

Comparación de Aceites Dieléctricos Minerales y Vegetales en Relación a la Producción de Gases

Matias Meira^{#1}, Raúl Álvarez^{*2}, Leonardo Catalano^{*3}, Cristian Ruschetti^{#4}, Carlos Verucchi^{#5}

[#]INTELYMEC (UNCPBA) and CIFICEN (UNCPBA-CICPBA- CONICET)

Av. Del Valle 5737, (B7400JWI) Olavarría, Argentina

¹ matias.meira@fio.unicen.edu.ar

⁴ cruschet@fio.unicen.edu.ar

⁵ verucchi@fio.unicen.edu.ar

^{*} IITREE-LAT-FI-UNLP

Calle 48 y 116, (B1900AMF) La Plata, Bs. As. – ARGENTINA

² rea@iitree-unlp.org.ar

³ lcatalano@iitree-unlp.org.ar

Abstract— In the manufacture of power transformers, mineral oils distilled from petroleum have traditionally been used as liquid insulation. Oil is one of the essential components for the correct operation of a power transformer. Its functions are to ensure the isolation between active parts, evacuate the heat, and protect other insulators (such as paper) from moisture. Moreover, the analysis of insulating oil provides a diagnosis of the state of the transformer without removing it from service. In recent years have begun to use dielectric oils of vegetable sources. These new oils are biodegradable; improve the cooling of the transformer and have a high fire and flash point compared to mineral oils. However, its high cost and low evaluation in service (performance), still limit its application. For mineral oils, there is a clear link between each type of fault and the gases generated. This is due to the fact that there is a large database obtained from the study of numerous cases over many years. On the contrary, the limited field data related to vegetable oil compared to mineral oils, makes the analysis of dissolved gases unreliable. Some preliminary studies attempt to determine the differences between each type of oil. This paper presents a review of the difference between the gases formed in mineral and vegetable oils as result of the most common faults in transformers.

Resumen— En la producción comercial de transformadores de potencia han sido utilizados tradicionalmente aceites minerales derivados del petróleo como aislamiento líquido. El aceite es uno de los componentes esenciales para el correcto funcionamiento de un transformador de potencia. Sus funciones son garantizar el aislamiento entre partes activas, contribuir a la refrigeración, proteger de la humedad a otros aislantes (como el papel) y ofrecer la posibilidad de realizar un diagnóstico del estado de la máquina sin sacarla de servicio. En los últimos años han comenzado a difundirse aceites dieléctricos de origen vegetal. Estos nuevos aceites resultan biodegradables, mejoran la refrigeración de un transformador y tienen un alto punto de inflamación en comparación con los aceites minerales. Sin embargo, su elevado costo y su escasa evaluación en servicio (desempeño), aún limitan en cierto grado su aplicación. Para los aceites minerales existe una clara vinculación entre cada falla y la composición de gases disueltos que se originan. Esta vinculación ha quedado establecida en la base a un elevado número de casos observados a lo largo de muchos años. La limitada experiencia registrada con aceites vegetales frente a la gran base de conocimiento en los aceites

minerales, por el contrario, impide que el análisis de gases disueltos pueda ser considerado en estos casos como una herramienta de diagnóstico importante. Algunos estudios preliminares intentan determinar las diferencias entre cada tipo de aceite. En este trabajo se presenta una revisión de las diferencias entre aceites de origen mineral y vegetal orientada principalmente a la formación de gases producto de las fallas más comunes en transformadores.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad la mayoría de los transformadores de potencia siguen fabricándose con aislamientos impregnados papel – aceite. Esto se debe a dos motivos principales. El primero es por cuestiones de aislamiento. Los transformadores de potencia producidos comercialmente utilizan aislamiento sólido y aislamiento líquido. El aislamiento sólido es el papel, y se lo utiliza para garantizar el aislamiento entre espiras de un devanado y entre los devanados de primario y secundario entre sí. El aislamiento de aceite se usa para cubrir los espacios donde no se requiere aislamiento sólido. A su vez, el aceite penetra en el papel y cubre los espacios de aire mejorando su capacidad aislante. El segundo motivo por el que se utiliza aceite en un transformador radica en su condición de refrigerante. La circulación, natural o forzada, del aceite, permite transferir al exterior el calor generado por las pérdidas eléctricas.

La vida útil de un transformador está limitada por la vida útil del papel aislante (celulosa). A diferencia del aceite, la degradación del papel es irreversible y su reemplazo exige el desencubado del transformador, operación que involucra grandes costos. Para prolongar la vida útil del papel es imprescindible mantener inalterables las características del aceite en el que está inmerso. De lo anterior se concluye que, mediante un mantenimiento correcto del aceite, es posible prolongar la vida útil de todo el sistema aislante, incluyendo el papel [1].

La condición del aislamiento de aceite-papel se deteriora debido a diversas sollicitaciones (eléctricas, térmicas y ambientales) ocasionadas por la operación del transformador. El deterioro de las propiedades del aislamiento aceite-papel puede provocar fallas en un

transformador y, por consiguiente, en la red eléctrica de la cual forma parte. Por este motivo, para asegurar la calidad de servicio en las redes eléctricas, en la actualidad resulta imprescindible el monitoreo permanente del estado del aislamiento del transformador [2].

Durante mucho tiempo, el aceite utilizado en la mayoría de los transformadores y equipos eléctricos era el aceite mineral. Sin embargo, hace algunos años comenzó a cobrar notoriedad el uso de aceites no minerales (como los ésteres naturales y sintéticos y los aceites de silicona). Los aceites no minerales comenzaron a utilizarse con mucha frecuencia en aplicaciones donde el carácter inflamable de los aceites minerales resulta peligroso (como en interiores, en áreas urbanas o en transformadores ferroviarios) [3]–[5].

