

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA INFORMÁTICA PARA EL
DIAGNÓSTICO DE LA CONDICIÓN DE LOS TRANSFORMADORES
DE POTENCIA DE LA EEQ EN BASE AL ANÁLISIS DE
PROPIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS, DIELECTRICAS Y
CROMATOGRAFÍA DE GASES DISUELTOS EN EL ACEITE**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO ELÉCTRICO**

MARCO DAVID VACA VELÁSQUEZ

DIRECTOR: ING. PATRICIA ELIZABETH OTERO VALLADARES, MSC

CODIRECTOR: DR. ING. FABIÁN ERNESTO PÉREZ YAULI

Quito, mayo 2021

AVAL

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Marco David Vaca Velásquez, bajo nuestra supervisión.

ING. PATRICIA ELIZABETH OTERO, MSC
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DR. ING. FABIÁN PÉREZ YAULI
CODIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo Marco David Vaca Velásquez, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración dejo constancia de que la Escuela Politécnica Nacional podrá hacer uso del presente trabajo según los términos estipulados en la Ley, Reglamentos y Normas vigentes.

MARCO DAVID VACA VELÁSQUEZ

DEDICATORIA

Este proyecto de titulación está dedicado con mucho cariño y amor:

A Dios, porque nos amas con un amor eterno que sobrepasa todo entendimiento. Y, a pesar de mi mal actuar me alcanzó tu misericordia.

A mi madre Amparo Velásquez, **A pesar de todas las dificultades que le ha tocado enfrentar, nunca dejó de luchar por nosotros.**

A mi padre Marco Vaca, **En honor a su esfuerzo y por haber sido en su tiempo ese hombro fuerte de apoyo, ¡gracias!**

A mi esposa Verónica Medina, **Nunca pensé que encontraría un amor que me cambie la vida. ¡¡Hoy no me puedo imaginar la vida sin ti!!**

A mi hermana Yahaira Vaca, **Dulce es la voz de una hermana en el momento de tristeza**

A mi hermano Danny Vaca, **Mi felicidad siempre estará vinculada a la tuya compañero mío.**

A mis hijos Brithany, Joshua, Anthony, Valentina y mi Matías, **Me basta saber de sus existencias para que llenen mi vida y me den la fuerza que necesito para seguir luchando.**

David Vaca

AGRADECIMIENTO

“Si me buscan de todo corazón, podrán encontrarme. Sí, me encontrarán—dice el Señor....”

Jeremías 29:13-15

Doy gracias a Dios por todas las bendiciones recibidas, quien con su amor eterno ha sido quien cumple sueños desechos.

A mi familia que han sido mi apoyo incondicional a lo largo de mi vida. Además, mis sinceros agradecimientos a la empresa Acurio y Asociados por su apertura, motivación y apoyo brindado en este proyecto.

Agradezco a mi amigo y especialista Ing. Carlos Molina por su acertada y valiosa aportación para el desarrollo de esta herramienta informática.

Y, de manera especial a la directora y codirector de este proyecto la ING. Patricia Elizabeth Otero, y al DR. ING. Fabián Pérez Yauli por el tiempo guía y conocimiento impartido.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AVAL	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN	VIII
ABSTRACT	IX
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 OBJETIVOS	2
1.2 ALCANCE	3
1.3 MARCO TEÓRICO.....	3
1.3.1 MANTENIMIENTO PREVENTIVO	3
1.3.2 MANTENIMIENTO PREDICTIVO	4
1.3.3 SISTEMA DE AISLAMIENTO DEL TRANSFORMADOR.....	4
1.3.4 ACEITE AISLANTE.....	5
1.3.5 COMPOSICIÓN DE LOS ACEITES MINERALES DE BASE NAFTÉNICA	5
1.3.6 PROCESO DE OXIDACIÓN QUÍMICA DEL ACEITE MINERAL AISLANTE.....	7
1.3.7 VIDA ÚTIL DEL ACEITE MINERAL AISLANTE	9
1.3.8 PAPEL AISLANTE	9
1.3.9 PROCESO DE ENVEJECIMIENTO DEL PAPEL AISLANTE.....	10
1.4.0 HIDRÓLISIS	12
1.4.1 OXIDACIÓN.....	13

1.4.2 PIRÓLISIS	13
1.4.3 METODOLOGÍA PARA EL DIAGNÓSTICO DE LA QUÍMICA DEL ACEITE MINERAL AISLANTE.....	14
1.4.4 LÍMITES SUGERIDOS PARA ACEITE MINERAL AISLANTE SEGÚN IEEE STD. C57.106.....	17
1.4.5 METODOLOGÍA PARA EL DIAGNÓSTICO DE GASES DISUELTOS.....	17
1.4.6 METODOLOGÍA PARA EL DIAGNÓSTICO DE CONTENIDO FURÁNICO (QUÍMICA DEL PAPEL AISLANTE).....	21
2. ANÁLISIS Y DISPONIBILIDAD DE LA INFORMACIÓN	23
2.1. COMPILACIÓN DEL REPOSITORIO DE LA INFORMACIÓN.....	23
2.2. EVENTO PARTICULAR.....	24
2.3. DESARROLLO DEI FORMATO PARA CARGA DE DATOS	26
3. DESARROLLO DE LA HERRAMIENTA INFORMÁTICA PARA EL DIAGNÓSTICO DE LA CONDICIÓN DE LOS TRANSFORMADORES DE POTENCIA.....	28
3.1 ARQUITECTURA DE LA HERRAMIENTA INFORMÁTICA.....	28
3.2 DESCRIPCIÓN DE LA HERRAMIENTA INFORMÁTICA	29
3.2.1 MÓDULO DE INGRESO Y MUESTRA DE INFORMACIÓN	29
3.2.2 MÓDULO DE ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS INGRESADOS.....	34
3.2.3 MÓDULO DE DESARROLLO DE REPORTE.....	47
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	48
4.1. ESCENARIO UNO	48
4.2. ESCENARIO DOS	51
4.3. ESCENARIO TRES.....	54
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	57
5.1. CONCLUSIONES.....	57
5.2. RECOMENDACIONES	58

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
ANEXOS	61

RESUMEN

En el presente proyecto se desarrolla una herramienta informática en lenguaje de programación de MATLAB, para el diagnóstico de la condición de los transformadores de potencia de la EEQ, mediante el tratamiento, correlación de variables, tendencias y análisis de los datos históricos de las diferentes pruebas realizadas a estos equipos.

Los resultados de ensayos de aptitud eléctrica y dieléctrica, medición de propiedades físico-químicas del fluido aislante, contenido furánico, cromatografía de gases disueltos, son analizados, utilizados y correlacionados en base a las recomendaciones y criterios de las guías estándar IEEE St. C57.106-2015 e IEEE St.C57.104-2019 según corresponda.

Los casos de estudios se han propuesto en función al diagrama de flujo de interpretación de gases disueltos DGA. La evaluación mediante históricos, tasa de cambio, alarmas de estado, reportes y análisis de tendencias nos permite determinar la evolución de problemas tipo eléctrico y/o térmico que se estén presentado en los transformadores de potencia de la EEQ.

PALABRAS CLAVE: pirólisis, hidrólisis, oxidación, grado de polimerización, aptitud eléctrica y dieléctrica, cromatografía de gases disueltos, agentes nocivos, furaldehído, metil-2-furaldehído, acetilfurano, acetileno (C₂H₂).

ABSTRACT

In the present project a computer tool in MATLAB programming language is developed, for the diagnosis of the condition of the power transformers of the EEQ, through the treatment, correlation of variables, trends, and analysis of the historical data of the different tests. made to these fixed assets.

The results of electrical and dielectric suitability tests, measurement of physical-chemical properties of the absorbent fluid, furan content, dissolved gas chromatography, are analyzed, used, and correlated based on the recommendations and criteria of the standard guides IEEE St. C57. 106-2015 and IEEE St.C57.104-2019 as applicable.

The case studies have been proposed based on the DGA dissolved gas interpretation flowchart. The evaluation through history, rate of change, status alarms, reports and trend analysis allow us to determine the evolution of electrical and/or thermal problems that occur in the power transformers of the EEQ

KEYWORDS: pyrolysis, hydrolysis, oxidation, degree of polymerization, electrical and dielectric aptitude, dissolved gas chromatography, harmful agents, furaldehyde, methyl-2-furaldehyde, acetylfuran, acetylene (C₂H₂).

1. INTRODUCCIÓN

Convencionalmente se ha definido al transformador como una máquina eléctrica estática de alta eficiencia, y como tal, se han despreciado los efectos de su dinámica interna, producto en primer lugar a la vibración mecánica de sus componentes debido al flujo magnético creado a partir de la circulación de corriente por sus bobinados, la cual es necesaria para modificar las amplitudes de corriente y voltaje que demandan los centros de consumo, y por otro lado, la química interactiva existente en el sistema de aislamiento, compuesta por fluidos aislantes y la celulosa.

En este contexto, si consideramos cada uno de los componentes de un transformador eléctrico inmerso en aceite mineral aislante, es indudable suponer que el componente de mayor fragilidad en el transformador es el papel aislante, compuesto fundamentalmente por celulosa orgánica y el cual se encuentra embebido mayoritariamente en los bobinados del transformador. Es así como muchas publicaciones de IEEE, IEC y Cigré destacan la importancia de dar un tratamiento adecuado a los resultados de la química del aceite, con la finalidad de identificar condiciones de envejecimiento o degradación del sistema de aislamiento y consecuentemente, la pérdida de vida útil en papel [1]–[4].

Por otro lado, los transformadores son susceptibles a fallas de carácter térmico y/o eléctrico, que normalmente se manifiestan a través de gases de falla tales como Hidrógeno, Metano, Etano, Etileno y Acetileno, los cuales requieren alta energía para su producción y que gracias a la aplicación de algoritmos propuestos en referencias bibliográficas como IEEE Std. C57.104, es posible identificar tempranamente condiciones inusuales de falla [5], [6].

La problemática surge cuando las empresas de distribución del país no dan un tratamiento adecuado a los datos, o en su defecto, los resultados de la química del aceite son archivados, entonces es necesario desarrollar herramientas computacionales que permitan dar un soporte técnico a los grupos de mantenimiento.

Para realizar diagnósticos acertados a los transformadores de las empresas de distribución en base a su condición, es imprescindible manejar de forma ordenada y sostenible a su información mediante el uso de bases de datos como a manera de su ficha médica y que permita organizar su historial de resultados, concibiendo la oportunidad de realizar análisis de tendencias y correlación a partir del análisis de históricos de la química del aceite. Por otro lado, en la actualidad es necesario hacer uso de algoritmos avanzados para la

detección y diagnóstico de fallas de tipo térmico y/o eléctrico mediante la aplicación del Análisis de Gases Disueltos (DGA). Como resultado del desarrollo de estas herramientas computacionales, se prevé optimizar los recursos de mantenimiento, mediante el reemplazo de prácticas empíricas y tradicionales por soluciones en base a la condición del equipo, considerando que cada transformador tiene condiciones particulares de diseño, modelo térmico, condiciones operativas, medio ambiente, escenarios de instalación, etc., las cuales lo hacen ser único y por lo tanto, la toma de decisiones para el mantenimiento del transformador de potencia, no pueden ser generales sino específicas según el caso; permitiendo reducir salidas no programadas con el objetivo de mejorar la calidad de producto del sistema de distribución de energía eléctrica.

1.1 OBJETIVOS

El objetivo general de este proyecto de titulación es:

- ❖ Desarrollar una herramienta informática para el diagnóstico de la condición de los transformadores de potencia de la EEQ en base al análisis de propiedades físicas, químicas, dieléctricas y de cromatografía de gases disueltos en el aceite dieléctrico mineral.

Los objetivos específicos del proyecto de titulación son:

- ❖ Establecer los aspectos teóricos para la gestión de mantenimientos de transformadores eléctricos de potencia en base a guías, normas y estándares nacionales e internacionales.
- ❖ Analizar los resultados de pruebas realizadas de al menos 50 transformadores de potencia en un rango de 10 MVA – 1000 MVA para la medición de las propiedades físicas, químicas, dieléctricas, contenido de inhibidores, cromatología de gases disponibles en el repositorio de datos del departamento de mantenimiento y construcciones de S/E de la EEQ..
- ❖ Desarrollar una herramienta informática sostenible en el tiempo para el diagnóstico de la condición de los transformadores de potencia de la EEQ en base al análisis de los resultados de las pruebas realizadas a estos equipos.
- ❖ Establecer la correlación de las variables: calidad del aceite mineral y cromatografía de gases disueltos en el aceite dieléctrico mineral permitiendo a través de la herramienta informática generar reportes, alarmas de estado y diagnóstico.

1.2 ALCANCE

El presente plan de trabajo de titulación propone el desarrollo de una herramienta informática en MATLAB para el diagnóstico de la condición de los transformadores de potencia de la EEQ, mediante el tratamiento y análisis de los datos históricos de las diferentes pruebas realizadas a estos equipos, para la medición de propiedades físicas, químicas, dieléctricas y cromatografía de gases disueltos en el aceite dieléctrico mineral.

La información tratada se convierte en entrada para la correlación de las variables: calidad del aceite mineral y cromatografía de gases disueltos, permitiendo generar reportes, alarmas de estado, con la finalidad de coordinar la frecuencia de suspensiones en la distribución de energía eléctrica para la ejecución de mantenimientos preventivos.

Los límites de las variables mencionadas se realizarán bajo las normas IEEE St. C57.106-2015 e IEEE St.C57.104-2019 según corresponda.

1.3 MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presenta los conceptos fundamentales de los aspectos teóricos para la gestión de mantenimiento de transformadores eléctricos de potencia, además de los componentes del sistema de aislamiento del transformador y sus mecanismos de envejecimiento, así como, el análisis de gases disueltos (DGA), como herramienta de diagnóstico y detección de fallas, conocimiento que preparan al lector y cimentan las bases requeridas para la comprensión de este proyecto de titulación.

1.3.1 MANTENIMIENTO PREVENTIVO

El mantenimiento preventivo se realiza en base a un plan previo, a fin de evitar, detectar o corregir defectos antes que se produzca una falla o avería en el equipo.

En este tipo de mantenimiento se hace por inspección o a través de mediciones y controles de sus parámetros de funcionamiento de acuerdo con las recomendaciones de los fabricantes, manuales de servicio emitida por cada equipo, normas y estándares nacionales e internacionales.

1.3.2 MANTENIMIENTO PREDICTIVO

Toda tarea que permita garantizar la calidad de servicio sobre la aplicación sistemática de técnicas de análisis utilizando medios de supervisión o de muestreo, reduce al mínimo el mantenimiento preventivo y disminuye al máximo el mantenimiento correctivo [13].

En este tipo de mantenimiento no se requiere de desarme de sus partes integrantes, se lo realiza por inspección y monitoreo del rendimiento y estado del equipo.

1.3.3 SISTEMA DE AISLAMIENTO DEL TRANSFORMADOR

En su mayoría los transformadores eléctricos poseen como fluido aislante el aceite mineral de bases naturales, debido a su desempeño eléctrico, costos económicos y térmico fundamentalmente. Su sistema aislante está compuesto de aislamiento líquido (aceite mineral aislante), y aislamiento sólido, compuesto fundamentalmente en base de celulosa orgánica obtenida mediante el proceso Kraft termo-estabilizados (cocción al sulfato)[4], [7].

En este contexto, la combinación de estos componentes motiva la existencia de una dinámica interactiva entre ambos medios, tanto en lo relacionado con la degradación química (envejecimiento), la despolimerización del papel como en la poliesterización del aceite aislante. Por otro lado, el contenido de agua presente en ambos componentes del aislamiento merece ser diagnosticado apropiadamente, constituyendo así en la base de los distintos procedimientos de mantenimiento preventivo que se deben realizar a un transformador [1], [3], [4].

Si consideramos cada uno de los componentes de un transformador eléctrico inmerso en aceite mineral aislante (bobinas, contenedor metálico, bujes, instrumentos de medida, papel aislante, herrajes, soportes, aceite, etc.). El componente más débil que tiene el transformador definitivamente es el papel aislante. En este contexto, toda labor de mantenimiento debidamente enfocada en garantizar la vida útil del componente más susceptible de un equipo, y que, en el caso del transformador eléctrico, sin ninguna duda es del papel aislante.

No obstante, si concluimos que, en gran medida la vida útil del transformador eléctrico depende del papel aislante, éste se encuentra inmerso en el aceite mineral aislante, entonces, también se vuelve imprescindible estudiar a profundidad la interrelación existente entre el aislamiento líquido y aislamiento sólido. En lo referente a los agentes que aceleran su envejecimiento.

1.3.4 ACEITE AISLANTE

Los aceites aislantes poseen cualidades y comportamientos específicos necesarios para transmitir las propiedades aislantes y proteger los componentes del transformador durante su almacenamiento y funcionamiento, los cuales se pueden clasificar según su procedencia:

- Aceites minerales (derivados del petróleo)
- Aceites minerales sintéticos y semisintéticos
- Aceites vegetales
- Aceites siliconados

Las funciones básicas que un aceite aislante debe tener son:

1. Ser un excelente aislante eléctrico
2. Refrigerar de forma correcta el transformador, disipando el calor natural generado por el proceso que realiza la transformación. Se puede lograr esto solo si el aceite tiene una densidad baja, suficiente para fluir y refrigerar adecuadamente.
3. Apropriadas cualidades de punto de fluidez y viscosidad a bajas temperaturas, menores que las temperaturas de servicio de acuerdo con los lugares de instalación.
4. Poseer una buena estabilidad a la oxidación, con contenidos apropiados de inhibidor natural y/o sintético que consiga hacer más lento el proceso de oxidación del aceite aislante previniendo la formación de poliésteres pesados en el mismo aceite conocidos como lodo.

1.3.5 COMPOSICIÓN DE LOS ACEITES MINERALES DE BASE NAFTÉNICA

El aceite derivado del petróleo natural es una mezcla de hidrocarburos isoparafínicos, nafténicos y aromáticos con moléculas entre 16 y 22 átomos de carbono, lograda a través de procesos especializados de destilación y refinación [2], [8].

Los componentes y características principales del aceite se detallan a continuación:

Tabla 1. Composición de aceites minerales derivado del petróleo natural

Compuesto hidrocarburo	Proporción en aceite aislante	Características
Isoparafínicos	35 – 40 %	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Alta fluidez ▪ Estabilidad térmica ▪ Menor tendencia a la gasificación ▪ Alta resistencia a la oxidación
Nafténicos	50 – 60 %	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Alta resistencia a la oxidación ▪ Estabilidad térmica ▪ Mucho menor tendencia a la gasificación con respecto al isoparafínico
Aromáticos	5 – 10 %	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Inhibidores naturales (retardantes a la oxidación)

A. ADITIVOS INHIBIDORES SINTÉTICOS CONTRA LA OXIDACIÓN

Cuando se desea que un aceite mineral aislante tenga más resistencia al proceso de oxidación, los procesos de destilación del aceite son reforzados mediante la adición de Aditivos Inhibidores Artificial. Estos compuestos químicos son de origen sintético que reaccionan con facilidad con el oxígeno disuelto en el aceite, facilitando su proceso de oxidación. Asu vez esta reacción forman compuestos estables y solubles en el mismo aceite aislante, protegiendo las bases de hidrocarburos contra la acidificación y retardando de manera notable la formación de ácidos grasos y lodos [2], [4].

Sin embargo, la inhibición de aceite mineral aislante mediante la compensación con compuestos sintéticos debe ser en un rango oscilante entre 0.08 y 0.30% de la masa del volumen total del aceite [8], toda vez que los compuestos DBP (2.6 Ditertbutil Fenol) y DBPC (Ditertbutil Paracresol) utilizados para esta actividad son altamente polares (desfase entre el centro de gravedad de la molécula y su centro electroquímico), que disminuyen características dieléctricas como son el voltaje de ruptura dieléctrica (rigidez dieléctrica) y el factor de potencia (pérdidas dieléctricas).

1.3.6 PROCESO DE OXIDACIÓN QUÍMICA DEL ACEITE MINERAL AISLANTE

Considerando que al interior de los transformadores eléctricos existen varios compuestos que acompañan al aceite mineral aislante (oxígeno, hierro, cobre, barnices, celulosa, agua, pinturas, lacas, temperatura, etc.), siendo algunos de éstos agentes catalizadores de procesos de oxidación del aceite (aceleradores del proceso), se presentan reacciones químicas y de acidificación en cadena que, en principio, Forman distintos subproductos intermedios de oxidación, tales como alcoholes, glicerina y aldehídos que son altamente contaminantes. La combinación entre ellos genera cetonas y posteriormente en el proceso se obtienen ácidos orgánicos que también reaccionan fácilmente entre sí formando ésteres.

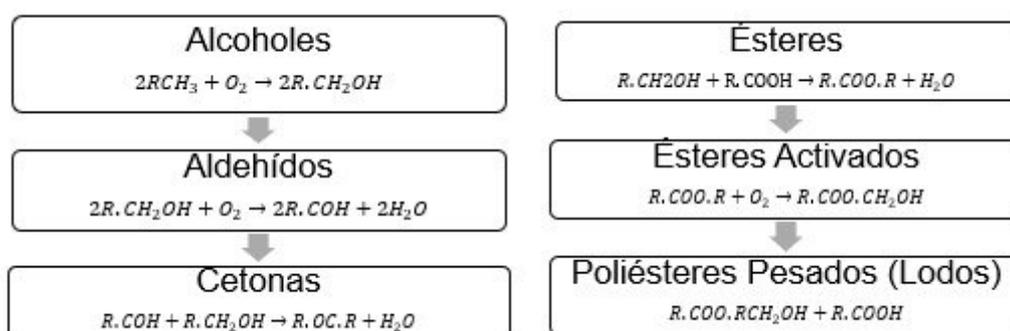


Figura 1. Mecanismo de Formación de Compuestos Polares en el Aceite Mineral Aislante [4]

Estos ésteres, a su vez se combinan con los demás compuestos y se polimerizan agrupándose para formar complejos compuestos moleculares de elevado peso en forma de lodos, los cuales se depositan en los intersticios de las fibras de la celulosa de los devanados. En casos de avanzada oxidación del aceite, pueden formarse capas endurecidas de lodos que afectan notablemente las condiciones de operación del equipo, disminuyendo notablemente la vida útil del transformador e incluso llevando al equipo a una condición de riesgo de falla [4].



Figura 2. Fibras de celulosa sumergidas en aceite dieléctrico con un número ácido de 0.10 [4], [9]

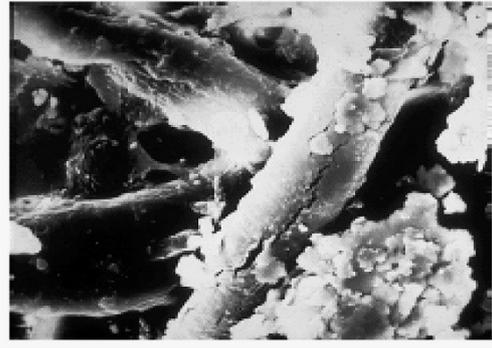


Figura 3. Fibras de celulosa sumergidas en aceite dieléctrico con un número de neutralización de 0.15 [4], [9]

En resumen, el aceite mineral aislante está compuesto de 3 bases fundamentales de hidrocarburos (isoparafínico, nafténico y aromático), los cuales no son totalmente estables químicamente a la presencia de oxígeno (O_2) y catalizadores de diferente condición (Hierro y Cobre), agua, así como, otros aceleradores como la temperatura (producto de los periodos de carga y sobrecarga del transformador eléctrico), producirá como resultado productos de oxidación del aceite mineral aislante que son sustancias polares ácidas y que en condiciones avanzadas se polimerizan formando los lodos.

