

# Diagnóstico de fallos en un generador de vapor BKZ-340-140-29M utilizando herramientas de lógica difusa

## Fault diagnosis in a BKZ-340-140-29M steam generator using tools of fuzzy logic

**Adrián Rodríguez-Ramos, Orestes Llanes-Santiago**

Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Facultad de Ingeniería Eléctrica, La Habana. Cuba  
Correo electrónico: [adrian.rr@electronica.cujae.edu.cu](mailto:adrian.rr@electronica.cujae.edu.cu)

Recibido: 17 de diciembre de 2014 Aceptado: 10 de abril de 2014

---

### Resumen

En este trabajo se presenta el diseño de un sistema de diagnóstico de fallos utilizando herramientas de lógica difusa para un generador de vapor BKZ-340-140-29M en una central termoeléctrica. La aplicación tiene como objetivo estudiar las ventajas que ofrece esta técnica en el desarrollo de un método de diagnóstico de fallos que sea robusto a perturbaciones externas y sensible ante fallos de pequeña magnitud. El diagnosticador se diseñó para el circuito agua – vapor del generador a partir de demostrarse su gran incidencia en la disponibilidad de los bloques de generación. Los resultados obtenidos indican la factibilidad de la propuesta.

**Palabras claves:** diagnóstico de fallos, robustez, sensibilidad, lógica difusa, generador de vapor.

### Abstract

In this work the design of a fault diagnosis system using tools of fuzzy logic for a BKZ-340-140-29M steam generator in a thermoelectric power station is presented. The application aims to study the advantages of these techniques in the development of a fault diagnostic method with the characteristic to be robust to external disturbances and sensitive to small faults. The fault diagnosis system was designed for the water – steam circuit of the steam generator by its great incidence in the correct functionality of the generation blocks. The obtained results indicate the feasibility of the proposal.

**Key words:** fault diagnosis, robustness, sensibility, fuzzy logic, steam generator.

## Introducción

Cuando un sistema presenta una desviación, que le impide funcionar según el propósito para el que fue diseñado, se dice que ha ocurrido un fallo [9]. Los fallos pueden ocasionar tanto pérdidas económicas como daños al capital humano o medio ambiente. Una visión general de las técnicas que se han desarrollado para abordar esta problemática se presentan en [13, 14] donde las mismas se clasifican en tres grandes grupos: los métodos basados en modelos cualitativos, los métodos basados en modelos cuantitativos y los métodos basados en históricos del proceso.

Existen otros autores como Sorsa [10] que prefieren agrupar estas técnicas en dos enfoques fundamentales: los métodos que emplean herramientas de estimación para determinar los parámetros de un modelo y los métodos que utilizan herramientas típicas del Reconocimiento de Patrones sobre datos históricos del proceso. El primer enfoque, utiliza herramientas matemáticas para obtener modelos que describen el funcionamiento de los procesos. Su principio básico está determinado por la generación de residuos a partir de discrepancias entre las señales medibles del proceso real y los valores obtenidos a partir de dichos modelos. Esto conlleva un conocimiento elevado de las características del proceso, de sus parámetros y de su zona de operación. Lo anterior puede resultar en ocasiones muy difícil debido a la elevada complejidad de algunos procesos industriales. Por otro lado, el enfoque basado en Reconocimiento de Patrones se subdivide en aquellos que utilizan las herramientas de la Inteligencia Artificial (IA) y los que hacen un análisis estadístico de los datos históricos. De forma general, los métodos que utilizan este enfoque son fáciles de implementar, no necesitan un modelo matemático y requieren poco conocimiento a priori de los parámetros del proceso [14]. Estas características constituyen una ventaja en sistemas muy complejos, donde las relaciones entre variables son no lineales o desconocidas y donde resulta muy difícil determinar un modelo analítico que describa la dinámica del proceso de forma eficiente.

El desarrollo de métodos de diagnóstico de fallos robustos a perturbaciones externas y sensibles ante fallos incipientes es considerado como un problema de gran importancia no solo para los investigadores que siguen esta línea de investigación sino también en las industrias donde el suceso de un fallo provocaría grandes pérdidas económicas y humanas [3, 6, 7]. Haciendo un análisis de las diferentes técnicas desarrolladas en los últimos años para labores de control y de diagnóstico de fallos se aprecia un incremento del uso de la lógica difusa [1-3]. Haciendo una evaluación de las características de esta técnica, se consideró que era ventajosa para desarrollar métodos de diagnóstico robustos a perturbaciones externas, sensibles a fallos de dimensiones pequeñas y de fácil implementación, sobre todo cuando no se cuenta con información precisa del proceso, ni modelos que incorporen los fallos como es el caso de un generador de vapor BKZ-340-140-29M.

