

**DISEÑO DE UNA PLATAFORMA DIGITAL PARA
DETECCIÓN Y DIAGNÓSTICO DE FALLAS
INCIPIENTES O AVANZADAS PARA
TRANSFORMADORES DE POTENCIA, BASADO
EN EL ANÁLISIS DE GASES DISUELTOS (DGA).**



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE QUITO

CARRERA DE ELECTRICIDAD

**DISEÑO DE UNA PLATAFORMA DIGITAL PARA
DETECCIÓN Y DIAGNÓSTICO DE FALLAS
INCIPIENTES O AVANZADAS PARA
TRANSFORMADORES DE POTENCIA, BASADO
EN EL ANÁLISIS DE GASES DISUELTOS (DGA).**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero Eléctrico

AUTOR: BRANDON STEVE CHIRIBOGA
VALENCIA
TUTOR: ALEX DAVID VALENZUELA SANTILLÁN

Quito -Ecuador
2022

Brandon Steve Chiriboga Valencia

DISEÑO DE UNA PLATAFORMA DIGITAL PARA DETECCIÓN Y DIAGNÓSTICO DE FALLAS INCIPIENTES O AVANZADAS PARA TRANSFORMADORES DE POTENCIA, BASADO EN EL ANÁLISIS DE GASES DISUELTOS (DGA).

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2022

Carrera de Electricidad

Breve reseña histórica e información de contacto.



Brandon Steve Chiriboga Valencia (Y'1998 – M'04) Realizó sus estudios secundarios en la Institución Educativa Fiscal Tarqui con título de bachiller en ciencias. Estudiante de la carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en el Diseño de una plataforma digital para detección y diagnóstico de fallas incipientes o avanzadas para transformadores de potencia, basado en el análisis de gases disueltos (DGA). bchiribogav@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Alex David Valenzuela Santillán (Y'1989). Realizó sus estudios superiores en la Escuela Politécnica Nacional de Quito, donde se graduó de Ingeniero Eléctrico en diciembre 2013, Además realizó estudios de maestría en Newcastle University en Reino Unido, donde obtuvo el título en Power Distribution Engineering MSc. Actualmente es profesor ocasional a tiempo completo en la Universidad Politécnica Salesiana. avalenzuela@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

©2022 Universidad Politécnica Salesiana

QUITO - ECUADOR

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Brandon Steve Chiriboga Valencia con documento de identificación N° 1720494408 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 20 de mayo del año 2022

Atentamente,



Brandon Steve Chiriboga Valencia

1720494408

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Yo, Brandon Steve Chiriboga Valencia con documento de identificación N° 1720494408, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Artículo Académico “Diseño de una plataforma digital para detección y diagnóstico de fallas incipientes o avanzadas para transformadores de potencia, basado en el análisis de gases disueltos (DGA).”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 20 de mayo del año 2022

Atentamente,



Brandon Steve Chiriboga Valencia

1720494408

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Alex David Valenzuela Santillán con documento de identificación N° 1721848644, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DISEÑO DE UNA PLATAFORMA DIGITAL PARA DETECCIÓN Y DIAGNÓSTICO DE FALLAS INCIPIENTES O AVANZADAS PARA TRANSFORMADORES DE POTENCIA, BASADO EN EL ANÁLISIS DE GASES DISUELTOS (DGA), realizado por Brandon Steve Chiriboga Valencia con documento de identificación N° 1720494408, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 20 de mayo del año 2022

Atentamente,



Ing. Alex David Valenzuela Santillán, M. Sc
1721848644

ÍNDICE GENERAL

Resumen	1
1 Introducción	2
2 Marco teórico	3
2.1 Triángulos y Pentágonos de Duval.....	4
2.2 Descomposición del papel (Kraft)impregnado en aceite.....	8
2.3 Descomposición del aceite	8
2.4 Energía requerida para romper los hidrocarburos	8
2.5 Oxígeno y Nitrógeno	9
2.6 Definiciones del tipo de ensayo (muestra)	9
2.7 Resultados DGA.....	10
3 Formulación del problema	10
4 Análisis de resultados.....	11
4.1 Caso de estudio 1	12
4.2 Caso de estudio 2.....	13
5 Conclusiones y recomendaciones	14
5.1 Discusión de resultados y trabajos futuros.	14
6 Referencias.....	14
6.1 Matriz de Estado del Arte.....	18
6.2 Resumen de Indicadores.....	21
7 Anexos	22

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de evaluación del estado de salud del transformador [autor].	3
Figura 2. Triangulo 1 de Duval [24].	5
Figura 3. Triangulo 4 de Duval [24]	5
Figura 4. Triangulo 5 de Duval [24].	6
Figura 5. Pentágono 1 de Duval [30].	8
Figura 6. Pentágono 2 de Duval [30].	8
Figura 7. Proceso de toma de decisiones basados en DGA [4].	10
Figura 8. Análisis de históricos	12
Figura 9. Intensidad de energía normalizada.	12
Figura 10. Análisis por descomposición de papel.	12
Figura 11. Triángulo de Duval C1	13
Figura 12. Análisis de históricos C2.	13
Figura 13. Intensidad de energía normalizada C2.	13
Figura 14. Análisis por descomposición de papel C2.	13
Figura 15. Triángulo de Duval C2	13
Figura 16. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.	21
Figura 17. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.	21
Figura 18. Indicador de solución - Estado del arte.	21

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Seis averías principales identificables por DGA [4].	4
Tabla 2. Fallas secundarias identificables por DGA [25].	5
Tabla 3. Límites numéricos del triángulo 1 [25].	5
Tabla 4. Límites numéricos del triángulo 4 [24].	5
Tabla 5. Límites numéricos del triángulo 5 [25].	6
Tabla 6. Resultados del análisis de los patrones de fallas por razones de gas [27].	6
Tabla 7. Estudio de los patrones de fallas por razones de gas [27].	6
Tabla 8. Diagnóstico de fallas por relación de dos gases [29].	7
Tabla 9. Energía requerida para romper los hidrocarburos [34].	8
Tabla 10. Diferencia de unidades selladas de unidades con respiración libre [4].	9
Tabla 11. Especificaciones del transformador C1.	11
Tabla 12. Datos de las muestras DGA C1.	11
Tabla 13. Especificaciones del transformador C2.	11
Tabla 14. Datos de las muestras DGA C2.	11
Tabla 15. Matriz de estado del arte.	18

DISEÑO DE UNA PLATAFORMA DIGITAL PARA DETECCIÓN Y DIAGNÓSTICO DE FALLAS INCIPIENTES O AVANZADAS PARA TRANSFORMADORES DE POTENCIA, BASADO EN EL ANÁLISIS DE GASES DISUELTOS (DGA).

Resumen

La presente investigación expone el análisis de la generación de gases en la cuba dentro del transformador, debido a que estos se generan a causa de fallas térmicas, fallas eléctricas, estrés mecánico y condiciones ambientales adversas, además de incompatibilidad con ciertos materiales. Por esta razón se evalúa la concentración de cinco gases combustibles hidrógeno (H_2), metano (CH_4), acetileno (C_2H_2), etileno (C_2H_4), etano (C_2H_6) producidos por la descomposición del aceite, así como la cantidad de oxígeno (O_2) que acelera la despolimerización del papel produciendo monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO_2). Sin embargo, la generación de los gases no puede ser posible sin la energía necesaria para romper los enlaces de hidrocarburos, de esta manera el análisis individual de estos gases y en función de varias combinaciones permiten identificar la naturaleza de la falla.

Palabras Clave: NEI, Hidrólisis química, furanos.

Abstract

This research exposes the analysis of the generation of gases in the tank inside the transformer because these are generated due to thermal failures, electrical failures, mechanical stress, and adverse environmental conditions, in addition to incompatibility with certain materials. For this reason, the concentration of five combustible gases hydrogen (H_2), methane (CH_4), acetylene (C_2H_2), ethylene (C_2H_4), ethane (C_2H_6) produced by the decomposition of the oil is evaluated, as well as the amount of oxygen that accelerates the depolymerization of the paper producing carbon monoxide (CO) and carbon dioxide (CO_2). However, the generation of gases cannot be possible without the energy necessary to break the hydrocarbon bonds, in this way the individual analysis of these gases and depending on several combinations allow to identify the nature of the failure.

Keywords: NEI, Chemical hydrolysis, furans.

1 Introducción

Los transformadores de potencia son robustas máquinas eléctricas. Además, soportan fallas eléctricas, mecánicas y adversidades medio ambientales con una durabilidad y confiabilidad mínima de 20 años llegando a alcanzar una vida útil de 35 años en los mejores casos. Para ello se recomienda brindar un mantenimiento programado para mejorar su tiempo de utilidad, ya que son un 60% de la inversión total dentro de una subestación [1]–[4].

Principalmente se utiliza aceite mineral como medio dieléctrico, refrigerante y protector del papel Kraft, debido a su bajo costo. Actualmente la preocupación ambiental busca remplazarlos por aceites vegetales con mejor biodegradabilidad para uso eléctrico[5]. Por otro lado, los aceites vegetales tienen problemas en temperaturas bajas debido a su congelación, además son costosos ya que se usan en la industria alimentaria, como el aceite de coco virgen que tienen propiedades como alto voltaje de ruptura y bajo contenido de humedad [6], [7].

Un transformador nuevo no siempre garantiza que funcione correctamente, debido a que pudo haber ocurrido una contaminación del aceite aislador mineral (aceite) durante su ensamblaje [8]. Estas máquinas deben ser ensambladas de manera en que sus materiales sean compatibles entre sí, ya que algunos materiales de construcción nuevos contienen epóxidos, poliuretano y cobre que pueden funcionar como catalizadores que contaminan el aceite acelerando la pérdida de sus características dieléctricas [9].