Si bien la aplicación de los nuevos aceites está en constante crecimiento, su comportamiento frente a diversas situaciones operativas no está comprobado [6].

En este trabajo se presenta una revisión general de los estudios realizados hasta el momento en los nuevos aceites. Se pone énfasis en el aspecto vinculado a la posibilidad de diagnóstico de fallas a través del análisis de gases disueltos.

II. TÉCNICAS EMPLEADAS PARA LA DETECCIÓN DE FALLAS EN TRANSFORMADORES

El análisis de gases disueltos (DGA) se ha utilizado durante muchos años como una herramienta efectiva y confiable para detectar fallas incipientes en transformadores inmersos en aceite mineral. Los enfoques actuales para interpretar los resultados de DGA identifican diferentes tipos de fallas en un transformador. La formación de gases ante fallas se debe a que la energía disipada rompe determinados enlaces químicos en el aceite. Esta ruptura ocasiona una recombinación que da origen a la formación de ciertos gases. En base a los gases que se encuentran en una muestra del aceite es posible identificar el tipo de falla que los produjo. Aunque las estructuras químicas del aceite mineral, los ésteres y el aceite de silicona son diferentes en cada caso, todas contienen enlaces similares (por ejemplo, enlaces C-H). Esto hace que los tipos de gases generados frente a diferentes fallas sean similares. Sin embargo, para una falla dada, las cantidades y proporciones de los gases pueden diferir de un fluido a otro [7]–[9].

Las técnicas más empleadas para evaluar la condición del aislamiento de los transformadores de potencia basadas en DGA e interpretación de los resultados son: la relación de Rogers (introducido en IEEE Std C57.104 [10]), la relación de Doernenburg [11], la relación IEC 60599:2015 [12], Gases Claves [10] y los triángulos de Duval [13]. En [14] y [15] se presenta una comparación entre cada una de ellas.

Estas técnicas interpretan la generación de gases de distinta manera a fin de realizar un diagnóstico de la máquina. Los métodos de relación de gases analizan, justamente, la relación existente entre diversos gases generados. La técnica de gases claves observa la presencia de un único gas generado que identifica el origen de la falla. Por su parte, el triángulo Duval utiliza tres gases disueltos (metano $-CH_4-$, etileno $-C_2H_4-$ y acetileno $-C_2H_2-$) para distinguir entre descargas parciales, fallas eléctricas (arco de alta y baja energía) y fallas térmicas (puntos calientes en diversos rangos de temperatura) [13], [16].

Existen, además, otras técnicas más recientes que proponen relacionar un mayor número de gases generados

por fallas para obtener el diagnóstico [17]. Concretamente se propone la utilización de un heptágono para mejorar la precisión en la clasificación de las fallas en relación a otras técnicas tales como los triángulos de Duval, la relación de Rogers, la relación de Doernenburg, la relación IEC 60599:2015 y Gases Clave.

Las diferentes técnicas de diagnóstico e interpretación de gases se aplicaron, en un principio, a aceites minerales que no contaran con conmutadores bajo carga (OLTC). Actualmente, están siendo adaptadas para compensar estas limitaciones y poder aplicarlas en transformadores con OLTC o con aceites no minerales (ésteres naturales o sintéticos) [8], [9], [18]–[21]. Para esto, es necesario realizar modificaciones sobre los límites empleados para el diagnóstico [4]. Sin embargo, para alcanzar un diagnóstico acertado del estado del transformador, en ocasiones es necesario aplicar una técnica según el resultado de otra. Por ejemplo, los triángulos 4 y 5 de Duval deben ser utilizados sólo para fallas identificadas previamente con el triángulo 1. De igual manera, los triángulos 4 y 5 de Duval nunca deben ser utilizados en caso de detección de descargas previamente con el triángulo 1.

Al combinar las diferentes técnicas por medio del desarrollo de algún programa de análisis, se obtiene una mayor precisión en el diagnóstico del transformador, como se presenta en [22]–[24]. Actualmente, éstos métodos combinados son aplicables a aceites minerales, pudiendo hacerse extensivos para aceites de éster natural.

III. DIFERENCIAS GENERALES ENTRE ACEITE MINERAL Y NATURAL

Desde el punto de vista estructural, los aceites minerales y los de origen vegetal son diferentes. Ambos poseen fortalezas y debilidades cuando se los emplea como aislantes y refrigerantes en transformadores [25]. En la Tabla I se realiza una comparación general de sus características.

Los ensayos que tradicionalmente se practican sobre aceites minerales, los procedimientos y la frecuencia de toma de muestras, son los mismos que se aplican para aceites vegetales. En algunos casos pueden presentarse diferencias en relación a la interpretación de los resultados.

A. Comparativa de aceites por DGA

El DGA se usa hace varias décadas en transformadores inmersos en aceite mineral y hay una gran base de conocimiento disponible [1], [10], [12], [26], [27]. Con la aparición de líquidos biodegradables y ésteres naturales, es importante conocer la manera en que se puede aplicar el DGA a ese tipo de líquidos, ya que la utilización de ésteres naturales en transformadores de potencia es creciente por los motivos antes mencionados (no contaminantes y no inflamables).

En la literatura hay un pequeño número de trabajos respecto a las diferencias entre aceites minerales y ésteres naturales en términos de formación de gases frente a distintas fallas.

Las herramientas necesarias para realizar los ensayos no son fáciles de conseguir. La detección de gases debe hacerse con un equipo de cromatografía a fin de distinguir los diferentes gases generados y sus respectivas concentraciones/proporciones.

