



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Química e Ingeniería Química
Escuela Profesional de Ingeniería Química

**Desarrollo de dos métodos de predicción de fallas para
transformadores eléctricos empleando resultados
obtenidos por un método acreditado por la Norma
ISO/IEC 17025 de cromatografía de gases**

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico

AUTOR

Cirilo CHUMBE NICODEMOS

ASESOR

Dr. Eder Clidio VICUÑA GALINDO

Lima, Perú

2023



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Chumbe, C. (2023). *Desarrollo de dos métodos de predicción de fallas para transformadores eléctricos empleando resultados obtenidos por un método acreditado por la Norma ISO/IEC 17025 de cromatografía de gases*. [Trabajo de Suficiencia Profesional de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Química e Ingeniería Química, Escuela Profesional de Ingeniería Química]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Cirilo Chumbe Nicodemos
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	47287036
URL de ORCID	https://orcid.org/0009-0001-8715-1973
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Eder Clidio Vicuña Galindo
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	09069542
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0003-4980-0490
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Darío Máximo Díaz Rivera
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	09400709
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Víctor Manuel Fernández Guzmán
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06690674
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Eder Clidio Vicuña Galindo
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	09069542
Datos de investigación	

Línea de investigación	No Aplica
Grupo de investigación	No Aplica
Agencia de financiamiento	Sin Financiamiento
Ubicación geográfica de la investigación	Edificio: Hitachi Energy País: Perú Departamento: Lima Provincia: Lima Distrito: Lurín Urbanización: Praderas de Lurín Calle: Kapala, Cercado de Lima 15823 Latitud: -12.297790 Longitud: -76.835718
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Agosto 2023 – Diciembre 2023
URL de disciplinas OCDE	Ingeniería Química http://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.04.01 Química Analítica http://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.04.07 Ingeniería Eléctrica, Ingeniería electrónica http://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.02.01



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

(Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA)

FACULTAD DE QUÍMICA E INGENIERÍA QUÍMICA

Central Telefónica: 619-7000

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Los suscritos miembros del Jurado Calificador nombrados por el señor Presidente del Comité Ejecutivo del "Programa Ciclo Taller de Titulación Profesional por la Modalidad de Tesis y Trabajo de Suficiencia Profesional para la Facultad de Química e Ingeniería Química 2023", bajo la Presidencia del Ing. DARIO MÁXIMO DÍAZ RIVERA; Dr. VÍCTOR MANUEL FERNÁNDEZ GUZMÁN (Miembro) y el Dr. EDER CLIDIO VICUÑA GALINDO (Asesor); habiendo presentado para tal efecto el **TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL**, titulada "**Desarrollo de Dos Métodos de Predicción de Fallas para Transformadores Eléctricos empleando Resultados obtenidos por un Método Acreditado por la Norma ISO/IEC 17025 de Cromatografía de Gases**" después de **SUSTENTADA Y APROBADA** el trabajo de suficiencia profesional elaborado por el bachiller en Ingeniería Química: **CIRILO CHUMBE NICODEMOS**; para optar el **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO QUÍMICO**, acordaron calificarlo con la **NOTA** de:

DIECIOCHO

(LETRAS)

(18)

(NÚMEROS)

Ciudad Universitaria, 16 de diciembre del 2023.


Ing. DARIO MÁXIMO DÍAZ RIVERA
Presidente


Dr. VÍCTOR MANUEL FERNÁNDEZ GUZMÁN
Miembro


Dr. EDER CLIDIO VICUÑA GALINDO
Asesor


Dr. RUBEN ALFREDO PALOMINO INFANTE
Director de la E.P. de Ingeniería Química





Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Vicerrectorado de Investigación y Posgrado



CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo Vicuña Galindo Eder Clidio en mi condición de asesor acreditado con la Resolución Decanal N° °000026-2024-D-FQIQ/UNMSM del trabajo de suficiencia profesional, cuyo título es **“Desarrollo de Dos Métodos de Predicción de Fallas para Transformadores Eléctricos empleando Resultados obtenidos por un Método Acreditado por la Norma ISO/IEC 17025 de Cromatografía de Gases”**, presentado por el bachiller en Ingeniería Química Chumbe Nicodemos Cirilo para optar el título Profesional de Ingeniera Química, CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante el software de similitud textual, el documento evaluado cuenta con el porcentaje de **14%** de similitud, nivel **PERMITIDO** para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional**.

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención el título correspondiente.

Firma del Asesor _____

DNI: 09069542

Nombres y apellidos del asesor:

Vicuña Galindo Eder Clidio



Agradecimientos

En primer lugar, a mi madre Adelaida que con su gran apoyo incondicional durante las diferentes etapas de mi vida ayudó a forjar a la persona que hoy en día soy, a mis hermanas (Kathy y Yuri) que han estado ahí siempre brindándome su apoyo en todo momento. A cada uno de mis profesores y compañeros, por compartir sus conocimientos personales y académicos para así fortalecer mi camino profesional, al Ingeniero Eder Vicuña por su ayuda y paciencia en el proceso de elaboración de este trabajo; y, por último, y no menos importante, a mi Universidad, la Universidad Nacional Mayor de San Marcos por la grata acogida que me brindó todos estos años.

Índice General

Resumen	1
Introducción	3
I - Datos del Lugar Donde se Desarrolla el Trabajo	5
II - Planteamiento del Problema	7
2.1 Descripción del Problema	7
2.1.1 Pregunta General	8
2.1.2 Preguntas Específicas	8
2.1.3 Justificación	8
2.1.4 Objetivos Generales	9
2.1.5 Objetivos Específicos	9
III - Metodología y Procedimientos	11
3.1 Determinación de los métodos predictivos de Fallas mediante Revisión Documentaria	11
3.1.1 Método de Gas Clave (KGM)	11
3.1.2 Método Triangulo Duval (DTM)	11
3.1.3 Método Ratio Doernenburg (DRM)	11
3.1.4 Método Ratio Rogers (RRM)	12
3.1.5 Comisión Electrotécnica Internacional (IEC)	12
3.2.1 Materiales y Equipos	16
3.2.2 Reactivos	16
IV Antecedentes y Marco Teórico	17
V Propuestas de Solución	21
VI Resultados	26

6.1 Acreditación de método DGA bajo Norma ISO/IEC 17025	26
6.1.1 Precisión de Materiales	26
A. Estimación de Precisión de Jeringas de vidrio	26
B. Estimación de Precisión de viales de vidrio	27
6.1.2 Análisis y/o ensayos cromatográficos	29
A. Repetibilidad de muestras control	29
B. Normalidad de datos de muestra de control	30
C. Evaluación de datos atípicos	31
D. Análisis de estimación de la precisión	32
E. Análisis de estimación de la Veracidad	36
F. Determinación de Límite de Detección y Cuantificación del Método	38
G. Coeficiente de partición	39
H. Incertidumbre de Cromatografía	43
6.2 Métodos de predicción de gases falla en transformadores eléctricos	44
A. Códigos de relación para método IEC.	49
B. Clasificación de averías mediante los códigos de relación de la IEC	49
C. Ejecución del Método de Predicción de Fallas IEC	50
D. Diagnósticos del transformador según códigos IEC	56
6.2.2 Método de predicción por el Triángulo Duval	57
A. Ubicación de relación de gases en Método Duval	57
B. Categorización de las fallas por el triángulo de Duval.	58
C. Ejecución del Método de Predicción de Fallas Triangulo Duval	59
C. Diagnósticos del transformador según Duval	61

VII – Conclusiones	63
VIII – Recomendaciones	64
Referencias	65
IX – Anexo	70
ANEXO 1: Repetibilidad de muestras control	70
ANEXO 2: Normalidad de datos de muestra de control - Datos atípicos	73
ANEXO 3: Análisis de estimación de la precisión	75
ANEXO 4: Veracidad de Ensayos	81
ANEXO 5: Certificados de Concentración Estándar de aceite mineral	82
ANEXO 6: Instructivo para Ensayos de Cromatografía de Gases - Hitachi	84

Lista de Figuras

Figura 1. Planta Hitachi Energy, Kapala, cercado de Lima 15823.....	6
Figura 2. Requerimientos de acreditación de la norma ISO/IEC 17025.	15
Figura 3 Propuesta de Mejora en el Laboratorio - Planta Hitachi	21
Figura 4 Diagrama del proceso de Acreditación del método DGA	22
Figura 5 Diagrama del proceso de ejecución de los métodos de Predicción de Fallas....	23
Figura 6 Diagrama de flujo del proceso del Método IEC por Matlab	24
Figura 7 Diagrama de flujo del proceso del Método Triangulo Duval.....	25
Figura 8 Prueba de Normalidad a concentración de ~100ppm de Metano.....	31
Figura 9 Prueba de Grubbs para concentración de ~100 ppm de metano.	32
Figura 10 Prueba T para resultados a concentración ~100 ppm de metano disuelto.....	37
Figura 11 Grafica V_G/V_L vs $1/\text{Área}$	42
Figura 12 Diagrama causa – efecto para Cromatografía de Gases	43
Figura 13 Inicio y presentación del método de predicción IEC en MATLAB.....	51
Figura 14 Elección de número de pruebas DGA a analizar.....	52
Figura 15 Ingreso de concentraciones (ppm) de gases falla según la Tabla 23	53
Figura 16 Numero de Transformador y sus concentraciones de gases.....	53
Figura 17 Rangos IEC obtenidos para el primer transformador	54
Figura 18 Resultados de la relación de gases del primer transformador	55
Figura 19 Códigos numéricos IEC para el primer transformador	55
Figura 20 Construcción del triángulo Duval.....	58
Figura 21 Punto de Falla para el para análisis del primer transformador	61

Lista de Tablas

Tabla 1 Tipos de Falla categorizadas por diferentes métodos DGA.....	12
Tabla 2 Comparación del %predicción por cada Método.....	14
Tabla 3. Precisión de jeringas de vidrio. Densidad = 0.874 g/ml.	26
Tabla 4 Precisión de viales de vidrio	27
Tabla 5 Repetibilidad de ensayos a concentraciones ~1, ~100 y ~500 ppm de Metano..	29
Tabla 6 Resultados entre analistas a ~100ppm de metano diluido en aceite.	33
Tabla 7 Resultados de RSD experimental de Horwitz.....	35
Tabla 8 Calculo RSD Repetibilidad y Reproducibilidad de Horwitz	36
Tabla 9 Estimación de la veracidad con muestras estándar de ~100 ppm	37
Tabla 10 Resultados de gases a bajas concentraciones ~1ppm.....	38
Tabla 11 Limite De Detección Del Método - LDM.....	39
Tabla 12 Limite de Cuantificación del Método - LCM	39
Tabla 13 Relación de fase (gas – Líquido) a distintos volúmenes.....	39
Tabla 14 Área detectada y relación de fase para el gas metano (CH ₄)	41
Tabla 15 Factor Estándar Temperatura-Presión.....	43
Tabla 16 Gases generados por fallas en transformadores.	44
Tabla 17 Gases generados en función del tipo de falla.....	45
Tabla 18 Subdivisión según el tipo de falla para el Método IEC y Duval.....	46
Tabla 19 Límites de concentraciones de gases disueltos	47
Tabla 20 Acciones basadas mediante resultados DGA.....	47
Tabla 21 Códigos de relación de gases para el método de relación IEC.	49
Tabla 22 Tipo de falla clasificados por códigos IEC	50

Tabla 23	Resultados de concentración de gases por método DGA	52
Tabla 24	Determinación de códigos de fallas para el primer transformador	54
Tabla 25	Diagnóstico para el 1er, 4to y 5to Transformador – Método IEC	56
Tabla 26	Categorización de las fallas según el Método Duval.	59
Tabla 27	Concentración de gases en transformadores según DGA – Método Duval.....	60
Tabla 28	Resultados de %Gases Falla para Método Duval	61
Tabla 29	Diagnostico para el 1er, 4to y 5to Transformador – Método Duval.....	62
Tabla 30	Tabla comparativa de Diagnósticos Método IEC y Método Duval.....	62

Resumen

Para prevenir el deterioro de un transformador eléctrico, este cuenta con un sistema aislante que le brinda una barrera dieléctrica capaz de tolerar las diferencias de potencial a la que están inmersos. Dentro estos sistemas de aislamiento están los Aceites Dieléctricos, los cuales funcionan como una barrera dieléctrica entre los componentes internos de un transformador y un regulador térmico. Se debe tener una adecuada interpretación del equipo por parte del personal de mantenimiento para detectar alguna falla menor y dar una pronta solución, así evitar la generación de fallas mayores y como consecuencia pérdidas económicas en reparaciones o en el peor de los casos en el cambio total del equipo. En este trabajo se busca presentar la eficacia de métodos tradicionales de predicción de Fallas en transformadores eléctricos tomando como base los resultados de concentraciones en ppm obtenidos por un método de ensayo acreditado de Análisis de Gases Disueltos (DGA), mostrando también el proceso a seguir para dicha acreditación ISO/IEC 17025 del método de ensayo DGA. El proceso de acreditación del método de ensayo DGA sigue la norma ISO/IEC 17025, que presenta los requerimientos generales, de estructura, de recursos, del proceso y del sistema de gestión, sumado a los diversos ensayos realizados en el Cromatógrafo de Gases para comprobar, validar y demostrar resultados confiables por parte del laboratorio Hitachi Energy, posterior a ello, resultados de casos reales evaluados por el método de ensayo DGA son evaluados por Métodos tradicionales de predicción de fallas para transformadores; en este caso, la evaluación del Método de predicción IEC, donde este método centrada su importancia en 5 importantes y las relaciones de estos para la obtención de sus diagnósticos IEC de fallas; y Método de predicción Triangulo Duval, este método toma importancia de 3 gases y sus relaciones porcentuales para su diagnóstico Duval, estos 2 métodos de predicción conllevan mejores características de precisión y exactitud en comparación con otros métodos tradicionales como son los M. Rogers con un 65%

de exactitud, M. Doernenburg 41% y M. Gases Clave 75% en sus predicciones de diagnóstico frente al Método IEC con 79% y Método Triangulo Duval con 89%. Finalmente, obtenida la acreditación, se asegura tener resultados de gran confianza que sirven como una gran base para la ejecución de ambos métodos de predicción en casos reales, encontrando elevada similitud en los resultados de sus diagnósticos para los casos reales tratados en este trabajo; además. el método de predicción Triangulo Duval muestra mejores características de predicción y puede complementarse de gran manera con el Método IEC.

Introducción

A lo largo de los años los transformadores se han convertido en equipos de gran importancia, en especial, para los Sistemas Energéticos Nacionales. Los Transformadores son equipos eléctricos estáticos que funcionan por inducción electromagnética, trabajan principalmente usando la frecuencia de corriente alterna, esto le permite aumentar o disminuir parámetros de Voltaje y Corriente, además, son el nexo entre las líneas de transmisión y los generadores eléctricos de potencia. Los transformadores durante su vida de servicio están propensos a diversos fenómenos que puedan alterar su funcionamiento, algunos como: descargas eléctricas, la corrosión del propio ambiente donde operan, temperaturas elevadas y esfuerzos eléctricos donde estas y otras características afectan sus componentes y como consecuencia la vida de servicio del Transformador, la falla en estos puede conllevar el colapso parcial o total de un sistema eléctrico.

Los transformadores deben tener un control adecuado donde deban pasar periódicamente por diversos tipos de pruebas para su mantenimiento predictivo, preventivo o corregir alguna deficiencia mínima con la finalidad de mantener y/o prolongar lo máximo posible su tiempo de vida útil de operación y/o servicio. Por tanto, se debe usar técnicas confiables y con una gran eficacia para poder evaluar las condiciones del transformador y posibiliten una buena toma de decisiones. Un métodos muy usados y que favorecen en determinar algún tipo de falla en el transformador sin la necesidad de parar su servicio es por medio del Análisis de Gases Disueltos (DGA), esta prueba consiste en extraer y contabilizar en partes por millón (ppm) la concentración de gases falla presentes en los aceites dieléctricos contenidos dentro de los transformadores; y estos resultados ser interpretados con el uso de la normativa adecuada para la interpretación de gases disueltos, donde estos gases diluidos en los aceite dieléctricos del transformador pueden

indicar una falla y la variación de cambio en estos niveles se puede utilizar para determinar su gravedad. Los principales Gases Falla en el ensayo DGA son: hidrógeno (H_2), metano (CH_4), etano (C_2H_6), etileno (C_2H_4), acetileno (C_2H_2), monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO_2).

“La Acreditación de la Norma ISO/IEC 17025 como una oportunidad de crecimiento y reconocimiento para los laboratorios de ensayo y/o calibración buscan generar y mantener la confianza en sus clientes” (Borja, 2019). Hitachi Energy en el proceso de Acreditación la Norma ISO/IEC 17025 para el Método de Análisis de Gases Disueltos por Cromatografía de Gases en Aceites dieléctricos de Transformadores busca conocer el estado de los Transformadores en revisión y apoyados mediante este método de Ensayo dar predicciones más certeras de las posibles fallas que tengan estos equipos. Los métodos de predicción o diagnósticos para transformadores solo necesitan las concentraciones de gases falla en ppm para obtener una respuesta base de cuál puede ser la falla o problema en el transformador, métodos como el Triángulo de Duval favorecen a definir con gran exactitud problemas presentes en el transformador tomando en cuenta la relación de 3 gases de hidrocarburos; metano (CH_4), etileno (C_2H_4) y acetileno (C_2H_2); este método ha mostrado ser confiable brinda diagnósticos con bajos porcentajes de error en sus resultados. De otro lado tenemos el Método IEC, esta técnica requiere la relación de concentraciones de 5 gases; metano (CH_4), etano (C_2H_6), etileno (C_2H_4), acetileno (C_2H_2) e Hidrogeno (H_2); estas relaciones vienen siendo las siguiente: CH_4/H_2 , C_2H_4/C_2H_6 y C_2H_2/C_2H_4 y donde estas se ordenan en una tabla de códigos ya definidos para después tabular estos valores e identificar el tipo de falla que se presente en los transformador consultados.

I - Datos del Lugar Donde se Desarrolla el Trabajo

Hitachi Energy es un líder mundial en transformadores y ofrece transformadores en seco y con líquido, además de servicios de soporte técnico durante todo el ciclo de vida, incluidos componentes y piezas de repuesto. Permite a las industrias, empresas de servicios públicos y sectores de infraestructura maximizar el retorno de sus activos de transformadores garantizando alta fiabilidad y óptimo rendimiento, y al mismo tiempo permite reducir los costos de ciclo de vida y el impacto ambiental. En su planta ubicada en el distrito de Lurín – Lima se da el proceso de Análisis, mantenimiento y reparación de Transformadores Eléctricos, dicha planta cuenta con su propio Laboratorio de Análisis de Aceites Dielectricos, estos aceites son los principales artífices para diagnosticar algún problema si los hubiese en los Transformadores. El laboratorio Hitachi Energy realiza y/o cuenta con diversos tipos de ensayos para el análisis de los aceites dieléctricos de transformadores, siendo uno de los principales el Método de Análisis de Gases Disueltos en Aceites dieléctricos por Cromatografía de Gases.

El presente trabajo tiene como una finalidad, la Acreditación bajo la Norma ISO/IEC 17025 del Método de Análisis de Gases Disueltos en Aceites Dielectricos por Cromatografía de Gases en el Laboratorio de la Planta de Transformadores Eléctricos de Hitachi Energy – Lurín y como el principal complemento el de desarrollar 2 Métodos de Predicción de Gases Falla para así darle a los resultados en ppm obtenidos por el Método Implementado una traducción más específica y clara de la necesidades o problema que puedan presentar estos equipos. El periodo de duración de este proceso ha sido de 4 meses iniciados en el mes de agosto del 2023 y la parte práctica de análisis y ensayos de muestras viene siendo realizado en el mismo laboratorio de Hitachi Energy – Lurín apoyado por la Licenciada Química, J.R.

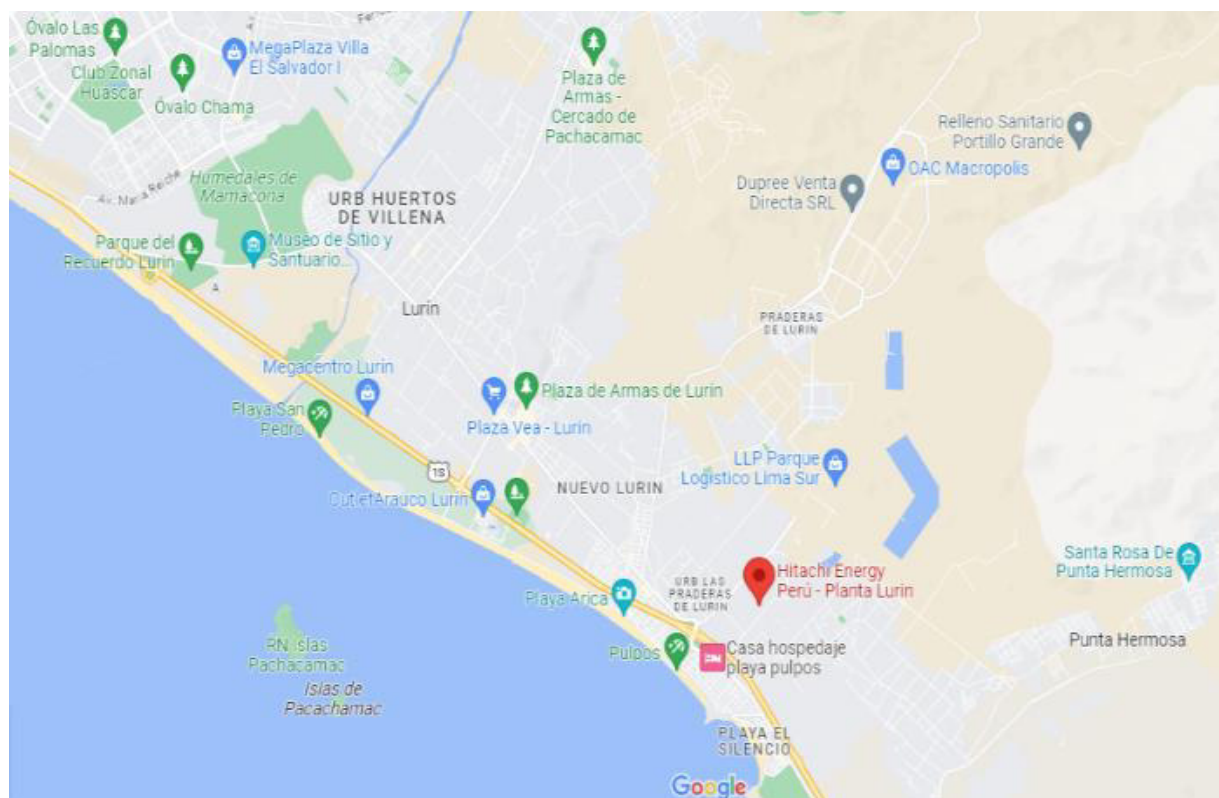


Figura 1. Planta Hitachi Energy, Kapala, cercado de Lima 15823.

