existen un conjunto de métodos que conforman la base de este campo y pueden ser considerados como los cimientos de los métodos más avanzados. Los métodos base de la detección de fallos se suelen clasificar en: basados en ecuaciones de paridad (Gertler, 1998), basados en observadores (Chen y Patton, 1999) y basados en estimación paramétrica (Isermann, 1993, 2006). Las relaciones entre todos estos métodos han sido establecidas por varios autores, ver por ejemplo Gertler (1998). Por otro lado, en la literatura, existen diferentes enfoques para el aislamiento de fallos basados en la construcción de conjuntos de residuos con las propiedades deseadas de aislabilidad de los fallos. Un enfoque se basa en el diseño de un vector de *residuos estructurados* (Gertler, 1998) de tal manera que cada residuo está diseñado para ser sensible a un subconjunto de fallos e insensible a los fallos restantes. El proceso de diseño del vector de residuos se divide en dos pasos: el primer paso consiste en especificar las relaciones de sensibilidad e insensibilidad entre los residuos y los fallos de acuerdo con el método de aislamiento utilizado, mientras que el segundo consiste en generar un conjunto de residuos estructurados según las relaciones de sensibilidad e insensibilidad especificadas. Una vez definido el conjunto de residuos estructurados, el problema de aislamiento se reduce a evaluar la consistencia de cada residuo por separado con su umbral asociado y aplicar una tabla de decisión que permite a partir de los residuos inconsistentes identificar cuáles son los fallos que pueden haber producido dichas inconsistencias. Una forma alternativa de lograr la aislabilidad de fallos es diseñar un vector de *residuos direccionales* (Gertler, 1998), de tal manera que cada fallo se manifiesta en una dirección fija específica en el espacio de los residuos.

Entre los métodos de detección de fallos existentes, para preparar las actividades de aprendizaje práctico en el laboratorio del curso de *Diagnóstico y Control Tolerante a Fallos* se eligió el enfoque basado en el uso de observadores. Esta elección se basó en que dicha técnica se consideraba la más idónea para introducir a los estudiantes en las metodologías de detección de fallos al estar ya en su mayoría familiarizados con los observadores en cursos previos de control. Por lo que respecta al aislamiento, se escogieron las técnicas basadas en residuos estructurados por ser las más ampliamente utilizadas en la literatura.

Por otro lado, se evaluaron diferentes metodologías didácticas posibles a utilizar para alcanzar los objetivos de aprendizaje propuestos. Después de algunas discusiones, los profesores del curso llegaron a la conclusión de que los estudiantes “aprenden

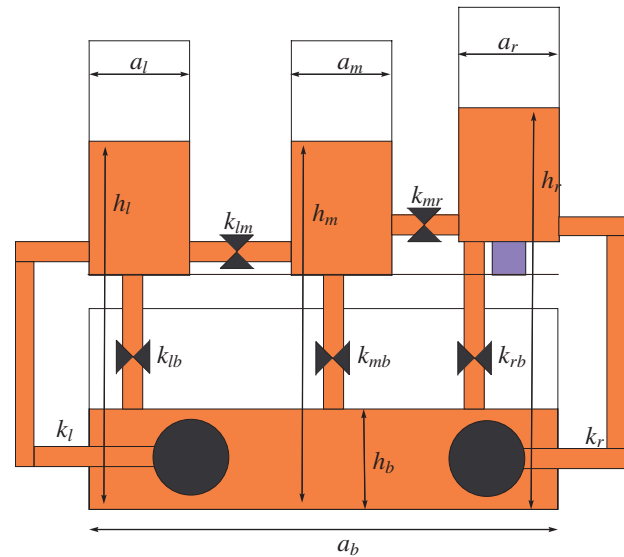


Figura 1: Esquema de la planta de 3 depósitos

haciendo” y que “los problemas del mundo real captan el interés de los alumnos, al mismo tiempo que ellos adquieren y aplican nuevos conocimientos para resolver estos problemas”. Este es el elemento clave en el que se basa la metodología de Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP) que ha demostrado ser eficaz en diferentes áreas de la enseñanza de la ingeniería (Kumar et al., 2013; Lamar et al., 2012; Kim, 2012). Siguiendo dicha metodología ABP se organizaron las actividades de laboratorio del curso de diagnosis de fallos. A lo largo de este artículo se mostrará como se organizaron las diferentes clases de laboratorio, los experimentos que los estudiantes deben realizar y los resultados que se deberían obtener.

Así pues, la principal contribución de este trabajo es mostrar cómo la metodología ABP se ha utilizado para organizar los laboratorios del curso de diagnosis de fallos utilizando una planta real basada en un sistema de tres depósitos. Por otra parte, aunque en el campo de la diagnosis de fallos existen varios libros que tratan la diagnosis basada en modelos y se pueden utilizar en el proceso de enseñanza/aprendizaje, hay una falta de materiales didácticos adecuados para el auto-aprendizaje de los alumnos. Este artículo trata de contribuir en la solución de dicha laguna mostrando el material que se ha desarrollado.

La estructura del artículo es la siguiente: En la Sección 2, se introduce el caso de estudio propuesto para utilizar en las actividades ABP. En la Sección 3, se resumen los conceptos de detección y aislamiento de fallos que se presentan a los estudiantes en la actividad ABP, así como los materiales de apoyo (libros y software). La Sección 4 resume los objetivos de aprendizaje que deben alcanzarse. A continuación, se presentan los ejercicios de aprendizaje en la Sección 5, y la forma de evaluar la asimilación de los objetivos de aprendizaje en la Sección 6. En la Sección 7 se resumen los resultados de la evaluación de los estudiantes. Por último, en la Sección 8, se presentan las conclusiones del trabajo.

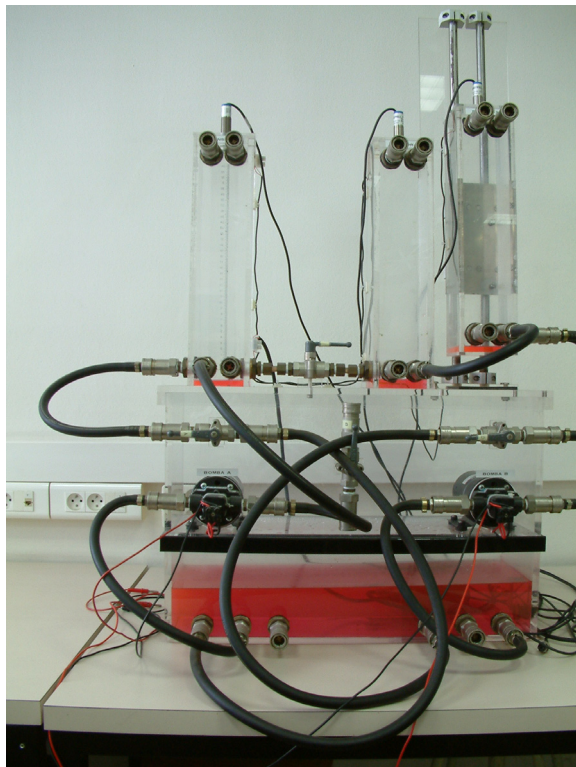


Figura 2: Vista de la planta real

2. Entorno experimental

2.1. Descripción

Para organizar las actividades de aprendizaje aplicando la metodología ABP en el curso de diagnóstico de fallos, se ha elegido una planta real de tres depósitos (ver Figura 1). Las plantas basadas en sistemas de depósitos, tanto en las versiones de tres o cuatro depósitos, han sido ampliamente utilizadas para fines docentes y de investigación (Dormido y Esquembre, 2003) (Join et al., 2005) (Johansson, 2000) (Dormido et al., 2008) (Pasamontes et al., 2012) debido a sus comportamientos dinámicos y su estructura relativamente simple.

