

## Sistema para diagnóstico de fallas en transformadores a través de lógica difusa

Madelín Lima Álvarez  
 Ovidio Ramírez Fiallo  
 Sergio J. Fernández García  
 Rómulo José Pérez Barrios

Recibido: Septiembre del 2003  
 Aprobado: Noviembre del 2003

### Resumen / Abstract

Se expone un sistema para diagnóstico de fallas en transformadores a través de mediciones cromatográficas de los gases disueltos en el aceite y su procesamiento utilizando la lógica difusa, herramienta eficaz de la inteligencia artificial, como método para el diagnóstico. En este caso se escogió de entre todos los modelos cromatográficos existentes para el diagnóstico, el de la norma IEC 599, por ser en la actualidad el de mayor validación experimental. El sistema tiene en cuenta las tres relaciones fundamentales y las tres relaciones complementarias entre los gases disueltos en el aceite, con vistas a la definición del tipo de falla. También considera la razón del incremento de producción de los gases, para la detección de una anomalía en el funcionamiento del equipo o de una agravante en el desarrollo de la falla. Por último, se incluye una serie de situaciones en las que no existe una falla totalmente definida por la clasificación tradicional, emitiéndose un diagnóstico más generalizado.

Palabras clave: *Diagnóstico, transformadores, cromatografía, análisis de gases*

*The following work deals with the presentation of a system for the diagnosis of failures in transformers, through chromatographic measures of the gases dissolved in oil and its process of results using the fuzzy logic, an efficient tool of the artificial intelligence, as method for the diagnosis. In this case the chromatographic model used was chosen from the existent standard IEC 599, for being at present the one with more experimental validation. The system takes into consideration the three fundamental and complementary relationships among the gases dissolved in the oil, in order to define the type of failure. It also concerns about the increase of gases, for detecting problems in the operation of equipment or of further difficulties in the development of the failure. Finally, a series of situations where failures not totally defined in the traditional classification are included providing a wider and more spread diagnosis.*

*Key words: Diagnostic, transformers, chromatographic, gas analysis*

### INTRODUCCIÓN

Un veloz desarrollo de la computación y el incremento del uso de técnicas cuantitativas, han llevado al hombre a tratar de darle solución a todo tipo de sistemas, incluyendo sistemas económicos, sociales, biológicos, etc. Estos intentos no han dado resultados satisfactorios, debido a que mientras más aumenta la complejidad de un sistema, la capacidad de hacer

sentencias precisas sobre su comportamiento, disminuye. La utilización de técnicas de inteligencia artificial y entre ellas, la teoría de lógica fuzzy, ha reportado resultados importantes en el tratamiento de estos tipos de sistemas.

Sin duda alguna, la presencia del carácter borroso en el proceso del pensamiento humano no es la lógica

tradicional bievaluada, ni aún la multievaluada, sino una lógica de verdades y conectivos fuzzy, así como reglas de inferencia. Debido a esto se puede plantear que la lógica fuzzy o difusa, es quien representa, un papel básico en lo que es una de las facetas más importantes del pensamiento humano: la habilidad de resumir información, es decir, extraer de las colecciones de datos que inciden sobre el cerebro humano, aquellas y solo aquellas subcolecciones, que sean importantes para la realización de una tarea encomendada por lo que esta metodología es muy efectiva en procesos de toma de decisión, donde las fuentes asequibles de información son imprecisas, interpretadas subjetivamente o inciertas como es el caso de los sistemas expertos. En el caso a tratar se utilizará este tipo de técnica para darle solución a la detección y localización de las fallas que se presentan en los transformadores de fuerza sobre la base del diagnóstico de los gases disueltos en el aceite que lo conforman.

Los transformadores son partes vitales para el funcionamiento de una estación eléctrica, por los que es necesario minimizar las causas de sus roturas o salidas de servicio. Sobre la base de eso, se necesitan cada vez más técnicas capaces de detectar los posibles fallos antes de que estos se manifiesten de forma severa provocando reparaciones costosas.<sup>1</sup> El análisis de los gases disueltos en el aceite, ha tenido un amplio reconocimiento a escala mundial como un método efectivo para la detección de fallas incipientes en los transformadores. Sin embargo, diferentes métodos y criterios han sido desarrollados en la actualidad, existiendo discrepancias en las metodologías propuestas y los resultados que brindan. Cada una de estas aproximaciones presenta limitaciones y ventajas unas con respecto a las otras. Por tanto, se puede asegurar que el problema aún presenta un gran margen de incertidumbre y que la experiencia, representa un papel fundamental en su solución, lo que implica que la utilización de técnicas de inteligencia artificial, es una vía importante para tratar de eliminar esta incertidumbre y obtener un diagnóstico acertado.

