

El mundo de DGA – y sus incertidumbres

El análisis de gases disuelto (DGA) es la única forma de detectar diferentes fallas internas en los transformadores. Aunque no es una ciencia exacta, durante décadas se ha usado la evaluación e interpretación basada en estadísticas para evaluar el estado de los transformadores.

El monitoreo DGA en línea está disponible desde finales de los años 90 y actualmente hay en el mercado diversos monitores en línea de gas, cada uno con su propia especificación técnica. Esto hace desafiante la comparación y evaluación de las diferentes opciones para los propietarios de transformadores. Para complicar este campo aún más para las empresas eléctricas, el análisis DGA de laboratorio también juega aquí su papel. Este documento describe diversos factores que deben tenerse en cuenta al examinar las especificaciones técnicas de un monitor y como evaluar su rendimiento, especialmente en comparación con los resultados del DGA de laboratorio. El principal desafío es que no hay ninguna referencia internacional explícita disponible para el DGA; sin embargo, todos los métodos incluyen el cálculo y los parámetros específicos del aceite. Incluso desde la perspectiva del DGA, no todos los aceites minerales son iguales.

Los monitores en línea han demostrado su valor sobre las muestras de aceite en la generación de tendencias de gas y en la detección de fallas de rápida evolución y cambio. Sin embargo, también se necesita una exactitud adecuada porque si el DGA da



resultados inexactos se pueden producir diagnósticos de fallas erróneos, en particular si las tasas de gas están cerca de un límite de la zona de falla. Además, los resultados inexactos podrían justificar que se tomen medidas equivocadas en un transformador si los valores de concentración se acercan a los valores de alarma usados en una empresa eléctrica.

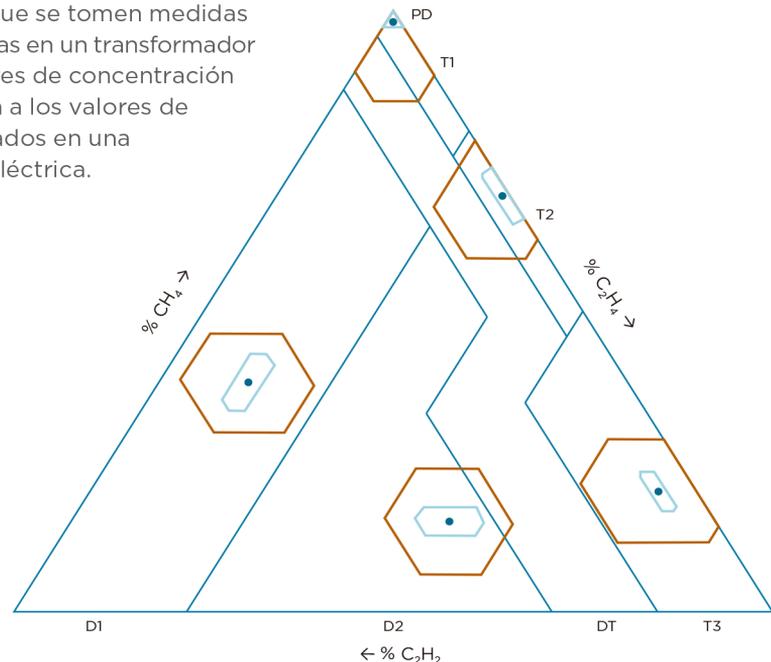


Figura 1 Efecto de la precisión en la incertidumbre del diagnóstico de fallas en los transformadores al usar Triángulos de Duval^[1]. Precisión $\pm 15\%$ en azul y $\pm 30\%$ en rojo, respectivamente.

Exactitud en la medición

Con frecuencia, la calidad de un dispositivo de medición se evalúa con una pregunta sencilla: ¿Qué tan exacta es la medición? Aunque esta pregunta parezca bastante sencilla, la respuesta puede no serlo. Elegir el instrumento de medición más adecuado implica comprender los factores que contribuyen a la incertidumbre en la medición. Esto a su vez proporciona una comprensión de las especificaciones del fabricante.