TABLA I
COMPARACIÓN GENERAL DE LAS CARACTERÍSTICAS DE ACEITES DE DIFERENTE ORIGEN

Característica		Aceite de origen mineral	Aceite de origen vegetal
Uso		Altamente utilizado en potencia, distribución y medida	Altamente utilizado en distribución, y poco utilizado en potencia
Origen		Derivados del petróleo	Productos agrícolas
Es renovable?		No	Si - además biodegradable
Susceptibilidad a la oxidación		Baja	Alta
Estabilidad a oxidación	Hasta 100 °C	muy buena (condiciones de emergencia permitirían hasta 115 °C)	aceptable pero más baja que aceite mineral
	Mayores a 100 °C	muy mala (se degradan muy rápido las propiedades aislantes del aceite)	mantiene la estabilidad hasta los 160 °C
Efecto principal de la oxidación		Formación de ácidos carboxílicos (muy corrosivos)	Aumento de la viscosidad a largo plazo
Viscosidad	@ 40°C (mm ² /s)	9	30 a 42
	@ 100°C (mm ² /s)	2,5	5,25 a 9
Conductividad térmica @ 25°C (W/mK)		0,126	0,144 a 0,17
Punto de combustión (°C)		170 -180	> 350
Punto de inflamación (°C)		160 - 170	> 300
Resistividad		Menor	Mayor
Humedad contenida para rigidez dieléctrica = 30 kV/mm		50 ppm	600 ppm aprox.
Tensión de ruptura (IEC 60156 2.5mm [28])		> 70 kV [29]	> 75 kV [30]
Capacidad térmica del aislamiento papel-aceite		Menor	Mayor
Formación de lodos		Sí, afectando la refrigeración	Casi inexistente
Número de neutralización y factor de disipación		Varían según la oxidación	Varían según la humedad
DGA		Gran base de datos	Faltan investigaciones
Costo		Menor	2 a 3 veces mayor
Higroscópico?		No (menos que la celulosa)	Altamente (más que la celulosa)

Gran parte de los datos de la Tabla I son extraídos de [31].

Para el tratamiento de ésteres naturales se puede utilizar el mismo equipo de tratamiento de un aceite mineral. Aunque éster natural y aceite mineral son completamente miscibles, la mezcla entre los dos fluidos es indeseable y debe ser evitada en transformadores y equipos de tratamiento de aceite. La mezcla con aceite mineral aislante cambia el factor de disipación, disminuye el punto de inflamación y puede reducir el punto de combustión del éster natural. Por lo tanto, para descontaminar el equipo de tratamiento se deben sacar los filtros de aceite, realizar una recirculación con aceite vegetal durante 30 minutos y descartar este volumen de aceite usado. Después de la instalación de un nuevo filtro, el equipo está listo para el uso [32].

Por lo antes expuesto, existe mayor información del comportamiento de ésteres naturales respecto de aceites minerales en términos de ensayos físicos, químicos y eléctricos [33]–[36], mientras que el análisis de formación de gases es acotado.

En [37] se presenta una revisión de los métodos utilizados para la producción de aceite vegetal. Además se describen investigaciones experimentales sobre diferentes aceites, su caracterización y los desafíos que enfrentan. Se compara, de manera general, el comportamiento de los aceites naturales respecto de los minerales frente a la degradación.

En [38] se evalúa el comportamiento de envejecimiento del papel aislante sumergido en un éster natural comercialmente disponible y un éster sintético a través del experimento de envejecimiento acelerado. Se analizan las

condiciones del aceite en diferentes etapas del envejecimiento midiendo el valor de acidez, la concentración de 2-furaldehído (2-FAL) y la viscosidad cinemática. Además se utiliza un DGA para evaluar la degradación del papel y del aceite. Este estudio revela que el papel impregnado en ésteres naturales y sintéticos muestra un patrón de envejecimiento similar. Al igual que el aceite mineral convencional, las concentraciones disueltas de 2-FAL y de óxidos de carbono están estrechamente asociadas con la degradación del papel. Un éster natural a base de soja muestra un comportamiento de gas completamente diferente para un fallo térmico respecto a un éster sintético. Además, los gases producidos por este éster natural debido al envejecimiento térmico son cuantitativamente diferentes al del éster natural a base de aceite de girasol. Por otra parte, el triángulo de Duval parece ser aplicable para identificar la falla térmica (T1) en los líquidos aislantes de éster natural y sintético. Las tensiones de ruptura de éster sintético y éster natural disminuyen debido a la mezcla con aceite mineral.

Los aceites minerales tanto como los ésteres naturales muestran un patrón espectral relativamente similar en las respuestas dieléctricas en el dominio de la frecuencia, esto es, al aumentar la frecuencia, las pérdidas dieléctricas disminuyen. Sin embargo, los ésteres naturales exhiben mayor capacitancia y, mayores pérdidas y corrientes de polarización. En comparación con el éster natural, el aceite mineral produce más gases en volumen debido a descargas de baja energía y sobrecalentamiento del aceite. El análisis

de los resultados de DGA con triángulo Duval y los métodos de relación de gases de IEC diagnosticaron correctamente la falla, excepto para una muestra de éster natural con el método del triángulo de Duval. Por lo tanto, la relación de gases de IEC y el método del triángulo de Duval parecen ser aplicables para la interpretación de los resultados de DGA de ésteres naturales. Sin embargo, se necesita mayor investigación para identificar su aplicabilidad en diversos tipos de ésteres naturales [39].