II - Planteamiento del Problema

2.1 Descripción del Problema

Durante su tiempo servicio, los transformadores están expuestos a diversos hechos que pueden perturbar su funcionamiento, algunos como: descargas eléctricas y/o corrosión del propio ambiente, temperaturas elevadas y esfuerzos eléctricos, estas y otras características anteriormente mencionadas afectan sus componentes y como una consecuencia directa la vida de servicio del Transformador. Para prevenir el deterioro, el transformador cuenta con un sistema aislante que le brinda una protección dieléctrica capaz de tolerar los cambios de potencial al que están inmersos los Transformadores. Dentro estos sistemas de aislamiento podemos encontrar a los conocidos Aceites Dieléctricos, los cuales funcionan como una protección dieléctrica entre los componentes internos de un transformador y tener un comportamiento de regulador térmico, proporciona información relevante del estado de funcionamiento de los transformadores. Al deteriorarse los materiales aislantes (en este caso, Aceites Dieléctricos) se van formando diversos tipos de gases, estos gases se diluyen en el aceite aislante y cuando estas concentraciones diluidas en el aceite salgan del rango permitido son una señal evidente de la presencia de una posible falla en el transformador, entonces al tener una adecuada interpretación por parte del personal de mantenimiento se puede lograr detectar fallas menores y dar una pronta solución, así evitar la generación de fallas mayores y como consecuencia pérdidas económicas en reparaciones o en el peor de los casos en el cambio del equipo.

Hitachi Energy ubicada en el distrito de Lurín – Lima es la encargada de la Fabricación, venta, mantenimiento y reparación de Transformadores Eléctricos. La planta industrial cuenta con un propio laboratorio donde se desarrollan los diferentes tipos de análisis de los aceites dieléctricos utilizados en los Transformadores, ya sean análisis internos; propios de la empresa Hitachi Energy

o análisis externos, donde Hitachi es contratado para dar seguimiento y diagnóstico a Transformadores de otras empresas y con ello en ambos casos (interno y externo) conocer a detalle los fallos que pueden presentarse y darse una respuesta inmediata de acción.

2.1.1 Pregunta General

Siguiendo un proceso adecuado, ¿Se puede Desarrollar Métodos de Predicción de Fallas confiables para Transformadores, que empleen como base los resultados en ppm obtenidos por un método de Análisis de Gases Disueltos (DGA) en aceites dieléctricos por Cromatografía de Gases?

2.1.2 Preguntas Específicas

¿Podremos determinar qué métodos de alta confiabilidad pueden usarse para un buen diagnóstico de fallas en transformadores basados en el método DGA por Cromatografía de Gases?

¿Cómo asegurar que los resultados de los análisis de los gases en transformadores eléctricos mediante cromatografía de gases sean exactos y/o precisos?

¿Es posible establecer que la predicción de fallas usando métodos predictivos y usando el análisis de cromatografía de gases es certero y pueda servir como herramientas que puedan implementarse satisfactoriamente en las empresas que trabajan con transformadores eléctricos?

2.1.3 Justificación

“Un Laboratorio con métodos Acreditados mediante Norma ISO/IEC 17025 permiten demostrar un mayor grado de competencia, imparcialidad de resultados o datos obtenidos y una mejora de la capacidad de los laboratorios en la realización de sus servicios” (ISO, 2017). de igual forma Métodos acreditado a nivel internacional genera confianza en los resultados que se obtienen. Con el pasar de los años se ha demostrado que el método DGA para transformadores de potencia

se ha convertido en un Método de Análisis muy efectivo para diagnosticar el estado y condición, así como las fallas del equipo, con la ventaja de que es posible realizarla sin sacar de operación el transformador. Los Transformadores Eléctricos al ser el principal activo de un sistema electro energético deben pasar por controles de estado, envejecimiento y tiempo de servicio restante, así poder valorar su condición actual y futura. Un fallo de aislamiento de un Transformador implica daños sensibles, genera costos elevados de reparación y pérdidas económicas, por lo tanto, se debe usar técnicas confiables y con una gran eficacia para poder evaluar, prever y diagnosticar las condiciones del transformador y que estas posibiliten una buena toma de decisiones según corresponda.

2.1.4 Objetivos Generales

Evaluar la eficacia de 2 métodos de predicción de Fallas; Método de Predicción de Fallas IEC y Método de Predicción de Fallas Triangulo Duval, y conocer el estado en que pueda presentarse un Transformador en consulta basándose en los resultados obtenidos y respaldados por un Método Acreditado de Análisis de Gases Disueltos (DGA) en Aceites Dieléctricos por Cromatografía de Gases en el Laboratorio de la planta de Transformadores Eléctricos Hitachi Energy – Perú.

2.1.5 Objetivos Específicos

Determinar que estos dos métodos, Método IEC y Método Triangulo Duval, son buenas herramientas metodológicas en la predicción de fallas de transformadores eléctricos.

Demostrar, bajo el respaldo de la Acreditación ISO/IEC 17025, que el Laboratorio de la planta de Transformadores Eléctricos Hitachi Energy – Perú posee las competencias técnicas y la gestión necesaria para generar resultados válidos con el método DGA en Aceites Dieléctricos por

Cromatografía de acuerdo a los requerimientos que solicitados por los clientes.

Evaluar la capacidad de predicción de los Métodos IEC y Método Triangulo Duval en la determinación del tipo de falla o problema que pueda existir en los Transformadores Eléctricos en consulta, basado en resultados obtenidos por el Método DGA.

III - Metodología y Procedimientos

3.1 Determinación de los métodos predictivos de Fallas mediante Revisión Documentaria

Existen diversas formas de poder saber la situación en el que se encuentra operando un transformador, sin embargo, la desventaja principal al emplear algunos métodos es que estos necesitan interrumpir o parar la operación del transformador, el DGA nos brinda información acerca del estado del transformador sin que sea necesario que este tenga que salir de operación. Existen varios métodos para la interpretación de los resultados DGA, tales como: Método de Gases Clave (KGM), Método Triangulo Duval (DTM), Método de Ratio Doernenburg (DRM), Método de Ratio Rogers y Método IEC; todos estos métodos requieren para su evaluación los datos obtenidos de los DGA en aceite por Cromatografía de Gases.

3.1.1 Método de Gas Clave (KGM)

El método utiliza las concentraciones de cada gas en particular y este es asociado a una falla específica en el transformador.

3.1.2 Método Triangulo Duval (DTM)

Se basa relación proporcional de 3 gases; Metano (CH_4), Etileno (C_2H_4) y Acetileno (C_2H_2) en un diagrama Triangular definido por áreas específicas con fallas definidas.

3.1.3 Método Ratio Doernenburg (DRM)

Doernenburg utiliza la relación de concentración de gases: CH_4/H_2 ; C_2H_2/CH_4 ; C_2H_4/C_2H_6 y C_2H_2/C_2H_4 y el diagnóstico de falla Doernenburg se da por medio de una Tabla de codificación basada en rangos de relaciones de gases ya mencionadas.

3.1.4 Método Ratio Rogers (RRM)

De la misma manera Rogers requiere de cuatro relaciones de gases: CH_4/H_2 ; C_2H_6/CH_4 ; C_2H_4/C_2H_6 y C_2H_2/C_2H_4 y su diagnóstico de fallas Rogers es por medio de Tablas con codificación basada en rangos de las relaciones de gases ya mencionadas.

3.1.5 Comisión Electrotécnica Internacional (IEC)

Toma origen del método de Roger, pero excluye la relación C_2H_6/CH_4 ya que solo señalaba rangos de temperatura limitados en la descomposición, manteniendo las otras 3 relaciones de gases (CH_4/H_2 ; C_2H_4/C_2H_6 y C_2H_2/C_2H_4) tienen diferentes rangos de códigos comparados con Rogers, pero de igual forma la obtención del diagnóstico de fallos IEC es a través de Tablas con codificación basada en rangos de sus relaciones de gases.

La Tabla 1 presenta un análisis comparativo de las categorías de Fallas que se presentan en un transformador para los 5 métodos tradicionales predictivos de Fallas por DGA.

Tabla 1 Tipos de Falla categorizadas por diferentes métodos DGA

Método	Falla Térmica a	Sobrecalentamiento y	Arco Eléctrico	Descargas	
	Bajas Temperaturas			Parciales y Efecto Corona	Normal
RRM	Leve sobrecalentamiento <150°C	Conductor sobrecalentado	Flameo Arco eléctrico	PDs	Normal
	Sobrecalentamiento 150-200°C	Circulación de corriente en el devanado	Chispas continuas	PDs con seguimiento	
	Sobrecalentamiento 200-300°C	Circulación de corriente en el tanque			

IEC	Falla térmica <150°C	Falla térmica 300 - 700°C	Descarga debaja energía	PDs de baja densidad de energía	Normal
	Falla térmica 200-300°C	Falla térmica >700°C	Descarga dealta energía	PDs de alta densidad de energía	
DRM	Descomposición Térmica con alta resistencia	Descomposición térmica	Arco	Corona	Normal (<L1)
DTM	Falla térmica <300°C	Falla térmica 300- 700°C	Descarga debaja energía	PDs Mezcla	Normal (<L1)
		Falla térmica >750°C	Descarga dealta energía	térmicay fallas eléctricas	
KGM	Gas principal	Gas principal C₂H₄	Gas principal C₂H₂	Gas principal H₂	Normal (<L1)

Nota. KGM: Método de Gases Clave; DTM: Método Triangulo Duval; DRM: Método Ratio Doernenburg; RRM: Método Ratio Rogers y IEC: Comisión Electrotécnica Internacional

Fuente: Adaptado de Syukri et al. (2023).

La Tabla 2 muestra los resultados de precisión para cada método. Estos porcentajes son obtenidos mediante un número de casos estudiados por Carrera, 2013. El método que muestra unos mejores números de precisión es el Método Triangulo Duval con mejores porcentajes en las características mostradas en la Tabla 2, después le siguen el Método IEC.

Tabla 2 Comparación del %predicción por cada Método

	RRM	IEC	DRM	DTM	KGM
% No Predicciones	51	28	54	2	10
% Si Predicciones	49	72	46	98	90
% Correctas	45	66	41	89	78
% Incorrectas	4	5	4	11	22
Exactitud (Pronóstico de Casos)	91%	92%	0%	89%	78%
Exactitud (Total de Casos)	45%	66%	41%	89%	78%

Fuente: Adaptado de Syukri et al. (2023).

Conclusión: Los métodos que aplican los códigos específicos en su diagnóstico muestran gran precisión (>90%). En contraste, métodos que aplican la interpretación directa en base del valor de cada uno de los gases falla en particular tienen una menor precisión.

3.2 Acreditación del método DGA bajo la norma ISO/IEC 17025

La norma ISO/IEC 17025:2017 presenta los requerimientos generales, de estructura, de recursos, del proceso y del sistema de gestión. Los requerimientos técnicos enfocan en los requisitos del personal, las instalaciones y condiciones ambientales, métodos de prueba, calibración y verificación, equipos, mediciones, muestreo, manipulación de ítems de ensayo y calibración, trazabilidad de los resultados y su presentación

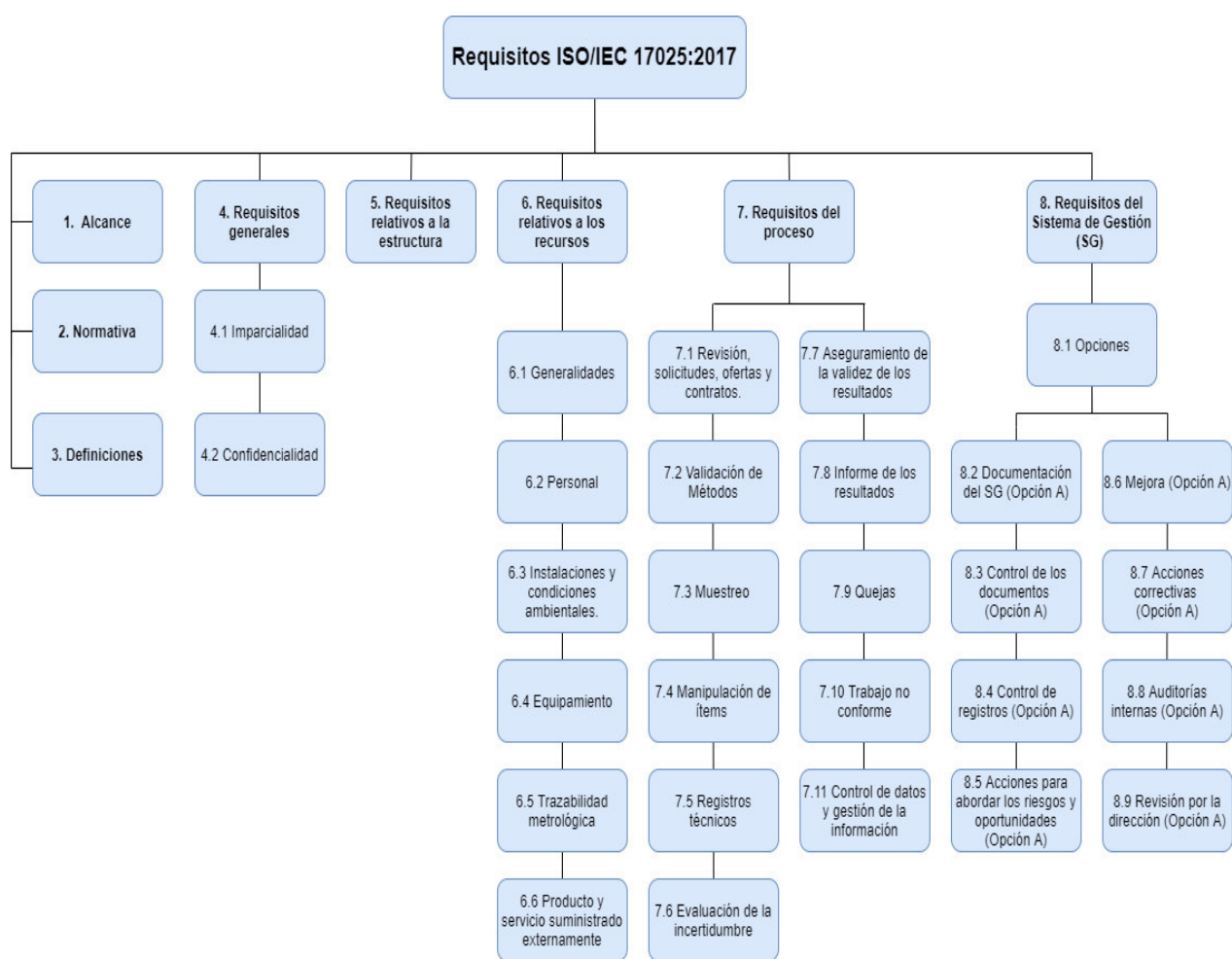


Figura 2. Requerimientos de acreditación de la norma ISO/IEC 17025.

3.2.1 Materiales y Equipos

- Programador Matlab
- Programa informático Excel
- Cromatógrafo de gases marca Agilent modelo 7890B (incluye el convertidor catalítico y detectores TCD Y FID)
- Headspace marca Agilent modelo 7697A
- Software Openlab Chemstation
- Precolumna 0.53mm
- Columna Molsieve 30m/0.53mm
- Columna HP Plot /Q 30m/0.53mm
- Jeringas de Vidrio
- Aguja 18G 1" y 26G 1/2"
- Viales Headspace 20mm con tapa aluminio con septa Rubber grey/PTFE
- Sistema de crimping
- Manómetros

3.2.2 Reactivos

- Gas Argón UHP presurizado 99.999%
- Gas AIRE UHP presurizado 99.999%
- Gas Nitrógeno UAP presurizado 99.999%
- Mezcla de gases para calibración

IV Antecedentes y Marco Teórico

La ISO/ IEC 17025:2017 muestran normas o requisitos para laboratorios que deseen mostrar su capacidad de gestión y técnica, con el objetivo de producir resultados válidos. Este estándar promueve la confiabilidad en las operaciones y actividades de los laboratorios, el cual permite validar la competencia técnica y los resultados brindados por el laboratorio (ISO, 2017). La acreditación de la Norma ISO/IEC 17025 brinda oportunidades de mejora y reconocimiento en laboratorios de análisis, estos buscan producir y mantener la confianza de sus resultados para con sus servicios. “La norma cuenta con una amplia aplicabilidad que permite ser empleada en cualquier entorno, lo que conlleva a que los diferentes laboratorios prestadores de servicios o de investigación la puedan implementar” (Mejía (2021)). “Las acreditaciones son un respaldo internacional para producir confianza sobre los servicios que brindan los organismos evaluadores de la Conformidad, tales como: laboratorios de ensayo, laboratorios de calibración y/o muestreo; organismos certificadores de sistemas de gestión, productos y personas” (Duarte (2018)). Para el logro de una Acreditación, las auditorías apoyan en asegurar que los métodos de ensayos que son evaluados en distintas partes del mundo realicen sus procedimientos de forma semejante, lo cual permite una aceptación recíproca de los resultados obtenidos por el mismo método (Gally (2016)). Mientras que los requisitos de gestión se relacionan a aspectos de control y actividades del laboratorio, los requisitos técnicos se enfocan en requerimientos del personal, las propias instalaciones y las condiciones del medio (humedad, Temperatura, presión, etc.), además de muchos más factores que intervengan en el ensayo, proceso y obtención de los resultados requeridos. Macchi & Ribeiro (2019) y Rivera y Rodríguez (2010) presentan el establecimiento del modelo general para los cálculos de repetibilidad y reproducibilidad; con estos valores posibiliten evaluar la homogeneidad de las varianzas específicamente para datos en métodos de

ensayo de laboratorio. Niño (2019) implementó la última versión de la norma ISO/IEC 17025 de 2017 en el Laboratorio de Ensayos, Metrología y Asistencia Técnica “Lemat”, establece la necesidad de implementar esta última versión, ya que la aplicación de la norma ayudó a estudiar los factores en los que no se encontraban cumpliendo con los ítems. Mejía (2021) nos presenta una adecuada interpretación de la norma detallando la documentación primordial que tienen que cumplir los laboratorios de ensayo para la adecuada prestación de sus servicios.

Montané et al. (2019) nos advierten sobre las consecuencias de Fallas y/o interrupciones que pueden ocurrir durante la operación o servicio del Transformador, consecuencias como; cortes súbitos de la energía, daño ambiental por posibles vertimientos de dieléctricos y expulsión de gases contaminante, además de la pérdida parcial o total del equipo. Pérez (2014) plantea la importancia de establecer rutinas de pruebas tanto eléctricas como no intrusivas para Transformadores de Potencia priorizando el análisis DGA. Ang et al. (2017) mencionan la importancia de medidas preventivas para los Transformadores en la subestaciones electricas centrandó su estudio en las Fallas en los bushing que son considerados como una de las principales causas averia en los transformadores, ademas en sus estudios de diagnostico toma en cuenta al Analisis de Gases Disueltos en Aceite (DGA), Rigidez dielectrica y analisis Furfuril al estos brindar los resultados mas significativos. Cerón et al. (2014) y Aponte et al. (2019) enfocan la importancia de predicción de fallas de un Transformador, el primero mediante la lógica difusa y el segundo usando una herramienta de software; ambos relacionan diferentes tipos de análisis realizados a los Transformadores, incluidos el DGA, para obtener el índice de salud total de los Transformadores Eléctricos en análisis. En “Service Handbook for Transformers” de la empresa ABB, con similar giro de negocio al de Hitachi Energy detalla procedimientos a seguir para un ensayo de DGA correcto como el Muestreo (lugar correcto del Transformador donde obtener las muestras),

Extracción (procedimiento adecuado de obtener la muestra a analizar), Análisis (acondicionamiento y Lectura de la muestra en el Cromatógrafo de Gases) y la Interpretación de resultados y diagnóstico, esto es determinar en cuánto aumentan los niveles de gas durante un período de tiempo determinado. Ashraf et al. (2021) da una evaluación correcta del desempeño en la evaluación de diagnósticos y prevención de fallas en transformadores, estudia los diferentes métodos de predicción de fallas tradicionales, tales como el de Roger, Duval, IEC, etc. y los complementa con métodos de apoyo con IA, redes neuronales y lógica difusa ya que de esta forma ayudan a resolver la incertidumbre de los métodos tradicionales, todos asociados con el método de Análisis de Gases Disueltos (DGA). En Syukri et al. (2023) podemos ver una comparativa de ventajas y desventajas, eficiencia, casos exitosos, etc.; todo esto para conocer las principales características de estos distintos métodos tradicionales de predicción de fallas para transformadores; como los de Duval, Gases Clave, Doernenburg entre otros. Nos guía también a usar otras alternativas que complementen o mejoren estos métodos tradicionales; tales como: Redes neuronales, sistemas adaptativos de inferencia neurodifusa, lógica difusa, entre otros. Reza (2022) centra sus estudios en los distintos análisis que requiere el transformador o sus componentes dieléctricos, conocemos los pros y contra de estos análisis; análisis fisicoquímicos, análisis de furanos, análisis de gases disueltos, etc. Además de en su comparativas se puede conocer cual método nos puede brindar una mayor eficiencia. Zhang et al. (2021) buscan una evaluación integral de los transformadores eléctricos en 3 campos; estado de operación, ve el desempeño de los transformadores y recomienda análisis preventivos, chequeos de rutina mediante diferentes análisis aplicados al aceite dieléctrico; Diagnóstico de falla, aplicando diversos métodos de predicción de fallas tradicionales y complementarios como lógica difusa, redes neuronales, razonamiento de probabilidad y finalmente estrategias de reparación. López (2014) nos orienta al

desarrollo y programación de aplicaciones informáticas, usando herramientas de programación, tales como el Matlab, ya que este puede ejecutar los resultados del DGA y plasmarlos en el método de Predicción Triangulo Duval por ser este un método bastante certero en cuanto a sus predicciones de Falla en transformadores. Brambila & Giion (2015) explican sobre diversos métodos de predicción de fallas o diagnósticos para transformadores, algunos como: Método Triangulo Duval, Relación Doernenburg, Método de Rogers, Técnica de Gases Clave, Limites y variaciones de TDGC, mediante los cuales se buscan las mejores opciones de detección de alguna falla o posibles irregularidades que pueden estar presentes en los transformadores en consulta.