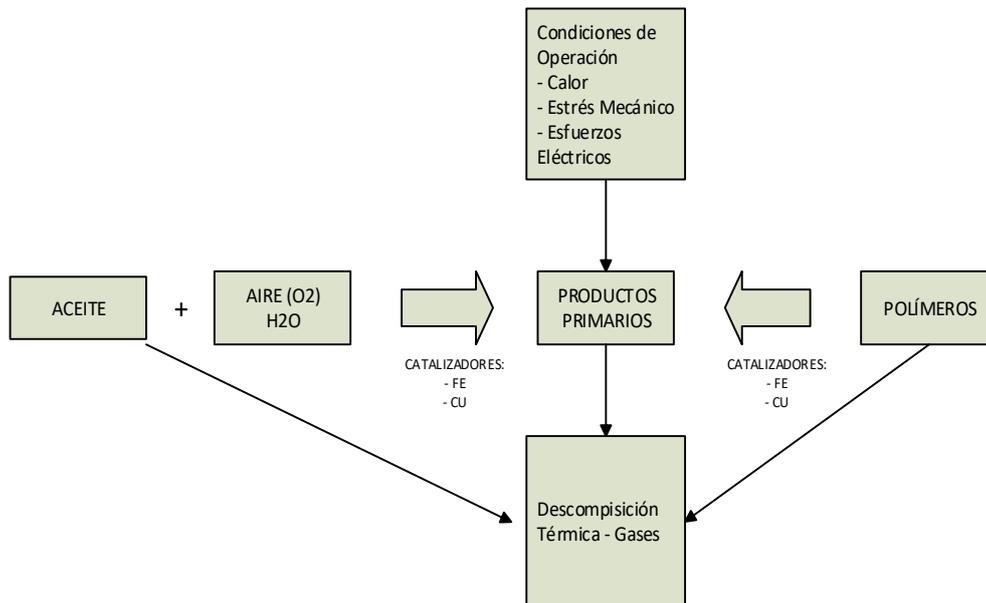


Figura 4. Mecanismo de Oxidación del Aceite Mineral Aislante

1.3.7 VIDA ÚTIL DEL ACEITE MINERAL AISLANTE

Tal y como se describió en la sección antecedente, la vida útil de un aceite mineral aislante no es función del tiempo, sino depende de la condición de sus propiedades químicas (tensión interfacial, número ácido y pérdidas dieléctricas), mismas que a su vez varían debido a condiciones de operación y fundamentalmente de la calidad de mantenimiento. En otras palabras, si se aplican prácticas muy preventivas de mantenimiento, los mantenimientos de fondo no serán necesarios, dado que las variables de envejecimiento y oxidación estarán controladas [1], [3], [4]. En este contexto, algunos autores sugieren que el fin de la vida técnica de un aceite aislante se defina como el tiempo durante el cual el aceite alcanza un número de neutralización de 3,0 mg KOH/g.

1.3.8 PAPEL AISLANTE

El papel aislante de un transformador eléctrico está compuesto por celulosa de origen orgánico y se encuentra presente mayoritariamente en el sistema de aislamiento de las bobinas de los transformadores. Este compuesto orgánico se compone por cadenas de entre 1100 a 1200 anillos de glucosa o también llamados monómeros y cuya formulación química es $(C_6H_{10}O_5)_n$. En promedio, la longitud de estos anillos de glucosa se llama DP (Degree of Polymerization) [9], [11].

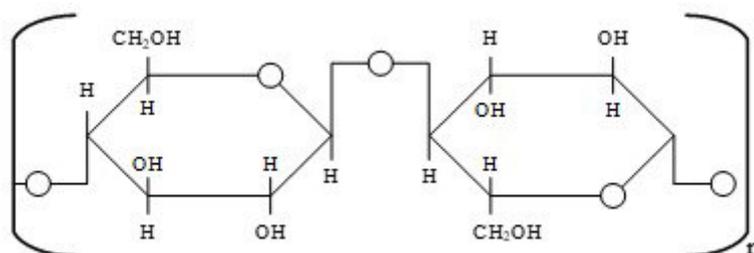


Figura 5. Estructura Química de Celulosa (El valor de “n”, representa el DP de la fibra de celulosa) [7], [9]

Las principales funciones que realiza el papel aislante en el interior del transformador son:

- ❖ Resistencia Eléctrica: Debe tener suficiente capacidad dieléctrica para soportar altos voltajes inducidos, esfuerzos de impulso y transitorios de sobrecorrientes y/o sobrevoltajes.
- ❖ Resistencia Mecánica a la Tracción: La unidad debe resistir adecuadamente los esfuerzos mecánicos axiales y radiales causados en eventos de cortocircuitos

locales y externos. Esta propiedad se la puede cuantificar indirectamente mediante el análisis de DP.

- ❖ Resistencia térmica.
- ❖ Adecuada esperanza de vida útil.

1.3.9 PROCESO DE ENVEJECIMIENTO DEL PAPEL AISLANTE

Mientras que la pérdida de DP está relacionada con la pérdida de vida útil del papel aislante en un transformador eléctrico, estudios de IEEE, IEC y Cigré asocian a la pérdida de monómeros de glucosa con la identificación de tres agentes que aceleran los procesos de envejecimiento. Los efectos de la combinación de la pirólisis (temperatura), hidrólisis (humedad) y oxidación (O_2) se muestran a continuación:

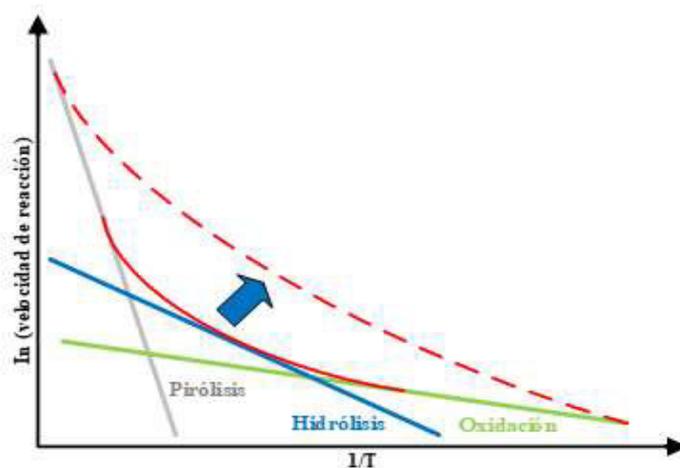


Figura 6. Influencia de la combinación de los agentes de envejecimiento del sistema de aislamiento del transformador sobre el papel aislante [7], [9]

Considerando los resultados presentados en la Figura 9, no cabe duda de que los efectos de altas temperatura en papel aislante aceleran rápidamente el envejecimiento de la celulosa del transformador eléctrico. Bajo este antecedente, los investigadores y autores de IEEE Std. C57.91, hacen un profundo análisis de la cargabilidad en los transformadores eléctricos de potencia y la temperatura en el punto más caliente (The Winding Hottest-Spot Temperature). Por otro lado evalúan el comportamiento de las unidades de vida del transformador (Per Unit Life) bajo escenarios de carga en condiciones normales, sobrecarga de corta duración y sobrecarga de emergencia, mediante la utilización de una

adaptación de la ecuación de Arrhenius que permite conocer el Factor de Aceleración de Envejecimiento (F_{AA}) debido a θ_H (The Winding Hottest-Spot Temperature) [11].

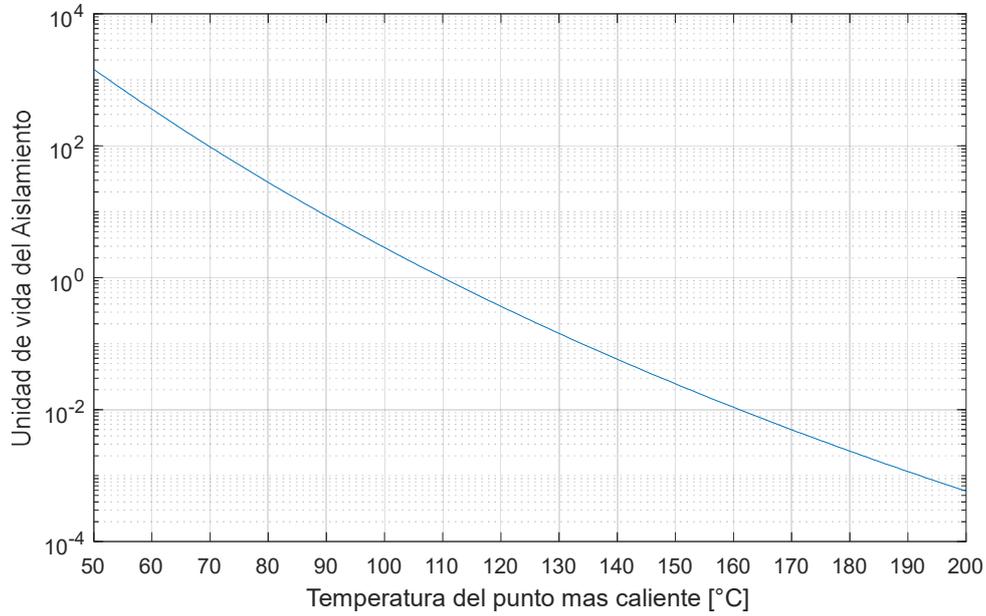


Figura 7. Unidad de Vida como función de la temperatura en el punto más caliente θ_H [9], [11]

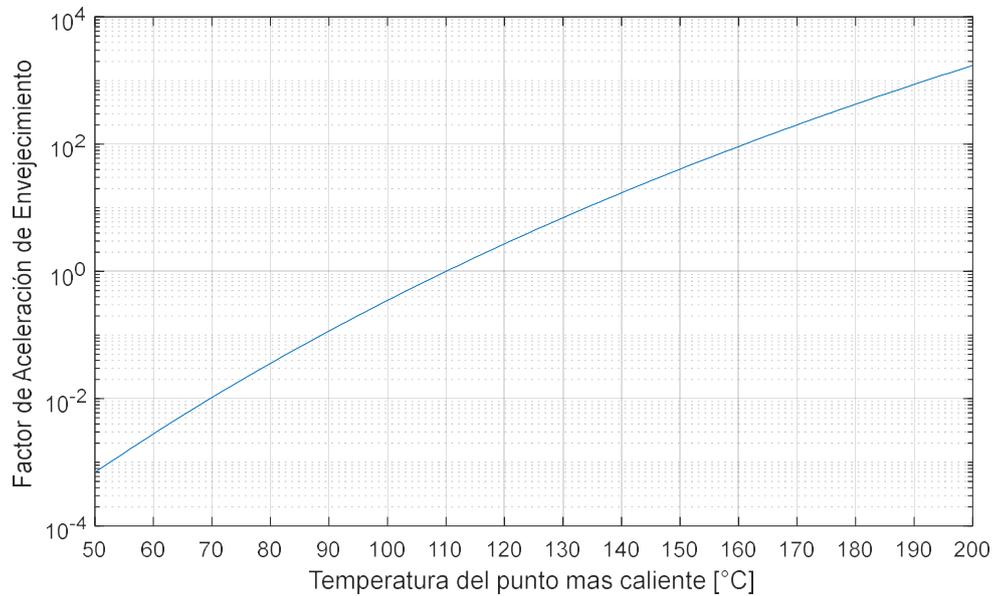


Figura 8. Factor de Aceleración del envejecimiento (F_{AA}) como función de la temperatura en el punto más caliente θ_H [9], [11]

Sin embargo, de acuerdo con la misma guía estándar IEEE Std. C57.91, los autores son reconocen que son la hidrólisis, la oxidación y la pirólisis los mecanismos de degradación del papel aislante y son claros en indicar que la expresión utilizada para su investigación ha considerado bajos niveles de hidrólisis y oxidación ya que son variables controladas por el sistema de preservación de los transformadores eléctricos o por mantenimientos adecuados, en otras palabras, los resultados de su investigación apuntan únicamente a los efectos del envejecimiento en el papel aislante como función de la temperatura (θ_H). En este contexto, el modelo propuesto por Lundgaard permite combinar la temperatura y el agua existente en el papel aislante, obteniendo resultados más críticos como se puede observar en la Figura 12 [7], [11].

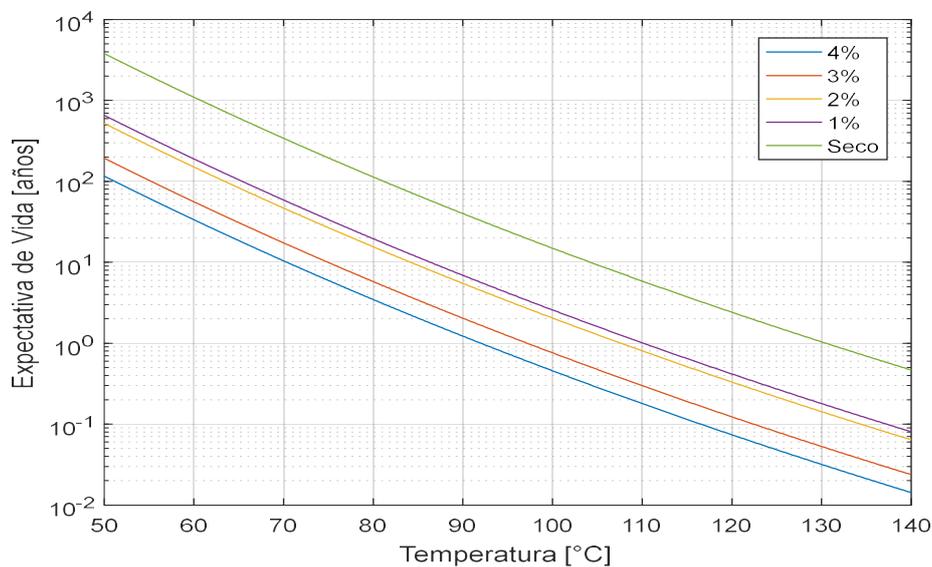


Figura 9. Expectativa de vida residual de papel aislante como función del contenido de temperatura y humedad [7], [9]

Con este antecedente, en los numerales consecuentes se analizarán los conceptos, características y efectos de cada uno de los tres agentes de envejecimiento del papel aislante.

1.4.0 HIDRÓLISIS

La hidrólisis es conocida como la presencia de agua en la celulosa del transformador. Es un agente que debilita los enlaces entre las moléculas de glucosa contenidas en la celulosa del papel aislante (enlaces glucosídicos) [12].

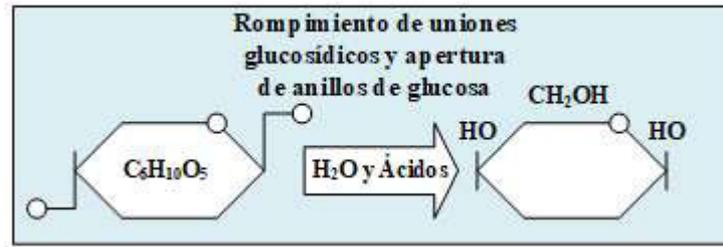


Figura 10. Fractura de enlaces de glucosa por efectos de hidrólisis y acidez en el aceite [9]

1.4.1 OXIDACIÓN

Como se mencionó en el numeral **1.3.2.2**, la composición química de las bases fundamentales de hidrocarburos que conforman el aceite mineral aislante (isoparafínico, nafténico y aromático), no son totalmente estables químicamente a la presencia de oxígeno (O₂) y catalizadores, produciendo como resultado subproductos de oxidación del aceite mineral aislante que son sustancias polares ácidas que se incrustan en las porosidades de las fibras de celulosa y que permiten la fractura de los enlaces de glucosa del papel aislante.

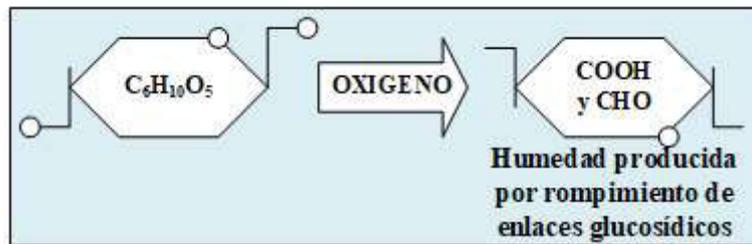


Figura 11. Fractura de enlaces de glucosa por efectos de oxidación [9]

Consecuencia de la pérdida de cadenas de glucosa, se libera agua al aceite mineral aislante, que, por un lado, en combinación con alcoholes, glicerina y aldehídos permiten la formación de cetonas, jabones metálicos, ésteres y finalmente lodos (como se indicó en el numeral **1.3.2.2**), y, por otro lado, incrementan los valores de hidrólisis en el papel aislante.

1.4.2 PIRÓLISIS

La temperatura moderada, que es producto del tiempo de carga y sobrecarga en los transformadores de potencia, rompe el enlace entre los monómeros de celulosa, lo que reduce considerablemente la tracción mecánica del papel debido a la pérdida de DP; y liberando dióxido de carbono, monóxido de carbono y vapor de agua [4], [12].

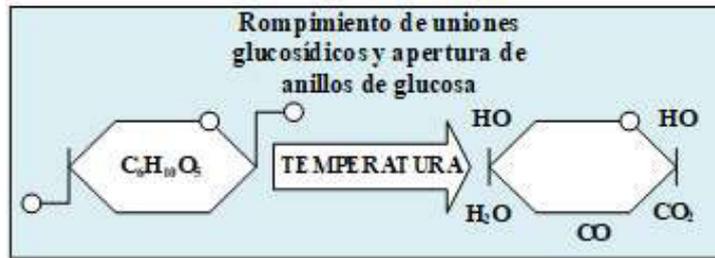


Figura 12. Fractura de enlaces de glucosa por efectos de la temperatura [9].

Como ya se ha mencionado a lo largo de este trabajo de investigación, no cabe duda de que los efectos de la pirólisis son más severos y agresivos cuando se trata de la pérdida de la vida útil del papel aislante de transformadores eléctricos.

1.4.3 METODOLOGÍA PARA EL DIAGNÓSTICO DE LA QUÍMICA DEL ACEITE MINERAL AISLANTE

El diagnóstico periódico a transformadores eléctricos es una disciplina que garantiza en cualquier ámbito y período confiabilidad y beneficio económico en la industria de producción, transmisión y distribución de la energía eléctrica. En este contexto, el diagnóstico de la química del aceite mineral aislante debe ser integral, es decir, debe contemplar el estudio de límites sugeridos por la normativa vigente, así como el análisis estadístico y de correlación de datos con la finalidad de emitir diagnósticos acertados y concluyentes siempre dentro del concepto de gestión de confiabilidad y vida útil de los transformadores eléctricos.

Es así que la American Society for Testing and Materials (ASTM), mediante su norma ASTM D-117, -117, relaciona 33 propiedades de los aceites aislantes minerales con base en hidrocarburos y 55 métodos de prueba. Sin embargo, sobre la base de la Norma IEEE Std. C57.106, así como las sugerencias de Cigré TB 445 "Guide for Transformer Maintenance", se valoran, cuantifican y analizan 6 pruebas que tienen como propósito evaluar la condición de envejecimiento, degradación y contaminación de los aceites minerales aislantes de transformadores eléctricos en funcionamiento.

A. RIGIDEZ DIELECTRICA – ASTM D 1816

La rigidez dieléctrica se efectúa según procedimientos claramente establecidos, principalmente por las normas ASTM y VDE. Si bien la ASTM tiene establecidos 2 normas o métodos, sin embargo, la norma IEEE Std. C57.106 indica claramente que en transformadores en operación únicamente se debe aplicar el procedimiento ASTM D 1816.

De forma general, la rigidez dieléctrica se define a la capacidad que tiene un aislante para soportar un campo eléctrico a determinada rampa de incremento de esta sin fallar. Esta prueba se realiza aplicando progresivamente el voltaje a 2 electrodos de bronce de geometría y separación según la norma seleccionada [1].

B. CONTENIDO DE AGUA – ASTM D 1533

El comportamiento del agua en el aceite se presenta en la Figura 17. De acuerdo con esta curva, es posible calcular el porcentaje de saturación de agua en el aceite y, por lo tanto, establecer el margen de seguridad en relación con la formación de agua libre en el caso de enfriamiento de aceite [1].

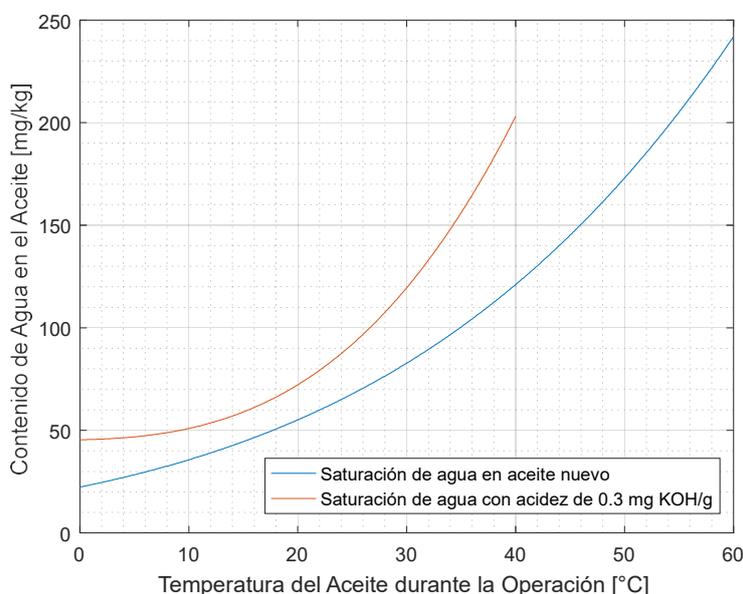


Figura 13. Curva de saturación de agua en el aceite mineral aislante como función de la temperatura [2], [9].

Evidentemente la rigidez dieléctrica bajará de manera sensible en la medida que el contenido de agua en el aceite a determinada temperatura se acerque a la curva de saturación.

C. NÚMERO DE NEUTRALIZACIÓN – ASTM D 974

Como ya se ha indicado a lo largo de este trabajo de investigación El aceite en operación dentro de un transformador eléctrico sufre un proceso de oxidación (degradación química), Que va evolucionando por efecto de la operación, la temperatura y los campos eléctricos al que es sometido.

El número de neutralización mide la acidez del aceite mineral aislante y se define como el peso en miligramos de hidróxido de potasio (KOH) que se requiere para neutralizar el ácido de un gramo de muestra de aceite (mg KOH)

D. TENSIÓN INTERFACIAL – ASTM D 971

Cuando en el aceite dieléctrico, que es una sustancia apolar, se encuentran disueltos productos polares, el aceite aislante aumenta su afinidad con el agua, que también es una sustancia polar, y la solubilidad de un aceite en el agua va a aumentar cuando crece la presencia de dichas sustancias polares. Este fenómeno se puede medir cualitativamente mediante la prueba de Tensión Interfacial (TIF), que no es otra cosa que medir la afinidad del aceite con el agua debido a la presencia de sustancias polares [1].

La medición de tensión Inter facial consiste en separar un anillo plano de Platino-Iridio De la superficie de un fluido de mayor tensión Inter facial, es decir, aplicada dicha fuerza hacia arriba de la interface, aceite agua, mediante el uso de una balanza de torsión llamada tensiómetro, se mide en dinas/cm o mN/m

E. FACTOR DE POTENCIA – ASTM D 924

Es la medición de la potencia en vatios [W] disipada por el aceite dividida para la potencia total en voltamperios [VA] aplicados, utilizando el aceite como dieléctrico en un condensador [1].

F. CONTENIDO DE INHIBIDOR – ASTM D 4768

La medición de contenido de inhibidor tiene por propósito medir la cantidad de inhibidor sintético DBP o DBPC residual en una muestra de aceite. La presencia de inhibidor artificial es deseable porque aumenta la resistencia del aceite contra la oxidación, aumentando considerablemente el periodo de inducción de este [1].

1.4.4 LÍMITES SUGERIDOS PARA ACEITE MINERAL AISLANTE SEGÚN IEEE STD. C57.106

A continuación, se presentan los límites sugeridos por IEEE Std. C57.106 para la evaluación de la química del aceite mineral aislante.

Tabla 2. Límites sugeridos para aceite mineral aislante de equipos en operación [8]

Ensayo y Método ASTM	Unidad	≤69 kV	> 69 - < 230 kV	≥ 230 kV
Voltaje de Ruptura Dieléctrica ASTM D1816 1 mm gap 2 mm gap	kV	mínimo 23 mínimo 40	mínimo 28 mínimo 47	mínimo 30 mínimo 50
Tensión Interfacial ASTM D971	mN/m	mínimo 25	mínimo 30	mínimo 32
Número de Neutralización (Acidez) ASTM D974	mg KOH/g	máximo 0.20	máximo 0.15	máximo 0.10
Contenido de Agua ASTM D1533	mg/kg (ppm)	máximo 35	máximo 25	máximo 20
Contenido de Inhibidor de Oxidación ASTM D2668	%	mínimo 0.08	mínimo 0.08	mínimo 0.08
Factor de Disipación ASTM D924 25 °C 100 °C	%	máximo 0.5 máximo 5	máximo 0.5 máximo 5	máximo 0.5 máximo 5

La aplicación de voltaje de ruptura dieléctrica bajo ASTM D 877 es aplicable únicamente a reactores y reguladores de voltaje [8].

1.4.5 METODOLOGÍA PARA EL DIAGNÓSTICO DE GASES DISUELTOS

El análisis de gases disueltos en aceite dieléctrico del transformador (DGA) es considerada una técnica moderna de detección y diagnóstico, basada en el estudio de la correlación de gases asociados a tipos de falla incipiente o avanzada. Los gases disueltos son producidos a partir de la ruptura de los enlaces carbono-hidrógeno y carbono-carbono provenientes de los hidrocarburos del fluido aislante, en presencia de altas concentraciones de energía como se aprecia en la Figura 18 [5], [6].