El desempeño de la medición está definido por dinámicas tales como: el rango de medición, el tiempo de respuesta, la exactitud y la estabilidad, lo que significa tolerancia a las condiciones ambientales hostiles y al envejecimiento. De estos factores, a menudo se considera que la exactitud es la cualidad más importante; y también, una de las más difíciles de especificar.

La relación entre el cambio en el resultado de la medición y el cambio en la cantidad medida se denomina sensibilidad. Lo ideal sería que esta relación sea lineal, pero en la práctica todas las mediciones implican algunas imperfecciones o incertidumbres. La coincidencia del valor medido con el valor real se suele denominar "exactitud", pero también en este caso se trata de un término algo vago. El desafío con el DGA es que ni el valor medido ni el valor real se conocen con precisión, es decir, que ambos tienen su propia incertidumbre. Normalmente, el valor real de un parámetro medido se determina con el DGA de laboratorio, en el que la incertidumbre rara vez se notifica o incluso se define.

La precisión especificada puede incluir o no la repetibilidad, es decir, la capacidad de un instrumento de proporcionar un resultado similar cuando la medición se repite en condiciones constantes. La lectura de un instrumento de medición

suele tener cierta variación aleatoria y el efecto de esta puede reducirse al mínimo utilizando promedios. Por lo general, la repetibilidad por sí sola es una fuente menor de incertidumbre en la medición, pero si la repetibilidad es escasa, debe tenerse en cuenta que esto debilita el diagnóstico de los transformadores basados en el DGA, que depende de las tendencias y los patrones distintivos de la gasificación.

Es probable que la especificación de la precisión no incluya la histéresis, la dependencia de la temperatura, la no linealidad ni la estabilidad a largo plazo, y si la especificación de la precisión no incluye otras incertidumbres, puede dar una impresión errónea del rendimiento real de la medición.

Es importante señalar que la precisión está relacionada siempre con una situación de medición particular, y aquí se incluyen las condiciones, el tiempo transcurrido desde la calibración, las concentraciones de gas y el tipo de aceite. Cuando hablamos de exactitud debemos especificar también las condiciones que cubre. Las especificaciones de la precisión de los monitores DGA en línea solo se indican en el punto de calibración. Sin embargo, rara vez hay información sobre el rendimiento o la precisión en aplicaciones reales, es decir, por ejemplo, lo que un usuario podría esperar en una instalación de transformadores con aceite muy viejo a +40°C, cinco años después de la calibración.