En [40] y [41] se presenta un estudio comparativo entre los aceites minerales y diversos ésteres a partir del DGA. Se provocaron fallas eléctricas (falla de baja energía) y térmicas (liberación de gas) a escala de laboratorio, para luego comparar la formación de gases con los diferentes métodos de diagnóstico: relación de IEC, triángulo de Duval y gases clave. La extracción de gases se realizó de acuerdo a dos métodos descritos en IEC 60567:2011 [42] basado en cromatografía de gases (GC) (multi-cycle vacuum degassing y stripping). Para los fallos eléctricos, y especialmente para las descargas de baja energía, se crean los mismos gases principales (hidrógeno y acetileno) en proporciones relativamente iguales, confirmando así la eficiencia del método de gases clave para los aceites de éster. También se muestra que el triángulo clásico de Duval (triángulo 1) es aplicable para este tipo de falla confirmando los resultados reportados en la literatura [7]. Para las fallas térmicas y especialmente para la emisión de gases dispersos (fallos a baja temperatura), el etano (asociado al hidrógeno) constituye el gas clave de los ésteres naturales. Los triángulos nuevos de Duval pueden ser aplicados: el Triángulo 4 para el aceite mineral y el Triángulo 6 para los aceites del éster. Los métodos de extracción de gases y los resultados obtenidos son comparables con el aceite mineral, aunque la mayor viscosidad de los ésteres puede interferir con la extracción.

En [43], se investigó la generación de gases bajo sollicitaciones eléctricas en aceites vegetales (aceite de salvado de trigo y aceite de palma) y se compararon con aceites minerales. Los mayores gases generados debido a esta sollicitación fueron C_2H_2 y H_2 , siendo representativos de la condición de falla de arco. Sin embargo, la predicción de las relaciones Doernenburg, Rogers e IEC 60599 para el aceite mineral no aplica a las muestras de aceite vegetal. Algunos resultados DGA pueden quedar fuera de los métodos de relación de gases, sin poder dar un diagnóstico. Sin embargo, todas las muestras fueron interpretadas correctamente por medio del triángulo de Duval.

En [44] y [45] se analiza experimentalmente el rendimiento de un aceite mineral (Géminis X) y un éster natural (FR3) en términos de generación de gases bajo fallas eléctricas y térmicas. Las fallas simuladas en el laboratorio incluyen arcos eléctricos (chispas), descargas parciales (DP) y distintos tipos de puntos calientes (falla térmica). Además, los gases disueltos en el aceite debido a la falla fueron analizados por un sistema de monitoreo de gases on-line (TM8) y por un análisis de aceite de laboratorio. Los resultados obtenidos con ambos métodos son comparables, con una desviación del 30% bajo todas las fallas. Los principales hallazgos de este trabajo se resumen en la Tabla II. Igualmente, la metodología empleada durante los estudios realizados debe ser mejorada, por lo que se requieren mayores estudios. Por ejemplo, el sellado del

sistema (estanqueidad) necesita ser mejorado para proporcionar menores fugas de gases para la prueba de DP (la duración de la prueba debe extenderse a más de 4 días debido a la pequeña tasa de generación de gases). Además, se necesita un método de medición de temperatura más preciso a fin de evaluar las fallas térmicas de acuerdo a la temperatura media. Por otro lado, no se analizó el efecto de la degradación del papel aislante en el aceite.

En [46] se presentan resultados experimentales de la aplicación de la técnica de DGA en ésteres naturales con diferentes niveles de humedad. Las fallas analizadas fueron descargas (de acuerdo con ASTM D877) y sobrecalentamiento en cuatro aceites aislantes comerciales diferentes, uno mineral y tres ésteres naturales (un aceite de maíz, un aceite de girasol y un aceite de soja -FR3-). Se analizaron cinco gases clave (hidrógeno - H_2 -, metano - CH_4 -, etano - C_2H_6 -, etileno - C_2H_4 - y acetileno - C_2H_2 -) generados en ésteres naturales y se compararon con los generados en el aceite mineral. Para interpretar el tipo de falla se aplicó el triángulo clásico de Duval 1, el triángulo de Duval modificado 3, la relación de Roger, de Doernenburg y de IEC 60599. En términos generales, para ambas fallas, el triángulo Duval modificado fue el mejor método de diagnóstico para los casos estudiados. Sin embargo, la aplicación directa de los métodos clásicos desarrollados para aceites minerales necesita algunas modificaciones para aplicarse a ésteres naturales. Además, como se sugiere en [8], algunos límites de zona de los triángulos Duval modificados pueden necesitar ajustes adicionales para los ésteres naturales.

En [47] se comparó la formación de cinco gases (H_2 , CH_4 , C_2H_4 , C_2H_6 , C_2H_2) bajo la influencia de estrés térmico para un aceite mineral y ésteres naturales. El envejecimiento se realizó a lo largo de 1.600 horas a una temperatura de 150 °C. Los principales hallazgos fueron que el C_2H_6 detectado en el éster natural fue dos veces mayor que en el aceite mineral y que el CH_4 detectado en el éster natural fue 1/4 de la cantidad detectada en el aceite mineral. La cantidad de otros gases disueltos fue similar entre sí. Sin embargo, al limitarse al análisis del estrés térmico, es necesario analizar el estrés eléctrico como descargas corona y arcos a fin de establecer un criterio más preciso.

