

Análisis Estructural para la Generación de Residuos: Consideraciones para la Implementación

Marino Sánchez Parra¹, Cristina Verde², Dionisio A. Suárez Cerda¹

¹División de Sistemas de control, Instituto de Investigaciones Eléctricas
msanchez@iie.org.mx

²Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México

Resumen. Se estudia la detectabilidad e identificabilidad de fallas críticas en un proceso complejo con requerimientos estrictos de operación y desempeño cuyo modelo dinámico es conocido. El caso de estudio es la turbina de gas de una central de generación de ciclo combinado. Se aplica el análisis estructural mediante tres algoritmos de apareamiento diferentes, obteniéndose conjuntos de relaciones redundantes consistentes. El sistema es monitoreable, pero no completamente detectable ante fallas, por lo que se modifica la estructura del sistema para obtener uno completamente sobre-restringido. Se asegura la redundancia completa del sistema, basada en el análisis de combinaciones apareables (bloques de König-Hall) entre restricciones y variables desconocidas, sin causalidad derivativa en el cálculo de los residuos.

Palabras clave: Análisis estructural, Diagnóstico de fallas, Matriz de incidencias, apareamiento, redundancia, relaciones de redundancia analítica.

1 Introducción

Debido a la creciente complejidad de los sistemas de control modernos, la incorporación de sistemas para el diagnóstico de fallas (SDF) en los sistemas automatizados es cada vez más demandante. El objetivo de los SDF es el mejorar la tolerancia a fallas de los sistemas de control a fin de evitar estados críticos del proceso y situaciones catastróficas de gran costo económico y social, entendiéndose por falla todo cambio en el comportamiento de alguna componente del sistema (desviación no permitida de alguna de sus propiedades o parámetros característicos) de manera que éste ya no puede satisfacer la función para la cual fue diseñado [1].

Desde la perspectiva del control automático, algunos grupos consideran que la esencia de la metodología del diagnóstico de fallas es el enfoque *basado-en-modelo* en el que se utilizan modelos cualitativos o cuantitativos combinados con métodos analíticos o heurísticos. Es por ello que durante los últimos 30 años, constantemente se ha enriquecido el desarrollo de SDF basados en modelos analíticos, como lo describen numerosos artículos que han explorado el estado del arte [9,10,11,16,21]. Una tendencia reciente es lograr la integración de los SDF y el control tolerante a fallas (CTF) [21]. La tolerancia a fallas (TF) se entiende como la capacidad del sistema de control **para mantener los objetivos de control** a pesar de la aparición de una falla, admitiéndose una cierta degradación de sus prestaciones [1,16].

M. A. Moreno, C. A. Cruz, J. Álvarez, H. Sira (Eds.)
Special Issue: Advances in Automatic Control and Engineering
Research in Computing Science 36, 2008, pp. 23-32

El trabajo se estructura de la forma siguiente: en la sección 2 se presenta el problema de diagnóstico de fallas asociado al problema de control tolerante. La sección 3 corresponde al caso de estudio: la turbina de gas (TG) de una central de generación de ciclo combinado (CGCC) y las fallas críticas consideradas. En la sección 4 se describe el estudio de *redundancia analítica* realizado basado en 3 procedimientos diferentes. En la sección 5 se describe un estudio algorítmico desarrollado para sistematizar el análisis de redundancia. En la sección 6 se describe la modificación de la estructura del sistema físico, realizada para lograr la detección y aislamiento completo de las fallas consideradas, útiles para el control tolerante. La sección 7 es de conclusiones.

2 Diagnóstico de fallas

Para desarrollar el SDF primero se efectúa el análisis del sistema, que se lleva a cabo a nivel de estructura con el objetivo de determinar el nivel de redundancia existente y para la aplicación de mecanismos de tolerancia a fallas.

