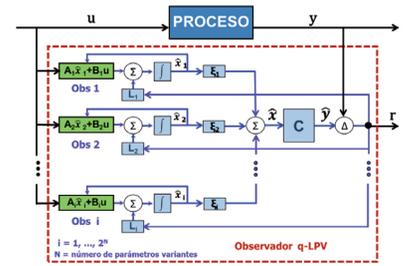


Diagnóstico de fallos en el control y compensación de la medición por sensores virtuales en una central termoeléctrica



Fault diagnosis in control and measurement compensation by virtual sensors in a thermal power plant



Guadalupe Madrigal-Espinosa^{1,2}, Carlos M. Astorga-Zaragoza², Manuel Adam-Medina², Gloria-Lilia Osorio-Gordillo², Miguel Vázquez-Román¹

¹ Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias. Reforma 113 Col. Palmira - 62490 Cuernavaca, Mor. (México). Tel +777 3623811.

² Tecnológico Nacional de México. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico. Dpto. de Ingeniería en Electrónica. Interior Internado Palmira, s/n - 62490 Cuernavaca, Mor. (México).

DOI: <https://doi.org/10.6036/8238> | Recibido: 07/12/2016 • Evaluado: 09/12/2016 • Aceptado: 02/03/2017

ABSTRACT

- In this work the system of fault diagnosis in control and measurement compensation by virtual sensors in a thermal power plant is presented. The diagnostic system is applied to control systems of the power plant, to compensate for faulty sensor measurements. The design is based on Luenberger-like observers for Linear Parameter-Varying (LPV). An LPV model of the steam generator and turbine is parameterized with real data from the operation of a power plant and represents the dynamic behavior of the pressure in the first stage of the turbine, drum pressure, superheated steam pressure and electrical power. The main contribution of this work is to show that the proposed diagnostic system is suitable for real plant applications. In this sense, the performance of the diagnostic system is evaluated adequately in a scenario by using a simulator that emulates the real operation of a power thermal plant.
- Key Words:** Observer, Fault diagnosis, Nonlinear model, LPV model, Virtual sensor, Power thermal plant.

RESUMEN

En este trabajo se presenta el sistema de diagnóstico de fallos en el control y compensación de la medición por sensores virtuales en una central termoeléctrica. El sistema de diagnóstico se aplica en sistemas de control de la central para la compensación de las mediciones de sensores con fallos. El diseño se basa en observadores tipo Luenberger para sistemas Lineales con Parámetros Variables en el tiempo (LPV). Un modelo LPV del generador de vapor y la turbina se parametriza con datos reales obtenidos de la operación de una central y representa el comportamiento dinámico de las variables de presión de la primera etapa de la turbina, presión en el domo, presión del vapor sobrecalentado y potencia eléctrica. Se muestra la viabilidad de que el sistema de diagnóstico sea implantado en el proceso real, en función de los resultados obtenidos al evaluar su desempeño en un simulador que emula la operación real de una central termoeléctrica.

Palabras Clave: Observador Luenberger, Diagnóstico de fallos, Modelo no lineal, Modelo LPV, Sensor virtual, Central Termoeléctrica.

1. INTRODUCCIÓN

Las centrales termoeléctricas tienen una participación muy importante en el proceso de generación de electricidad, contri-

buyendo además a la seguridad, estabilidad y operación eficiente de las redes eléctricas de potencia. Estas centrales se integran por una o varias unidades de generación de energía eléctrica, en las cuales los generadores de vapor son equipos complejos e importantes por los procesos que realizan durante la operación de las unidades.

Debido a la gran cantidad de sensores y actuadores en los sistemas de control de un generador, el fallo de alguno de ellos puede tener efectos significativos sobre la unidad como puede ser su salida de operación o el daño a equipos o partes de la misma. Para evitar esto, se requiere que los sistemas de control se adapten a las condiciones que originan los fallos, por lo que es necesario detectarlos rápidamente a fin de mitigar sus efectos mediante acciones correctivas. En la mayoría de los casos se recurre a la redundancia física [1] para mantener la operación confiable y eficiente de la unidad en presencia de fallos en sensores de los sistemas de control. Sin embargo, el uso de sensores físicamente redundantes incrementa las necesidades de mantenimiento con el correspondiente costo que estas tareas implican. Una alternativa que permite reducir estos costos es el uso de nuevas tecnologías de sistemas de diagnóstico de fallos y de control tolerante a los mismos, con base en el concepto de redundancia analítica [2].

Algunos ejemplos de sistemas de diagnóstico de fallos diseñados con base en modelos simplificados de generadores de vapor de centrales termoeléctricas han sido reportados en [3], [4] y [5], donde las tareas sólo se limitan a la detección y/o localización del fallo, sin incidir sobre los sistemas de control o sobre los sensores fallados. El diseño de estos sistemas está basado en modelos lineales [3] o en modelos no lineales linealizados para un solo valor de demanda de carga eléctrica [4] y [5]; sin embargo las unidades de generación operan en un amplio rango de cargas: bajas, medias y altas. Aun cuando en estos trabajos se muestra el buen desempeño de los sistemas de diagnóstico, los resultados de evaluación fueron obtenidos de pruebas de simulación realizadas sobre los mismos modelos simplificados con los que fueron diseñados. Una clase de modelo que representa las dinámicas no lineales complejas de un proceso en todo su rango de operación, a la vez que permite el uso de metodologías para sistemas lineales, son los LPV [6]. Modelos LPV para procesos industriales han sido usados en el diseño de sistemas de diagnóstico de fallos; por ejemplo en [7] para una celda de combustible y en [8] para actuadores de aviones. Sin embargo, no se han encontrado en la literatura diseños de sistemas de diagnóstico de fallos con sensores virtuales y basados en modelos LPV para generadores de vapor de unidades de generación de energía eléctrica.

