



Diagnóstico de Transformadores de potencia utilizando Lógica Difusa

Carlos Sánchez, Luis Aranda, Domingo Maldonado

Facultad Politécnica UNE / ITAIPU BINACIONAL

PARAGUAY

RESUMEN

El trabajo tiene como objetivo principal el diagnóstico de posibles fallas en transformadores de potencia mediante el uso de una técnica de inteligencia artificial denominada lógica difusa o lógica borrosa.

Los transformadores son componentes de vital importancia para el funcionamiento de una estación eléctrica, por ende es necesario minimizar las posibles causas de su desconexión del sistema eléctrico. Considerando esto, el diagnóstico preventivo de los transformadores posibilita intervenir antes de que se produzcan fallas más severas que podrían dejarlos fuera de servicio, como también prolongar su vida útil. Con un buen diagnóstico preventivo se logra una mayor fiabilidad y continuidad del sistema eléctrico.

El problema de diagnóstico de transformadores a través del análisis de los gases disueltos en el aceite posee un gran margen de incertidumbre por lo que la aplicación de la lógica difusa propuesta como herramienta de diagnóstico asociará un grado de pertenencia a los posibles diagnósticos.

Con el fin de validar los resultados obtenidos con el sistema de diagnóstico implementado se procederá a la comparación de los mismos con los resultados obtenidos a través de métodos normalizados.

PALABRAS CLAVES

Transformadores de potencia, lógica difusa, cromatografía de gases, diagnóstico de fallas.

1 INTRODUCCIÓN

Los transformadores de potencia son partes vitales dentro del funcionamiento de una subestación eléctrica, de ahí la necesidad de minimizar las causas que pueden provocar su fallo o salida de servicio. Para evitar esto existen muchos equipos y métodos que se utilizan para tratar de monitorear su funcionamiento, sin embargo, la mayoría actúan hasta la presencia misma de la falla, lo que conlleva a la sustitución o reparación del equipo y por consiguiente la retirada total o parcial del servicio.

De aquí que se lleve a cabo un mantenimiento predictivo y preventivo donde se realizan diversas pruebas al equipo eléctrico capaces de detectar posibles fallas antes de que estas se manifiesten de forma severa y provoquen reparaciones costosas. Una prueba que ha tenido un amplio reconocimiento a nivel mundial como método efectivo para la detección de fallas incipientes es el análisis de los gases disueltos en el aceite aislante.

El problema de diagnóstico de transformadores a través del análisis de los gases disueltos en el aceite posee un gran margen de incertidumbre, lo cual hace útil la aplicación de la lógica difusa como herramienta de diagnóstico para asociar un grado de pertenencia a los posibles diagnósticos.

2 CONCEPTOS FUNDAMENTALES

2.1 Lógica difusa

Es un conjunto de principios matemáticos basados en grados de pertenencia. Su objetivo principal es crear un sistema basado en el comportamiento y pensamiento humano. Su función es modelar la información. A diferencia de la lógica convencional, que se rige por valores exactos como 1 o 0, la lógica difusa representa la lógica humana, dando sentencias basadas en reglas de inferencias impuestas por el que modela el algoritmo. En inteligencia artificial, la lógica difusa o lógica borrosa se utiliza para resolver una variedad de problemas, principalmente los relacionados con control de procesos industriales complejos y sistemas de decisión en general. Con su aplicación se puede obtener mejor resultado respecto de la lógica binaria dada su capacidad de tratamiento más complejo de la información.

Es una herramienta flexible que se basa en reglas lingüísticas, por ejemplo, “el día es caluroso”, “el automóvil va muy rápido”, etc. En el primer caso, se sabe que hay alta temperatura pero no se sabe a qué temperatura exactamente nos estamos refiriendo; en el segundo caso, se dice que el automóvil va rápido, sin embargo nunca se especifica su velocidad. [4]

2.1.1 Conjunto difuso

Existen ciertos conceptos que no tienen un límite bien definido, por dicha razón aparece la necesidad de utilizar los conjuntos difusos. Un conjunto difuso se encuentra asociado por un valor lingüístico que está definido por una palabra, etiqueta lingüística o adjetivo. [8]

La idea básica de un conjunto difuso es que un elemento forma parte de un conjunto con un determinado grado de pertenencia. De este modo una proposición no es totalmente (sino parcialmente) cierta o falsa. Este grado se expresa mediante un número en el intervalo (0; 1).