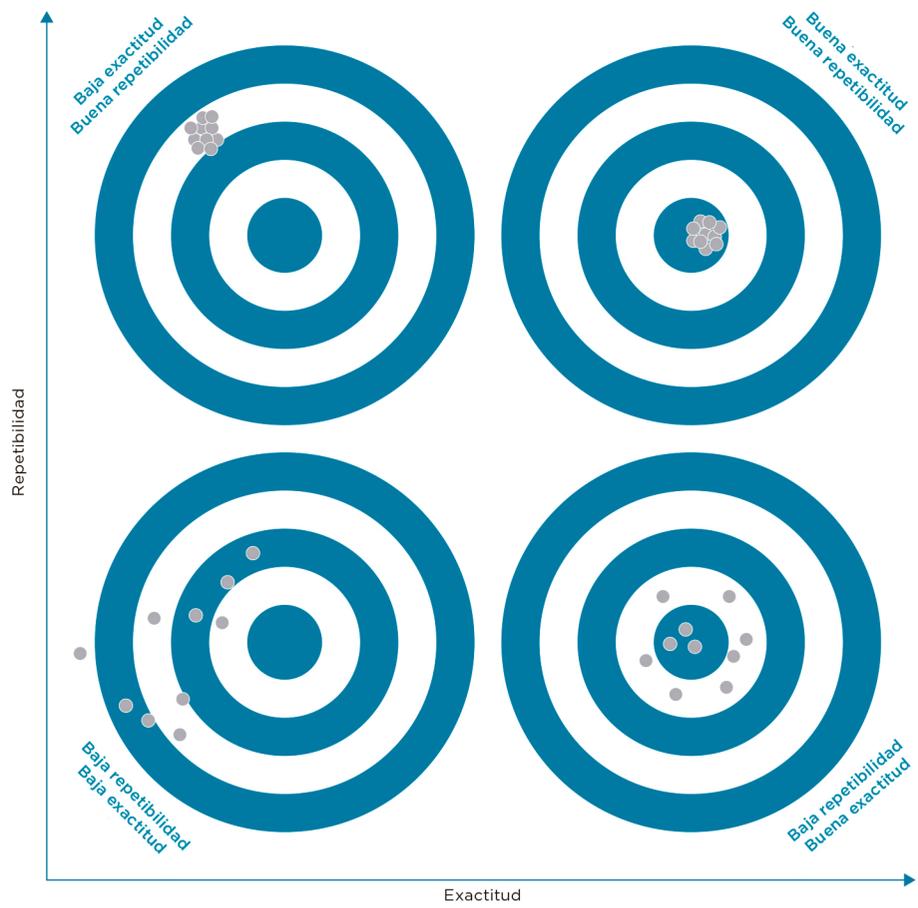


Figura 2 Imagen esquemática que muestra la exactitud y la repetibilidad, también llamada precisión.

Otro parámetro que está relacionado con el rendimiento de la medición es el límite inferior de detección (LDL), es decir, la menor concentración que el instrumento de medición puede distinguir del cero de forma fiable. Nuevamente, "fiable" es un término algo vago que puede determinarse, por ejemplo, como un nivel de confianza del 95%. Hay una relación entre la repetibilidad de la medición y el LDL: el promedio reduce la variación aleatoria de la medición, mejorando la repetibilidad y disminuyendo el LDL. En la práctica, la especificación del LDL podría ser, por ejemplo, el doble de la desviación estándar de las lecturas de la medición en un nivel de gas de 0 ppm. A modo de ejemplo, si el dispositivo de medición indica un valor más alto que este, hay una probabilidad aproximada del 2,5% de que el valor real sea de 0 ppm. Es importante señalar la dificultad de crear muestras de referencia con una concentración de gas tan baja, por ejemplo <1 ppm, por lo que resulta casi imposible medir el LDL en la práctica. Es necesario definirlo teóricamente sobre la base de la repetibilidad.

DGA de laboratorio

Cuando se comparan los resultados de los análisis de los diferentes métodos, hay que tener en cuenta las incertidumbres relacionadas con ambos. Entre las fuentes de incertidumbre más comunes están, por ejemplo, el método y la calidad del muestreo de aceite, el método de extracción de gas, los coeficientes de reparto empleados, las diferencias en los estándares utilizados, etc. También es importante entender que una medición no podrá ser más precisa que la referencia utilizada en la calibración.

El DGA de laboratorio y las incertidumbres relacionadas

El DGA de laboratorio se ve influenciado por muchos factores, que van desde la calidad de la muestra de aceite hasta el equipamiento y el estándar utilizados para el análisis,

por no mencionar el factor humano, que siempre está presente cuando se llevan a cabo procesos manuales. Algunos ejemplos de fuentes de incertidumbre en los análisis de laboratorio son:

- Preparación de la muestra y repetibilidad de la señal de GC
- Incertidumbre en la calibración y en la preparación de la muestra de calibración
- Incertidumbre del coeficiente de reparto (K)
- Incertidumbre del volumen del vial
- Incertidumbre de la masa de la muestra
- Incertidumbre de la densidad del aceite