La relevancia de este trabajo radica en demostrar la viabilidad de implantar un sistema de diagnóstico de fallos en el control y compensación de la medición por sensores virtuales, en adelante SDFSV (Sistema de Diagnóstico de Fallos y Sensores Virtuales), en la Unidad nº4 de la Central Termoeléctrica Gral. Francisco Villa, localizada en México, a partir de los resultados que se obtienen al evaluar el SDFSV en un simulador que emula la operación real de la Unidad nº4. El diseño del SDFSV se realiza con base en un modelo simplificado de tipo LPV, para considerar todo el rango de operación no lineal del generador de vapor; también, en observadores tipo Luenberger para la generación de los residuos, en un umbral fijo de detección para eliminar las falsas alarmas y en sensores virtuales que se construyen a partir del modelo no lineal con información que se obtiene de un análisis estructural. La representación LPV se deriva de un modelo no lineal simplificado que se parametriza con datos reales de la Unidad nº4 para distintas demandas de carga eléctrica. La aplicación del SDFSV se realiza sobre los sistemas de control de la Unidad nº4 para la compensación de las mediciones de sus sensores; los resultados demuestran que los sistemas de control mantienen su buen desempeño.

2. MODELADO DEL GENERADOR DE VAPOR

La representación matemática no lineal que modela el proceso de generación de vapor se deriva de principios físicos de balances de masa y energía, [9], [10] y [11], y del análisis de las características dinámicas operativas de la Unidad nº4, con capacidad de generación de 158 MW. El modelo se parametrizó con datos reales de la operación de la unidad, para representar de manera simplificada la dinámica del generador de vapor y las turbinas de la unidad, en todo su rango de operación; esto es, demandas de carga eléctrica bajas (de 80 a 100 MW), medias (de 100 a 140 MW) y altas (de 140 a 158 MW). El modelo no lineal de la Unidad No.4 se integra por cuatro ecuaciones diferenciales y dos ecuaciones algebraicas, y contiene cuatro variables de estado (f_{VM} , P_D , P_T y P_o), cuatro variables de salida (P_{1a} , P_D , P_T y P_o) y dos variables de entrada (u_1 y u_2).

$$\dot{f}_{VM} = \frac{K_H u_1 - f_{VM}}{t_H} \quad (1)$$

$$\dot{P}_D = \frac{f_{VM} - K\sqrt{P_D - P_T}}{C_D} \quad (2)$$

$$\dot{P}_T = \frac{K\sqrt{P_D - P_T} - m_s}{C_{SH}} \quad (3)$$

$$\dot{P}_o = \frac{K_{Po} m_s - P_o}{t_{Po}} \quad (4)$$

$$P_{1a}(t) = K_\alpha f_{VM}(t) - K_\beta \quad (5)$$

$$m_s = (K_1 u_2 + K_2) P_T \quad (6)$$

Los valores de las constantes de tiempo t_{Po} y t_H y de los parámetros C_D , C_{SH} , K , K_{Po} y K_H se ajustan en condiciones de carga máxima (158 MW) siguiendo los lineamientos establecidos en [10] y [11]. Los valores de los parámetros K_1 y K_2 se determinan de las curvas de diseño del fabricante de la válvula de vapor principal de la Unidad nº4. Los valores de los parámetros K_α y K_β se obtienen de la curva de relación que usa como señal de prealimentación

el control maestro de combustible de la unidad, con base en la medición de P_{1a} ; esta medición también corresponde a la presión del vapor que ya realizó un trabajo sobre la primera etapa de la turbina y sale exhausto con un valor menor al valor nominal de P_T .

La nomenclatura de las variables y parámetros del modelo no lineal es la siguiente.

SÍMBOLOS	UNIDAD	DESCRIPCIÓN
f_{VM}	kg/s	Flujo de vapor en la mezcla agua-vapor.
P_D	Pa	Presión del domo.
P_T	Pa	Presión de vapor sobrecalentado que entra a la turbina.
P_o	MW	Potencia eléctrica.
P_{1a}	Pa	Presión de vapor en la primera etapa de la turbina.
m_s	kg/s	Flujo de vapor principal.
u_1	Fracción (0-1)	Apertura de la válvula de combustible.
u_2	Fracción (0-1)	Apertura de la válvula de vapor principal.
K	kg/(Pa • s)	Constante que relaciona la interacción entre P_D , P_T , m_s y f_{VM} .
K_{Po}	(MW • s)/kg	Constante que relaciona P_o con m_s .
K_H	kg/s	Constante que relaciona f_{VM} con u_1 .
K_1, K_2	kg/(Pa • s)	Constantes que relacionan u_2 y P_T con m_s .
K_α	(Pa • s)/kg	Constantes que relacionan P_{1a} con f_{VM} .
K_β	Pa	
C_D	kg/Pa	Constante que relaciona la masa de vapor en paredes de agua y domo con P_D .
C_{SH}	kg/Pa	Constante que relaciona la masa de vapor en el sobrecalentador con P_T .
t_{Po}	s	Constante de tiempo de P_o .
t_H	s	Constante de tiempo de la energía calorífica en el hogar hacia la mezcla agua-vapor en paredes de agua.

2.1. REPRESENTACIÓN LPV

Con el modelo no lineal dado en las Ecs. (1) a (6) se obtiene la siguiente representación cuasi-LPV (q-LPV Politépico) con fallos en sensores [6], [12]. Se le denomina q-LPV debido a que los parámetros variables en el tiempo dependen de las variables de estado.

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^M \xi_i(\rho(x(t))) [A_i(\rho(x(t)))x_i(t) + B_i(\rho(x(t)))u(t)] \quad (7)$$

$$y(t) = Cx(t) + f(t) \quad (8)$$

$$\text{donde } \sum_{i=1}^M \xi_i(\rho(x(t))) = 1, \quad \xi_i(\rho(x(t))) \geq 0, \quad \forall i \in \{1, \dots, M\} \quad (9)$$

$x(t) \in R^n$, $u(t) \in R^m$ y $y(t) \in R^p$ son el vector de estado, el vector de entrada y el vector de salida respectivamente. $A_i(\rho(x(t)))$, $B_i(\rho(x(t)))$ y C son matrices conocidas de dimensiones apropiadas. $\rho(x(t)) = [P_1(x(t)), \dots, P_N(x(t))]$ es el vector de parámetros variables en el tiempo, que evolucionan dentro de un polítopo convexo P de M vértices ($M = 2^n$) tal que $\rho(x(t)) \in \text{Co}\{P_1, \dots, P_N\}$; N es el número

ro de parámetros variables del vector $p(x(t))$. Cada componente ρ_k está acotado dentro del intervalo $[\underline{\rho}_k, \bar{\rho}_k] \forall k \in \{1, \dots, N\}$, donde $\bar{\rho}_k$ es el valor máximo del parámetro variable y $\underline{\rho}_k$ el valor mínimo. $\xi_i(\rho(x(t)))$ son funciones de ponderación.