El diagnóstico de fallas basado en el análisis de gases disueltos (DGA) en el aceite tiene su origen en 1960, desde entonces la IEEE con una gran

recopilación de autores, ofrece una guía para la interpretación de gases generados en transformadores sumergidos en aceite mineral. En la actualidad es bien reconocida como una técnica fiable y barata de diagnóstico de fallas [4].

El aceite sometido a condiciones térmicas o eléctricas irregulares son capaces de generar gases combustibles en partes por millón (ppm) dentro de la cuba. La condición en la que se encuentra el aceite refleja el estado de salud de un transformador [10].

Se evalúa la concentración de oxígeno (O_2), hidrógeno (H_2), nitrógeno (N_2), metano (CH_4), acetileno (C_2H_2), etileno (C_2H_4), etano (C_2H_6) en caso de la descomposición del petróleo, por la descomposición del papel producen monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO_2), donde la cantidad y composición de estos gases está relacionada con el tipo y severidad de la falla[11], [12].

La generación de gases en el transformador no puede ser posible sin una energía requerida para romper los enlaces de hidrocarburos, debido a esto se organizan los gases combustibles de menor a mayor energía. Por ende, entre mayor energía requieran mayor será la gravedad con la que actúen estos gases [13].

En la actualidad se utilizan costosos sensores de diagnóstico en línea que monitorean constantemente el envejecimiento del aceite producido por la descomposición de materiales aisladores, con la finalidad de mejorar la eficiencia y prolongar la vida útil de la máquina [14].

La técnica de Duval tiene mayor precisión de entre las técnicas convencionales (Rogers, IEC, Key gas) utilizadas para averiguar la condición de falla de los transformadores, aplicando

un modelo de lógica difusa se mejora la precisión estandarizando los resultados de interpretación de DGA [15].

Un problema que puede presentarse al interpretar un DGA, es la experiencia en transformadores para comprender y diagnosticar un mantenimiento. Por otro lado, las muestras deben ser procesadas de forma correcta de manera que no se contaminen e interfieran con el diagnóstico [16].

El diagrama esquemático (Figura 1) muestra el proceso que se cumple para

evaluar la condición del transformador y emitir un estatus de alerta con el fin de mejorar el sistema de mantenimiento y prolongar la utilidad de las máquinas.

El trabajo se profundiza y constituye de la siguiente manera: Sección 1: introducción; Sección 2: Métodos de interpretación con el resumen del análisis de gases disueltos; Sección 3: Técnica de interpretación; Sección 4: conclusiones y finalmente las referencias.

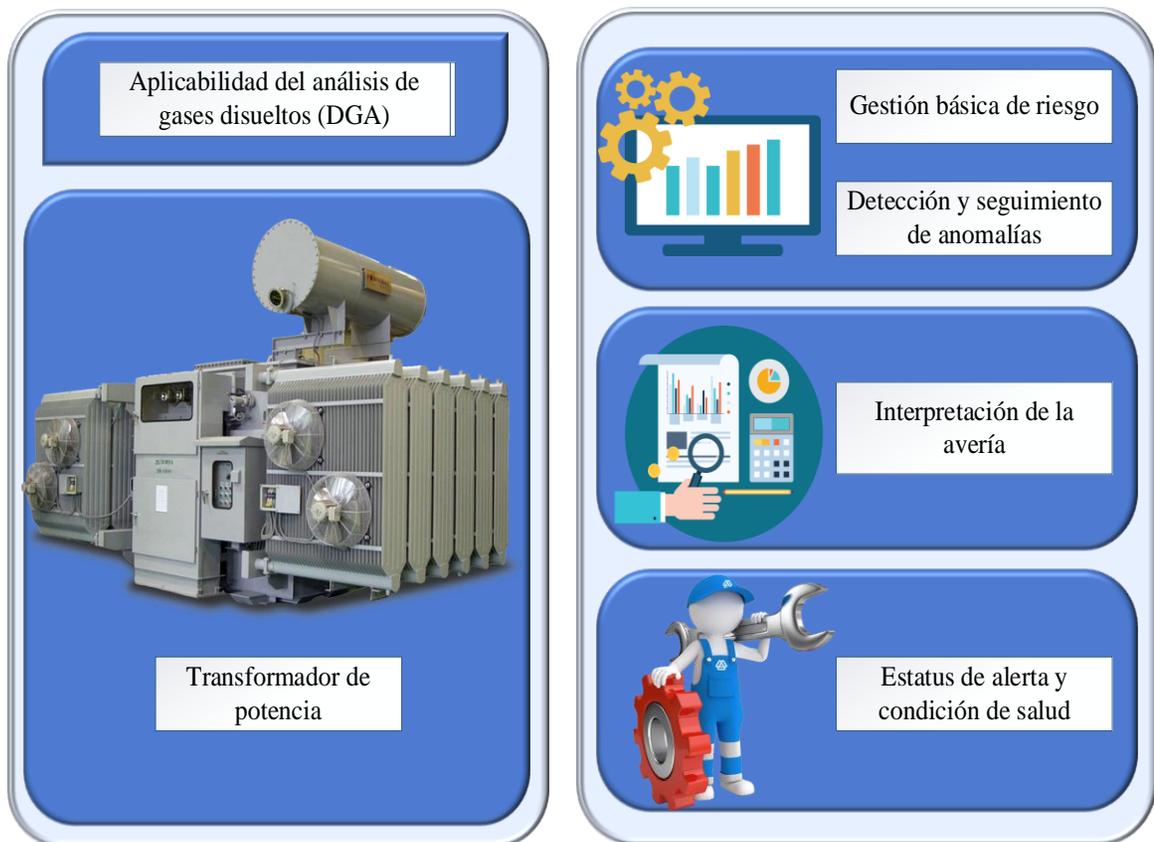


Figura 1. Esquema de evaluación del estado de salud del transformador [autor].

2 Marco teórico

La IEEE [4] recomienda además de la interpretación de resultados ya que no son totalmente fiables, se debe complementar con una base de históricos, pruebas eléctricas, mecánicas,

inspección interna y otras pruebas al aceite.

Duval ha demostrado su amplio conocimiento adquirido a través de los años con respecto al análisis de gases disueltos en el aceite (DGA), por esa razón, es necesario elaborar un estudio detallado de su trabajo.

A partir de 1974, se reconoce que el hidrógeno se propaga a mayor velocidad en presencia de metales a diferencia de otros gases hidrocarburos alterando el diagnóstico [17].

Para 1989, expone la sensibilidad de los transformadores modernos ante sobre tensiones en comparación con las robustas máquinas antiguas [18].

En 1990, mediante un análisis de 6046 muestras, concluyó que es más probable

que en transformadores de potencia se produzcan fallas por temperatura, que por fallas eléctricas [19]. Más tarde en el mismo año clasificó las fallas de manera fiable mediante inspección visual [20].

Desde el 2002, se representa gráficamente la interpretación de los resultados del DGA, definiendo los seis tipos de fallas señaladas en la Tabla 1 [21].

Tabla 1. Seis averías principales identificables por DGA [4].

Clasificación	Causa	Descripción
PD	Descarga parcial tipo corona	Descargas parciales (PD) del tipo de plasma frío (corona), lo que resulta en una posible deposición de cera sobre el aislamiento del papel siendo la más dañina.
T1	Avería térmica menor a 300°C	Una avería térmica, en aceite mineral y / o papel, por debajo de 300 °C, el papel puede volverse color marrón (T1). Por encima de 300 °C; el papel se ha carbonizado (T2)
T2	Avería térmica entre 300°C y 700°C	
T3	Avería térmica superior a 700°C	En averías térmicas de temperaturas superiores a 700 °C (T3), existe una fuerte evidencia de carbonización del aceite mineral, decoloración de metales (800 °C) o fusión de metales (> 1000 °C)
D1	Descarga de baja energía (chispas)	Descargas de baja energía (D1), en aceite mineral y / o papel, evidenciadas por perforaciones carbonizadas más grandes a través del papel (pequeños agujeros), carbonización de la superficie del papel (seguimiento), partículas de carbono en aceite mineral también sufre estrés mecánico como en la ejecución del desviador del cambiador de tomas
D2	Descarga de alta energía (arco eléctrico)	Descargas de alta energía (D2), en aceite mineral y / o papel, con seguimiento de potencia, evidenciado por la destrucción y carbonización extensas de papel, fusión de metales en las extremidades de descarga, carbonización extensa en aceite mineral
DT	Mezcla de averías térmicas y eléctricas	

Duval, hace énfasis sobre cómo los resultados de laboratorio pueden perjudicar el juicio del diagnóstico, dado que son escasos los laboratorios en el mundo los cuales son capaces de proporcionar resultados precisos. Por lo tanto, recomienda comprobar que se cumplan estándares de calidad y normas que han sido establecidas para todo el mundo por CIGRE TF11 como $\sim \pm 15\%$ [22].

Desde el 2008, determina distintos métodos aplicando recomendaciones establecidas por CIGRE e IEC para el cálculo de límites de gases individuales e intervalos de muestreo [23]. Además,

propone nuevos arreglos al triángulo clásico de Duval, el triángulo 1 se usa para aceites minerales, el triángulo 2 para cambiadores de toma de carga (LTC), el triángulo 3 para aceites no minerales (ésteres naturales o sintéticos) y los triángulos 4 y 5 para identificar fallas de baja temperatura considerando que la gasificación de dispersión en aceites puede perjudicar el diagnóstico [24].