Teniendo en cuenta lo anterior, el objetivo fundamental del presente trabajo es el diseño de un diagnosticador de fallos para el generador de vapor antes mencionado empleando herramientas de la lógica difusa.

Este trabajo está estructurado de la siguiente forma, en la sección de Materiales y Métodos se aborda primeramente la descripción general del generador de vapor BKZ-340-140-29M, luego se presenta el análisis estadístico de los fallos que han ocurrido para determinar el subsistema de interés donde mayor impacto tendría la incorporación de un diagnosticador de fallos y posteriormente se realiza la propuesta para el diseño del diagnosticador y su aplicación al generador de vapor. Finalmente se exponen los resultados obtenidos, se realiza su discusión y se presentan las conclusiones.

## Métodos y Materiales

### Descripción del generador de vapor BKZ-340-140-29M

Uno de los elementos principales de una central termoeléctrica, y además uno de los más complejos, es el generador de vapor o caldera. Los generadores de vapor acuatubulares son los utilizados en las centrales termoeléctricas debido a que permiten altas presiones a su salida y tienen una gran capacidad de generación. Un generador de vapor es un equipo capaz de transformar en energía térmica la energía contenida en un combustible mediante su combustión y transferirla al agua para producir vapor, que es usado en otros equipos o sistemas. Es un sistema multivariable, dinámico, con grandes interacciones entre las variables y parámetros que se ven afectados por múltiples perturbaciones. La generación de vapor constituye un proceso continuo en el cual las variables pueden tomar diferentes valores en un rango determinado. Es por ello que el control del mismo es vital para la seguridad de la operación y para la eficiencia del bloque generador. En la actualidad existe una gran variedad de generadores de vapor, los cuales pueden ser clasificados según el tipo de combustible, el tipo de tiro, los sistemas de apoyo, la transmisión de calor y la disposición de los fluidos. El generador de vapor tipo BKZ-340-140-29M presentan un solo domo y está diseñado para trabajar en bloques con una turbina del tipo K-100-130-3600-2T3, tiene una capacidad de 340 ton/h de vapor sobrecalentado y consta de un horno, un domo y

cuatro etapas de sobrecalentamiento. El vapor a la salida de la última etapa de sobrecalentamiento, pasa hacia la turbina de la misma unidad y retorna a las dos etapas del recalentador. (Ver Fig. 1)

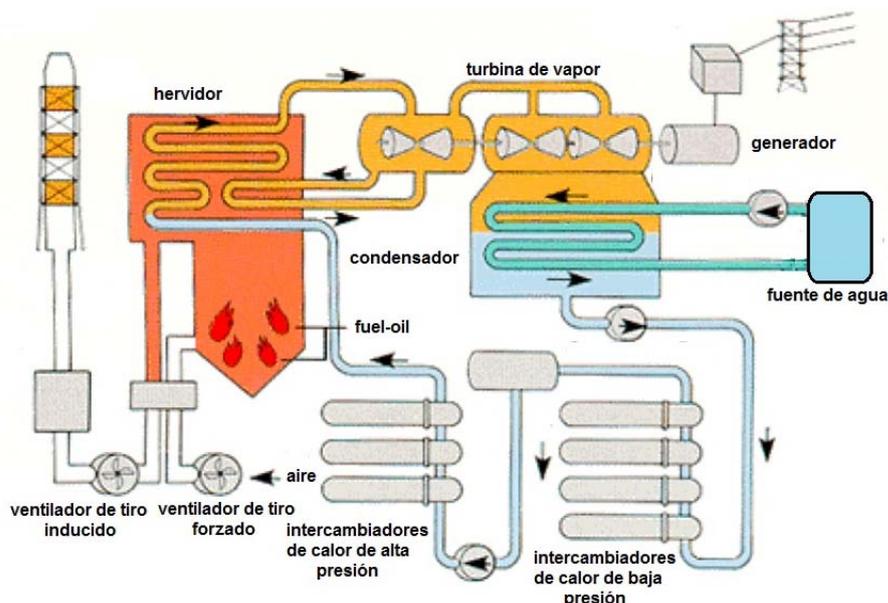


Fig. 1. Generador de vapor BKZ-340-140-29M

Esta caldera está diseñada para trabajar bajo las condiciones técnicas que se resumen en la tabla 1:

Tabla 1. Condiciones técnicas de la caldera BKZ-340-140-29M

Condiciones Técnicas	Unidades de medida
Capacidad de producción de vapor	340 t/h
Presión de vapor en el domo	160 atm
Presión en el cabezal de salida	140 atm
Temperatura del vapor sobrecalentado	545 °C
Temperatura del agua de alimentar(AA)	230 °C
Temperatura de vapor a la entrada del recalentador	340 °C
Temperatura. del vapor a la salida del recalentador	550 °C
Temperatura de los gases de salida	170 °C
Flujo de vapor recalentado	280 t/h
Presión de vapor a la entrada del recalentador	29 atm
Presión de vapor a la salida del recalentador	27 atm
Eficiencia bruta	90 %
Espacio de agua en la caldera	96.6 m <sup>3</sup>
Espacio de vapor circuito primario	35 m <sup>3</sup>
Espacio de vapor circuito secundario	40 m <sup>3</sup>

Para el generador de vapor BKZ-340-140-29M se definen 3 circuitos fundamentales que incluyen todo el equipamiento necesario para la producción, tratamiento y distribución del vapor. Los mismos son: agua-vapor, aire-gases y combustión.

### Análisis estadístico de los fallos

En esta sección se presenta el estudio estadístico realizado a partir de la información de las interrupciones ocurridas en las unidades de generación de 100 MW, durante los años 2011, 2012 y 2013. Como parte de este estudio se analizará la influencia de los sistemas que componen una unidad de generación o sea el generador de vapor, la turbina y el generador eléctrico en las interrupciones ocurridas. Este estudio permitirá determinar el sistema donde tendrá mayor impacto la incorporación de un diagnosticador.

Los pasos seguidos para el estudio fueron:

- 1- Analizar las interrupciones ocurridas en las unidades de generación.
- 2- Identificar las causas fundamentales que incidieron en las interrupciones.
- 3- Determinar el sistema más afectado.
- 4- Identificar los circuitos de mayor incidencia en las interrupciones.
- 5- Determinar los equipos tecnológicos causantes de las interrupciones.

#### **Análisis de las interrupciones ocurridas en las unidades de generación**

En la tabla 2 se presentan la cantidad de interrupciones ocurridas en los últimos 3 años para las unidades generadoras 5, 7 y 8 que son las que actualmente están en funcionamiento.

**Tabla 2.** Interrupciones en los últimos 3 años ocurridas en las unidades generadoras analizadas

<b>Unidad</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>
<b>5</b>	35	82	98
<b>7</b>	50	75	66
<b>8</b>	54	85	53
<b>Total</b>	139	242	217

#### **Identificación de las causas fundamentales que incidieron en las interrupciones**

A partir de realizar una entrevista con los técnicos de la termoeléctrica se determinó que las causas más frecuentes que incidieron en las interrupciones de las unidades generadoras son las siguientes: poro en el economizador (EKO), disparo por Autómata, falta de agua cruda, fuera de servicio (F/S) ventilador de tiro inducido (VTI), quemadores no disponibles, poro en el sobrecalentador, fuera de servicio (F/S) ventilador de tiro forzado (VTF-B), salidero estación de agua, lavado de los CAR y avería calentador de aire regenerativo (CAR-A).

#### **Determinación del sistema más afectado**

Las principales causas que incidieron en las interrupciones ocurridas en las unidades de generación 5, 7 y 8 se deben a problemas en la instrumentación y accesorios del generador de vapor por lo que este será el objeto de estudio para el diseño del diagnosticador.

#### **Identificación de los circuitos de mayor incidencia en las interrupciones**

La tabla 3 muestra las interrupciones ocurridas en los subsistemas de cada uno de los circuitos que componen al generador de vapor BKZ-340-140-29M.

**Tabla 3.** Interrupciones ocurridas en los circuitos de la caldera BKZ-340-140-29M

<b>Circuitos</b>	<b>Interrupciones</b>
<b>Agua-Vapor</b>	
Poro en el economizador EKO	57
Falta de agua cruda	17
Poro sobrecalentador	17
Salidero estación de agua	41
<b>Total</b>	<b>132</b>
<b>Aire-Gases</b>	
F/S VTI-A	12
F/S VTF-B	8
Lavado de los CAR	15
Avería CAR-A	4
<b>Total</b>	<b>39</b>
<b>Combustión</b>	
Disparos por Autómata	16
Quemadores F/S	10
<b>Total</b>	<b>26</b>

Al analizar esta tabla se obtiene que en el circuito Agua-Vapor ocurren 132 interrupciones, equivalente al 67 % del total, en el circuito Aire-Gases ocurre el 19.8 % y en el circuito de combustión el 13.2 %. Como puede apreciarse, el circuito Agua-Vapor presenta una incidencia significativamente superior que los otros dos circuitos, por lo que se decidió diseñar el diagnosticador para este circuito.