Diseño del sistema de diagnóstico: se parte del análisis estructural (AE), tomando en cuenta las variables medidas y las fallas posibles de identificar. El análisis estructural utilizado en SDF es una técnica basada en la teoría de grafos que explora las propiedades estructurales de un sistema utilizando grafos estructurales orientados [2,3,7,16,22]. Se usa para representar las relaciones existentes entre las variables y las restricciones (ecuaciones) del modelo de comportamiento, las cuales son independientes de la forma exacta bajo la cual se exprese dicho modelo (cuantitativo o cualitativo).

En un sistema complejo como la TG CGCC, es conveniente analizar el sistema partiendo de definir subsistemas, es decir componentes agrupadas estructuralmente y unidas funcionalmente. En el caso de que no se puedan diagnosticar todas las fallas que se deseen, entonces se deberá modificar la instrumentación disponible hasta conseguirlo. El SDF no solo deberá detectar y aislar las fallas, sino también estimar su tamaño (cuantificación).

2.1 Modelo estructural

La estructura del sistema físico puede obtenerse a partir del modelo de comportamiento normal $S = (R, V)$ definido mediante un conjunto de p restricciones $R = \{r_1, r_2, \dots, r_p\}$, que pueden incluir derivadas, y un conjunto de q variables $V = \{v_1, v_2, \dots, v_q\} = X \cup U \cup Y \cup \Theta$ donde X corresponde al estado, U a la entrada, Y a la salida y Θ a los parámetros del sistema. El conjunto de variables V puede descomponerse en $V = X \cup K$, donde X es el subconjunto de variables no conocidas y K es el subconjunto de variables conocidas. $K = U \cup Y \cup \Theta$ contiene los subconjuntos de variables de control U , salidas Y , y parámetros de la estructura Θ [18].

2.2 Matriz de Incidencia

La estructura del modelo se puede representar mediante una matriz denominada Matriz Estructural ó Matriz de Incidencia (MI). Es una matriz cuyas filas se corresponden con las restricciones R del modelo y las columnas se corresponden con las variables V . Cada elemento $m_{ij} \in MI$ es '1' si y sólo si la variable de la columna j está contenida en la relación de la fila i , y '0' en caso contrario [18].

2.3 Aparejamiento perfecto (perfect matching)

El aparejamiento perfecto (AP) consiste en determinar el aparejamiento completo entre variables desconocidas $x_i \in X$ y restricciones R a partir de las cuales las x_i pueden ser calculadas usando las variables conocidas, mediante un grafo bipartito: $G = (R \cup X, \Gamma)$, siendo Γ el conjunto de arcos orientados entre variables y restricciones. Con el aparejamiento es posible precisar las restricciones de un sistema que son necesarias para encontrar una solución para sus variables. Las variables que no forman parte del aparejamiento no pueden ser calculadas. Además las variables que pueden ser calculadas de diversas maneras presentan *redundancia*, la cual será de utilidad en la detección de fallas y en la realización de mecanismos de TF.

En general no existe una solución única para el AP. En el desarrollo de los SDF, el primer método de resolución fue el llamado *resolution process graph* [4] basado en la teoría de grafos. Posteriormente se definió un grafo de estructura o grafo bipartito a partir del cual es posible realizar el AP [12] y para sistematizar el AP en el diseño de los SDF en [2] se describe el algoritmo llamado *ranking* que realiza el número de pasos necesarios para calcular una variable desconocida a partir de las variables conocidas. Posteriormente el algoritmo anterior fue modificado vía la diagonalización de la matriz de incidencia y una formulación parametrizada de la matriz de incidencia aparejada MI^* del modelo estructural en forma triangular MI_T^* [18].

2.4 Ciclos en el grafo y aparejamiento causal

Algunos aparejamientos conducen a ciclos en el grafo orientado. Existen dos tipos: ciclos algebraicos y ciclos diferenciales. El primer tipo contiene solamente restricciones algebraicas, por lo que es posible resolver el sistema de ecuaciones que representa. El segundo tipo representa un sistema de ecuaciones algebraicas y ecuaciones diferenciales que no pueden ser resueltas si no se conocen las condiciones iniciales [2]. Un *aparejamiento causal* es aquel que induce un grafo orientado sin ciclos diferenciales [8,20].