Para el modelo no lineal de la Unidad nº4 se definen los siguientes dos parámetros variables en el tiempo:

$$\rho_1(x(t)) = \frac{1}{\sqrt{P_D(t) - P_T(t)}} \quad ; \quad [\bar{\rho}_1, \underline{\rho}_1] \quad (10)$$

$$\rho_2(x(t)) = P_T(t) \quad ; \quad [\bar{\rho}_2, \underline{\rho}_2] \quad (11)$$

Se observa que estos parámetros dependen de las variables de estado P_D y P_T , las cuales son medibles en línea. Con dos parámetros variables ($N = 2$), el politopo tiene cuatro vértices ($M = 4$) sobre los cuales se definen las siguientes funciones de ponderación $\xi_i(\rho(x(t)))$ ($i = 1, \dots, M$) de acuerdo con lo establecido en [12].

$$\xi_1(\rho(x(t))) = F_{11}(\rho(x(t))) * F_{21}(\rho(x(t))) \quad (12)$$

$$\xi_2(\rho(x(t))) = F_{11}(\rho(x(t))) * F_{22}(\rho(x(t)))$$

$$\xi_3(\rho(x(t))) = F_{12}(\rho(x(t))) * F_{21}(\rho(x(t)))$$

$$\xi_4(\rho(x(t))) = F_{12}(\rho(x(t))) * F_{22}(\rho(x(t))) \quad (13)$$

Las funciones se definen como:

$$F_{j1}(\rho(x(t))) = \frac{\rho_j(x(t)) - \underline{\rho}_j}{\bar{\rho}_j - \underline{\rho}_j}$$

$$F_{j2}(\rho(x(t))) = \frac{\bar{\rho}_j - \rho_j(x(t))}{\bar{\rho}_j - \underline{\rho}_j} \quad (14)$$

con $j = 1, \dots, N; i = 1, 2$

y satisfacen las siguientes condiciones:

$$F_{j1}(\rho(x(t))) + F_{j2}(\rho(x(t))) = 1 \quad (15)$$

$$1 \geq F_{j1}(\rho(x(t))) \geq 0; \quad 1 \geq F_{j2}(\rho(x(t))) \geq 0 \quad (16)$$

Los vectores de variables de estado $x(t)$, de entradas $u(t)$ y de salidas $y(t)$, y la matriz C son:

$$x(t) = \begin{bmatrix} f_{VM}(t) \\ P_D(t) \\ P_T(t) \\ P_o(t) \end{bmatrix}, \quad u(t) = \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix}, \quad y(t) = \begin{bmatrix} P_{1a}(t) \\ P_D(t) \\ P_T(t) \\ P_o(t) \end{bmatrix}, \quad (17)$$

$$C = \begin{bmatrix} K_\alpha & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Las matrices A_i y B_i en los vértices del politopo son:

$$A_1 = A_2 = \begin{bmatrix} -1/t_H & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_D} & \frac{-K\bar{\rho}_1}{C_D} & \frac{K\bar{\rho}_1}{C_D} & 0 \\ 0 & \frac{K\bar{\rho}_1}{C_{SH}} & -\frac{K\bar{\rho}_1}{C_{SH}} - \frac{K_2}{C_{SH}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{K P_o K_2}{t_{P_o}} & -1/t_{P_o} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$A_3 = A_4 = \begin{bmatrix} -1/t_H & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_D} & \frac{-K\rho_1}{C_D} & \frac{K\rho_1}{C_D} & 0 \\ 0 & \frac{K\rho_1}{C_{SH}} & -\frac{K\rho_1}{C_{SH}} - \frac{K_2}{C_{SH}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{K P_o K_2}{t_{P_o}} & -1/t_{P_o} \end{bmatrix}$$

$$B_1 = B_3 = \begin{bmatrix} K_H/t_H & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -\frac{K_1\bar{\rho}_2}{C_{SH}} \\ 0 & \frac{K P_o K_1 \bar{\rho}_2}{t_{P_o}} \end{bmatrix} \quad (19)$$

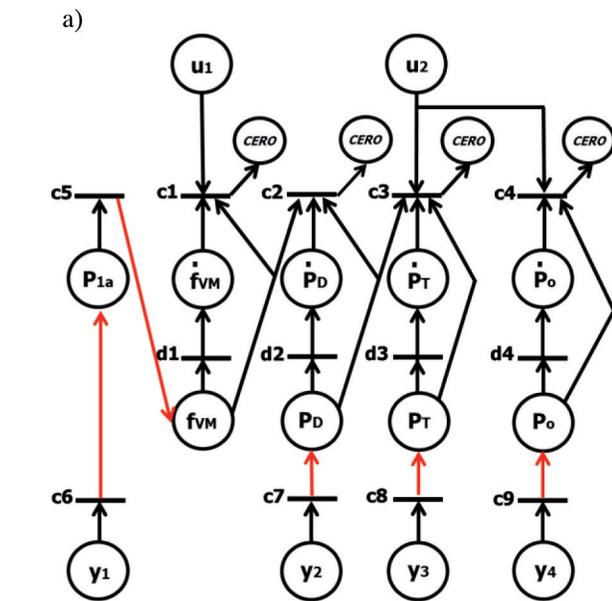
$$B_2 = B_4 = \begin{bmatrix} K_H/t_H & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -\frac{K_1\rho_2}{C_{SH}} \\ 0 & \frac{K P_o K_1 \rho_2}{t_{P_o}} \end{bmatrix}$$

3. ANÁLISIS ESTRUCTURAL

La metodología de análisis estructural [15] se empleó para determinar las relaciones entre las variables conocidas (entradas o salidas medibles, o parámetros de valor conocido) y las desconocidas (variables de estado y algebraicas) del modelo no lineal de la unidad de generación, con el propósito de determinar información redundante útil para el diseño del SDFSV. Esta metodología permite conocer las relaciones entre los distintos componentes de un sistema y las restricciones que puedan existir sobre sus variables, representando estas relaciones mediante un grafo bipartito o una matriz de incidencia. Para el modelo no lineal de las Ecs. (1) a (6) se definieron las siguientes restricciones (*ci's* y *di's*), sin considerar el vector de fallos en sensores.