### Determinación de los equipos tecnológicos causantes de las interrupciones

Como también se muestra en la tabla 4, el circuito Agua-Vapor está afectado por cuatro causas de mal funcionamiento, de las cuales, debido a la instrumentación actualmente instalada, existe la posibilidad real de diagnosticar de forma automática dos de ellas. Esto reduce a dos la cantidad de equipos tecnológicos que se obtienen en el último paso del estudio, los cuales son: economizador y sobrecalentador donde los fallos en ellos representan el 37,6 % del total. A partir de realizar una inspección en el proceso de generación de vapor, contando además con el criterio de los expertos se determinó que los fallos a diagnosticar son los siguientes:

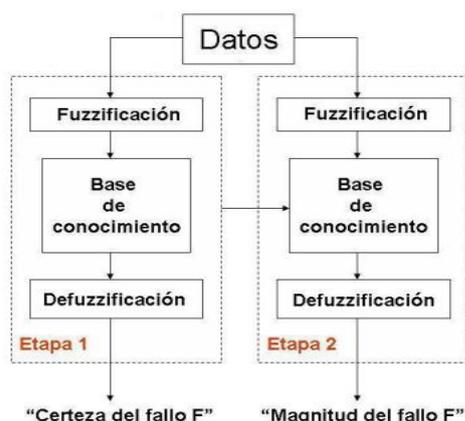
- F1:** Poro en el sobrecalentador
- F2:** Poro en el economizador
- F3:** Fallo en la apertura de la reductora
- F4:** Poro en el recalentador
- F5:** Combustión secundaria
- F6:** Infiltraciones en el horno

**Tabla 4.** Umbrales obtenidos a partir del criterio de los expertos

Muy bajo (a)	Bajo (a)	Normal	Alto (a)
-	-	$-5 \leq v1 \leq -3$	$-3 < v1 < 5$
-	$v2 < -2$	$-2 \leq v2 \leq 0$	-
$v3 \leq -10$	$-10 < v3 \leq 5$	$-5 < v3 < 10$	$v3 \geq 10$

### Descripción de la propuesta de diseño del diagnosticador

Son diversas las aplicaciones que ha tenido la lógica difusa en el campo del diagnóstico de fallos, obteniéndose resultados satisfactorios. [11, 12, 14]. Basándonos en estos trabajos previos se realiza una propuesta de diseño para diagnosticar los fallos del generador de vapor BKZ-340-140-29M. En la figura 2 se observa la estructura del diagnosticador que se propone. La misma consta de una primera etapa encargada de realizar la clasificación de los fallos, dando un valor de certeza a su salida. En esta etapa inicial, primeramente se realiza un proceso de fuzzificación en la que cada una de las variables síntomas de los fallos se convierten en variables cualitativas. Esto se realiza mediante la construcción de funciones de pertenencia trapezoidales definiendo los conjuntos difusos: Bajo, Normal, Alto, aunque en caso de ser necesario se podrán definir otros conjuntos difusos en dependencia del comportamiento de los umbrales obtenidos a partir del criterio de los expertos. Posteriormente, con una base de reglas se expresa la relación entre los síntomas que se manifiestan en las variables medidas y la ocurrencia de los fallos. Para finalizar esta primera etapa se efectúa un proceso de defuzzificación que convierte las variables cualitativas en cuantitativas expresando finalmente la certeza de la ocurrencia de un fallo determinado. Para lo anterior, se definieron primeramente las salidas correspondiendo a cada uno de los fallos analizados en cada proceso. Estas salidas están conformadas cada una por dos funciones singleton: cierto e incierto.



**Fig. 2.** Estructura del diagnosticador propuesto

La segunda etapa se encarga de estimar la magnitud de los fallos y para ello se divide en  $n$  sistemas difusos correspondientes a los  $n$  fallos analizados. Las entradas de cada uno de estos sistemas serán las variables síntomas de cada fallo en específico. La construcción de las funciones de pertenencia está basada en dividir los conjuntos difusos Bajo y Alto definidos previamente en la etapa 1 en tres subconjuntos: pequeña, media y grande y además se define un conjunto difuso normal. Luego se crea una base de reglas que establece la relación entre el comportamiento de las variables síntomas y la magnitud de los fallos. Finalmente se realiza la defuzzificación obteniéndose valores entre 0 y 3, correspondiente a las salidas, las cuales están conformadas cada una por cuatro funciones triangulares:

cero (0), pequeño (1), mediano (2) y grande (3), que permitirán dar un estimado de la magnitud de los fallos.