Este sistema de tres depósitos de metacrilato se ha construido en el Departamento de Ingeniería de Sistemas, Automática e Informática Industrial (ESAI) de la UPC para realizar experimentos de diferentes materias (Figura 2). Con el fin de medir el estado completo, se han instalado tres sensores ultrasónicos (*Honeywell, 945 / LAY-AD-1C0*) en la parte superior de cada depósito (midiendo la distancia desde la parte superior para el nivel de líquido).

Como actuadores se utilizan dos bombas peristálticas (*Flo-jet, 2100-740*) que pueden desplazar agua desde el depósito inferior a cualquiera de los depósitos superiores¹. La interconexión entre los diferentes depósitos se realiza por medio de tuberías flexibles y conectores, de modo que el sistema puede ser reconfigurado fácilmente. Algunas de las tuberías incluyen una

válvula (*Legris, 6401*) que permite modificar las características de las tuberías. El agua de los depósitos está tintada a fin de facilitar mediciones experimentales mediante una regla impresa en los mismos depósitos.

Con el fin de facilitar la interconexión de la planta con el entorno MATLAB/Simulink, se ha implementado un dispositivo electrónico que alimenta a los sensores, filtra las señales obtenidas de éstos y acondiciona las señales para enviarlas a la tarjeta de adquisición de un ordenador. También se dispone de un modelo que implementa las ecuaciones (ver Sección 2.2) que describen la dinámica de la planta en Simulink (ver Figura 3). Los parámetros del modelo se han estimado con datos experimentales para representar el comportamiento real del sistema (ver Tabla 1). Por otro lado, los parámetros y estructura de la planta real se pueden cambiar fácilmente. Ello permite que se puedan introducir diferentes fallos en la planta. En particular:

- La conexión entre los diferentes depósitos se compone de varios tubos que pueden conectarse o desconectarse fácilmente. Esto permite cambiar la estructura del sistema sin mucha dificultad. La detección de estos cambios a través de algoritmos de diagnóstico de fallos es un ejercicio muy interesante que los estudiantes pueden abordar durante el curso.
- En algunas de las tuberías se puede modificar su sección, lo que permite la incorporación de fallos paramétricos en el sistema. Estos cambios son más difíciles de detectar, pero su detección está más cerca de los problemas de la vida real.
- Los sensores de nivel pueden moverse ligeramente, y por lo tanto se pueden implementar fallos aditivos en los sensores. La detección de estos errores se puede estudiar también durante los ejercicios.
- Por último, uno de los depósitos se puede desplazar verticalmente, siendo este otro de los cambios que se pueden incorporar en la planta real.

Con todos estos cambios se pueden plantear diferentes tipos de ejercicios de detección y aislamiento de fallos.

2.2. Modelo matemático

El modelo cuasi estático² del sistema de tres depósitos puede ser escrito por las siguientes ecuaciones:

$$\dot{h}_l(t) = \frac{1}{a_l} (-k_{lb}s(h_l(t) - h_b(t)) - k_{lm}s(h_l(t) - h_m(t)) + k_{lu}u_l(t)) \quad (1)$$

$$\dot{h}_m(t) = \frac{1}{a_m} (k_{lm}s(h_l(t) - h_m(t)) + k_{mr}s(h_m(t) - h_r(t))) \quad (2)$$

$$\dot{h}_r(t) = \frac{1}{a_r} (-k_{mr}s(h_m(t) - h_r(t)) - k_{rb}s(h_r(t) - h_b(t)) + k_{ru}u_r(t)) \quad (3)$$

$$\dot{h}_b(t) = \frac{1}{a_b} (k_{lb}s(h_l(t) - h_b(t)) + k_{rb}s(h_r(t) - h_b(t))) \quad (4)$$

¹Es importante señalar que las bombas peristálticas tienen un comportamiento lineal en un amplio rango de operación

²En hidráulica, un modelo se denomina cuasi-estático cuando no se toman en cuenta la dinámicas de propagación de los fluidos sino sólo los variaciones de volumen en términos de balances de masas entre caudales de entrada y salida

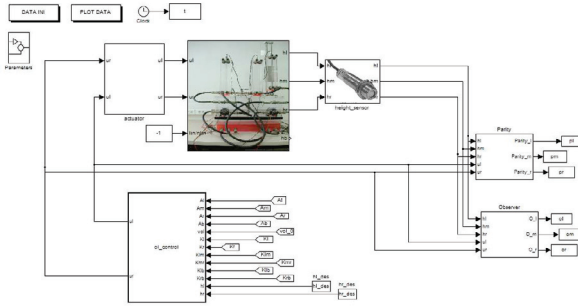


Figura 3: Simulador basado en MATLAB/Simulink del sistema de 3 depósitos

donde h_l, h_m, h_r y h_b se corresponden a los niveles de líquido de los depósitos izquierdo, central, derecho e inferior, respectivamente (definidos como se muestra en la Figura 1), a_l, a_m, a_r y a_b corresponden a las secciones transversales de los depósitos izquierdo, central, derecho e inferior, respectivamente, u_l y u_r son los voltajes aplicados a las bombas izquierda y derecha respectivamente, k_l y k_r son las ganancias de las bombas izquierda y la derecha respectivamente, k_{lb}, k_{lm}, k_{sr} y k_{rb} son los diferentes coeficientes de las tuberías; y $s(x) = \text{sign}(x) \sqrt{|x|}$. Los valores de los parámetros nominales, obtenidos experimentalmente, se presentan en la Tabla 1. Este conjunto de parámetros corresponden al modelo nominal (sin presencia de fallos), siendo la base para la aplicación de los métodos de detección y aislamiento de fallos.

El sistema definido por (1) - (4) es un modelo no lineal de cuarto orden que puede ser reducido a uno de tercer orden considerando $x = [h_l, h_m, h_r]$ y $u = [u_l, u_r]$ y utilizando el hecho de que el volumen total de agua en el sistema es constante.

