

Comité de Estudio A2 - Transformadores

Herramienta de Gestión y Análisis para los Ensayos de DGA en Transformadores de Potencia Inmersos en Aceite Mineral

J.S PIEGARI*
EDELAP S.A
ARGENTINA

R.E. ALVAREZ
IITREE-LAT-FI-UNLP
ARGENTINA

L.J. CATALANO
IITREE-LAT-FI-UNLP
ARGENTINA

Resumen – Los transformadores de potencia son activos vitales en las redes eléctricas. Los altos costos de equipos nuevos y los largos tiempos de reposición requeridos hacen que estas máquinas tengan un adecuado mantenimiento de forma periódica a fin de lograr un servicio óptimo. A su vez, es sabido que la vida útil de los transformadores está estrechamente relacionada con “la vida del aislamiento”. El conocimiento del estado del aceite del transformador es una excelente herramienta de diagnóstico del estado del transformador. El diagnóstico se realiza mediante el análisis de gases disueltos en el aceite, DGA considerando los criterios y recomendaciones de IEC [1] e IEEE [2].

En el mercado existen algunos softwares específicos que permiten la gestión y el análisis del estado del aceite del transformador por medio del DGA. No obstante, en la mayoría de los casos estas herramientas son costosas y con flexibilidad limitada. En tal sentido, el uso de planillas de cálculo es una alternativa. Sin embargo, dicha herramienta pierde eficacia cuando se requiere procesar y analizar gran cantidad de datos. Por lo expuesto, ha resultado de interés desarrollar una nueva herramienta de gestión y análisis de DGA con las premisas de facilidad de uso e interpretación y flexibilidad de aplicación. Dicha herramienta se desarrolló en entorno MATLAB. Utilizando dicho software se ha implementado un programa de análisis de los resultados de DGA que permite la realización de los análisis recomendados por las normas IEC [1] / IEEE [2] de forma intuitiva y rápida, comparar entre los métodos de diagnóstico, analizar de forma gráfica la evolución de defectos y generar reportes.

Palabras claves: DGA, aceite, aislamiento, diagnóstico, Matlab, cromatografía, gases disueltos, Doernenburg, Rogers, Duval.

1. INTRODUCCIÓN

El concepto “la vida útil del transformador es la vida del aislamiento” implica la observación continua del estado del sistema aislante de la máquina. Debido a que el aceite circula por cada porción del sistema de aislamiento, puede extraer de él valiosa información convirtiéndose en una excelente herramienta de diagnóstico. En este sentido el ensayo de DGA (Análisis de Gases Disueltos en el Aceite) del transformador es la práctica de excelencia en el mantenimiento a la hora del diagnóstico. El DGA comprende la identificación y cuantificación mediante cromatografía de los gases disueltos en el aceite del transformador y que son formados por diferentes fenómenos producidos en el interior de este. Los estándares IEC e IEEE establecen criterios para analizar los resultados obtenidos, y a partir de ello arribar a un diagnóstico sobre la condición del transformador.

El software desarrollado busca mejorar el análisis del estado de los transformadores brindando la posibilidad de utilizar los métodos de diagnóstico planteados por las normas IEC [1] / IEEE [2] de forma combinada o individual. Los métodos implementados son:

- Relaciones Básicas de Gases (IEC 60599 [1])
- Triángulo de Duval (IEC 60599 [1])
- Rogers (IEEE C57.104 [2])
- Doernenburg (IEEE C57.104 [2])

ESTRUCTURA DE LA HERRAMIENTA

En la Fig. 1 se presenta un esquema con la estructura de análisis aplicando los cuatro métodos más difundidos, a partir de los resultados de DGA (“Entrada de Gases”). Como se indica en dicha figura, en todos

los casos es requerido el diagnóstico individual, es decir, analizar los resultados de cada una de las entradas, para luego hacer un “Diagnóstico Final” en el cual se considerarían las restantes mediciones (historial).