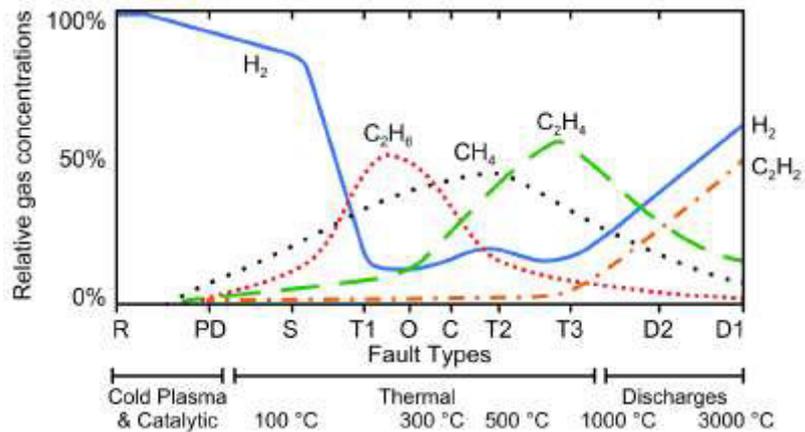


Figura 14. Porcentaje relativo de concentraciones de gas disuelto en aceite mineral en función de la temperatura y el tipo de falla [5], [6].

Consecuencia de la ruptura de enlaces carbono-hidrógeno y carbono-carbono debido a la existencia de una falla interna en el transformador (térmica o eléctrica), se producen gases que contienen elementos de carbono (C) e hidrógeno (H₂), llamados también hidrocarburos; óxidos de carbono (CO y CO₂) y otros hidrocarburos de mayor peso molecular (propano y propileno). Sin embargo, los gases a ser considerados en un análisis de gases disueltos (DGA) son los siguientes:

- ❖ Nitrógeno (N₂)
- ❖ Oxígeno (O₂)
- ❖ Hidrógeno (H₂)
- ❖ Monóxido de Carbono (CO)
- ❖ Dióxido de Carbono (CO₂)
- ❖ Metano (CH₄)
- ❖ Etano (C₂H₆)
- ❖ Etileno (C₂H₄)
- ❖ Acetileno (C₂H₂)

La reciente actualización de la guía estándar IEEE Std. C57.104 publicada en el año 2019, trae un flujograma para el análisis e interpretación del estado de datos DGA [5].

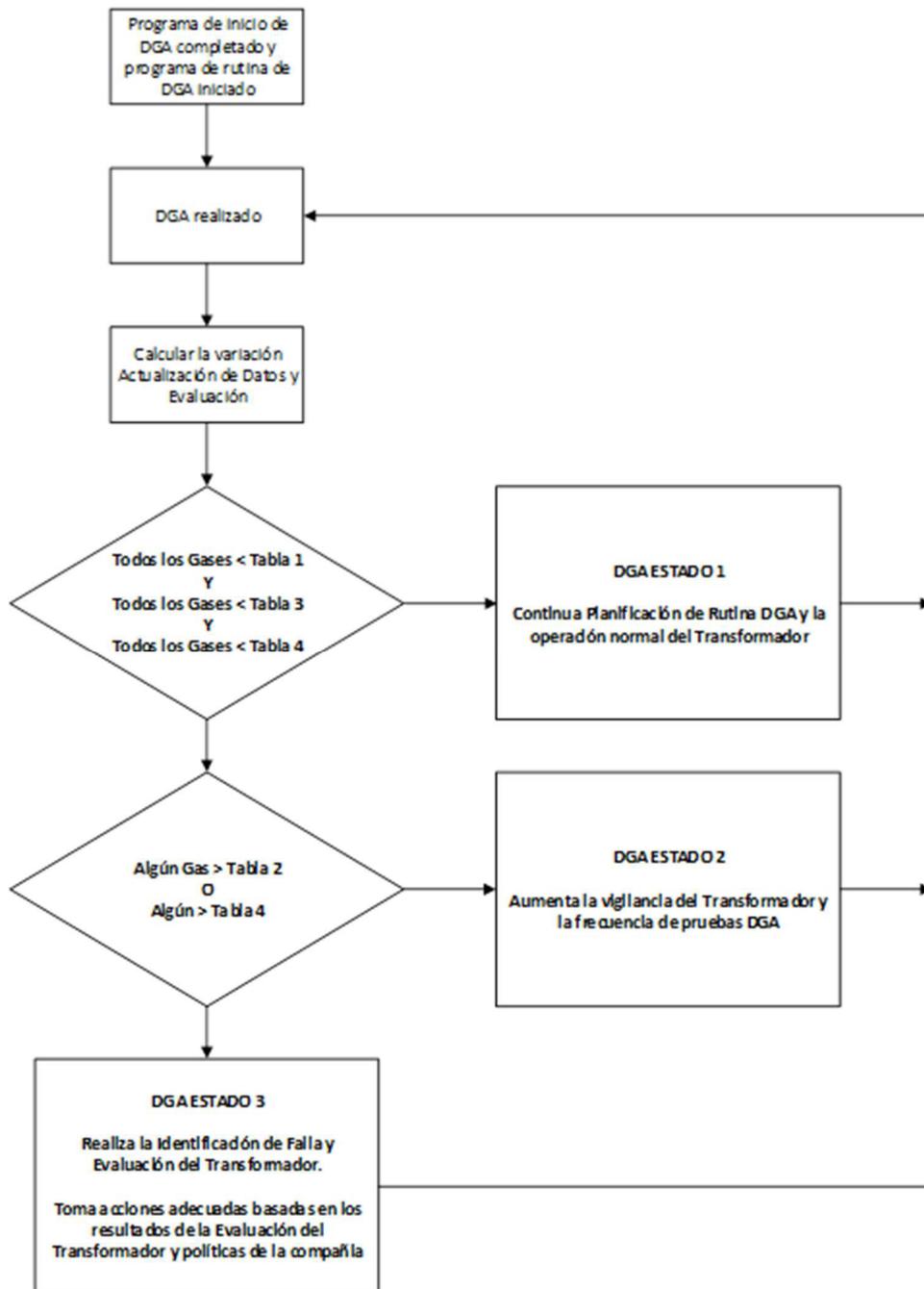


Figura 15. Diagrama de Flujo de Interpretación DGA [5]

- ❖ **DGA Estado 1:** Resultados son Aceptables. Continúa con la operación de rutina del equipo.

- ❖ **DGA Estado 2:** Producción de gases moderada o incipiente, o ligero incremento del nivel de gases. Realice un ensayo de confirmación en un mes e identifique la condición.
- ❖ **DGA Estado 3:** Altos niveles de gasificación o significativa producción de gases. Acciones de mitigación pueden ser consideradas (p.e. monitoreo continuo).

Tabla 3. Concentraciones de gases del percentil 90 en función de la relación O₂ / N₂ y la edad del Transformador en µL/L (ppm) [5].

		Relación O ₂ / N ₂ ≤ 0.2				Relación O ₂ / N ₂ > 0.2			
		Edad del Transformador [años]				Edad del Transformador [años]			
		No conocido	1 - 9	10 - 30	> 30	No conocido	1 - 9	10 - 30	> 30
GAS	Hidrógeno (H ₂)	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 No. 1.

Tabla 4. Concentraciones de gases del percentil 95 en función de la relación O₂ / N₂ y la edad del Transformador en µL/L (ppm) [5].

		Relación O ₂ / N ₂ ≤ 0.2				Relación O ₂ / N ₂ > 0.2			
		Edad del Transformador [años]				Edad del Transformador [años]			
		No conocido	1 - 9	10 - 30	> 30	No conocido	1 - 9	10 - 30	> 30
GAS	Hidrógeno (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 No. 2.

Tabla 5. Valores del percentil 95 para variaciones de nivel absoluto (delta), entre sucesivas muestras de DGA de laboratorio en $\mu\text{L} / \text{L}$ (ppm) [5].

		Variación Máxima $\mu\text{L}/\text{L}$ (ppm) entre muestras de laboratorio DGA consecutivas	
		Relación $\text{O}_2 / \text{N}_2 \leq 0.2$	Relación $\text{O}_2 / \text{N}_2 > 0.2$
GAS	Hidrógeno (H_2)	40	25
	Metano (CH_4)	30	10
	Etano (C_2H_6)	25	7
	Etileno (C_2H_4)	20	
	Acetileno (C_2H_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 No. 3.

Tabla 6. Valores del percentil 95 del análisis de velocidad multipuntos (3-6 puntos) de muestras de DGA de laboratorio con todos los niveles de gas por debajo de los valores de la Tabla 1, en $\mu\text{L} / \text{L} / \text{año}$ (ppm / año) [5].

		Período entre la primera y la última muestra de la serie $\mu\text{L}/\text{L}/\text{año}$ (ppm/año)			
		Relación $\text{O}_2 / \text{N}_2 \leq 0.2$		Relación $\text{O}_2 / \text{N}_2 > 0.2$	
		4 - 9 meses	10 - 24 meses	4 - 9 meses	10 - 24 meses
GAS	Hidrógeno (H_2)	50	20	25	10
	Metano (CH_4)	15	10	4	3
	Etano (C_2H_6)	15	9	3	2
	Etileno (C_2H_4)	10	7	7	5
	Acetileno (C_2H_2)	Cualquier tasa de incremento		Cualquier tasa de incremento	
	Monóxido de Carbono (CO)	200	100	100	80
	Dióxido de Carbono (CO_2)	1750	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 No. 4.

1.4.6 METODOLOGÍA PARA EL DIAGNÓSTICO DE CONTENIDO FURÁNICO (QUÍMICA DEL PAPEL AISLANTE)

Los furanos son parte de los subproductos de la degradación de la celulosa y son parcialmente solubles en el aceite aislante, existen cinco tipos de compuestos furánicos a ser analizados:

- ❖ 2-Furaldehído (2FAL).
- ❖ 5-Metil-2-Furaldehído (5M2F)
- ❖ 5-Hidroximetil-2-Furaldehído (5H2F)
- ❖ 2-Acetilfurano (2ACF)
- ❖ 2-Furfurol (2FOL)

La formación de estos compuestos depende de los efectos de hidrólisis, la temperatura de operación, la presencia de oxígeno y el tipo de papel utilizado. Entre estos compuestos, el 2-Furaldehído (2FAL) es el más representativo, debido a que este compuesto posee una mayor tasa de generación y estabilidad dentro de un transformador [12]–[14]. La Tabla 6 muestra diferentes estados del papel aislante (celulosa) en base a la concentración de 2FAL en aceite dieléctrico aislante.

Tabla 7. Correlación entre la concentración de 2FAL y el estado del transformador eléctrico [14]

Condición	Concentración (ppm)
Bueno	2FAL < 0.50
Aceptable	0.50 ≤ 2FAL ≤ 1.00
Necesita Cuidado	1.10 ≤ 2FAL ≤ 1.50
Pobre	1.6.0 ≤ 2FAL ≤ 2.00
Muy Pobre	2FAL ≥ 2.10

Así también, la concentración individual de contenido furánico asocia a un conjunto de mecanismos de envejecimiento del papel aislante, como puede verse en la Tabla 7.

Tabla 8. Causas de la generación de componentes furánicos [7], [14]

Componente Furánico	Posible causa observada
2FAL	Efectos derivados de temperatura y envejecimiento normal del papel
5M2F	Alta temperatura
2ACF	Causa no definida
5H2F	Oxidación
2FOL	Hidrólisis

Finalmente para la estimación del DP del papel aislante, mediante mediciones de contenido furánico, se utilizan la formulación de Chendong como sigue a continuación [7], [12]:

$$DP = \frac{1.51 - \log_{10}(C_{fur})}{0.0035} \quad \text{Ec (1)}$$

Donde:

DP : Grado de Polimerización (Degree Polimerization). Rango: $150 < DP < 1000$

C_{fur} : Contenido Furánico Total [ppm]

2. ANÁLISIS Y DISPONIBILIDAD DE LA INFORMACIÓN

En este capítulo se presenta el análisis de la información disponible de las subestaciones eléctricas de la EEQ, en lo referente a los resultados de ensayos de aptitud eléctrica y dieléctrica, medición de propiedades físico-químicas del fluido aislante, contenido Furánico, cromatografía de gases disueltos, termogramas, históricos de mantenimiento de los transformadores de potencia.

Para la realización del presente trabajo y con la finalidad de hacer las validaciones respectivas de información, la EEQ S.A. a través del delegado representante de la Dirección de Subtransmisión entregó los siguientes archivos:

- Análisis físico-químicos de los transformadores de potencia del sistema de subtransmisión y generación; años 2019-2020 (formato PDF)
- Cromatografías de Gases años de los transformadores de potencia del sistema de subtransmisión y de generación; años 2019-2020 (formato PDF)
- Diagnóstico del contenido furánico de los transformadores de potencia del sistema de subtransmisión y de generación; años 2019-2020 (formato PDF)

2.1. COMPILACIÓN DEL REPOSITORIO DE LA INFORMACIÓN

Con la finalidad de garantizar la calidad de la información se llevó a cabo un análisis técnico y metódico de revisión de la información en base a un barrido total de los resultados a las

pruebas realizadas tanto físico-químicas, cromatografías de gases, contenido furánico y a los principales agentes nocivos que aceleran el proceso de envejecimiento que se estén presentando en los transformadores y de la evolución de los problemas de tipo eléctrico, físico o químico.

Como se mencionó en la **Tabla 5** y en base al estudio del marco teórico se identificó la interrelación de las pruebas realizadas, la evaluación mediante los históricos y análisis de tendencias de estos resultados. En este contexto se estableció la evolución de problemas tipo eléctrico y/o térmico que se están presentando en los transformadores de potencia de la EEQ, los cuales fueron variables de entrada para la programación del software

2.2. EVENTO PARTICULAR

Un indicio importante fue el caso ocurrido en el equipo T1 de la Subestación 08 La Marín. El diagnóstico adecuado del problema de tipo eléctrico-térmico presentado en el transformador de potencia debido a un evento gaseoso acumulativo de gravedad se lo realizó a través de la correlación e identificación de agentes nocivos, los mismos que se detallarán en las siguientes figuras:

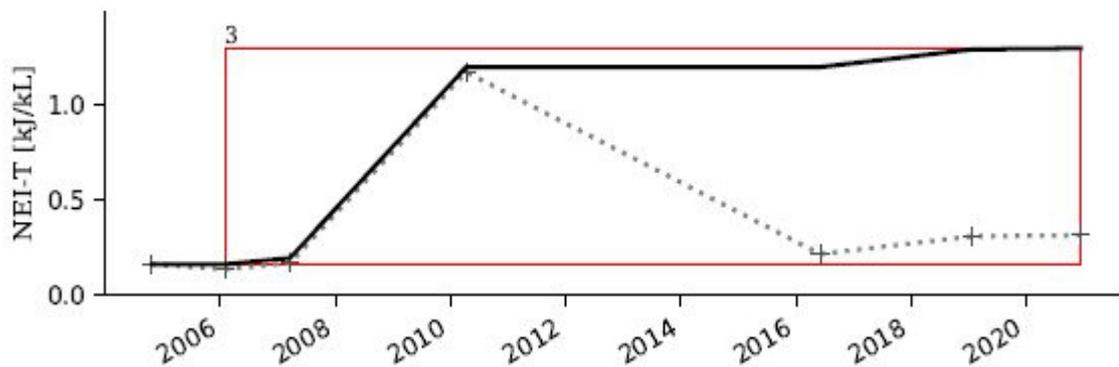


Figura 20. Gas triangular acumulado NEI (Energía acumulada de los gases combustibles debido a una descarga eléctrica de baja energía)

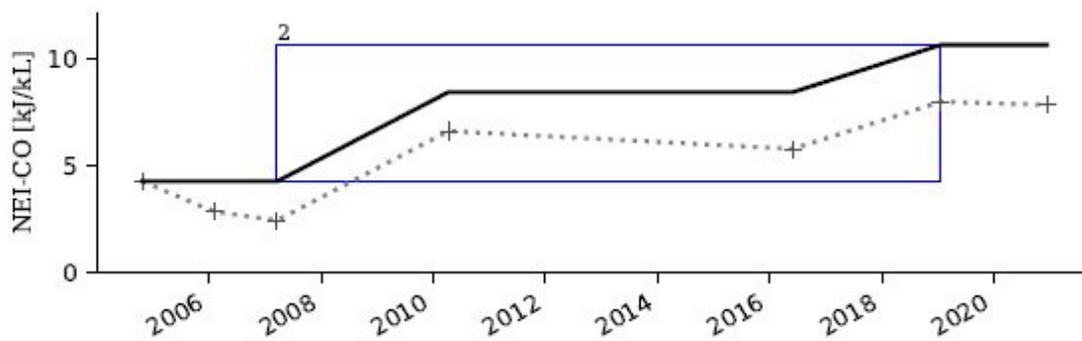


Figura 21. Gas monóxido de carbono acumulado NEI

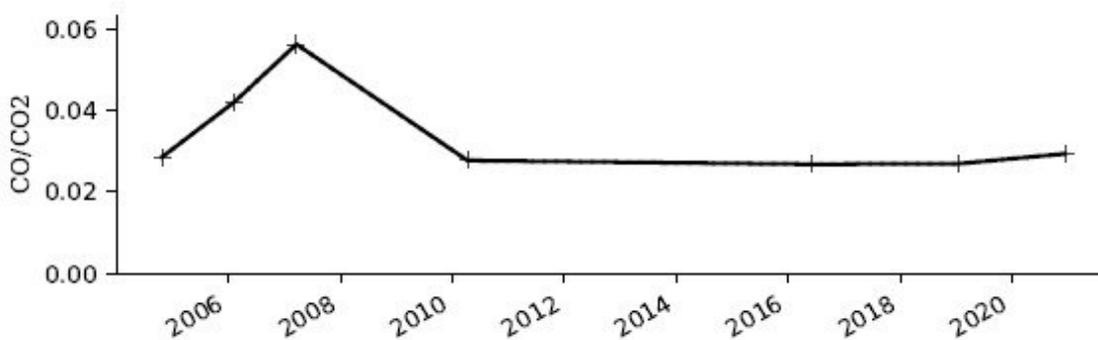


Figura 22. Relación de monóxido de carbono y dióxido de carbono

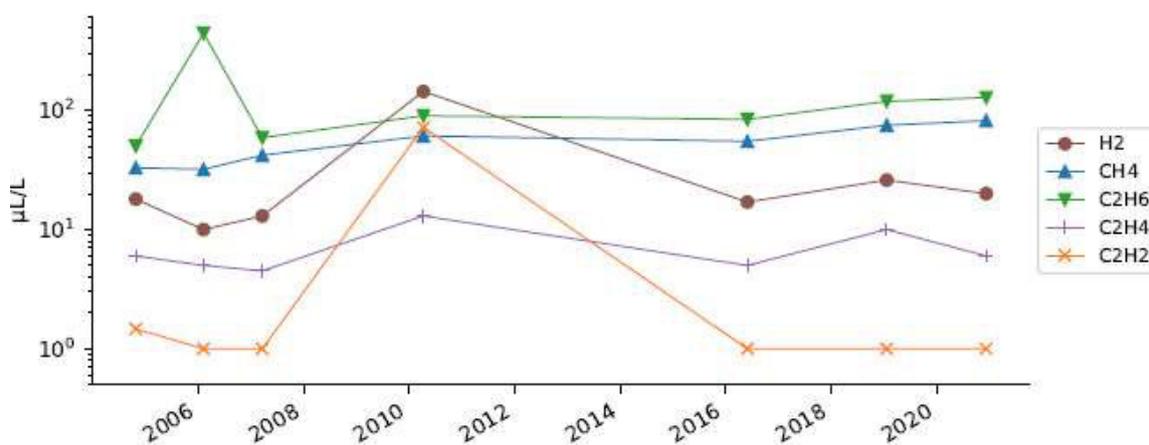


Figura 22. Historial de gases de hidrocarburos e hidrógeno

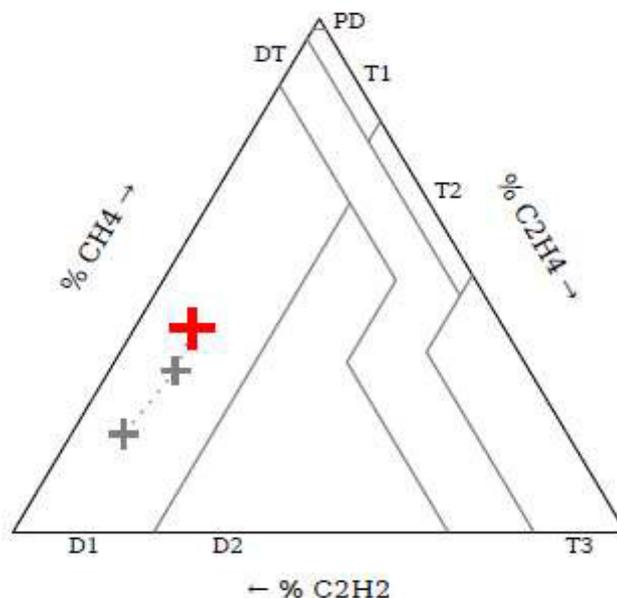


Figura 23. Triángulo de Duval D1: Descarga eléctrica de baja energía

Diagnóstico: Producción reciente de gas de falla (estado de gasificación 3). La producción reciente de gas hidrocarburo sugiere una falla activa. La producción aparente de acetileno puede necesitar ser investigado. El tipo de falla responsable de la producción reciente de gas de falla según el Triángulo de Duval es "D1". Descarga eléctrica de baja energía.

Cabe recalcar que los eventos tanto particulares como de rutina fueron aspectos claves para el desarrollo en la programación de la herramienta informática.

2.3. DESARROLLO DEL FORMATO PARA CARGA DE DATOS

Para la carga de los resultados históricos de las pruebas físico-químicas, cromatografías y contenido furánico realizadas a los transformadores de potencia se desarrolló un archivo plano formato.xls atendiendo las recomendaciones y criterios de las guías estándar IEEE Std. C57.93-2019, IEEE Std. C57.106-2015, IEEE Std. C57.104-2019, IEEE Std. C57.152-2013, así como la normativa IEC60422 y CIGRE TB 445 "Guide for Transformer Maintenance".

Las propiedades físicas, químicas y dieléctricas considerados en el formato son los siguientes:

- Acidez
- Tensión interfacial
- Color
- Humedad
- Rigidez dieléctrica D1816
- Gravedad específica
- Factor de potencia 25 °C
- Factor de potencia 100° C

Los gases considerados en el formato son los siguientes:

- Nitrógeno (N₂)
- Oxígeno (O₂)
- Hidrógeno (H₂)
- Monóxido de Carbono (CO)
- Dióxido de Carbono (CO₂)
- Metano (CH₄)
- Etano (C₂H₆)
- Etileno (C₂H₄)
- Acetileno (C₂H₂)

El contenido furánico considerado en el formato son los siguientes:

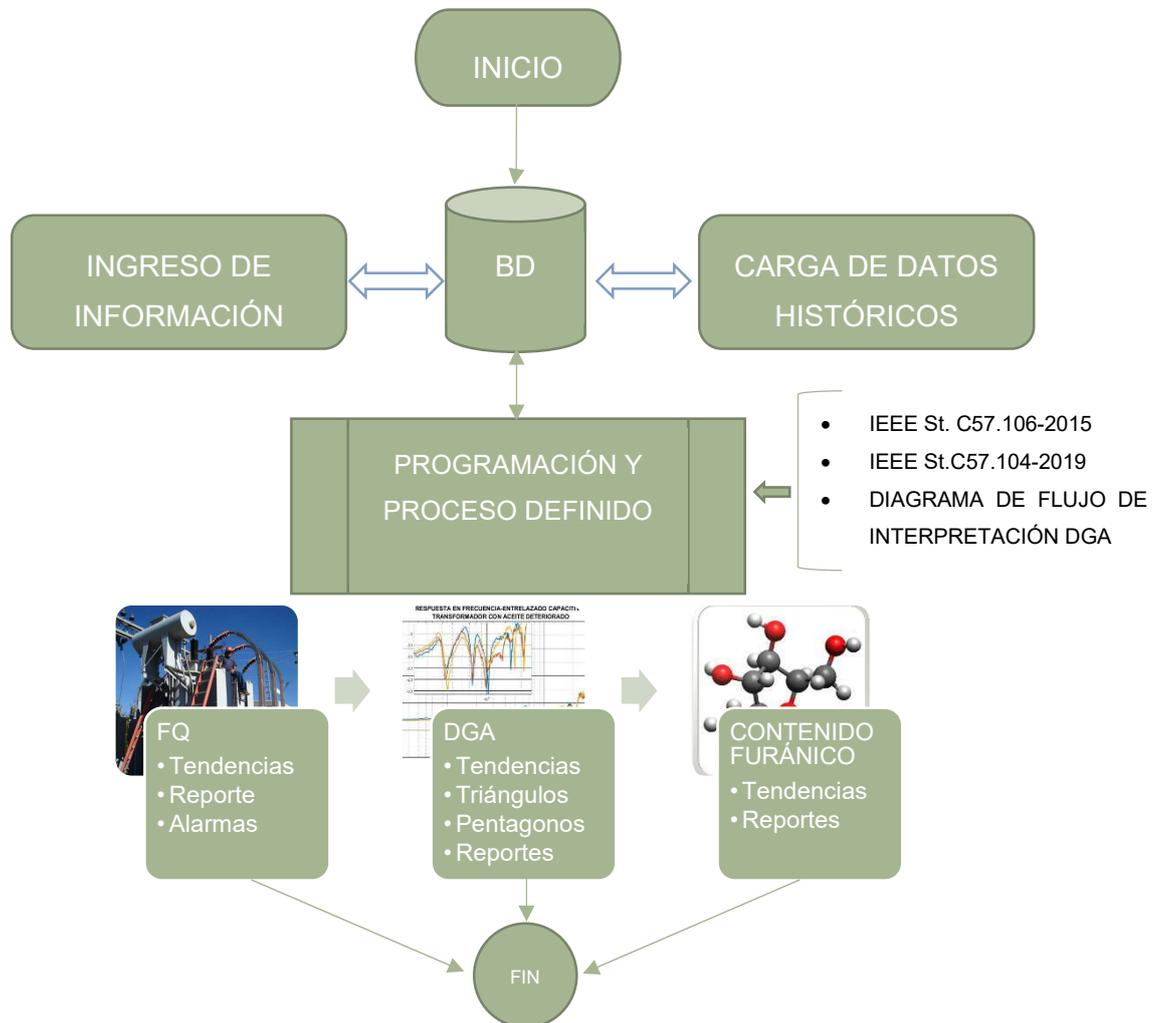
- 2-Furaldehído (2FAL).
- 5-Metil-2-Furaldehído (5M2F)
- 5-Hidroximetil-2-Furaldehído (5H2F)
- 2-Acetilfurano (2ACF)
- 2-Furfurol (2FOL)

3. DESARROLLO DE LA HERRAMIENTA INFORMÁTICA PARA EL DIAGNÓSTICO DE LA CONDICIÓN DE LOS TRANSFORMADORES DE POTENCIA

La información tratada y descrita en el capítulo anterior, la correlación de las variables, la calidad del aceite mineral y cromatografía de gases disueltos se convierte en entrada al lenguaje de programación de la herramienta informática desarrollada en Matlab. A través de esta herramienta genera reportes, alarmas de estado, con la finalidad de coordinar la posible frecuencia de suspensiones en la distribución de energía eléctrica para la ejecución de mantenimientos preventivos.