2.5 Relación Redundante

De acuerdo a [16] una *relación redundante* (RR) no se ve involucrada en el AP en el grafo bipartito $G = (R \cup X, \Gamma)$. Cada RR origina una **relación de redundancia**

analítica (RRA) cuando las variables no conocidas involucradas en la RR son reemplazadas por su expresión formal. En [13] se asegura que las RRAs son ecuaciones deducidas a partir de un modelo analítico completo y solamente incluyen variables medidas. Además, a partir de un conjunto finito de RRs es posible deducir un conjunto de RRA's mediante un procedimiento de cálculo "hacia atrás" (backtracing) de las variables desconocidas contenidas en cada RR de MI_T^* [14].

2.6 Descomposición estructural canónica

La descomposición estructural de un grafo bipartito de un modelo de simulación es conocida como *descomposición Dulmage-Mendelsohn* (DDM) [6]. Canónicamente descompone cualquier apareamiento máximo de un grafo bipartito en tres subsistemas:

1. Sobre-restringido denotado por S^+ , con más restricciones que variables.
2. Justo-restringido denotado por S^0 , con igual número de variables y restricciones.
3. Sub-restringido denotado por S^- , con más variables que restricciones.

La utilidad de la DDM en los SDF resulta al considerar que si la redundancia describe información extra en un sistema, y esta se presenta cuando el número de restricciones es mayor que el número de variables desconocidas, **entonces un sistema con redundancia debe ser un subsistema sobre-restringido**. Con el algoritmo de Potten & Fan [17] se desarrolló una importante herramienta computacional en Matlab® a partir de la cual es posible sistematizar la obtención de relaciones redundantes partiendo de la matriz de incidencia MI del modelo analítico.

2.7 Inconsistencia y Residuos

Los SDF de sistemas complejos representados por modelos analíticos deterministas se basan en la inconsistencia entre el comportamiento actual del proceso y el comportamiento esperado el cual está descrito por un modelo analítico. La *inconsistencia* se muestra en señales llamadas *residuos*. Los residuos son señales generadas mediante el procesamiento de las señales medidas de entrada y salida de la planta, además de un subconjunto adicional de variables monitoreadas del sistema.

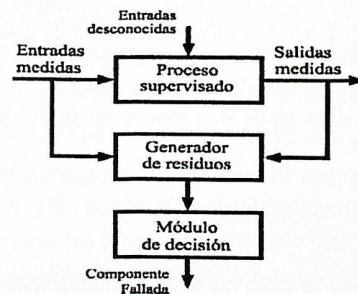


Figura 1. Estructura de un sistema de diagnóstico de fallas

Entonces es necesario asegurar la monitoreabilidad del sistema para garantizar la redundancia de las variables medidas adicionales que son necesarias. En un punto de equilibrio de la planta (estado estacionario deseado) en ausencia de fallas los residuos son cero. Cuando ocurre una falla, los residuos asociados al subsistema fallado se desvían de cero. El objetivo del módulo de decisión mostrado en la Fig. 1 es determinar cuales residuos difieren de cero lo suficiente para indicar las componentes falladas (detectabilidad).

2.8 Detectabilidad y aislabilidad estructural

Un residuo es estructuralmente sensible a una falla f_i si esta falla afecta alguna de las restricciones usadas para generarlo [16]. Además el conjunto de fallas a las que es sensible el residuo se conoce como su *firma de fallas*. Entonces si se determina la firma de fallas de cada residuo, es posible construir la matriz de firma de fallas, que se genera concatenando todas las firmas de fallas posibles. Cada línea corresponde a un residuo y cada columna a una falla, de manera que un 1 en la posición (i, j) significa que la falla j es detectable por el residuo i (*detectabilidad estructural*). Cuando dos firmas son idénticas se sabe que las fallas no son distinguibles entre sí. Para visualizar la propiedad de aislamiento de fallas, o *aislabilidad estructural*, se construye la *matriz de aislamiento*: una matriz cuadrada en la cual cada fila y cada columna corresponde a una falla, de manera que un 1 en la posición (i, j) significa que la falla i no es aislable de la falla j [11].