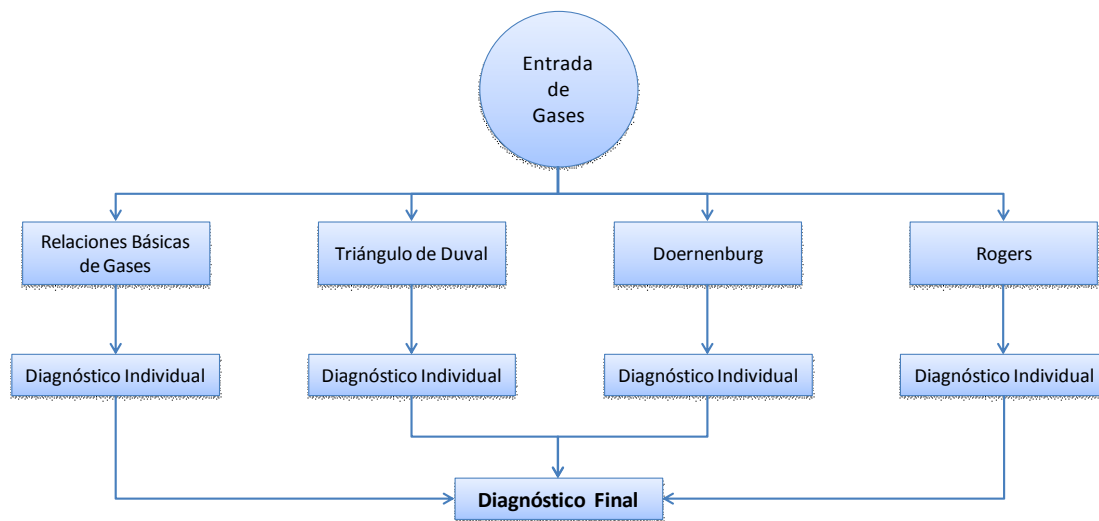


Fig.1 - Diagrama de flujo realización de análisis mediante software diseñado.

Existen análisis que requieren de una representación gráfica para la obtención del diagnóstico o simplemente para un mejor entendimiento de éste. Esto último presenta una limitación de las hojas de cálculo y es debido a que la representación para cada análisis haría engorrosa tarea tanto para el analista como para de cálculo. A partir de ello, se ha desarrollado un programa en Matlab [3] con las premisas y criterios de análisis de cada uno de los métodos de diagnóstico; la cual permite no sólo realizar el diagnóstico individual sino que también incluir un historial de análisis y realizar una “Diagnóstico Final”.

La utilización de Matlab [3] fue debido a que es una programa de llegada masiva y brinda al usuario importantes y poderosas herramientas de cálculo y gráficas como así también la posibilidad de crear interfaces graficas (GUIs) mediante la utilización de su aplicativo GUIDE.

A continuación se describen los principales módulos y secciones del programa implementado.

1.1. Pestañas

Cada método de diagnóstico es presentado en una pestaña diferente para su mejor ordenamiento (ver Fig. 2) y rápido acceso. Además de las pestañas de análisis se cuenta con dos sub-pestañas adicionales:

- Tabla de Concentraciones de Gases
- Evolución de Gases



Fig. 2 - Pestañas.

1.1.1. Tabla de concentraciones de gases

Esta sección del programa se utiliza para la carga de las concentraciones de gases disueltos en aceite medidos para el transformador a diagnosticar (“Entrada de Gases” de la Fig. 1). Se utiliza para la entrada de datos planillas de cálculo con extensión “XLS” o “XLXS” (ver Fig.3). Con ello se pueden importar los datos históricos cargados con anterioridad o ir cargando nuevos análisis a medida que se realizan.

La norma IEC 60599 [1] destaca que para la utilización de estos métodos es requisito que alguna de las concentraciones de gases supere los valores típicos propuestos por la norma. Mientras que la norma IEEE C57.104:2008 [2] establece varios criterios para la utilización de sus métodos, sin embargo para que su diagnóstico sea válido establece que al menos una de las concentraciones de los gases exceda en dos veces el valor límite y una de las concentraciones de los gases restantes (CO y C2H6) excede el valor límite indicado por la misma tabla, se considera que el transformador tiene un defecto. Luego mediante otras comparaciones se deben validar que las relaciones de gases utilizadas en los métodos sean válidas.

Las fórmulas presentadas para cada método de análisis son las relaciones entre las distintas concentraciones de gases y que permiten diagnosticar la máquina.