2.1.2 Funciones de pertenencia

Las funciones de pertenencia nos posibilitan representar gráficamente un conjunto difuso. Existen funciones de pertenencia convencionales y no convencionales, entre las convencionales se ilustra:

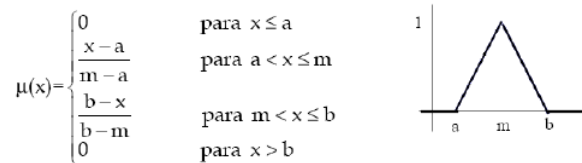


Figura 1 Función de pertenencia de un conjunto difuso triangular. [6]

2.1.3 Sistema de inferencia difusa

El proceso de la inferencia difusa está compuesto de cuatro partes principales: interfaz de difusificación, base de conocimientos, inferencia o evaluación de las reglas e interfaz de defusificación.

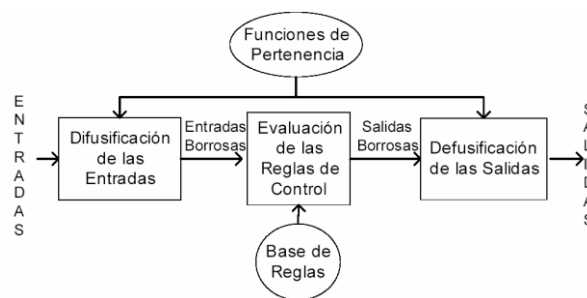


Figura 2 Proceso de inferencia difusa. [5]

Mediante el mecanismo de inferencia se obtiene la salida de un sistema borroso en función de sus reglas y las entradas que le sean aplicadas. Luego de la difusificación de las entradas, se evalúan estas entradas en cada una de las reglas definidas aplicando los operadores como AND u OR obteniéndose el consecuente resultante para cada regla. [9]

2.1.3.1 Defusificación

Cuando la salida del sistema de inferencia es un conjunto borroso pero la aplicación requiere que sea un valor numérico concreto, es necesario aplicar un método defusificador. Este elemento convierte dicho conjunto en un valor numérico. [9]

Los defusificadores más utilizados son el método del centroide, método de la media de máximo y método del promedio ponderado [8]

2.2 Aceite mineral aislante

El aceite aislante, aceite dieléctrico o simplemente aceite para transformador, es un aceite que se utiliza en general en equipos eléctricos como los transformadores. Es un subproducto de la destilación del petróleo que exhibe buenas propiedades dieléctricas características esenciales para oponerse al paso de la corriente eléctrica.

La eficiencia de un transformador depende no solo de su diseño y la forma de operación, sino también de las características del lubricante utilizado para su refrigeración y aislamiento. [12]

2.3 Análisis de gases disueltos

Existen diversos ensayos y métodos para determinar fallas en transformadores, siendo uno de los más importantes el análisis de gases disueltos (DGA) que identifica fallas incipientes en el aislamiento del transformador. Ésta es una técnica antigua y muy utilizada para la identificación de fallas incipientes en equipamientos con aislamiento a aceite.

El descubrimiento de fallas incipientes en la aislación aceite/papel por el método de DGA está basado en el hecho de que estas aislaciones sufren degradaciones bajo condiciones térmicas o eléctricas anormales, liberando una variedad de sustancias volátiles y no volátiles resultantes de la degradación.