### Aplicación de la propuesta de diseño del diagnosticador a un generador de vapor BKZ-340-140-29M

#### Construcción de las funciones de pertenencia de las entradas. Etapa 1: Clasificación de los fallos

Primeramente se realizó un estudio de cuales podían ser las variables síntomas de los fallos a analizar. Para esto se realizaron entrevistas individuales a tecnólogos de la planta. Como resultado se obtuvo un consenso de que las variables a utilizar eran: Presión en el horno ( $v_1$ , mmH<sub>2</sub>O), variación de la potencia de generación ( $v_2$ , MW) y variación en la temperatura de la salida de los gases ( $v_3$ , °C).

La variable  $v_3$  merece una explicación más detallada. Como es típico en los generadores del tipo BKZ-340-140-29M, a la salida del economizador se encuentran ubicados dos calentadores de aire regenerativo (CAR). El comportamiento de la temperatura de los gases a la salida de estos equipos está relacionado con el estado del economizador, ya que la aparición de poros en el mismo provoca una variación brusca en el comportamiento de la temperatura de los gases de salida. Incorporar el análisis de la temperatura de ambos CAR en el diseño del diagnosticador trae como consecuencia un aumento de la complejidad del mismo. Sin embargo, para diagnosticar el estado del economizador lo que hace falta es vigilar el máximo valor de variación de las temperaturas de ambos CAR, por lo que se implementa un mecanismo de pre-procesamiento de ambos valores para solamente trabajar con el valor que representa la mayor variación de temperatura, el cual será  $v_3$ . Además de las variables síntomas ( $v_1$ ,  $v_2$  y  $v_3$ ), se monitoriza una cuarta variable ( $v_4$ ). Esta variable corresponde a la variación del flujo de petróleo, que tiene la función de "interruptor" del diagnosticador. O sea, los síntomas antes expuestos tienen sentido solamente si la unidad de generación se encuentra en estado estable. Esto es, si no está variando sus parámetros producto a manipulaciones. Si esta variable no se encuentra en el rango adecuado provocará la desconexión del diagnosticador.

Para la construcción de las funciones de pertenencia de las variables de entrada es necesario definir los umbrales que delimitan los diferentes estados del comportamiento de estas variables. Debido a que no se contaba con información histórica del comportamiento de las variables para cada uno de los estados de funcionamiento de interés, se consultaron diferentes expertos en este proceso para determinar los umbrales de los otros estados que se definen. Como resultado de este procedimiento se obtuvieron los umbrales que se muestran en la tabla 4. En el caso de la variable  $v_4$  se definió un conjunto llamado rango permitido considerando que la variación de esta variable debe mantenerse según los expertos entre  $\pm 0.2$ .

#### Construcción de la base de reglas. Etapa 1: Clasificación de los fallos

La base de reglas expresa la relación que existe entre el comportamiento de las variables síntomas y los principales fallos que afectan a este generador de vapor, teniendo en cuenta además que la variable  $v_3$  se encuentre en el rango permitido. Como se mencionó anteriormente para lograr esto se siguió el criterio de los expertos de la planta. Las reglas mostradas a continuación son del tipo *Mamdani* debido a que las salidas no van a ser funciones que dependen de las entradas como son las reglas tipo Sugeno sino que van a ser conjuntos difusos.

If  $v_4$  is rango permitido and  $v_1$  is  $A^1_1$  and  $v_2$  is  $A^2_2$  and ... and  $v_n$  is  $A^j_n$  Then Fallo  $B_m$

Donde:

$n$ : es el número de variables de entrada o variables síntomas. En nuestro caso  $n=3$  ( $v_1$ ,  $v_2$  y  $v_3$ )

$j$ : es el número de conjuntos difusos definidos para cada variable de entrada. En nuestro caso  $j=3$  (baja, normal y alta). Para el caso de  $v_3$  se define otro conjunto difuso (muy baja).

$m$ : es el número de fallos analizados En nuestro caso  $m=6$  (F1, F2, F3, F4, F5 y F6)

La tabla 5 resume la identificación del estado de las variables afectadas para cada uno de los fallos analizados.

**Tabla 5.** Estado de las variables afectadas para cada uno de los fallos analizados

FALLO	V1	V2	V3
F1	Alta (+)	Baja (-)	Normal (0)
F2	Alta (+)	Normal (0)	Muy baja (- -)
F3	Normal (0)	Baja (-)	Normal (0)
F4	Alta (+)	Normal (0)	Normal (0)
F5	Alta (+)	Normal (0)	Alta (+)
F6	Alta (+)	Normal (0)	Baja (-)

### **Etapa 1: Construcción de las funciones de pertenencia de las salidas. Etapa 1: Clasificación de los fallos**

Para este diagnosticador se tienen 7 salidas, 6 corresponden a los fallos analizados y cada una va a estar formada por dos funciones singleton: cierto e incierto. Existe otra salida que se corresponde al estado del diagnosticador, la cual depende de la variación del flujo de petróleo (variable v4). Si v4 está fuera del rango permitido el diagnosticador se desconecta. Esta última salida también está conformada por dos funciones singleton: encendido y apagado.