Los límites de las variables mencionadas se realizaron bajo las normas IEEE St. C57.106-2015 e IEEE St.C57.104-2019 según corresponda. El entorno de programación se detalla en el ANEXO A.

3.1 ARQUITECTURA DE LA HERRAMIENTA INFORMÁTICA



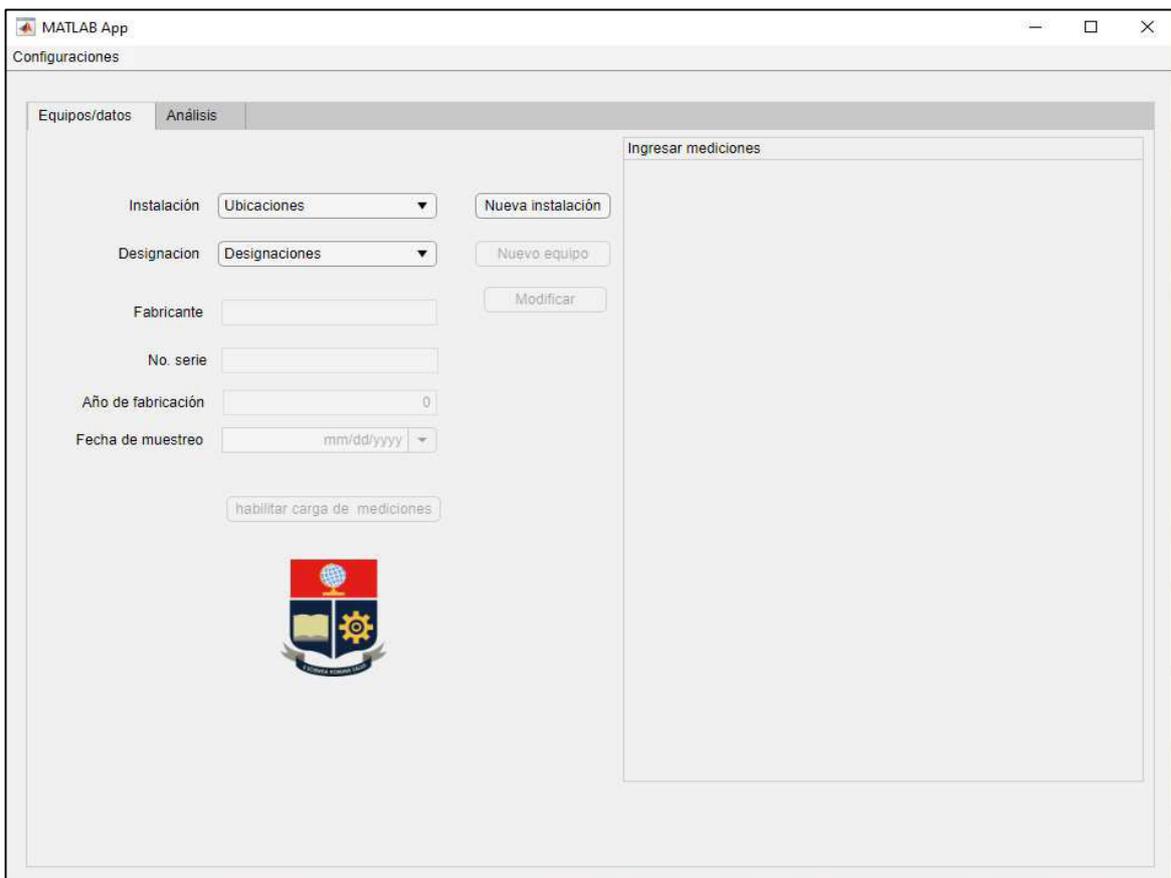
3.2 DESCRIPCIÓN DE LA HERRAMIENTA INFORMÁTICA

La medición de propiedades físicas, químicas y dieléctricas en aceites dieléctricos de transformadores de potencia a través de ensayos según procedimientos ASTM, permiten medir la degradación y formación de sustancias polares, además, evalúa cualidades dieléctricas que facilitan la toma de decisiones acertadas desde el punto de vista de la necesidad de efectuar el mantenimiento preventivo óptimo según la condición del equipo.

A su vez, DGA es considerada una técnica moderna, basada en el estudio de casos que correlaciona gases asociados a tipos de falla incipientes o avanzadas [14], [1] que han sido objeto de estudio e insumo para el desarrollo de esta herramienta.

3.2.1 MÓDULO DE INGRESO Y MUESTRA DE INFORMACIÓN

El administrador o usuario ingresa los resultados de las pruebas actuales o a través del formato de carga descrito en el **punto 2.3** para los resultados históricos.



The screenshot shows a MATLAB App window titled 'Configuraciones'. It has two tabs: 'Equipos/datos' and 'Análisis'. The 'Equipos/datos' tab is active. The form contains the following fields and buttons:

- Instalación: Dropdown menu with 'Ubicaciones' selected. Button: 'Nueva instalación'.
- Designación: Dropdown menu with 'Designaciones' selected. Button: 'Nuevo equipo'.
- Fabricante: Text input field. Button: 'Modificar'.
- No. serie: Text input field.
- Año de fabricación: Text input field with '0'.
- Fecha de muestreo: Date picker with 'mm/dd/yyyy' format.
- Button: 'habilitar carga de mediciones'.

At the bottom center is a logo of a university. On the right side, there is a large empty table area titled 'Ingresar mediciones'.

Figura 23. Muestra e ingreso de información histórica y actual

La configuración de la herramienta informática se encarga del control y cambios de acuerdo con las necesidades específicas de la evaluación de la condición de los transformadores.

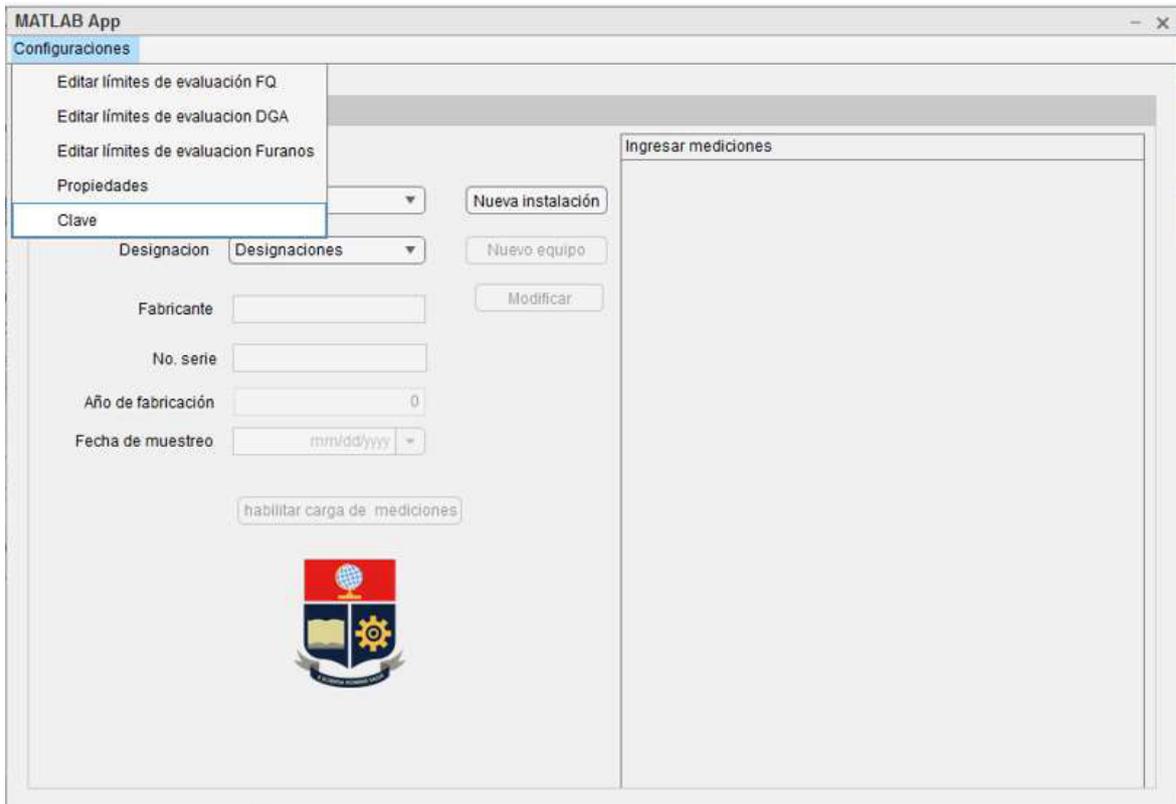


Figura 24. Configuración de límites de evaluación FQ, DGA y contenido Furanos

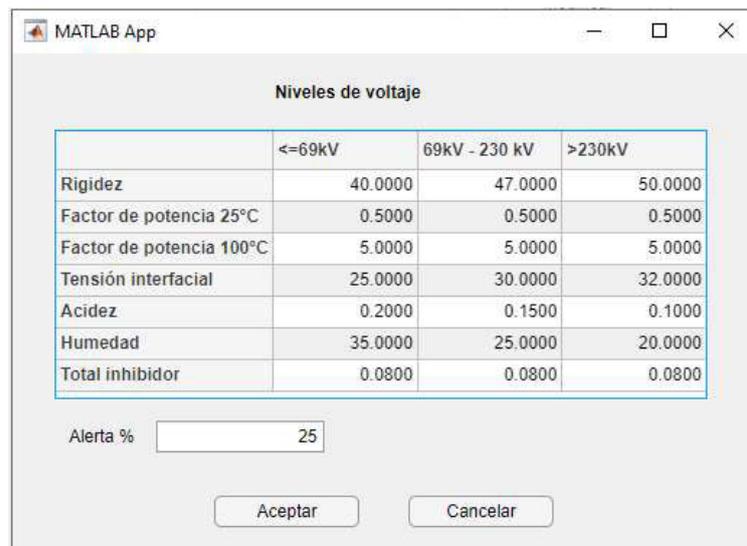


Figura 25. Sustentabilidad de la herramienta informática

Los resultados de ensayos de aptitud eléctrica y dieléctrica, medición de propiedades físico-químicas del fluido aislante, contenido furánico, cromatografía de gases disueltos, realizados a los transformadores de la EEQ S.A se ingresaron al repositorio de la información de la herramienta informática.

En la **Figura 26** se muestra la lista desplegable de las subestaciones ingresadas con sus respectivos transformadores.

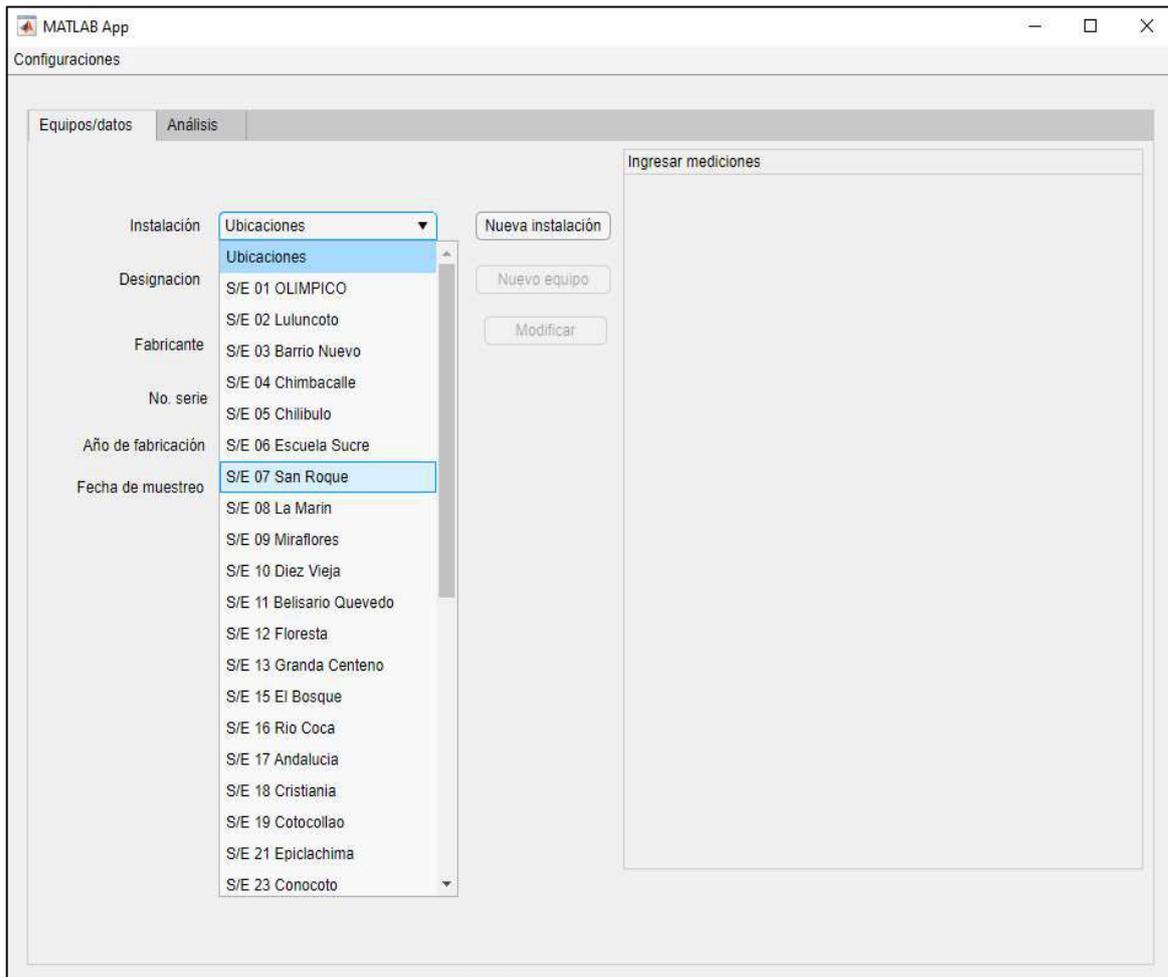


Figura 26. Lista desplegable de las subestaciones ingresadas

Con la finalidad de que la herramienta informática sea dinámica y sostenible en el tiempo, se ha creado en la parte inferior del módulo el botón **habilitar carga de mediciones** el cual permite el ingreso de los resultados de las recientes pruebas realizadas y para las próximas pruebas planificadas.

Configuraciones

Equipos/datos | Análisis

Instalación: S/E 02 Luluncoto [Nueva instalación]

Designación: T1 [Nuevo equipo]

Fabricante: ABB [Modificar]

No. serie: 200790

Año de fabricación: 2010

Fecha de muestreo: mm/dd/yyyy

habilitar carga de mediciones

Ingresar mediciones

FQ	DGA	Furanos	
		Acidez	0 mg KOH/g
		Tensión interfacial	0 mN/m
		Color	0
		Humedad	0
		Rigidez dieléctrica D877	0 kV
		Rigidez dieléctrica D1816	0 kV
		Gravedad específica	0
		Inhibidor DBP	0 %
		Inhibidor DBPC	0 %
		Total Inhibidor	0 %
		Azufre corrosivo	0
		PCBs	0 ppm
		Factor de potencia 25 C	0 %
		Factor de potencia 100 C	0 %

Cargar mediciones FQ

Figura 27. Ingreso de resultados de las pruebas realizadas FQ, DGA y Furanos

La **Figura 28** detalla el ingreso de nuevas instalaciones (subestaciones) y de transformadores. Debido a la sensibilidad y trazabilidad de la información a ingresar, esta opción requiere una contraseña

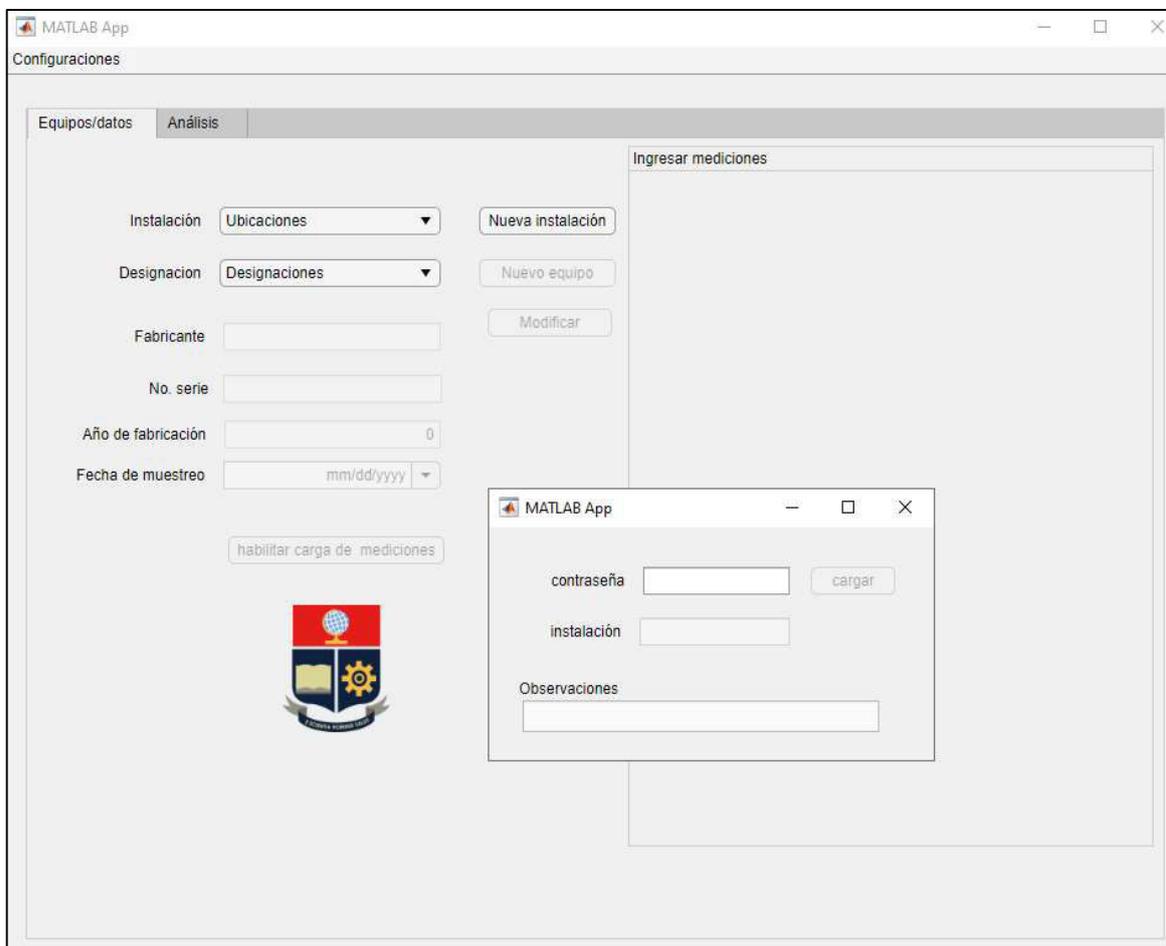


Figura 28. Ingreso de nueva Subestación (instalación)

El **Botón modificar** se aplica al momento de ingresar información de los resultados actuales de las pruebas realizadas FQ, DGA y Furanos; no modifica la base de datos.

3.2.2 MÓDULO DE ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS INGRESADOS

El administrador o usuario considerando la criticidad del Análisis de Gases Disueltos (DGA) obtenido a partir del estudio de los resultados de las pruebas realizadas FQ, DGA y Furanos; así como el análisis visual de las tendencias disponible en el módulo de análisis, aplica las metodologías de triángulo y pentágono de Duval (descrito en IEEE Std. C57.104 2019) con la finalidad de determinar el origen probable de la producción de gases de los transformadores de potencia.

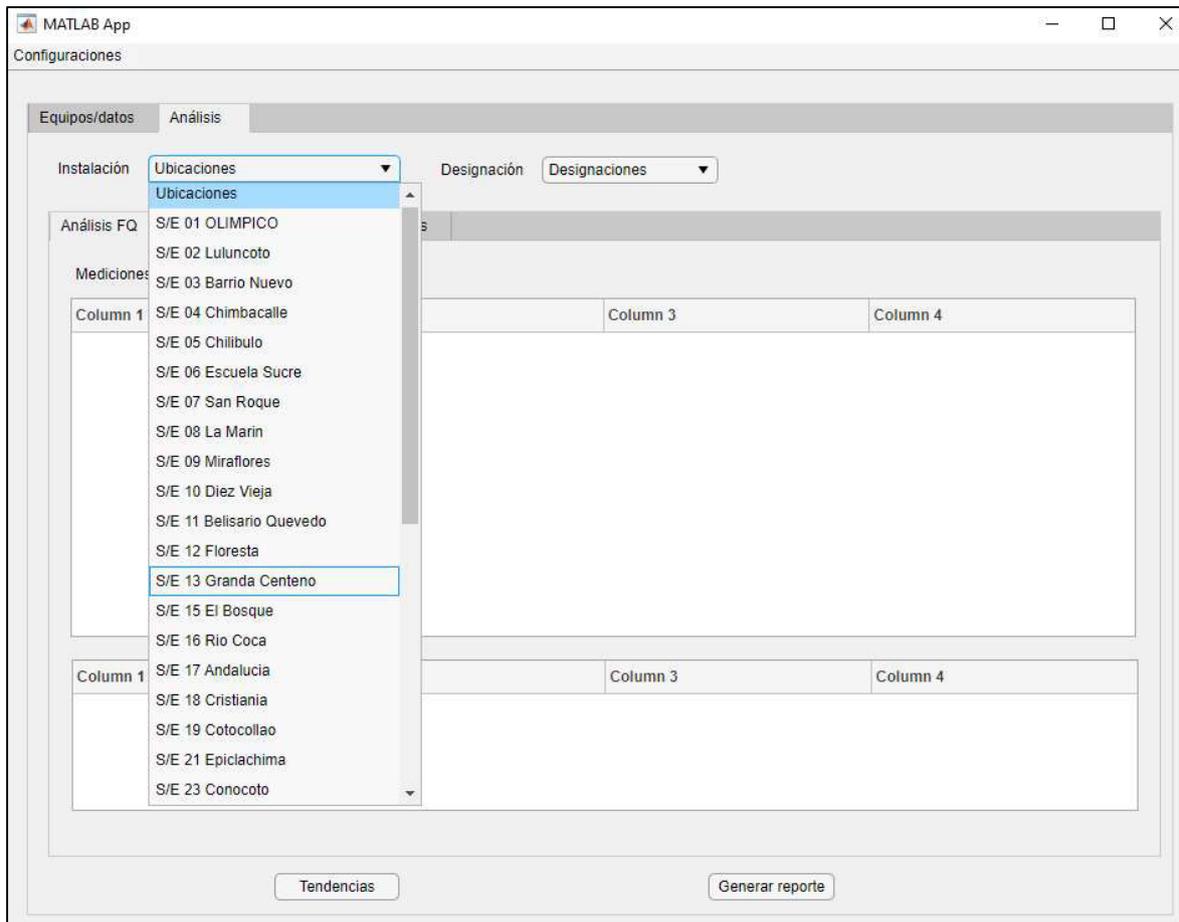


Figura 29. Módulo de selección de subestación y equipo a ser analizado

3.2.2.1 ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO FQ

En el Análisis e Interpretación de Resultados de Transformadores, se ve necesario contar con el apoyo de alarmas de estado, tendencias y correlación de variables expuestas de manera cronológicas brindándole al usuario una mejor interpretación. Dichos recursos se encuentran ubicados en el módulo de análisis de la herramienta informática y se muestran en la **Figura 30**, **Figura 31** y **Figura 32**.