En [48] se presentan resultados experimentales de gases disueltos formados en un éster natural convencional (FR3), un éster natural basado en camelia y un aceite mineral convencional bajo un rango de fallas térmicas. La formación de gases característicos en ésteres naturales bajo esta condición de falla difiere de los aceites minerales. El gas característico del aceite mineral es el CH_4 , mientras que para los ésteres naturales son el C_2H_6 para el FR3 y H_2 y C_2H_6 para el éster de camelia. El criterio tradicional de relación de IEC no es adecuado para el diagnóstico en ésteres naturales. Además, los gases claves difieren entre los fluidos. Por lo tanto, los métodos tradicionales de diagnóstico para aceite mineral deben ser evaluados cuando se los aplica a ésteres naturales.

En [49] se analiza la generación de gases en monoésteres naturales (derivados de aceites de palma y arroz) con y sin doble enlace C-C en sus estructuras moleculares bajo fallas térmicas de baja temperatura (entre 200 y 300°C). El diagnóstico de fallas térmicas o eléctricas en ésteres

TABLA II
GENERACIÓN DE GASES DE UN ACEITE MINERAL Y UN ÉSTER NATURAL BAJO DISTINTAS FALLAS

	Falla eléctrica		Falla térmica
	Arco	DP	Punto caliente
Gemini X	-	Formación de gases ligeramente inferior	Gases claves: CH ₄ y C ₂ H ₄ . El triángulo de Duval reconoce correctamente todas las fallas térmicas
FR3	25% más de gases de falla bajo la misma energía de chispa	Bajo una misma amplitud de DP se generan mayores gases (debido a una mayor tasa de repetición de DP). Reconocidas en el Triángulo Duval ajustado. La generación de gases es determinada por la energía total de DP en lugar de la amplitud DP o el número DP	Genera menos gases a temperaturas más altas (> 300 °C) Gases claves: CH ₄ y C ₂ H ₄ , CO y C ₂ H ₆ . Debe hacerse una ligera revisión al triángulo de Duval para reconocer las fallas térmicas
Común a ambos	Cantidad de gases similares para una falla. El triángulo de Duval reconoce chispas como descargas de baja energía	La tasa de generación de gas aumenta para DP con amplitudes más altas.	Las velocidades de generación de gases se determinan principalmente por la temperatura del punto caliente.

minerales [50] y la aplicación de los métodos tradicionales han sido evaluados [46], coincidiendo en que el triángulo de Duval 3 es el que muestra el mejor rendimiento en función predicción de falla. Sin embargo, para fallas de baja temperatura, las concentraciones de gases generados son pequeñas y la aplicación de los métodos convencionales de relación de gases se vuelven imprecisos [12]. En este caso se utilizan otras relaciones, por ejemplo, la relación de C₂H₆ / CH₄ propuesta en [51] dentro del rango de 100 a 200°C. La relación propuesta en este trabajo es CO / CH₄ dentro del rango de 200 a 300°C. Ambas relaciones de gases alternativos dan noción de la temperatura de falla.

Otros aportes de [49] son:

- Los gases producidos por monoésteres naturales sin doble enlace C-C son similares a los producidos por el aceite mineral, en lugar de los producidos por monoésteres naturales que tienen doble enlace C-C.
- Los monoésteres naturales tienden a producir una mayor cantidad de monóxido de carbono, pero menos cantidad de metano que el aceite mineral.
- Los monoésteres naturales que tienen doble enlace C-C tienden a generar una notable cantidad de etano, acompañado de una pequeña cantidad de hidrógeno, mientras que los que no tienen doble enlace C-C y el aceite mineral no lo hacen. Por lo tanto el etano podría usarse como el gas clave para fallas de baja temperatura en ésteres naturales (válido únicamente para aceites que tienen doble enlace C-C).

IV. APORTE DE NORMATIVA

La normativa vigente para fluidos de uso dieléctrico e interpretación de formación de gases generados en transformadores proviene de IEEE e IEC.

En IEEE Std C57.104-1991 [52], la “condición” y los “gases clave” combinados con “velocidades de gaseado” son útiles en el análisis de ésteres naturales dieléctricos refrigerantes. Sin embargo, actualmente hay datos de campo insuficientes relativos al aceite mineral para indicar si se requieren modificaciones específicas [6].

La norma IEC 62770:2013 [53], por su parte, no menciona la formación de gases en los ésteres naturales respecto a los aceites minerales frente a fallas. Por el contrario, se limita a establecer especificaciones generales y valores límites para diferentes propiedades (físicas, químicas, eléctricas, entre otras) de los ésteres naturales y sus métodos de ensayo.

En TB 436 de CIGRE [31] se describe la experiencia del uso de ésteres sintéticos, ésteres naturales y fluidos de silicona (fluidos alternativos) y su desempeño en servicio. Menciona las diferencias físicas y químicas entre los fluidos alternativos y el aceite mineral.

V. DISCUSIÓN

Hasta la fecha no existen normativas exclusivas sobre la interpretación de los resultados de gases generados en transformadores inmersos en aceites vegetales. Tanto la IEC como la IEEE se limitan a especificar pautas relacionadas con la aceptación y mantenimiento de aceites vegetales.

Las investigaciones realizadas hasta el momento convergen en que para que estos fluidos tengan una total aceptación y empleo en transformadores de cualquier capacidad, deben demostrar ser seguros, económicos (en contraste con otras alternativas del mercado) y ofrecer un alto rendimiento térmico y eléctrico durante su vida de trabajo.

Resultados de estudios de envejecimiento acelerado a iguales condiciones de exposición de temperatura y tiempo [54] muestran que los ésteres naturales reducen las tasas de envejecimiento de la celulosa [55]. De esta manera, es posible alcanzar una mayor vida útil, para las mismas condiciones de carga, que la obtenida en transformadores sumergidos en aceite mineral.