Como las técnicas más utilizadas para la detección y aislamiento de fallos en sistemas dinámicos se han desarrollado para sistemas lineales (Gertler, 1998) (Blanke et al., 2006), y el curso se centra en estas técnicas, se debe de obtener un modelo lineal para este sistema alrededor de un punto de operación. Cuando se trabaja en torno a un punto de equilibrio (x_o, u_o) , el comportamiento del sistema (1)-(4) puede ser linealizado como se propone en (Roubal et al., 2010) y se resume en la Figura 4:

$$\dot{\chi}(t) = A\chi(t) + B\mu(t) \tag{5}$$

con $\chi = [\eta_l, \eta_m, \eta_r]$, $\mu = [v_l, v_r]$, $A = \frac{\partial f}{\partial x}|_{x=x_o, u=u_o}$ y $B = \frac{\partial g}{\partial u}|_{x=x_o, u=u_o}$. La mayoría de los experimentos a realizar durante el curso se llevan a cabo alrededor del punto de equilibrio definido por $x_o = (h_l, h_r, h_m) = (41,0, 39,0, 40,39)\text{cm}$ y $u_o = (u_l, u_r) = (4,35, 8,76)\text{V}$.

La implementación de los algoritmos de diagnóstico de fallos habitualmente en la práctica se implementan en tiempo discreto dado que los datos se obtienen mediante un tarjeta de adquisición a un determinado periodo de muestreo. De forma que el modelo lineal (5) se transforma a un modelo en tiempo discreto para el punto de equilibrio considerado

$$\chi(k+1) = \tilde{A}\chi(k) + \tilde{B}\mu(k) \tag{6}$$

utilizando el método de discretización de Euler³ y tomando $T_s = 1\text{s}$.

³La elección de este método de discretización se justifica porque preserva

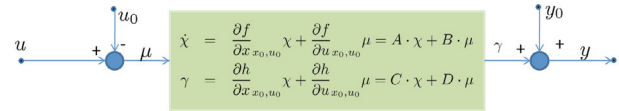


Figura 4: Linealización alrededor de un punto de equilibrio

3. Conceptos de detección y aislamiento de fallos basados en modelos

3.1. Detección de fallos basado en modelos

El principio de detección de fallos basado en modelos es comprobar si las entradas aplicadas y salidas medidas del sistema a monitorizar son coherentes con el modelo matemático del sistema sin fallos. Si se detecta una incoherencia, la existencia de un fallo queda probada. La comprobación de coherencia entre el comportamiento real medido por los sensores, $y(k)$, y el valor predicho por el modelo, $\hat{y}(k)$, se realiza generalmente mediante el residuo calculado como:

$$r_i(k) = y_i(k) - \hat{y}_i(k) \quad i = 1, \dots, n_y \tag{7}$$

donde n_y es el número de sensores de salida.

La tarea de detección de fallos consiste en decidir si un residuo dado por la ecuación (7) es violado o no en un instante de tiempo determinado, generando una señal de fallo ϕ_i de acuerdo con:

$$\phi_i(k) = \begin{cases} 0, & \text{if } |r_i(k)| < \tau_i \text{ (no fallo)} \\ 1, & \text{if } |r_i(k)| \geq \tau_i \text{ (fallo)} \end{cases} \tag{8}$$

donde τ_i es el umbral asociado al i -ésimo residuo. Una vez generadas las diferentes n_y señales ϕ_i , se determina cual es el fallo que ha podido producir las inconsistencias observadas en los residuos. La Figura 5 presenta un diagrama conceptual que describe el procedimiento de detección y aislamiento de fallos basado en modelos descrito anteriormente.

Tabla 1: Parámetros ajustados experimentalmente

| $k_{lm} \text{ cm}^2/\text{s}$ | $k_{lb} \text{ cm}^2/\text{s}$ | $k_{mr} \text{ cm}^2/\text{s}$ | $k_{rb} \text{ cm}^2/\text{s}$ |
|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 15,86 | 7,04 | 10,48 | 6,93 |
| $k_{mb} \text{ cm}^2/\text{s}$ | $k_l \text{ cm}^3/\text{sV}$ | $k_r \text{ cm}^3/\text{sV}$ | $a_l \text{ cm}^2$ |
| 0,00 | 6,04 | 6,04 | 64,00 |
| $a_m \text{ cm}^2$ | $a_r \text{ cm}^2$ | $a_b \text{ cm}^2$ | $vol \text{ cm}^3$ |
| 64,00 | 64,00 | 1044,00 | 15990,00 |

Como se describió en la introducción, la detección de fallos utilizada en este trabajo se basa en el uso de observadores. Si se utiliza un observador con la estructura Luenberger para obtener la estimación de la salida $\hat{y}(k)$ en (7)

$$\begin{aligned} \hat{x}(k+1) &= A\hat{x}(k) + Bu(k) + L(y(k) - \hat{y}(k)) \\ \hat{y}(k) &= C\hat{x}(k) \end{aligned} \tag{9}$$

donde L es la ganancia del observador, diseñada para fijar los valores propios de la matriz $A - LC$ y obtener así el comportamiento de detección de fallos deseado.

La relación estructural entre las entradas y las salidas a diferencia del método de mantenedor de orden cero más ampliamente utilizado en control digital. La preservación de las relaciones estructurales es una propiedad importante para el aislamiento de fallos.

La salida predicha del observador dado por la Ec. (9), expresando las matrices del sistema en forma canónica de observador, también se puede expresar en forma de entrada/salida

$$\hat{y}(k) = G_u(q)u(k) + G_y(q)y(k) \quad (10)$$

donde

$$G_u(q) = C(qI - A + LC)^{-1}B = \frac{V(q)}{W(q) + H(q)}$$

$$G_y(q) = C(qI - A + LC)^{-1}L = \frac{H(q)}{W(q) + H(q)} \quad (11)$$

con $M(q) = \frac{V(q)}{W(q)}$ la función de transferencia del sistema y $H(q) = \sum_{i=1}^n l_i q^{-i}$ donde $l_i, i = 1, \dots, n$ son a las ganancias de los observadores.

Obsérvese que al tomar la ganancia del observador igual a cero, $L = 0$ (o $H(q) = 0$) (es decir, no se introduce ninguna corrección), corresponde a una simulación en lazo abierto y la expresión del residuo del observador dada por la ecuación (11) se transforma en una ecuación de paridad en forma ARMA según (Gertler, 1998). Por otro lado, en el caso en el que todos los estados son medidos y la ganancia del observador satisface: $LC = A$ (o $W(q) + H(q) = 1$), se obtiene un predictor a un paso o lo que se conoce como una ecuación de paridad en forma MA (ver (Gertler, 1998)).