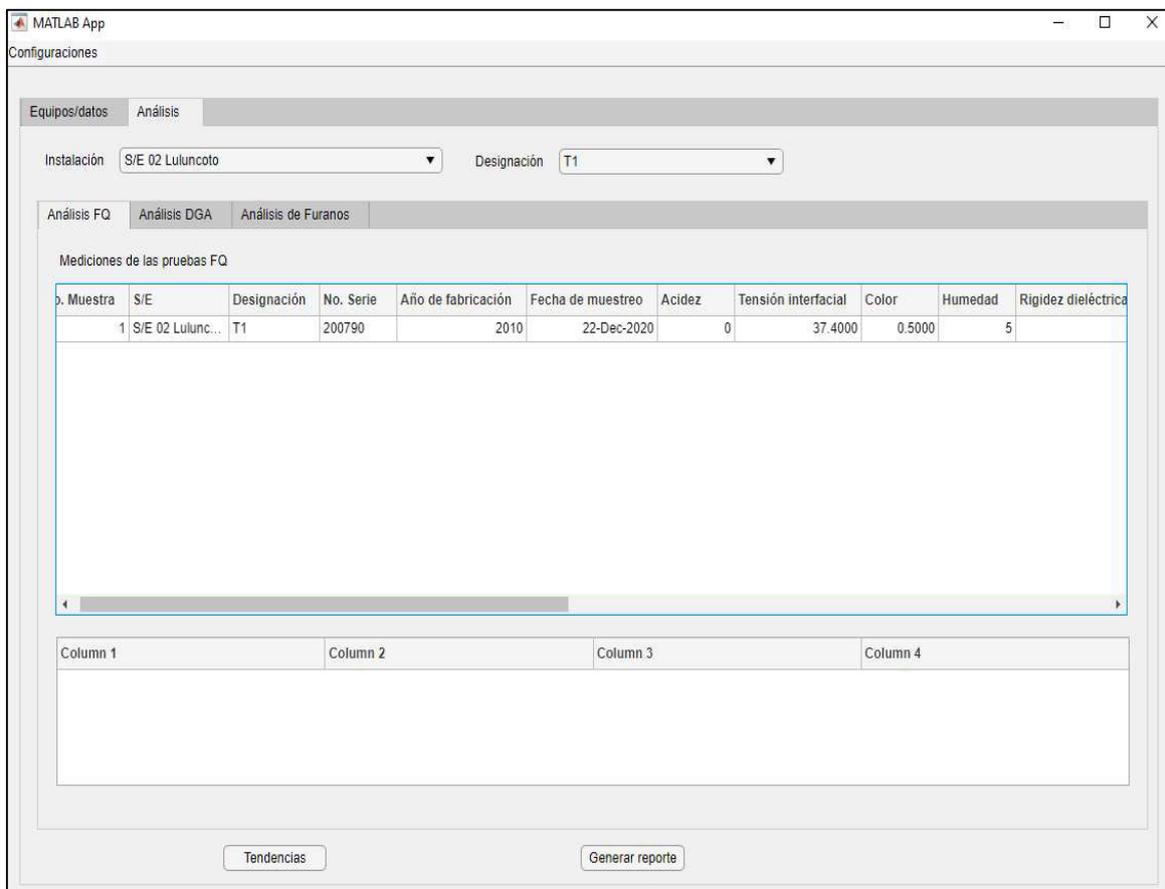


Figura 30. Análisis FQ de la muestra del T1 S/E Luluncoto

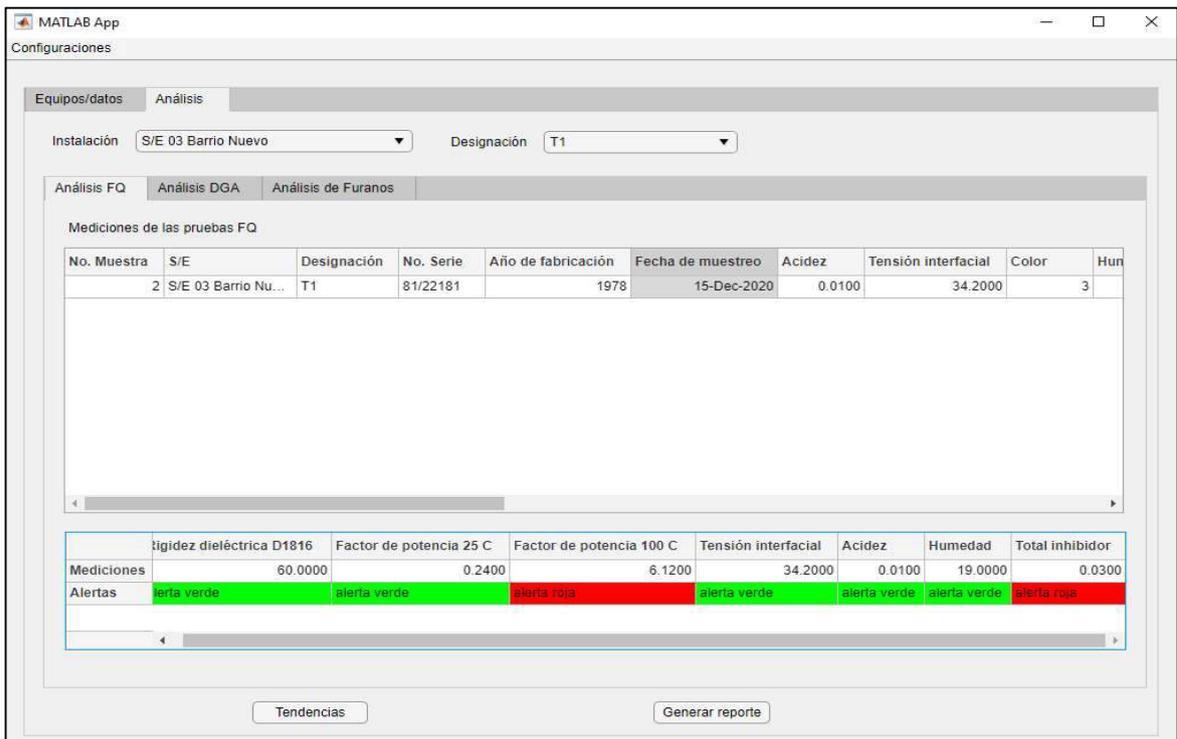
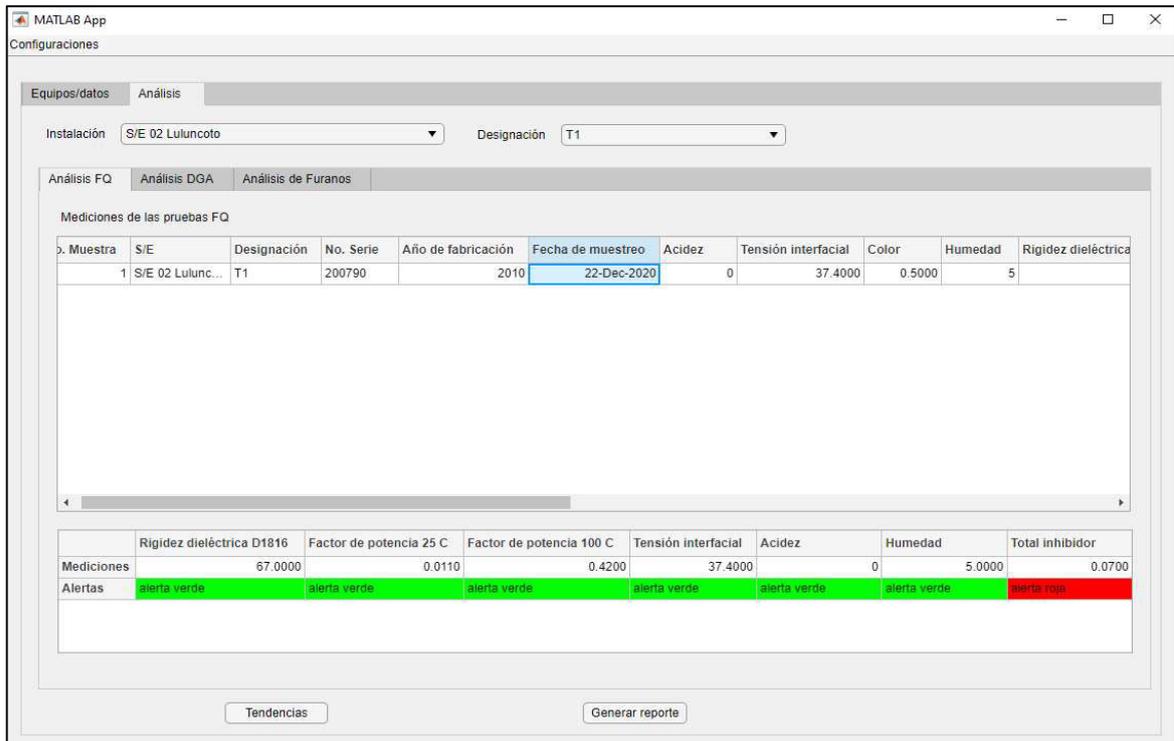


Figura 31. Alarmas de estado de las muestras T1 S/E 02 Luluncoto, T1 S/E 03 Barrio Nuevo

El banner contiene las variables, intervalo de tiempo e interfaz gráfica.

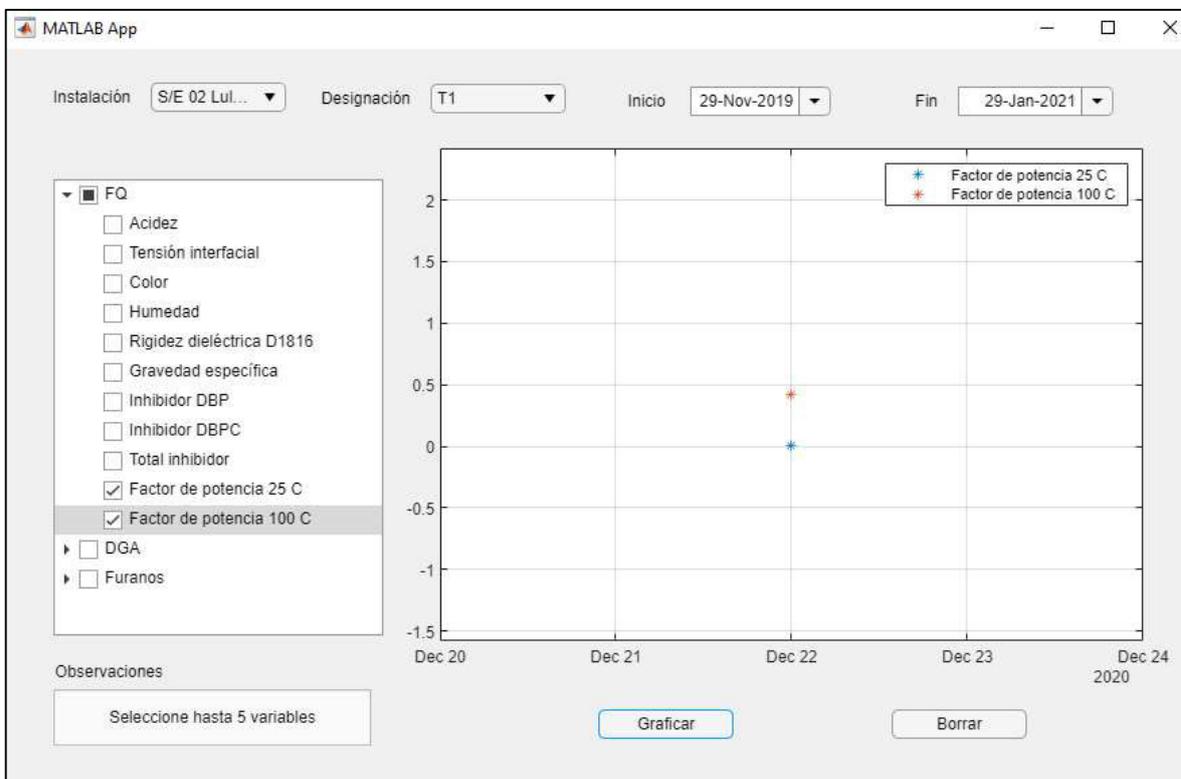
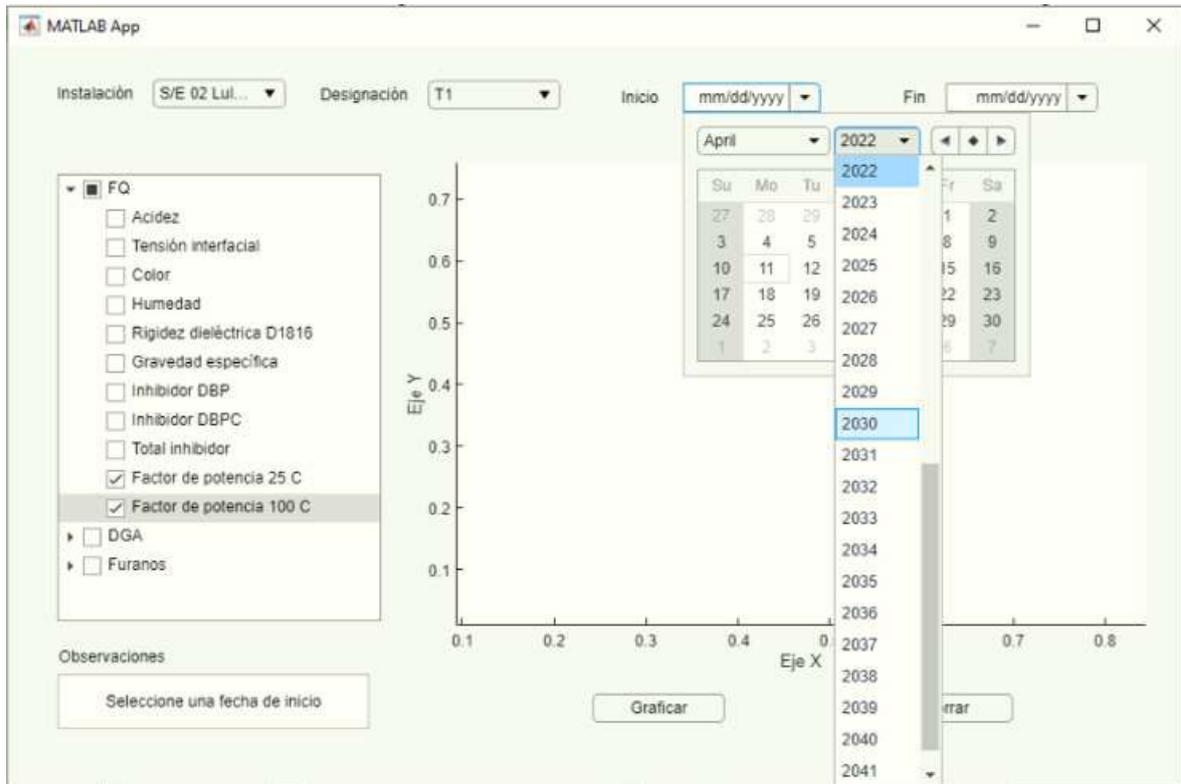


Figura 32. Gráfica de las variables seleccionadas en un intervalo de tiempo

3.2.2.2 ANÁLISIS CROMATOGRFÍA DE GASES DISUELTOS DGA

El análisis DGA es una herramienta de diagnóstico muy útil para la evaluación del estado de los transformadores de potencia. El módulo de análisis indica el número de muestras realizadas o ingresadas del transformador en estudio, la misma que se debe seleccionar en la columna informativa **Fecha de muestreo**.

Una vez fijada la fecha del muestreo la herramienta informática calcula las variaciones y deltas entre los gases analizados. Posterior al cálculo y de acuerdo con lo descrito en el punto 1.4.6 trae un flujograma para el análisis e interpretación del estado de datos DGA [5].

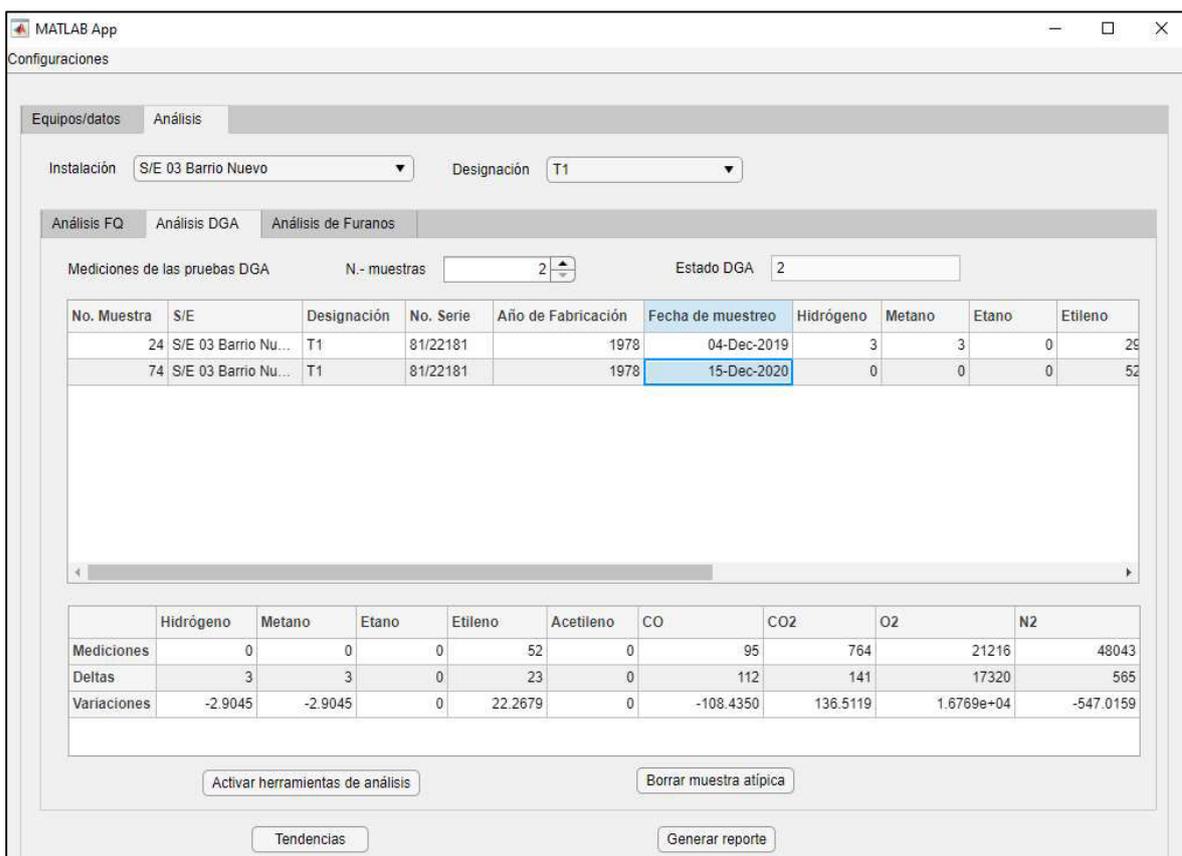


Figura 33. Análisis DGA

La evaluación mediante datos históricos y análisis de tendencia de estos resultados nos permite determinar la evolución de problemas de tipo eléctrico y/o térmico que se estén presentando en los transformadores. En este sentido como se muestra en la **Figura 34**, **Figura 35**, la herramienta informática permite la correlación de las variables seleccionadas y evaluación dentro de un intervalo de tiempo.