1.1.2. Relaciones Básicas de Gases

En esta sección se realiza el diagnóstico a partir de relaciones básicas de gases según IEC 60599 [1] y se utiliza una representación gráfica de la tabla de los defectos permitiendo así una rápida interpretación. Las siguientes son las relaciones utilizadas por este método:

$$R_1 = \frac{\text{Acetileno}}{\text{Etileno}} = \frac{C_2H_2}{C_2H_4} \quad R_2 = \frac{\text{Metano}}{\text{Hidrógeno}} = \frac{CH_4}{H_2} \quad R_3 = \frac{\text{Etileno}}{\text{Etano}} = \frac{C_2H_4}{C_2H_6}$$

En cada caso, en función de los resultados obtenidos el método establece los posibles diagnósticos (“DP” Descargas parciales, “D1” Descargas de baja energía, “D2” Descargas de alta energía, “T1” Defecto térmico, temperatura < 300 °C, “T2” Defecto térmico, 300 °C < temperatura < 700 °C y “T3” Defecto térmico, temperatura > 700 °C). Este método tiene la limitación que, para determinadas concentraciones de gases, las relaciones obtenidas no tienen un diagnóstico asignado.

1.1.3. Triángulo de Duval

Este método se basa en las concentraciones de tres gases característicos de las fallas más severas que se pueden presentar en un transformador en servicio. El diagnóstico se obtiene a partir del cálculo de los valores porcentuales de los tres gases claves considerados (acetileno C₂H₂, etileno C₂H₄ y metano CH₄) y que son:

$$C_2H_2 = 100 \times \frac{C_2H_2}{C_2H_2 + C_2H_4 + CH_4} \quad \%C_2H_4 = 100 \times \frac{C_2H_4}{C_2H_2 + C_2H_4 + CH_4}$$

$$\%CH_4 = 100 \times \frac{CH_4}{C_2H_2 + C_2H_4 + CH_4}$$

Al igual que en la relación Básica de Gases, en función de los porcentajes se establecen los diferentes diagnósticos (los mismos que indicados en 2.1.2). Se destaca que este método dispone de ciertas características distintivas a la hora de su utilización (alto nivel de precisión, fácil y rápida interpretación, posibilidad de obtener un diagnóstico para cualquier condición, etc.) respecto al de relaciones básicas de gases. Estas características hacen que el triángulo de Duval sea el método más utilizado hoy en día a nivel mundial para el diagnóstico de transformadores.

Esta sección del programa, además de presentar una tabla con el cálculo de las concentraciones, se grafica cada uno de los resultados obtenidos.

1.1.4. Rogers y Doernenburg

Ambos métodos de diagnóstico se basan en relaciones entre las concentraciones de cinco gases claves (hidrógeno H₂, acetileno C₂H₂, etileno C₂H₄ y metano CH₄ y etano C₂H₆). De acuerdo a IEEE C57.104 [2] las relaciones son:

$$R_1 = \frac{CH_4}{H_2} \quad R_2 = \frac{C_2H_2}{C_2H_4} \quad R_3 = \frac{C_2H_2}{CH_4} \quad R_4 = \frac{C_2H_6}{C_2H_2} \quad R_5 = \frac{C_2H_4}{C_2H_6}$$

El método de Doernenburg utiliza las relaciones de gases R₁, R₂, R₃ y R₄, mientras que el método de Rogers utiliza las relaciones R₁, R₂ y R₅.

En esta modalidad de análisis, el software muestra como resultado una tabla con las relaciones junto al diagnóstico de cada método.

1.1.5. Evolución de Gases

En esta opción del software se muestra la evolución individual de cada gas. Resulta de particular interés, puesto que es importante detectar una falla activa en el transformador a partir del crecimiento anómalo de un gas.

1.1.6. Selección de Análisis y Reporte

En cada una de las pestañas de los análisis se dispone de una opción “*Analizar*” que permite iniciar el análisis de la o las muestras cargadas previamente (“Entrada de Gases,” en la Fig. 1). En cada pestaña además, se ha implementado una acción de “*Reporte*” mediante la cual se genera un informe en formato “PDF” con los análisis seleccionados en la tabla o con todos los análisis.

2. EJEMPLO DE APLICACIÓN

Con el fin de exponer las características del software desarrollado se presentará un ejemplo de aplicación real. Para ello, en la Tabla I se presenta el historial de resultados de DGA de un transformador de potencia, cuya entrada en servicio fue en el año 1983. De acuerdo a lo expuesto en la Fig. 1, el historial de la Tabla I constituye la “Entrada de Gases”.