El grafo bipartito que se obtiene se presenta en la Fig. 1a. Cada variable se representa por un círculo y cada restricción por una barra; las líneas de conexión entre círculos y barras representan la relación de cada variable con alguna de las restricciones *ci's* o *di's*. Cuando en una restricción sólo existen variables de entrada, se adiciona un nodo (círculo) denominado CERO para representar la salida de la restricción. La relación de una variable desconocida con una restricción, a partir de la cual la variable puede calcularse, se define como una paridad ("*Matching*") [14]; en el grafo se identifican como la línea única que sale de una restricción (barra) y llega a una variable desconocida (círculo). Las direcciones de las líneas de conexión se establecen a partir de las paridades identificadas. El propósito principal del concepto de paridad es identificar las partes del sistema que contienen información redundante, [15], [14]. Las variables desconocidas que pueden ser conectadas de varias formas, podrán ser determinadas a partir de más de una restricción [13].

$$\begin{aligned}
 c1: \quad & \dot{f}_{VM} - \frac{K_H u_1 - f_{VM}}{t_H} = 0 \\
 d1: \quad & \dot{f}_{VM} - \frac{d}{dt} f_{VM} = 0 \\
 c2: \quad & \dot{P}_D - \frac{1}{C_D} f_{VM} + \frac{K \rho_1(t)}{C_D} P_D - \frac{K \rho_1(t)}{C_D} P_T = 0 \\
 d2: \quad & \dot{P}_D - \frac{d}{dt} P_D = 0 \\
 c3: \quad & \dot{P}_T - \frac{K \rho_1(t)}{C_{SH}} P_D + \left(\frac{K \rho_1(t)}{C_{SH}} + \frac{K_2}{C_{SH}} \right) P_T + \frac{K_1 \rho_2(t)}{C_{SH}} u_2 = 0 \\
 d3: \quad & \dot{P}_T - \frac{d}{dt} P_T = 0 \\
 c4: \quad & \dot{P}_O - \frac{K_2}{t_{P_O}} P_T + \frac{P_O}{t_{P_O}} - \frac{K_{P_O} K_1 \rho_2(t)}{t_{P_O}} u_2 = 0 \\
 d4: \quad & \dot{P}_O - \frac{d}{dt} P_O = 0 \\
 c5: \quad & P_{1a} - K_\alpha f_{VM} + K_\beta = 0 \\
 c6: \quad & y_1 - P_{1a} = 0 \\
 c7: \quad & y_2 - P_D = 0 \\
 c8: \quad & y_3 - P_T = 0 \\
 c9: \quad & y_4 - P_O = 0
 \end{aligned}$$



b) Matriz de incidencia

		f_{VM}	P_D	P_T	P_O	P_{1a}	u_1	u_2	y_1	y_2	y_3	y_4
c_5		1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
c_7		0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
c_8		0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
c_9		0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
c_6		0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0
$RR1$	c_1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
$RR2$	c_2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
$RR3$	c_3	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0
$RR4$	c_4	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0

Fig. 1: Análisis estructurado de la Unidad n°4; a) Grafo Bipartito; b) Matriz de incidencia

La matriz de incidencia (Tabla 2) se obtiene de la información contenida en el grafo bipartito (Fig. 1b) donde cada columna corresponde a un círculo, cada fila a una barra y la línea que une un círculo con una barra se representa con el número uno en la matriz [16]. Se observa que todas las variables desconocidas tienen una relación con alguna restricción; esto se representa en la matriz con un "1" en la intersección de la columna y fila correspondiente; las paridades se representan con el número uno en romano ("I"). Analizando la matriz de incidencia se observa que las restricciones c_1 , c_2 , c_3 y c_4 y las variables f_{VM} , P_D , P_T , P_O , m_s y P_{1a} no tienen asociada una paridad y por lo mismo son usadas como relaciones de redundancia analítica (RRA). Estas RRA's al contar con un número de variables mayor que el número de restricciones, contienen información redundante que puede ser usada para el diagnóstico de fallos y el diseño de los sensores virtuales. Se observa que f_{VM} puede ser calculada de manera redundante a través de las restricciones c_1 y c_2 , y que P_D se puede calcular a partir de las restricciones c_2 y c_3 . También, se observa que la variable P_T puede ser calculada de las restricciones c_2 , c_3 y c_4 , y que la variable P_O sólo puede ser calculada a partir de la restricción c_4 .

4. SISTEMA DE DIAGNÓSTICO DE FALLOS CON SENSORES VIRTUALES

Desde su puesta en servicio, la Unidad n°4 opera en un esquema de control de Caldera en Seguimiento y los sensores que miden las variables P_T , P_{1a} y P_O no tienen redundancia física. Conforme a lo establecido en [1], estas mediciones deben ser redundantes para que el fallo en un sensor no afecte la operación de la unidad. Como una alternativa, se propone integrar al esquema de control un SDFSVM que realice el diagnóstico del fallo y tome las acciones necesarias para compensar la medición en sensor fallado (Fig. 2), a fin de mantener el buen desempeño del sistema de control.

El SDFSVM está constituido por un generador de residuos, una lógica de detección y localización de fallos, un conjunto de sensores virtuales, para compensar las mediciones de las variables P_T , P_{1a} y P_O , y una lógica de compensación de sensores (Fig. 3).