2.1 Triángulos y Pentágonos de Duval

El primer triángulo permite reconocer las seis principales fallas del transformador (PD, D1, D2, T1, T2, T3). También las

fallas térmicas secundarias son identificables mediante el uso de triángulos 4 y 5, descritas en la Tabla 2 [24].

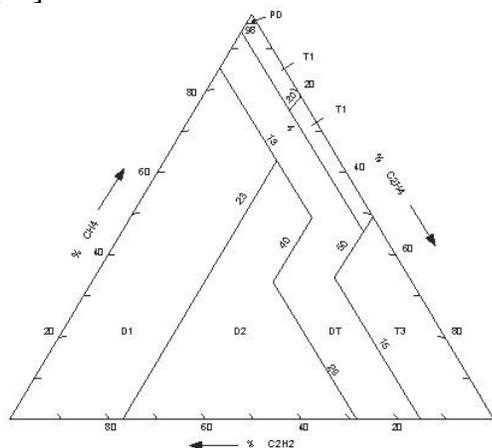


Figura 2. Triángulo 1 de Duval [24].

El uso del triángulo 1 siempre proporciona una falla, minimizando el error de diagnóstico. Sin embargo, no se debe utilizar con bajos niveles de gases por su confusa precisión [24].

Cuando se determinan fallas de baja temperatura en el triángulo 1 (PD o T1) se puede apoyar el diagnóstico con el Triángulo 4.

Tabla 2. Fallas secundarias identificables por DGA [25].

Clasificación	Descripción
S	Gases Principales de Aceite (Stray Gassing) a temperatura < 200°C
O	Sobrecalentamiento sin carbonización del papel < 250°C
C	Posible carbonización del papel
T3-H	Falla Térmica T3 únicamente en el aceite mineral
R	Reacción Catalítica

Nota: Una reacción catalítica (R) se produce entre agua y acero galvanizado en válvulas de muestreo de aceite de transformadores o con tanque de acero (óxido).

Se aplica el Triángulo 5 en determinados casos que involucran una falla térmica de alta energía (T2 o T3) localizadas en el Triángulo 1.

Tabla 3. Límites numéricos del triángulo 1 [25].

Fallas	Porcentaje del gas
PD	$CH_4 = 2, C_2H_6 = 1, CH_4 = 15$
S	$C_2H_6 = 44, H_2 = 9, C_2H_6 = 24, CH_4 = 36, CH_4 = 15, C_2H_6 = 1, CH_4 = 2$
C	$CH_4 = 36, C_2H_6 = 24$
O	$H_2 = 9, C_2H_6 = 24$

Cuando en el triángulo 1 se reconocen fallas eléctricas (D1 o D2), no se recomienda recurrir al uso de los triángulos 4 y 5 [26].

En el 2013, M. Duval et al., [27] establece un nuevo estudio para el diagnóstico DGA enfocado en el uso de la IEC TC 10 y en base de datos vinculadas. Analizando cinco gases: (hidrógeno, metano, acetileno, etileno y etano), determinando la clasificación de las fallas mostradas en la Tabla 6.

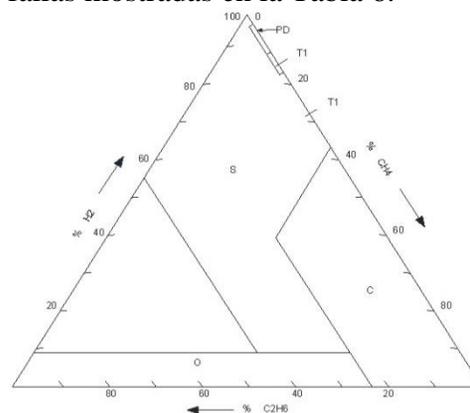


Figura 3. Triángulo 4 de Duval [24].

Tabla 4. Límites numéricos del triángulo 4 [24].

Fallas	Porcentaje del gas
PD	$CH_4 = 2, C_2H_6 = 1, CH_4 = 15$
S	$C_2H_6 = 44, H_2 = 9, C_2H_6 = 24, CH_4 = 36, CH_4 = 15, C_2H_6 = 1, CH_4 = 2$
C	$CH_4 = 36, C_2H_6 = 24$
O	$H_2 = 9, C_2H_6 = 24$

Las 5 razones R1-R5 son usadas en técnicas de diagnóstico (convencionales) [28]. Alcanzan a detectar fallas de escala térmica (T1, T2 y T3) y eléctricas (PD,

D1 y D2). Para las bajas temperaturas no se tienen resultados legítimos. La relación R6 distingue fallas de baja o alta temperatura de fallas térmicas, R7-R10 no son confiables para el diagnóstico. Estas últimas 5 relaciones no han sido normadas internacionalmente[27].

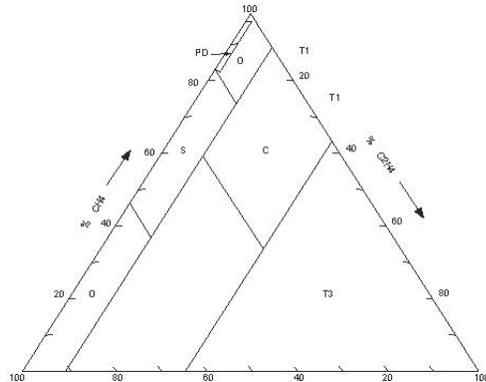


Figura 4. Triángulo 5 de Duval [24].

Tabla 5. Límites numéricos del triángulo 5 [25].

Fallas	Porcentaje del gas
PD	$C_2H_4 = 1, C_2H_6 = 15$
S	$C_2H_6 = 53, C_2H_4 = 10, C_2H_6 = 15$
C	$C_2H_4 = 10, C_2H_6 = 30, C_2H_4 = 35$
O	$C_2H_4 = 10, C_2H_6 = 53, C_2H_6 = 15, C_2H_4 = 1$

Se utiliza un arreglo de 15 combinaciones en base a las relaciones de gases (R1, R2, R3, R4, R5, R6) que son las más confiables. Se utiliza 3 combinaciones: (R1-R2) distingue entre fallas de carácter térmico y eléctrico, la relación (R5-R6), distingue fallas (T1) de otras fallas térmicas, mediante la relación (R2-R5) se distingue (T2 y T3), las combinaciones entre relaciones de gas se muestran en la Tabla 7 [27].

Se utiliza el porcentaje relativo descrito en las ecuaciones (1, 2, 3 y 4) de los cuatro gases combustibles (hidrógeno, acetileno, etileno y metano) para el diagnóstico de fallas internas,

utiliza dos técnicas para clasificar las seis fallas principales [29].

Tabla 6. Resultados del análisis de los patrones de fallas por razones de gas [27].

No.	Relación de gas	Distinción posible		
		Falla eléctrica o térmica	Falla entra T1-T3	Falla entra PD-D2
R1	$\frac{CH_4}{H_2}$	⊙	X	⊙
R2	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	⊙	X	△
R3	$\frac{C_2H_2}{CH_4}$	⊙	X	⊙
R4	$\frac{C_2H_6}{C_2H_2}$	⊙	X	⊙
R5	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	△	△	⊙
R6	$\frac{C_2H_4}{CH_4}$	⊙	⊙	X
R7	$\frac{C_2H_6}{CH_4}$	X	X	X
R8	$\frac{C_2H_4}{H_2}$	X	△	X
R9	$\frac{C_2H_6}{H_2}$	△	X	X
R10	$\frac{C_2H_2}{H_2}$	X	X	⊙

Leyenda. - ; ⊙: Identificable; △ : Poco identificable; X: No identificable

Tabla 7. Estudio de los patrones de fallas por razones de gas [27].

Combinación	Falla eléctrica o térmica	Fallas eléctricas			Fallas térmicas		
		PD	PD	D1	T1	T1	T2
-	-	-	-	-	-	-	-
D1	D2	D2	T2	T3	T3		

R1-R2	⊕	△	△	X	X	X	X
R1-R3	⊖	⊕	⊕	X	X	X	X
R1-R4	△	⊕	⊕	X	X	X	X
R1-R5	△	⊕	⊕	X	△	⊖	△
R1-R6	△	⊕	⊕	X	⊖	⊕	⊖
R2-R3	△	⊕	⊕	X	△	⊖	△
R2-R4	⊖	⊕	⊕	⊕	△	△	X
R2-R5	⊖	⊕	⊕	X	△	⊖	⊕
R2-R6	⊖	⊕	⊕	X	⊖	⊕	⊖
R3-R4	X	⊕	⊕	X	X	X	X
R3-R5	X	⊕	⊕	X	△	△	△
R3-R6	△	⊕	⊕	X	⊖	⊕	⊖
R4-R5	X	⊕	⊕	X	△	△	△
R4-R6	X	⊕	⊕	X	⊖	⊕	⊖
R5-R6	X	⊕	⊕	X	⊕	⊕	⊖

Leyenda. - ⊕: Clara identificación; ⊖
: Identificable; △
: Poco identificable; X: No identificable

$$\%C_2H_2 = \frac{W}{W + X + Y + Z} * 100 \quad (1)$$

$$\%C_2H_4 = \frac{X}{W + X + Y + Z} * 100 \quad (2)$$

$$\%CH_4 = \frac{Y}{W + X + Y + Z} * 100 \quad (3)$$

$$\%H_2 = \frac{Z}{W + X + Y + Z} * 100 \quad (4)$$

Donde:

W	Acetileno C_2H_2 $\left[\frac{ul}{l}\right]$
X	Etileno C_2H_4 $\left[\frac{ul}{l}\right]$
Y	Metano CH_4 $\left[\frac{ul}{l}\right]$
Z	Hidrógeno H_2 $\left[\frac{ul}{l}\right]$

El diagnóstico es mucho más preciso a diferencia de otros métodos, se emplean combinaciones que requieren únicamente de dos gases [29].