V Propuestas de Solución

Este trabajo abordara la ejecución de métodos de predicción para resultados del ensayo (DGA) en aceites Dieléctricos para Transformadores; Método de Predicción IEC, presentado en la plataforma de programación Matlab y el Método de Predicción Triangulo Duval presentado en el programa informático Excel respectivamente; estos métodos de predicción toman como base los resultados de casos reales en concentraciones ppm obtenidas por el método de Gases Disueltos por Cromatografía de Gases, método Acreditado por la Normal ISO/IEC 17025, donde tal mérito de Acreditación ha sido logrado mediante adecuados procesos que también detallados y efectuados en este trabajo.

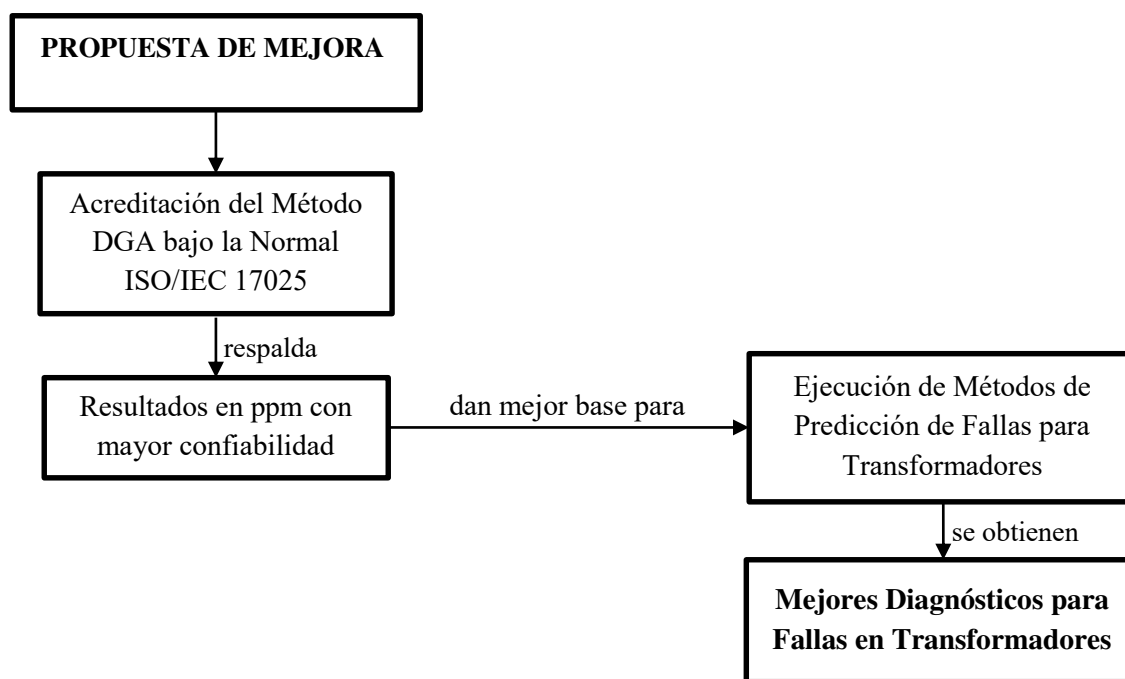


Figura 3 Propuesta de Mejora en el Laboratorio - Planta Hitachi

Nota: La acreditación del método DGA complementa de una gran manera la posterior ejecución de los métodos de Predicción de Fallas, ambos procesos son detallados en las Figuras (4) y (5)

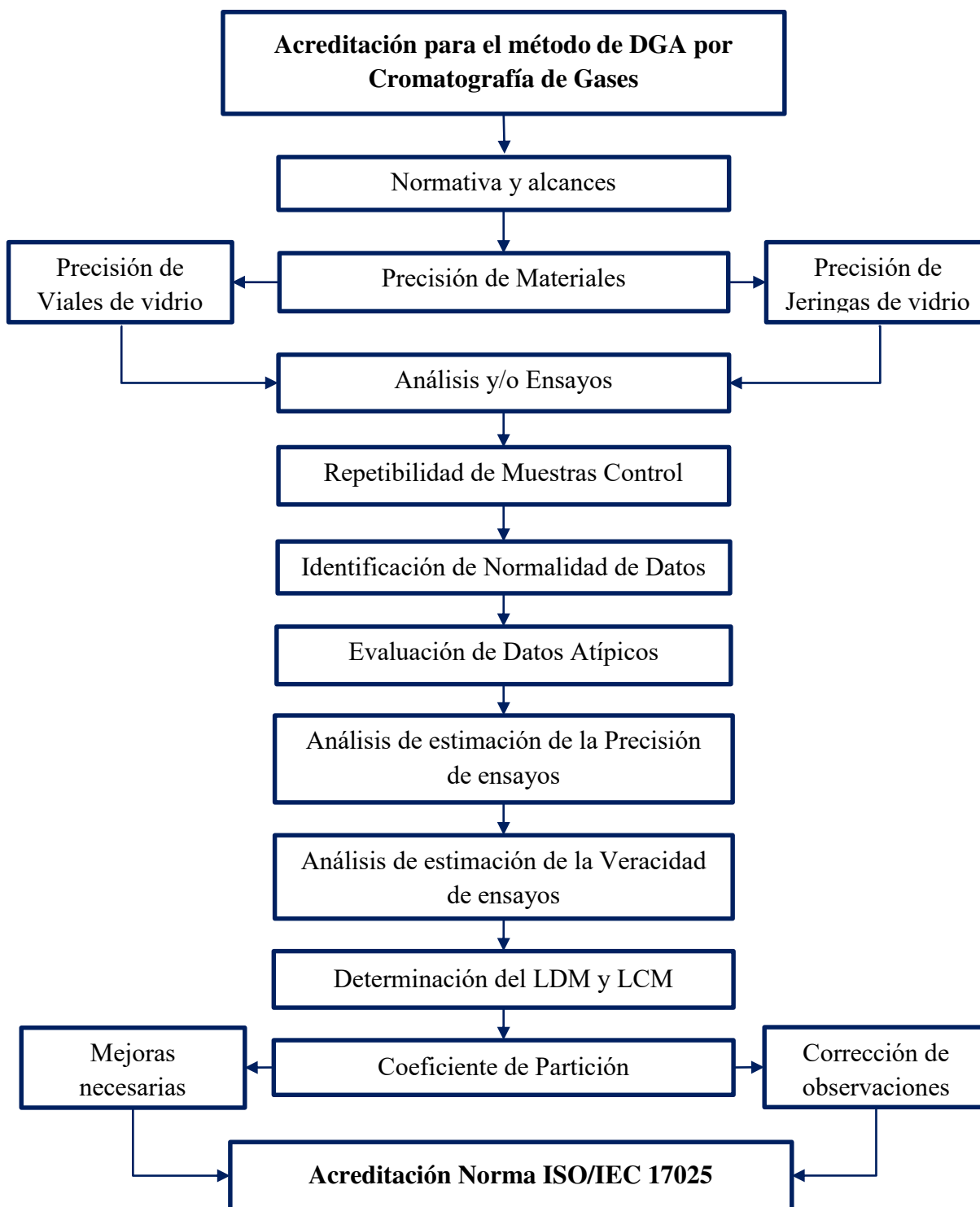


Figura 4 Diagrama del proceso de Acreditación del método DGA

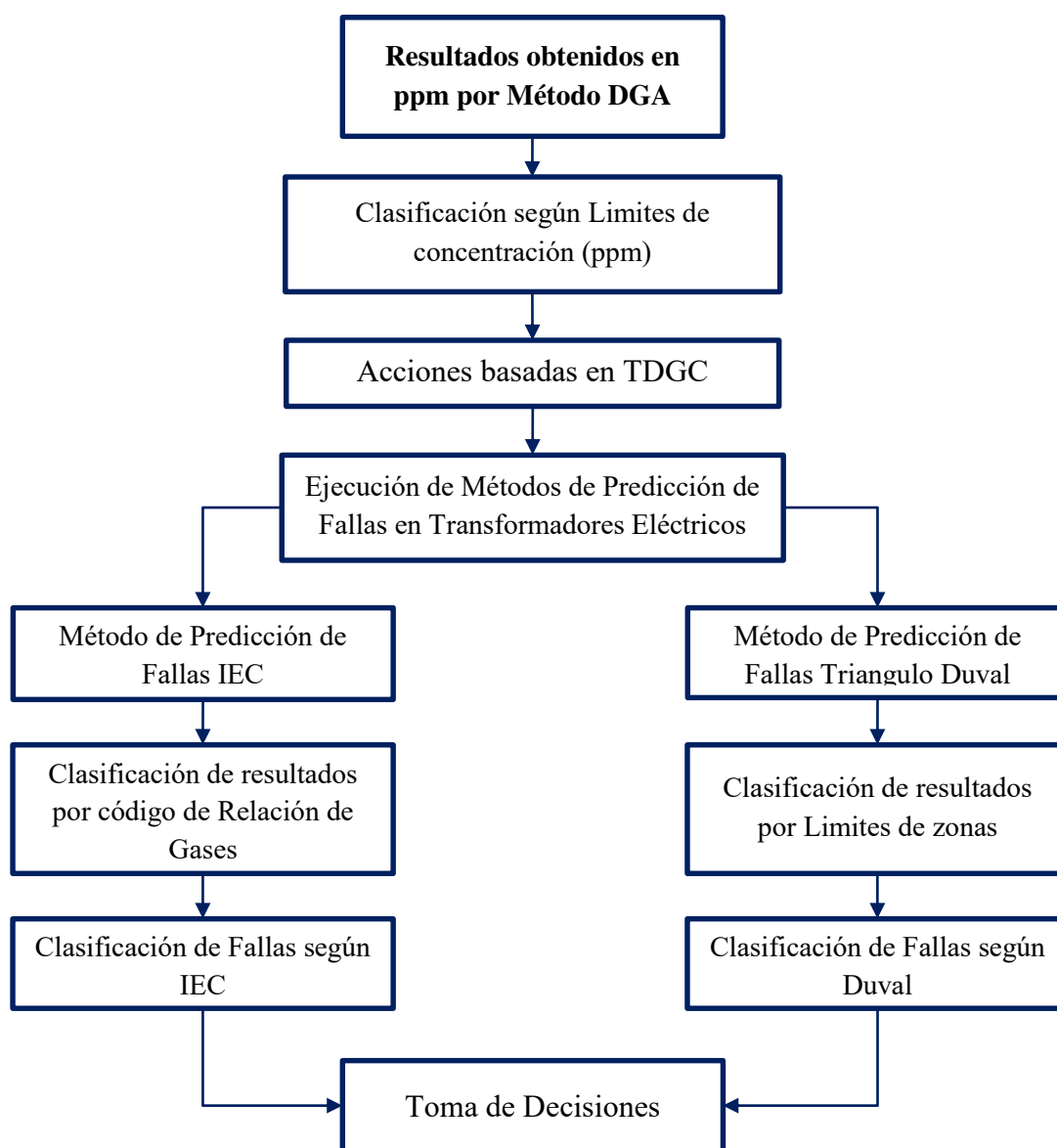


Figura 5 Diagrama del proceso de ejecución de los métodos de Predicción de Fallas.

El Método de Predicción IEC ejecutara los resultados en ppm obtenidos del método DGA mediante la plataforma de programación Matlab y su proceso es mostrado en el diagrama de la Figura 6, posteriormente es comparado con los resultados obtenidos del Método de Predicción Triangulo Duval el cual es ejecutado mediante en el programa informático Excel y muestra su

proceso en la Figura 7, de esta forma conocer las similitudes en los diagnósticos de ambos métodos de predicción.

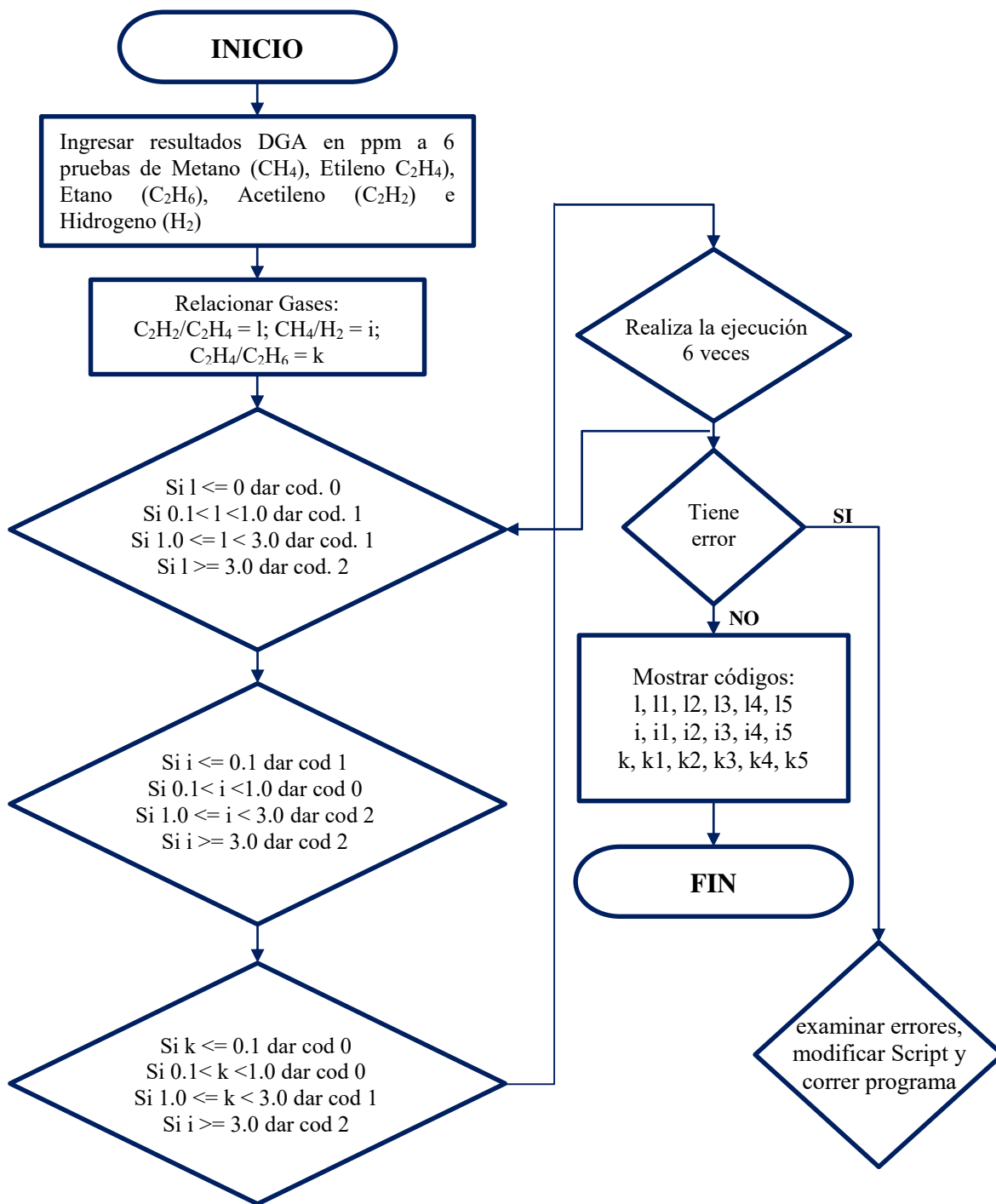


Figura 6 Diagrama de flujo del proceso del Método IEC por Matlab

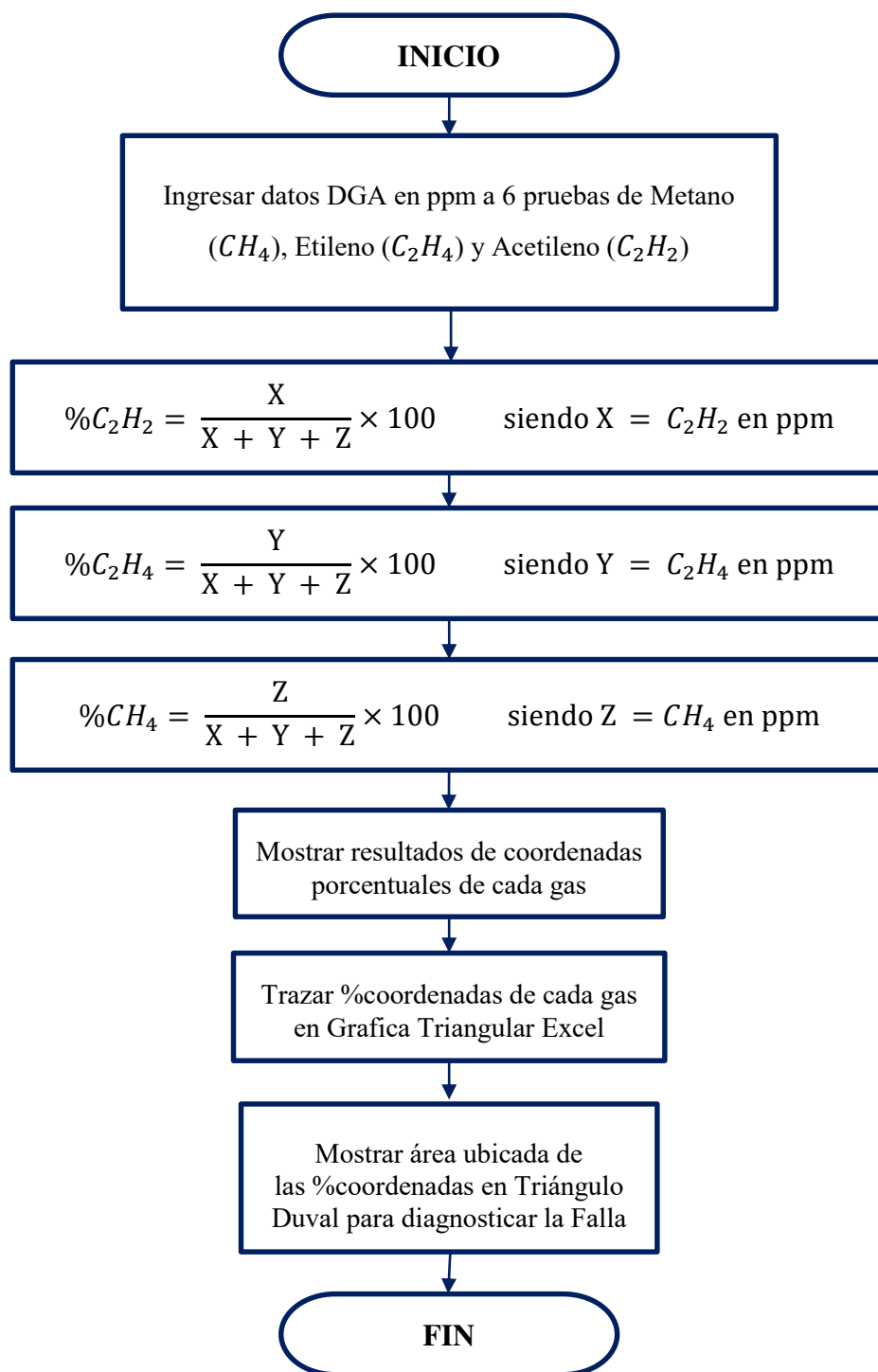


Figura 7 Diagrama de flujo del proceso del Método Triángulo Duval

VI Resultados

6.1 Acreditación de método DGA bajo Norma ISO/IEC 17025

El proceso de Acreditación para el método DGA es un complemento ideal para los métodos de predicción de Fallas en los Transformadores y sigue los pasos mostrados en el diagrama de la Figura 4 hasta la consecución y obtención de la Acreditación oficial del método.

6.1.1 Precisión de Materiales

Los principales materiales de recolección y contenedor de muestra son las jeringas y viales de vidrio en ese orden respectivamente, estos deben cumplir con las medidas solicitadas, por ende, se les hace un reconocimiento para conocer sus medidas en ml reales.

A. Estimación de Precisión de Jeringas de vidrio

Las jeringas de vidrios, principal implemento de extracción y primer contenedor de la muestra de aceite dieléctrico a analizar, debe asegurar que su volumen indicado cumpla con las medidas exactas, la verificación de su volumen real es comprobada para 20 jeringas mediante el contenido en peso de 15 ml teóricos de aceite de con una densidad definida y bajo la fórmula:

$$V_{\text{real}} = \frac{\text{peso (15ml teóricos)}}{\text{densidad (aceite)}} \quad (1)$$

Tabla 3. Precisión de jeringas de vidrio. Densidad = 0.874 g/ml.