Un sensor físico presenta un fallo cuando el residuo, que se genera al comparar su medición con el valor de la variable estimada por el observador, sobrepasa el umbral fijo de detección; esto para garantizar que no se trate de una falsa alarma. Entonces, la lógica de detección determina un síntoma del fallo. La lógica de localización compara el síntoma en una matriz de firma de fallos, para identificar cual es el sensor fallado. La lógica de compensación de

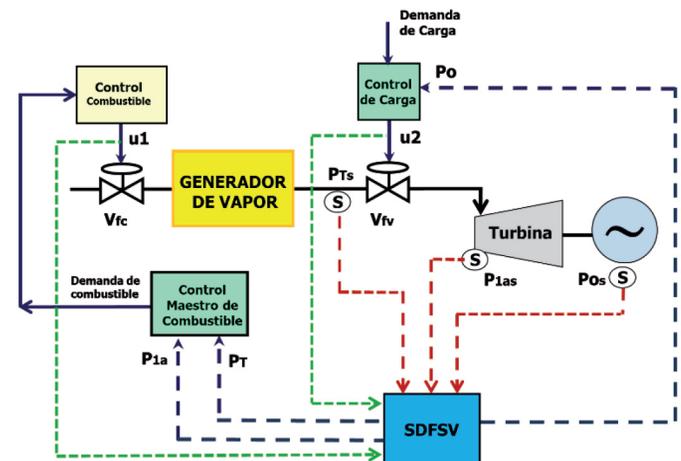


Fig. 2: SDFSVM integrado al esquema de control de Caldera en Seguimiento de la Unidad n° 4

sensores ejecuta la acción para sustituir la medición del sensor físico fallado con la medición del sensor virtual correspondiente.

En el diagrama conceptual del SDFS (Fig. 3) y representa el vector de valores reales de las variables de la unidad, y_m el vector de variables de salida medidas a través de los sensores físicos, y_v el vector de variables de salida estimadas con los sensores virtuales, u representa el vector de variables de entrada, r el vector de residuos, f el vector de fallos detectados y s el vector de síntomas que permiten localizar los sensores fallados. S representa los sensores físicos.

El generador de residuos se diseñó con base en el siguiente observador tipo Luenberger extendido, considerando la representación q-LPV dada en (7) y (8).

$$\hat{x}(t) = \sum_{i=1}^M \xi_i(\rho(x(t))) (A_i \hat{x} + B_i u + L_i (y - \hat{y})) \quad (20)$$

$$\hat{y}(t) = C \hat{x}(t) \quad (21)$$

$$r(t) = y(t) - \hat{y}(t) \quad (22)$$

Aquí, $\hat{x}(t)$ es el vector de estado estimado, $\hat{y}(t)$ es el vector de salidas estimadas y $r(t)$ es el vector de residuos. $p(x(t))$ es el vector de parámetros variables en el tiempo y $\xi_i(\rho(x(t)))$ son funciones de ponderación.

Las matrices L_i son las ganancias de los observadores en cada vértice del politopo. Estas matrices se calculan mediante el método de colocación de polos, de manera que se cumpla que las

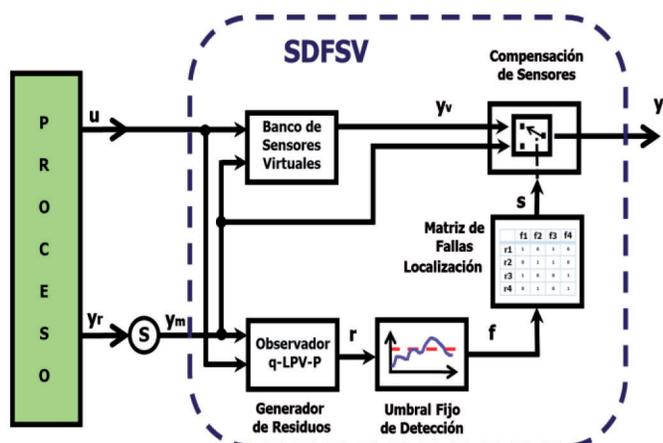


Fig. 3: Diagrama conceptual del SDFS

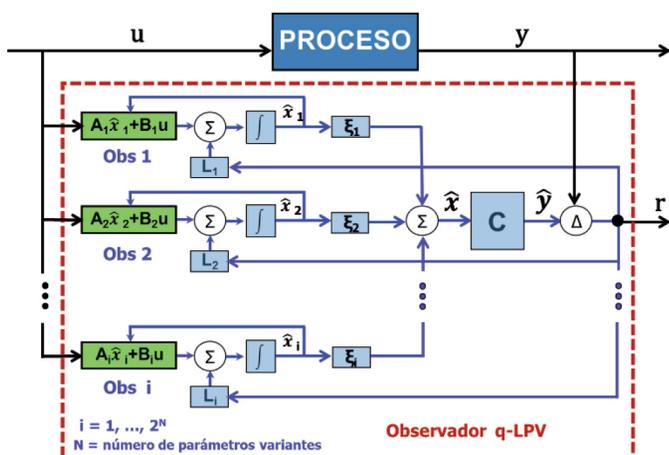


Fig. 4: Diagrama esquemático del Observador q-LPV

matrices $(A_i - L_i C)$ tengan valores propios con parte real negativa.

El criterio para colocar los polos es que la dinámica de los observadores sea más rápida que la dinámica del modelo; es decir, los valores absolutos de los valores propios de las matrices $(A_i - L_i C)$ deben ser mayores que los valores absolutos de los valores propios de las matrices A_i del modelo LPV dado en (7) y (8).