El objetivo fundamental del presente trabajo es mostrar los resultados obtenidos en la construcción de un sistema para el diagnóstico de transformadores, basado en el análisis de gases disueltos en el aceite, que utiliza la lógica difusa como arma fundamental, en busca de una máxima exactitud de respuesta. Este tiene como antecedente, el sistema experto<sup>2,3</sup> el cual en este caso se actualiza, ya que utiliza una norma más reciente

En el sistema se utiliza el método de diagnóstico basado en el análisis de los gases disueltos en el aceite, que constituye una de las normas más reconocidas a escala mundial IEC-599,<sup>4</sup> y la que cuenta en la actualidad con una mayor validación desde el punto de vista experimental.

## MÉTODO DE DIAGNÓSTICO

### Descripción del método

El método utilizado, como la mayoría de los existentes a escala mundial, se basa en la medición de los siguientes gases: hidrógeno, metano, etano, etileno, acetileno, monóxido de carbono y dióxido de carbono, pues sus concentraciones disueltas pueden variar con la severidad y naturaleza de diferentes fallas. En la tabla 1,<sup>5</sup> se muestran como ejemplo algunos de los límites de sensibilidad establecidos, los cuales definen los valores mínimos a considerar en el sistema.

Tabla 1 Límites de sensibilidad de los gases		
Gas	Notación química	Límites de sensibilidad (S)
Hidrógeno	H <sub>2</sub>	5 ppm
Oxígeno	O <sub>2</sub>	50 ppm
Metano	CH <sub>4</sub>	1 ppm
Dióxido de Carbono	CO <sub>2</sub>	25 ppm

Los valores de concentraciones por debajo de los límites de detección S que aparecen en la tabla 1, deben ser sustituidos por los valores que aparecen en dicha tabla.

Un segundo filtro de los valores medidos es el de los valores normales de las concentraciones de gases, estos están definidos en la referencia 2 con un 90 % de probabilidad de que no exista falla. En la tabla 2, se muestran como ejemplo, estos valores para transformadores no equipados con cambiatap bajo carga o con uno en un tanque aparte del principal, que es el caso más frecuente.

El modelo de diagnóstico empleado en la mayoría de estos métodos, se basa en relaciones específicas entre la concentraciones de los gases. En este caso,<sup>4</sup> están normalizadas las relaciones que aparecen en la tabla 3, donde se dan como ejemplo algunos de los tipos de fallas y comportamiento de estas.

Tipo	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	CH <sub>4</sub>
Sin OLTC	3-50	60-150	60-280	540-900	51001-3 000	50-90	40-110

donde:

OLTC: Cambiador de derivaciones bajo carga.

Solapamiento de las zonas

Puede ocurrir solapamiento por ejemplo entre las fallas D1 y D2, lo que significa que en algunos casos debe ser dada una distribución dual de D1 o D2.

Algunas combinaciones de las relaciones gaseosas, que caen fuera de los límites definidos en la tabla 3, pueden ser consideradas como una mezcla de fallas, o nuevas fallas, las cuales se combinan con un alto nivel de gases.

En tales casos, la tabla 3 no puede brindar un diagnóstico, y es necesario determinar cuál característica de falla es la más cercana. La tabla 4,<sup>4</sup> es utilizada entonces, para obtener una distinción entre (PD), (D) y fallas (T), como un diagnóstico burdo.

Otro factor fundamental utilizado para determinar la intensidad del fenómeno detectado es el cálculo del rango de producción de gases en mililitros /día, según lo que se evalúa a través de la expresión (1).

Caso	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>
PD		<0,2	
D	>0,2		
T	<0,2		

$$\text{Rango en mL / d} = \frac{(y_2 - y_1) m}{r (d_2 - d_1)} \quad \dots(1)$$

donde:

$y_1$  = Análisis de referencia.

$y_2$  = Último análisis.

$(y_2 - y_1)$  = Incremento en  $\mu\text{L/L}$  de aceite.

$m$  = Masa de aceite en kg.

$\rho$  = Densidad en  $\text{kg/m}^3$ .