Tabla I -Concentraciones de gases disueltos en aceite transformador de potencia

Interv. N°	Fecha	Hidrógeno	Metano	Etano	Etileno	Acetileno	CO	CO ₂	Nitrógeno	Gases Totales
1	01/11/1995	6.00	3.00	2.00	1.00	0.00	40.00	115.00	13000.00	0.00
2	07/11/1996	2.00	19.00	2.00	13.00	10.00	41.00	238.00	12298.00	0.00
3	30/08/1997	9.00	31.00	1.00	1.00	1.00	376.00	900.00	35900.00	0.00
4	25/10/1998	28.00	9.00	0.00	12.00	1.00	546.00	1319.00	45999.00	0.00
5	17/05/2000	80.00	13.00	4.00	25.00	2.00	90.00	1900.00	58700.00	0.00
6	11/10/2001	79.00	27.00	7.00	61.00	2.00	89.00	1799.00	58699.00	0.00
7	09/06/2002	199.00	269.00	51.00	399.00	2.00	699.00	1799.00	58699.00	0.00
8	16/06/2002	1074.00	196.00	85.00	388.00	3.00	1050.00	2503.00	58700.00	0.00
9	05/11/2002	207.00	46.00	40.00	165.00	8.00	1197.00	2827.00	58697.00	0.00
10	06/11/2003	225.00	46.00	49.00	164.00	9.00	1230.00	3500.00	58700.00	0.00
11	04/11/2004	30.00	19.00	17.00	108.00	0.00	1176.00	5843.00	85647.00	0.00
12	21/10/2005	54.00	24.00	11.00	57.00	0.00	1899.00	9099.00	77699.00	0.00
13	06/11/2006	32.00	14.00	6.00	93.00	3.00	1358.00	6793.00	66959.00	0.00
14	07/11/2007	16.00	29.00	6.00	59.00	1.00	623.00	3271.00	37203.00	0.00
15	15/10/2008	51.00	91.00	32.00	198.00	1.00	1807.00	10045.00	68587.00	8.30
16	01/12/2009	33.00	41.00	21.00	137.00	1.00	1825.00	6079.00	83789.00	10.10

La primera fase del proceso de diagnóstico consiste en cargar los datos de la Tabla I a la pestaña “Tabla de Concentraciones de Gases”. En la Fig. 3 se muestra una imagen de dicha sección del software, con los datos del historial de la Tabla I cargados.

	Fecha	Hidrógeno	Metano	Etano	Etileno	Acetileno	CO	CO ₂	Nitrogeno	Gases Totales
1	01/11/1995 1...6	3	2	1	0	40	115	13000	0	
2	07/11/1996 1...2	19	2	13	10	41	238	12298	0	
3	30/08/1997 0...9	31	1	1	1	376	900	35900	0	
4	25/10/1998 1...28	9	0	12	1	546	1319	45999	0	
5	17/05/2000 0...80	13	4	25	2	90	1900	58700	0	
6	11/10/2001 0...79	27	7	61	2	89	1799	58699	0	
7	09/06/2002 0...199	269	51	399	2	699	1799	58699	0	
8	16/06/2002 0...1074	196	85	388	3	1050	2503	58700	0	
9	05/11/2002 0...207	46	40	165	8	1197	2827	58697	0	
10	06/11/2003 1...225	46	49	164	9	1230	3500	58700	0	
11	04/11/2004 0...30	19	17	108	0	1176	5843	85647	0	
12	21/10/2005 0...54	24	11	57	0	1899	9099	77699	0	
13	06/11/2006 0...32	14	6	93	3	1358	6793	66959	0	
14	07/11/2007 0...16	29	6	59	1	623	3271	37203	0	
15	15/10/2008 0...51	91	32	198	1	1807	10045	68587	8.3	
16	01/12/2009 1...33	41	21	137	1	1825	6079	83789	10.1	

Fig. 3 - Tabla de concentraciones de gases disueltos en aceite cargada.

A continuación se presentan los resultados de los métodos de diagnóstico, para cada criterio desarrollado anteriormente que han sido implementados en el software.