N°	Peso	Volumen	N°	Peso	Volumen
1	13.1830	15.1	11	13.0889	15.0
2	13.1817	15.1	12	13.1207	15.0
3	13.0861	15.0	13	13.2001	15.1
4	13.0935	15.0	14	13.1488	15.0

5	13.1694	15.1	15	13.1301	15.0
6	13.1125	15.0	16	13.1025	15.0
7	13.2109	15.1	17	13.1624	15.1
8	13.1598	15.1	18	13.1288	15.0
9	13.0889	15.0	19	13.0989	15.0
10	13.0981	15.0	20	13.1379	15.0

Conclusión: El promedio ($\bar{x}$) es igual a 15.03; la desviación estándar (s) es igual a 0.046; y de aquí se determina el RSD %máximo = 0.0030. El RSD es menor a 1.9 por lo que cumple el criterio establecido por la norma ASTM 3612-C

B. Estimación de Precisión de viales de vidrio

Los viales de vidrio son los contenedores en segundo orden de la muestra de aceite dieléctrico; van a contener la muestra de aceite en el proceso de Cromatógrafo de Gases; se debe asegurar que el volumen indicado cumpla con las medidas más exactas (20 ml teóricos); la verificación del volumen real es comprobada para 20 viales mediante el peso de 20 ml teóricos de agua con su densidad definida y usando la fórmula (1), así obtener el volumen real aproximado para cada vial.

Tabla 4 Precisión de viales de vidrio

N°	W (g) vial vacío	W (g) vial lleno	Temperatura Agua (°C)	Densidad Agua (g/cm ³)	Densidad teórica (g/cm ³)	Volumen vial (mL)
1	14.4023	36.1263	23.8	0.998	0.9973	21.7675
2	14.3434	35.9025	23.8	0.998	0.9973	21.6023

3	14.3826	36.0316	23.9	0.998	0.9973	21.6924
4	14.2883	35.9111	21.9	0.998	0.9978	21.6661
5	14.4155	36.1728	21.8	0.998	0.9978	21.8009
6	14.7812	36.5533	22.0	0.998	0.9978	21.8157
7	14.3624	35.9083	22.0	0.998	0.9978	21.5891
8	14.3309	35.8920	21.7	0.998	0.9978	21.6043
9	14.7695	36.4658	21.4	0.998	0.9979	21.7398
10	14.3545	35.9392	21.2	0.998	0.9979	21.6280
11	14.7775	36.6603	21.4	0.998	0.9979	21.9267
12	14.7626	36.6568	21.0	0.998	0.9980	21.9381
13	14.7216	36.6248	22.2	0.998	0.9977	21.9471
14	14.3954	36.0587	22.3	0.998	0.9977	21.7067
15	14.6439	36.3524	22.5	0.998	0.9977	21.7520
16	14.7493	36.5458	22.6	0.998	0.9976	21.8402
17	14.3267	35.9712	22.6	0.998	0.9976	21.6879
18	14.3103	35.8918	22.7	0.998	0.9976	21.6247
19	14.7194	36.3500	22.7	0.998	0.9976	21.6739
20	14.2812	35.9296	22.8	0.998	0.9976	21.6918

RSD: Desviación Estándar Relativa

Nota. El promedio ($\bar{x}$) del Volumen del vial (real) es 21.7348; la desviación estándar (s) es igual a 0.112628; y se determina el %RSD = 0.52.

Conclusión: El RSD es menor a 0.7 por lo que cumple el criterio establecido por la norma ASTM 3612-C

6.1.2 Análisis y/o ensayos cromatográficos

A. Repetibilidad de muestras control

La repetibilidad de Muestra de Control consiste en la dilución de gases con concentraciones definidas de ~1, ~100 y ~500 ppm en una muestra de Aceite Control (aceite dieléctrico sin ningún uso ni contaminante) para ser analizados en el cromatógrafo de gases, el objetivo principal de esta parte consiste en evaluar en cuál de estas 3 concentraciones existe un mayor porcentaje de reconocimiento de los 7 gases falla. Por medio de la jeringa de muestreo se introduce 15ml de Muestra Control de aceites dieléctrico a cada vial sellado, después este pasa por un burbujeo de gases con las concentraciones mencionadas y finalmente a ser analizadas. Este proceso es efectuado para conocer en que concentración de gases se encuentra el mayor porcentaje de reconocimiento o la concentración más confiable detectada por parte del método de ensayo.

Tabla 5 Repetibilidad de ensayos a concentraciones ~1, ~100 y ~500 ppm de Metano

N°	Concentración Diluida (1ppm)			Concentración Diluida (100ppm)			Concentración Diluida (500ppm)		
	A1	A2	A3	A1	A2	A3	A1	A2	A3
1	0.462	0.449	0.480	81.454	80.895	82.031	319.79	312.91	313.34
2	0.478	0.476	0.456	82.893	83.113	80.911	320.77	321.18	322.11
3	0.442	0.449	0.484	82.893	82.271	81.758	322.75	317.72	320.29
4	0.475	0.479	0.471	80.228	82.425	80.719	313.38	322.52	316.03
5	0.442	0.453	0.452	80.601	80.787	82.742	315.36	313.63	319.94
6	0.465	0.453	0.463	82.423	81.444	82.181	322.239	315.91	315.66
7	0.459	0.467	0.463	80.511	80.353	82.977	313.81	322.25	320.93

8	0.473	0.450	0.453	81.236	81.975	80.234	318.29	322.31	319.02
9	0.467	0.442	0.446	82.038	82.471	82.812	321.12	318.96	317.00
10	0.448	0.477	0.449	82.002	80.695	80.710	317.38	318.72	320.71

Nota. El % Reconocimiento para ~1ppm es 46.130%; % Reconocimiento para ~100ppm es 81.660% y el % Reconocimiento para ~500ppm fue de 63.708%.

Conclusión: El ensayo óptimo para esta parte es aquel con concentración definida de ~100ppm, ya que tiene un % Reconocimiento mayor a 80% por lo que cumple el criterio establecido por la norma ASTM 3612-C

B. Normalidad de datos de muestra de control

Para evaluar mediante una técnica gráfica si todo el conjunto de datos mostrados en la Tabla 5 tienen una distribución aproximadamente normal o no se emplea el método estadístico “Gráfica de Probabilidad”. Los datos se trazan frente a una distribución normal teórica de tal manera que los puntos formen una línea recta aproximada. La figura 8 presenta el comportamiento de normalidad de los datos de la Tabla 5 para concentraciones de ~100ppm de Metano diluido en un aceite control, posteriormente se busca que el valor “p” resultante en la Gráfica de Probabilidad cumpla con ser mayor a 0.05, que es mayor al nivel de significancia ($\alpha = 0.05$); y usando la prueba de Anderson-Darling por Minitab se obtiene un aproximado valor de “p” por cada uno de los 3 analista; A1, A2, y A3

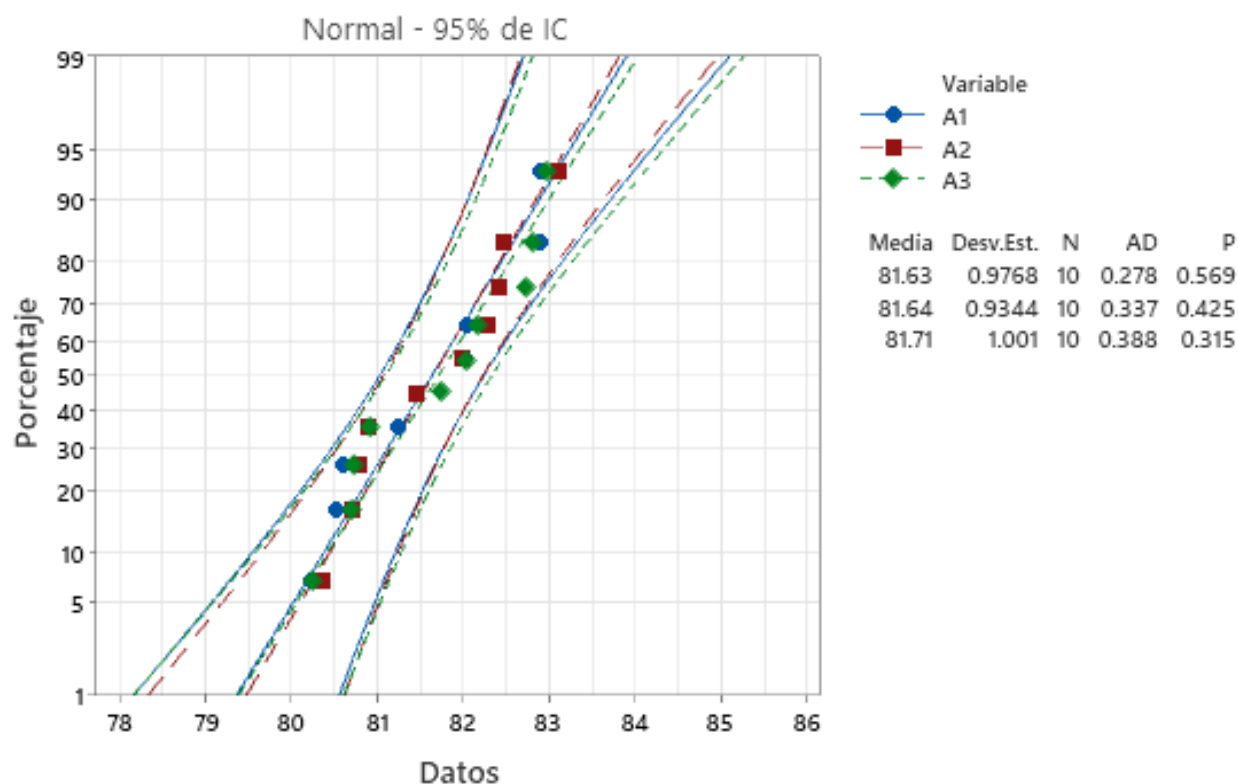


Figura 8 Prueba de Normalidad a concentración de ~100ppm de Metano

Conclusión: Se cumple el valor $p > 0.05$, que es mayor al nivel de significancia ($\alpha = 0.05$) entonces se concluye que los datos son normales

C. Evaluación de datos atípicos

Tras la verificación que los datos de la Tabla 5 para la concentración de 100 ppm de metano diluido en aceite, control, cumple con el requisito de Normalidad, ahora se debe comprobar que no haya datos o casos atípicos entre los resultados, para ello se usa el método estadístico de la Prueba de Grubbs, donde este método es utilizado para encontrar un solo valor atípico en un conjunto de datos que han cumplido con la verificación de normalidad de datos; estos resultados se muestran en la Figura 9.

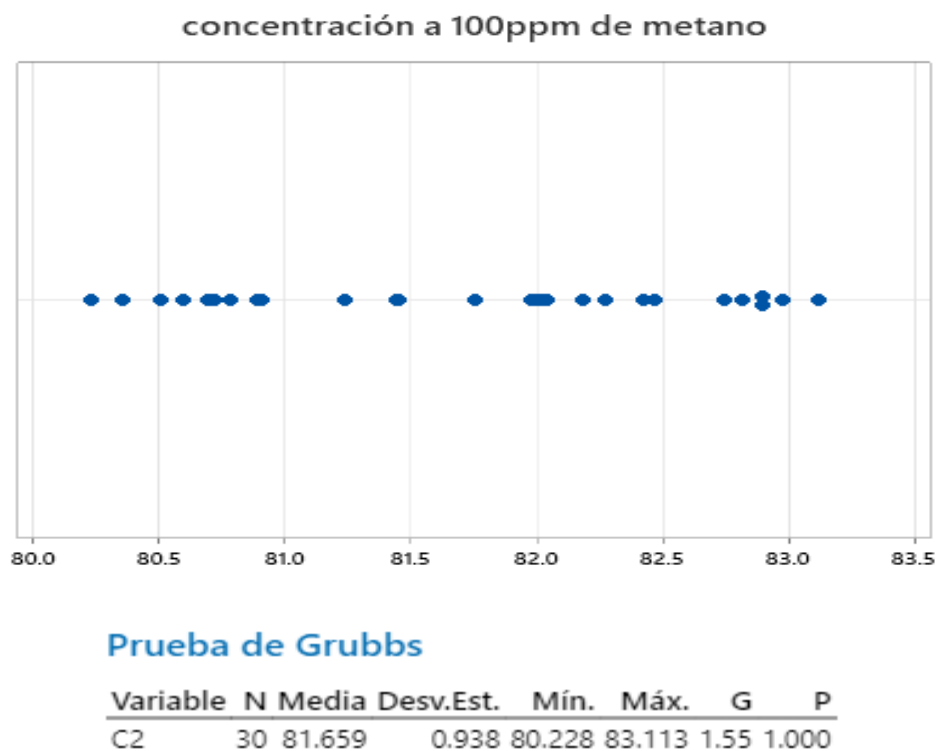


Figura 9 Prueba de Grubbs para concentración de ~100 ppm de metano.

Conclusión: La prueba de Grubbs muestra que no hay valores atípicos para un nivel de significancia de 5% en los resultados expuestos en la Figura 9.

D. Análisis de estimación de la precisión

Para esta parte tomamos el termino de precisión como la concordancia de resultados que se obtienen al aplicar un mismo método experimental repetidas veces a la misma muestra y con las mismas condiciones (temperatura, humedad, presión, etc.) en cada proceso. En la Tabla 4 se reflejan 30 datos; 10 datos y/o resultados de ensayos por cada analista (3 analistas) para una concentración aproximada de ~100ppm de metano diluido, además la precisión de estos ensayos se apoyará por medio de la relación de Horwitz, este es un método calificado para precisión en ensayos de laboratorio. Según Horwitz la precisión interlaboratorio de un método de análisis es

aceptable cuando su coeficiente de Desviación Estándar Relativa o en sus siglas en ingles RSD experimental sea menor al calculado con la ecuación RSD teórica de Horwitz.

Tabla 6 Resultados entre analistas a ~100ppm de metano diluido en aceite.

DATOS	A1	A2	A3
1	81.45422	80.89594	82.03174
2	82.89299	83.11323	80.91131
3	82.89299	82.27194	81.75881
4	80.22870	82.42560	80.71990
5	80.60144	80.78762	82.74208
6	82.42370	81.44398	82.18185
7	80.51119	80.35393	82.97768
8	81.23649	81.97557	80.23456
9	82.03853	82.47139	82.81282
10	82.00294	80.69497	80.71000
Promedio ($\bar{x}_i$)	81.628	81.643	81.708
Desviación Estándar (s_i)	0.977	0.934	1.001
Varianza (s_i^2)	0.9539	0.8729	1.0013

Nota. N = 30, números total de datos y P = 3, número de analistas

Para hacer la comparativa experimental y teórica de la Relación Horwitz se debe conocer el RSD de Repetibilidad y RSD de Reproducibilidad experimentales, donde tomamos como Repetibilidad a la variación que puede observarse cuando un mismo operador hace los mismos ensayos o análisis varias veces bajo las mismas condiciones en todas las repeticiones del ensayo y

la Reproducibilidad es la capacidad, en este caso, de la variación que puede observarse al ser diferentes los operadores que realizan los ensayos múltiples veces utilizando el mismo sistema de análisis con las mismas condiciones en todas las reproducciones, para esto se realizan las siguientes ecuaciones:

- **Varianza Repetibilidad (S_r^2)**

$$S_r^2 = \left| \frac{(N-1) \times (Si^2)}{N \times P} \right| \quad (2)$$

- **Varianza entre Analistas (S_L^2)**

$$S_L^2 = \left| \left(\frac{N \times Xi^2}{P} - S_r^2 \right) \times \left(\frac{1}{N} \right) \right| \quad (3)$$

- **Varianza Reproducibilidad (S_R^2)**

$$S_R^2 = S_r^2 + S_L^2 \quad (4)$$

- **Desviación Estándar Repetibilidad (S_r)**

$$S_r = \sqrt{S_r^2} \quad (5)$$

- **Desviación Estándar Reproducibilidad (S_R)**

$$S_R = \sqrt{S_R^2} \quad (6)$$

Las ecuaciones anteriormente mostradas servirán de apoyo para obtener los resultados de Varianza y Desviación que serán mostrados en la Tabla 7, posteriormente estos resultados ser evaluados en los RSD Horwitz y conocer si los datos manejados en la Tabla 6 para una concentración de 100ppm de metano diluido en aceite control cumplen con la característica de Precisión a concentración de ~100ppm para el gas Metano.

Tabla 7 Resultados de RSD experimental de Horwitz

Varianza Repetibilidad (S_r^2)	0.94273
Varianza entre Analistas (S_L^2)	0.02963
Varianza Reproducibilidad (S_R^2)	0.97235
Desviación Estándar Repetibilidad (S_r)	0.9709
Desviación Estándar Reproducibilidad (S_R)	0.9861

Los valores numéricos presentados en la Tabla 7 son obtenidos mediante las ecuaciones (2), (3), (4), (5) y (6) respectivamente.

Mediante los resultados obtenidos en la Tabla 7 se procede a calcular el RSD de Repetibilidad y Reproducibilidad Horwitz y para ello se siguen las siguientes Ecuaciones:

- **RSD Horwitz Repetibilidad**

$$RSD_{EXPERIMENTAL} = \frac{S_r}{C} \times 100 \quad (7)$$

$$RSD_{HORWITZ} = 0.67 \times 2^{[1-0.5\text{Log}(C)]} \quad (8)$$

- **RSD Horwitz Reproducibilidad**

$$RSD_{EXPERIMENTAL} = \frac{S_R}{C} \times 100 \quad (9)$$

$$RSD_{HORWITZ} = 2^{[1-0.5\text{Log}(C)]} \quad (10)$$

Nota. C es la concentración del elemento analizado; en este caso, la concentración promedio de los 30 datos de gas metano diluido en aceite que es mostrado en la Tabla 6.

Tabla 8 Calculo RSD Repetibilidad y Reproducibilidad de Horwitz

Cálculo RSD HORWITZ Repetibilidad	
RSD EXP Repetibilidad	1.189
RDS HORWITZ (Repetibilidad)	1.381
Cálculo RSD HORWITZ Reproducibilidad	
RSD EXP Reproducibilidad	1.208
RDS HORWITZ (Reproducibilidad)	2.062

Nota: Se obtienen los resultados RSD EXP Repetibilidad y RSD EXP Reproducibilidad, ambos son comparados con sus RSD teóricos de Horwitz y dicha comparación nos mostrara si los datos evaluados cumplen con la característica de Precisión para concentraciones de 100 ppm de metano diluido en aceite control

Conclusión: $RDS_{exp} < RSD_{Horwitz}$, por lo tanto, los resultados son precisos a concentración ~100 ppm en metano disuelto.

E. Análisis de estimación de la Veracidad

La veracidad en un método analítico se estima por medio de un Material de Referencia Certificado (MRC) con valores de identificación de concentraciones conocidas. Este ensayo de estimación de veracidad es efectuado por 3 analistas con muestras estándar especiales (MRC) que tienen concentraciones ya predeterminadas para cada gas, con este ensayo se busca comprobar que la detección de cada tipo de gas falla por parte del Cromatógrafo se encuentra en los rangos que indica el documento estándar 1HO781 del MRC, además de verificar destreza en la manipulación de ensayos por parte de los analistas para este método DGA.

Tabla 9 Estimación de la veracidad con muestras estándar de ~100 ppm

100PPM	H ₂	CH ₄	CO	CO ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂
A1	108.60	106.3	105.60	134.50	105.20	107.20	107.90
A1	107.20	108.2	107.30	140.10	107.20	107.70	106.60
A2	111.40	107.1	105.20	140.50	105.70	106.70	107.10
A2	109.40	106.4	106.30	139.60	106.50	107.10	106.90
A3	110.50	106.3	105.50	135.20	107.00	106.40	107.80
A3	111.80	108.2	107.60	135.30	106.50	107.20	107.40
1HO781	107.00	107.0	107.00	135.00	107.00	107.00	107.00
± ppm	±5.35	±5.35	±5.35	±6.75	±5.35	±5.35	± 5.35
Rango	101.65- 112.35	101.65- 112.35	101.65- 112.35	128.25- 141.75	101.65- 112.35	101.65- 112.35	101.65- 112.35

Nota. A1, A2 y A3 representan los datos obtenidos por 3 analistas diferentes en esta ensayo

Conclusión: Los ensayos son aceptados y/o pasan la aprobación ya que los valores obtenidos por los analistas se encuentran en los rangos establecidos por el documento del MRC 1HO781.

One-Sample T: CH4-2

Descriptive Statistics

N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI for μ
6	107.083	0.915	0.374	(106.123, 108.044)

μ : population mean of CH4-2

Test

Null hypothesis	$H_0: \mu = 107$
Alternative hypothesis	$H_1: \mu \neq 107$

T-Value	P-Value
0.22	0.832

Figura 10 Prueba T para resultados a concentración ~100 ppm de metano disuelto.

Tabla 11 Limite De Detección Del Método - LDM

LDM	H ₂	CH ₄	CO	CO ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂
TEORICO	0.53	0.6	0.09	0.1	0.04	0.04	0.05

Conclusión: Quedan establecido los valores para el Límite de Detección del Método (LDM), tomando como referencia lo establecido por el método de ensayo (establecido por la norma).

Tabla 12 Limite de Cuantificación del Método - LCM

LCM	H ₂	CH ₄	CO	CO ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂
	1.0	0.3	0.3	4.0	0.3	0.3	0.4

Conclusión: Queda establecido los valores del Límite de Cuantificación del Método (LCM), tomando como referencia los resultados obtenidos por los ensayos en el laboratorio.