La Figura 6 (a) presenta los resultados de la detección de fallos (en el caso de estudio real de los tres depósitos) cuando se introduce un fallo en el sensor de medición del nivel del depósito de la derecha h_r . Esta figura muestra cómo el resultado de la detección de fallos varía al cambiar la ganancia del observador L . Se puede observar que el caso de simulación ($L = 0$) el residuo es sensible de forma persistente al efecto del fallo. Sin embargo, en los otros dos casos: predicción (L cumpliendo $LC = A$) y observación (L entre 0 y $LC = A$), la sensibilidad al efecto del fallo evoluciona con el tiempo (respuesta dinámica dependiendo de los polos de los residuos). Esto produce que la salida predicha tienda a seguir la medida afectada por el fallo (efecto de seguimiento de fallo) y por lo tanto la indicación de fallo puede ser desactivada (no persistente) al cabo de un tiempo. Por otro lado, si el efecto de seguimiento del fallo afecta a algunos de los residuos sensibles a un fallo, también puede causar problemas en el proceso de aislamiento de fallos.

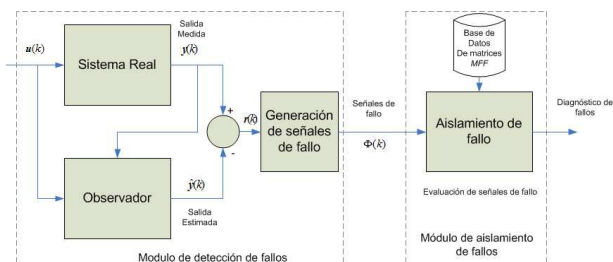


Figura 5: Diagrama conceptual del diagnóstico de fallos basado en modelos

3.2. Aislamiento de fallos basado en modelos

La Firma Real de Fallo (FRF) del sistema

$$\Phi(k) = [\phi_1(k), \phi_2(k), \dots, \phi_{n_r}(k)], \quad (12)$$

se obtiene aplicando el test de detección (ver (8)) al conjunto de residuos $r_i(k) i = 1, \dots, n_r$ y se proporciona al módulo de aislamiento de fallos que se encarga de dar un diagnóstico (véase la Figura 5). La FRF se compara con la Matriz de Firma de Fallos (MFF) teórica que codifica en forma binaria la influencia de los diferentes fallos considerados $f_j, j = 1, \dots, n_f$ (que en el caso del sistema de 3 depósitos corresponden a fallos en sensores y actuadores (bombas)) sobre los diferentes residuos r_i disponibles ($i = 1, \dots, n_r$). Por lo tanto, la MFF tiene tantas filas como residuos disponibles (n_r) y tantas columnas como fallos considerados (n_f). Si un elemento MFF_{ij} de esta matriz es igual a 1 significa que el fallo $j^{\text{ésimo}}$ aparece en la expresión del residuo $i^{\text{ésimo}}$. De lo contrario, este coeficiente es igual a 0. Suponiendo las hipótesis clásicas en diagnóstico de fallos basada en modelos, es decir, fallos individuales y sin compensación (exoneración), el aislamiento de fallos consiste en la búsqueda de una columna de la MFF que coincide con la firma real del fallo $s(k)$ (véase la figura 5). Este método de aislamiento de fallos clásico se conoce como evaluación por columna (Gertler, 1998).

El conjunto de residuos utilizado para el aislamiento de fallos se puede obtener mediante el análisis estructural (Blanke et al., 2006) que permite combinar las ecuaciones del modelo con las medidas para obtener las expresiones de los residuos y la matriz MFF. Alternativamente, un conjunto de residuos estructurados puede ser diseñado utilizando el método propuesto por (Gertler, 1998), en donde, mediante una transformación de los residuos primarios, se obtienen unos residuos que son sensibles a un solo fallo e insensibles al resto de los fallos.

Las Figuras 6.b, 6.c y 6.d muestran la evolución de unos residuos estructurados de la planta real generados mediante un banco de observadores (Figura 5) cuando aparece un error de off-set (fallo aditivo) de 4 cm en el sensor del depósito de la derecha h_r (Figura 6.a). En estas figuras se observa que mientras los residuos r_1 (Figura 6.b) y r_2 (Figura 6.c) permanecen casi sin cambios, se detecta una variación significativa en r_3 (Figura 6.d) de tal manera que rebasa cualitativamente el valor umbral de este residuo y por lo tanto permite detectar el fallo aditivo presente en el sensor que mide h_r (Figura 6.a).

3.3. Material de soporte

Existen varios libros disponibles que constituyen una referencia básica para investigadores y estudiantes interesados en el campo del diagnóstico de fallos. Desde la aparición del libro pionero (Patton et al., 1989), que fue la única referencia durante muchos años, han aparecido varios libros de los que cabe destacar:

- El libro de Gerler (Gertler, 1998) que aborda principalmente el problema de la diagnosis de fallados basado en modelos utilizando métodos basados en ecuaciones de paridad.