El DGA, utilizado durante muchas décadas en transformadores inmersos en aceite mineral, debe ser adaptado para el caso de los aceites vegetales, dadas las diferencias existentes, a fin de poder introducir algunas consideraciones para el diagnóstico por medio de relaciones de gases, gases claves y el clásico triángulo de Duval. Actualmente, debido al incremento en el empleo de aceites vegetales, es necesaria una mayor investigación en el envejecimiento y estimación de vida útil a escala real y en.

TABLA III
CANTIDAD DE GASES GENERADOS EN ACEITES DE DIFERENTE ORIGEN FRENTE A UNA FALLA

Ref.	Compara con		Bajo	Gases generados	
				Similares	Diferentes
[38]	Papel impregnado en éster natural	Éster sintético	Envejecimiento	•	
[38]	Éster natural base de soja	Éster sintético	Falla térmica		•
[38]	Éster natural base de soja	Éster natural base de aceite de girasol	Envejecimiento térmico		•
[38]	Aceite mineral	Éster natural	Descargas de baja energía y sobrecalentamiento		•
[48]	Éster natural convencional (FR3)	Éster natural basado en camelia	Falla térmica		•
[49]	Monoésteres naturales sin doble enlace CC	Aceite mineral	Falla térmica de baja temperatura	•	
[49]	Monoésteres naturales sin doble enlace CC	Monoésteres naturales con doble enlace CC	Falla térmica de baja temperatura		•

TABLA IV
APLICABILIDAD DE LOS DIFERENTES MÉTODOS DE INTERPRETACIÓN DE DGA EN ÉSTERES NATURALES

Ref.	Tipo de aceite	Bajo	Método que aplica			
			Triángulo 1 de Duval	Triángulo 3 de Duval	Triángulo 6 de Duval	Gases claves
[38]	Éster natural Éster sintético	Falla térmica (T1)	•			
[40], [41]	Éster natural	Falla eléctrica (descargas de baja energía)	•			•
[46]	Éster natural	Descargas y sobrecalentamiento		•		
[49]	Monoéster natural	Falla térmica de baja temperatura		•		

TABLA V
GASES CLAVES FRENTE A UNA FALLA PARA ÉSTERES NATURALES

Ref.	Tipo de aceite	Bajo	Gas clave		
			H ₂	C ₂ H ₂	C ₂ H ₆
[40], [41]	Éster natural	Falla eléctrica (descargas de baja energía)	•	•	
[40], [41]	Éster natural	Falla térmica (fallas a baja temperatura)	•		•
[47]	Éster natural	Estrés térmico (envejecimiento)			•
[48]	Éster natural (FR3)	Falla térmica			•
[48]	Éster natural basado en camelia	Falla térmica	•		•
[49]	Monoéster natural con doble enlace CC	Falla térmica de baja temperatura	•		•

los métodos de diagnóstico de transformadores en servicio con éster natural (inspección y monitoreo) [56]. En la Tabla III se compara la cantidad de gases generados entre diversos tipos de aceites de diferente origen bajo un tipo de falla específica. En la Tabla IV se analiza la aplicabilidad de los diferentes métodos de interpretación de DGA en ésteres naturales. En la Tabla V se indican los gases claves producidos en ésteres naturales ante un tipo de falla específico. Sin embargo, es necesario realizar un mayor análisis a fin de establecer un criterio más preciso. La diversidad de resultados obtenidos, y las variaciones existentes entre los aceites, hacen que las conclusiones arribadas hasta el momento sean insuficientes. Por ejemplo, en [38] el método de relación de gases de IEC identifica fallas térmicas, siendo aplicable tanto para aceites minerales como ésteres naturales. Sin embargo, en el caso presentado en [48], el criterio tradicional de relación de gases de IEC no resultó adecuado para identificar una falla térmica en ésteres naturales.

VI. CONCLUSION

Los aceites de origen vegetal son un posible sustituto para el tradicionalmente empleado aceite mineral, máxime donde se requieran características de bajo punto de inflamabilidad y mayor compatibilidad medioambiental. Su comportamiento y desempeño frente a diferentes tipos de falla está siendo analizado, requiriendo una evaluación en servicio real (hasta el momento los ensayos son a escala de laboratorio).

El DGA ha demostrado ser aplicable a aceites de origen vegetal, aunque se requieren modificaciones en los métodos de interpretación de los resultados. Información histórica con este tipo de técnica y su diagnóstico a través del triángulo de Duval deben empezar a construirse. Son necesarios más estudios para la caracterización de los gases presentes en los ésteres naturales en los momentos de fallas para formar una base del conocimiento que ayude a la toma de decisiones, precisa y confiable.

Las conclusiones arribadas hasta el momento de los trabajos sugieren mayor investigación debido a la diversidad de resultados. Se debe determinar la factibilidad de aplicación de los criterios de análisis para los diversos tipos de ésteres naturales. Es necesario el empleo de metodologías adecuadas durante los estudios de generación de gases frente a distintas fallas. Es imprescindible asegurar la hermeticidad de los recipientes a fin de evitar la fuga de gases y contaminación del aceite con el medio ambiente. Además, la extracción y análisis de gases disueltos por cromatografía gaseosa debe realizarse bajo normativa vigente para poder obtener resultados viables.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó gracias a los aportes de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata, de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica, del CONICET y de la CIC-PBA.