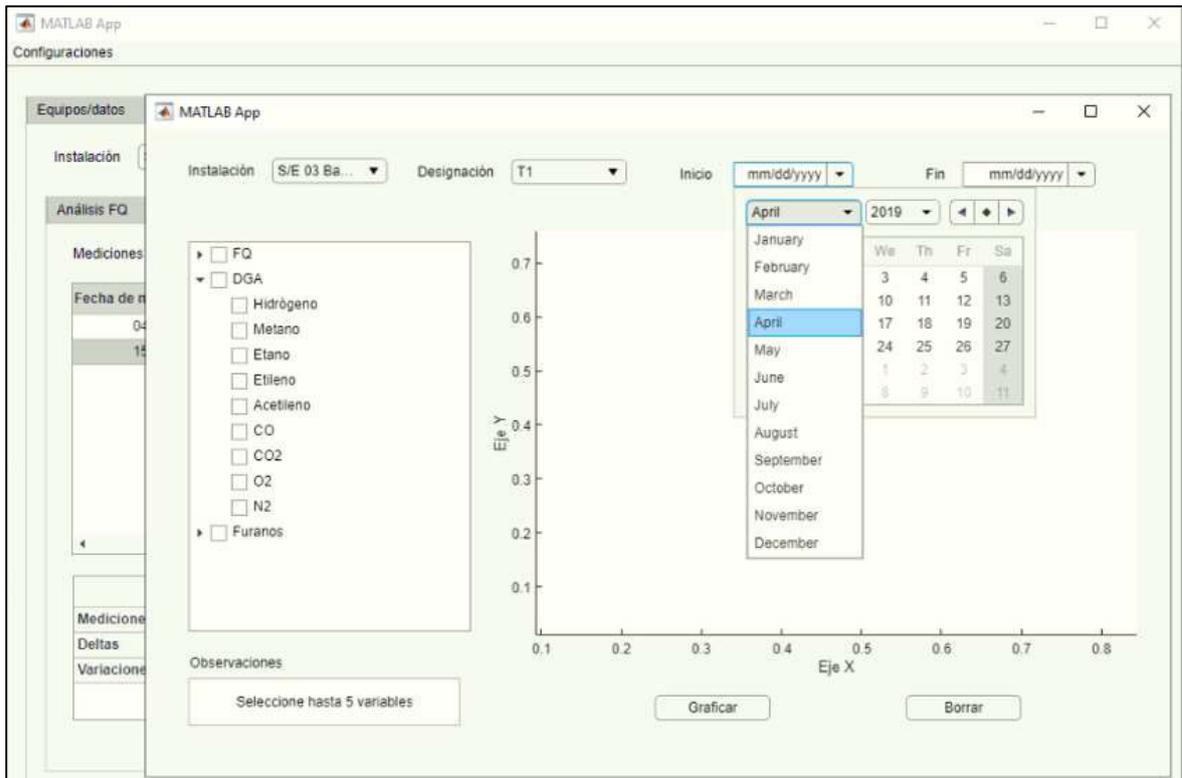


Figura 34. Selección de variables e intervalo de tiempo

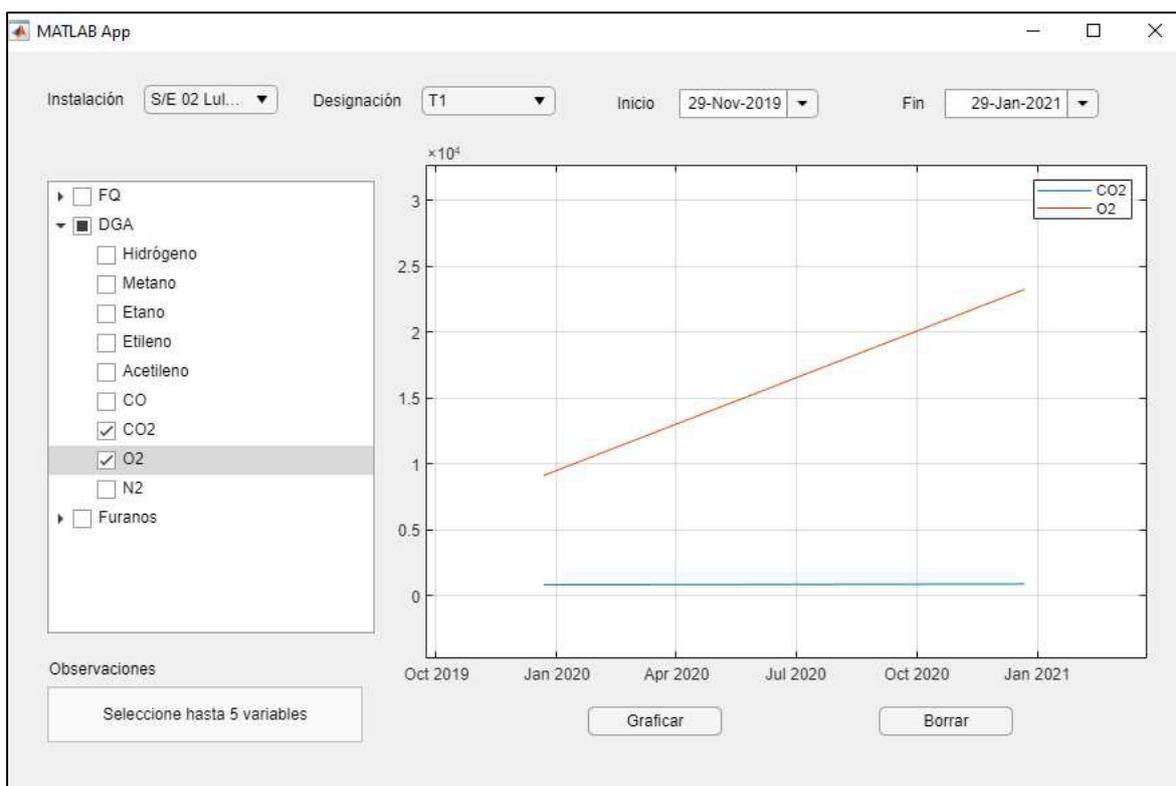
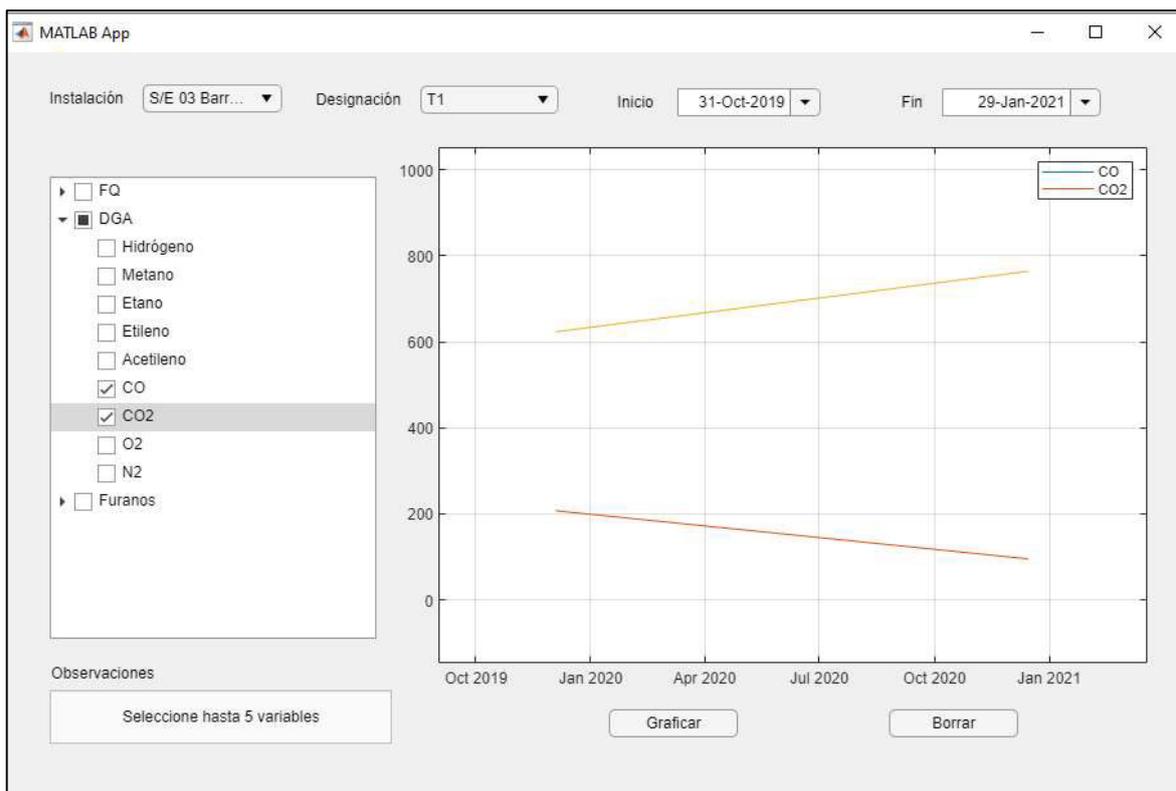


Figura 35. Gráfica de las variables seleccionadas en un intervalo de tiempo

En complemento al análisis de cromatografía de gases es imprescindible emplear el método de: Triángulo de DUVAL debido a su gran precisión. El método consta de un triángulo equilátero dentro del cual existen zonas delimitadas, cada una de ellas representa una falla. El número de zonas depende del tipo de líquido y el tipo de fallas que se quieren detectar, esto hace que existan siete versiones distintas del Triángulo de Duval [13].

De hecho, en el módulo de análisis de los resultados en la parte inferior izquierda se encuentra el botón **Activar herramienta de análisis**. Este interfaz despliega los cuatro triángulos empleados para el análisis de cromatografía de gases disueltos en el aceite dieléctrico mineral de los transformadores de potencia.

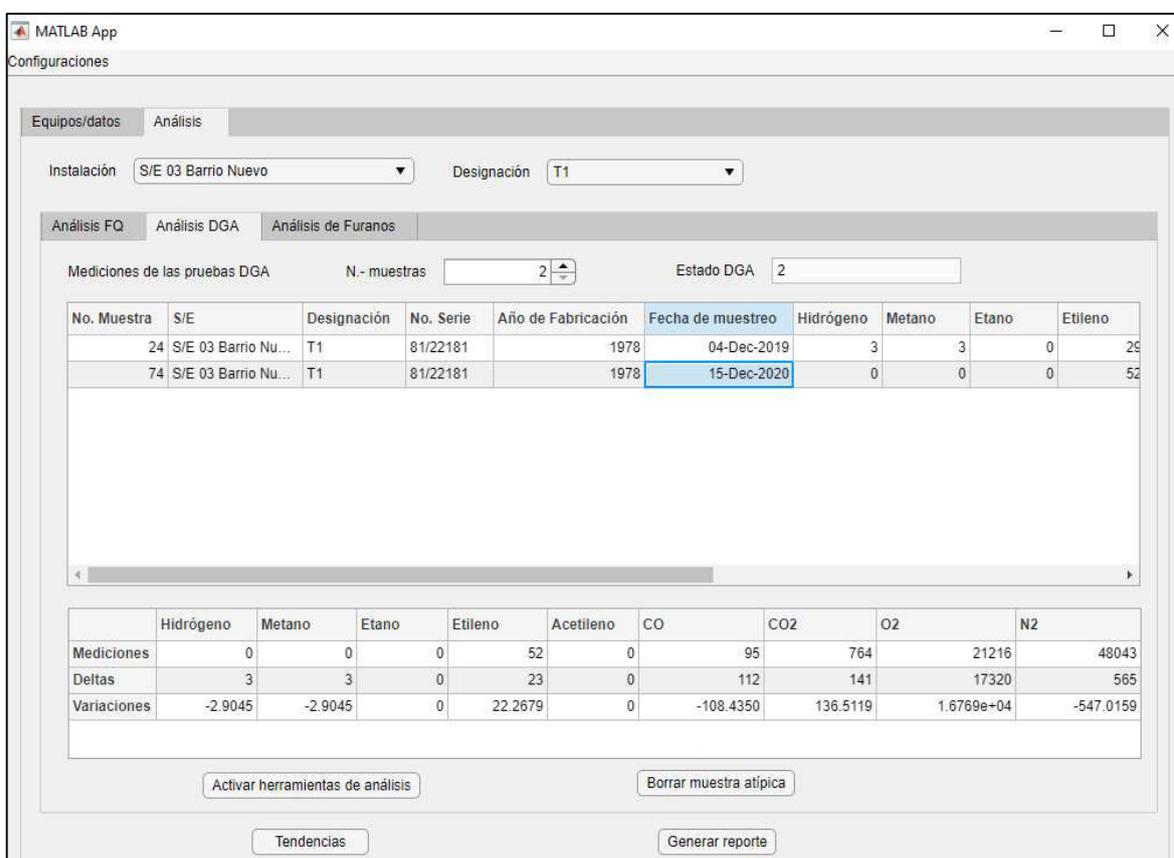


Figura 36. Herramienta de análisis DGA

En la **Figura 37**, **Figura 38**, **Figura 39** y **Figura 40** se observa la evaluación de la muestra de aceite del transformador T1 de la subestación S/E 03 Barrio Nuevo

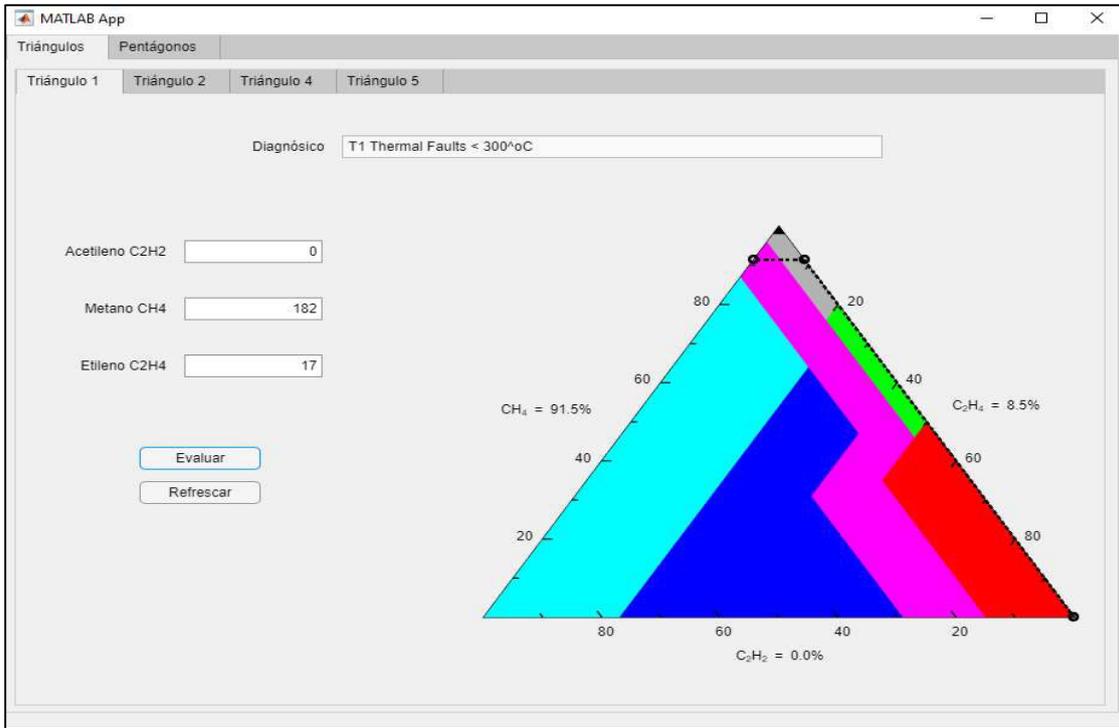


Figura 37. Triangulo uno DUVAL

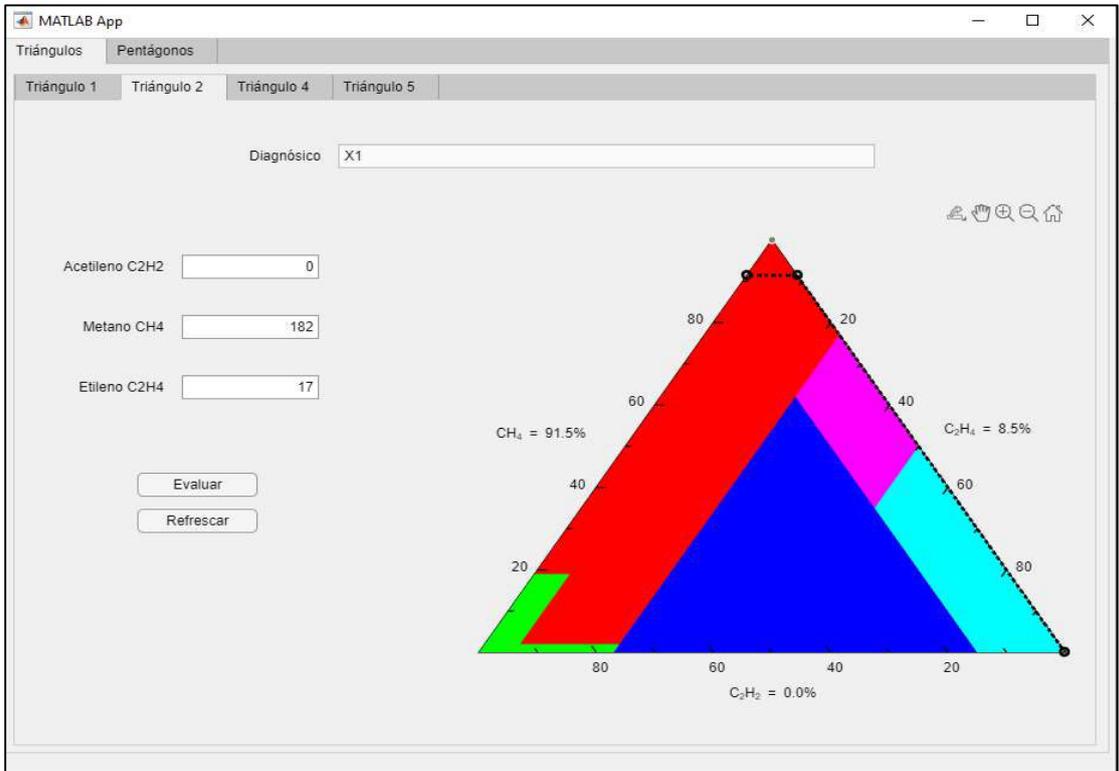


Figura 38. Triangulo dos DUVAL

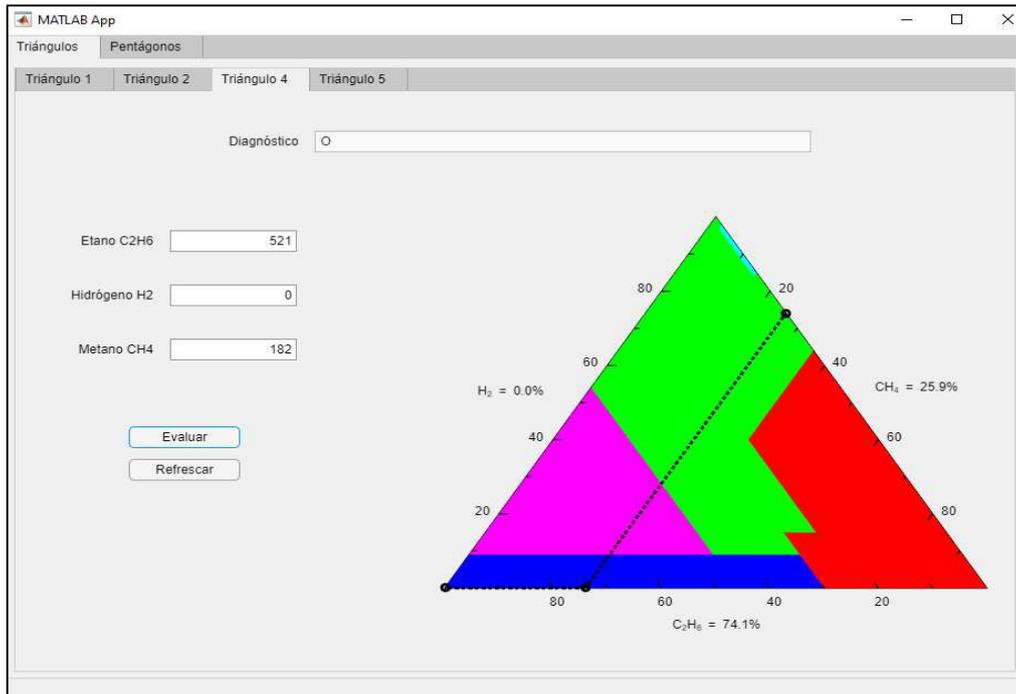


Figura 39. Triangulo cuatro DUVAL

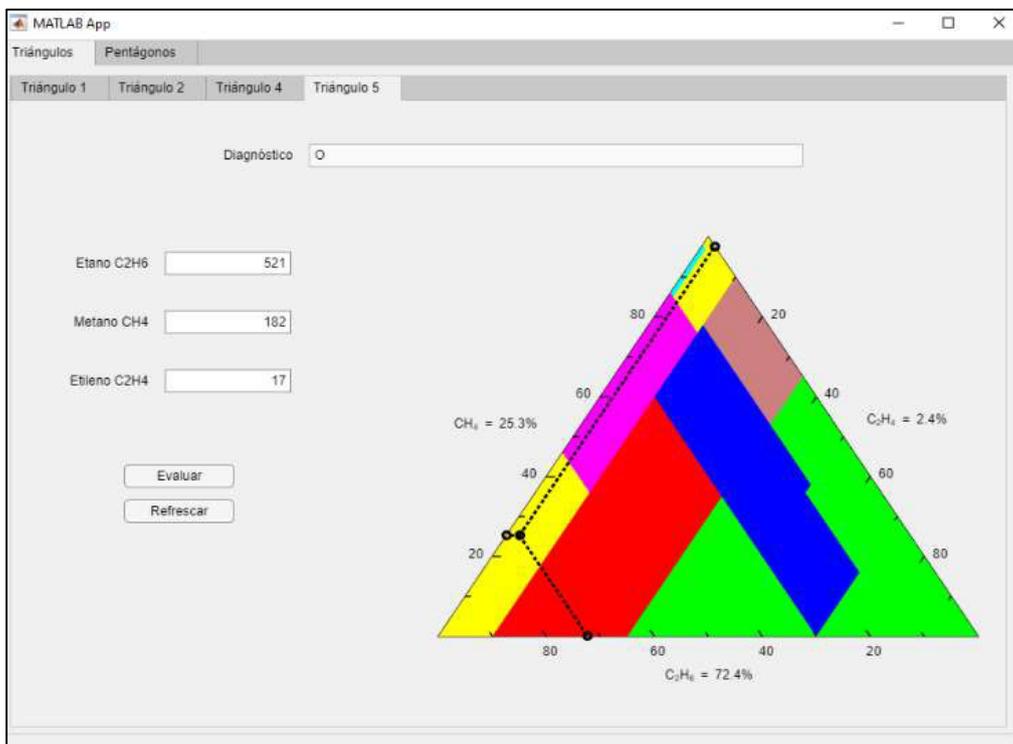


Figura 40. Triangulo cinco DUVAL

Los pentágonos DUVAL ayudan al diagnóstico de fallas presentes en transformadores de potencia con base al análisis de gases disueltos en aceite (DGA). El usuario puede realizar una evaluación de estado al ingresar a la **herramienta de análisis** dispuesto en la parte inferior del modulo de análisis de resultados.

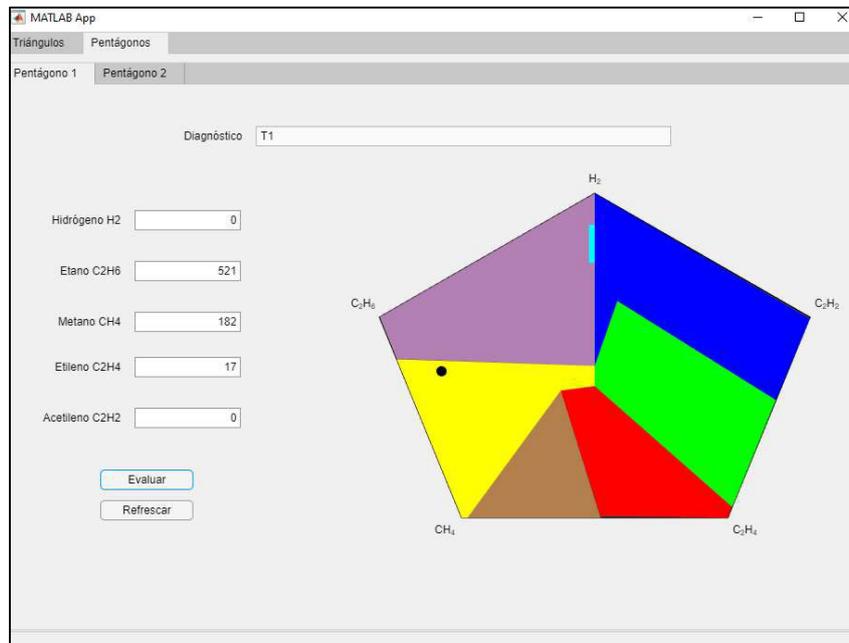


Figura 41. Pentágono uno DUVAL estado posterior a la evaluación muestra T1 S/E 03

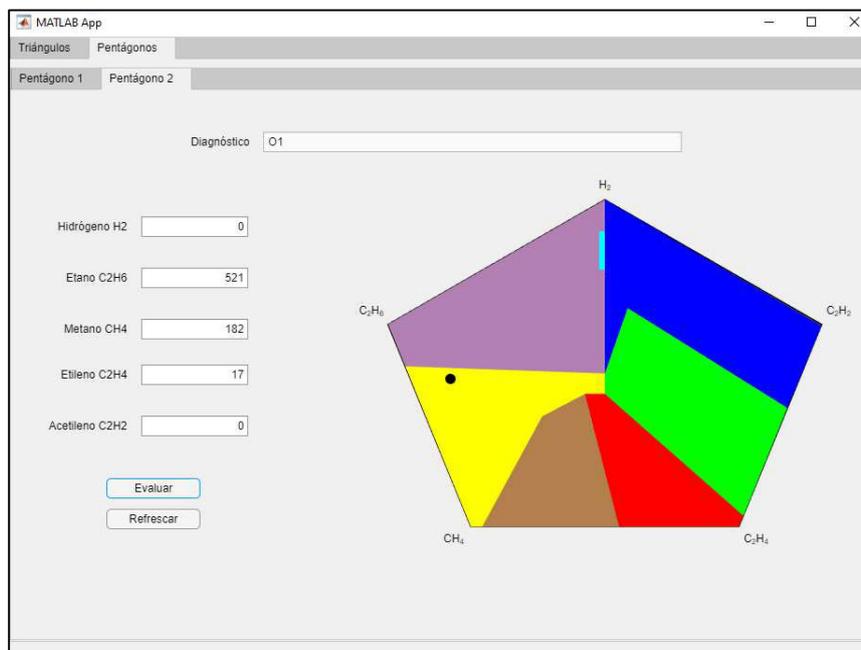


Figura 42. Pentágono dos DUVAL estado posterior a la evaluación muestra T1 S/E 03

3.2.2.3 GRADO DE POLIMERIZACIÓN

Para deducir la condición del papel aislante y estimar el valor de Grado de Polimerización (GP) se ejecuta el análisis del contenido furánico. Las concentraciones se informan como un grado estimado de polimerización. El usuario puede acceder a este análisis a través del módulo de Furanos dispuesto en la parte central de la interfaz como lo muestra la **Figura 43**.