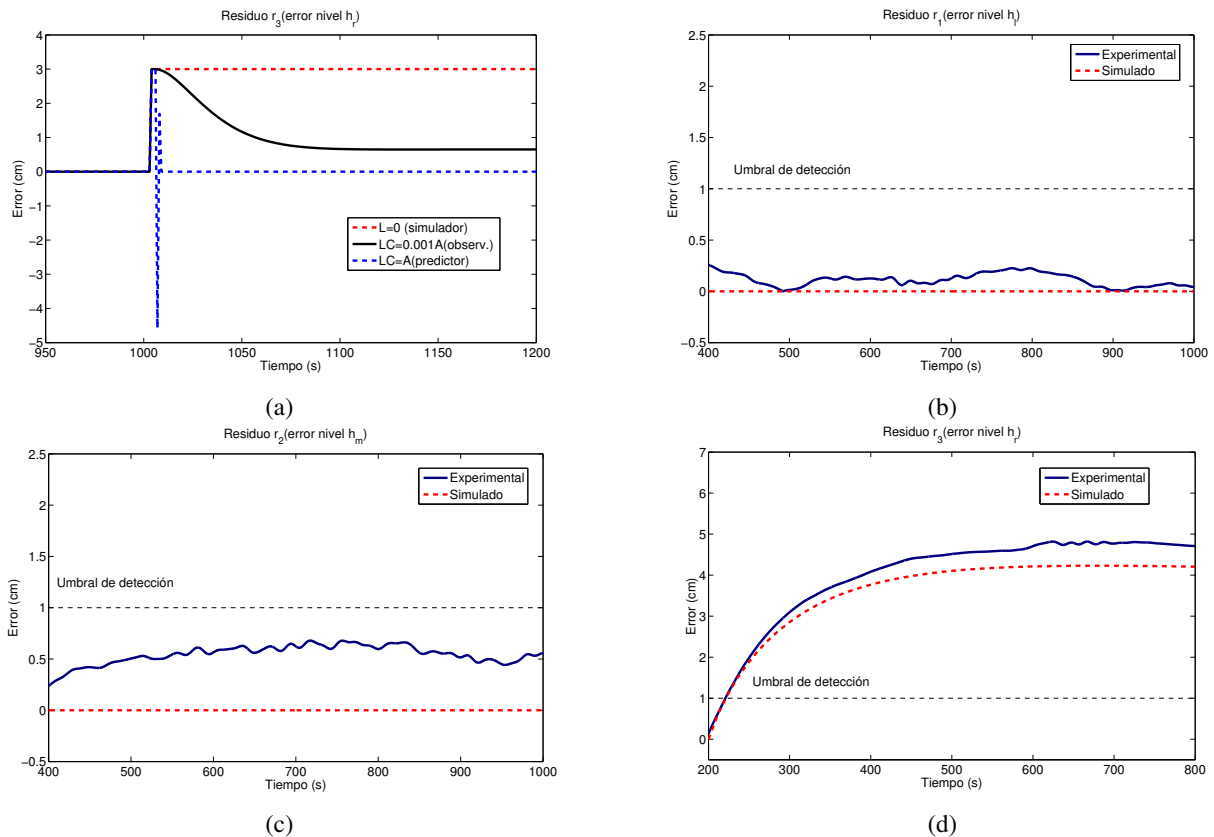


Figura 6: (a) residuo r_3 correspondiente al nivel del tanque de la derecha (h_r), cambiando la ganancia del observador L , en caso de un fallo en el sensor de medición de este nivel. (b),(c),(d) residuos para los tres niveles de los tanques cuando un fallo está afectando al sensor de medición del nivel del tanque de la derecha en la planta real.

- El libro de Chen y Patton (Chen et al., 1998) que se centra en los métodos basados en observadores con un énfasis explícito al problema de la robustez en la diagnosis de fallos.
- El libro de Blanke (Blanke et al., 2006) donde se aborda el problema de la diagnosis y el control tolerante a fallos a partir del análisis estructural utilizando modelos clásicos (cuantitativos) y modelos cualitativos.
- El libro de Isermann (Isermann, 2006) que es un tutorial introductorio de diagnosis de fallos y control tolerante utilizando diferentes metodologías. Hay un segundo libro del mismo autor (Isermann, 2011) que muestra cómo los métodos presentados en (Isermann, 2006) se pueden aplicar en una selección de veinte aplicaciones prácticas reales.
- El libro de Ding (Ding, 2008) que proporciona una introducción a los esquemas básicos de diagnóstico basado en modelos, un análisis de algoritmos de diseño avanzados, y las herramientas matemáticas y de la teoría de control necesarias para estudiantes de posgrado, investigadores e ingenieros que se deseen introducir en el área. Se incluyen siempre que son posibles comparaciones entre el uso de diferentes métodos.

Recientemente se ha publicado el primer libro en habla hispana en esta materia (Verde et al., 2013) que abarca varias metodologías de detección y aislamiento de fallos ilustradas con ejemplos prácticos y resultados experimentales.

Tal vez el libro de Isermann (Isermann, 2006) es el único que ofrece la perspectiva más general ya que presenta una amplia gama de métodos de diagnosis de fallos que van desde los métodos basados en el conocimiento o análisis de señales hasta los basados en modelos matemáticos. Es un libro que se puede utilizar para introducir las técnicas de diagnosis de fallos incluso a estudiantes de pregrado ya que el nivel previo requerido de matemáticas y de teoría de control es muy asequible. Por otro lado, los otros libros son excelentes libros para estudiantes de posgrado que están preparando su tesis de doctorado o máster en el área de la diagnosis de fallos.

Finalmente, existen varios trabajos monográficos de diferentes autores que son buen punto de partida para los estudiantes: (Isermann, 1997, 2005), (Frank, 1996; Frank y Ding, 1997), (Patton, 1994), (Venkatasubramanian et al., 2003a,b,c), (Puig et al., 2004a,b) entre otros.

En cuanto a herramientas útiles para el diseño de sistemas de diagnosis de fallos basados en modelos se pueden citar:

- *SaTool* desarrollada por Blanke y otros investigadores de prestigio en el área de diagnosis de fallos (Blanke

y Lorentz, 2006), se trata de una herramienta de alto nivel para el análisis de la estructura de sistemas. El análisis realizado por SaTool incluye la detectabilidad, la aislabilidad, las relaciones de paridad de forma simbólica para los modos de funcionamiento de no fallo y de fallo definidos por el usuario.

- *Fault Detection Toolbox* desarrollada por Varga (Varga, 2006) ofrece un conjunto completo de funciones de alto nivel en el entorno de MATLAB para el diseño de filtros que permiten la generación de residuos utilizando algoritmos numéricos.
- *FDI-Toolbox* desarrollada por Ding y otros investigadores (Ding et al., 2006) permite el diseño de sistemas de diagnóstico de fallos basados en observadores y en el espacio de paridad. El desarrollo de esta librería implementada en MATLAB se basa en las librerías de control (básica) y de control robusto existentes en el entorno de MATLAB.

En las sesiones de laboratorio del curso, se utiliza *SaTool* para generar el conjunto de residuos, mientras que la *FDI-Toolbox* se utiliza para el diseño de un conjunto de residuos estructurados basados en observadores.

4. Objetivos de aprendizaje

Como se explica en la introducción, el objetivo de las clases de laboratorio del curso de *Diagnosis y Control Tolerante a Fallos* es proporcionar a los estudiantes una perspectiva práctica de las técnicas de diagnóstico introducidas en las clases teóricas del curso. Teniendo en cuenta dicho objetivo, los profesores del curso decidieron seleccionar el siguiente conjunto de aspectos que cubren todo el ciclo de diseño de un sistema de diagnóstico de fallos:

- Modelización del sistema a supervisar.
- Análisis estructural del sistema con el fin de identificar la redundancia existente para la generación de residuos capaces de detectar y aislar los fallos definidos.
- Implementación de los residuos utilizando observadores y estudio de como la ganancia del observador puede ser utilizada como un parámetro de ajuste que afecta al rendimiento en la detección.
- Implementación de la lógica de aislamiento de fallos basada en la matriz *MFF*.
- Comprobación del funcionamiento del sistema de diagnóstico de fallos real diseñado y evaluación del índice de desempeño.

En la preparación de los objetivos de aprendizaje del proyecto ABP, los profesores consideran que los conocimientos previos necesarios de los estudiantes son:

- Teoría de sistemas: Representación de sistemas mediante funciones de transferencia y ecuaciones en espacio de estado, estabilidad, observabilidad, observadores con estructura de Luenberger y linealización de sistemas no lineales.
- Modelado y simulación de sistemas dinámicos: Modelado de sistemas, simulación de sistemas utilizando simuladores numéricos e identificación de sistemas dinámicos.