REFERENCIAS

- [1] CIGRE Technical Brochure 323, "Ageing of cellulose In mineral-oil insulated transformers," *Task Force D1.01.10 CIGRE*, Oct. 2007.
- [2] CIGRE Technical Brochure 227, "Life Management Techniques For Power Transformers," *Working Group A2.18 CIGRE*, 2003.
- [3] M. Lashbrook and M. Kuhn, "The use of ester transformer fluids for increased fire safety and reduced costs," in *Cigre Session*, 2012.
- [4] CIGRE Technical Brochure 443, "DGA in Non-Mineral Oils and Load Tap Changers and Improved DGA Diagnosis Criteria," *Working Group D1.31*, 2010.
- [5] N. A. Gomez, R. Abonia, H. Cadavid, and I. H. Vargas, "Chemical and spectroscopic characterization of a vegetable oil used as dielectric coolant in distribution transformers," *Journal of the Brazilian Chemical Society*, vol. 22, no. 12, pp. 2292–2303, 2011.
- [6] "IEEE Guide for Acceptance and Maintenance of Natural Ester Fluids in Transformers," *IEEE Std C57.147-2008*, pp. 1–31, Jul. 2008.
- [7] Imad-U-Khan, Z. Wang, I. Cotton, and S. Northcote, "Dissolved gas analysis of alternative fluids for power transformers," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 23, no. 5, pp. 5–14, 2007.
- [8] M. Duval, "The duval triangle for load tap changers, non-mineral oils and low temperature faults in transformers," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 24, no. 6, pp. 22–29, Dec. 2008.
- [9] M. Duval, "Calculation of DGA limit values and sampling intervals in transformers in service," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 24, no. 5, pp. 7–13, 2008.
- [10] "IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers," *IEEE Std C57.104-2008 (Revision of IEEE Std C57.104-1991)*, pp. 1–36, Feb. 2009.
- [11] E. Dornenburg and W. Strittmatter, "Monitoring oil-cooled transformers by gas-analysis," *Brown Boveri Review*, vol. 61, no. 5, pp. 238–247, 1974.
- [12] IEC 60599:2015, "Mineral oil-filled electrical equipment in service - Guidance on the interpretation of dissolved and free gases analysis."
- [13] M. Duval, "A review of faults detectable by gas-in-oil analysis in transformers," *IEEE electrical Insulation magazine*, vol. 18, no. 3, pp. 8–17, 2002.
- [14] J. T. Sarria-Arias, N. A. Guerrero-Bello, and E. Rivas-Trujillo, "Estado del arte del análisis de gases disueltos en transformadores de potencia," *Revista Facultad de Ingeniería (Fac. Ing.)*, vol. 23, no. 36, pp. 105–122, Jun. 2014.
- [15] J. Faiz and M. Soleimani, "Dissolved gas analysis evaluation in electric power transformers using conventional methods a review," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 24, no. 2, pp. 1239–1248, 2017.
- [16] M. Duval, "Dissolved gas analysis: It can save your transformer," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 5, no. 6, pp. 22–27, 1989.
- [17] O. E. Gouda, S. H. El-Hoshy, and H. H. El-Tamaly, "Proposed heptagon graph for DGA interpretation of oil transformers," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 12, no. 2, pp. 490–498, 30 2018.
- [18] M. Duval, "The duval triangle for Itcs, alternative fluids and other applications," in *76th Doble International Client Conference*, Boston, USA, 2009.
- [19] M. Duval and R. Baldyga, "Stray gassing of FR3 oils in transformers in service," in *76th Doble International Client Conference*, Boston, USA, 2009.
- [20] M. Duval, "New frontiers of DGA interpretation for power transformers and their accessories," *Society of Electrical and Electronics Engineers in Israel (SEEDI)*, pp. 1–8, 2012.
- [21] N. Moodley and C. T. Gaunt, "Low energy degradation triangle for power transformer health assessment," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 24, no. 1, pp. 639–646, 2017.
- [22] J. S. Piegari, R. E. Álvarez, and L. J. Catalano, "Herramienta de gestión y análisis para los ensayos de DGA en transformadores de potencia inmersos en aceite mineral," in *XVI Encuentro Regional Iberoamericano de CIGRÉ (Puerto Iguazú, 17 al 21 de mayo de 2015)*, 2015.
- [23] S. Singh, D. Joshi, and M. N. Bandyopadhyay, "Software Implementation of Duval Triangle Technique for DGA in Power Transformers," *International Journal of Electrical Engineering*, vol. 4, no. 5, pp. 529–540, 2011.
- [24] N. V. Reddy, "Dissolved Gas Analysis—An Early Identification of Faults in High Voltage Power Equipment using MATLAB GUI," MTEch thesis, National Institute of Technology, Rourkela, Orissa, India, May. 2014.
- [25] S. Tenbohlen, I. Höhlelein, M. Lukas, A. Müller, K. Schröder, and U. Sundermann, "Dynamic Behaviour of Fault Gases and Online Gas Sensors," in *Cigre Session*, 2016.
- [26] CIGRE Technical Brochure 296, "Recent developments in DGA interpretation," *Joint Task Force D1.01/A2.11 CIGRE*, Oct. 2004.
- [27] CIGRE Technical Brochure 393, "Thermal Performance of Transformers," *Working Group A2.24 CIGRE*, Oct. 2009.
- [28] IEC 60156:1995, "Insulating liquids - Determination of the breakdown voltage at power frequency - Test method."
- [29] Nynas Nytro 10GBN Product Data Sheet, <http://www.promelsa.com.pe/pdf/68102017.pdf>.
- [30] M&I Materials MIDEL® eN TDS 5 Product Overview, http://static.mimaterials.com/midel/documents/technical/MIDEL_eN_1204_UK.pdf
- [31] CIGRE Technical Brochure 436, "Experiences in service with new insulating liquids," *Working Group A2.35 CIGRE*, pp. 1–95, 2010.
- [32] A. Sbravati, M.N. Martins, J.C. Gomes, F. Paes, and D. Pires, "Límites de Investigación, Tratamiento y Regeneración de Transformadores Llenos con Fluidos Basados en Éster Natural (Aceite Vegetal Aislante)," in *XVI Encuentro Regional Iberoamericano de CIGRÉ (Puerto Iguazú, 17 al 21 de mayo de 2015)*, 2015.
- [33] S. Tenbohlen *et al.*, "Application of vegetable oil-based insulating fluids to hermetically sealed power transformers," in *Cigre session*, 2008, vol. 42, pp. 24–29.
- [34] E. Gockenbach and H. Borsi, "Natural and synthetic ester liquids as alternative to mineral oil for power transformers," in *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2008. CEIDP 2008. Annual Report Conference on*, Quebec, QC, Canada, 2008, pp. 521–524.
- [35] M. Marci, I. Kolcunová, and J. Kurimský, "Dielectric properties of natural esters," in *Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2011 10th International Conference on*, Rome, Italy, 2011, pp. 1–4.
- [36] C. Perrier and A. Beroual, "Experimental investigations on mineral and ester oils for power transformers," in *Electrical Insulation, 2008. ISEI 2008. Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on*, Vancouver, BC, Canada, 2008, pp. 178–181.
- [37] M. Rafiq *et al.*, "Use of vegetable oils as transformer oils—a review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 52, pp. 308–324, 2015.
- [38] K. Bandara, C. Ekanayake, and T. K. Saha, "Compare the performance of natural ester with synthetic ester as transformer