G. Coeficiente de partición

Definimos la razón entre las concentraciones de una sustancia en las dos fases de la mezcla formada por dos disolventes inmiscibles en equilibrio, es decir, determina la velocidad promedio de cada zona de soluto conforme la fase móvil avanza a lo largo de la columna. Para esta parte se busca obtener las relaciones del volumen del gas (V_G) sobre el volumen del líquido/aceite (V_L) para varias muestras con volúmenes de 6, 8, 10, 12 y 14 ml.

Tabla 13 Relación de fase (gas – Líquido) a distintos volúmenes.

Nº vial	Volumen	Peso de vial vacío purgado	Peso de vial con aceite	Volumen (ml)	V_G/V_L
1	6	16.2944	21.0769	5.4971	2.9538402052
2	6	16.3481	22.0065	6.5039	2.3417999402
3	6	16.1912	21.9421	6.6102	2.2880489630
4	6	16.2907	21.6022	6.1052	2.5600566284

5	6	16.3668	21.7817	6.2169	2.4960895937
6	6	16.3723	21.3188	5.6856	2.8227515984
7	8	16.4250	23.3333	7.9406	1.7371771321
8	8	16.3509	23.2940	7.9806	1.7234579340
9	8	16.3453	23.0303	7.6839	1.8286074468
10	8	16.3740	23.1987	7.8355	1.7738912393
11	8	16.4833	23.3191	7.8572	1.7662074346
12	8	16.2384	22.6647	7.3866	1.9424771302
13	10	16.3685	25.0189	9.9430	1.1859383129
14	10	16.3181	24.9149	9.8814	1.1995673718
15	10	16.2381	24.7125	9.7407	1.2313368240
16	10	16.2572	24.8172	9.8391	1.2090234558
17	10	16.2963	24.8821	9.8687	1.2023854250
18	10	16.3709	25.2660	10.2125	1.1282476353
19	12	16.2350	26.5004	11.7993	0.8420364313
20	12	16.3410	26.7535	11.9684	0.8160135204
21	12	16.2958	26.8500	12.1313	0.7916318415
22	12	16.1999	26.5541	11.9014	0.8262387033
23	12	16.1577	26.5126	11.9022	0.8261152480
24	12	16.2777	26.7918	12.0852	0.7984649929
25	14	16.3401	28.1657	13.5926	0.5990089959
26	14	16.2530	28.3719	13.9298	0.5603099936
27	14	16.3452	28.1216	13.5361	0.6056894112
28	14	16.2919	28.4974	14.0293	0.5492393414
29	14	16.4123	28.2563	13.6138	0.5965248887
30	14	16.3489	28.1491	13.5634	0.6024508722

Nota. volumen total: 21.73476 ml; Densidad aceite: 0.870 g/ml y temperatura: ~22°C

La Tabla 14 se centra en los resultados del gas metano (CH_4) obtenidos por el cromatógrafo de gases, el fin es buscar una relación entre el área ocupada por cada concentración detectada de metano (CH_4) y la relación de fases (V_G/V_L) obtenida en la Tabla 13.

Tabla 14 Área detectada y relación de fase para el gas metano (CH₄)

Nº vial	Área	1/Área	V _G /V _L
1	1841	0.000543	2.954
2	2312	0.000432	2.288
3	2123	0.000471	2.560
4	2156	0.000463	2.496
5	1938	0.000516	2.823
6	2913	0.000343	1.723
7	2815	0.000355	1.829
8	2845	0.000351	1.774
9	2836	0.000352	1.766
10	2694	0.000371	1.942
11	3877	0.000257	1.186
12	3919	0.000255	1.200
13	3947	0.000253	1.209
14	3950	0.000253	1.202
15	4141	0.000241	1.128
16	5102	0.000196	0.842
17	5254	0.000190	0.816
18	5419	0.000184	0.792
19	5262	0.000190	0.826
20	5317	0.000188	0.826
21	5372	0.000186	0.798
22	6472	0.000154	0.599
23	6954	0.000143	0.560
24	6428	0.000155	0.606
25	6528	0.000153	0.549
26	6445	0.000155	0.597
27	6727	0.000148	0.602

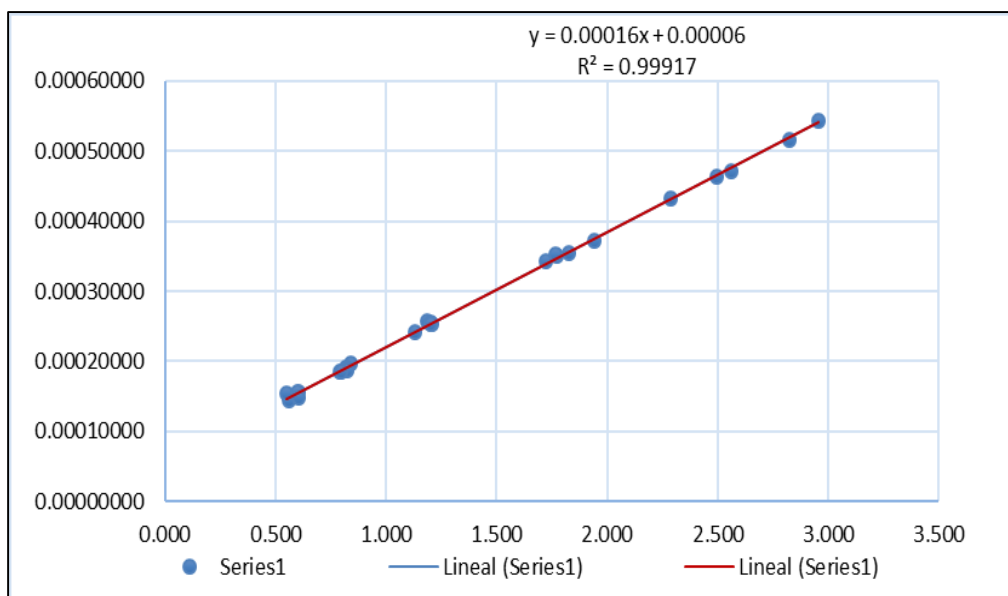


Figura 11 Grafica V_G/V_L vs $1/\text{Área}$.

El Intercepto es 0.00005 y la Pendiente 0.00016.

Conclusión: El coeficiente de partición para metano ($K\text{-CH}_4$) es igual 0.313, donde $K\text{-CH}_4$ se obtiene mediante la relación del *Intercepto sobre la Pendiente*; de esta forma se obtienen las constantes para los demás gases falla.

El Factor Estándar Temperatura Presión (STP) es una variable de corrección donde influye la temperatura y presión del ambiente donde se está desarrollando el proceso cromatógrafo, para la obtención de estos se sigue el siguiente procedimiento, iniciando con las ecuaciones (11) y (12):

$$F = K_{aceite} + \frac{V_G}{V_L} \quad (11)$$

$$\text{Factor STP} = F \times \left(\frac{P}{101.325 \times 10} \right) \times \left(\frac{273}{T + 273} \right) \quad (12)$$

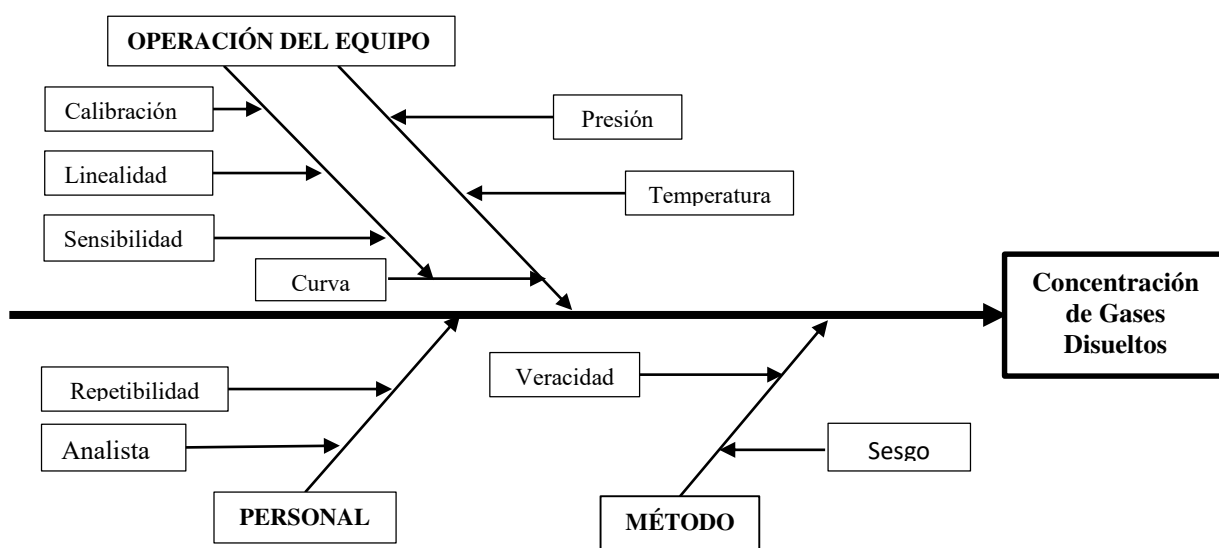
Tabla 15 Factor Estándar Temperatura-Presión.

Gas	N	Kaceite	F	FACTOR STP
Dióxido de Carbono - CO₂	1.02	0.8000	1.247	1.149
Etileno - C₂H₄	1.47	1.2500	1.697	1.564
Acetileno - C₂H₂	0.93	1.0000	1.447	1.334
Etano - C₂H₆	2.09	1.7500	2.197	2.025
Hidrogeno - H₂	0.074	0.0230	0.470	0.433
Metano - CH₄	0.44	0.3130	0.760	0.700
Monóxido de Carbono - CO	0.12	0.1250	0.572	0.527

Nota. N: constante definida para cada gas por la norma ASTM; Kaceite: constantes obtenidas en la Tabla 7 para cada gas.

H. Incertidumbre de Cromatografía

Se entiende como “una estimación unida al resultado de un ensayo que caracteriza el intervalo de valores dentro de los cuales se afirma que está el valor verdadero” (ISO,1993).

**Figura 12** Diagrama causa – efecto para Cromatografía de Gases

6.2 Métodos de predicción de gases falla en transformadores eléctricos

Como se conoce, la técnica de Cromatografía de Gases puede detectar gran variedad de compuestos gaseosos en una mezcla, en este caso nos hemos centrado especialmente en gases generados por Fallas en los transformadores, el origen de estos gases puede ser explicado en tres grandes categorías: Descarga corona o descargas parciales, calentamiento térmico y arcos. Estas categorías se distinguen principalmente en la intensidad de energía; la más grave ocurre con el arco, en menor cantidad con el calentamiento y finalmente con descargas parciales. En la Tabla 16 se mencionan estos gases con la posible causa de su presencia y en la Tabla 16 se indican los gases generados por la presencia de los diferentes tipos de averías eléctricas y térmicas.

Tabla 16 Gases generados por fallas en transformadores.

GASES GENERADOS POR FALLAS EN TRANSFORMADORES	
Hidrógeno (H₂)	Este gas se presenta al inicio de cualquier falla, ya sea descargas de baja energía o de alta energía. Normalmente se genera a partir de los 150°C.
Metano (CH₄)	Se produce ante la presencia de descargas parciales o descomposición térmica del aceite. El metano comienza a formarse en pequeñas cantidades a la misma temperatura que la del hidrógeno.
Monóxido de Carbono (CO)	Generalmente la causa de este gas se le atribuye a la descomposición térmica de la celulosa u otro aislamiento sólido.
Etano (C₂H₆)	La principal causa de la formación de este gas es la descomposición térmica del aceite. Se comienza a producir a partir de los 250°C.
Dióxido de Carbono (CO₂)	Este gas es un indicativo del envejeciendo de la celulosa o la presencia de descargas en la misma.

Etileno (C₂H₄)	Empieza a presentarse en el aceite sobre los 350°C. Este gas normalmente se debe a la descomposición térmica del aceite a altas temperaturas.
Acetileno (C₂H₂)	Este gas se produce a temperaturas superiores a los 500°C, y generalmente su causa es la presencia de un arco eléctrico.

Fuente: Adaptada de Evaluación del estado de transformadores de potencia mediante la aplicación de lógica difusa al análisis de gases disueltos en aceite (p 21), por Chicaiza (2016).

Tabla 17 Gases generados en función del tipo de falla

GASES GENERADOS EN UN TRANSFORMADOR				
Fallas	Térmicas	Altas	Aceite	C ₂ H ₄ , H ₂ (CH ₄ , C ₂ H ₆)
		Temperaturas	Papel	CO, (CO ₂)
		Bajas	Aceite	CH ₄ , C ₂ H ₆
		Temperaturas	Papel	CO ₂ , (CO)
	Eléctricas	Descargas	Aceite	H ₂
		Parciales	Papel	H ₂ , CO, CO ₂
		Arcos Eléctricos	Aceite	H ₂ , C ₂ H ₂

Fuente: Adaptada de Chicaiza (2016).

Existe variedad de métodos de predicción de fallas para el ensayo de Análisis de Gases Disueltos. En este trabajo se ejecutarán los métodos de relaciones entre gases: Método de IEC y el Método Grafico de Triangulo Duval; mediante la aplicación de estos métodos podremos distinguir las posibles fallas que puedan presentarse en los transformadores así como sus posibles soluciones analizando el aceite dieléctrico circulante en el transformador.

Tabla 18 Subdivisión según el tipo de falla para el Método IEC y Duval

	Falla térmica a baja Temperatura	Sobrecalentamiento y Chisporroteo	Arco	Descargas Parciales y Corona	Desgaste Normal
Duval	Falla térmica bajo los 300°C	Falla térmica entre 300°C y 700°C	Descargas de baja energía	Descargas Parciales	Normal
		Falla térmica a más de 700°C	Descargas de alta energía	Mezcla de fallas térmicas y eléctricas	
IEC	Falla Térmica <150°C	Falla Térmica de 300°C – 700°C	Descargas de baja energía	PDs de baja densidad de energía	Normal
	Falla térmica de 150°C – 300°C	Falla Térmica >700°C	Descargas de alta energía		

Nota. Adaptada de Chicaiza (2016).

Los Límites de concentraciones de gases falla disueltos (ppm), posterior a los ensayos cromatográficos, para efectuar los métodos de predicción de fallas en el transformador se debe tener en cuenta cumplir con ciertas condiciones. Estos se basan en los resultados DGA en las concentraciones de gases de forma individual y total de todos los gases combustible. En la Tabla 15 se encuentran los límites y/o rangos de estas concentraciones para diferentes condiciones. Donde:

- Condición 1: Operación satisfactoria.
- Condición 2: Necesidad de revisión por estar por encima de los niveles normales
- Condición 3: Existe un nivel alto de descomposición.
- Condición 4: Nivel excesivo de gases, puede originarse la falla.

Tabla 19 Límites de concentraciones de gases disueltos

	H₂	CH₄	C₂H₂	C₂H₄	C₂H₆	CO	CO₂	TDGC
Cond.1	100	120	1	50	65	350	2500	720
Cond.2	101- 700	121-400	2-9	51-100	66-100	351-570	2500-4000	721-1920
Cond.3	701-1800	401-1000	10-35	101-200	101-150	571-1400	4001-10000	1921-4630
Cond.4	>1800	>1000	>35	>200	>150	>1400	>10000	>4630

Fuente: Adaptada de Brambila & Gijon (2015). TDGC: Total de Gases Combustible Disueltos.

Tabla 20 Acciones basadas mediante resultados DGA.

	TDGC niveles (ppm)	R ppm/d	Muestreo de intervalos y procedimientos operativos para las valores de generación degas	
			Intervalos de muestreo	Procedimientos de operación
Cond. 4	>4630	>30	Diario	Considerar sacar de servicio al transformador
		10 a 30	Diario	Comunicar al fabricante.
		<10	Semanal	Precaución extrema de las maniobras Analizar gases individuales Plan de paro Comunicar al fabricante
		>30	Semanal	Precaución extrema en maniobras
Cond. 3	1921 a 4630	10 a 30	Semanal	Analizar gases individuales. Plan de paro
		<10	Mensual	Comunicar al fabricante

Cond. 2	721 a 1920	>30	Mensual	Precaución en las maniobras
		10 a 30	Mensual	Analizar gases individuales
		<10	Trimestral	Determinar dependencia de carga.
Cond. 1	≤720	>30	Mensual	Precaución en las maniobras
		10 a 30	Trimestral	Analizar gases individuales Determinar dependencia de carga
		<10	Anual	Continuar con la operación normal

Nota. Adaptada de Brambila & Gijon (2015).

6.2.1 Método de predicción de fallas IEC

El método de predicción IEC es una versión mejorada del método de Rogers, este presenta 4 relaciones con los gases falla presentes y su posterior decodificación; además que IEC solo utiliza tres relaciones con dichos gases: acetileno/etileno (C_2H_2/C_2H_4), metano/hidrogeno (CH_4/H_2) y etileno/etano (C_2H_4/C_2H_6) y considera tres intervalos para el uso de la relación de gases.

A. Códigos de relación para método IEC.

Teniendo las concentraciones en ppm de los 5 principales gases falla (C_2H_2 , C_2H_6 , C_2H_4 , CH_4 e H_2), que son necesarios reconocer para la ejecución de este método, se forman las Relaciones IEC, los que se clasifican por rangos establecidos y así obtener los códigos vistos en la Tabla 18.

Tabla 21 Códigos de relación de gases para el método de relación IEC.

RELACIÓN DE GASES [PPM]	Rango	Código
$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	< 0.1	0
	$0.1 \leq x < 3.0$	1
	≥ 3.0	2
$\frac{CH_4}{H_2}$	< 0.1	1
	$0.1 \leq x < 1.0$	0
	≥ 1.0	2
$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	< 1.0	0
	$1.0 \leq x < 3.0$	1
	≥ 3.0	2

Fuente: Adaptado de Freire (2023).

B. Clasificación de averías mediante los códigos de relación de la IEC

Una vez obtenida las relaciones de gases y posteriormente obtenido los códigos respectivos por la Tabla 18 se procede a la clasificación de estos códigos mediante la guía de la Tabla 19, de

esta forma la concordancia de códigos obtenidos de la Tabla 18 y la posterior clasificación de estos en la Tabla 19 nos brindan una respuesta inmediata del posible fallo que presentan los transformadores en análisis; así poder ejecutar una adecuada toma de decisiones por el bien del equipo.

Tabla 22 Tipo de falla clasificados por códigos IEC

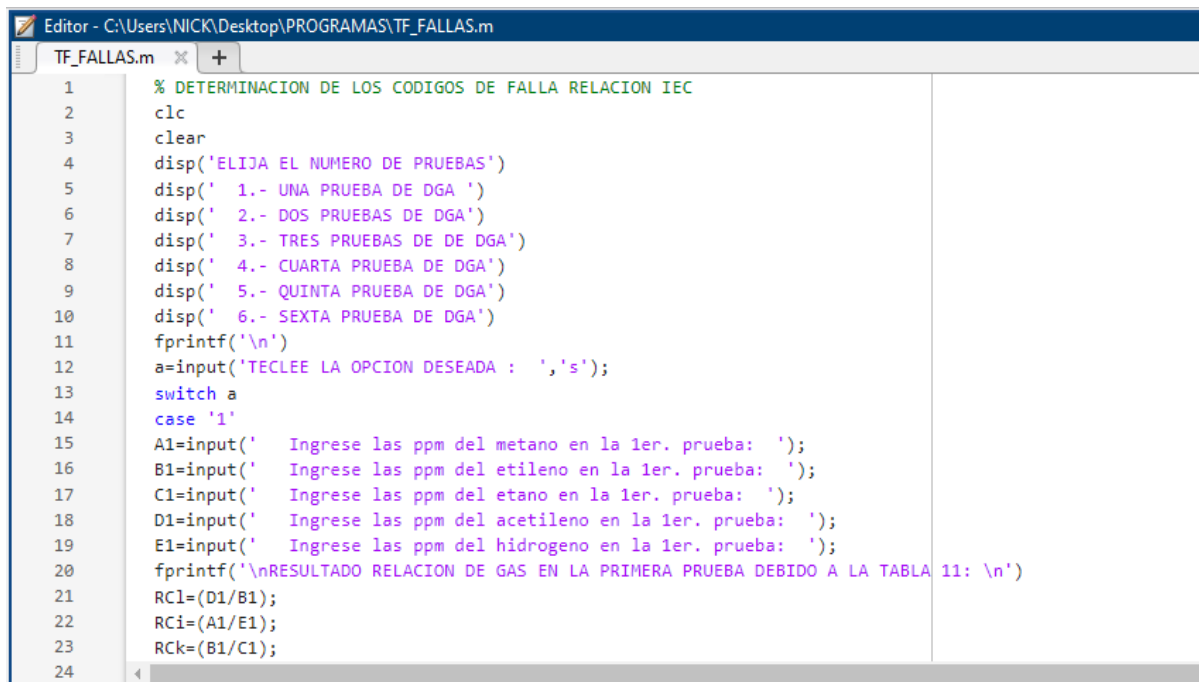
TIPO DE FALLA	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$
Erosión normal, no hay falla	0	0	0
Descarga parcial con baja energía	insignificante	1	0
Descarga parcial con alta energía	1	1	0
Descarga de baja energía, chispas continuas	1 - 2	0	1 - 2
Descarga de alta energía	1	0	2
Falla térmica ($T \leq 150\text{ }^{\circ}\text{C}$)	0	0	1
Falla térmica ($150\text{ }^{\circ}\text{C} < T \leq 300\text{ }^{\circ}\text{C}$)	0	2	0
Falla térmica ($300\text{ }^{\circ}\text{C} < T \leq 700\text{ }^{\circ}\text{C}$)	0	2	1
Falla térmica ($700\text{ }^{\circ}\text{C} < T$)	0	2	2

Fuente: Adaptado de Carrera (2013).