Finalmente, los profesores definieron el siguiente conjunto de objetivos de aprendizaje que deben lograr los estudiantes para adquirir las habilidades deseadas al final del proceso de aprendizaje basado en el proyecto propuesto:

- (O.1) Comprender los principios de la detección de fallos basada en modelos, así como saber cómo aplicar las técnicas más utilizadas, es decir, las basadas en ecuaciones de paridad y en observadores, comprensión de la relación que existe entre estas técnicas y el diferente rendimiento de éstas en la presencia de diferentes tipos de fallos.
- (O.2) Entender los principios del análisis estructural, así como su papel clave en el diseño de un sistema de aislamiento de fallos.
- (O.3) saber cómo realizar el análisis estructural utilizando *SaTool* en una planta real para hallar las relaciones de redundancia analítica, así como la *MFF* (ver Figura 7).
- (O.4) Diseñar un conjunto de residuos estructurados que satisfacen unas especificaciones de aislamiento de fallos con respecto a un conjunto de fallos preestablecidos.
- (O.5) Entender las diferencias entre el comportamiento simulado y el real, debido a los errores de modelización e incertidumbres producidas por la presencia de ruido/perturbaciones en el sistema real. Las Figuras 6.b, 6.c y 6.d muestran un estudio comparativo de las respuestas experimentales y simuladas del sistema de tres depósitos, lo que permite entender el concepto de detección y aislamiento de fallos en un sistema real.
- (O.6) Trabajar con un sistema real de laboratorio que se asemeja a una aplicación industrial real de tal manera que los estudiantes puedan entender mejor la utilidad de las técnicas introducidas en la parte teórica del curso en la detección y aislamiento de fallos.
- (O.7) Aprender a trabajar en equipo.

5. Actividades de aprendizaje

Una vez presentado el material de referencia básica y su aplicación al caso de estudio, así como los objetivos de aprendizaje, se organizaron un conjunto de tres sesiones de laboratorio de tres horas cada una de ellas. En estas sesiones, las actividades de aprendizaje tienen como objetivo aplicar las

diferentes metodologías de diagnóstico de fallos que se presentan en la sección 3. Cada sesión se centra en uno de los temas clave de aprendizaje que se proponen en la sección de objetivos de aprendizaje.

5.1. Sesión 1: Detección de fallos mediante observadores y ecuaciones de paridad

Los estudiantes implementan un conjunto de residuos primarios directamente del modelo de entrada/salida descrito mediante la representación en espacio de estado linealizado del sistema obtenida a partir de (4) y utilizando los métodos de ecuaciones de paridad y observadores introducido en la Sección 3. Los residuos son evaluados en diferentes escenarios de fallo (cambio de parámetros, fugas, fallos en sensores de nivel y bombas) con el fin de ver el efecto de la ganancia del observador L sobre la sensibilidad a cada fallo. En particular, los estudiantes variarán la ganancia del observador entre $L = 0$ (simulación) y $L = CA$ (predicción) (ver Figura 6.a donde el efecto de la ganancia del observador en el residuo del nivel del depósito de la derecha se ilustra en un escenario de fallo aditivo en el sensor de dicho nivel). De dicho análisis, los estudiantes deberán concluir que variando la ganancia del observador L , la persistencia de la indicación del fallo varía. Por otro lado, si elegimos una ganancia del observador muy baja el sistema será muy sensible a errores de modelo como por ejemplo errores en las condiciones iniciales del sistema y tendremos que aumentar el umbral de detección. Por lo tanto, los estudiantes deberán comprender que la selección de dicha ganancia se debe de hacer de forma cuidadosa estableciendo un compromiso entre persistencia en la indicación del fallo, ruido y efecto de las condiciones iniciales.

5.2. Sesión 2: Análisis Estructural

Partiendo del conjunto de ecuaciones de los componentes del sistema introducidas en la Sección 2 y mediante el uso de la herramienta *SaTool* (Blanke y Lorentz, 2006) los estudiantes realizan el análisis estructural del sistema. Como resultado de este análisis, se obtiene la estructura del sistema representada en la Figura 7. En dicha figura, los círculos en negro representan las ecuaciones básicas de los componentes del sistema, los círculos rojos las variables del sistema y los círculos verdes y azules las variables de entrada y salida, respectivamente. Usando el algoritmo de generación de relaciones de redundancia disponible en *SaTool*, se obtiene el conjunto de los residuos, así como la matriz de la firma fallo (MFF) con respecto a la serie de fallos considerados. Por último, a partir de la MFF se lleva a cabo los análisis de detectabilidad y aislabilidad de fallos que permitirá a los estudiantes identificar los fallos detectables y aislables con el conjunto de residuos obtenidos. Los estudiantes también deberán razonar cuáles sería el mínimo número de sensores que se deberían instalar para conseguir separar todos los fallos.

5.3. Sesión 3: Aislamiento de fallos mediante residuos estructurados

A partir del conjunto de residuos obtenidos en la Sesión 2, los estudiantes implementan un sistema de diagnóstico de

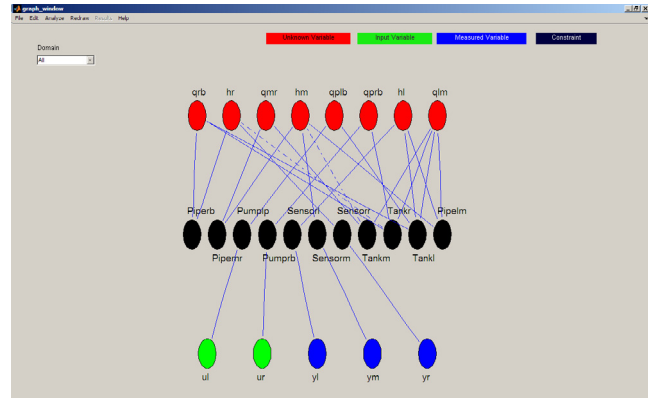


Figura 7: Grafo de análisis estructural utilizando SaTool

fallos utilizando el entorno MATLAB/SIMULINK que les permitirá validar la matriz de la firma fallo MFF obtenida mediante el análisis estructural. Los estudiantes podrán observar que no todos los fallos son aislables con los residuos obtenidos mediante el método de análisis estructural. Pero mediante una transformación adecuada de este conjunto de residuos como se describe en la Sección 3, se puede derivar un nuevo conjunto de residuos capaces de aislar el conjunto de fallos definido. A partir de este nuevo conjunto de residuos, los estudiantes procederán a su implementación mediante un banco de observadores, donde cada observador se dedica a supervisar un fallo en particular. Finalmente, el sistema de diagnóstico implementado se validará sobre la planta real.

5.4. Objetivos de aprendizaje por sesión

Los objetivos de aprendizaje que se presentan en la sección 4 se abordan en las diferentes sesiones presentadas anteriormente de la siguiente manera: El Objetivo (O.1) se trabaja en la sesión 1, mientras que los objetivos (O.2) y (O.3) son tratados en la sesión 2, y, por último, el objetivo (O.4) se aborda en la Sesión 3. Los objetivos (O.5), (O.6) y (O.7) son transversales y se abordan en todas las sesiones. La forma de evaluar que los estudiantes han asumido los objetivos de aprendizaje se basa en una hoja de respuestas que los estudiantes tienen que rellenar durante la sesión y en unas preguntas verbales que el profesor formula de forma individual a los estudiantes al final de la sesión.