Muestreo de aceite

La principal fuente de incertidumbre suele estar relacionada con la calidad de la muestra: el modo de obtención de la misma, las condiciones del equipamiento utilizado, la forma de almacenamiento de la muestra y el modo de transporte afectarán a la calidad. Una cantidad importante de gases como el H₂ y CO pueden escapar del aceite, y la muestra puede verse contaminada por la humedad y los gases del aire ambiente como el oxígeno, provocando un análisis de laboratorio incorrecto. Por este motivo, es imprescindible que el aceite no entre en contacto con el aire en ningún momento durante la recolección de la muestra, y que el recipiente de la muestra se llene completamente utilizando el procedimiento de muestreo adecuado. En este sentido, las mejores opciones son las jeringas de alta calidad y las botellas de aluminio, ya que pueden tolerar incluso variaciones de presión durante el transporte aéreo de carga.

Trabajo de análisis de laboratorio

Es necesario, también, tener en cuenta la incertidumbre del trabajo de laboratorio cuando se evalúan los resultados del DGA, o cuando se comparan los resultados con los datos de un monitor en línea. En un

laboratorio, el primer paso es transferir una pequeña cantidad de aceite del recipiente de muestras al vial de un cromatógrafo de gases (GC). Esta parte del proceso involucra el factor humano, ya que en muchos laboratorios se hace de forma total o parcialmente manual. Inevitablemente, cualquier error humano que resulte en la entrada de aire u otros contaminantes en la muestra de aceite tiene consecuencias visibles en los resultados. La reproducibilidad del laboratorio, es decir, la capacidad de repetir los resultados del DGA con muestras idénticas día tras día, independientemente de la persona que realice el análisis, es un parámetro excelente para determinar la calidad de los procesos del laboratorio.

La norma IEC 60567 recomienda que cada laboratorio determine su propia exactitud^[2], es decir, su incertidumbre. Esta información debe estar disponible para los usuarios de los servicios del laboratorio. Los laboratorios acreditados deberán contar con esto como requisito para su acreditación. Si no se cuenta con datos oficiales sobre la incertidumbre, se puede preguntar si el laboratorio ha participado en algún ensayo internacional interlaboratorio ("round robin test") (RRT), y si sus resultados están disponibles. Esto brinda una buena indicación aproximada del nivel de incertidumbre previsto.

El estándar IEC 60567 da ejemplos de las precisiones que se obtienen al utilizar su procedimiento experimental general. Estos valores están definidos a partir de los ensayos interlaboratorio de IEC y CIGRE realizados en dos normas de gas en aceite y en los que participaron 44 laboratorios de todo el mundo. La incertidumbre del DGA de laboratorio depende del método de extracción de gas utilizado, del tipo de gas y del nivel de concentración del mismo. El método "headspace" (HS) tiene una mayor incertidumbre que los métodos de vacío o de barrido. Si no hay otros

Tabla 1 Ejemplos de niveles de exactitud para varios métodos de extracción según IEC 60567 ed 4-2011^[2].

PROCEDIMIENTO DE EXTRACCIÓN	Exactitud en porcentaje del valor nominal	
	CONCENTRACIÓN MEDIA	CONCENTRACIÓN BAJA
TOEPLER	13	35
DESGASIFICACIÓN PARCIAL	13	30
BARRIDO	18	23
HEADSPACE	18	37
TOEPLER SIN MERCURIO	15 ¹	14 ¹
DESGASIFICACIÓN PARCIAL SIN MERCURIO	11 ¹	
PRUEBA DE AGITACIÓN	15	44

¹⁾ Basado en un número limitado de análisis.

Tabla 2 Niveles de precisión de un laboratorio acreditado por ISO 17025 usando el método HS vs IEC 60567:2011 en diferentes niveles de concentración de gas.