5. PRUEBAS DE EVALUACIÓN

Para la evaluación del SDFS en las condiciones más cercanas a la operación real de la Unidad n°4 se utilizó un simulador construido en la plataforma Matlab/Simulink que emula el proceso de generación de vapor de una central termoeléctrica, con base en un modelo no lineal de alto orden de veintinueve variables de estado (en adelante el simulador de referencia) [17], integrado por los módulos mostrados en la Fig. 5. Este simulador se adecuó para emular la operación de la Unidad n°4 y se empleó en la evaluación

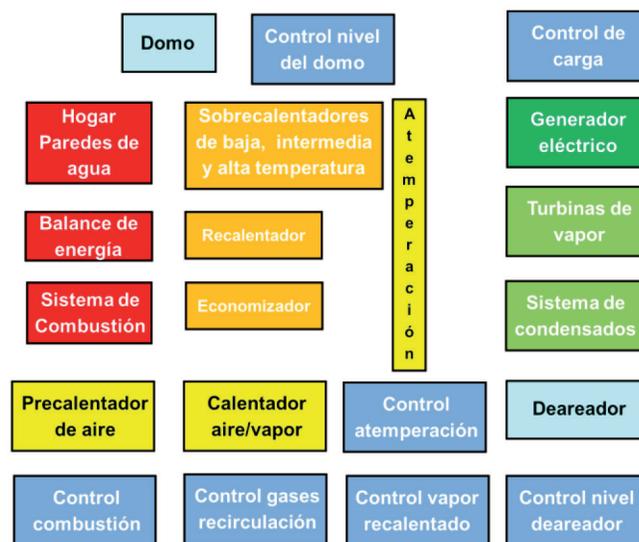


Fig. 5: Módulos del simulador de referencia para evaluación del SDFS

de los sistemas de control y en el ajuste de los controladores, durante los proyectos de modernización de los sistemas de control de los generadores de vapor de las Unidades No. 4 y No. 5 de la central, en los años 2014 y 2016 respectivamente.

Para las pruebas de validación se definieron los siguientes escenarios, considerando solamente fallos en la medición del sensor físico de P_r : a) SDFS en condiciones libre de fallos; b) Sistema de control con el sensor fallado y sin compensación del sensor virtual; c) Sistema de control con el sensor fallado y con compensación del sensor virtual.

En el escenario a) las pruebas se realizaron con diferentes demandas de carga eléctrica (baja, media y alta), modificando de forma programada la variable u_r . Para los escenarios b) y c) las pruebas al SDFS se realizaron para una demanda de carga eléctrica media, con las condiciones iniciales siguientes.

$$y_o = \begin{bmatrix} P_{1a,o} \\ P_{D,o} \\ P_{T,o} \\ P_{o,o} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 7,2 \text{ MPa} \\ 13,03 \text{ MPa} \\ 12,51 \text{ MPa} \\ 120 \text{ MW} \end{bmatrix} \quad u_o = \begin{bmatrix} u_{1,o} \\ u_{2,o} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,23 \\ 0,73 \end{bmatrix} \quad (23)$$

Los estados del observador se establecieron en condiciones iniciales de valor cero. El fallo en el sensor P_r se consideró de tipo abrupto, en forma de pulso y de un valor de -10% (-1,4 Mpa) del rango de medición de la variable P_r sobre su valor de operación. El fallo ocurre a los 1000 segundos (16,67 minutos) y desaparece a los 3000 segundos (50 minutos).

5.1. RESULTADOS

Por razones de espacio sólo se presentan los resultados para la variable P_T , por ser ésta la variable crítica en el esquema de control.

a) SDFVS en condiciones libre de fallos en sensores.

En la Fig. 6 se muestra el comportamiento de la variable u_2 (Fig.6a), la variable u_1 (Fig. 6b), la variable P_r (Fig. 6c), y el valor absoluto de su residuo (Fig. 6d). Se observa el buen desempeño del observador q-LPV dado que la variable P_r estimada converge