2.1. Relaciones Básicas de Gases

Una vez cargados los datos de entradas, se ejecuta la aplicación “*Analizar*” en la pestaña de Relaciones Básicas de Gases, y se obtienen los resultados correspondientes aplicando lo expuesto en 2.1.2. En la Fig.

4se presentan los resultados con todo el historial de datos. Por su parte en la Fig. 5se presentan los resultados obtenidos seleccionando arbitrariamente los resultados de tres ensayos (07/11/2007,15/10/2008,01/12/2009).

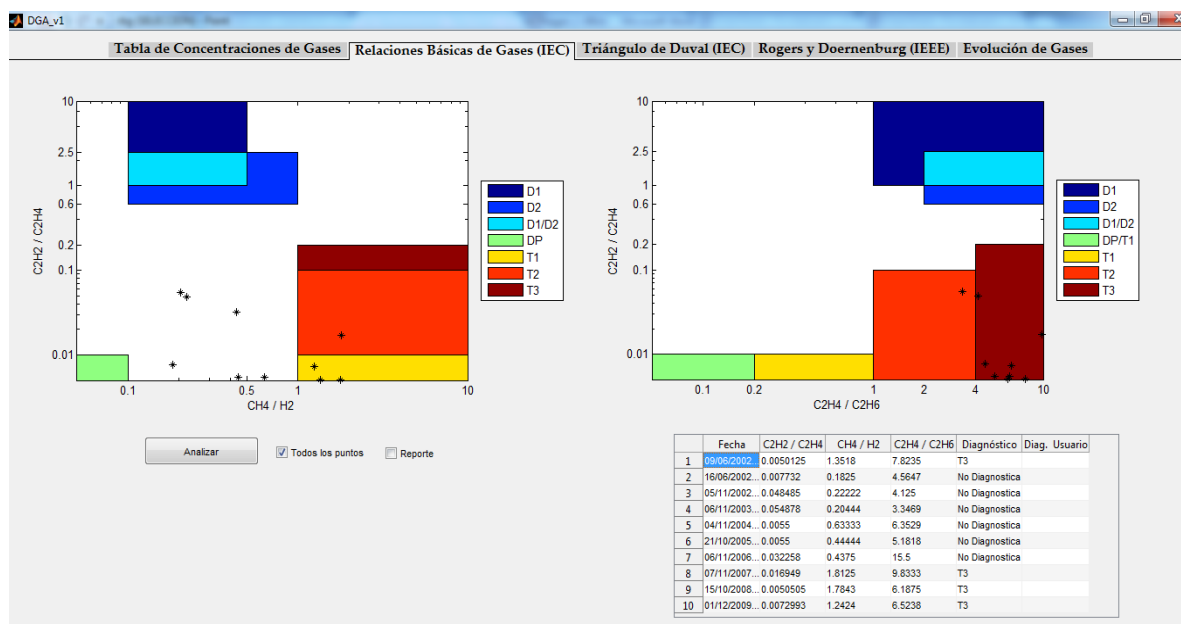


Fig. 4 - Relaciones básicas de gases con todos los análisis representados.