Tabla 8. Diagnóstico de fallas por relación de dos gases [29].

No	Combinaciones	Tipos de fallas
1	$\%H_2 - \%CH_4$	PD, D1, D2, T2, T3.
2	$\%H_2 - \%C_2H_2$	PD, D1, D2, T2, T3.
3	$\%C_2H_4 - \%C_2H_2$	PD, D1, D2, T2, T3
4	$\%C_2H_4 - \%CH_4$	PD, D1, D2, T1, T2, T3

Donde:

1. Fallas eléctricas cuyo grado representa baja energía y fallas térmicas que presentan baja temperatura.
2. Fallas eléctrica cuyo grado representan baja energía y alta energía.
3. Fallas eléctricas cuyo grado representan alta energía y fallas térmicas que presentan alta temperatura.
4. Fallas térmicas de grado bajo y alto.

Para el 2014, se formulan los pentágonos 1 y 2 de Duval empleando el porcentaje relativo de los 5 gases combustibles que indican condiciones de falla cuando los gases no se ajustan al Triángulo 1[30].

El Pentágono 1, permite identificar fallas térmicas (T1, T2 y T3) [30].

El Pentágono 2, permite identificar tres fallas de baja energía (PD, D1 y D2) complementando el Pentágono 1 y una mayor detección entre los cuatro tipos de fallas secundarias (S, O, C y T3-H) [30].

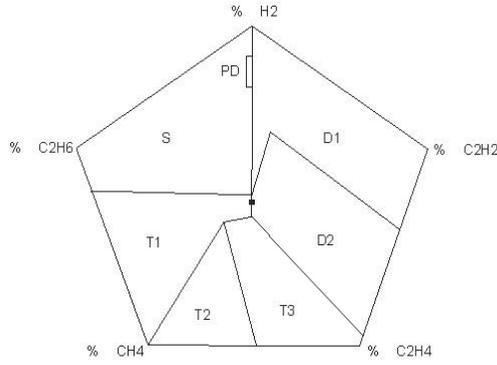


Figura 5. Pentágono 1 de Duval [30].

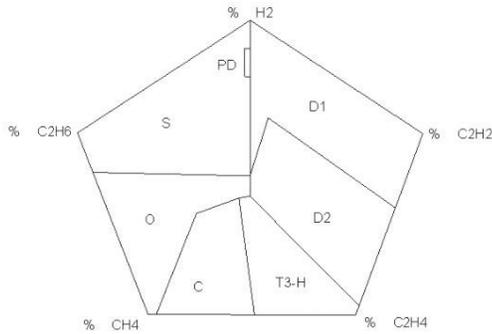


Figura 6. Pentágono 2 de Duval [30].

2.2 Descomposición del papel (Kraft) impregnado en aceite

Las cadenas poliméricas de glucosa contienen enlaces débiles de $C - O$ y enlaces glucosídicos inestables. Estos se empiezan a descomponerse a 105°C hasta los 300°C completando su descomposición y se carboniza produciendo la formación de agua, CO , CO_2 y Furanos [31].

El papel está encargado de [32]:

- Resguarda a la máquina de impulsos, sobre voltajes y transitorios.
- Protección al estrés térmico.
- Protección al estrés mecánico.

2.3 Descomposición del aceite

El proceso de descomposición del aceite se manifiesta en presencia de oxígeno (O_2), condiciones de humedad además de

catalizadores (hierro y cobre en presencia de agua) por consecuencia de altas temperaturas que degradan sus características dieléctricas [33].

2.4 Energía requerida para romper los hidrocarburos

La intensidad de energía normalizada (NEI) es la energía requerida para que se produzca cambios en la estructura del aceite [4].

NEI-OIL

$$(77.7 \times [CH_4] + 93.5 \times [C_2H_6] + 104.1 \times [C_2H_4] + 278.3 \times [C_2H_2])/22400 \quad (5)$$

NEI-PAPER

$$(101.4 \times [CO] + 30.2 \times [CO_2])/22400 \quad (6)$$

A. Metano, Etano y Etileno

Aparecen por aumento de temperatura en aceite o papel.

B. Acetileno

Aparece por un arco interno en el aceite o papel a causa de una gran temperatura ($>1000^{\circ}\text{C}$).

C. Hidrógeno

Presencia de Descargas Parciales Corona, Gases Preliminares (Stray Gassing), Descargas de Arco, una mejor precisión es la presencia del Acetileno. Incluso puede resultar a partir de reacciones químicas con acero galvanizado [31].

Tabla 9. Energía requerida para romper los hidrocarburos [34].

Temperatura	Gas disuelto en el aceite	Energía requerida
Baja temperatura (120°C)	Hidrógeno	338 kJ/mol
	Metano	338 kJ/mol
	Etano	607kJ/mol

Alta temperatura (700°C)	Etileno	720 kJ/mol
	Acetileno	960 kJ/mol

2.5 Oxígeno y Nitrógeno

Con alrededor de 1.5 millones de casos se concluye que la edad de los transformadores mantiene un gran aporte en niveles comunes de gases. Además, el volumen de aceite y nivel de voltaje son insignificantes para el diagnóstico [35].

A. Oxígeno

- Presencia de fugas
- Variación del sobrecalentamiento
- Oxidación del aceite

B. Nitrógeno

- Presencia de fugas
- Cargabilidad del transformador en sistemas con colchón de nitrógeno.

Tabla 10. Diferencia de unidades selladas de unidades con respiración libre [4].

Relación $\frac{O_2}{N_2}$	Descripción
≤ 0.2	Aplicable para la mayoría de los transformadores sellados con colchón de N ₂ y para el 60% de los transformadores sellados con membrana en el conservador.
> 0.2	Aplicable para transformadores con respiración libre y para el 40% de los transformadores sellados con membrana en el conservador.

2.6 Definiciones del tipo de ensayo (muestra)

Es importante la frecuencia de muestreo dependiendo del tipo y severidad de la falla, para ello se clasifican en [4]:

- **Muestra inicial:** Establece una línea base para el análisis en condiciones como:
 - Un transformador sin historial DGA.
 - Luego de la conexión eléctrica de un transformador nuevo.
 - A partir de una restauración o alteraciones mayores.
- **Muestra regular:** Se recopila periódicamente o por rutina de mantenimiento (según las políticas de mantenimiento). Valida su funcionamiento y ejecución usual del transformador.
- **Muestra de inspección:** Se recopila en una serie de intervalos más cortos de tiempo para distinguir una falla, manteniendo una inspección cercana del transformador u otras condiciones inusuales.
- **Muestra de inspección continua:** Se recopila una serie de muestras de manera frecuente (típicamente más de una por día o una cada pocos días), permite una vigilancia estricta y cercana del transformador con un alto riesgo técnico y económico.
- **Muestra de investigación de un incidente:** se recopila luego que el transformador ha pasado a una condición de falla.
- **Muestra de aseguramiento de calidad:** gestiona la precisión y repetitividad de los resultados difundidos por un laboratorio.
- **Muestra de autenticación:** se recopila con la finalidad de comparar resultados anómalos de DGA desde una reciente muestra del mismo equipo.

2.7 Resultados DGA

El diagnóstico recae en tres tipos de estado para lo cual se los denomina como [4]:

- **Estado DGA 1:** Los resultados son aceptables. Continúe con la operación de rutina (**DGA Normal**).
- **Estado DGA 2:** Producción reciente de gas incipiente o moderados o nivel de gas moderadamente elevado. Vuelva a realizar un ensayo para disociar y controlar la posible evolución del gas (**DGA posible sospechoso**).
- **Estado DGA 3:** Niveles altos de gas o producción significativa continua de gas se deben considerar (**DGA probablemente sospechoso**). acciones de mitigación u otras respuestas (es decir, monitoreo continuo).

3 Formulación del problema

El DGA es una herramienta que se puede complementar con la normativa IEEE C57.104-2019 para evaluar de manera precisa las fallas en un transformador. Por lo tanto, para caracterizar la naturaleza de una falla, es primordial el análisis de los gases combustibles, la variación del monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2) y como estos han ido evolucionando, dado que son los primeros indicios de descomposición del aceite o en el papel.

La plataforma informática fue desarrollada en Python, un lenguaje de programación dinámico que ofrece un entorno visual amigable de fácil manejo para el usuario. El usuario podrá ingresar una base de datos para evaluar mediante el análisis de gases disueltos (DGA) e informarse sobre la condición del equipo. El proceso de análisis está basado en los

gases generados aplicando relaciones y los métodos más significativos de la sección 2.

La generación de gases es normal cuando se presentan condiciones eléctricas o térmicas adversas en la máquina. Además, el crecimiento de los gases en transformadores antiguos puede ser normalizado debido a que estos empiezan a generarse a medida que su edad aumenta sin afectar notoriamente su funcionamiento, debido a esto para su diagnóstico se tiene tablas específicas adjuntas en Anexos.

La IEEE [4] muestra el proceso en el siguiente diagrama de flujo que debe ejecutarse para el diagnóstico de máquinas antiguas.