3 Caso de estudio

3.1 Proceso

La TG de la Fig. 2 es una de dos unidades que junto con dos recuperadores de calor y una turbina de vapor integran la central de generación de ciclo combinado Westinghouse PACE260 de la Comisión Federal de Electricidad. Por medio del análisis estructural aplicado al modelo matemático de la TG [5] se busca determinar la viabilidad de diagnosticar fallas mecánicas y fallas térmicas usando las mediciones de dicha instalación. Cada unidad de la TG se encuentra formada por los siguientes equipos: compresor, cámara de combustión, turbina de gas, generador eléctrico, recuperador de calor y actuadores.

El modelo de comportamiento simplificado de la unidad consiste de 28 ecuaciones no lineales (19 estáticas y 9 diferenciales) 3 acciones de control, 4 actuadores y 12 señales de proceso (velocidad, presiones y temperaturas), mientras que el modelo estructural consiste de 37 restricciones $c_i \in R$, 27 variables desconocidas $x_i \in X$, 19 variables conocidas $k_i \in K$ y 28 parámetros $\theta_i \in \Theta$ que generan la matriz de incidencia MI [19].

3.2 Fallas críticas

Fallas mecánicas en el acoplamiento del rotor del turbogenerador y *fallas térmicas* en la cámara de combustión afectan la potencia eléctrica k_{13} producida por el generador de la unidad. Ambas fallas se pueden emular mediante variaciones de parámetros del modelo: θ_{11} *fricción en el rotor del turbogenerador*, y θ_9 *poder calorífico del combustible*, respectivamente. Entonces ante un cambio en la potencia eléctrica k_{13} , el módulo de decisión del SDF debe indicar la causa.

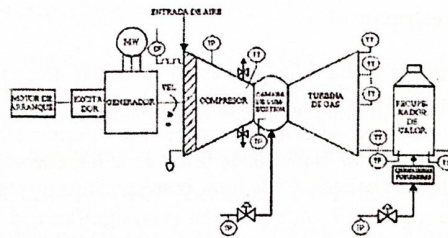


Figura 2. Componentes de la turbina de gas

4. Estudio de redundancia analítica

Se estudió la propiedad estructural de redundancia analítica del modelo de TG para determinar los grados de monitoreabilidad, detectabilidad y aislabilidad de fallas, mediante los casos siguientes:

Caso 1. Se construyó la matriz de incidencia MI y se calculó la matriz de incidencia aparejada triangular MI_r^* [2,18,20] obteniéndose 10 RR s. Después se realizó el cálculo “hacia atrás” para obtener las correspondientes RR As (ecuaciones de paridad).

Caso 2. Con el programa SaTool [15] se obtuvo un grafo del modelo estructural, Fig. 3(a), y un conjunto de 10 RR As.

Caso 3. Se calculó la descomposición canónica DM de la MI del modelo estructural [17] y se obtuvieron subsistemas $S^0 \in \mathbb{R}^{7 \times 7}$ y $S^+ \in \mathbb{R}^{30 \times 20}$ de 10 RR s, Fig. 3(b).

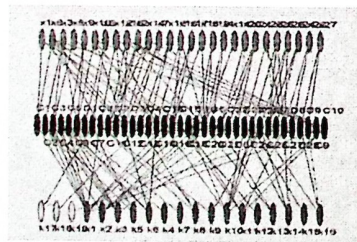
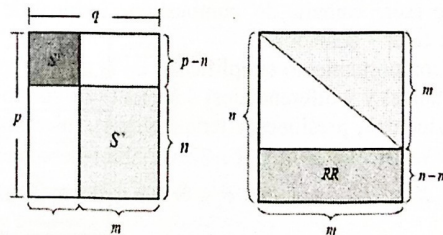