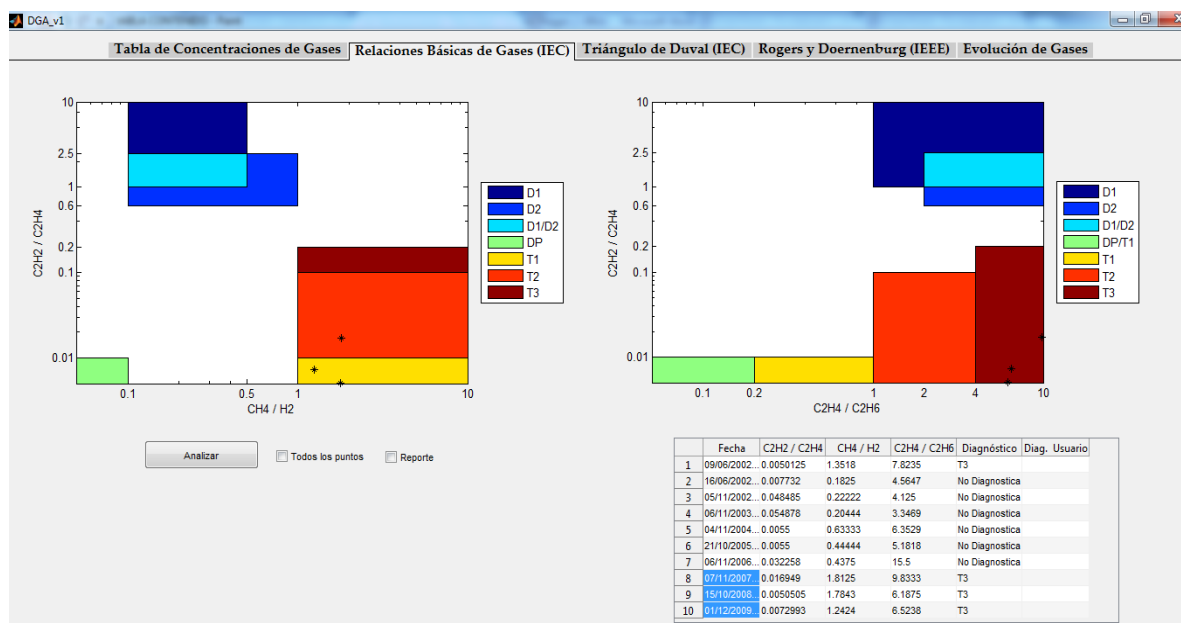


Fig. 5 - Relaciones básicas de gases con tres análisis seleccionados.

2.2. Triángulo de Duval

Ejecutando la aplicación "Analizar" en la pestaña de "Triángulo de Duval", se obtienen los resultados correspondientes aplicando lo expuesto en 2.1.3. En la Fig. 6 se presentan los resultados con todo el historial de datos mientras que en la Fig. 7 se presentan los resultados obtenidos en los últimos tres ensayos (07/11/2007,15/10/2008,01/12/2009).

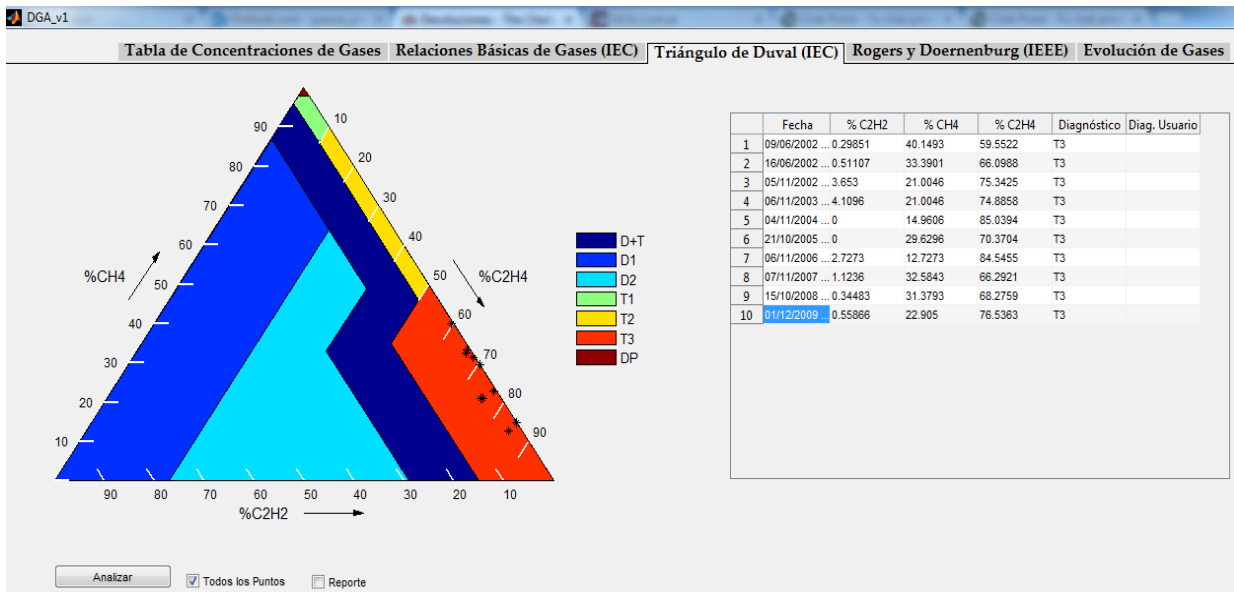


Fig. 6 - Triángulo de Duval con todos los análisis representados.