C. Ejecución del Método de Predicción de Fallas IEC

Considera la programación y ejecución del método de predicción de fallas para transformadores (Método IEC en Matlab), tomando como base las concentraciones resultantes de

gases falla obtenidas en el proceso de Análisis Cromatográfico. La implementación del Programa propone el diagnóstico de 1 a 6 transformadores por cada ejecución, solicitando para cada transformador las concentraciones en ppm de los siguientes gases: acetileno (C_2H_2), etileno (C_2H_4), metano (CH_4), hidrogeno (H_2) y etano (C_2H_6) presentes en sus análisis cromatográficos.



```

Editor - C:\Users\NICK\Desktop\PROGRAMAS\TF_FALLAS.m
TF_FALLAS.m
1 % DETERMINACION DE LOS CODIGOS DE FALLA RELACION IEC
2 clc
3 clear
4 disp('ELIJA EL NUMERO DE PRUEBAS')
5 disp(' 1.- UNA PRUEBA DE DGA ')
6 disp(' 2.- DOS PRUEBAS DE DGA')
7 disp(' 3.- TRES PRUEBAS DE DE DGA')
8 disp(' 4.- CUARTA PRUEBA DE DGA')
9 disp(' 5.- QUINTA PRUEBA DE DGA')
10 disp(' 6.- SEXTA PRUEBA DE DGA')
11 fprintf('\n')
12 a=input('TECLEE LA OPCION DESEADA : ','s');
13 switch a
14 case '1'
15 A1=input(' Ingrese las ppm del metano en la 1er. prueba: ');
16 B1=input(' Ingrese las ppm del etileno en la 1er. prueba: ');
17 C1=input(' Ingrese las ppm del etano en la 1er. prueba: ');
18 D1=input(' Ingrese las ppm del acetileno en la 1er. prueba: ');
19 E1=input(' Ingrese las ppm del hidrogeno en la 1er. prueba: ');
20 fprintf('\nRESULTADO RELACION DE GAS EN LA PRIMERA PRUEBA DEBIDO A LA TABLA 11: \n')
21 RCl=(D1/B1);
22 RCi=(A1/E1);
23 RCK=(B1/C1);
24

```

Figura 13 Inicio y presentación del método de predicción IEC en MATLAB.

Nota. Programa adaptado de Análisis de gases disueltos en aceite para el mantenimiento preventivo a transformadores de potencia mediante la implementación de software Matlab, por Carrera, 2013.

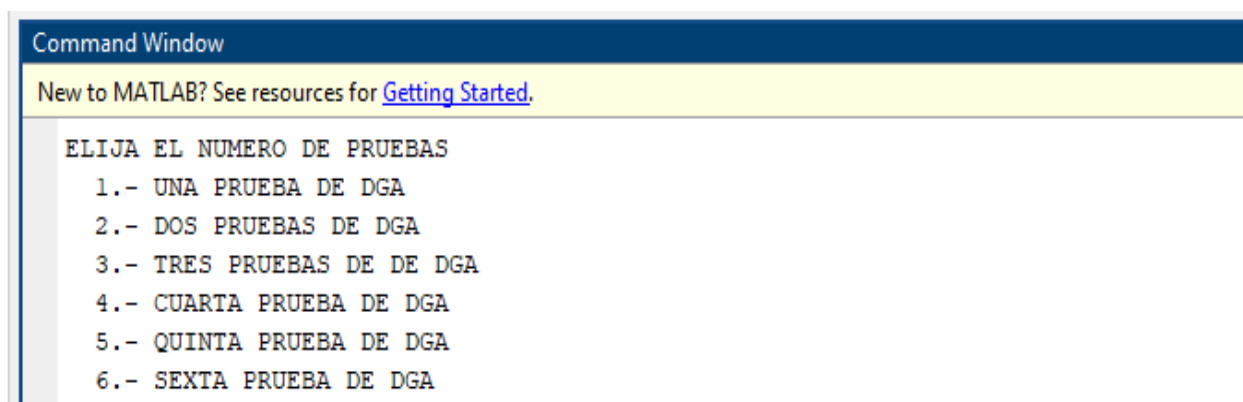


Figura 14 Elección de número de pruebas DGA a analizar.

A continuación, en la Tabla 23 se obtienen los resultados del Método Acreditado de Gases disueltos por Cromatografía de Gases para 6 transformadores de un Cliente “X”, estos han sido analizados por el laboratorio de la Planta de Transformadores Hitachi Energy.

Tabla 23 Resultados de concentración de gases por método DGA

N°	CH ₄ [ppm]	C ₂ H ₄ [ppm]	C ₂ H ₆ [ppm]	C ₂ H ₂ [ppm]	H ₂ [ppm]
1er Transformador	36	133	19	2	18
2do Transformador	14	155	27	1	1
3er Transformador	2	74	1	0	3
4to Transformador	26	13	7	0	9
5to Transformador	12	2	1	0	14
6to Transformador	3	5	1	0	4

Nota: Se toman en cuenta los 5 gases principales que son necesarios para las relaciones de gases del metodo IEC

```

TECLEE LA OPCION DESEADA : 6
ingrese las ppm del metano en la 1er. prueba: 36
ingrese las ppm del etileno en la 1er. prueba: 133
ingrese las ppm del etano en la 1er. prueba: 19
ingrese las ppm del acetileno en la 1er. prueba: 2
ingrese las ppm del hidrogeno en la 1er. prueba: 18

ingrese las ppm del metano en la 2da. prueba: 14
ingrese las ppm del etilino en la 2da. prueba: 155
ingrese las ppm del etano en la 2da. prueba: 27
ingrese las ppm del acetileno en la 2da. prueba: 1
ingrese las ppm del hidrogeno en la 2da. prueba: 1

```

Figura 15 Ingreso de concentraciones (ppm) de gases falla según la Tabla 23

Command Window

New to MATLAB? See resources for [Getting Started](#).

CROMATOGRAFIA DE GASES EN EL TRANSFORMADOR					
ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
M8 =					
36	14	2	~	12	3
133	155	74	26	2	5
19	27	1	13	1	1
2	1	0	7	0	0
18	1	3	0	14	4
			9		

Figura 16 Numero de Transformador y sus concentraciones de gases

Nota. Datos generados por el Listado de Sentencias (Script) en Matlab son las concentraciones en ppm obtenidas por el método DGA como muestran los datos de la Tabla 23

Tabla 24 Determinación de códigos de fallas para el primer transformador

RELACIÓN DE GASES	Relación de Concentración (ppm)	Resultado de Relación de Gases	Resultados de Rango	Resultados de Códigos
$\frac{C_2H_2}{C_2H_4} = RCl$	$\frac{2}{133}$	0.015	< 0.1	0
$\frac{CH_4}{H_2} = RCi$	$\frac{36}{18}$	2.000	≥ 1.0	2
$\frac{C_2H_4}{C_2H_6} = Rck$	$\frac{133}{19}$	7.000	≥ 3.0	2

Nota. Los resultados de los ítems “Resultados de Rango” y “Resultados de Códigos” han sido obtenidos mediante la relación de gases del primero transformador en análisis y su comparativa con la Tabla 21

```

Command Window
New to MATLAB? See resources for Getting Started.

RESULTADO RELACION DE GAS DE LA PRIMERA HASTA LA SEXTA PRUEBA DEBIDO A LA TABLA 11:
RCl es menor a 0.1
RCi esta entre 1 y 3
Rck es mayor o igual a 3

RCl1 es menor a 0.1
RCi1 es mayor o igual a 3
Rck1 es mayor o igual a 3

RCl2 es menor a 0.1
RCi2 esta entre 0.1 y 1.0
Rck2 es mayor o igual a 3

RCl3 es menor a 0.1
RCi3 esta entre 1 y 3
Rck3 es mayor o igual a 3

```

Figura 17 Rangos IEC obtenidos para el primer transformador

Conclusión: Los resultados arrojados por el Script hecho en Matlab para los RCl, RCi y Rck concuerdan con los resultados del ítem “Resultados de rango” de la Tabla 24.

Command Window

New to MATLAB? See resources for [Getting Started](#).

RESULTADO DE LA RELACION DE GASES DEL TRANSFORMADOR

RELACION DE GAS NUMERICO

	1er	2da	3er	4ta	5ta	6ta
M =						
1.0000	0.0150	0.0065	0	0	0	0
2.0000	2.0000	14.0000	0.6667	2.8889	0.8571	0.7500
3.0000	7.0000	5.7407	74.0000	1.8570	2.0000	5.0000

fx

Figura 18 Resultados de la relación de gases del primer transformador

Conclusión: Los resultados arrojados por el Script Matlab concuerdan con los resultados del ítem “Resultado de Relación de Gases” de la Tabla 24

Command Window

New to MATLAB? See resources for [Getting Started](#).

CODIGOS DE FALLAS PRESENTES EN EL TRANSFORMADOR

RELACION DE CODIGO NUMERICO

	1er	2da	3er	4ta	5ta	6ta
M7 =						
1	0	0	0	0	0	0
2	2	2	0	2	0	0
3	2	2	2	1	1	2

fx >>

Figura 19 Códigos numéricos IEC para el primer transformador

Conclusión: Los resultados arrojados en el Script hecho en Matlab concuerdan con los resultados del ítem “Resultados de Códigos” de la Tabla 24.

D. Diagnósticos del transformador según códigos IEC

Los códigos obtenidos para el análisis del primer transformador son: 0-2-2 mediante la Tabla 21 “Código de relación de gases para método de predicción IEC”, posteriormente estos códigos son comparados con la Tabla 22 “Tipo de falla clasificados por códigos IEC”, obteniendo como respuesta según la Tabla 22: **“FALLA TÉRMICA ($T > 700^{\circ}\text{C}$)”**

Se sigue el mismo procedimiento planteado para el Transformador N°1 con los demás Transformadores, donde podemos ver en la Tabla 25 los diagnósticos para los Transformadores N°1, N°4 y N°5 en consulta.

Tabla 25 Diagnóstico para el 1er, 4to y 5to Transformador – Método IEC

N° TRANSFORMADOR	CÓDIGO	DIAGNÓSTICO IEC
1er	0 – 2 - 2	Falla térmica ($T > 700^{\circ}\text{C}$)
4to	0 – 2 - 1	Falla térmica ($300^{\circ}\text{C} < T \leq 700^{\circ}\text{C}$)
5to	0 – 0 - 1	Falla térmica ($T \leq 150^{\circ}\text{C}$)

6.2.2 Método de predicción por el Triángulo Duval

El método de predicción Triangulo Duval emplea la relación porcentual de tres de los gases presentes en los aceites dieléctricos: metano (CH_4), etileno (C_2H_4) y acetileno (C_2H_2); estas relaciones son cotejadas en un Diagrama Triangular que contiene áreas ya definidas por fallas presentes en Transformadores.

A. Ubicación de relación de gases en Método Duval

Las relaciones de estos gases sumado a la interpretación gráfica de un Triangular equilátero donde cada lado constituye un vértice en el cual se puede representar el contenido en porcentaje de C_2H_2 , CH_4 y C_2H_4 respectivamente. Las siguientes ecuaciones apoyan el cálculo porcentual de contenido de cada gas.

$$\% \text{C}_2\text{H}_2 = \frac{X}{X + Y + Z} \times 100 \quad (13)$$

$$\% \text{CH}_4 = \frac{Y}{X + Y + Z} \times 100 \quad (14)$$

$$\% \text{C}_2\text{H}_4 = \frac{Z}{X + Y + Z} \times 100 \quad (15)$$

Nota. X, Y y Z es la concentración en ppm de $[\text{C}_2\text{H}_2]$, $[\text{CH}_4]$ y $[\text{C}_2\text{H}_4]$ respectivamente.

Posteriormente y obtenido los resultados de las ecuaciones (13), (14) y (15); dichos resultados nos servirán como coordenadas para el Diagrama Triangular de Duval. Se deben trazar líneas paralelas referidas a la cantidad de porcentaje correspondiente y a los lados adyacentes a él, estos puntos intersectar en algún punto del diagrama triangular, estas intersecciones de estas tres líneas, indicará el punto de ubicación de la falla.

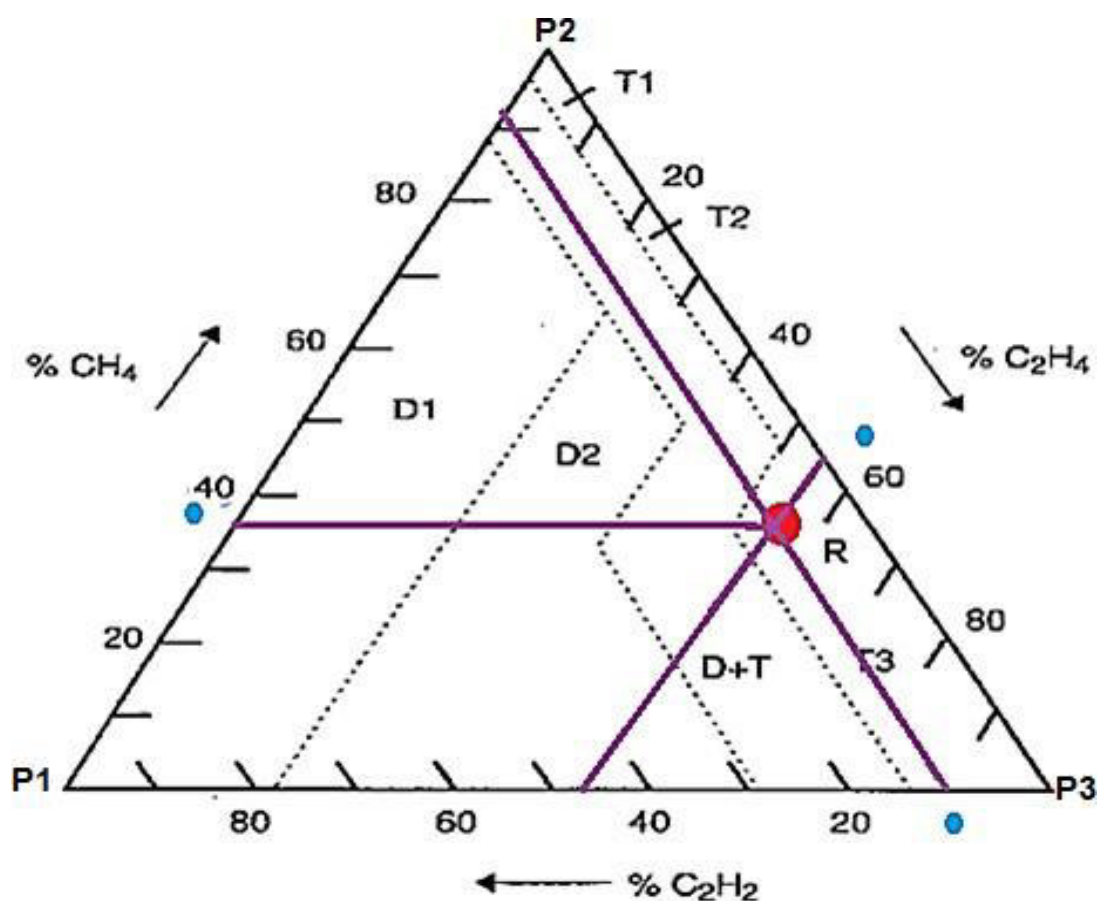


Figura 20 Construcción del triángulo Duval

Nota. P1= % metano; P2 = % etileno. P3: % acetileno y R = punto de ubicación de la falla

Fuente: Adaptado de Predicción de falla en los transformadores de potencia mediante técnica de cromatografía de gases (p50), por Branbila & Gijon, 2015.

B. Categorización de las fallas por el triángulo de Duval.

De similar al Método de Predicción IEC, al formarse las relaciones de las concentraciones (ppm) entre los gases principales para este método se van a identificar en zonas, pero en este caso, de un diagrama triangular para posteriormente ser identificado el tipo de falla si es que existiese mediante la siguiente tabla.

Tabla 26 Categorización de las fallas según el Método Duval.

SIMBOLO	FALLA	EJEMPLO
PD	DESCARGAS PARCIALES	Descargas de tipo parcial en las burbujas de gas o huecos, con la posible formación de $\ddot{A}$ -CERA en papel.
D1	DESCARGAS DE BAJA ENERGÍA	Las descargas parciales de emisión de chispas, las descargas de agujeros que inducen bajos pinchazos carbonizados. Bajo consumo de energía que induce un arco o la formación de partículas en el aceite.
D2	DESCARGAS DE ALTA ENERGÍA	Las descargas en el papel o aceite con potencia, las descargas de seguimiento, daños de alta energía para el papel o la formación de grandes partículas de carbono en la fusión de metal en el aceite y de disparo en los equipos y alarmas de gas
DT	COMBINACIÓN DE FALLAS TÉRMICAS Y ELÉCTRICAS	Puntos calientes ($T < 200^{\circ}\text{C}$)
T1	FALLA TÉRMICA $T \leq 300^{\circ}\text{C}$	Demostrado por el papel marrón ($< 300^{\circ}\text{C}$) o carbonizado ($> 300^{\circ}\text{C}$).
T2	FALLA TÉRMICA $300^{\circ}\text{C} < T < 700^{\circ}\text{C}$	La carbonización del papel, la formación de partículas en el aceite
T3	FALLA TÉRMICA $T > 700^{\circ}\text{C}$	Extensa formación de partículas de carbono en el aceite, la coloración de metal (800°C) o de metal fusión ($> 1000^{\circ}\text{C}$)

Nota. Adaptado de Carrera (2013).

C. Ejecución del Método de Predicción de Fallas Triangulo Duval

La siguiente parte consta de presentar la ejecución del método de predicción de fallas para transformadores (Método Duval por Graficas Excel), con las concentraciones resultantes de gases

falla obtenidas en el proceso de Análisis Cromatográfico. La implementación tomara los mismos ejemplos de transformadores usados en el método anterior (Método IEC), de igual forma, solicitando para cada transformador, la información de las concentraciones en ppm de los gases metano (CH_4), etileno (C_2H_4) y acetileno (C_2H_2) presentes en sus análisis cromatográficos.

A continuación, presentamos concentraciones de gases falla obtenidas de los aceites dieléctricos de 6 Transformadores en consulta real pertenecientes a una empresa “X”; y estos valores han sido plasmados en la Tabla 27.

Tabla 27 Concentración de gases en transformadores según DGA – Método Duval

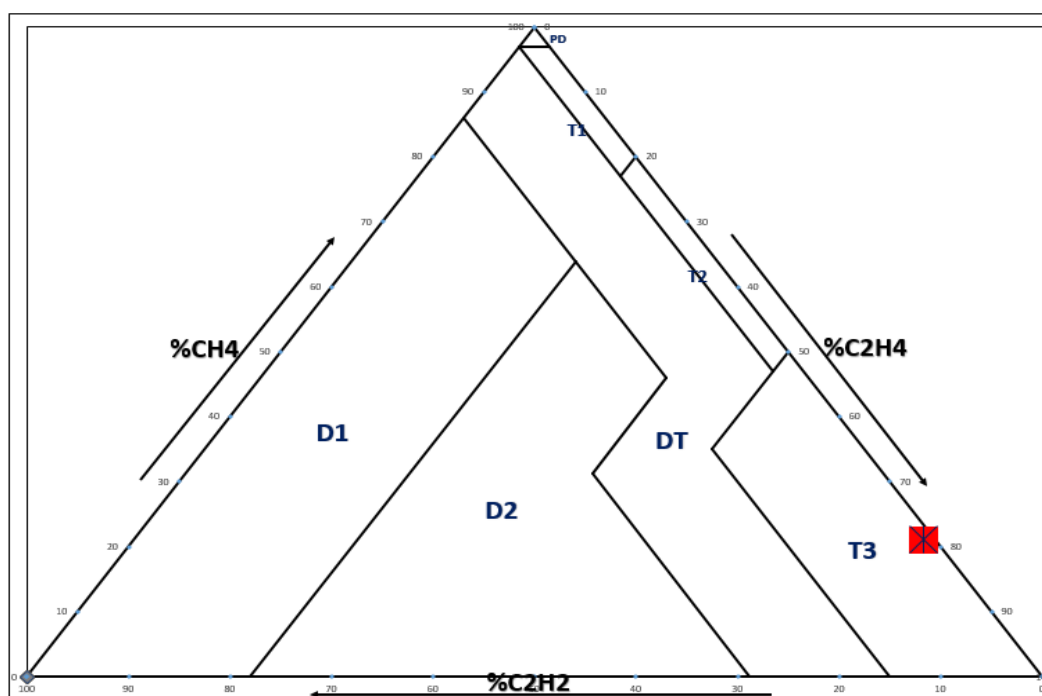
N°	CH_4 [ppm]	C_2H_4 [ppm]	C_2H_2 [ppm]
1er Transformador	36	133	2
2do Transformador	14	155	1
3er Transformador	2	74	0
4to Transformador	2	101	0
5to Transformador	12	2	0
6to Transformador	3	5	0

Nota: Se toman en cuenta los 3 gases principales que son necesarios para las relaciones de gases del metodo Duval

Con los procedimientos dictados por el Método Duval y sus ecuaciones (11), (12) y (13), obtenemos los resultados de la Tabla 28 para luego ser plasmados en el diagrama Triangular Duval.