	EXACTITUD (%) EN CONCENTRACIONES BAJAS	EXACTITUD (%) EN CONCENTRACIONES MEDIAS	EXACTITUD (%) EN CONCENTRACIONES ALTAS
H ₂	15.6	9.5	5.9
CH ₄	13.9	8.3	6.7
C ₂ H ₄	26.7	10.6	3.8
C ₂ H ₆	26.2	22.3	6.3
C ₂ H ₂	33.6	18.8	8.3
CO	26.5	14.1	8.9
CO ₂	10.7	11.3	11
PROMEDIO DE LAB.	21.9		10.4
IEC 60567:2011 PARA HS	37		18

Tabla 3 La precisión de laboratorios que utilizan los métodos de extracción de gas A (desgasificación parcial), B (barrido) y C (HS). La especificación IEC se muestra en la fila inferior^[7].

MÉTODO	EXACTITUD PROMEDIO DE LOS LABORATORIOS (%)		NÚMERO DE LABORATORIOS INEXACTOS, % DE PARTICIPANTES	
	> 100 ppm	< 8 ppm	> 100 ppm	< 8 ppm
A	12	18	17	0
B	19	65	60	63
C	28	51	75	42
ESPECIFICACIÓN IEC	15	30		

datos de incertidumbre, puede utilizar un promedio de $\pm 15\%$ al evaluar los resultados del DGA de laboratorio y al compararlos con un monitor en línea. En un laboratorio específico el número puede ser significativamente más alto, pero también más bajo en un análisis de alta calidad.

Variación por el método estándar en uso

Los dos estándares más utilizados en el DGA de laboratorio en todo el mundo son IEC 60567 y ASTM D3612, ambos tienen subsecciones relativas a métodos específicos de extracción de gas: vacío, barrido (stripping) o HS. IEC, CIGRE, ASTM y el Institute for Inter-Laboratory Studies de los Países Bajos han realizado una serie de RRTs (Round Robin Tests) para evaluar la variación entre los análisis de los diferentes métodos de extracción estándar. Las diferencias entre los métodos de laboratorio utilizados se presentan en la Tabla 3. Los resultados muestran claramente que para los laboratorios es más difícil obtener resultados precisos con el método HS.

En la tabla, "precisión media" indica el promedio de las precisiones para cada gas en las muestras de aceite medidas, mientras que "número de laboratorios inexactos" significa el porcentaje de laboratorios que participaron de los RRT y que no cumplieron con los requisitos IEC en materia de precisión (por ejemplo, $\pm 15\%$ por encima de 100 ppm).

Es importante señalar que los estándares ASTM y IEC calculan el volumen de gas a diferentes temperaturas, 0°C y 20°C respectivamente^[2, 3]. Esta circunstancia por sí sola explica el 8% de diferencia en las concentraciones establecidas para muestras idénticas, lo que se debe tener en cuenta al comparar los resultados del DGA de un monitor y de un laboratorio. Todos los valores de ppm medidos deben convertirse primero a la misma condición, ya sea 20°C (IEC) o 0°C (ASTM), según se prefiera.

Coefficientes de reparto y extracción de gas

En el análisis de gas disuelto, sea en línea o en laboratorio, hay que extraer los gases del aceite para realizar la medición. Cuanto más completa sea la extracción, menor será la incertidumbre relacionada con los cálculos de las concentraciones. La eficiencia de la extracción depende del método utilizado. Por ejemplo, el método Toepler tiene una eficiencia de casi el 100%, mientras que en los peores casos el HS puede alcanzar menos del 30% de eficiencia.

En el método HS, la proporción del gas extraído es igual a

$$\frac{1}{1+K \frac{V_{OIL}}{V_{GAS}}}$$

en donde V_{OIL} es el volumen del aceite y V_{GAS} es el volumen de la fase de gas en el vial del Cromatografo de gas y K es el coeficiente de reparto específico del gas.

Por lo general, en el método HS estándar, la relación de volumen en un vial de GC es de 10:12.