$d_1$  = Fecha para  $y_1$ .

$d_2$  = Fecha para  $y_2$ .

Los rangos de producción de gases normales apropiados para transformadores de potencia en mililitros por día (mL/día), excepto para el caso de transformadores que respiran a la atmósfera, según se muestra en la tabla 5.

Caso	Falla característica	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>
		C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	CO	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>
PD	Descargas parciales	<0,01	<0,1	<0,2			
D1	Descargas de baja energía	>1	0,1-0,5	>1			
T3	Falla térmica $T > 700$ °C	<0,2	>1	>4			
P	Falla del papel				<3		
O	Oxidación del aceite					<0,3	
C	Contaminación con aceite OLTC						$\geq 2 \leq 3$

Tabla 5  
Rangos de producción de gases para transformadores de potencia en mL/día

Gas	Notación	Niveles
Hidrógeno	H <sub>2</sub>	<5
Metano	CH <sub>4</sub>	<2
Etano	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	<2
Etileno	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	<2
Acetileno	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	<0,1
Monóxido de Carbono	CO	<50
Dióxido de Carbono	CO <sub>2</sub>	<200

## SISTEMA EXPERTO

Diseño del sistema

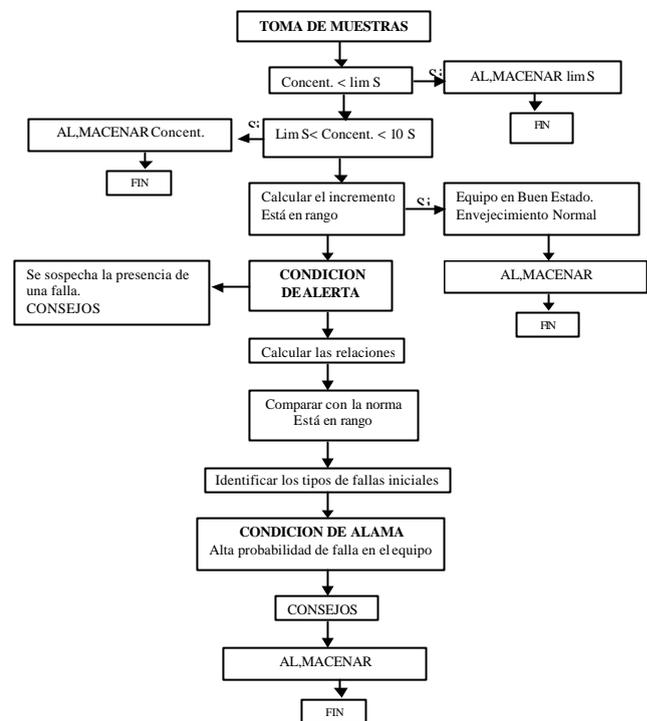
Un sistema experto con lógica difusa se basó en 4 componentes fundamentales según la referencia 1: La base del conocimiento, el motor de inferencia, la base de datos y la interfase hombre máquina.

La base del conocimiento es la colección de la experiencia del especialista la cual contiene las relaciones fundamentales que permiten tomar las decisiones pertinentes. Las reglas utilizadas en este sistema son enunciadas en la forma de reglas IF-THEN y la veracidad del mismo, estará dada por la calidad con que dichas reglas son formuladas. El sistema experto para el diagnóstico del transformador está basado en lo que establece la norma IEC-599.<sup>3</sup>

El motor de inferencia es el encargado de controlar la estrategia de razonamiento del sistema. El mismo comprende las relaciones difusas utilizadas en la base del conocimiento así como todos los algoritmos que rigen la secuencia de trabajo del sistema experto en su totalidad. En la base de datos se almacenan las variables utilizadas, en este caso la concentración de los gases tanto del estado actual del sistema como los datos históricos del mismo. Para el diseño de las interfases se crearon ventanas interactivas con el usuario, para la entrada y la salida de la información.