### **Construcción de las funciones de pertenencia de las entradas. Etapa 2: Magnitud de los fallos**

La construcción de las funciones de pertenencia de las variables de entrada de la etapa 2, que en este caso son los coeficientes de magnitud de las variables síntomas de cada fallo se realizó a partir de las funciones ya definidas en la etapa 1. Para esto se dividió el rango de cada variable síntoma entre sus respectivos valores de estado estacionario y se obtuvo un rango de coeficientes de magnitud para cada variable analizada. Sólo queda aclarar que como se tenía un rango de valores en operación normal de las variables síntomas y no un valor de estado estacionario, se tomó el valor medio del rango de cada una de estas variables. Además de las entradas antes mencionadas se tiene otra entrada denominada estado de fallo que se corresponde con la salida del estado de cada uno de los fallos de la etapa 1.

### **Construcción de la base de reglas. Etapa 2: Magnitud de los fallos**

Las reglas de cada uno de los diagnosticadores de la magnitud de los fallos también son del tipo *Mamdani* y se expresan de la siguiente manera:

- If estado de fallo is ON and cm (variable síntoma 1) is pequeña and...and cm (variable síntoma n) is pequeña Then magnitud fallo m is pequeño.
- If estado de fallo is ON and cm (variable síntoma 1) is medio and....and cm (variable síntoma n) is medio Then magnitud fallo m is mediano.
- If estado de fallo is ON and cm (variable síntoma 1) is grande and....and cm (variable síntoma n) is grande Then magnitud fallo m is grande.
- If estado de fallo is not ON Then magnitud fallo m is cero.

Donde:

**n** es el número de las variables síntomas de cada fallo.

**m** es el número de fallos analizados.

Como se observa, las tres primeras reglas expresan una relación entre el comportamiento de los coeficientes de magnitud de cada variable y la magnitud de los fallos teniendo en cuenta que se haya diagnosticado algún fallo como indica la variable estado de fallo. La última regla expresa que si no se ha diagnosticado algún fallo entonces la salida es cero.

### **Construcción de las funciones de pertenencia de las salidas. Etapa 2: Magnitud de los fallos**

Las salidas de los estimadores de la magnitud de los fallos van a estar formadas cada una por cuatro funciones triangulares: cero, pequeño, mediano y grande donde las tres últimas funciones denotan la posible magnitud del fallo diagnosticado y la función cero se define para cuando no se haya diagnosticado ningún fallo.

## **Resultados y Discusión**

A continuación se presentan los resultados obtenidos de la aplicación de la metodología propuesta al generador de vapor BKZ-340-140-29M de una central termoeléctrica utilizando los datos fuera de línea. Para validar esta metodología se cuenta con dos conjuntos de datos pertenecientes a la operación normal del proceso y a la ocurrencia de un fallo por poro en el sobre calentador (fallo 1). Como en este caso se dispone de un proceso real, ya los datos están sometidos a un nivel de ruido, lo que permite realizar un análisis de la robustez del diagnosticador. La tabla 6 muestra los resultados para estos dos conjuntos de datos analizados.

**Tabla 6.** Certeza de cada fallo analizado con datos en operación normal y del fallo 1

Datos	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Oper.Normal	14.1%	0%	14.1%	100%	0%	0%
Fallo 1	100%	0%	0%	100%	0%	0%