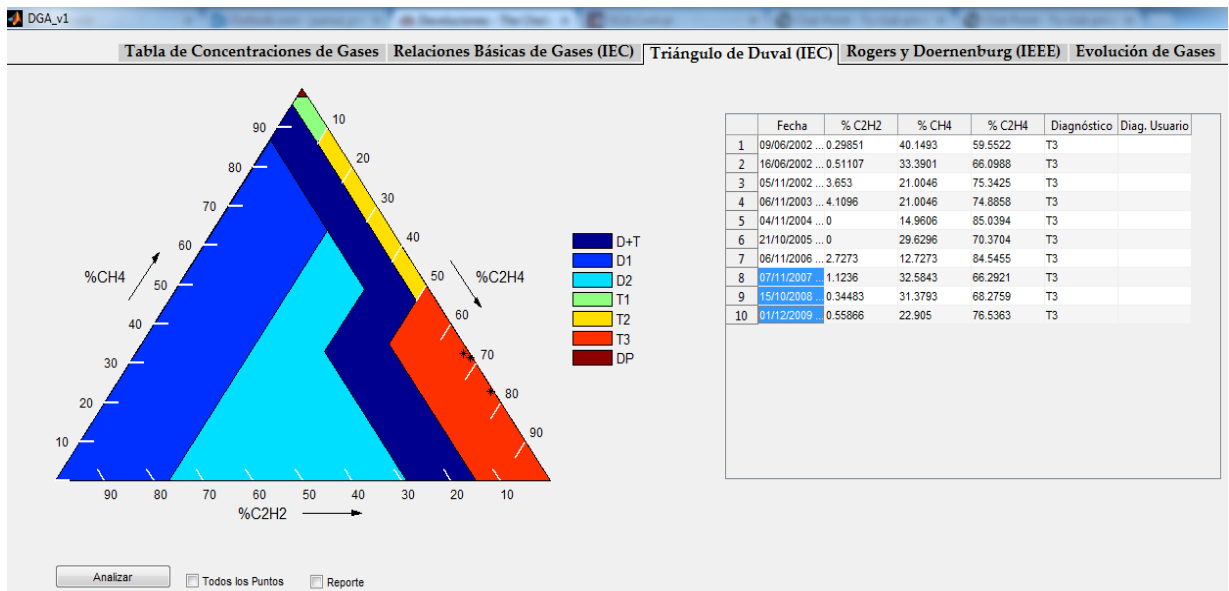


Fig. 7 - Triángulo de Duval contra análisis seleccionados.

2.3. Rogers y Doernenburg

Ejecutando la aplicación “Análisis” en la pestaña de “Rogers y Doernenburg”, se obtienen los resultados correspondientes aplicando lo expuesto en 2.1.4. En la Fig. 8 se presentan los resultados con todo el historial de datos.