Existen varios métodos para realizar el diagnóstico de fallas incipientes en el aceite de los transformadores, a partir de las relaciones entre los gases encontrados en la detección, siendo que los principales métodos disponibles en la literatura: método de gas clave, método de Roger, método de Dörnenburg, método de Duval y el criterio adoptado por la norma ABNT – NBR 7274/1982 propuesto en la IEC/IEEE. [3]

3. MODELO DEL SISTEMA DE DIAGNÓSTICO

El primer paso para diseñar un sistema difuso es determinar las variables de entrada, en este caso son los gases disueltos en el aceite mineral aislante de los equipos eléctricos en servicio.

Para el método de **gas clave**, como variable de entrada son tomados los porcentajes de concentración (ppm) entre los seis gases combustibles: monóxido de carbono (CO), hidrogeno (H₂), metano (CH₄), etano (C₂H₆), etileno (C₂H₄) y acetileno (C₂H₂).

$$\%GasX = \text{Concentración_de_gas}X \times 100 / \sum \text{concentraciones_de_todos_los_gases}$$

El siguiente paso es la difusificación de los datos de entrada convirtiendo esos porcentajes en un valor en cada función de membresía a las cuales pertenece. A seguir, los intervalos en los cuales están definidos las funciones de membresía en el caso del hidrogeno y del metano.

	$\text{Bajo} \begin{cases} 1 & H_2 \leq 10 \\ 1 \sim 0 & 10 < H_2 \leq 30 \\ 0 & H_2 > 30 \end{cases}$			$\text{Bajo} \begin{cases} 1 & CH_4 \leq 4 \\ 1 \sim 0 & 4 < CH_4 \leq 7 \\ 0 & CH_4 > 7 \end{cases}$
Hidrogeno → Medio	$\begin{cases} 0 & H_2 \leq 25 \\ 0 \sim 1 & 25 < H_2 \leq 55 \\ 1 & 55 < H_2 \leq 70 \\ 1 \sim 0 & 70 < H_2 \leq 90 \\ 0 & H_2 > 90 \end{cases}$	Metano → Medio	$\begin{cases} 0 & CH_4 \leq 5 \\ 0 \sim 1 & 5 < CH_4 \leq 6.5 \\ 1 & 6.5 < CH_4 \leq 8.5 \\ 1 \sim 0 & 8.5 < CH_4 \leq 11 \\ 0 & CH_4 > 11 \end{cases}$	
Alto	$\begin{cases} 0 \sim 1 & H_2 \leq 80 \\ 0 & 80 < H_2 \leq 90 \\ 1 & H_2 > 90 \end{cases}$	Alto	$\begin{cases} 0 & CH_4 \leq 10 \\ 0 \sim 1 & 10 < CH_4 \leq 13.5 \\ 1 & CH_4 > 13.5 \end{cases}$	

Para el método de **la NBR7274** como variables de entrada son tomados 3 relaciones entre gases característicos por la NBR7274. Estas relaciones están dadas por:

$$R1 = \frac{C_2H_2}{C_2H_4} \quad R2 = \frac{CH_4}{H_2} \quad R3 = \frac{C_2H_4}{C_2H_6}$$

El siguiente paso es la difusificación, los siguientes rangos de valores son las que definen las funciones de membresía, dentro de los cuales pertenecerán los datos de entrada. Dichas rango de valores son válidos para las tres relaciones.

$R \rightarrow \text{Muy bajo} \begin{cases} 1 & R \leq 0.09 \\ 1 \sim 0 & 0.09 < R \leq 0.11 \\ 0 & R > 0.11 \end{cases}$	$R \rightarrow \text{Bajo} \begin{cases} 0 & R \leq 0.09 \\ 0 \sim 1 & 0.09 < R \leq 0.11 \\ 1 & 0.11 < R \leq 0.95 \\ 1 \sim 0 & 0.95 < R \leq 1.1 \\ 0 & R > 1.1 \end{cases}$
--	---

XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
25 y 26 de Agosto de 2016

$$R \rightarrow Medio \begin{cases} 0 & R \leq 0.95 \\ 0 \sim 1 & 0.95 < R \leq 1.1 \\ 1 & 1.1 < R \leq 2.75 \\ 1 \sim 0 & 2.75 < R \leq 3.2 \\ 0 & R > 3.2 \end{cases} \quad R \rightarrow Alto \begin{cases} 1 & R \leq 2.75 \\ 1 \sim 0 & 2.75 < R \leq 3.2 \\ 0 & R > 3.2 \end{cases}$$

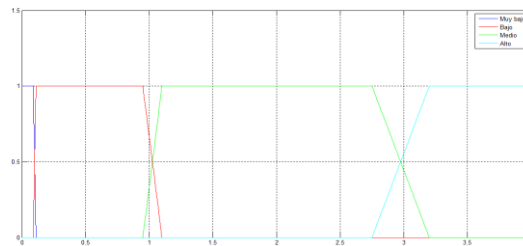


Figura 3 Funciones de membrecía de las relaciones de la NBR7274.

En la siguiente figura observamos a que conjunto difuso corresponde una entrada de $R_1=1,04$, como se puede observar este pertenece a un rango medio con grado de pertenecía 0,6 y un rango bajo con un grado para pertenencia de 0,4.

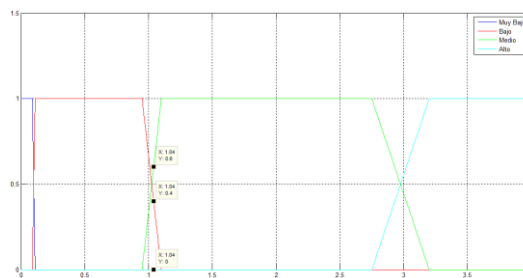


Figura 4 Ejemplo de difusificación de los datos de entrada para NBR 7274.

Para el método de Roger como variables de entrada son tomados 4 relaciones entre gases característicos considerados por este método. Estas relaciones están dadas por:

$$I = \frac{CH_4}{H_2} \quad J = \frac{C_2H_6}{CH_4} \quad K = \frac{C_2H_4}{C_2H_6} \quad L = \frac{C_2H_2}{C_2H_4}$$

El siguiente paso es la difusificación, los siguientes rangos de valores son las que definen las funciones de membrecía, dentro de los cuales pertenecerán los datos de entrada.

$$I \rightarrow Muy bajo \begin{cases} 1 & R \leq 0.09 \\ 1 \sim 0 & 0.09 < R \leq 0.11 \\ 0 & R > 0.11 \end{cases} \quad I \rightarrow Bajo \begin{cases} 0 & R \leq 0.09 \\ 0 \sim 1 & 0.09 < R \leq 0.115 \\ 1 & 0.115 < R \leq 0.9 \\ 1 \sim 0 & 0.9 < R \leq 1.05 \\ 0 & R > 1.05 \end{cases}$$

$$I \rightarrow Medio \begin{cases} 0 & R \leq 0.9 \\ 0 \sim 1 & 0.9 < R \leq 1.05 \\ 1 & 1.05 < R \leq 2.75 \\ 1 \sim 0 & 2.75 < R \leq 3.2 \\ 0 & R > 3.2 \end{cases} \quad I \rightarrow Alto \begin{cases} 0 & R \leq 2.75 \\ 0 \sim 1 & 2.75 < R \leq 3.2 \\ 1 & R > 3.2 \end{cases}$$

XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
25 y 26 de Agosto de 2016

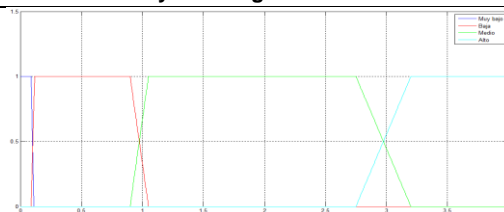


Figura 5 Funciones de membresía para la relación I.