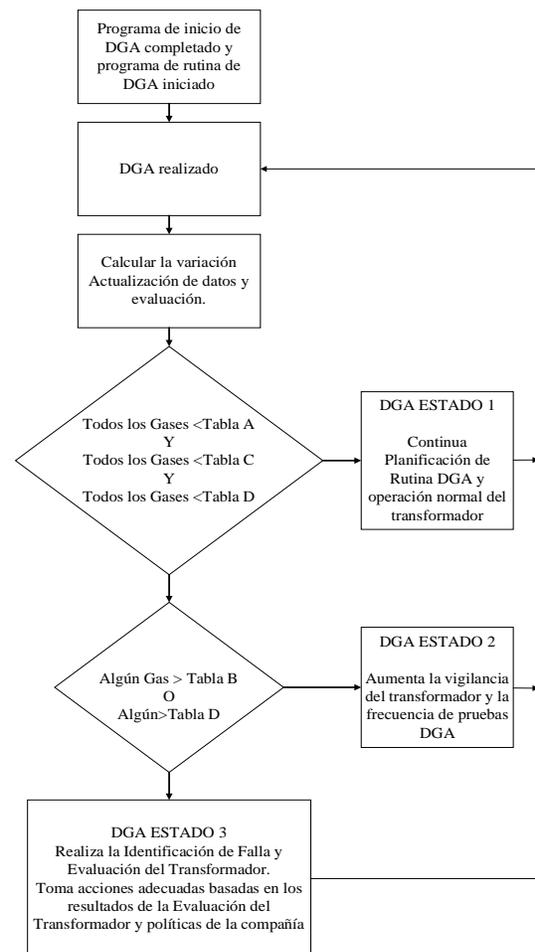


Figura 7. Proceso de toma de decisiones basados en DGA [4].

4 Análisis de resultados

Se pretende evaluar la condición en la que se encuentran los casos mostrados a continuación.

Para el caso 1 se evalúa un transformador con las siguientes características.

Tabla 11. Especificaciones del transformador C1

Fabricante	BROWN BOVERI
Elaboración	1986
Tipo de fluido	Aceite mineral
Voltaje	138 kV

Los valores de las distintas muestras DGA están mostrados en la tabla 12.

Tabla 12. Datos de las muestras DGA C1

Fechas	14/7/2007	19/4/2010	1/6/2016	1/6/2019	11/12/2020
Temperatura	55	47	54	24	28
Hidrógeno (H2)	15	15	7	7	0
Metano (CH4)	111	112	121	180	166
Etano (C2H6)	249	304	310	506	520
Etileno (C2H4)	130	154	128	181	167
Acetileno (C2H2)	0	3	0	0	0
Monóxido de carbono (CO)	164	130	111	152	122
Dióxido de carbono (CO2)	725	1580	1428	1769	1228
Oxígeno (O2)	1446	11238	10163	67	142
Nitrógeno (N2)	35151	79544	72921	62512	52129

Para el caso 2 se evalúa un transformador con las siguientes características.

Los valores de las distintas muestras DGA están mostrados en la tabla 14 para el caso 2.

Tabla 13. Especificaciones del transformador C2

Fabricante	MITSUBISHI
Elaboración	1978
Tipo de fluido	Aceite mineral
Voltaje	43.8 kV

Tabla 14. Datos de las muestras DGA C2.

Fechas	2/4/2007	19/4/2010	1/6/2016	21/6/2019	11/12/2020
Temperatura	33	33	38	25	22
Hidrógeno (H2)	101	98	57	91	58
Metano (CH4)	85	77	82	121	111
Etano (C2H6)	29	20	37	59	56
Etileno (C2H4)	91	88	87	132	124
Acetileno (C2H2)	29	26	0	0	0
Monóxido de carbono (CO)	131	106	104	152	121
Dióxido de carbono (CO2)	1381	2854	1326	4364	2927
Oxígeno (O2)	2290	2290	11768	158	1545
Nitrógeno (N2)	42859	42859	79107	63370	55112

Mediante la lectura de históricos para cada caso se procesa los valores de los gases para conocer el incremento porcentual que ha venido experimentando el transformador durante cada medición DGA, además de complementar el estudio por generación de gases preliminares.

4.1 Caso de estudio 1

Los parámetros de volumen del aceite, potencia (MVA) y voltaje no contribuyen al análisis, por consiguiente, la figura 8 evidencia la variación de los gases combustibles donde se distingue niveles de generación de gases como: acetileno producido por fallas de alta energía eléctrica; etileno, para fallas por alta energía térmica; metano, por fallas de baja energía térmica; hidrógeno, por fallas de baja energía eléctrica.) que no sobrepasan los límites establecidos que se dan normalmente por la antigüedad del transformador.

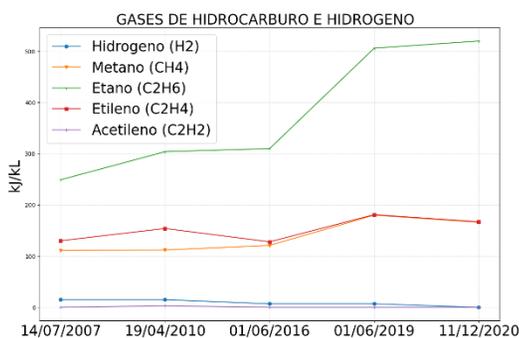


Figura 8. Análisis de históricos

La generación de gases no puede ser posible sin el NEI necesario para romper los hidrocarburos que modifican las propiedades físico química del aceite o papel. Por esta razón es indispensable el análisis de este parámetro mostrado en la figura 9.

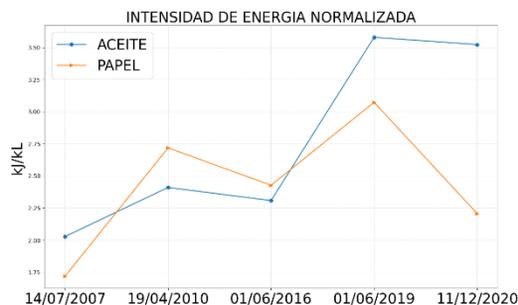


Figura 9. Intensidad de energía normalizada.

El aumento del NEI es un parámetro clave a la hora de conocer la condición en la que se encuentra el transformador, debido a que un crecimiento en el NEI-PAPEL muestra la degradación que tiene el papel generando furánicos que provocan la descomposición prematura del aceite y la formación de agua. En consecuencia, el crecimiento de NEI-OIL evidencia una probabilidad mucho más alta de daño con una sobre gasificación en el aceite como puede ser una alerta de que existe una falla interna en el transformador y está empeorando.

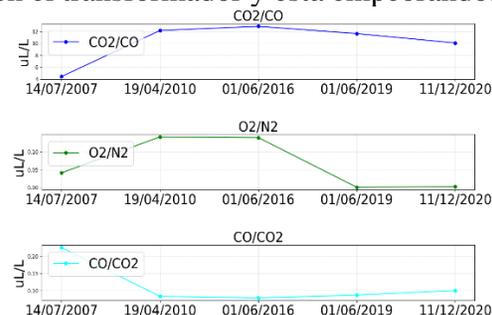


Figura 10. Análisis por descomposición de papel.

Las distintas combinaciones junto con la interpretación de resultados muestran la presencia elevada de oxígeno que acelera la formación de óxidos además de la variación de temperatura que produce la descomposición en el papel formando una hidrólisis contribuyendo el deterioro temprano del aceite.

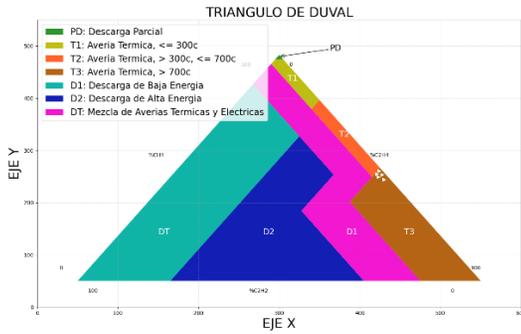


Figura 11. Triángulo de Duval C1

Mediante la interpretación gráfica por Duval se identifica un sobrecalentamiento de tipo T3. De esta manera se produce la formación de polímeros que continúan con la degradación de la vida útil de la máquina, se recomienda aumentar la inspección visual y otros estudios además de la frecuencia de pruebas DGA en el transformador.

4.2 Caso de estudio 2

El análisis de los históricos de generación de gases de acuerdo con el crecimiento que estos han tenido durante cada muestra revela que los valores de los gases combustibles están en los límites permitidos.

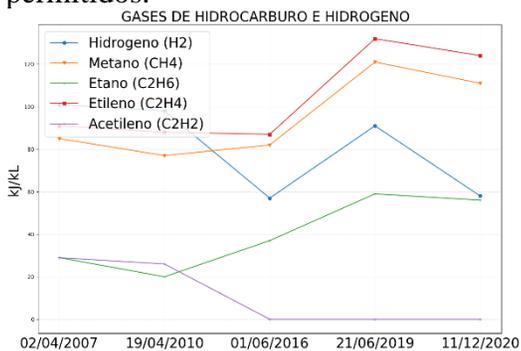


Figura 12. Análisis de históricos C2.

Sin embargo, el transformador presenta valores relativamente altos de Etileno por esta razón se llega a la conclusión que la máquina está afectada por un sobrecalentamiento en el aceite o papel de alta temperatura mayor a los 700 °C. Se requiere de más estudios para ejecutar un mantenimiento.

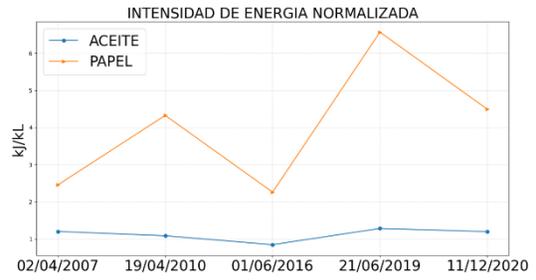


Figura 13. Intensidad de energía normalizada C2.