La relacion en concentraciones (C) entre la fase aceite y la fase gas dependen de la relacion de volumen gas-en-aceite en el recipiente de extraccion.

$$C_{OIL} = C_{GAS} \left(K + \frac{V_{GAS}}{V_{OIL}} \right)$$

en donde V_{OIL} es el volumen del aceite y V_{GAS} es el volumen de la fase de gas en el vial del GC, y K es el coeficiente de reparto específico del gas.

Los gases varían en su tendencia a permanecer disueltos en el aceite: algunos prefieren quedarse allí mientras otros, si es posible, "escaparán" de inmediato. Esta tendencia es la solubilidad de los gases en el aceite y se define por los denominados coeficientes de reparto (K), que varían, por ejemplo, según el gas, el tipo de aceite, la calidad del mismo y la temperatura. La

variación de K puede ser significativa incluso entre diferentes tipos de aceite mineral. Como tan solo se puede extraer del aceite y medir una parte del gas, los coeficientes son necesarios para calcular la concentración inicial del gas en el aceite. Cuanto menos gas se extraiga, al igual que en el HS, más resultados dependen de los cálculos y, por lo tanto, de los coeficientes.

La mayor parte de los laboratorios de análisis y de los dispositivos de DGA en línea utilizan el método HS o un derivado del mismo con membrana o tubo, porque es menos complicado y menos costoso. Sin embargo, muy pocos tienen en cuenta las diferencias en los coeficientes de reparto entre los aceites de fuentes diferentes y esto puede provocar errores importantes.

Cromatografía de gases

El GC es un método tradicional para, en una mezcla de gases, identificarlos y medir cuánto hay de cada uno. Desde un vial de muestra, se inyecta una muestra de gas en una delgada columna del GC y se empuja a través de un gas portador, como el helio (He). La columna separa los diferentes componentes del gas según el tamaño de sus moléculas, y debido a que el tiempo de retención es un componente específico, las moléculas pequeñas salen primero y las más grandes después. Después de la columna,

los gases van a los detectores. La identificación de los gases se basa en sus tiempos de retención a lo largo de la columna, y las cantidades individuales se determinan por la fuerza de la señal del detector en función del tiempo (área del pico).

El GC no es un método de análisis fundamental en el cual los tiempos de retención o la intensidad de la señal son universales, es necesaria una calibración específica de cada equipo. Hay dos métodos diferentes que se comúnmente se usan para calibrar el GC, las mezclas trazables del gas de referencia y los estándares de gas en aceite con concentraciones de gas conocidas. La calibración define un tiempo de retención único para cada componente del gas y las áreas de pico de la señal del detector son proporcionales a las concentraciones de gas de la referencia de calibración.

El desafío con los estándares de gas en aceite es que utilizan un aceite específico y el problema sigue siendo su representitividad en lo que respecta a los valores de solubilidad de gas (coeficientes de reparto) de las muestras de aceite de varios transformadores, especialmente cuando se utiliza el método de extracción HS. En la calibración, los gases de referencia tienen el mismo desafío de que los resultados de los análisis dependen de los diferentes coeficientes de reparto de los gases.