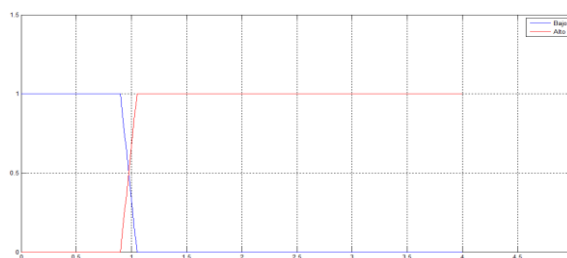


Figura 6 Funciones de membresía para la relación J.

Ya definidas las variables de entrada para cada método, se establecen las reglas que formarán la base de conocimientos.

Las reglas para gas clave fueron dictadas en base a los gases característicos para cada tipo de falla y en base a las designaciones dadas en los conjuntos difusos a las variables de entradas

- Regla 1 = Si H_2 es *medio* y C_2H_2 es *alto* entonces es *un arco eléctrico*.
- Regla 2 = Si H_2 es *alto* y CH_4 es *alto* entonces es *descargas parciales*.
- Regla 3 = Si C_2H_4 es *alto* y C_2H_6 es *alto* y CH_4 es *alto* entonces es *sobrecalentamiento del aceite*.
- Regla 4 = Si CO es *alto* y H_2 es *bajo* entonces es *sobrecalentamiento de la celulosa*.
- Regla 5 = Si H_2 es *alto* y CH_4 es *bajo* entonces es *electrólisis*.

A continuación resumen de la matriz de reglas para la *NBR7274* con 56 combinaciones:

Tabla I. Matriz de reglas para *NBR 7274*.

Entradas			Diagnóstico
R1	R2	R3	
MB	MB	MB	CASO B
MB	MB	M	CASO A
MB	A	M	CASO H
MB	A	A	CASO I
B	MB	MB	CASO C

Y la matriz de reglas para Roger:

Tabla II. Matriz de reglas para Roger.

Entradas				Diagnóstico
I	J	K	L	
MB	B	B	B	CASO B
MB	B	B	M	CASO C
MB	B	B	A	CASO A
B	B	B	M	CASO D
B	A	B	B	CASO H
A	A	B	B	CASO I

MÉTODO DE INFERENCIA

El método empleado es el de Mamdani con composición máx-min donde el siguiente paso luego de la difusificación de las variables de entradas es la de evaluar dichas entradas en los antecedentes de las reglas difusas. Como las reglas definidas en la sección anterior tienen dos o más antecedentes, se utiliza el operador AND u OR para generar un único número que represente la evaluación como se observa en la figura 10.

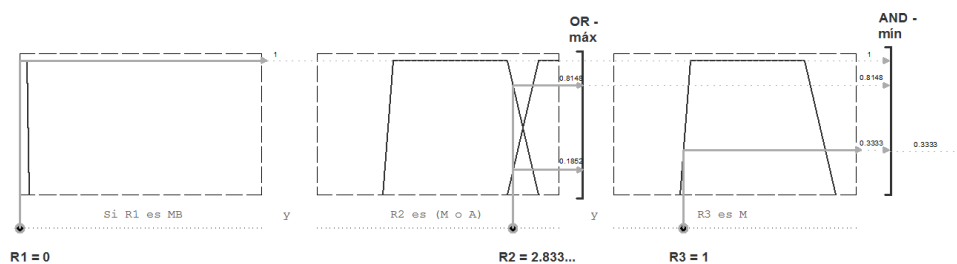


Figura 7 Ejemplo de evaluación de una regla difusa aplicando los operadores AND y OR.

Los resultados de la evaluación del antecedente son utilizados en el consecuente, aplicando un recorte a la salida con el valor de la evaluación del antecedente ver (figura 8). Luego se combinan todas las funciones de las salidas recortadas, conocido como agregación de las salidas ver (figura 9).