Figura 3. (a) Grafo estructural,



(b) Descomposición DM:

$$p = 37, q = 27; n = 30, m = 20; p - n = q - m = 7$$

Se obtuvieron tres conjuntos iguales con 10 RRs cada uno. El sistema completo resultó ser monitoreable [18,20], pero un hallazgo importante fue el haber encontrado un subsistema S^0 sin redundancia y por tanto no detectable ante fallas [19] que afecta la restricción c_{20} , Fig. 4. El análisis efectuado muestra que la estructura no permite la detección de fallas mecánicas en el acoplamiento rotor-generator, ni la detección de cambios en la velocidad del rotor k_2 . Además los parámetros de inercia del turbogenerador θ_{20} y fricción del rotor θ_{11} no son detectables.

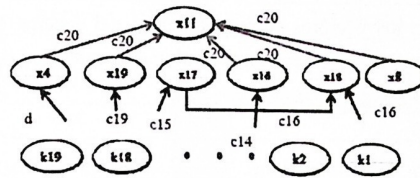


Figura 4. Subsistema sin redundancia S^0

5. Estudio algorítmico

El análisis de los resultados anteriores mostró la existencia de ciclos diferenciales en las trayectorias de cómputo de variables aparejadas en S^+ . Con el objetivo de garantizar la *redundancia completa del sistema y la calculabilidad* de las variables desconocidas $x_i \in X$ en S^+ , se propone un algoritmo que calcula todos los AP posibles, con el propósito de juntar todas las estructuras de residuos, sin pérdida de información y con la capacidad de distinguir las diferentes fallas unas de otras.

Algo-fdi-1:

- (1) Calcular la descomposición DM de MI de $p \times q$
- (2) Identificar el sistema S^+ de $(n \times m)$ con $n > m$
- (3) Calcular todos los AP en S^+ :
 - o Con combinaciones de n restricciones en grupos de m variables
 - o Seleccionar combinaciones de *rango estructural completo* ($Comb_REC$).¹
- (4) Clasificar $Comb_REC$ en función de ciclos diferenciales, de acuerdo a las siguientes propiedades:
 - p_1 : Derivadas con 2 variables desconocidas $x_{i+1} = dx_i / dt$
 - p_2 : Derivadas con 1 variable desconocida $x_i = dk_j / dt$
 - $p_3 \sqcap p_1 \text{ and } p_2$, se cumplen p_1 y p_2
 - $p_4 \sqcap \overline{p_1 \text{ and } p_2}$, no se cumplen: ni p_1 ni p_2
- (5) Con p_4 calcular la MI_T^* y a partir de esta las RRs del sistema.
- (6) Determinar RRAs del sistema como función de variables $v_q \in V \subset K$

¹ Conocidas como Bloques de König-Hall (BKH)

(7) Hallar expresiones analíticas de los residuos y calcular matrices de firmas.

Resultados obtenidos con Algo-fdi-1:

Tabla 1

Comb_REC	p_1	p_2	p_3	p_4
65,496	1993	86	63,415	2

A cada caso de p_4 se le asociaron los vectores correspondientes del sistema S^+ y se obtuvo la matriz aparejada triangularizada sin derivadas en el aparejamiento, Fig. 5.

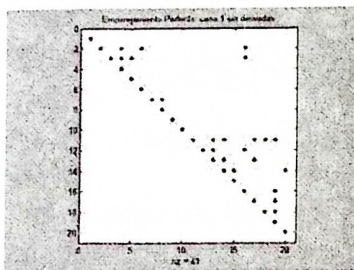


Figura 5. Subsistema S^+ sin derivadas en la secuencia de aparejamiento

Se encontró que los 2 conjuntos de 10 *RRAs* son iguales. Con lo anterior es posible asegurar que el modelo estructural de TG descrito en la Sección 3 contiene **un conjunto único de 10 *RRAs*** y un *subsistema no detectable de fallas mecánicas*.