A partir de un análisis detallado de la Norma IEC 599, se desarrolló el diagrama de flujo para la

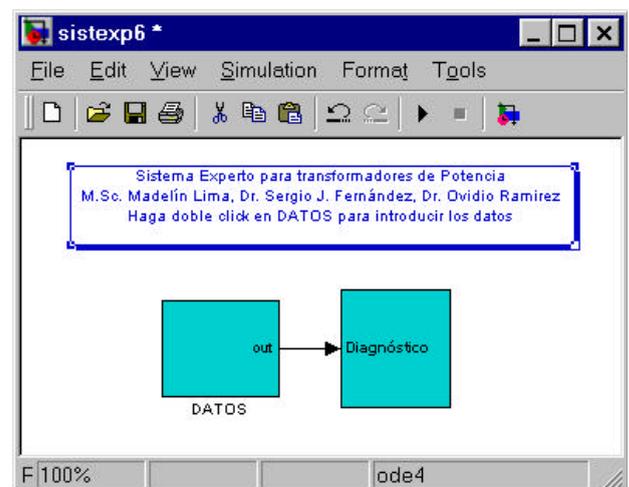
programación del sistemas experto. En la figura 1 se presenta una simplificación del mismo.



1

Diagrama de flujo.

La programación del sistema se realizó utilizando el lenguaje de simulación para sistemas dinámicos, SIMULINK, del Matlab®. En la ventana principal se encuentran los dos subsistemas principales, DATOS y Diagnóstico (figura 2), los cuales representan la entrada y la salida del sistema experto.

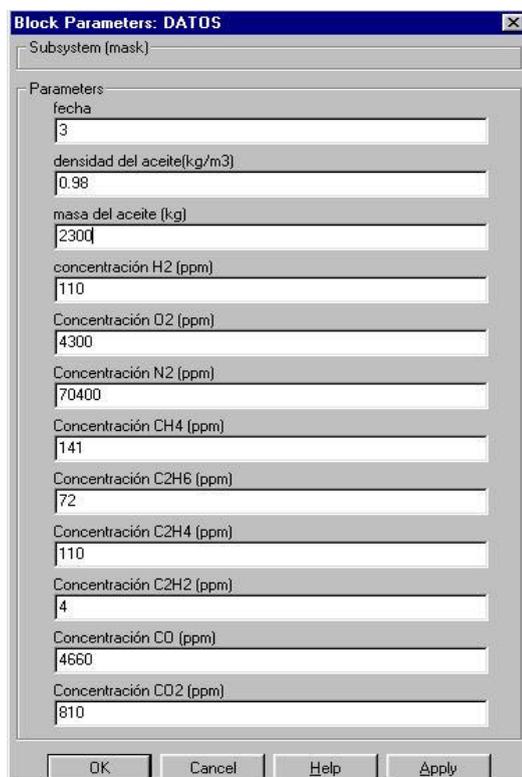


Sistema experto para transformadores de potencia.

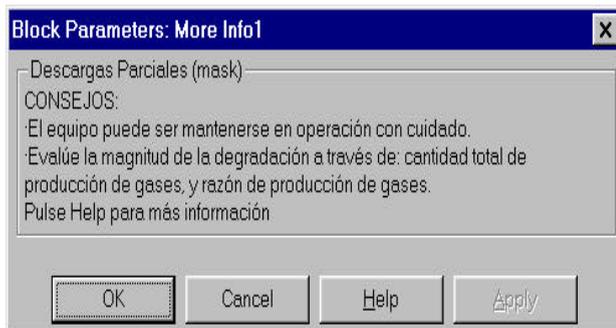
2

El subsistema DATOS constituye el motor de inferencia del sistema experto, al hacer doble clic sobre este se abre la ventana inicial en la cual el usuario entra los valores de concentración de los gases (variables de entrada del sistema experto) obtenidos a partir de realizar el análisis cromatográfico de gases disueltos en el aceite (figura 3).

El subsistema Diagnóstico es el encargado de brindar la información del estado del equipo de forma tal que sea comprensible por el usuario. Para ello se crearon una serie de ventanas en las cuales en dependencia del valor en la salida *out* del subsistema DATOS se activará una ventana informando sobre el estado del equipo correspondiente a la condición analizada (figura 4).