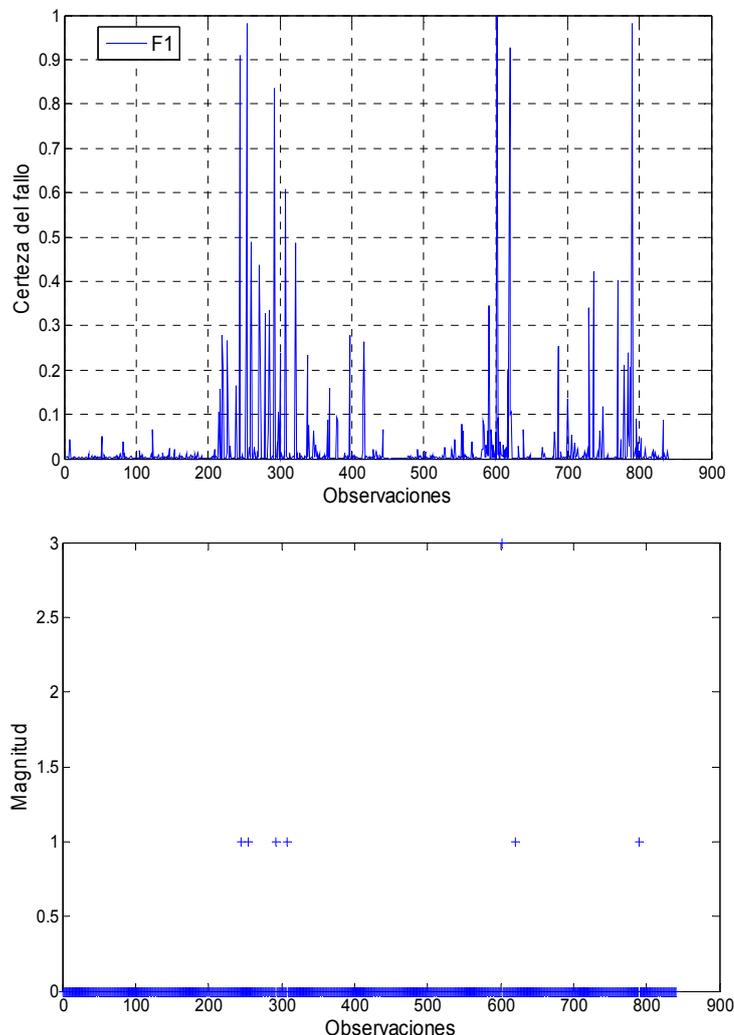
Como se aprecia en la segunda fila de la tabla, cuando se analizaron los datos del el generador de vapor en funcionamiento normal el diagnosticador reporta un fallo por poro en el recalentador (F4), lo que

estaría indicando una posible falsa alarma, sin embargo cuando estos resultados fueron analizados con los expertos, estos confirmaron la existencia del fallo el cual fue detectado, cuando su influencia se hizo más significativa y no en el momento en que fueron tomados los datos. En la tercera fila de la tabla correspondiente a los datos del fallo 1, además de estar presente el fallo 1, continua afectando el fallo 4 porque como se explicó anteriormente se desconocía de la existencia del mismo.

Los por cientos de certeza de los fallos diagnosticados son elevados a diferencia de los falsos fallos que reflejan muy bajas certezas, demostrando así la robustez que posee el diagnosticador propuesto para este proceso

### Análisis de la sensibilidad

Para poder realizar un análisis de la sensibilidad en el diagnóstico se seleccionó el fallo 1 que es uno de los fallos generado por poros, en este caso en el sobre calentador. La selección de este fallo se debe a que según los expertos los fallos de este tipo pueden ser detectados por ellos sólo cuando el poro ya tiene un tamaño considerable. Como la salida del diagnosticador permite no sólo decir si hay fallo o no, sino con que certeza ocurre el fallo, es posible hacer el diagnóstico en el momento en que el poro tiene un pequeño tamaño. Además la etapa 2 serviría de apoyo a este análisis ya que dará un estimado de la magnitud de los fallos. La figura 3 refleja el comportamiento de la salida del diagnosticador para el fallo 1 y las magnitudes estimadas en cada momento en que la ocurrencia del fallo 1 tenía una certeza considerable.



**Fig. 3.** Salida del diagnosticador para el fallo 1 y su magnitud estimada para cada momento.

### Implementación del diagnosticador

Para la incorporación en línea del diagnosticador se diseñó un interfaz visual de uso sencillo para facilitar el trabajo de los operadores y técnicos de la planta. Las variables primarias monitoreadas (flujo de petróleo, variación de la temperatura de salida de los gases, la variación de la potencia de generación y la presión del horno), son obtenidas desde una réplica de la base de datos del SCADA con un período de un minuto. La figura 4 muestra una vista general de la arquitectura del prototipo del diagnosticador. La

aplicación interfaz, toma estos datos para mostrar un sinóptico, donde se incluyen las tendencias de las variables primarias, un listado de los eventos del sistema y el estado del generador donde se incluye el valor de certeza de cada fallo analizado.

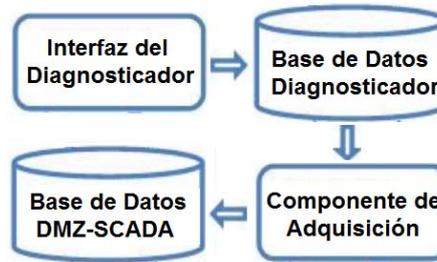


Fig. 4. Arquitectura del prototipo del Diagnóstico

El principal resultado de este trabajo lo constituye la factibilidad del diseño del sistema de diagnóstico de fallos basada en lógica difusa para lograr robustez ante perturbaciones externas y sensibilidad a fallos incipientes. Debe destacarse principalmente esta última característica del diagnóstico debido a que fue capaz de detectar y aislar el fallo F4 que los expertos no identificaron desde un primer momento por ser de pequeña magnitud.