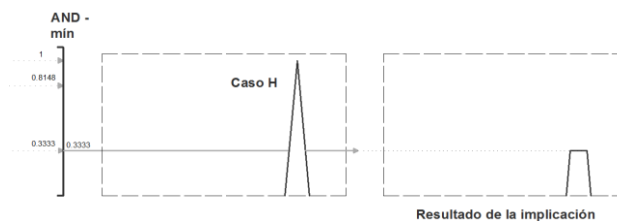


Figura 8 Ejemplo de recorte del consecuente.

XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
25 y 26 de Agosto de 2016

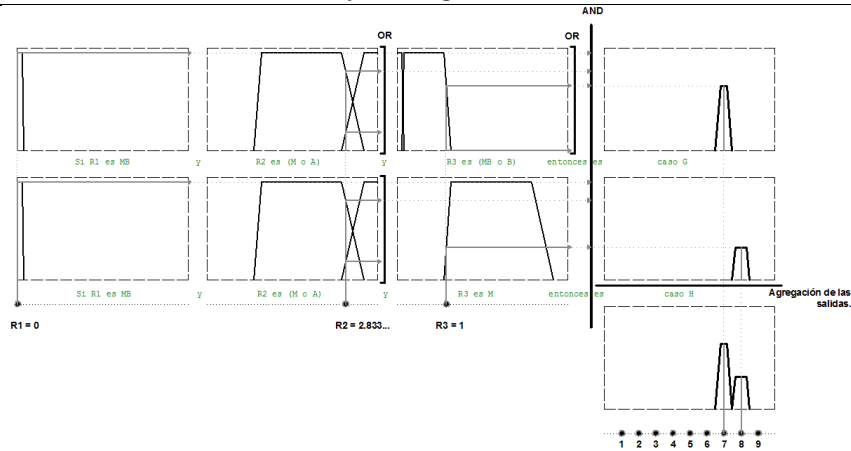


Figura 9 Ejemplo de evaluación de las reglas teniendo como resultado un conjunto difuso producto de la agregación de las salidas.

En cuanto a la salida se tiene como resultado el diagnóstico arrojado en función a las entradas y la base de conocimientos para cada método. Cada conjunto difuso representa a su respectivo diagnóstico.

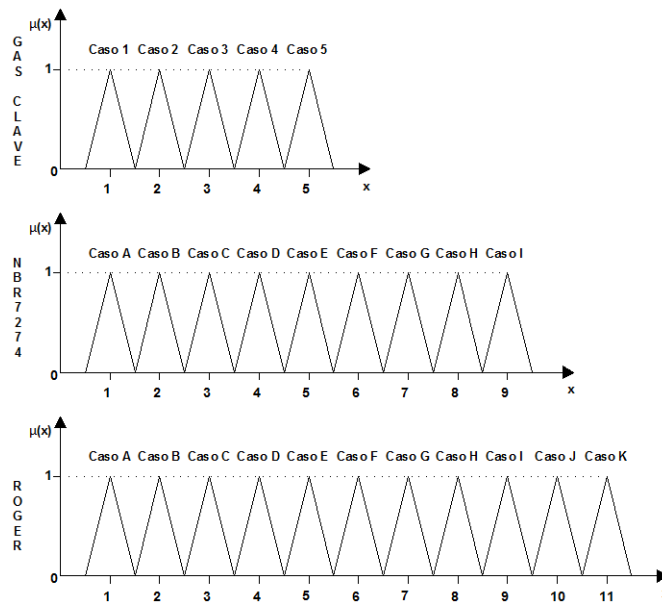


Figura 10 Conjuntos difusos de las salidas.