6. Valoración

La evaluación de las actividades organizadas en el marco del proyecto de tres depósitos propuesto se hace en una forma diferente con respecto al de un proyecto tradicional. El objetivo es evaluar el proceso de aprendizaje en lugar del producto final (el desarrollo de un sistema de diagnóstico de fallos). Al final de cada sesión práctica, los estudiantes entregan un informe de resultados al profesor. A continuación, el profesor procede a verificar el contenido del informe y formula algunas preguntas a los estudiantes para ver si la han entendido los resultados que se han obtenido, asegurando de esta manera la evaluación continua. La evaluación de la sesión supone un 70 % de la nota final

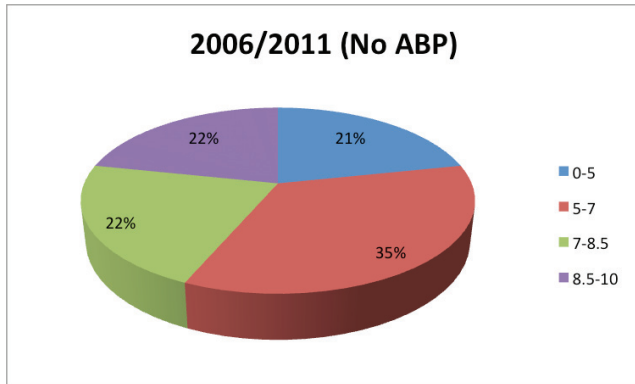


Figura 8: Resultados académicos antes de la aplicación de la metodología ABP en el periodo 2006-2011

de los laboratorios. Al final de las tres sesiones, cada grupo de laboratorio tiene que presentar delante de los otros estudiantes y los profesores el resultado final del proyecto, así como una demostración de cómo funcionaba el sistema de diagnóstico de fallos. Después de esta presentación, los profesores hacen algunas preguntas para evaluar que los estudiantes han asumido los conceptos de diagnosis de fallos establecidos en los objetivos de aprendizaje de la parte laboratorios de la asignatura. La evaluación final del proyecto global supone un 30% de la nota final de los laboratorios.

El gráfico de la Figura 8 presenta los resultados de la evaluación cuando no se aplicó el ABP, mientras que por otro lado el gráfico de la Figura 9 muestra los resultados de la evaluación después de la aplicación de la metodología ABP. Como se puede observar, la introducción de la metodología ABP ha mejorado los resultados obtenidos por los alumnos en el curso. Por lo tanto, podemos afirmar que obligar a los estudiantes a hacer frente a todos los pasos de un proyecto de diagnosis de fallos obliga a los estudiantes a entender claramente cual es el papel de cada elemento en un sistema de diagnosis de fallos. Esto influye claramente en la mejora de los resultados académicos obtenidos en la evaluación de los estudiantes.

7. Encuestas de los estudiantes

Finalmente, se realizó una encuesta anónima para obtener la retroalimentación de los estudiantes después de la finalización del curso.

Los ejercicios propuestos en este trabajo se han utilizado durante varios años en el curso de *Diagnosis y Control Tolerante a Fallos*. Cada año, la materia ha sido cursada por aproximadamente 10 a 15 estudiantes. La Tabla 2 contiene un resumen de la opinión de los estudiantes obtenida a través de la encuesta anónima. Como se desprende de los resultados de la encuesta, los estudiantes están satisfechos con los ejercicios propuestos, consideran que estos ejercicios son una buena manera de comprender e identificar todos los elementos y algoritmos que componen un sistema diagnóstico de fallos. Por otro lado, el material didáctico propuesto ha sido calificado de manera satisfactoria por la mayoría de los estudiantes. Como conclusión,

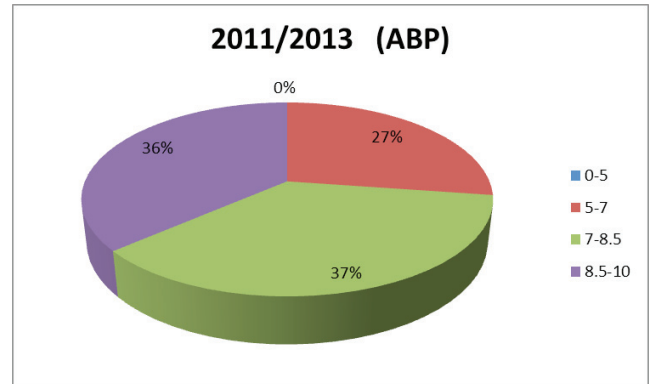


Figura 9: Resultados académicos después de la aplicación de la metodología ABP en el periodo 2011-13

se considera que los ejercicios y materiales propuestos son adecuados para introducir las técnicas de diagnóstico a los estudiantes de Ingeniería de Control.

8. Conclusiones

En este trabajo se muestra cómo la metodología ABP se ha utilizado para organizar las clases de laboratorio del curso de máster de *Diagnosis y Control Tolerante a Fallos* utilizando un sistema real de tres depósitos. La principal motivación para la elección de la metodología ABP es debida a que los estudiantes aprenden resolviendo problemas reales. El hecho de adquirir y aplicar nuevos conocimientos en un contexto de resolución de problemas reales aumenta el interés de los estudiantes. En particular se proponen un conjunto de ejercicios y actividades de laboratorio para aplicar los métodos basados en observadores y residuos estructurados para la detección y el aislamiento de fallos en el sistema real. Se presentan los resultados de las evaluaciones y encuestas a los estudiantes que se realizaron antes y después de aplicar la metodología ABP que confirman el aumento de interés y el cumplimiento de los objetivos de aprendizaje al utilizar esta metodología.

Como trabajo futuro, se plantea ampliar la experiencia de la asignatura de *Diagnosis y Control Tolerante a Fallos* a otras asignaturas del *Máster de Control Automático y Robótica* en la UPC.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por la ayudas del Ministerio de Educación de España a través de los proyectos CICYT ECOCIS (ref. DPI2013-48243-C2-1-R) y CICYT HARCRICS (ref. DPI2014-58104-R).

Referencias

- Blanke, M., Kinnaert, M., Lunze, J., Staroswiecki, M., 2006. *Diagnosis and Fault-Tolerant Control*. Second Edition. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Blanke, M., Lorentz, T., 2006. SaTool: A Software Tool for Structural Analysis of Complex Automation Systems. En: In Proceedings of the 6th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes. Beijing, China, pp. 673–678.