- insulating oil,” in *Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM), 2015 IEEE 11th International Conference on the*, Sydney, NSW, Australia, 2015, pp. 975–978.
- [39] K. Bandara, C. Ekanayake, and T. K. Saha, “Comparative study for understanding the behaviour of natural ester with mineral oil as a transformer insulating liquid,” in *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 2014 IEEE Conference on*, Des Moines, IA, USA, 2014, pp. 792–795.
- [40] C. Perrier, M. Marugan, M. Saravolac, and A. Beroual, “DGA comparison between ester and mineral oils,” in *2011 IEEE International Conference on Dielectric Liquids*, 2011, pp. 1–4.
- [41] C. Perrier, M. Marugan, and A. Beroual, “DGA comparison between ester and mineral oils,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 19, no. 5, 2012.
- [42] IEC 60567:2011, Edition 4.0, “Oil-filled electrical equipment – Sampling of gases and analysis of free and dissolved gases – Guidance.”
- [43] M. H. A. Hamid, M. T. Ishak, M. M. Ariffin, N. I. A. Katim, N. A. M. Amin, and N. Azis, “Dissolved gas analysis (DGA) of vegetable oils under electrical stress,” in *2017 International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS)*, Sanur, Indonesia, 2017, pp. 29–34.
- [44] S. Li, “Study of Dissolved Gas Analysis under Electrical and Thermal Stresses for Natural Esters used in Power Transformers,” MPhil thesis, The University of Manchester, Manchester, UK, 2012.
- [45] Z. Wang, X. Wang, X. Yi, S. Li, and J. V. Hinshaw, “Gas generation in natural ester and mineral oil under partial discharge and sparking faults,” *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 29, no. 5, pp. 62–70, 2013.
- [46] H. Wilhelm, C. Santos, and G. Stocco, “Dissolved gas analysis (DGA) of natural ester insulating fluids with different chemical compositions,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 21, no. 3, pp. 1071–1078, 2014.
- [47] K. Dongjin and K. Kyosun, “The criteria of dissolved gas analysis in natural Ester fluid,” in *Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), 2012 International Conference on*, Bali, Indonesia, 2012, pp. 901–904.
- [48] Y. Liu, J. Li, and Z. Zhang, “Fault gases dissolved in vegetable insulating oil under electrical faults,” in *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 2013 IEEE Conference on*, Shenzhen, China, 2013, pp. 198–201.
- [49] A. Rajab, M. Tsuchie, M. Kozako, M. Hikita, and T. Suzuki, “Low thermal fault gases of various natural monoesters and comparison with mineral oil,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 23, no. 6, pp. 3421–3428, Dec. 2016.
- [50] N. A. Muhamad, B. T. Phung, T. R. Blackburn, and K. X. Lai, “Comparative study and analysis of DGA methods for transformer mineral oil,” in *Power Tech, 2007 IEEE Lausanne*, 2007, pp. 45–50.
- [51] M. Tsuchie, M. Kozako, M. Hikita, and E. Sasaki, “Modeling of early stage partial discharge and overheating degradation of paper-oil insulation,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 21, no. 3, pp. 1342–1349, 2014.
- [52] “IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers,” *IEEE Std C57.104-1991*, p. 0_1, 1992.
- [53] IEC 62770:2013, “Fluids for electrotechnical applications - Unused natural esters for transformers and similar electrical equipment.”
- [54] P. Hopkinson, “Panel discussion to focus on natural ester fluids,” *The Line*, no. 240, pp. 8–11, 2006.
- [55] J. Luksich, “Loading guide A and B factors for envirotemp FR3 fluid and thermally upgraded kraft insulation,” Report TP03-DR-009. Cooper Power System, 2003.
- [56] D. Fernando-Navas, H. Cadavid-Ramírez, and D. F. Echeverry-Ibarra, “Aplicación del aceite dieléctrico de origen vegetal en transformadores eléctricos,” *Ingeniería y Universidad*, vol. 16, no. 1, 2012.