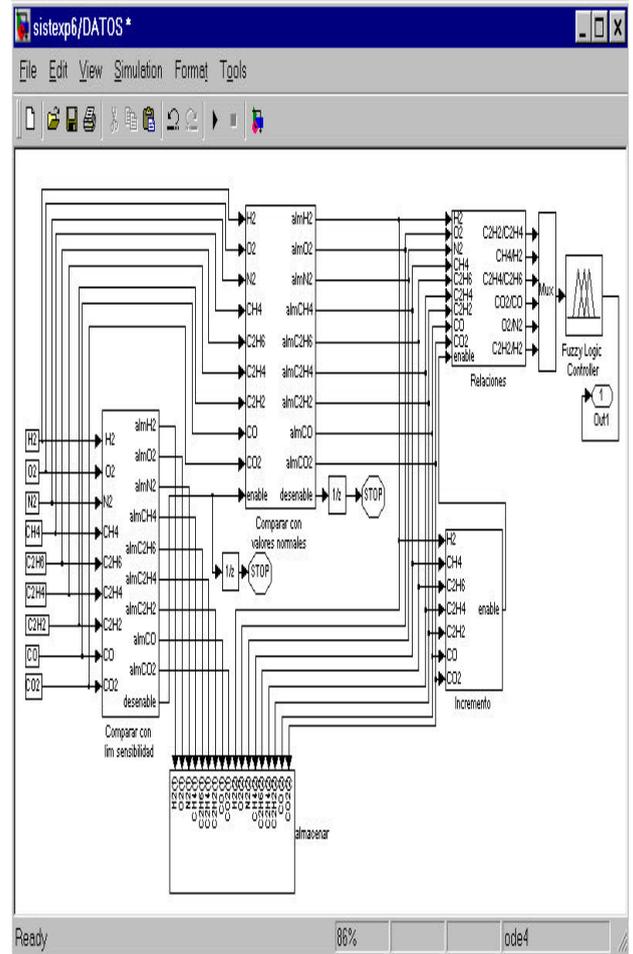


Determinación del tipo de falla en los casos de incertidumbre. 3



Ventana de entrada de datos. 4

El subsistema DATOS está compuesto por varios subsistemas en los cuales se almacena la información, se compara con los límites establecidos, se calculan las relaciones y el incremento de producción de gases por día y se realiza el proceso de inferencia difuso (figura 5).



Bloques del subsistema DATOS.

5

Para la programación del proceso de inferencia difuso se utilizó el Toolbox Fuzzy del Matlab®. Primeramente se realizó una definición del sistema, donde se decidió qué cantidad de variables de entrada y de salida conforman el mismo y dentro de qué intervalos van a variar estas.<sup>1,6,7</sup>

Las variables de entrada del sistema difuso quedaron definidas a partir del estudio de la norma,<sup>4</sup> escogiéndose como variables de entrada las relaciones entre las concentraciones de los gases:  $CH_4/H_2$ ,  $C_2H_2/C_2H_4$ ,  $C_2H_4/C_2H_6$ ,  $CO_2/CO$ ,  $O_2/N_2$ ,  $C_2H_2/H_2$  y como salida la variable diagnóstico (figura 6).