6. Modificación de la estructura

El subsistema S^0 de la Fig. 4 involucra energías consumidas por el compresor x_8 y por fricción del rotor x_{19} y la energía suministrada por el motor de arranque x_{11} . También vincula la entalpía de los gases en la cámara de combustión x_{16} y la entalpía de los gases de escape de la turbina x_{18} con la densidad de los gases de escape x_{17} y la aceleración del rotor x_4 . Con este conjunto de variables asociadas a la trayectoria de gases producidos por la combustión se calcula la eficiencia de la turbina de gas en régimen térmico. Entonces surge la pregunta sobre ¿cual(es) debe(n) ser la(s) variable(s) que se puede(n) medir de la trayectoria de gases para construir un grafo redundante que involucre al nodo c_{20} ?

Como el aparejamiento de S^0 se reduce al grafo de la Fig. 4, se observa que para que este se transforme en un grafo redundante es necesario conocer el nodo x_{11} (asociado a la energía del motor de arranque), por lo que es razonable adicionar un dinamómetro a la instrumentación de la unidad para calcular x_{11} a partir de la medición del torque. Consecuentemente se modificó la estructura del modelo haciendo conocida a la

variable x_{11} , es decir con $k_{20} \square x_{11}$. Entonces el modelo estructural modificado quedó de 37×26 , con 20 variables conocidas, por lo que se procedió a realizar el estudio de redundancia a fin de obtener el conjunto completo de residuos de la *nueva estructura*: Se obtuvieron 11 *RRs* (10 obtenidas anteriormente y una más). De esta forma con la medición k_{20} es posible detectar y aislar las fallas emuladas con variaciones en θ_{11} y θ_9 . La Tabla 2 muestra las firmas de ambas fallas consideradas:

Tabla 2. Detección de fallas originadas por parámetros

FALLA	Mecánica: Δ_{11}	Térmica: Δ_9
RR_{A_6}	0	1
RR_{A_8}	0	1
$RR_{A_{11}}$	1	1

Pruebas.- Para verificar el resultado del análisis se simuló el proceso con los parámetros tomados de [5] en condiciones de falla y normales. En condición nominal del modelo en estado estacionario de carga base, los residuos se mantuvieron en cero como era de esperarse. En condiciones de falla se consideraron dos escenarios:

- (1) Desviación en el factor de fricción del rotor $\Delta_{11} = \theta_{11} \times F_{f11}$, factor de falla $F_{f11} > 1$.
- (2) Desviación por pérdida de poder calorífico $\Delta_9 = \theta_9 \times F_{f9}$, factor de falla $F_{f9} < 1$.

Al cambiar el valor del parámetro la potencia eléctrica generada k_{13} disminuye mientras que la velocidad k_2 permaneció constante.

7. Conclusiones

La aplicación del AE a un sistema complejo con requerimientos estrictos de operación mostró la capacidad de la técnica para determinar la redundancia analítica completa, para la implementación del generador de residuos robusto, asegurando no tener ciclos diferenciales en la secuencia de cómputo de las variables desconocidas del modelo con aparejamiento perfecto. Además, al modificar la estructura del modelo se obtuvo un sistema TG completamente monitoreable y detectable ante fallas de sensores, actuadores, señales de control y parámetros del proceso, mediante 11 *RRAs*.

El estudio de aislabilidad de ambas fallas que afectan la potencia generada de la TG mostró que son distinguibles. Está pendiente la identificación de la magnitud de las fallas, sin embargo dado que las especificaciones de esta tarea dependen en cierta medida del esquema de control seleccionado, se tiene previsto atacarla de manera conjunta con la tarea de control.

Referencias

- [1] Blanke, M., Frei, C.W., Kraus, F., Patton, R.J., Staroswiecki, M.: What is Fault-tolerant Control? In: Proc. of 4th IFAC Symposium SAFEPROCESS'00, pp. 40-51 (2000).