Tabla 28 Resultados de %Gases Falla para Método Duval

Concetracion de Gases Falla - Transformador N°1		
CH ₄ (ppm)	C ₂ H ₄ (ppm)	C ₂ H ₂ (ppm)
36	133	2
% Gases Falla - Transformador N°1		
% CH ₄	% C ₂ H ₄	% C ₂ H ₂
21.05	77.78	1.17

**Figura 21** Punto de Falla para el para análisis del primer transformador

Conclusión: La ubicación del punto de falla del análisis del primer transformador se encuentra en el área correspondiente a “T3”

C. Diagnósticos del trasformador según Duval

Tomando las concentraciones de gases falla para el primer transformador y efectuando de manera correcta el proceso del Método Duval hallamos que la ubicación del punto de falla se

encuentra en el área correspondiente a “T3” como se muestra en la Figura 21, donde cotejando esta área con la Tabla 26, se obtiene como respuesta: “**FALLA TÉRMICA ($T > 700^{\circ}\text{C}$)**”

Tabla 29 Diagnostico para el 1er, 4to y 5to Transformador – Método Duval

N° TRANSFORMADOR	ÁREA	DIAGNOSTICÓ DUVAL
1er	T3	Falla térmica ($T > 700^{\circ}\text{C}$)
4to	T2	Falla térmica ($300^{\circ}\text{C} < T \leq 700^{\circ}\text{C}$)
5to	T1	Falla térmica ($T \leq 300^{\circ}\text{C}$)

Se sigue el mismo procedimiento planteado para el Transformador N°1 con los demás Transformadores, donde podemos ver en la Tabla 30 los diagnósticos para los Transformadores N°1, N°4 y N°5 en consulta.

Tabla 30 Tabla comparativa de Diagnósticos Método IEC y Método Duval

N° TRANSFORMADOR	CÓDIGO IEC	DIAGNÓSTICO IEC	AREA DUVAL	DIAGNÓSTICO DUVAL
1er	0 – 2 - 2	Falla térmica ($T > 700^{\circ}\text{C}$)	T3	Falla térmica ($T > 700^{\circ}\text{C}$)
4to	0 – 2 - 1	Falla térmica ($300^{\circ}\text{C} < T \leq 700^{\circ}\text{C}$)	T2	Falla térmica ($300^{\circ}\text{C} < T \leq 700^{\circ}\text{C}$)
5to	0 – 0 - 1	Falla térmica ($T \leq 150^{\circ}\text{C}$)	T1	Falla térmica ($T \leq 300^{\circ}\text{C}$)

Conclusiones: Los Diagnósticos para el Método de Predicción IEC y Método de Predicción Triangulo Duval coinciden en sus resultados como lo muestra la Tabla 30 para los transformadores en consulta.

VII – Conclusiones

Los métodos IEC y Método Triangulo Duval muestran mejor precisión en sus predicciones, 79% y 89% de exactitud respectivamente, frente a otros métodos como: Rogers con un 65%, Doernenburg 41% y Gases Clave con un 75% de exactitud; además de ello, son económicas en su implementación y fáciles de interpretar utilizando programas conocidos como Matlab y Gráficas Excel.

La Acreditación del método DGA mediante Cromatografía de Gases brinda un mejor estatus de servicio del laboratorio y/o empresa, asegurando resultados de mayor confianza como los demuestran los resultados similares obtenidos en los diagnósticos de predicción de fallas (Tabla 30), estos a partir de la base del Método DGA amparado por un ente regulador, además que para este método no necesita parar la operación de un transformador para conocer su estado de “salud”.

La evaluación de casos por medio del método Duval e IEC muestran similitud en sus resultados de diagnóstico, donde en ambos métodos para el 1er transformador se obtiene un diagnóstico de “Falla térmica a $T > 700^{\circ}\text{C}$ ”. Los métodos de predicción de Fallas se complementan de gran manera con el método de ensayo DGA, ya que estos métodos de predicción al trabajar con una base de resultados en ppm más precisos, respaldados por una Acreditación ISO/IEC, generan que los diagnósticos de predicción tengan un grado mayor de exactitud y de confianza también.

VIII – Recomendaciones

Reactualizaciones constantes en los analistas responsables para este método Acreditado de Análisis de Gases disueltos por Cromatografía de Gases, por si se dan cambios o actualizaciones en la Norma del Método ISO/IEC 17025.

Para incrementar el grado de precisión en los diagnósticos de Transformadores se debe aumentar los tipos de análisis en los aceites dieléctricos como el Análisis fisicoquímico, Análisis de Furanos, de Polimerización y demás técnicas que reduzcan la incertidumbre en los resultados de algún problema presente en los transformadores.

Aplicar otros métodos que apoyen o complementen a la mejora de los métodos IEC y Duval, tales como: Redes neurales, Lógica Difusa, softwares más avanzados o métodos aplicados con Inteligencia Artificial, actualmente una tecnología muy relevante.

Referencias

Ang, S., Wen, F., Rahmanb, Q., Salam, M., & Von, W. (2017). Causes of transformer failures and diagnostic methods – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.165>

Aponte, G., Cadavid, H., Ceron, A., Zuñiga, A., Tariacuri, J., Restrepo, L., Gaona, M. (2020). Herramientas de software para estimar el indice de salud en transformadores de potencia. *e-Gnosis*, 18(10), pp1-21.

Ashraf, S., Singh, A., Sohail, S., Rahman, O., Parveen, S., & Khan, S. (2021). Advances in DGA based condition monitoring of transformers: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 149. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111347>

Bastidas, A., Maquilon, J., & Chavez, C. (2022). Evaluacion del estado de funcionamiento de transformadores de potencia sumergidos en aceite en la subestaciones electricas. *Revista Ingenio*, 5(1). Obtenido de fing.revista.ingenio@uce.edu.ec

Brambila Tello, D., & Gijon Olivares, L. V. (2015). *Prediccion de falla en los transformadores de potencia mediante tecnica de cromatografía de gases*. tesis para obtencion del titulo, Instituto Politecnico Nacional de Mexico. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/<https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/21906/Tesis%20completa-07-11-15.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Cano Rivas, J. L. (2016). *Analisis de Gases disueltos en aceites dilectricos de los transformadores de potencia mediante cromatografía de gases*. Trabajo de titulación, Universidad Catolica de Santiago de Guayaquil. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/<http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/5411/1/T-UCSG-PRE-TEC-IEM-74.pdf>

Carrera Gomez, A. (2013). *Analisis de gases disueltos en aceite para el mantenimiento preventivo a transformadores de potencia mediante la implementacion de software*. Tesis para obtencion de titulo, Instituto Politecnico Nacional. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgglefindmkaj/https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/11797/7.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Carro Rejas, C. (2017). *Revisión De La Norma ISO/IEC 17025*. ENAC (Entidad Nacional de Acreditación). Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgglefindmkaj/https://documentacion.sea-acustica.es/publicaciones/Coruna17/AED-3%20001.pdf

Ceron, A., Echeverry, D., Aponte, G., & Romero, A. (2014). Indice de salud para transformadores de potencia inmersos en aceite mineral con voltajes de 69kv y 230kv usando logica difusa. *Información Tecnológica*, 26(2), pp107-116. doi:10.4067/S0718-07642015000200013

Chicaiza Portero, A. J. (2016). *Evaluacion del estado de transformadores de potencia mediante la aplicacion de logica difusa al analisis de gases disueltos en aceite*. Proyecto para la obtencion de Titulo, Escuela Politecnica Nacional. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgglefindmkaj/https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/16778/1/CD-7374.pdf

Crespo Sanchez, G. (2015). Análisis de gases disueltos para monitoreo y diagnóstico de transformadores de fuerza de servicio. *Aplicaciones Industriales*, 36(2), pp180-189.

Diaz, M. S., & Schmidt, E. (2014). Diagnostico del estado de transformadores de potencia mediante analisis de gases disueltos DGA. *Extensionimos, Innovacion y transferencia tecnologica*, 2, pp62-68.

Fernandez Blanco, J. C., Hernandez Gonzales, F. H., & Corrales Barrios, L. B. (2021). Metodo de logica difusa para diagnostico de fallos incipientes en un transformador de 40MVA. *RIELAC*, 42(2), pp76-88.

Freire Freire, A. S. (2023). *Interpretacion de gases disueltos en aceite dielectricos mediante redes neuronales para la deteccion de anomalias en transformadores de potencia de la subestacion Novacero*. Trabajo para la obtencion del titulo Magister, Universidad Tecnica de Cotopaxi. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgglefindmkaj/http://repositorio.utc.edu.ec/bitstream/27000/10299/1/MUTC-001435.pdf

Freire, A. S., Astudillo, J. C., Quinatoa, C. I., & Arias, F. R. (2022). Interpretacion de Gases disueltos en aceite dielectrico mediante bosques aleatorios para deteccion de anomalias en transformadores de potencia. *Revista Técnica "Energía"*, 19, pp90-98. doi:<https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v19.n2.2023.544>

Lima alvarez, M., Ramirez Fiallo, O., Fernandex García, S. J., & Perez Barrios, R. J. (s.f.). Sistema para diagnóstico de fallas en tranformadores a traves de logica difusa. *Aplicaciones Industriales*, 24(3), pp34-41.

Linsinger, T. P., & Josephs, R. D. (2006). Limitations of the application of the Horwitz equation. *Trends in Analytical Chemistry*, 26(7), pp1125-1130.

López García, M. (2014). *Implementación informática del método del triángulo de Duval*. Trabajo de fin de Grado, Universidad Carlos III de Madrid. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10016/26363>

Martínez Alarcón, R. (2015). *Aplicación del triángulo de Duval a la interpretación del análisis de gases disueltos de transformadores*. Trabajo de fin de Grado, Universidad Carlos III

de Madrid. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10016/23698>

Mejia Rojas, E. A. (2021). *Investigacion sobre Metodologias de Implementacion de Norma ISO/IEC 17025:2017 en Laboratorios de Calibración y Ensayo*. Trabajo de Investigacion para la obtención del grado de Bachiller. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.12404/18327>

Montané García, J. J., Dorrbercker drake, S. a., & Del Castillo Serpa, a. M. (2019). Avances en la Evaluacion del estado y la vida remanente de transformadores de fuerza. *Aplicaciones Industriales*, 40(3), pp245-256.

Niño Arenas, J. A. (2019). *Implementación de requisitos de la norma iso-iec 17025:2017 respecto a la selección, validación y verificación de métodos de ensayos a transformadores de distribución de energía eléctrica*. Trabajo de Pregrado, Universidad Francisco de Paula Santander. Obtenido de <http://repositorio.ufps.edu.co/handle/ufps/3890>

Perez, J. B. (2014). *Best Practices in Dissolved Gases Analysis (DGA) for power transformer*. IEEE Central America And Panama Convention. doi:978-1-4799-7584-6/14

Reyes Perez, I. (2010). *Procedimiento para realizar e interpretar la prueba de cromatografía de gases en transformadores de potencia*. tesina para obtencion de titulo, Universidad Naacional Autonoma de Mexico. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.14330/TES01000665575>

Reza Abbasi, A. (2022). Fault detection and diagnosis in power transformers: a comprehensive review and classification of publications and methods. *Electric Power Systems Research*, (209). doi:<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.107990>

Rivera Orozco, C., & Rodriguez Baes, M. (2010). Uso de la Ecuacion Horwitz en Laboratorios de Ensayos NMX-EC-17025-IMNC-2006. *Centro Nacionla de Metrología 2010*. Obtenido de chrome-

extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.cenam.mx/sm2010/info/pviernes/sm2010-vp03c.pdf

Salamanca, S., Céspedes, A., & Aponte, G. (2021). Monitoreo en línea de transformadores de potencia. Una revision critica de sensores de temperatura, humedad del aceite y gas disuelto. *Tecnología en Marcha*, 34, pp114-125. doi:<https://doi.org/10.18845/tm.v34i7.6019>

Sarria Arias, J. T., Guerrero Bello, N. A., & Rivas Trujillo, E. (2014). Estado del arte del análisis de gases disueltos en transformadores de potencia. *Revista Facultad de Ingeniería*, 23(36), pp105-122.

Syukri, M., Halim, A., Omar, A., Abdul, A., & Hajar, S. (2023). Conventional methods of dissolved gas analysis using oil-immersed power transformer for fault diagnosis: A review. *Electric Power Systems Research*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.109064>

Zhang1, C., Ning, Y., & Shi, Y. ((159)). Review of Comprehensive Assessment of Power Transformer. *Advances in Intelligent Systems Research*, (159). Obtenido de <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

Zorrilla Henao, J. D., Cespedes Fernadez, A., & Garcia Gomez, D. F. (2020). Tecnicas para diagnostico de transformadores de potencia: una revision critica. *Ingeniare. Revista chilena de Ingeniería*, 28(2), pp184-203.

IX – Anexo

ANEXO 1: Repetibilidad de muestras control

Hidrogeno

N°	concentración ~1			concentración ~100			concentración ~1000		
	A1	A2	A3	A1	A2	A3	A1	A2	A3
1	0.3946	0.3889	0.4010	56.0317	57.0516	58.2540	599.821	595.550	591.712
2	0.4005	0.3785	0.3790	57.9113	58.2243	56.9934	597.247	598.001	599.305
3	0.4053	0.4005	0.3738	58.1588	56.2960	57.6415	602.316	611.601	605.301
4	0.3810	0.3951	0.4026	58.1361	57.7598	57.8930	601.288	601.520	599.936
5	0.3725	0.3811	0.3908	57.7421	56.9469	58.3952	610.266	602.301	609.314
6	0.3900	0.3718	0.3855	58.1819	57.2546	56.1796	608.184	605.901	598.529
7	0.3726	0.3954	0.4022	56.9777	58.3654	57.1172	598.373	599.712	603.643
8	0.3904	0.3997	0.3915	57.2346	57.9587	57.1455	602.049	608.303	605.908
9	0.3889	0.4064	0.3795	56.8128	58.3689	58.1985	609.769	599.411	610.419
10	0.4050	0.3795	0.3955	58.2100	57.4297	56.8542	591.582	610.404	601.607

Dióxido de Carbono

N°	concentración ~1000			concentración ~5000			concentración ~1500		
	A1	A2	A3	A1	A2	A3	A1	A2	A3
1	795.87	803.3	791.1	6383.2	6345.3	6307.6	12240.3	12153.0	12144.4
2	802.77	795.1	797.8	6309.3	6275.0	6359.8	12169.7	12118.7	12295.3
3	791.40	788.3	794.4	6277.9	6385.9	6374.4	12247.7	12286.1	12285.4
4	804.97	802.0	803.6	6285.9	6299.2	6291.3	12298.3	12175.2	12177.9
5	796.28	805.9	802.0	6337.1	6358.4	6290.4	12118.4	12229.3	12144.7
6	805.93	801.7	792.2	6296.6	6283.9	6310.9	12138.7	12203.3	12228.8
7	802.45	791.9	803.4	6296.4	6362.8	6281.2	12199.0	12140.2	12261.7
8	801.19	799.0	805.9	6338.7	6313.4	6367.9	12194.9	12154.7	12139.2
9	789.37	802.0	798.7	6359.7	6295.8	6283.3	12131.9	12257.7	12157.4
10	792.80	790.7	799.6	6311.1	6317.9	6352.2	12275.1	12228.3	12168.2

Nota. Fuente el Autor

Monóxido de Carbono

N°	concentración ~5			concentración ~500			concentración ~1000		
	A1	A2	A3	A1	A2	A3	A1	A2	A3
1	5.7065	5.5931	5.7333	519.7960	514.4220	514.8210	3147.26	3166.70	3166.15
2	5.7099	5.7856	5.4869	524.7700	519.5650	517.2470	3164.70	3157.12	3155.20
3	5.5953	5.5698	5.6241	527.7520	517.8120	520.3160	3152.95	3143.03	3164.09
4	5.6986	5.5524	5.7678	513.3820	521.4540	511.2880	3164.86	3137.58	3128.84
5	5.4563	5.4936	5.5496	512.3630	514.3640	519.2660	3158.44	3120.49	3146.00
6	5.7069	5.7716	5.5378	522.2390	515.5580	518.1840	3129.68	3154.69	3154.72
7	5.6346	5.5165	5.4368	513.8120	515.6260	518.3730	3134.81	3156.37	3126.77
8	5.4768	5.5933	5.6963	518.2960	520.2250	517.0490	3143.12	3141.51	3124.82
9	5.6411	5.6487	5.7485	521.1210	513.4140	515.7690	3129.34	3143.72	3134.81
10	5.5348	5.4699	5.6464	521.3820	518.4960	513.5820	3126.52	3130.50	3157.04

Etano

N°	concentración ~10			concentración ~100			concentración ~500		
	A1	A2	A3	A1	A2	A3	A1	A2	A3
1	0.88070	0.85460	0.84516	202.19963	201.491	202.626	1715.241	1715.752	1753.177
2	0.83680	0.84370	0.83157	201.80882	201.307	201.529	1742.694	1746.175	1719.295
3	0.88450	0.87530	0.87863	203.60368	202.185	201.336	1749.382	1732.163	1737.899
4	0.87130	0.84700	0.84367	201.05057	203.271	201.391	1734.952	1719.314	1715.932
5	0.85290	0.84480	0.85159	203.57684	201.503	202.539	1713.763	1746.398	1737.137
6	0.85070	0.86370	0.84248	201.02827	202.131	203.423	1750.496	1715.920	1746.591
7	0.83350	0.88310	0.86342	204.09922	202.634	202.152	1733.654	1728.521	1732.411
8	0.83880	0.83800	0.85634	202.19866	204.039	203.087	1736.250	1745.108	1738.695
9	0.86650	0.87040	0.88098	201.31333	201.467	201.985	1730.634	1744.942	1749.703
10	0.85150	0.85050	0.87139	201.64200	203.192	202.365	1733.212	1739.241	1721.144

Acetileno

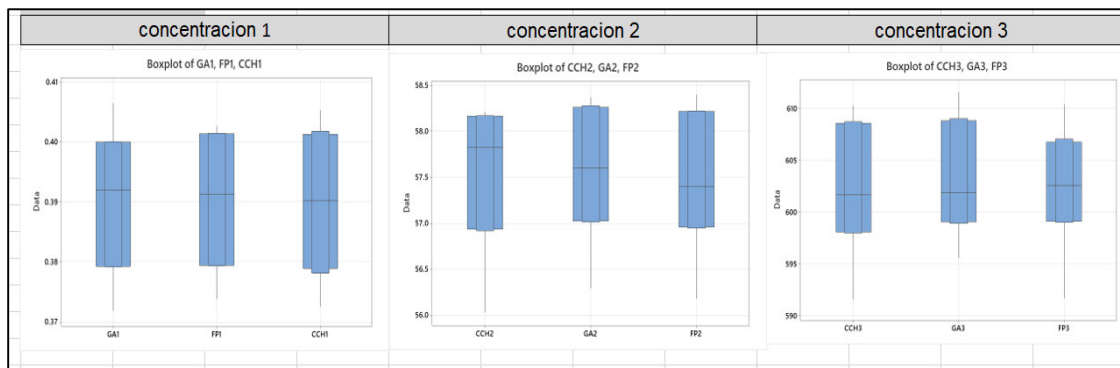
N°	concentración ~10			concentración ~100			concentración ~500		
	A1	A2	A3	A1	A2	A3	A1	A2	A3
1	0.59440	0.59300	0.59900	70.89594	71.032	71.454	674.868	664.822	662.789
2	0.62790	0.61070	0.61840	72.11323	69.911	70.261	662.596	677.247	670.564
3	0.59030	0.62667	0.62002	72.27194	70.759	72.893	671.131	662.316	666.398
4	0.61110	0.60880	0.62318	69.42560	69.720	71.229	666.265	671.288	665.304
5	0.59550	0.59687	0.59658	70.78762	70.742	70.601	668.689	669.266	679.462
6	0.60270	0.60300	0.60800	70.44398	71.182	69.424	679.994	668.184	671.854
7	0.60830	0.61070	0.59710	70.35393	71.978	70.511	665.229	678.373	669.585
8	0.62790	0.60667	0.60489	70.97557	72.235	71.236	672.069	668.049	669.714
9	0.60180	0.59880	0.60116	72.47139	71.813	71.039	662.991	665.769	677.947
10	0.59940	0.60687	0.59997	70.69497	70.710	72.003	666.515	671.582	672.892

Etileno

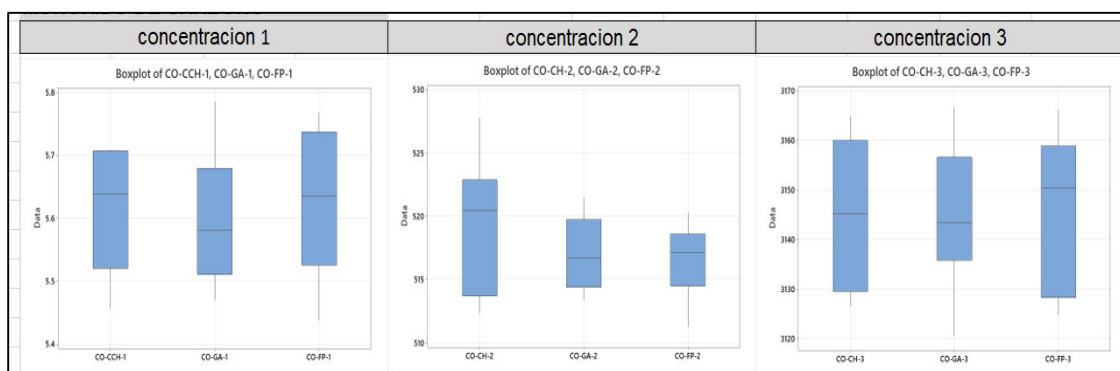
N°	concentración ~10			concentración ~100			concentración ~500		
	A1	A2	A3	A1	A2	A3	A1	A2	A3
1	0.97929	0.97251	0.99916	164.831	161.572	162.132	1469.275	1472.016	1475.292
2	0.98622	0.96687	0.97624	161.237	162.712	161.747	1458.058	1479.433	1481.607
3	0.99982	0.98214	0.98981	163.075	162.134	162.478	1480.046	1459.325	1458.614
4	0.94953	0.97561	0.94957	164.528	162.341	163.809	1472.219	1468.123	1470.166
5	0.96396	0.94215	0.97392	161.972	162.373	161.724	1471.103	1459.985	1461.929
6	0.98361	0.99584	0.95361	162.621	163.951	161.068	1459.442	1479.712	1462.331
7	0.99795	0.98083	0.97798	161.607	161.378	160.666	1463.314	1458.504	1460.024
8	0.95034	0.96932	0.99037	161.362	161.545	161.231	1477.151	1462.698	1465.471
9	0.97242	0.98367	0.98241	160.829	161.344	160.907	1464.192	1463.852	1481.769
10	0.98713	0.97762	0.97714	160.188	161.182	162.823	1461.502	1475.901	1461.362