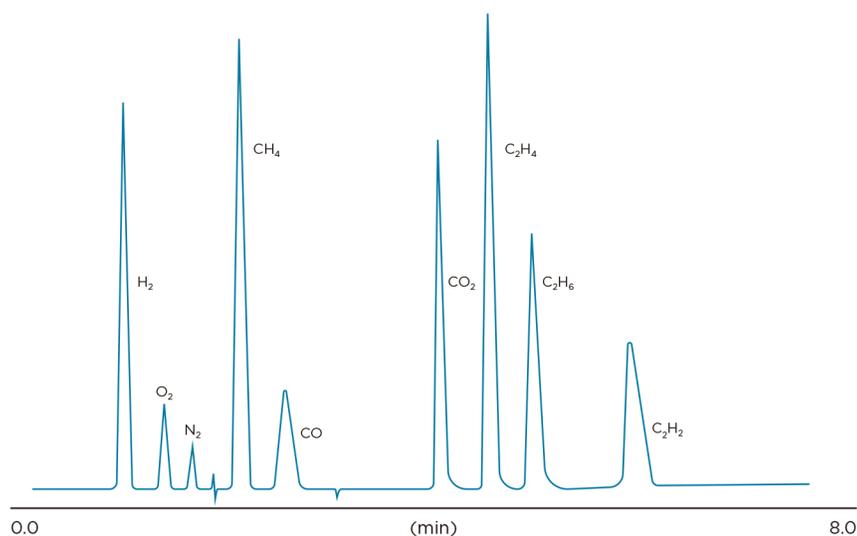


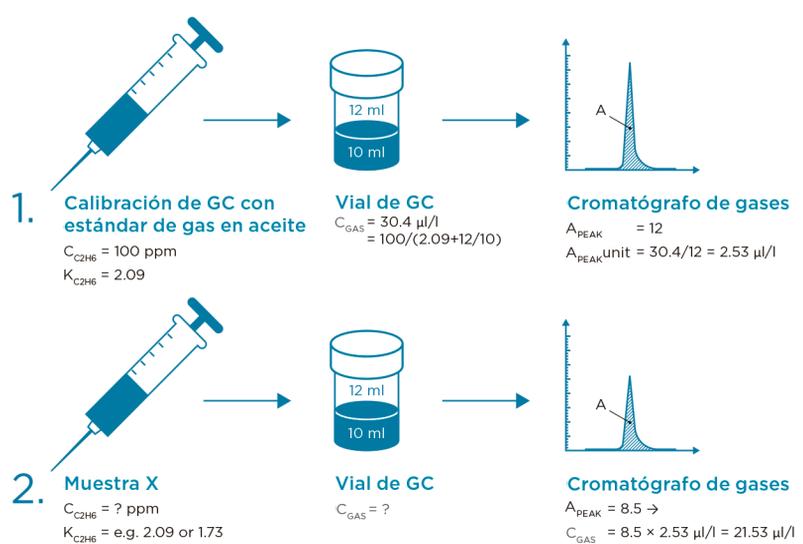
Figura 3 Ejemplo de un cromatograma GC.

A la derecha se ve un ejemplo del efecto de utilizar el estándar de gas en aceite para calibrar el GC sin tener en cuenta y sin definir los coeficientes de reparto específicos de los aceites. ¿Cuáles serían los resultados del DGA para el etano, si se emplearan coeficientes de reparto diferentes? ¿Cuál de los dos resultados DGA es correcto, o acaso ninguno de ellos es preciso? Este es solo un ejemplo de cómo pueden obtenerse lecturas variables de diferentes análisis. Los coeficientes de reparto utilizados en este ejemplo son de IEC60567 3rd ed., 2005^[4].

Para que un GC de laboratorio funcione de manera confiable se necesitan altos niveles de experiencia, para que así el operador pueda mantener una calibración adecuada y garantizar un alto rendimiento general del equipo. Además, con el paso del tiempo cambia la superficie interna de la columna debido, por ejemplo, a la contaminación con moléculas de hidrocarburos más grandes. Es posible controlar el estado de una columna realizando una inspección de su capacidad para separar las moléculas pequeñas y comprobando si los picos comienzan a tener colas extra. Esto podría provocar una interpretación inexacta al determinar las concentraciones. Además, es posible que el detector se desvíe con el tiempo, incluso a corto plazo, si se ejecuta un gran número de muestras una tras otra. Esto puede detectarse teniendo muestras de referencia dentro de la serie de análisis real.