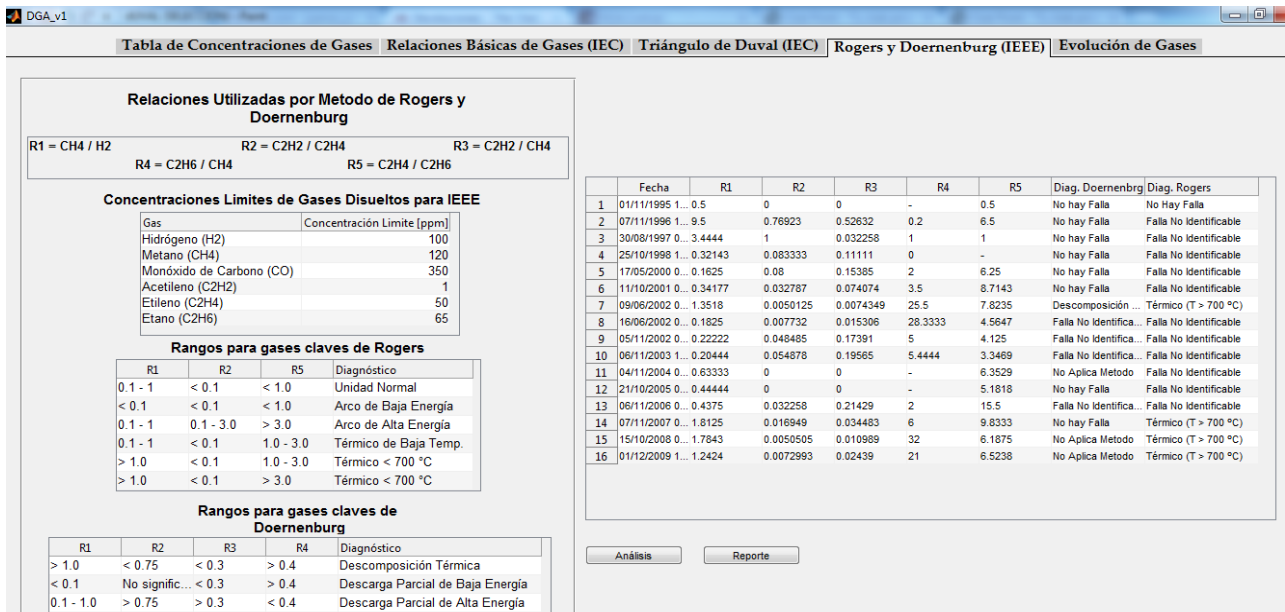


Fig. 8 - Análisis completo por método de Doernenburg y Rogers.

2.4. Diagnóstico

Para fijar ideas, en la Tabla II se resumen los diagnósticos obtenidos aplicando los métodos de IEC (Relación Básica de Gases y Duval) e IEEE (Doernenburg y Rogers).

Tabla II - Resumen de defectos identificados para diagnóstico

Fecha	IEC 60599 [1]		IEEE C57.104 - 2008 [2]	
	Rel- Bas. de Gases	Duval	Doernenburg	Rogers
09/06/2002	T3	T3	Falla No Identificable	Falla No Identificable
07/11/2007	T3	T3	No Hay Falla	T > 700 °C
15/10/2008	T3	T3	No Aplica Método	T > 700 °C
01/12/2009	T3	T3	No Aplica Método	T > 700 °C

Del análisis de los resultados, se concluye que para el ejemplo considerado:

- En el análisis correspondiente al 09/06/2002 los métodos de IEC [1] solamente identifican un defecto y es con $T > 700$ °C, por lo que días después se le realiza un nuevo análisis para corroborar el defecto y tomar acciones correctivas. Esto se ven los siguientes años donde cada análisis no presenta defecto y la concentración de gases disminuyo considerablemente.
- En los análisis correspondientes al 07/11/2007, 15/10/2008 y 01/12/2009 los métodos, excepto el de Doernenburg, identifican un defecto térmico $T > 700$ °C. Por la experiencia adquirida esta máquina deber ser sacada de servicio para realizarle más ensayos a fin de identificar la problemática y evitar una falla que acabe con la vida de la máquina.

3. CONCLUSIONES

Como fue expuesto, el estudio de DGA requiere el manejo de un volumen de datos importante cuando uno se tiene que analizar un parque de transformadores grande, tanto más cuanto más pruebas deban analizarse y/o criterios normativos (IEC / IEEE) sean considerados.

A partir de ello, empleando las herramientas con que dispone el software Matlab ha sido posible desarrollar un programa donde se incorporaron los criterios de IEC e IEEE para el análisis de los resultados de DGA. Así el programa desarrollado permite:

- Realizar los análisis recomendados por las normas (IEC / IEEE) de forma veloz.
- Comparar entre los métodos de diagnóstico.
- Análisis de forma gráfica e intuitiva la evolución de defectos.
- Generar reportes personalizados.

- Versatilidad de aplicación, puesto que el programa es utilizable en cualquier transformador inmerso en aceite donde se requiera aplicar los métodos de análisis de IEC y/o IEEE.

Es importante destacar que mediante este trabajo queda demostrado que, para una herramienta de diagnóstico tan importante como es el DGA para los transformadores, no es necesario invertir una fortuna en una aplicación informática que lo realice. Siempre que haya inventiva y un poco de investigación se puede lograr una herramienta efectiva y con el detalle que el creador vea necesaria.

4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] “Norma IEC 60599, Guía para la interpretación de los análisis de gases disueltos y libres” - 2000 - Actualizada en 2007.
- [2] “Norma IEEE C57.104 - 2008, Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers” - 2008.
- [3] “Matlab, The Language Of Technical Computing” - MathWorks - 2011.