ANEXO 2: Normalidad de datos de muestra de control - Datos atípicos

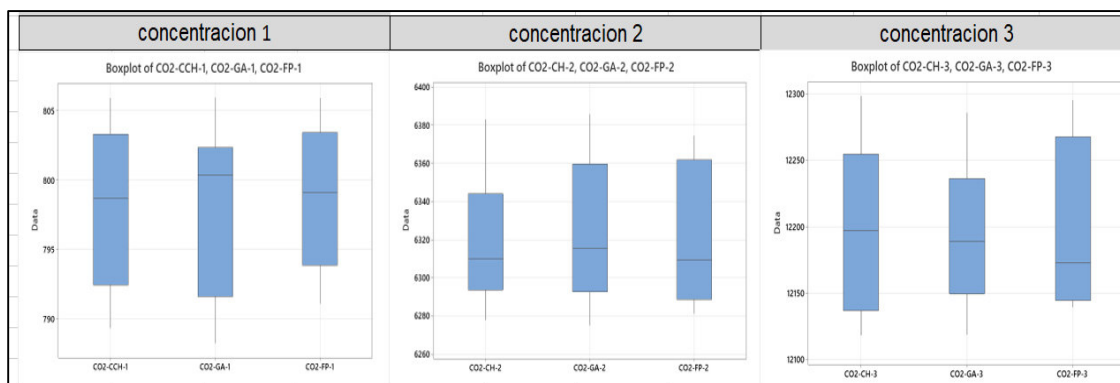
Hidrogeno



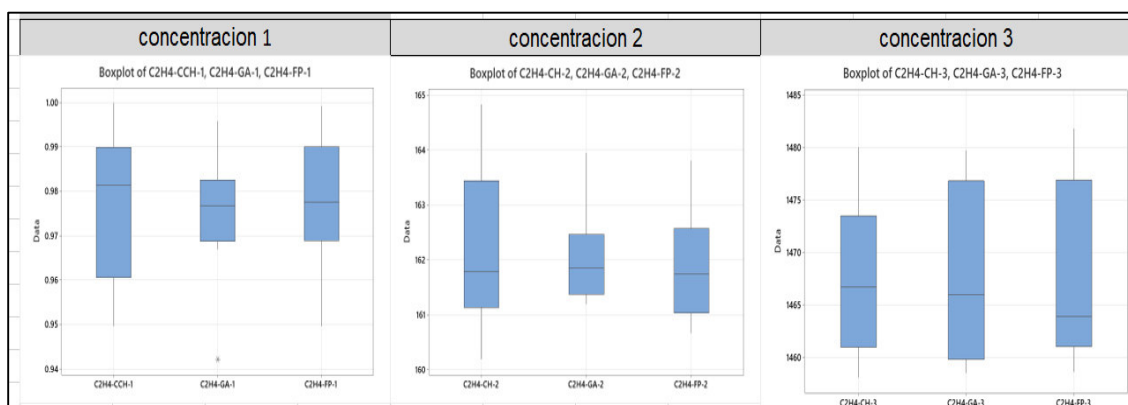
Monóxido de Carbono



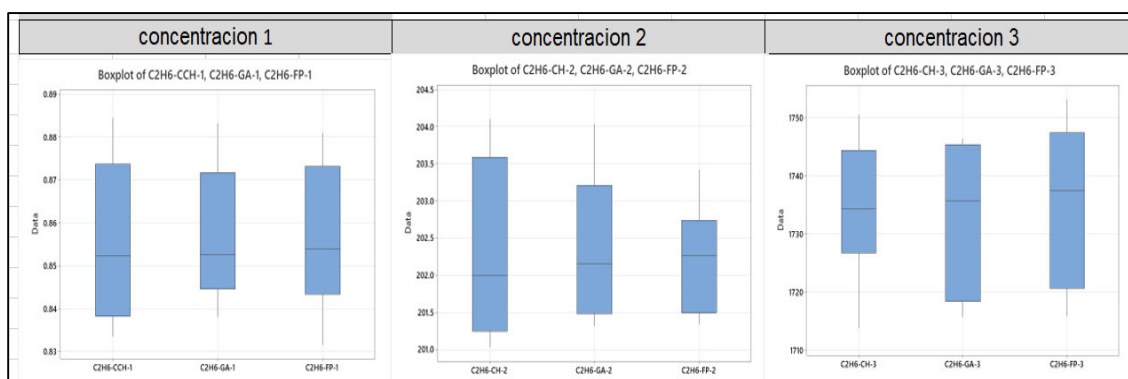
Dióxido de Carbono



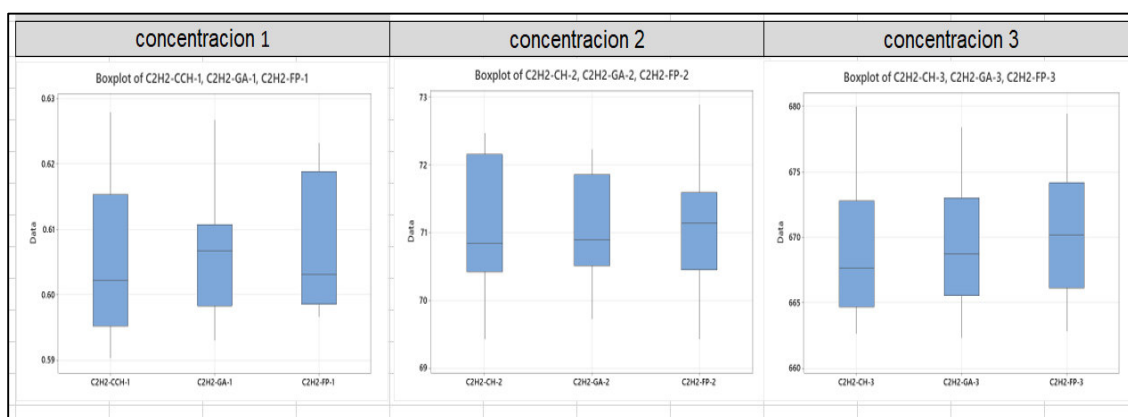
Etileno



Etano



Acetileno



ANEXO 3: Análisis de estimación de la precisión

Hidrogeno – concentración 1

Cálculo RSD HORWITZ Repetibilidad	
RSD EXP Repetibilidad	2.894
RDS HORWITZ (repetibilidad)	3.088

Cálculo RSD HORWITZ Reproducibilidad	
RSD EXP Reproducibilidad	2.941
RDS HORWITZ (Reproducibilidad)	4.609

Hidrogeno – concentración 2

Cálculo RSD HORWITZ Repetibilidad	
RSD EXP Repetibilidad	1.251
RDS HORWITZ (repetibilidad)	1.456

Cálculo RSD HORWITZ Reproducibilidad	
RSD EXP Reproducibilidad	1.269
RDS HORWITZ (Reproducibilidad)	2.174

Hidrogeno – concentración 3

Cálculo RSD HORWITZ Repetibilidad	
RSD EXP Repetibilidad	0.941
RDS HORWITZ (repetibilidad)	1.023

Cálculo RSD HORWITZ Reproducibilidad	
RSD EXP Reproducibilidad	0.951
RDS HORWITZ (Reproducibilidad)	1.526

Monóxido de Carbono – concentración 1

Cálculo RSD HORWITZ Repetibilidad	
RSD EXP Repetibilidad	1.910
RDS HORWITZ (repetibilidad)	2.067

Cálculo RSD HORWITZ Reproducibilidad	
RSD EXP Reproducibilidad	1.930
RDS HORWITZ (Reproducibilidad)	3.085

Monóxido de Carbono – concentración 2

Calculo RSD HORWITZ Repetibilidad	
RSD EXP Repetibilidad	0.715
RDS HORWITZ (repetibilidad)	1.046

Calculo RSD HORWITZ Reproducibilidad	
RSD EXP Reproducibilidad	0.764
RDS HORWITZ (Reproducibilidad)	1.562

Monóxido de Carbono – concentración 3

Cálculo RSD HORWITZ Repetibilidad	
RSD EXP Repetibilidad	0.471
RDS HORWITZ (repetibilidad)	0.797

Cálculo RSD HORWITZ Reproducibilidad	
RSD EXP Reproducibilidad	0.479
RDS HORWITZ (Reproducibilidad)	1.190

Dióxido de Carbono – concentración 1

Calculo RSD HORWITZ Repetibilidad	
RSD EXP Repetibilidad	0.713
RDS HORWITZ (repetibilidad)	0.980

Calculo RSD HORWITZ Reproducibilidad	
RSD EXP Reproducibilidad	0.723
RDS HORWITZ (Reproducibilidad)	1.463

Dióxido de Carbono – concentración 2

Calculo RSD HORWITZ Repetibilidad	
RSD EXP Repetibilidad	0.574
RDS HORWITZ (repetibilidad)	0.718

Calculo RSD HORWITZ Reproducibilidad	
RSD EXP Reproducibilidad	0.583
RDS HORWITZ (Reproducibilidad)	1.071

Dióxido de Carbono – concentración 3

Calculo RSD HORWITZ Repetibilidad	
RSD EXP Repetibilidad	0.490
RDS HORWITZ (repetibilidad)	0.650

Calculo RSD HORWITZ Reproducibilidad	
RSD EXP Reproducibilidad	0.497
RDS HORWITZ (Reproducibilidad)	0.971

Etileno – concentración 3

Calculo RSD HORWITZ Repetibilidad	
RSD EXP Repetibilidad	1.627
RDS HORWITZ (repetibilidad)	2.690

Calculo RSD HORWITZ Reproducibilidad	
RSD EXP Reproducibilidad	1.648
RDS HORWITZ (Reproducibilidad)	4.015

Etileno – concentración 3

Calculo RSD HORWITZ Repetibilidad	
RSD EXP Repetibilidad	0.715
RDS HORWITZ (repetibilidad)	1.246

Calculo RSD HORWITZ Reproducibilidad	
RSD EXP Reproducibilidad	0.718
RDS HORWITZ (Reproducibilidad)	1.860

Etileno – concentración 3

Calculo RSD HORWITZ Repetibilidad	
RSD EXP Repetibilidad	0.561
RDS HORWITZ (repetibilidad)	0.894

Calculo RSD HORWITZ Reproducibilidad	
RSD EXP Reproducibilidad	0.570
RDS HORWITZ (Reproducibilidad)	1.335

Etano – concentración 3

Cálculo RSD HORWITZ Repetibilidad	
RSD EXP Repetibilidad	1.953
RDS HORWITZ (repetibilidad)	2.743

Cálculo RSD HORWITZ Reproducibilidad	
RSD EXP Reproducibilidad	1.985
RDS HORWITZ (Reproducibilidad)	4.094

Etano – concentración 3

Cálculo RSD HORWITZ Repetibilidad	
RSD EXP Repetibilidad	0.464
RDS HORWITZ (repetibilidad)	1.205

Cálculo RSD HORWITZ Reproducibilidad	
RSD EXP Reproducibilidad	0.471
RDS HORWITZ (Reproducibilidad)	1.799

Etano – concentración 3

Cálculo RSD HORWITZ Repetibilidad	
RSD EXP Repetibilidad	0.733
RDS HORWITZ (repetibilidad)	0.872

Cálculo RSD HORWITZ Reproducibilidad	
RSD EXP Reproducibilidad	0.743
RDS HORWITZ (Reproducibilidad)	1.302

Acetileno – concentración 3

Calculo RSD HORWITZ Repetibilidad	
RSD EXP Repetibilidad	1.814
RDS HORWITZ (repetibilidad)	2.890

Calculo RSD HORWITZ Reproducibilidad	
RSD EXP Reproducibilidad	1.843
RDS HORWITZ (Reproducibilidad)	4.313

Acetileno – concentración 3

Calculo RSD HORWITZ Repetibilidad	
RSD EXP Repetibilidad	1.295
RDS HORWITZ (repetibilidad)	1.411

Calculo RSD HORWITZ Reproducibilidad	
RSD EXP Reproducibilidad	1.316
RDS HORWITZ (Reproducibilidad)	2.106

Acetileno – concentración 3

Calculo RSD HORWITZ Repetibilidad	
RSD EXP Repetibilidad	0.792
RDS HORWITZ (repetibilidad)	1.006

Calculo RSD HORWITZ Reproducibilidad	
RSD EXP Reproducibilidad	0.796
RDS HORWITZ (Reproducibilidad)	1.502

ANEXO 4: Veracidad de Ensayos**Concentración de 5ppm**

5PPM	H2	CH4	CO	CO2	C2H4	C2H6	C2H2
CCH	6.80	5.5	7.00	49.00	5.90	5.90	5.90
CCH	6.60	5.5	7.20	48.80	6.10	6.10	6.00
GA	5.80	5.9	6.90	47.00	5.90	6.10	6.10
GA	6.10	5.9	7.10	50.00	6.00	6.00	5.90
FP	6.00	5.7	7.00	50.10	6.10	5.90	6.00
FP	6.20	5.4	7.20	47.90	5.90	6.00	6.00
1HO735	6.00	6.0	7.00	48.00	6.00	6.00	6.00
± ppm	0.90	0.6	0.7	4.8	0.6	0.6	0.6
rango	5.1-6.9	5.4-6.6	7.3-7.7	43.2-52.8	5.4-6.6	5.4-6.6	5.4-6.6

Concentración de 500ppm

500PPM	H2	CH4	CO	CO2	C2H4	C2H6	C2H2
CCH	518.20	518.1	516.50	554.00	521.70	523.60	523.90
CCH	518.90	519.4	517.70	558.00	523.70	521.60	525.40
GA	519.40	521.7	518.20	555.20	521.80	522.20	524.90
GA	519.80	522.0	517.10	552.60	524.00	521.90	526.10
FP	524.50	519.7	517.70	551.10	521.80	520.90	523.70
FP	525.10	522.8	518.40	556.50	522.80	521.40	525.20
1HO808	520.00	521.0	518.00	554.00	522.00	521.00	524.00
± ppm	26.00	26.05	25.9	27.7	495.9- 548.1	26.05	26.2
rango	494-546	494.95- 547.05	492.1- 543.9	526.3- 581.7	101.65- 112.35	494.95- 547.05	497.8- 550.2

ANEXO 5: Certificados de Concentración Estándar de aceite mineral

Concentración de ~5ppm

Syringe S/N :	Lot No. :	Expiry Date :	Prepared by :	QC Approved :
140735	RN563	2023-06-29	RN	

Component	Concentration* (ppm)	Component	Concentration* (ppm)
H ₂ (Hydrogen)	6 ± 15%	C ₂ H ₆ (Ethane)	6 ± 10%
O ₂ (Oxygen)	16300 ± 5%	C ₂ H ₂ (Acetylene)	6 ± 10%
N ₂ (Nitrogen)	57500 ± 5%	C ₃ H ₈ (Propane)	6 ± 10%
CH ₄ (Methane)	6 ± 10%	C ₃ H ₆ (Propylene)	6 ± 10%
CO (Carbon Monoxide)	7 ± 10%	C ₄ H ₁₀ (Butane)	6 ± 10%
CO ₂ (Carbon Dioxide)	48 ± 10%	C ₄ H ₈ (1-Butene)	6 ± 10%
C ₂ H ₄ (Ethylene)	6 ± 10%	C ₄ H ₆ (1,3-Butadiene)	6 ± 10%

(*) Milliliters of gas at 273K and 760 torr per cubic meter of oil.
 Concentrations are certified by the method of preparation and is verified by laboratory analysis using by ASTM D3612 method as well as calibration using NIST traceable weight. ± defined on a 95% confidence interval for true concentration. This standard was unitized according to an in-house procedure and is guaranteed to be homogeneous. There is no minimum sub-sample size required.

Concentración de ~100ppm

Syringe S/N :	Lot No. :	Expiry Date :	Prepared by :	QC Approved :
140781	RN557	2023-06-29	RN	

Component	Concentration* (ppm)	Component	Concentration* (ppm)
H ₂ (Hydrogen)	107 ± 5%	C ₂ H ₆ (Ethane)	107 ± 5%
O ₂ (Oxygen)	15600 ± 5%	C ₂ H ₂ (Acetylene)	107 ± 5%
N ₂ (Nitrogen)	56400 ± 5%	C ₃ H ₈ (Propane)	107 ± 5%
CH ₄ (Methane)	107 ± 5%	C ₃ H ₆ (Propylene)	107 ± 5%
CO (Carbon Monoxide)	107 ± 5%	C ₄ H ₁₀ (Butane)	107 ± 5%
CO ₂ (Carbon Dioxide)	135 ± 5%	C ₄ H ₈ (1-Butene)	107 ± 5%
C ₂ H ₄ (Ethylene)	107 ± 5%	C ₄ H ₆ (1,3-Butadiene)	107 ± 5%

(*) Milliliters of gas at 273K and 760 torr per cubic meter of oil.
 Concentrations are certified by the method of preparation and is verified by laboratory analysis using by ASTM D3612 method as well as calibration using NIST traceable weight. ± defined on a 95% confidence interval for true concentration. This standard was unitized according to an in-house procedure and is guaranteed to be homogeneous. There is no minimum sub-sample size required.

Concentración de ~500ppm




ANAB
ACCREDITED
REFERENCE MATERIAL
PRODUCER



TRUE NORTH
Mineral Oil Standard




Certificate of Concentration

Syringe S/N :	Lot No. :	Expiry Date :	Prepared by :	QC Approved :
1H0808	RN554	2023-06-29	RN	

Component	Concentration* (ppm)	Component	Concentration* (ppm)
H ₂ (Hydrogen)	520 ± 5%	C ₂ H ₆ (Ethane)	521 ± 5%
O ₂ (Oxygen)	15900 ± 5%	C ₂ H ₂ (Acetylene)	524 ± 5%
N ₂ (Nitrogen)	50800 ± 5%	C ₃ H ₈ (Propane)	521 ± 5%
CH ₄ (Methane)	521 ± 5%	C ₃ H ₆ (Propylene)	522 ± 5%
CO (Carbon Monoxide)	518 ± 5%	C ₄ H ₁₀ (Butane)	523 ± 5%
CO ₂ (Carbon Dioxide)	554 ± 5%	C ₄ H ₈ (1-Butene)	528 ± 5%
C ₂ H ₄ (Ethylene)	522 ± 5%	C ₄ H ₆ (1,3-Butadiene)	520 ± 5%

(*) Milliliters of gas at 273K and 760 torr per cubic meter of oil.
 Concentrations are certified by the method of preparation and is verified by laboratory analysis using by ASTM D3612 method as well as calibration using NIST traceable weight. ± defined on a 95% confidence interval for true concentration. This standard was unitized according to an in-house procedure and is guaranteed to be homogeneous. There is no minimum sub-sample size required.

ANEXO 6: Instructivo para Ensayos de Cromatografía de Gases - Hitachi

	CÓDIGO:	I-PG-TR-LA-23-09
	VERSIÓN:	1
	PÁGINAS	8

INSTRUCTIVO PARA ENSAYO DE CROMATOGRAFIA DE GASES

1. Objetivo

Explicar la manera como se realiza el análisis de gases disueltos en aceite aislante eléctrico, utilizando el cromatógrafo de gases con Head Space, según la Norma ASTM D3612 método C vigente.

2. Alcance

Esta instrucción aplica para el personal autorizado del Laboratorio de Aceites.

3. Definiciones

ASTM: American Society for Testing and Materials / Pruebas Americanas para productos en proceso.
Cromatografía:

Es una técnica de separación de compuestos. En cualquier caso, todos estos métodos utilizan una fase estacionaria y una fase móvil. Los componentes de una mezcla son arrastrados a través de una fase estacionaria mediante el flujo de una fase móvil; la separación se basa en las diferencias de las velocidades de migración de los componentes de la mezcla.

Cromatografía de Gases:

Es una técnica cromatográfica en la que la muestra se volatiliza y se inyecta en la cabeza de una columna cromatográfica. La elución se produce por el flujo de una fase móvil de gas inerte. A diferencia de los otros tipos de cromatografía, la fase móvil no interactúa con las moléculas del analito; su única función es la de transportar el analito a través de la columna.

Columnas cromatográficas capilares:

La longitud de estas columnas es variable, de 2 a 60 metros, y están construidas en acero inoxidable, vidrio, sílice fundida o teflón. Debido a su longitud y a la necesidad de ser introducidas en un horno, las columnas suelen enrollarse en una forma helicoidal con longitudes de 10 a 30 cm, dependiendo del tamaño del horno

Detector de Conductividad Térmica -TCD:

Se utiliza en cromatografía de gases y es uno de los primeros utilizados. Tiene una amplia aplicación y su uso se basa en la diferencia de conductividad térmica del gas portador cuando circula también analito.

Detector de Ionización de Flama - FID:

Es un detector utilizado en cromatografía de gases. Es uno de los detectores más usados y versátiles. Básicamente es un quemador de hidrógeno/oxígeno, donde se mezcla el efluente de la columna (gas portador y analito) con hidrógeno. Inmediatamente, este gas mezclado se enciende mediante una chispa eléctrica, produciéndose una llama de alta temperatura. La mayoría de los compuestos orgánicos al someterse a altas temperaturas pirolizan y se producen iones y electrones, que son conductores eléctricos. Este hecho se aprovecha estableciendo una diferencia de potencial de unos centenares de voltios entre la parte inferior del quemador y un electrodo colector situado por encima de la llama. La corriente generada es baja (del orden de los 10-12 A), por lo tanto debe ser amplificada mediante un amplificador de alta impedancia.