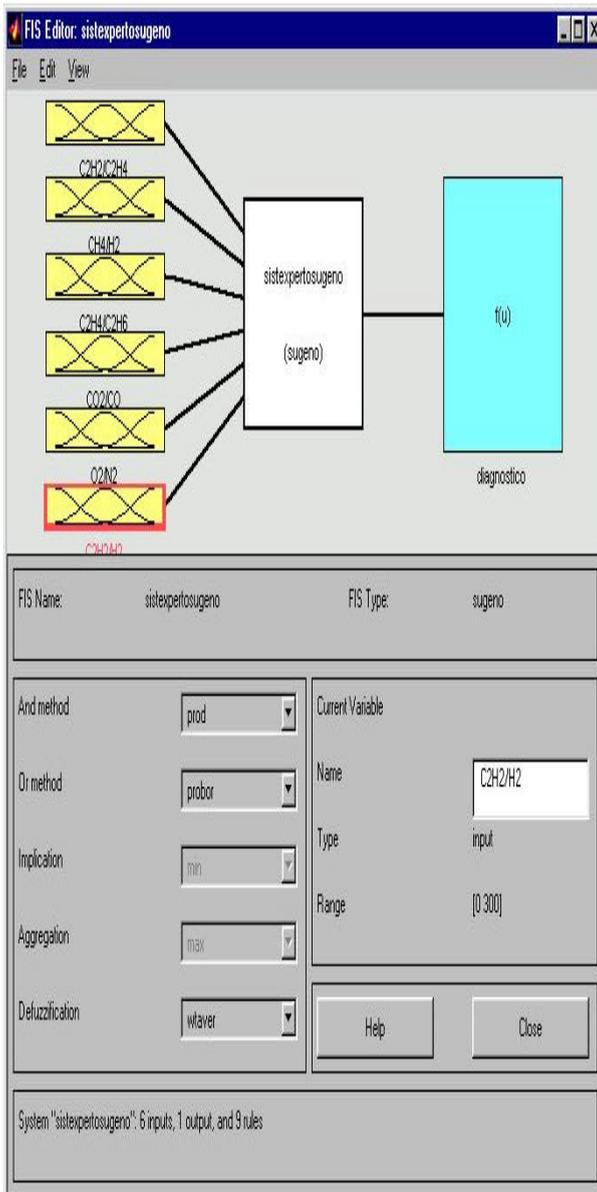
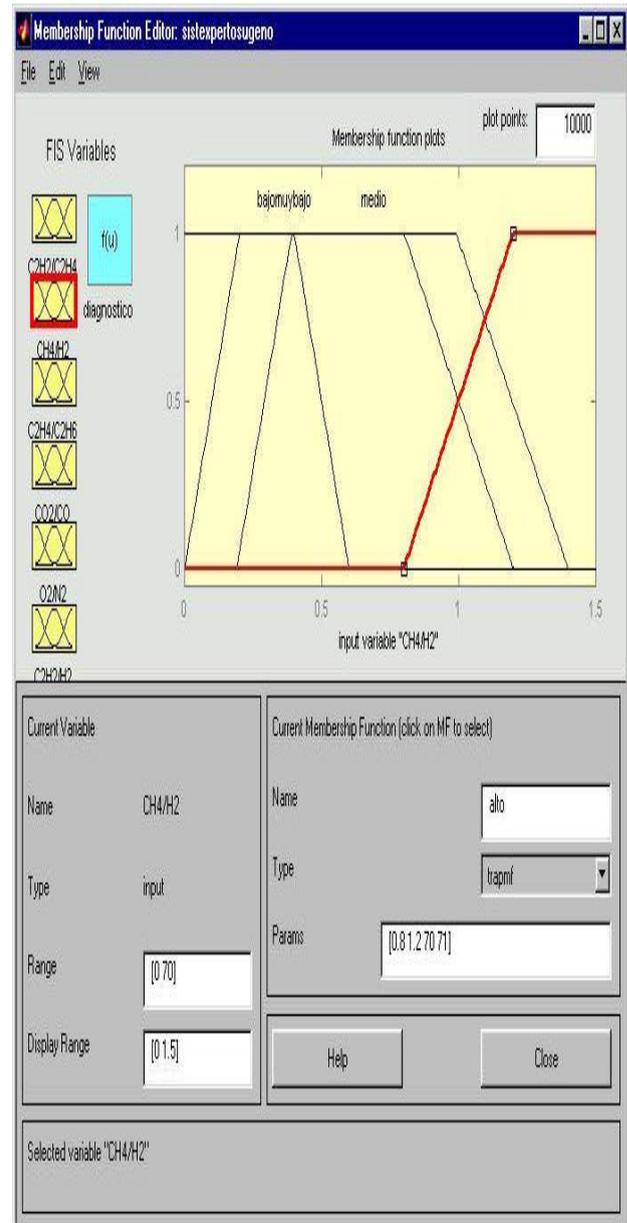


Diagrama de flujo del sistema.

6

El universo de variación de cada variable de entrada, se seleccionó teniendo en cuenta el máximo valor histórico que han alcanzado los gases correspondientes al numerador de la relación. Se seleccionaron funciones de pertenencia del tipo trapezoidal, cuyo universo de variación se enmarcó según los intervalos en que se expresan los resultados del análisis de gases que se muestra en la tabla 1. En la figura 7 se muestra como ejemplo el conjunto de funciones de pertenencia correspondientes a la variable de entrada  $CH_4/H_2$ .