Tabla III. Diagnostico correspondiente a cada conjunto difuso

Gas Clave		NBR7274		Roger	
Caso 1	Arco eléctrico	A	Sin Falla	A	No hay diagnóstico por este método
Caso 2	Descargas parciales	B	Descarga parcial de baja energía	B	Descarga parcial de baja energía
Caso 3	Sobrecalentamiento del aceite	C	Descarga parcial de alta energía	C	Descarga parcial de alta energía
Caso 4	Sobrecalentamiento celulosa	D	Descarga de baja energía	D	Descarga de baja energía

XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
25 y 26 de Agosto de 2016

Caso 5	Electrólisis	E	Descarga de alta energía	E	Descarga de baja energía
		F	Falla térmica baja (<150 ° C)	F	Descarga de alta energía
		G	Falla térmica media (150-300 ° C)	G	Sobrecalentamiento del conductor aislado
		H	Falla térmica alta (300-700 ° C)	H	Falla térmica baja (< 150 ° C)
		I	Falla térmica muy alta (>700 ° C)	I	Falla térmica media (100-200 ° C)
				J	Falla térmica (150-300 ° C)
				K	Falla térmica (300-700 ° C)

DEFUSIFICACIÓN

La entrada para el proceso de defusificación es un conjunto difuso resultado de la agregación de las salidas al final de la evaluación de las reglas y la salida es un simple número. El método seleccionado para la defusificación fue el de la media de máximo (MOM, middle of maximum).

4. RESULTADOS

Los datos de entrada utilizados en el trabajo fueron extraídos de un transformador de 25 MVA, 500/13.8 Kv. Una vez realizado el sistema de diagnóstico, nos queda observar los resultados arrojados para diferentes niveles de concentración de gases combustibles en distintas fechas en donde para cada análisis se obtuvo un diagnóstico para el transformador.

Datos de entrada – concentración de gases en el aceite aislante en la fecha 05/03/2012



The screenshot shows a diagnostic software interface with the following sections:

- Input Section:** "Ingresar las concentraciones en ppm" with fields for CO (352), H2 (7), CH4 (25), C2H6 (0), C2H4 (2), and C2H2 (0).
- GAS CLAVE:** Lists gas concentrations: CO bajo: 0, CO medio: 0, CO alto: 1, H2 bajo: 1, H2 medio: 0, H2 alto: 0, CH4 bajo: 0.228595, CH4 medio: 0.875421, CH4 alto: 0, C2H6 bajo: 1, C2H6 medio: 0, C2H6 alto: 0, C2H4 bajo: 1, C2H4 medio: 0, C2H4 alto: 0, C2H2 bajo: 1, C2H2 alto: 0.
- Diagnóstico:** "SOBRECALENTAMIENTO DE LA CELULOSA" with a "Grado de pertenencia" of 1.
- NBR 7274:** Lists diagnostic criteria: R1 muy: 1, R1 bajo: 0, R1 medio: 0, R1 alto: 0, R2 muy: 0, R2 bajo: 0, R2 medio: 0, R2 alto: 0, R3 muy: 1, R3 bajo: 0, R3 medio: 0, R3 alto: 0.
- Diagnóstico:** "FALLA TERMICA MEDIA (150-300°C)" with a "Grado de pertenencia" of 1.
- ROGERS:** Lists diagnostic criteria: R1 bajo: 1, R1 medio: 0, R1 alto: 0, R2 muy: 0, R2 bajo: 0, R2 medio: 0, R2 alto: 1, R3 bajo: 1, R3 medio: 0, R3 alto: 0, R4 bajo: 1, R4 alto: 0.
- Diagnóstico:** "NO HAY DIAGNOSTICO" with a "Grado de pertenencia" of 1.
- ANÁLISIS:** "Método de análisis: GASCHAVE", "Diagnóstico: CELULOSE SUPER AQUECIDA", "RECOMENDACIONES: - Repetir coleta e ensaio", "Método de análisis: ROGERS", "Diagnóstico: SEM DIAGNÓSTICO EMITIDO POR ESTE CRITÉRIO", "Método de análisis: NBR7274", "Diagnóstico: FALHA TERMICA MEDIA 150 A 300C", "RECOMENDACIONES: - Repetir coleta e ensaio", "- Verificar evolução dos gases em relação as amostragens anteriores", "- Verificar histórico de Cromatografia da Família".

Figura 11 a) Resultado de la fecha 05/03/2012, b) Diagnóstico especialistas.