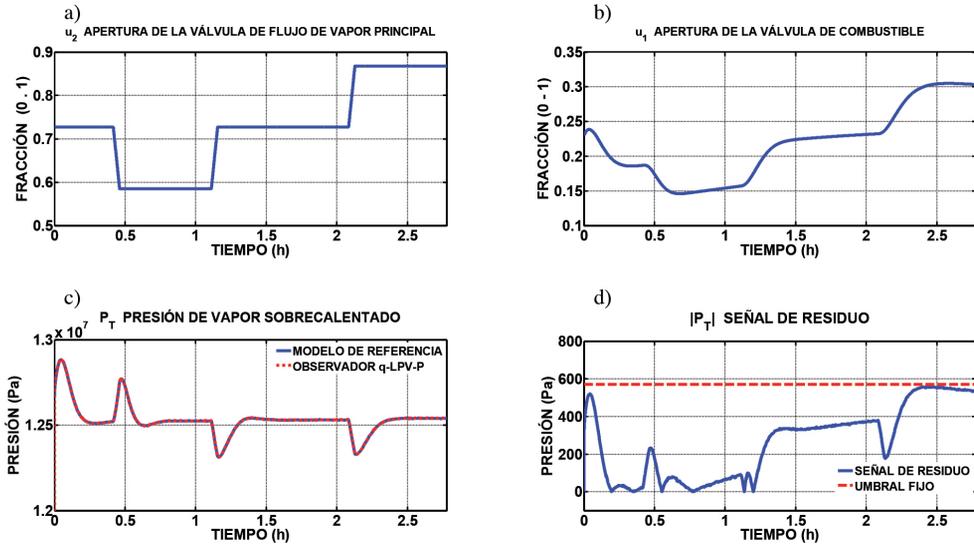


Fig. 6: Desempeño del SDFVS en condiciones libre de fallos en sensores

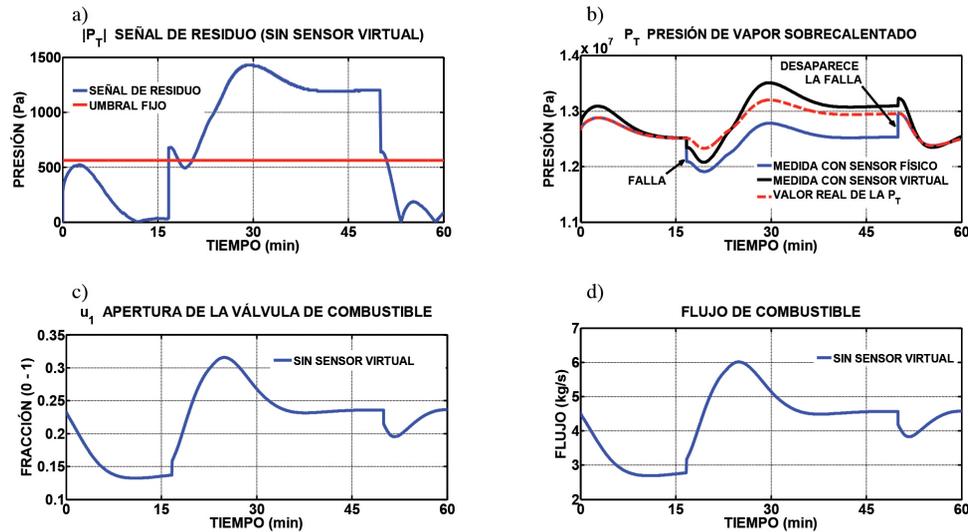


Fig. 7: Desempeño del SDFVS integrado al sistema de control, con el sensor de P_r fallado y sin compensación del sensor virtual

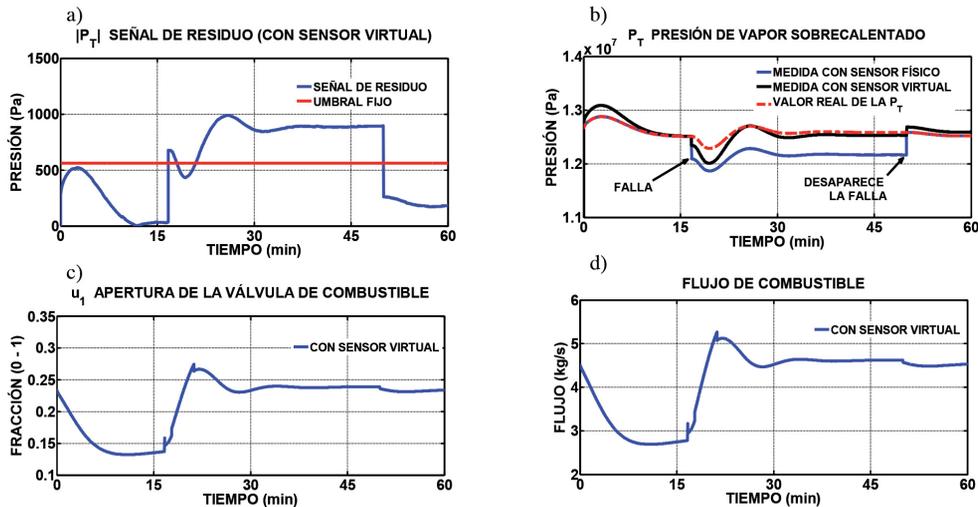


Fig. 8: Desempeño del SDFVS y del Sistema de control, con el sensor de P_r fallado y compensación del sensor virtual

al valor real de esa variable en la Unidad nº4 (líneas azul y rojo en la Fig. 6c), para cualquier demanda de carga eléctrica. Se observa que la señal de entrada u_1 se adapta a las exigencias de los cambios de u_2 , para mantener la P_T en su valor de referencia. El umbral fijo (línea color rojo en la Fig. 6d) se determinó a partir del máximo valor absoluto de la señal de residuo de P_T .

Para los propósitos de esta prueba, el sistema SDFSVM se limitó para no compensar la medición del sensor fallado. En la Fig. 7 se observa que al ocurrir el fallo en el sensor físico, la señal de residuo $|P_T|$ (línea azul en Fig. 7a) rebasa el umbral fijo (línea roja). Debido a que el sistema SDFSVM no compensa la medición de P_T , el sistema de control mantiene la variable P_T (línea color azul en la Fig. 7b) en el punto de referencia.

Sin embargo, el desempeño del sistema de control no es correcto debido a que el valor real de la P_T de la Unidad nº4 se encuentra en un valor mayor (línea color rojo de la Fig. 7b) al del punto de referencia (12,51 MPa); este valor de la P_T no es aceptable en condiciones reales para nivel de carga eléctrica considerado, ya que como se observa en la Fig. 7c el sistema de control provoca un valor mayor de la variable u_1 y por lo mismo un mayor flujo de combustible (Fig.7d). Se observa que la medición de P_T con el sensor virtual (línea color negro en la Fig. 7b) es cercana a su valor real (línea color rojo en la Fig. 7b). Al desaparecer el fallo, el sistema de control recupera su buen desempeño y las tres mediciones de P_T presentan un valor similar (Fig. 7b).

En la Fig. 8 se observa que al ocurrir el fallo en el sensor físico de medición de la P_T , la señal de residuo $|P_T|$ (línea color azul en la Fig. 8a) rebasa el umbral fijo (línea color rojo en la Fig. 8a). El sistema SDFSVM actúa compensando la medición del sensor físico con la medición del sensor virtual. Después del transitorio provocado por el fallo, el valor real de la P_T (línea color rojo en la Fig. 8b) se mantiene en el valor de referencia (12,51 MPa), cercano al valor estimado con el sensor virtual (línea color negro en la Fig. 8b). El sensor físico fallado proporciona una medición de P_T diferente al valor de referencia (línea color azul en la Fig. 8b).

El sistema de control ajusta la variable u_1 (Fig. 8c) en menor tiempo (aproximadamente en 25 s) que en el caso anterior (aproximadamente en 35 s) (Fig. 7c), con menor consumo de combustible (Fig. 8d) con respecto al caso anterior (Fig. 7d). Esta acción contribuye a mantener el buen desempeño del esquema de control.

Al desaparecer el fallo, el sistema SDFSVM deja de compensar la medición con el sensor virtual y ejecuta la acción de regresar el sensor físico a operación. El sistema de control conserva su buen desempeño al mantener el valor real de la P_T en su valor de referencia (línea color rojo en la Fig. 8b).