Como se visualiza en la figura 13, Se puede distinguir el bajo crecimiento del NEI-OIL a diferencia del NEI-PAPER que tiene valores altos. Por esta razón se puede diagnosticar que el calentamiento y degradación está principalmente en el papel con alcances al aceite.

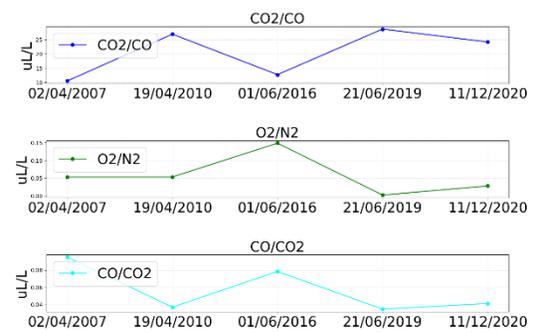


Figura 14. Análisis por descomposición de papel C2.

En la figura 14 se evidencia la acumulación de los óxidos producidos por la descomposición del papel por un calentamiento térmico de baja temperatura. Por lo tanto, la falla en el transformador es de tipo T2 a T3 en un rango de 300 °C o superiores a 700 °C.

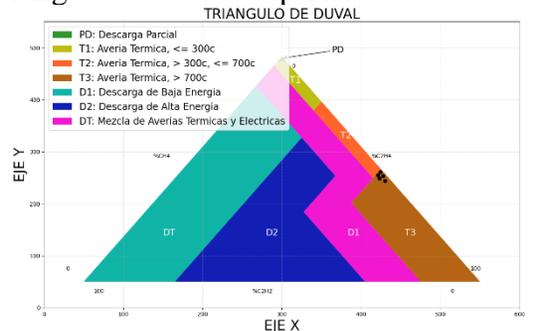


Figura 15. Triángulo de Duval C2

En la figura 15 complementa la precisión de los métodos anteriores mostrados, con la caracterización de la falla de tipo T3 correspondiente a la formación de Etileno por degradación de papel. De esta manera se recomienda una evaluación periódica DGA y operación normal del transformador.

5 Conclusiones y recomendaciones

Con todos los resultados obtenidos, se concluye que la plataforma resulta ser útil para el análisis de históricos y planificación de mantenimientos. Por otra parte, debido a la incertidumbre del método además de considerar criterios es necesario complementar con más estudios eléctricos y termográficos para tomar una decisión.

Considerando que los transformadores más antiguos tienen valores típicos en la generación de gases. Es decir, pueden interferir con los resultados, se debe complementar con el diagnóstico con la velocidad de generación de gases y estudios NEI para determinar posibles anomalías.

Un transformador que disminuye su vida útil evidencia un crecimiento de gases desde baja energía hasta alta energía evaluados periódicamente. Sin embargo, se requiere de diferentes pruebas, mantenimientos, datos de carga, condiciones ambientales que puedan ser útiles para obtener pistas sobre la naturaleza de las anomalías.

5.1 Discusión de resultados y trabajos futuros.

La presente investigación ha sido desarrollada acorde a las últimas actualizaciones de la guía de interpretación de gases disueltos en aceite que incluye nuevos parámetros como: la edad del transformador, velocidad de generación de gases,

relación oxígeno/nitrógeno, además de eliminar interpretaciones (TCG y TDCG).

La herramienta se puede complementar con más métodos de interpretación junto con un análisis por redes neuronales artificiales y lógica difusa.

6 Referencias

- [1] M. B. A. Elf. S. A. I. Sayed A.Ward, "21st International Middle East Power Systems Conference (MEPCON).," 2019.
- [2] Institute of Electrical and Electronics Engineers, *Proceedings of the 2nd International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS) 2019: Bali, October, 1st - 4th, 2019, Inna Grand Bali Beach Hotel, Sanur, Bali, Indonesia.*
- [3] H. Wang, S. Ma, H. Yu, Q. Zhang, and P. Wang, "Study on Stray Gassing of Transformer Oil with Metal Deactivator under condition of coincident electric field and temperature."
- [4] IEEE, *C57.104-2019 - IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Mineral Oil-Immersed Transformers.* IEEE, 2019.
- [5] T.V. Oommen, "Vegetable Oils for Liquid-Filled Transformers," 2002.
- [6] Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE Power Electronics Society, Universiti Teknologi Malaysia, IEEE Malaysia Section. Power Electronics Chapter, and Chölyöök Chonja Hakhoe, *2015 IEEE Conference on Energy Conversion*

- (CENCON) : 19-20 October 2015, Johor Bahru, Malaysia.
- [7] S. Maneero, K. Jariyanurat, P. Nimsanong, C. Bunlaksananusor, and K. M. I. of T. L. Faculty of Engineering, *Studies of Electrical and Thermal Characteristics of Natural Ester Immersed Transformer Compared with Mineral Oil Immersed and Palm Oil Immersed Transformer*. IEEE, 2018.
- [8] University of Manchester, IEEE Dielectrics and Electrical Insulation Society, and Institute of Electrical and Electronics Engineers, *2017 IEEE 19th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL) : 25 June - 29 June, 2017, Manchester, United Kingdom*.
- [9] Ivanka Atanasova-Höhlein and G. Siemens AG, "Influence of copper on gassing properties of transformer insulating liquids," *DEIS*, 2019.
- [10] Institut Teknologi Bandung Sekolah Teknik Elektro dan Informatika, IEEE Dielectrics and Electrical Insulation Society, Annual IEEE Computer Conference, B. IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis 2012.09.23-27 Sanur, and B. IEEE CMD 2012.09.23-27 Sanur, *International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), 2012 23-27 Sept. 2012, [Sanur], Bali, Indonesia*.
- [11] *C57.139-2015 - IEEE Guide for Dissolved Gas Analysis in Transformer Load Tap Changers*. IEEE, 2016.
- [12] S. Eeckhoudt, S. Autru, and L. Lerat, "Stray Gassing of Transformer Insulating Oils: Impact of Materials, Oxygen Content, Additives, Incubation Time and Temperature, and Its Relationship to Oxidation Stability."
- [13] Università degli studi di Roma "La Sapienza," IEEE Dielectrics and Electrical Insulation Society, and Institute of Electrical and Electronics Engineers, *2019 IEEE 20th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL) : Roma, Italy, June 23 - June 27, 2019*.
- [14] P. Trnka, Západočeská univerzita v Plzni. Faculty of Electrical Engineering. Department of Technologies and Measurement, Západočeská univerzita v Plzni, IEEE Czechoslovakia Section, and Institute of Electrical and Electronics Engineers., *2016 Conference on Diagnostics in Electrical Engineering (Diagnostika) : Parkhotel Pilsen, September 6-8, 2016*.
- [15] S. Hmood, Abu-Siada, B. E. and C. E. D. C. U. W. IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis 2012.09.23-27 Sanur, and B. I.-1-4673-1018-5/12/\$31.00 ©2012 I. 2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis 23-27 September 2012, *Standardization of DGA Interpretation Techniques using Fuzzy Logic Approach*. 2012.
- [16] T. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition 2016 Dallas, Power & Energy Society, Tex. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition 2016.05.03-05 Dallas, Tex. T & D 2016.05.03-05 Dallas, and Tex.

- IEEE PES T & D Conference & Exposition 2016.05.03-05 Dallas, *2016 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T & D) 3-5 May 2016.*
- [17] C. Lamarre, J. P. Crine, and M. Duval, "INFLUENCE OF OXIDATION ON THE ELECTRICAL PROPERTIES OF INHIBITED NAPHTHENIC AND PARAFFINIC TRANSFORMER OILS," 1987.
- [18] M. Duval and H. -Quebec, "Dissolved Gas Analysis: It Can Save Your Transformer."
- [19] M. Duval and H. -Quebec, "Acceptable gas-in-oil levels in generation and transmission power transformers".
- [20] M. Duval and H. -Quebec, "Interpretation of Gas-In-Oil Analysis Using New IEC Publication 60599 and IEC TC 10 Databases."
- [21] M. Duval and H. -Quebec, "A Review of Faults Detectable by Gas-in-Oil Analysis in Transformers."
- [22] M. Duval and H. -Quebec, "Improving_the_reliability_of_transformer_gas-in-oil_diagnosis".
- [23] M. Duval, "Calculation of DGA Limit Values and Sampling Intervals in Transformers in Service."
- [24] M. Duval, "New versions of the The Duval Triangle for Load Tap Changers, Non-Mineral Oils and Low Temperature Faults in Transformers."
- [25] M. Duval and L. Lamarre, "Electrical Insulation Conference (EIC), A Review of Faults Detectable by Gas-in-Oil Analysis in Transformers.," 2017.
- [26] Milan Vidmar Electric Power Research Institute, IEEE Dielectrics and Electrical Insulation Society, and Institute of Electrical and Electronics Engineers, *ICDL 2014 : proceedings of the 2014 IEEE 18th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL) : June 29 - July 3, 2014, Bled, Slovenia.*
- [27] S.-W. Kim, S.-J. Kim, H.-D. Seo, J.-R. Jung, H.-J. Yang, and M. Duval, "New Methods of DGA Diagnosis using IEC TC 10 and Related Databases Part 1: Application of Gas-ratio Combinations," 2013.
- [28] Institut Teknologi Bandung Sekolah Teknik Elektro dan Informatika, IEEE Dielectrics and Electrical Insulation Society, Annual IEEE Computer Conference, B. IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis 2012.09.23-27 Sanur, and B. IEEE CMD 2012.09.23-27 Sanur, *Improving accuracy of DGA interpretation of oil-filled power transformers needed for effective condition monitoring.*
- [29] S.-J. Lee, Y.-M. Kim, H.-D. Seo, J.-R. Jung, H.-J. Yang, and M. Duval, "New Methods of DGA Diagnosis using IEC TC 10 and Related Databases Part 2: Application of Relative Content of Fault Gases," 2013.
- [30] M. Duval and L. Lamarre, "The Duval Pentagon-A New Complementary Tool for the Interpretation of Dissolved Gas Analysis in Transformers." [Online]. Available: <http://paulbourke.net/geometry/polyarea>.
- [31] K. L. J. P. C. B. D. Hanson, C. Claiborne, and D. Cherry, *2016 IEEE Electrical Insulation*