Es necesario destacar que en procesos muy complejos el conocimiento de los expertos es fundamental y que la lógica difusa ayuda a incorporar ese conocimiento de expertos en las soluciones, aspecto que fue fundamental para llevar a cabo esta aplicación.

## Conclusiones

El principal resultado de este trabajo lo constituye la factibilidad del diseño del sistema de diagnóstico de fallos basada en lógica difusa para lograr robustez ante perturbaciones externas y sensibilidad a fallos incipientes. Debe destacarse principalmente esta última característica del diagnóstico debido a que fue capaz de detectar y aislar el fallo F4 que los expertos no identificaron desde un primer momento por ser de pequeña magnitud.

Es necesario destacar que en procesos muy complejos el conocimiento de los expertos es fundamental y que la lógica difusa ayuda a incorporar ese conocimiento de expertos en las soluciones, aspecto que fue fundamental para llevar a cabo esta aplicación.

## Referencias

1. Azadeh, A. y Ebrahimip, V. "A fuzzy inference system for pump failure diagnosis to improve maintenance process: The case of a petrochemical industry". *Expert Systems with Applications*. 2010, vol. 37, p. 627-639. ISSN 0957-4174.
2. Camacho, O., Padilla, D. y Gouveia, J. L. "Fault diagnosis based on multivariate statistical techniques". *Rev. Tec. Ing. Univ. Zulia*. 2009, vol. 30, p. 253-262. ISSN 0254-0770.
3. Chen, J., Roberts, C. y Wes Ton, P. "Fault detection and diagnosis for railway track circuits using neuro-fuzzy systems". *Control Engineering Practice*. 2010, vol. 16, p. 585-596. ISSN 0967-0661.
4. Chen, J. Y. y Chang, C. T. "Fuzzy diagnosis method for control systems with coupled feed forward and feedback loops". *Chemical Engineering Science*. 2009, vol. 61, p. 3105 – 3128. ISSN 0009-2509.
5. Dash, S., Rengaswamy, R. y Venkatasubramanian, V. "Fuzzy-logic based trend classification for fault diagnosis of chemical processes". *Computers and Chemical Engineering*. 2002, vol. 27, p. 347-362. ISSN 0098-1354.
6. De Migue, L. J. y Blázquez, L. F. "Fuzzy logic-based decision-making for fault diagnosis in a dc motor". *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2005, vol. 18, p. 423-450. ISSN 0952-1976.
7. Diao, Y. y Passino, K. M. "Fault diagnosis for a turbine engine". *Control Engineering Practice*. 2003, vol. 12, p. 1151 – 1165. ISSN 0967-0661.
8. Kong, F. y Chen, R. "A combined method for triplex pump fault diagnosis based on wavelet transform fuzzy logic and neuro-networks". *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2004, vol. 18, p. 161-168. ISSN 0888-3270.
9. Simani, S., Fantuzzi, C. y Patton, R. J. "Model-based fault diagnosis in dynamic systems using identification techniques". *Control Engineering Practice*. 2009, vol. 16, p. 769-786. ISSN 0967-0661.
10. Sorsa, T. y Koivo, H. "Application of artificial neural networks in process fault diagnosis". *Automatic*. 1993, vol. 21, p. 815-825. ISSN 0005-1098.

11. Tran, V. T. "Fault diagnosis of induction motor based on decision trees and adaptive neuro fuzzy inference". *Expert Systems with Applications*. 2011, vol. 36, p. 1840 – 1849. ISSN 0957-4174.
12. Venkatasubramanian, V., Rengaswamy, R., Yin, K., *et al.* "A review of process fault detection and diagnosis. Part I: Qualitative models and search strategies". *Computers and Chemical Engineering*. 2002, vol. 27, p. 293 – 311. ISSN 0098-1354.
13. Venkatasubramanian, V., Rengaswamy, R., Yin, K., *et al.* "A review of process fault detection and diagnosis. Part ii: Qualitative models and search strategies". *Computers and Chemical Engineering*. 2002, vol. 27, p. 313 – 326. ISSN 0098-1354.
14. Wang, J. y Hu, H. "Vibration-based fault diagnosis of pump using fuzzy technique". *Measurement*. 2009, vol. 39, p. 176 – 185. ISSN 0263-2241.