Datos de entrada – concentración de gases en el aceite aislante en la fecha 26/08/2009

**XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
25 y 26 de Agosto de 2016**



Figura 12 Resultado de la fecha 26/08/2009, b) Diagnóstico especialistas

5 CONCLUSIONES

El trabajo de investigación realizado conduce a las siguientes conclusiones.

1. El mantenimiento preventivo de un transformador es de gran importancia para mejorar su vida útil ya que los transformadores se encuentran sometidos a diferentes estados de cargabilidad y de solicitaciones transitoria, corrosión ambiental y fallas propias de operación que inevitablemente influye en el envejecimiento de los aislantes afectando sus componentes y por consiguiente afectan la confiabilidad y vida útil del mismo.
2. El análisis cromatográfico del aceite de un transformador es un método muy efectivo y valedero para emitir un diagnóstico del estado del transformador, convirtiéndola una herramienta fundamental dentro del mantenimiento preventivo periódico de un transformador con aceite mineral aislante.
3. La implementación de la inteligencia artificial, en este caso la lógica difusa en el sistema de diagnóstico presentado para el detección de fallas es efectiva ya que los resultados obtenidos a través de la metodología propuesta se corresponde con los resultados esperados desde el punto de vista de los expertos de experiencia en el mantenimiento preventivo de un transformador.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Orozco Ruíz, H. “Automatización de un sistema de vacío y llenado multipunto, para la extracción de gases e ingreso de aceite dieléctrico a los transformadores trifásicos en la empresa ECUATRAN S.A., controlado a través de un HMI”. Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero en Electromecánica. Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, Ecuador, 2015.
- [2] Milasch, Milan. “Manutenção de Transformadores Em Líquido Isolante”. Sexta edición, Ed. Edgard Blücher LTDA, 2003.
- [3] Sampaio de Almeida G., C. “Incerteza de Medição em Redes Neurais Artificiais Aplicadas à Manutenção Preditiva de Transformadores”. Tesis presentada para la obtención del grado de Master en Metrología. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Brasil, 2011.
- [4] Ponce Cruz, P. “Inteligencia Artificial con aplicaciones a la ingeniería”. Primera edición, Ed. Alfaomega, 2010.
- [5] “Lógica Difusa y Sistemas De Control”. [En línea]. Disponible en: http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1_185_184_133_1746.pdf. [Último acceso: 06 de enero de 2016].
- [6] Ortiz de la Vega, H. “Algoritmo simple para sintonización de controladores difusos (ASSCD)”. Tesis para la obtención del grado de Master en Ciencias, Área Cibernética. Universidad La Salle, México, 2009.
- [7] González M., Carlos. “Lógica difusa. Una introducción práctica”.
- [8] Siler William, Buckley James. “Fuzzy Expert Systems and Fuzzy Reasoning”. Wiley – Interscience, 2005.
- [9] Barragán P., Antonio J. “Síntesis de Sistemas de Control Borroso Estables por Diseño”. Tesis Doctoral. Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Huelva, 2009.
- [10] NBR 7274: Interpretação da Analise dos Gases de Transformadores em Serviço, Abril / 1982.
- [11] “Aceites Minerales Aislantes Nuevos para Transformadores y Equipamiento de Maniobra”. [En línea]. Disponible en: http://www.efn.uncor.edu/departamentos/electro/cat/eye_archivos/apuntes/a_practico/Cap%202%20Pco.pdf [Último acceso: 06 de enero de 2016].
- [12] “Transformadores”. [En línea]. Disponible en: <http://fliphtml5.com/kegd/ckdr/basic> [Último acceso: 06 de enero de 2016].
- [13] Chapman, Stephen. “Máquinas eléctricas”. Tercera edición, Ed. Mc. Graw Hill.
- [14] Sarria, J., Guerrero, N., Rivas, E. “Estado del arte del análisis de gases disueltos en transformadores de potencia”. [En línea]. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/rfing/v23n36/v23n36a10.pdf> [Último acceso: 06 de enero de 2016].