- Conference (EIC)*
“*Understanding Dissolved Gas Analysis of Ester Liquids*”. IEEE, 2016.
- [32] A. Betie, U. M. Rao, I. Fofana, M. Fethi, and Z. Yeo, “Influence of cellulose paper on gassing tendency of transformer oil under electrical discharge,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 26, no. 6, pp. 1729–1737, Dec. 2019, doi: 10.1109/TDEI.2019.008039.
- [33] I. Atanasova-Höhlein, “Stray gassing cases of insulating liquids in HV equipment,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 22, no. 5, pp. 2718–2722, Oct. 2015, doi: 10.1109/TDEI.2015.005220.
- [34] H. Wang, S. Ma, H. Yu, Q. Zhang, and P. Wang, “Study on Stray Gassing of Transformer Oil with Metal Deactivator under condition of coincident electric field and temperature.”
- [35] *C57.104-2019 - IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Mineral Oil-Immersed Transformers*. IEEE, 2019.

6.1 Matriz de Estado del Arte

Tabla 15. Matriz de estado del arte.

DISEÑO DE UNA PLATAFORMA DIGITAL PARA DETECCIÓN Y DIAGNÓSTICO DE FALLAS INCIPIENTES O AVANZADAS PARA TRANSFORMADORES DE POTENCIA, BASADO EN EL ANÁLISIS DE GASES DISUELTOS (DGA).																		
ITEM	AÑO	DATOS TÍTULO DEL ARTÍCULO	TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA		SOLUCIÓN PROPUESTA			
			Descomposición del papel (Kraft)	Descomposición del aceite	Energía requerida para romper los hidrocarburos	Análisis de gases disueltos	Stray Gassing	Caracterización de fallas	Influencia de la descomposición de papel	Análisis de DGA	Gases Combustibles	Intensidad de Energía Normalizada	NEI	Gases combustibles	Aplicación Digital	NEI	Triángulo de Duval	Análisis de velocidad multipunto
1	2019	IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Mineral Oil-Immersed Transformers	☒				☒	☒	☒			☒						
2	2019	Proceedings of the 2nd International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems	☒		☒		☒	☒				☒			☒			
3	2021	Study on Stray Gassing of Transformer Oil with Metal Deactivator under condition of coincident electric field and temperature	☒		☒							☒			☒			
4	2019	IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Mineral Oil-Immersed Transformers. IEEE	☒	☒			☒		☒									☒
5	2002	Vegetable Oils for Liquid-Filled Transformers	☒	☒	☒		☒	☒		☒	☒			☒				☒
6	2015	IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON)	☒	☒			☒		☒					☒				☒
7	2018	Studies of Electrical and Thermal Characteristics of Natural Ester Immersed Transformer Compared with Mineral Oil Immersed and Palm Oil Immersed Transformer	☒	☒			☒	☒	☒					☒		☒	☒	☒
8	2017	IEEE 19th International Conference on Dielectric Liquids	☒															
9	2018	Influence of copper on gassing properties of transformer insulating liquids	☒							☒								
10	2012	International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)	☒	☒	☒							☒			☒			
11	2015	IEEE Guide for Dissolved Gas Analysis in Transformer Load Tap Changers		☒						☒								
12	2018	Stray Gassing of Transformer Insulating Oils: Impact of Materials, Oxygen Content, Additives, Incubation Time and Temperature, and Its Relationship to Oxidation Stability		☒			☒				☒					☒	☒	
13	2019	IEEE Dielectrics and Electrical Insulation Society, and Institute of Electrical and Electronics Engineers	☒	☒												☒		

DISEÑO DE UNA PLATAFORMA DIGITAL PARA DETECCIÓN Y DIAGNÓSTICO DE FALLAS INCIPIENTES O AVANZADAS PARA TRANSFORMADORES DE POTENCIA, BASADO EN EL ANÁLISIS DE GASES DISUELTOS (DGA).																	
ITEM	AÑO	DATOS	TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA		SOLUCIÓN PROPUESTA		
			Descomposición del papel (Kraft)	Descomposición del aceite	Energía requerida para romper los hidrocarburos	Análisis de gases disueltos	Stray Gassing	Caracterización de fallas	Influencia de la descomposición de papel	Análisis de DGA	Gases Combustibles	Intensidad de Energía Normalizada	NEI	Gases combustibles	Aplicación Digital	NEI	Triángulo de Duval
14	2019	International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)	☒	☒			☒	☒	☒	☒		☒	☒				
15	2019	Influence of copper on gassing properties of transformer insulating liquids	☒	☒			☒	☒	☒	☒		☒	☒				
16	2017	The New Duval Pentagons Available for DGA Diagnosis in Transformers Filled with Mineral and Ester Oils	☒	☒			☒	☒	☒	☒		☒	☒				
17	2019	Review of chemical indicators of degradation of cellulosic electrical paper insulation in oil-filled transformers	☒	☒			☒	☒	☒	☒		☒	☒				
18	2016	Conference on Diagnostics in Electrical Engineering (Dagnostika)	☒	☒		☒							☒	☒	☒	☒	
19	2012	International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis		☒	☒		☒	☒		☒	☒				☒	☒	☒
20	2016	Transmission and Distribution Conference and Exposition			☒					☒				☒			
21	1987	INFLUENCE OF OXIDATION ON THE ELECTRICAL PROPERTIES OF INHIBITED NAPHTHENIC AND PARAFFINIC TRANSFORMER OILS			☒					☒							
22	2000	Dissolved Gas Analysis: It Can Save Your Transformer			☒	☒				☒							☒
23	2002	Acceptable gas-in-oil levels in generation and transmission power transformers			☒					☒							
24	2013	Interpretation of Gas-In-Oil Analysis Using New IEC Publication 60599 and IEC TC 10 Databases			☒	☒				☒	☒						☒
25	2017	A Review of Faults Detectable by Gas-in-Oil Analysis in Transformers.			☒	☒				☒	☒						☒
26	2015	Improving the reliability of transformer gas-in-oil diagnosis				☒					☒					☒	
27	2016	Calculation of DGA Limit Values and Sampling Intervals in Transformers in Service.			☒	☒				☒							☒
28	2013	New versions of the The Duval Triangle for Load Tap Changers, Non-Mineral Oils and Low Temperature Faults in Transformers				☒											
29	2014	International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)			☒	☒					☒						☒

DISEÑO DE UNA PLATAFORMA DIGITAL PARA DETECCIÓN Y DIAGNÓSTICO DE FALLAS INCIPIENTES O AVANZADAS PARA TRANSFORMADORES DE POTENCIA, BASADO EN EL ANÁLISIS DE GASES DISUELTOS (DGA).																	
ITEM	AÑO	DATOS	TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA		SOLUCIÓN PROPUESTA		
			Descomposición del papel (Kraft)	Descomposición del aceite	Energía requerida para romper los hidrocarburos	Análisis de gases disueltos	Stray Gassing	Caracterización de fallas	Influencia de la descomposición de papel	Análisis de DGA	Gases Combustibles	Intensidad de Energía Normalizada	NEI	Gases combustibles	Aplicación Digital	NEI	Triángulo de Duval
30	2013	New Methods of DGA Diagnosis using IEC TC 10 and Related Databases Part 1: Application of Gas-ratio Combinations				☒					☒					☒	
31	2012	IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis	☒			☒					☒						
32	2016	Improving accuracy of DGA interpretation of oil-filled power transformers needed for effective condition monitoring									☒	☒					☒
33	2013	New Methods of DGA Diagnosis using IEC TC 10 and Related Databases Part 2: Application of Relative Content of Fault Gases									☒	☒					☒
34	2016	The Duval Pentagon-A New Complementary Tool for the Interpretation of Dissolved Gas Analysis in Transformers									☒	☒					
35	2021	Influence of cellulose paper on gassing tendency of transformer oil under electrical discharge						☒	☒				☒				
			16	15	13	6	12	9	9	17	7	3	7	8	6	7	14

6.2 Resumen de Indicadores

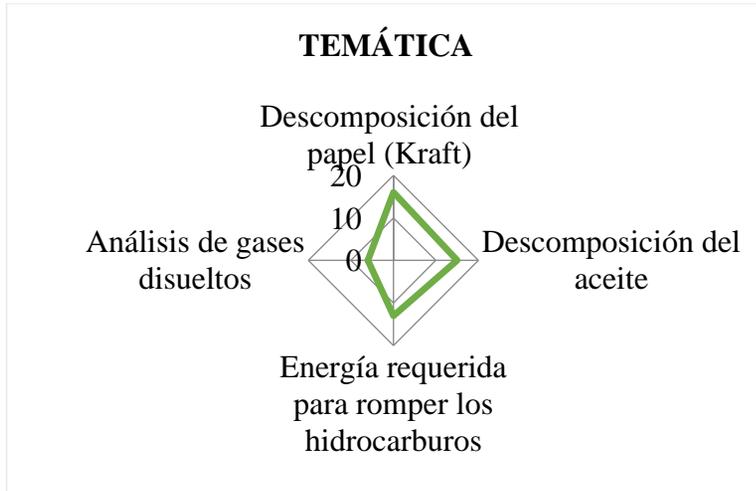


Figura 16. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.