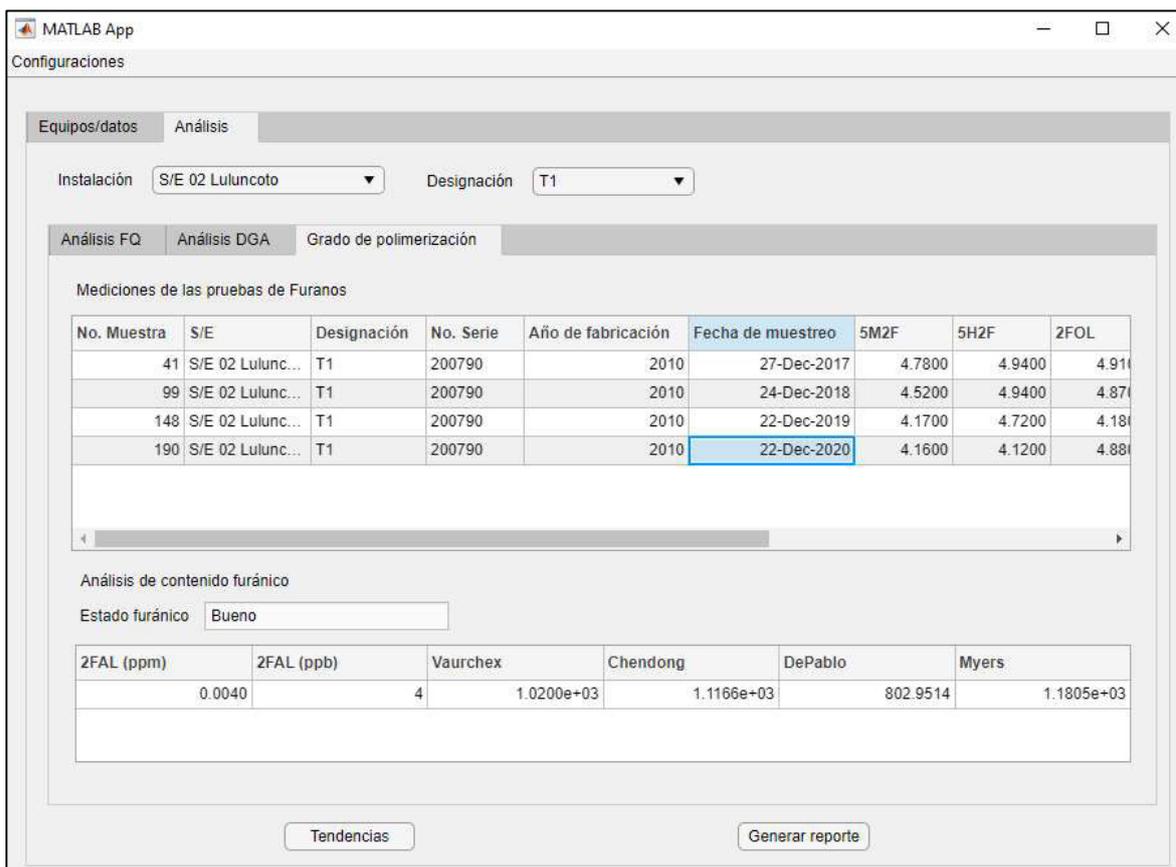


Figura 43. Análisis de contenido furánico del T1 S/E Luluncoto

La evaluación mediante datos históricos y análisis de tendencia de estos resultados nos permite determinar la evolución de problemas y condición del papel aislante que se estén presentando en los transformadores. En este sentido como se muestra en la **Figura 44**, la herramienta informática permite la correlación de las variables seleccionadas y evaluación dentro de un intervalo de tiempo

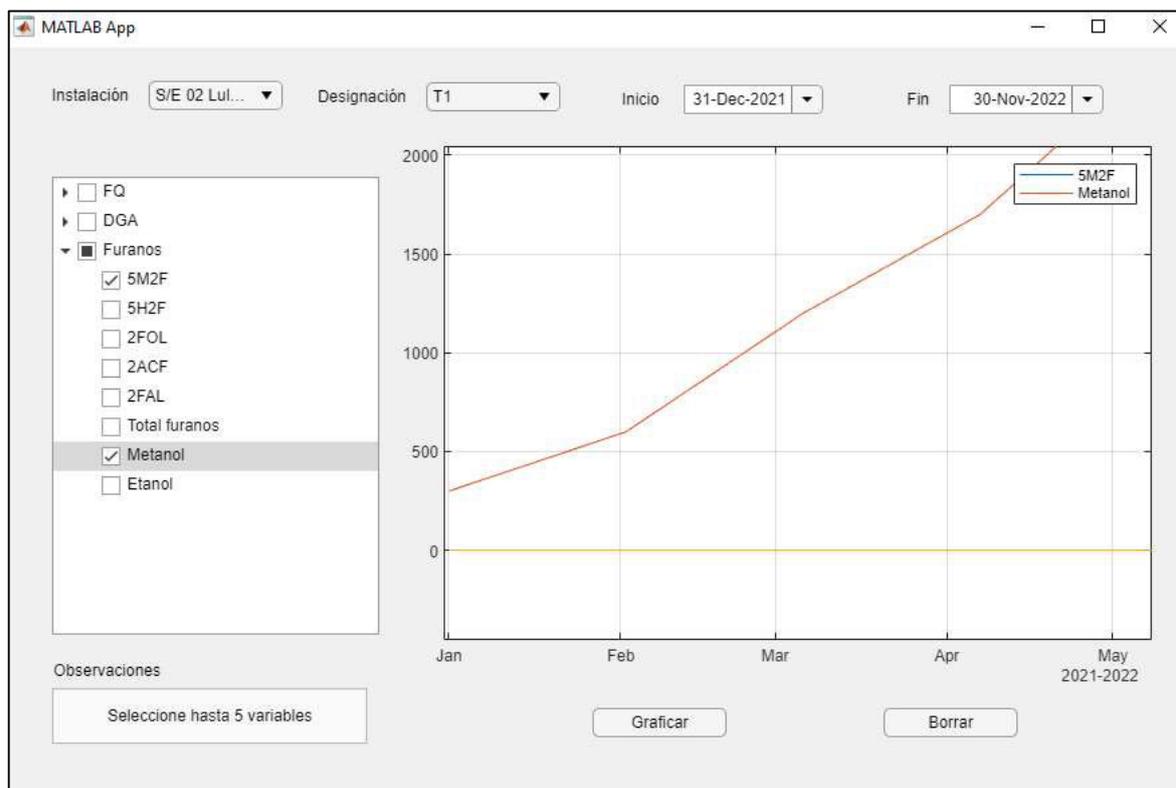


Figura 44. Gráfica de las variables seleccionadas en un intervalo de tiempo

3.2.3 MÓDULO DE DESARROLLO DE REPORTE

Para finalizar el proceso de ingreso y análisis de los resultados de las pruebas realizadas a los transformadores, la herramienta informática programada en MATLAB emite un reporte con el análisis de tendencias y gráficas descritas en los apartados 3.2.2.1, 3.2.2.2 y 3.2.2.3.

Cada apartado del análisis contiene el parte inferior un botón **Generar reporte**, el cual abre un interfaz de selección múltiple como se muestra en la **Figura 45**.

Este reporte se exporta de manera automática en formato .docx (Word) y se detalla en el ANEXO B

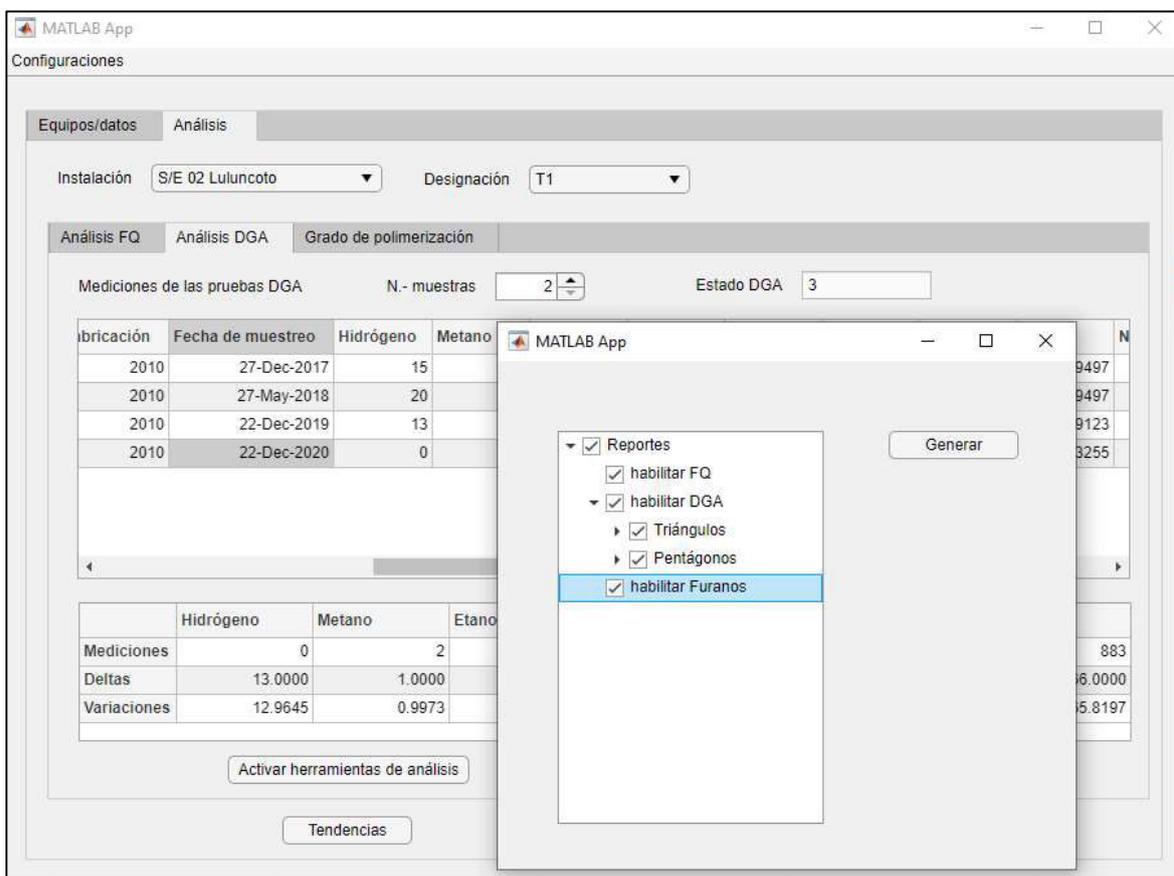


Figura 45. Generar reporte de análisis FQ, DGA y Contenido furánico

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados más relevantes obtenidos en la ejecución de la herramienta informática al análisis y procesamiento de los datos de los ensayos de aptitud eléctrica y dieléctrica, medición de propiedades físico-químicas del fluido aislante, contenido furánico, cromatografía de gases disueltos realizados a los transformadores de potencia de la EEQ son presentados en cuatro escenarios de estudio.

4.1. ESCENARIO UNO

En el escenario uno se consideraron los resultados de las pruebas realizadas al transformador de potencia T1 de la subestación S/E 08 Marín

Tabla 9. Resultados de la medición de las propiedades físicas y químicas T1 S/E 08 La Marín – Fecha de muestreo 06-Dec-2020

Rigidez D1816	Factor de potencia 25°C	Factor de potencia 100°C	Tensión interfacial	Acidez	Humedad	Inhibidor
65	0,045	1,2	36,4	0,01	11	0

Tabla 10. Resultados de pruebas cromatográficas T1 S/E 08 La Marín – Fecha de muestreo 19-Nov-2019

Hidrogeno (H2)	Metano (CH4)	Etano (C2H6)	Etileno (C2H4)	Acetileno	Monóxido de Carbono (CO)	Dióxido de Carbono (CO2)	Nitrógeno (N2)	Oxígeno (O2)
26	75	119	10	0	146	5423	66837	157

Tabla 11. Resultados de pruebas cromatográficas T1 S/E 08 La Marín – Fecha de muestreo 06-Dec-2020

Hidrogeno (H2)	Metano (CH4)	Etano (C2H6)	Etileno (C2H4)	Acetileno	Monóxido de Carbono (CO)	Dióxido de Carbono (CO2)	Nitrógeno (N2)	Oxígeno (O2)
20	82	128	6	0	155	5284	64553	1008

Tabla 12. Resultados del contenido furánico S/E 08 La Marín – Fecha de muestreo 06-Dec-2020

2-Furaldehído (2FAL)	5-Metil-2-Furaldehído (5M2F)	5-Hidroxi-metil-2-Furaldehído (5H2F)	2-Acetilfurano (2ACF)	2-Furfurol (2FOL)
17	0,045	1,2	5,1	4,3

De acuerdo con lo indicado en el punto **3.2.1.1** las alarmas de estado se muestran en la siguiente figura:

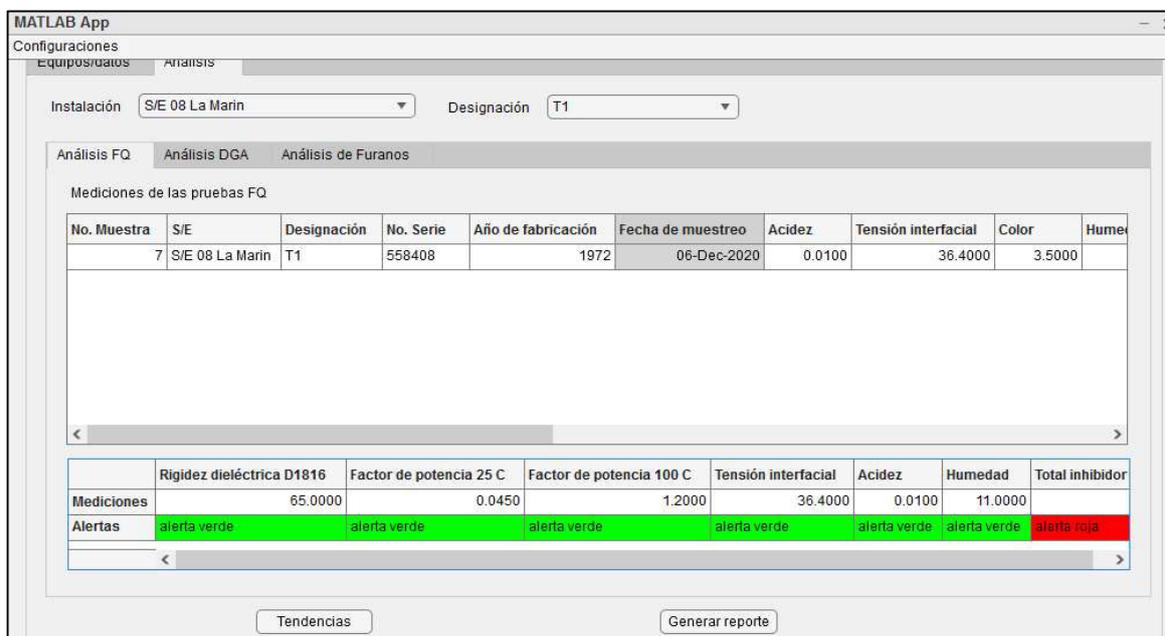


Figura 46. Alarma de estado en el análisis FQ del transformador T1 S/E 08 La Marín

De acuerdo con lo indicado en el punto 3.2.1.2 las alarmas de estado se muestran en la siguiente figura:

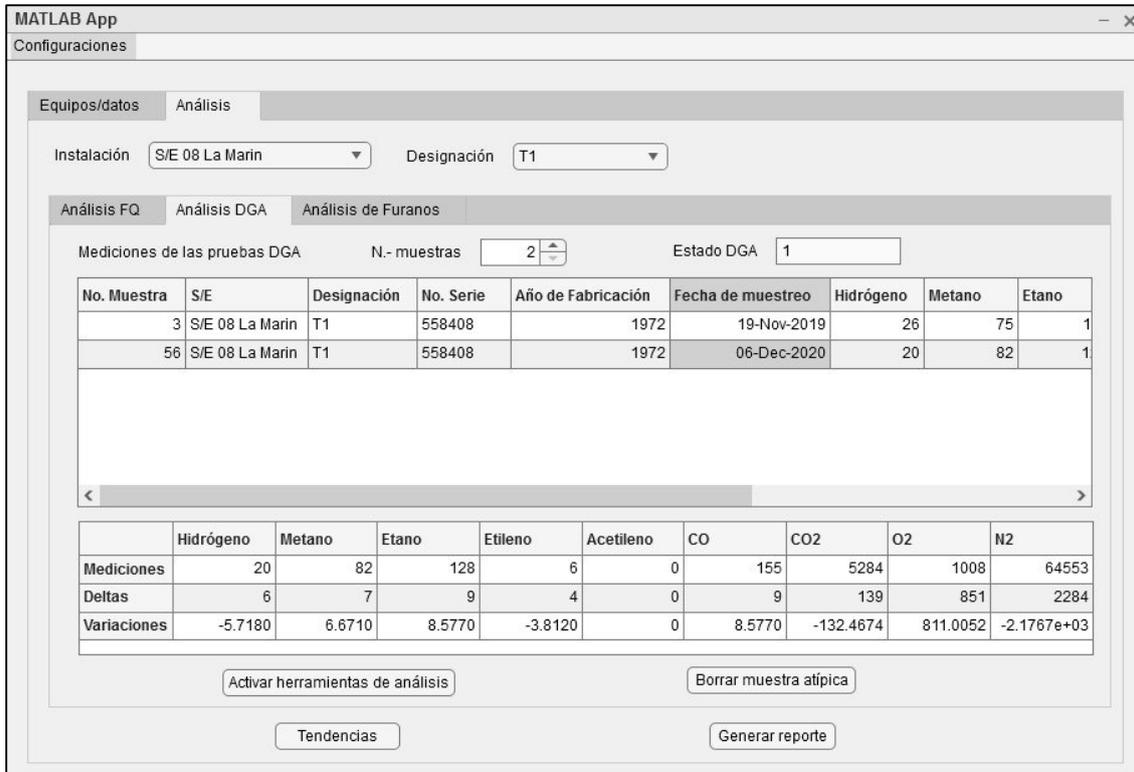


Figura 47. Estado DG1

De acuerdo con lo indicado en el punto 3.2.1.3 las alarmas de estado se muestran en la siguiente figura

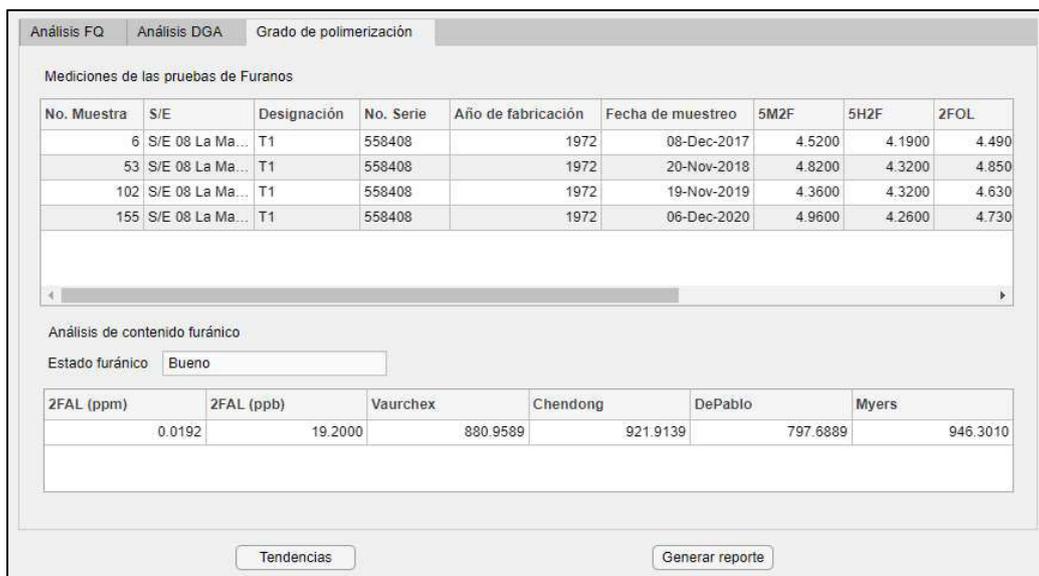


Figura 48. Grado de polimerización Bueno

4.2. ESCENARIO DOS

En el escenario dos se consideraron los resultados de las pruebas realizadas al transformador de potencia T1 de la subestación S/E 03 Barrio Nuevo

Tabla 13. Resultados de la medición de las propiedades físicas y químicas T1 S/E 03 Barrio Nuevo – Fecha de muestreo 15-Dec-2020

Rigidez D1816	Factor de potencia 25°C	Factor de potencia 100°C	Tensión interfacial	Acidez	Humedad	Inhibidor
60	0,24	6,12	34,2	0,01	19	0,03

Tabla 14. Resultados de pruebas cromatográficas T1 S/E 03 Barrio Nuevo – Fecha de muestreo 04-Dec-2019

Hidrogeno (H2)	Metano (CH4)	Etano (C2H6)	Etileno (C2H4)	Acetileno	Monóxido de Carbono (CO)	Dióxido de Carbono (CO2)	Nitrógeno (N2)	Oxígeno (O2)
3	3	0	29	0	207	623	48608	3896

Tabla 15. Resultados de pruebas cromatográficas T1 S/E 03 Barrio Nuevo – Fecha de muestreo 15-Dec-2020

Hidrogeno (H2)	Metano (CH4)	Etano (C2H6)	Etileno (C2H4)	Acetileno	Monóxido de Carbono (CO)	Dióxido de Carbono (CO2)	Nitrógeno (N2)	Oxígeno (O2)
0	0	0	52	0	95	764	48043	21216

Tabla 16. Resultados del contenido furánico S/E 03 Barrio Nuevo – Fecha de muestreo 15-Dec-2020

2-Furaldehído (2FAL)	5-Metil-2-Furaldehído (5M2F)	5-Hidroximetil-2-Furaldehído (5H2F)	2-Acetilfurano (2ACF)	2-Furfurol (2FOL)
41	0,045	1,2	4,7	3,3

De acuerdo con lo indicado en el punto **3.2.1.1** las alarmas de estado se muestran en la siguiente figura:

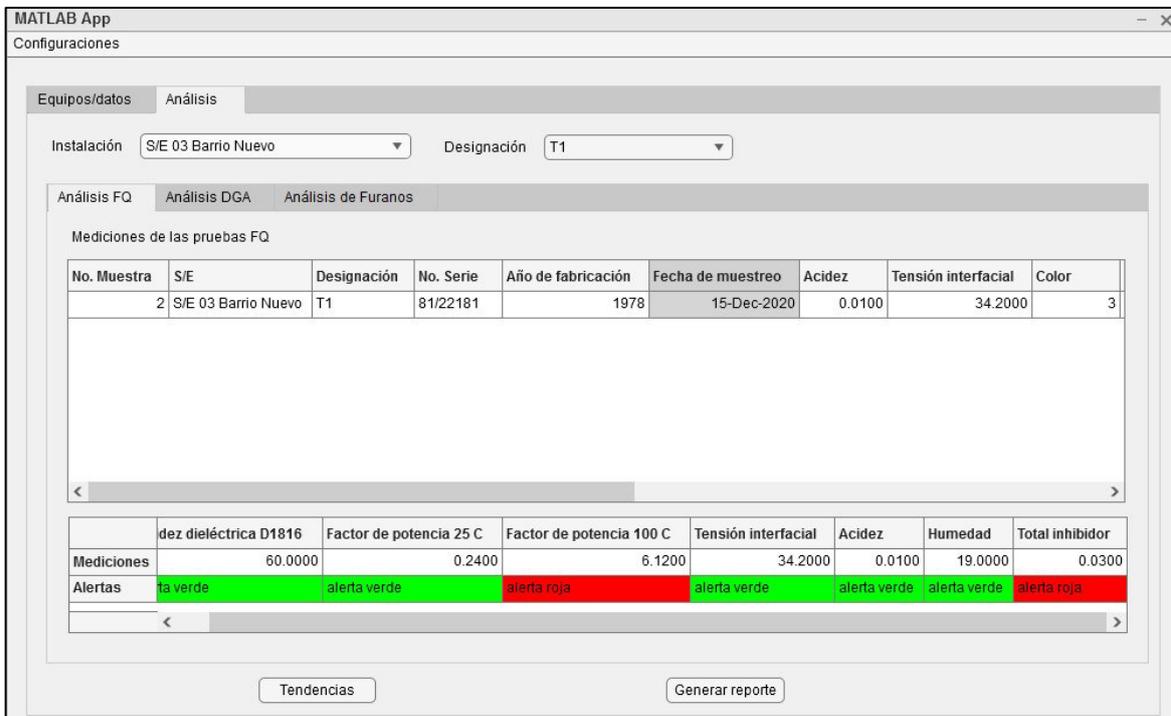


Figura 49. Alarma de estado en el análisis FQ del transformador T1 S/E 03 Barrio Nuevo

De acuerdo con lo indicado en el punto 3.2.1.2 las alarmas de estado se muestran en la siguiente figura:

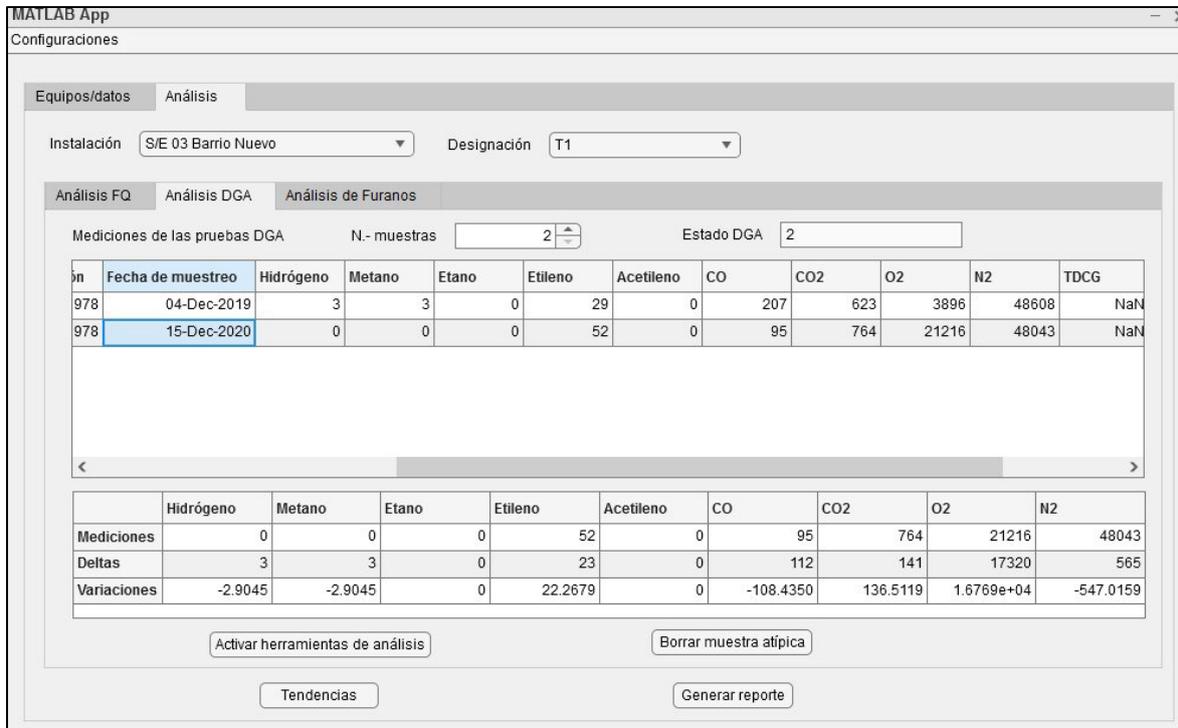


Figura 50. Estado DG2

De acuerdo con lo indicado en el punto 3.2.1.3 las alarmas de estado se muestran en la siguiente figura

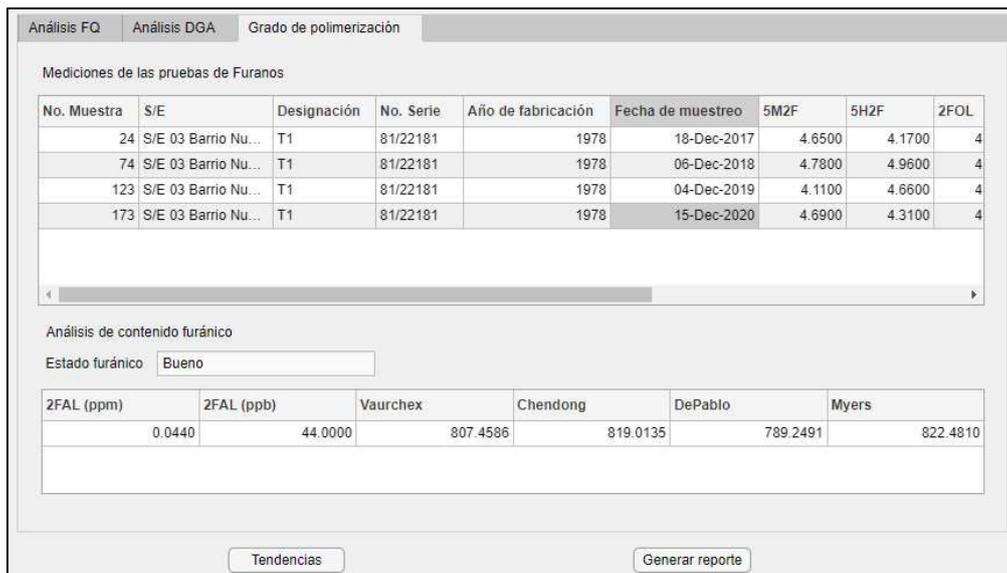


Figura 51. Grado de polimerización Aceptable

4.3. ESCENARIO TRES

En el escenario uno se consideraron los resultados de las pruebas realizadas al transformador de potencia T1 de la subestación S/E 02 Luluncoto

Tabla 17. Resultados de la medición de las propiedades físicas y químicas T1 S/E 02 Luluncoto – Fecha de muestreo 22-Dec-2020

Rigidez D1816	Factor de potencia 25°C	Factor de potencia 100°C	Tensión interfacial	Acidez	Humedad	Inhibidor
67	0,01	0,42	37,4	0	5	0

Tabla 18. Resultados de pruebas cromatográficas T1 S/E 02 Luluncoto – Fecha de muestreo 19-Nov-2019

Hidrogeno (H2)	Metano (CH4)	Etano (C2H6)	Etileno (C2H4)	Acetileno	Monóxido de Carbono (CO)	Dióxido de Carbono (CO2)	Nitrógeno (N2)	Oxígeno (O2)
65	0,045	1,2	36,4	0,01	11	0	51788	9123

Tabla 19. Resultados de pruebas cromatográficas T1 S/E 02 Luluncoto – Fecha de muestreo 06-Dec-2020

Hidrogeno (H2)	Metano (CH4)	Etano (C2H6)	Etileno (C2H4)	Acetileno	Monóxido de Carbono (CO)	Dióxido de Carbono (CO2)	Nitrógeno (N2)	Oxígeno (O2)
65	0,045	1,2	36,4	0,01	11	0	47223	23255

Tabla 20. Resultados del contenido furánico S/E 02 Luluncoto – Fecha de muestreo 06-Dec-2020

2-Furaldehído (2FAL)	5-Metil-2-Furaldehído (5M2F)	5-Hidroximetil-2-Furaldehído (5H2F)	2-Acetilfurano (2ACF)	2-Furfurol (2FOL)
4,98	0,045	3,2	3,4	4,4

De acuerdo con lo indicado en el punto 3.2.1.1 las alarmas de estado se muestran en la siguiente figura:

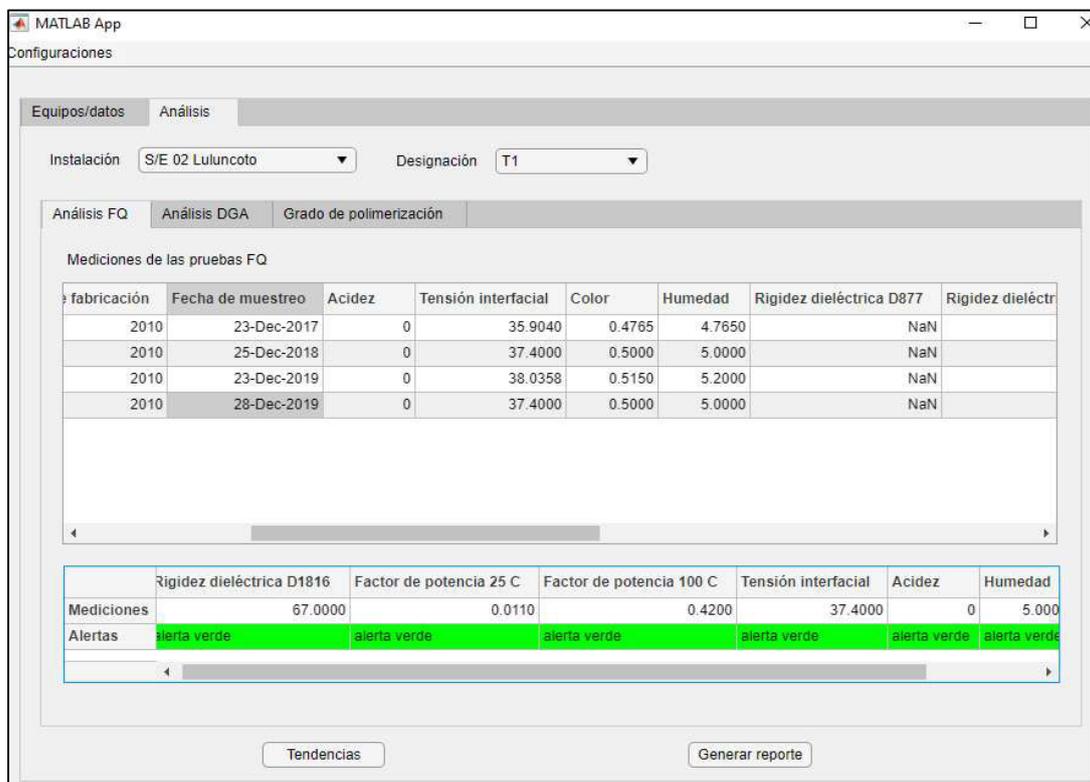


Figura 52. Alarma de estado en el análisis FQ del transformador T1 S/E 02 Luluncoto

De acuerdo con lo indicado en el punto 3.2.1.2 las alarmas de estado se muestran en la siguiente figura:

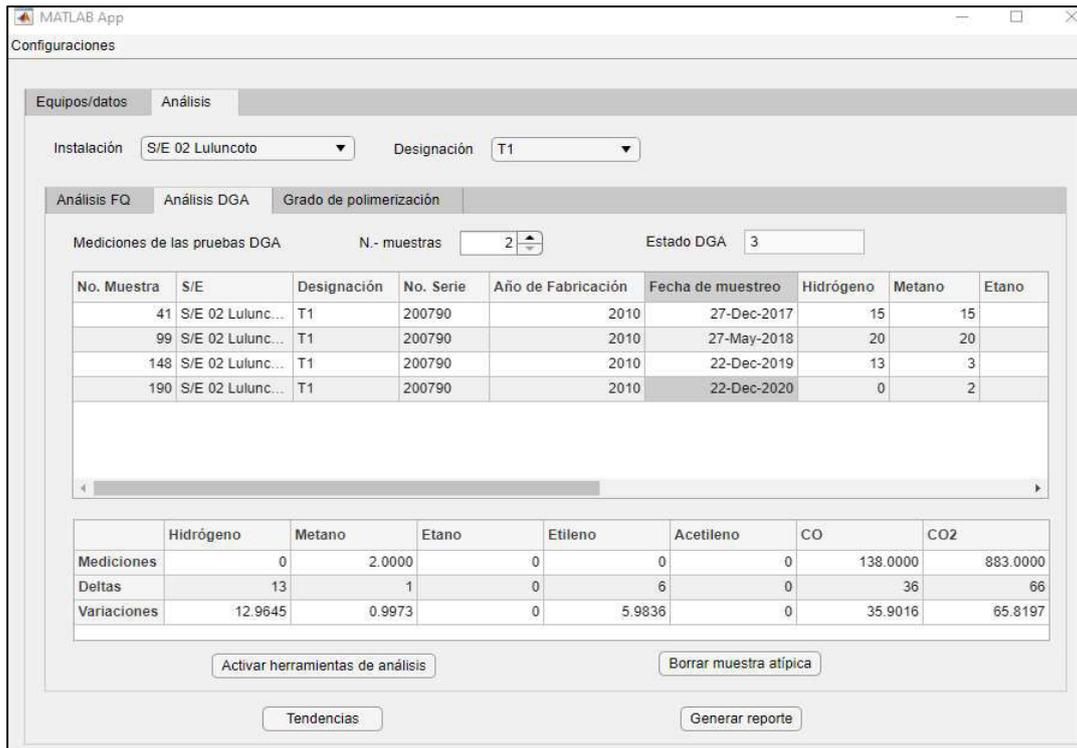


Figura 53. Estado DG3

De acuerdo con lo indicado en el punto 3.2.1.3 las alarmas de estado se muestran en la siguiente figura

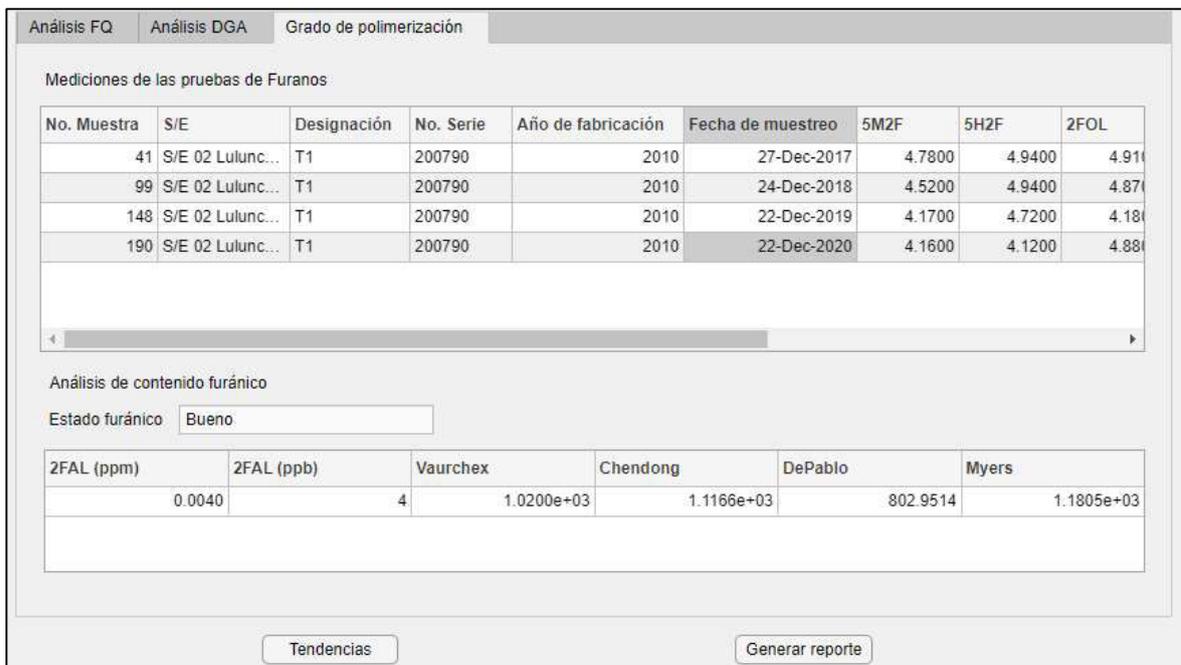


Figura 54. Grado de polimerización Bueno

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- Se desarrolló una herramienta informática en MATLAB para el diagnóstico de la condición de los transformadores de potencia de la EEQ en base al análisis de propiedades físicas, químicas, dieléctricas y de cromatografía de gases disueltos en el aceite dieléctrico mineral.
- Se estableció la correlación de las variables: calidad del aceite mineral y cromatografía de gases disueltos en el aceite dieléctrico mineral permitiendo a la herramienta informática generar reportes, alarmas de estado y diagnósticos acertados.
- El diagnóstico de la condición de los transformadores de potencia resulta fundamental para la gestión de la vida útil de estos tipos de activos y optimiza las condiciones de operación, así como planificar trabajos en adopción de acciones correctivas.
- El concepto moderno, actualizado y sobre el cual se fundamentan los procedimientos acertados y eficaces en cuanto a mantenimiento de transformadores de potencia inmersos en aceite mineral aislantes, está basado, sin lugar a dudas, en la vida útil del papel aislante.
- Es necesario la evaluación de datos históricos y análisis de tendencias de las pruebas eléctricas, físicas y químicas que determinan la evolución de los transformadores y así delimitar las actividades de mantenimiento que deben priorizarse y planificarse para no solo garantizar la óptima operación de los equipos y mitigación del posible impacto de fallas, sino extender la vida útil, mejorar los procesos, garantizar una mejor utilización de los recursos, mayor seguridad para el personal y disminución de costos en mantenimientos correctivo.
- La interpretación de DGA debe considerar no solo los valores absolutos de las concentraciones de gas individuales, sino también su tasa de aumento en el tiempo.

- Una vez analizados los resultados de las pruebas realizadas a los transformadores de potencia de la EEQ, se concluye que se debe dar atención prioritaria al transformador T1 de la S/E 07 San Roque debido al incremento en la variación del gas acetileno.

5.2. RECOMENDACIONES

- En la actualidad la información de los ensayos de aptitud eléctrica y dieléctrica, medición de propiedades físico químicas del fluido aislante, e históricos de mantenimiento, han sido manejados de forma manual por los departamentos involucrados en estas actividades, también se han creado bases de datos estáticas, por lo cual se recomienda disponer de una herramienta informática sobre una plataforma dinámica de gestión de datos y sostenible en el tiempo, desarrollada en base a las recomendaciones y criterios de las guías estándar IEEE y normativa IEC; que permita generar alarmas y tendencias de resultados, con la finalidad de determinar el diagnóstico de problemas de tipo eléctrico y/o térmico que se estén presentando en los transformadores de potencia.
- La herramienta informática desarrollada en este proyecto puede ser utilizada y mejorada con la finalidad de ofrecer una plataforma dinámica de gestión de datos sostenible en el tiempo a departamentos de construcción y mantenimiento de transformadores de potencia.
- Se recomienda redefinir los procesos empíricos de revisión y análisis de ensayos de aptitud eléctrica y dieléctrica, medición de propiedades físico-químicas del fluido aislante, contenido furánico, cromatografía de gases disueltos.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] E. Gallo Martínez, *Diagnóstico y Mantenimiento a Transformadores en Campo*, Segunda Edición. Bogotá, 2010.
- [2] GURU, Bhag. "Máquinas Eléctricas y Transformadores". Tercera Edición. Oxford University press, Inc. New York, 2005.
- [3] S. D. Myers, J. J. Kelly, and R. H. Parrish, *A Guide To Transformer Maintenance*, Second. Akron, Ohio: S D Myers Inc, 1988.
- [4] C. Molina, "Maximización de la vida técnica de transformadores de potencia a través de espectroscopía dieléctrica", Universidad Politécnica Salesiana, 2019.
- [5] IEEE Power and Energy Society, "IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers and Step-Voltage Regulators." IEEE, pp. 1–123, 2012.
- [6] L. E. Lundgaard et al., Cigré Brochure 323 - Ageing of Cellulose in Mineral-Oil Insulated Transformers, no. October. Cigré Brochure, 2007.
- [7] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, "Mineral insulating oils in electrical equipment – Supervision and maintenance guidance," *IEC 60422*. pp. 1–11, 2009.
- [8] K. Liland, M. Kes, M.-H. Glomm Ese, L. Lundgaard, and B. Christensen, "Study of oxidation and hydrolysis of oil impregnated paper insulation for transformers using a microcalorimeter," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 18, no. 6, pp. 2059–2068, Dec. 2011.
- [9] C. Rajotte *et al.*, "Cigré Brochure 445 - Guide for Transformer Maintenance," *CIGRE Tech. Broch.*, no. February, p. 23, 2011.
- [10] L. Cheim, D. Platts, T. Prevost, and S. Xu, "Furan analysis for liquid power transformers", *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 28, no. 2, pp. 8–21, Mar. 2012.
- [11] ASTM, "Annual Books of ASTM Standards", Electrical Insulated liquid and gases, Electrical protective, 1994.

[12] IEEE, "Guide for Acceptance of Insulating Oil in Equipament", Commit IEEE Transformers, 2006.

[13] L. Rivera, A. Sucozhaña, "Diagnóstico del estado de los transformadores de potencia de las centrales Molino y Mazar basados en análisis de aceite, Universidad de Cuenca, 2016.

[14] L. Arvidsson, P. Boman, K. Carrander, and H. Foschum, "Cigre Brochure 296 – Recent Developments in DGA Intrepretation," *CIGRE Tech. Broch.*, 2006.

ANEXOS

ANEXO A. Entorno de programación en lenguaje MATLAB de la herramienta informática.

ANEXO B. Reporte de la gestión de los resultados exportada desde la herramienta informática.

ANEXO A

Programación en lenguaje de MATLAB de la herramienta informática (presente el Zip adjunto).

ANEXO B

Reporte de la gestión de los resultados de las pruebas realizadas a los transformadores con sus respectivas alarmas y tendencias de resultados exportada desde la herramienta informática.

	REPORTE DE LAS CONDICIONES DEL ACEITE MINERAL																																		
	Norma IEEE Std C57 - 104 y 106		DAMPESA FICTORIA CUI C. S.A.																																
OBJETIVO																																			
Emitir un reporte de carácter técnico, que detalle la condición del estado actual del sistema de aislamiento sólido a través del análisis físico químico, análisis de gas disuelto y de contenido furánico en aceite dieléctrico de origen mineral.																																			
<table border="1"> <tr> <td>Empresa</td> <td>EPN</td> </tr> <tr> <td>División</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Ubicación</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Fecha</td> <td>26/04/2022</td> </tr> <tr> <td>Analizado por:</td> <td>David Vaca</td> </tr> </table>		Empresa	EPN	División		Ubicación		Fecha	26/04/2022	Analizado por:	David Vaca																								
Empresa	EPN																																		
División																																			
Ubicación																																			
Fecha	26/04/2022																																		
Analizado por:	David Vaca																																		
<table border="1"> <tr> <td>Tipo de aparato</td> <td></td> <td>kV</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Ubicación</td> <td>S/E 02 Luluncoto</td> <td>MVA</td> <td></td> </tr> <tr> <td>No. serie</td> <td>200790</td> <td>Tipo de aceite</td> <td>Mineral</td> </tr> <tr> <td>Fabricante</td> <td>ABB</td> <td>Fecha de muestreo</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Descripción</td> <td>T1</td> <td>Año de fabricación</td> <td>2010</td> </tr> </table>				Tipo de aparato		kV		Ubicación	S/E 02 Luluncoto	MVA		No. serie	200790	Tipo de aceite	Mineral	Fabricante	ABB	Fecha de muestreo		Descripción	T1	Año de fabricación	2010												
Tipo de aparato		kV																																	
Ubicación	S/E 02 Luluncoto	MVA																																	
No. serie	200790	Tipo de aceite	Mineral																																
Fabricante	ABB	Fecha de muestreo																																	
Descripción	T1	Año de fabricación	2010																																
Evaluación FQ																																			
<table border="1"> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">Concentraciones</td> </tr> <tr> <td>Acidez</td> <td style="text-align: center;">0.01</td> </tr> <tr> <td>Tensión interfacial</td> <td style="text-align: center;">34.2</td> </tr> <tr> <td>Color</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Humedad</td> <td style="text-align: center;">19</td> </tr> <tr> <td>Rigidez dieléctrica</td> <td style="text-align: center;">60</td> </tr> <tr> <td>Factor de potencia 20°C</td> <td style="text-align: center;">0.24</td> </tr> <tr> <td>Factor de potencia 100°C</td> <td style="text-align: center;">6.12</td> </tr> </table>			Concentraciones	Acidez	0.01	Tensión interfacial	34.2	Color		Humedad	19	Rigidez dieléctrica	60	Factor de potencia 20°C	0.24	Factor de potencia 100°C	6.12																		
	Concentraciones																																		
Acidez	0.01																																		
Tensión interfacial	34.2																																		
Color																																			
Humedad	19																																		
Rigidez dieléctrica	60																																		
Factor de potencia 20°C	0.24																																		
Factor de potencia 100°C	6.12																																		
<table border="1"> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">≤ 69kV</td> <td style="text-align: center;">> 69 - 230kV</td> <td style="text-align: center;">≥ 230kV</td> </tr> <tr> <td>Rigidez dieléctrica 2mm esp</td> <td style="text-align: center;">40</td> <td style="text-align: center;">47</td> <td style="text-align: center;">60</td> </tr> <tr> <td>Factor de potencia 20°C</td> <td style="text-align: center;">0.5</td> <td style="text-align: center;">0.5</td> <td style="text-align: center;">0.5</td> </tr> <tr> <td>Factor de potencia 100°C</td> <td style="text-align: center;">1.1</td> <td style="text-align: center;">5.0</td> <td style="text-align: center;">5.0</td> </tr> <tr> <td>Tensión interfacial</td> <td style="text-align: center;">25</td> <td style="text-align: center;">30</td> <td style="text-align: center;">32</td> </tr> <tr> <td>Acidez</td> <td style="text-align: center;">0.2</td> <td style="text-align: center;">0.5</td> <td style="text-align: center;">0.10</td> </tr> <tr> <td>Contenido de agua</td> <td style="text-align: center;">35</td> <td style="text-align: center;">25</td> <td style="text-align: center;">20</td> </tr> <tr> <td>Contenido de nitrógeno oxidante</td> <td style="text-align: center;"></td> <td style="text-align: center;">0.05</td> <td style="text-align: center;"></td> </tr> </table>			≤ 69kV	> 69 - 230kV	≥ 230kV	Rigidez dieléctrica 2mm esp	40	47	60	Factor de potencia 20°C	0.5	0.5	0.5	Factor de potencia 100°C	1.1	5.0	5.0	Tensión interfacial	25	30	32	Acidez	0.2	0.5	0.10	Contenido de agua	35	25	20	Contenido de nitrógeno oxidante		0.05			
	≤ 69kV	> 69 - 230kV	≥ 230kV																																
Rigidez dieléctrica 2mm esp	40	47	60																																
Factor de potencia 20°C	0.5	0.5	0.5																																
Factor de potencia 100°C	1.1	5.0	5.0																																
Tensión interfacial	25	30	32																																
Acidez	0.2	0.5	0.10																																
Contenido de agua	35	25	20																																
Contenido de nitrógeno oxidante		0.05																																	
REPORTE DE LAS CONDICIONES DEL ACEITE MINERAL																																			
Norma IEEE Std C57 - 104 y 106																																			

ORDEN DE EMPASTADO