- [2] Blanke, M., Kinnaert, M., Lunze, J. y Staroswiecki, M.: *Diagnosis and fault tolerant control*. Springer, Berlin (2003).
- [3] Cassar, J.P., M. Staroswiecki y P. Declerk (1994). Structural decomposition of large scale systems for the design of failure detection and identification procedures. *Systems Science*.
- [4] Cassar, J. and Staroswiecki, M.: A structural approach for the design of failure detection and identification systems. In: Proc. of IFAC/IFIP/IMACS Conference on Control of Industrial Processes. Belfort, France, (1997).
- [5] Delgadillo, M.A. and Fuentes J.E.: Modelo dinámico de la turbina de gas. Informe técnico No. IC-5117-MOD-TG-2.0, Proyecto 5117. IIE, México (1996).
- [6] Dulmage, A.L. and Mendelsohn, N.S.: Covering of bipartite graphs. *Canadian J. of mathematics*, **10**, 517-534, (1958).
- [7] Düstegör, D. Cocquempot, V. and Staroswiecki, M.: Structural analysis for fault detection and isolation: an algorithm study. In: Proc. of 2nd IFAC Symposium SSSC'04, 134-139, (2004).
- [8] Düstegör, D., Frisk, E., Cocquempot, V., Krysander, M. and Staroswiecki, M.: Structural analysis of fault isolability in the DAMADICS benchmark. *Control Engineering Practice*, **14** (6), 597-608, (2006).
- [9] Frank, P.M.: Quantitative and qualitative model-based fault diagnosis- A survey and some new results, *European Journal of Control*, **2**(1), 6-28, (1996).
- [10] Isermann, R. and Ballé, P.: Trends in the application of model-based fault detection and diagnosis of technical processes. *Control Engineering Practice*, **5**(5), 709-719, (1997).
- [11] Ding, S. X.: *Model-based Fault Diagnosis Techniques*. Springer, Berlin (2008).
- [12] Izadi-Zamanabadi, R. and Blanke, M.: Structural analysis for Diagnosis-The matching problem. In: Proc. of 15th Triennial World Congress. Barcelona, Spain, (2002).
- [13] Kinnaert, M.: Fault diagnosis based on analytical models for linear and nonlinear systems – A tutorial. In: Proc. of 5th IFAC Symposium SAFEPROCESS'03, pp 37-50, (2003).
- [14] Lorentzen T., Blanke, M. and Niemann, H.: Structural Analysis– A case study of the Romer satellite. In: Proc. of 5th IFAC Symposium SAFEPROCESS'03, pp. 187-192. (2003).
- [15] Lorentzen, T. and Blanke, M.: Industrial use of structural analysis – a rapid prototyping tool in the public domain. In: Colloque Annuel IAR. Karlsruhe, Germany, pp. 187-192, (2004).
- [16] Puig, V., Quevedo, J., Escobet, T., Morcego, B. y Ocampo, C.: Control tolerante a fallos (Parte I): Fundamentos y diagnóstico de fallos. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, **1**(1), 15-31, (2004).
- [17] Pothén, A. and Fan, Ch.: Computing the blok triangular form of a sparse matrix. *ACM Trans. on mathematical software*, **16**(4), 330-324, (1990).
- [18] Sánchez, M. and Verde, C.: Analytical Redundancy for a Gas Turbine of a Combined Cycle Power Plant. In: Proc. ACC'06, pp. 4442-4447, Minneapolis, MN, USA, (2006).
- [19] Sánchez, M. and Verde, C.: Structural analysis for sensor fault detection in combined cycle power plant units. In: Proc. 2nd International Conference on Dynamics, Instrumentation and Control. Querétaro, México, (2006).
- [20] Verde, C. and Sánchez, M.: Monitorability analysis for a gas turbine using structural analysis. In: Proc. of 6th IFAC Symposium SAFEPROCESS'06, **13**(), 721-726. Beijing, China, (2006).
- [21] Zhang, Y. and Jiang, J.: Issues on integration of fault diagnosis and reconfigurable control in active fault-tolerant control systems. In: Proc. of 6th IFAC Symposium SAFEPROCESS'06, **13**(), 1513-1524. Beijing, China, (2006).
- [22] Verde, C.: Análisis de fallas usando sistemas estructurados. En: Memoria Congreso Annual de la AMCA, 182-187, (2004).