6. CONCLUSIONES

En este artículo se presentó el diseño del SDFSVM que permite detectar y localizar fallos, y compensar la medición de sensores fallados en el esquema de control de Caldera en Seguimiento de la Unidad nº 4. Se demostró que la implantación del sistema SDFSVM en el proceso real es factible y que contribuiría para que la Unidad nº 4 operara de manera segura y confiable en presencia de fallos, al contar con redundancia (analítica) en los sensores del esquema de control. El diseño del SDFSVM se basó en un modelo simplificado q-LPV y su validación se realizó en un simulador que emula la operación real de la Unidad nº4, en todo su rango de cargas eléctricas. Los resultados obtenidos de estas pruebas de validación demostraron la funcionalidad del SDFSVM en presencia de fallo en el sensor de P_T , logrando que esta variable permanezca en su valor de referencia y que el esquema de control contribuya a una operación estable de la unidad.

El SDFSVM favorece al buen desempeño del esquema de control en presencia de un fallo en un sensor, al compensar la medición del sensor físico fallado con la medición del sensor virtual correspondiente, garantizando así una correcta medición de cualquiera de las variables $P1a$, P_T y P_o . La implementación del umbral fijo robusteció el desempeño del SDFSVM, al no permitir que éste considerara como fallos los cambios en la variable u_2 , por condiciones de variación en la demanda de carga eléctrica a la unidad.

Como continuación de esta investigación se están realizando trabajos relacionados con los diseños de un sistema de diagnóstico de fallos en actuadores, un umbral adaptable considerando las variaciones en la demanda de carga eléctrica y un sistema de control tolerante a fallos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Comisión Federal de Electricidad (CFE). "Instrumentación, control y automatización". CFE-G0000-21. México. 1987. http://lapem.cfe.gob.mx/normas/carga_pagina.asp?pag=G0000-21.pdf.
- [2] Isermann R. "Perspectives of automatic control". Control Engineering Practice. 2011. Vol. 19, pp. 1399-1407. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2011.08.004>.
- [3] Addeh-Gelief M, Zakouk S. "Application of multi-Model fault diagnosis for an Industrial system". 21st Mediterranean Conference on Control & Automation (MED). Plataniás-Chania, Crete, Greece. 2013, DOI: <https://doi.org/10.1109/MED.2013.6608755>.
- [4] Khoshnevisan L, Momeni H R, Ashraf-Modarres A. "Implementation of an innovative simplified sliding mode observer-based robust fault detection in a drum boiler system" International Journal of Computer, Electrical, Automation, Control and Information Engineering. 2011. Vol. 5, Núm 1, pp. 42-46, 2011. <http://www.internationalconferencecenter.org/publication/12199>.
- [5] Khoshnevisan L, Momeni H, Ashraf-Modarres A. "Introduction of a robust fault detection filter model based on continuous Kalman filter for a real drum boiler system". International Journal of Modeling and Optimization, 2012. Vol. 2, Núm. 4, p. 539-543. DOI: <https://doi.org/10.7763/IJMO.2012.V2.178>.
- [6] Briat C. Linear parameter-varying and time-delay systems - analysis, observation, filtering & control., Springer-Verlag., 2015, DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-44050-6>.
- [7] De Lira S, Puig V, Quevedo J, et al. "LPV observer design for PEM fuel cell system: Application to fault detection". Journal of Power Sources. 2011. Vol. 196, p. 4298-4305. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.11.084>.
- [8] Varga A, Ossmann D. "LPV model-based robust diagnosis of flight actuator faults". Control Engineering Practice. 2014. Vol. 31, p. 135-147. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2013.11.004>.
- [9] Cheres E. "Small and medium size drum boiler models suitable for long term dynamic response". IEEE Transactions on Energy Conversion. 1990. Vol. 5, Núm. 4, pp. 686-692. DOI: <https://doi.org/10.1109/60.63140>.
- [10] De Mello F. "Boiler models for system dynamic performance studies". IEEE Transactions on Power Systems. 1991. Vol. 6, Núm 1, pp. 66-74. DOI: <https://doi.org/10.1109/59.131048>.
- [11] Zhong-Xu H, Xiao-Hong Q, Zhi Z, et al. "A dynamic non-linear simulation model of boiler turbine coordinated control systems and its application". International Conference on Electrical Engineering. China. 2005. <https://es.scribd.com/document/74548647/A-Dynamic-Non-Linear-Simulation-Model-of-Boiler-Turbine-Coordinated-Control-System-and-Its-Application-1>.
- [12] Nagy A, Mourot G, Marx B, Ragot J, et al. "Systematic multimodeling methodology applied to an activated sludge reactor model". Industry Engineering Chemistry Research. 2010. Vol. 49, Núm. 6, pp. 2790-2799. DOI: <https://doi.org/abs/10.1021/ie8017687>.
- [13] Blanke M, Kinnsert M, Lunze J, et al. Diagnosis and fault-tolerant control., Springer-Verlag. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-35653-0>.
- [14] Izadi-Zamanabadi R, Blanke M. "Structural analysis for diagnosis - The matching problem". Proceedings of the 15th Triennial World Congress. Barcelona, España, 2002. <https://doi.org/10.3182/20020721-6-ES-1901.00792>.
- [15] Izadi-Zamanabadi R, Larsen J. "A fault tolerant control supervisory system development procedure for small satellites: The AAUSAT-II case". 17th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace. 2007. <https://doi.org/10.3182/20070625-5-FR-2916.00050>.
- [16] Derdour Y, Haffaf H, Bouazza K. "Application of the structural analysis on a three axis manipulator robot". Computer Science and Engineering. 2013. Vol. 3, Núm. 2, pp. 15-23. DOI: <https://doi.org/10.5923/j.computer.20130302.01>.
- [17] Delgado M, Suárez D, Moreno J. "A PDE model of a waterwalls steam generation process". ISA Transactions. 2008. Vol. 47, pp. 374-385. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2008.07.002>.

AGRADECIMIENTOS

A la Central Termoeléctrica Gral. Francisco Villa, al Instituto de Nacional de Electricidad y Energías Limpias, y al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, por las facilidades otorgadas para la realización de este trabajo.