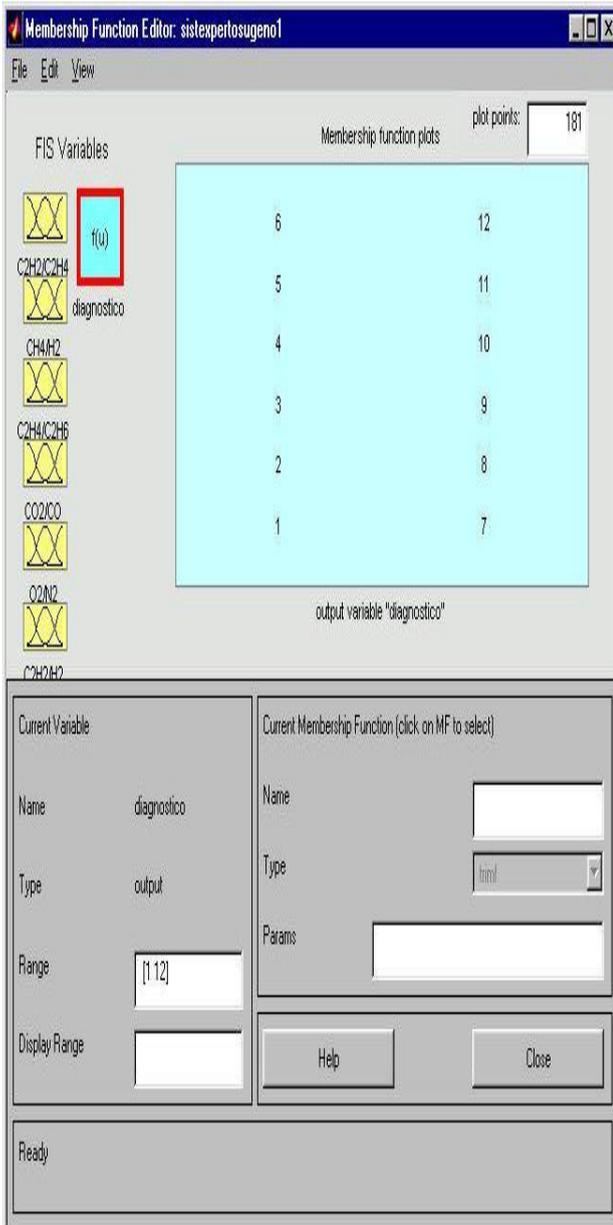
La variable de salida diagnóstico en la figura 6, está compuesta por doce funciones de pertenencia de tipo "Singleton" (figura 8).

Funciones de pertenencia de la variable de entrada  $CH_4/H_2$ .

7

Se seleccionó este tipo de función para garantizar un fácil cálculo, a la hora de obtener el resultado determinístico de la variable de salida del sistema, además de disminuir el tiempo computacional empleado para obtener el resultado anteriormente mencionado.

En el diseño de este sistema fueron utilizadas doce reglas de inferencia para describir la heurística del mismo, dichas reglas se muestran a continuación y están incluidas en el Editor de Reglas del Sistema Experto.



8

Variable de salida diagnóstico.

1. If  $[C_2H_4/C_2H_6 \text{ is muybajo}]$  then  $[\text{diagnostico is } 1]$  (1).
2. If  $[C_2H_2/C_2H_4 \text{ is muybajo}]$  and  $[CH_4/H_2 \text{ is extra bajo}]$  and  $[C_2H_4/C_2H_6 \text{ is muybajo}]$  then  $[\text{diagnostico is } 2]$  (1).
3. If  $[C_2H_2/C_2H_4 \text{ is medio}]$  then  $[\text{diagnostico is } 3]$  (1)
4. If  $[C_2H_2/C_2H_4 \text{ is not medio}]$  and  $[CH_4/H_2 \text{ is extra bajo}]$  and  $[C_2H_4/C_2H_6 \text{ is muybajo}]$  then  $[\text{diagnostico is } 4]$  (1).
5. If  $[C_2H_2/C_2H_4 \text{ is not alto}]$  and  $[CH_4/H_2 \text{ is medio}]$  and  $[C_2H_4/C_2H_6 \text{ is muyalto}]$  then  $[\text{diagnostico is } 5]$  (1).
6. If  $[C_2H_2/C_2H_4 \text{ is not muyalto}]$  and  $[CH_4/H_2 \text{ is bajo}]$  and  $[C_2H_4/C_2H_6 \text{ is alto}]$  then  $[\text{diagnostico is } 6]$  (1).
7. If  $[C_2H_2/C_2H_4 \text{ is not medio}]$  and  $[CH_4/H_2 \text{ is alto}]$  and  $[C_2H_4/C_2H_6 \text{ is extraalto}]$  then  $[\text{diagnostico is } 7]$  (1).
8. If  $[C_2H_2/C_2H_4 \text{ is not bajo}]$  and  $[CH_4/H_2 \text{ is alto}]$  and