Tabla 2: Opinión de los estudiantes sobre el curso en el periodo 2011-13.

| Pregunta | Totalmente de acuerdo | De acuerdo | Neutro | En desacuerdo | Totalmente en desacuerdo |
|--|-----------------------|------------|---------|---------------|--------------------------|
| La propuesta de proyecto me permitió entender el papel de un subsistema de detección y aislamiento de fallos dentro de un sistema de control y supervisión | 83.33 % | 16.67 % | 0.00 % | 0.00 % | 0.00 % |
| Los ejercicios propuestos son un buen complemento a los conceptos teóricos introducidos durante el curso | 50.00 % | 33.33 % | 16.67 % | 0.00 % | 0.00 % |
| Mi interés en el campo de la detección y aislamiento de fallos se ha incrementado después de realizar los ejercicios | 50.00 % | 33.33 % | 16.67 % | 0.00 % | 0.00 % |
| Entiendo la diferencia entre la detección de fallos y aislamiento de fallos | 66.67 % | 33.33 % | 0.00 % | 0.00 % | 0.00 % |
| Puedo ver las limitaciones de aislamiento de fallos y su relación con la estructura del sistema | 50.00 % | 50.00 % | 0.00 % | 0.00 % | 0.00 % |
| Me siento capaz de diseñar un sistema de detección y aislamiento de fallos después de realizar los ejercicios | 33.33 % | 25.00 % | 33.33 % | 8.33 % | 0.00 % |
| La bibliografía proporcionada ha sido siempre útil para abordar el proyecto | 41.67 % | 33.33 % | 16.67 % | 8.33 % | 0.00 % |

- Chen, J., Patton, R., 1999. Robust Model-Based Fault Diagnosis for Dynamic Systems. Kluwer Academic Publishers.
- Chen, J., Patton, R., Chen, Z., 1998. An lmi approach to fault-tolerant control of uncertain systems. Held jointly with IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation (CIRA), Proceedings of the 1998 IEEE International Symposium on Intelligent Systems and Semiotics (ISAS) 1, 175–180.
- Clark, R. N., Fosth, D., Walton, V. M., 1975. Detection instrument malfunctions in control systems. IEEE Transactions Aerospace Electronic Systems 11, 465–473.
- Ding, S., 2008. Model-based Fault Diagnosis Techniques: Design Schemes, Algorithms, and Tools. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Ding, S. X., Atlas, E., Schneider, S., Ma, Y., Jeinsch, T., Ding, E. L., 2006. An Introduction to a Matlab-based FDI-Toolbox. En: In Proceedings of the 6th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes. Beijing, China, pp. 651–656.
- Dormido, R., Vargas, H., Duro, N., Sánchez, J., Dormido-Canto, S., Farias, G., Esquembre, F., Dormido, S., 2008. Development of a Web-Based Control Laboratory for Automation Technicians: The Three-Tank System. IEEE Transactions on Education 51 (1), 35–44.
- Dormido, S., Esquembre, F., 2003. The Quadruple-Tank Process: An Interactive Tool For Control Education. En: European Control Conference (ECC'03). Cambridge. UK.
- Frank, P., 1996. Analytical and Qualitative Model-based Fault Diagnosis: A Survey and Some New Results. European Journal of Control 2 (1), 6–28.
- Frank, P., Ding, X., 1997. Survey of Robust Residual Generation and Evaluation Methods in Observer-based Fault Detection systems. Journal of Process Control 7 (6), 403–424.
- Gertler, J., 1998. Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems. Marcel Dekker, New York.
- Isermann, R., 1993. Fault diagnosis of machines via parameter estimation and knowledge processing. Automatica 29, 815–836.
- Isermann, R., 1997. Supervision, Fault-detection and Fault-diagnosis Methods: An Introduction. Control Engineering Practice 5 (5), 639–652.
- Isermann, R., 2005. Model-based Fault-detection and Diagnosis: Status and Applications. Annual Reviews of Control 29 (1), 71–85.
- Isermann, R., 2006. Fault-Diagnosis Systems: An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance. Springer, Berlin, Germany.
- Isermann, R., 2011. Fault-Diagnosis Applications. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Johansson, K. H., May 2000. The Quadruple-tank Process: A Multivariable Laboratory Process with an Adjustable Zero. IEEE Transactions on Control Systems Technology 8 (3), 456–465.
- Join, C., Sira-Ramírez, H., Fliess, M., 2005. Control of an Uncertain Three-Tank System Via On-Line Parameter Identification and Fault Detection. Kim, J., February 2012. An Ill-Structured PBL-Based Microprocessor Course Without Formal Laboratory. IEEE Transactions on Education 55 (1), 145–153.
- Kumar, A., Fernando, S., Panicker, R., 2013. Project-Based Learning in Embedded Systems Education Using an FPGA Platform. IEEE Transactions on Education 56 (4), 407–415.
- Lamar, D. G., Miaja, P. F., Arias, M., Rodríguez, A., Rodríguez, M., Vázquez, A., Hernando, M. M., Sebastián, J., February 2012. Experiences in the Application of Project-Based Learning in a Switching-Mode Power Supplies Course. IEEE Transactions on Education 55 (1), 69–77.
- Pasamontes, M., Alvarez, J., Guzman, J., Berenguel, M., May 2012. Learning Switching Control: A Tank Level-Control Exercise. IEEE Transactions on Education 55 (2), 226–232.
- Patton, R., 1994. Robust Model-based Fault Diagnosis: The State of the Art. En: Proceedings of the IFAC SAFEPROCESS 1994. Espoo, Finland, pp. 1–27.
- Patton, R. J., Frank, P. M., Clark, R. N., 1989. Fault Diagnosis in Dynamic Systems, Theory and Applications. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Puig, V., Quevedo, J., Escobet, T., Morcego, B., Ocampo, C., 2004a. Control Tolerante a Fallos (Parte I): Fundamentos y Diagnóstico de Fallos. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial 1 (1), 15–31.
- Puig, V., Quevedo, J., Escobet, T., Morcego, B., Ocampo, C., 2004b. Control Tolerante a Fallos (Parte II). Mecanismos de Tolerancia y Sistema Supervisor. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial 1 (2), 5–25.
- Roubal, J., Husek, P., Stecha, J., 2010. Linearization: Students Forget the Operating Point. IEEE Transactions on Education.
- Varga, A., 2006. A Fault Detection Toolbox for MATLAB. En: In Proceedings of the 2006 IEEE Conference on Computer Aided Control Systems Design. Munich, Germany, pp. 3013–3018.
- Venkatasubramanian, V., Rengaswamy, R., Yin, K., Kavuri, S. N., 2003a. A Review of Process Fault Detection and Diagnosis. Part I: Quantitative Model-based Methods. Computer and Chemical Engineering 27 (3), 293–311.
- Venkatasubramanian, V., Rengaswamy, R., Yin, K., Kavuri, S. N., 2003b. A Review of Process Fault Detection and Diagnosis. Part II: Qualitative models and search strategies. Computer and Chemical Engineering 27 (3), 313–326.
- Venkatasubramanian, V., Rengaswamy, R., Yin, K., Kavuri, S. N., 2003c. A Review of Process Fault Detection and Diagnosis. Part III: Process History Based Methods. Computer and Chemical Engineering 27 (3), 327–346.
- Verde, C., Gentil, S., Morales-Menéndez, R., 2013. Monitoreo y Diagnóstico Automático de Fallas en Sistemas Dinámicos. Editorial Trillas, México.