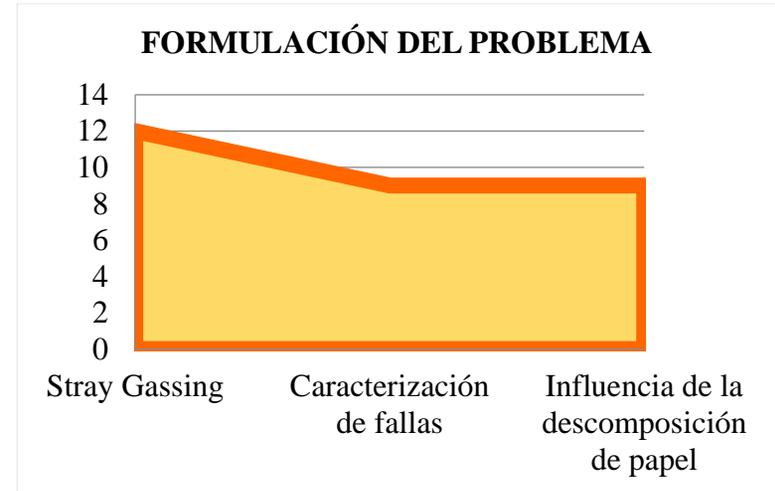


Figura 17. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.

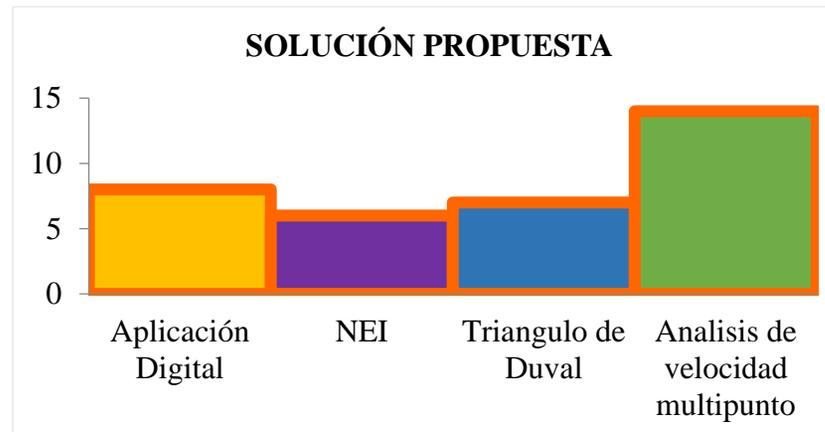


Figura 18. Indicador de solución - Estado del arte.

7 Anexos

Anexo 1. Manual de usuario

MANUAL DE USUARIO

REQUERIMIENTOS

Antes de inicializar la plataforma de análisis DGA se requiere de la siguiente aplicación:
 - Anaconda Prompt 3.8.2
 Además de las librerías para el entorno gráfico y análisis de datos.
 - Tkinter
 - Pandas
 - Matplotlib

```

Anaconda Prompt - python main.py
(base) C:\Users\Brandon\conda activate dgas
(dgas) C:\Users\Brandon>
(dgas) C:\Users\Brandon>
(dgas) D:\Brandon\GSA_Actualizado
(dgas) D:\Brandon\GSA_Actualizado>python main.py
    
```

ANÁLISIS DE DATOS DGA

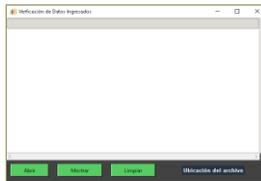
Una vez inicializada la aplicación independientemente el método utilizado, las variables ingresadas junto con las fechas de análisis estarán guardadas en un apartado en Excel.

Para el análisis de datos DGA.

- 1.- En la ventana principal, seleccionar entre los métodos propuestos.
- 2.- Ingresar los datos requeridos por fechas.
- 3.- Para guardar los datos, presionar el botón calcular.
- 4.- Pulsar el botón Mostrar resultados para verificar los datos y cálculos.
- 5.- En la ventana principal, seleccionar la opción Graficar en el método anteriormente seleccionado.

RECOMENDACIONES

- Un aumento considerable (+0.5) del NEI, evidencia una anomalía no despreciable.
- Antes de tomar una decisión consulte con un experto en análisis DGA.
- Cuando se ingresa los datos, evitese usar la coma para separar los decimales. Use (.)
- Para el análisis de otra máquina, guardar los datos Excel debido a que se sobrescriben.



Anexo 2. Aplicación Digital.



Anexo 3. Ingreso de datos.

Fecha de Registro:

Hidrógeno (H2):

Metano (CH4):

Etano (C2H6):

Etileno (C2H4):

Acetileno (C2H2):

Anexo 4. Verificación de datos.

Fecha	Hidrogeno (H2)	Metano (CH4)	Etano (C2H6)	Etileno (C2H4)	Acetileno (C2H2)	Oil
14/07/2007	15	111	249	130.0	0	2.0285357
19/04/2010	15	112	304	154.0	3	2.4103883
01/06/2016	7	121	310	128.0	0	2.3085491
01/06/2019	7	180	506	181.0	0	3.5776383
11/12/2020	0	166	520	167.0	0	3.5224508
08/01/2022	155	23	56	55.8	0	0.5728517

D:/Brandon/DGA_Actualizado/ingresa_neiOIL.xlsx

Anexo 5. Concentraciones de gases del percentil 90 [4].

	Relación O2/N2 ≤0.2				Relación O2/N2 >0.2			
	Edad del Transformados [años]				Edad del Transformados [años]			
	No conocido	1-9	10-30	>30	No conocido	1-9	10-30	>30
G_A Hidrogeno (H2)	80	75	100	80	40	40		

Metano (CH ₄)	90	45	90	110	90	45	20	
Etano (C ₂ H ₆)	90	30	90	150	90	30	15	
Etileno (C ₂ H ₄)	50	20	50	90	50	20	25	60
Acetileno (C ₂ H ₂)	1		1		2		2	
Monóxido de Carbono (CO)	900		900		500		500	
Dióxido de Carbono (CO ₂)	9000	5000	10000		5000	3500	5500	

NOTA: Durante el análisis de datos, se determinó que el voltaje, potencia (MVA), y el volumen del aceite mineral en la unidad no contribuye significativamente a la determinación de valores presentado en Tabla A.

Anexo 6. Concentraciones de gases del percentil 95 [4].

GAS	Relación O ₂ /N ₂ ≤0.2				Relación O ₂ /N ₂ >0.2			
	Edad del Transformados [años]				Edad del Transformados [años]			
	No conocido	1-9	10-30	>30	No conocido	1-9	10-30	>30
	Hidrogeno (H ₂)	200	200			90	90	
Metano (CH ₄)	150	100	150	200	50	60	30	
Etano (C ₂ H ₆)	175	70	175	250	40	30	40	
Etileno (C ₂ H ₄)	100	40	95	175	100	80	125	
Acetileno (C ₂ H ₂)	2	2		4	7		7	
Monóxido de Carbono (CO)	1100		1100		600		600	
Dióxido de Carbono (CO ₂)	12500	7000	14000		7000	5000	8000	

NOTA: Durante el análisis de datos, se determinó que el voltaje, potencia (MVA), y el volumen del aceite mineral en la unidad no contribuye significativamente a la determinación de valores presentado en Tabla B.

Anexo 7. Posible gasificación a través de variaciones de nivel absoluto (DELTA)[4].

Variación Máxima MI/l(ppm) entre muestras de laboratorios DGA consecutivas		
GAS	Relación O ₂ /N ₂ ≤0.2	Relación O ₂ /N ₂ >0.2
	Hidrogeno (H ₂)	40
Metano (CH ₄)	30	10
Etano (C ₂ H ₆)	25	7
Etileno (C ₂ H ₄)	20	
Acetileno (C ₂ H ₂)	Cualquier Incremento	
Monóxido de Carbono (CO)	250	175
Dióxido de Carbono (CO ₂)	2500	1750

NOTA: Durante el análisis de datos, se determinó que el voltaje, potencia (MVA), y el volumen del aceite mineral en la unidad no contribuye significativamente a la determinación de valores presentado en Tabla C.

Anexo 8. Probable Gasificación Activa a través del análisis de velocidad multipuntos [4].

	Período entre la primera y la última muestra de la serie MI/I/año (ppm/año)				
	Relación O2/N2 0,2		Relación O2/N2 0,2		
	4 - 9 meses	10 - 24 meses	4 - 9 meses	10 - 24 meses	
GAS	Hidrogeno (H2)	50	20	25	10
	Metano (CH4)	15	10	4	3
	Etano (C2H6)	15	9	3	2
	Etileno (C2H4)	10	7	7	5
	Acetileno (C2H2)	Cualquier tasa de incremento		Cualquier tasa de incremento	
	Monóxido de Carbono (CO)	200	100	100	80
	Dióxido de Carbono (CO2)	17650	1000	1000	800

NOTA: Durante el análisis de datos, se determinó que el voltaje, potencia (MVA), y el volumen del aceite mineral en la unidad no contribuye significativamente a la determinación de valores presentado en Tabla D.