- $[C_2H_4/C_2H_6 \text{ is medio}]$  then  $[\text{diagnostico is } 8]$  (1).
9. If  $[C_2H_2/C_2H_4 \text{ is no muybajo}]$  and  $[CH_4/H_2 \text{ is alto}]$  and  $[C_2H_4/C_2H_6 \text{ is bajo}]$  then  $[\text{diagnostico is } 9]$  (1).
10. If  $[C_2H_2/C_2H_4 \text{ is bajo}]$  then  $[\text{diagnostico is } 10]$  (1).
11. If  $[O_2/N_2 \text{ is bajo}]$  then  $[\text{diagnostico is } 11]$  (1).
12. If  $[C_2H_2/H_2 \text{ is bajo}]$  then  $[\text{diagnostico es } 12]$  (1).

Por último, se selecciona el método de defuzzificación a utilizar, que en este caso fue el método de ponderación del promedio.

Análisis de los resultados

Para comprobar la del sistema experto propuesto, se introdujeron datos de análisis cromatográficos realizados a transformadores de los cuales se había comprobado el tipo de falla que presentaban. Por ejemplo, en la tabla 6 aparecen datos de un transformador con una falla térmica de temperatura media (300-700 °C), el cual había fallado por el sobrecalentamiento local del núcleo debido a la circulación de corrientes por el circuito magnético

Primeramente se efectuaron varias corridas del programa con el objetivo de tener la evolución de la falla. Después, se realizó nuevamente la corrida del programa y se obtuvo el diagnóstico que se muestra en la figura 9. Este corresponde con la falla que ya se había detectado previamente en la revisión del transformador.

Gas	Pruebas			
Fecha	(3/88)	(8/91)	(12/95)	(5/96)
N <sub>2</sub>	72300	72300	48000	49700
O <sub>2</sub>	4300	2900	8500	12500
H <sub>2</sub>	110	613	211	10
CH <sub>4</sub>	141	262	535	16
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	72	156	223	5
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	110	393	963	15
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	53	53	22	3
CO	4660	7071	3535	2245
CO <sub>2</sub>	810	915	553	308



Diagnóstico final.

9

## CONCLUSIONES

1. Se ha desarrollado un prototipo de sistema de diagnóstico a través de la lógica difusa capaz de diagnosticar fallas incipientes en los transformadores a partir del estudio de los gases disueltos en el aceite.
2. Se validó el sistema propuesto mediante la comparación con los datos obtenidos de transformadores con fallas reales cuyo diagnóstico por análisis de gases se realizó utilizando la Norma IEC-599.
3. Esta versión de sistema experto constituye una mejora y actualización del anterior que se utilizaba en Cuba.

## REFERENCIAS

1. Lin, C.E.; J.M. Ling and C.L. Huang: "An Expert System for Transformer Fault Diagnosis Using Dissolved Gas Analysis", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 8, No. 1, pp. 231-238, January, 1993.
2. Ramírez, O.; A. de la Cruz y M. Alonso: "Sistema experto para diagnóstico por cromatografía gaseosa", *Revista Energética*, Vol. XX, No 4, Ciudad de La Habana, 1999.
3. Ramírez, O.: "Modelación físico-matemática para el diagnóstico de grandes transformadores en tiempo real", Tesis Doctoral, Ciudad de La Habana 2001.
4. IEC-599. *Guide to the Interpretation of Dissolved and Free Gases Analysis*. 1999.
5. IEC-567, *Guide for the Sampling of Gases and Oil from Oil-Filled Electrical Equipment and for the Analysis of Free and Dissolved Gases*, 1977

6. *Fuzzy Logic; Education Program 2.0*, Center for Emerging Computer Technologies, Motorola; Inc.; 1996.

7. Li-Xin Wang: *A Course in Fuzzy Systems and Control*, 1997.

## AUTORES

Madelín Lima Álvarez

Ingeniera Electricista, Máster en Ciencias, Asistente, Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba

e-mail:made@cipel.cujae.edu.cu

Ovidio Ramírez Fiallo

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Investigador Agregado, CIPEL, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba.

e-mail:oramirez@cipel.cujae.edu.cu

Sergio J. Fernández García

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Asistente, CIPEL, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba

e-mail:sfg@cipel.cujae.edu.cu

Rómulo José Pérez Barrios

Ingeniero Electricista, Docente de la Universidad Politécnica Antonio José de Sucre, UNEXPO, Venezuela

e-mail:rperez@bqto.unexpo.edu.ve