Monitores de DGA en línea

Las experiencias de uso del DGA en línea en todo el mundo demuestran de forma creciente que todos los tipos de fallas internas de los transformadores, que podrían pasar desapercibidas entre los intervalos regulares de toma de muestras de aceite, se pueden identificar en una etapa temprana.



Usando el mismo K que el estándar de aceite (2.09) $\rightarrow C_{OIL1} = 70,8 \text{ ppm}$
 Usando $K = 1,73 \rightarrow C_{OIL2} = 63,1 \text{ ppm}$

¡10% de diferencia! ¿Cuál es la respuesta correcta? ¿O ninguna de las dos lo es?

Figura 4 Ejemplo de utilización del estándar de gas en aceite para la calibración (1). Efecto del coeficiente de reparto en el análisis de la muestra (2).

Si se desea obtener información útil para evaluar el estado de un transformador, el análisis de laboratorio de muestras de aceite que se toman con poca frecuencia debe ser absolutamente exacto. Con los monitores en línea hay más flexibilidad y se pueden usar, además, los promedios y la corrección de compensación para garantizar datos confiables para los diagnósticos. Una vez más, disponer de datos sin promedios permite un rápido tiempo de respuesta para diagnosticar una falla de rápida evolución. Es más confiable realizar el seguimiento de la tasa de cambio de los gases con el monitoreo en línea que con las muestras de laboratorio^[5].

Especificación de la hoja de datos del monitor

En la mayor parte de los monitores se especifica su precisión en el punto de calibración con respecto a los gases de referencia trazables, aunque algunos utilizan como referencia el estándar de gas en

aceite. Un monitor de DGA debe estar siempre acompañado de un certificado de calibración que muestre la diferencia entre los resultados observados con el monitor y una lectura de referencia en los rangos deseados. Además, debe especificar el método de referencia utilizado y si la calibración es trazable a referencias internacionales o no.

Más allá del tipo de calibración, de los estándares de gases puros o de gas en aceite, ambos métodos dependen del tipo y de la antigüedad del aceite a través de los coeficientes de reparto, especialmente si se utiliza el método HS, con o sin tubos o membranas, para la extracción de gas. Esto significa que las especificaciones de exactitud indicadas no son aplicables como tales para un transformador real en funcionamiento, porque, probablemente, el aceite de un transformador y sus coeficientes de reparto no son los mismos que los utilizados para la calibración del monitor.

Es importante tener en cuenta todo esto al escribir una especificación de compra para los monitores DGA en línea. Vale la pena dedicar algo de tiempo a definir los requisitos y necesidades reales de la empresa eléctrica. Que los números sean más pequeños en el papel no quiere decir que ese monitor de transformador sea la mejor opción, ni tampoco la más útil. Sobre todo al comprar monitores en línea para una flota mayor de transformadores, debería tener la posibilidad de probar en condiciones reales los dispositivos que se están evaluando. La mejor manera de tener una imagen real del rendimiento del monitor en funcionamiento es probarlo con un transformador activo durante un período largo, por ejemplo seis meses. Esto también brindaría una primera indicación de la estabilidad de la medición. Se deberían tomar, al menos, de tres a cinco muestras

de aceite al mismo tiempo, a ser posible para dos laboratorios independientes que puedan suministrar los valores de incertidumbre para sus propios procesos. Las muestras deberían tomarse durante todo el período de prueba, por ejemplo, una vez al mes.

Rangos de medición

Los monitores comerciales en línea tienen diversas especificaciones para sus rangos de medición. Se puede evaluar si son necesarios o no los rangos más amplios tomando en consideración, por ejemplo, las concentraciones probables de los gases y los límites explosivos de los gases inflamables. Además, es una cuestión de seguridad si los monitores pueden realmente probarse con concentraciones extremadamente altas de gases explosivos. Por ejemplo, si se analiza una concentración de H₂

de 20 000 ppm en aceite, se debe utilizar un cilindro de gas con 36% de hidrógeno que está muy por encima de su límite inferior de explosividad (LEL 4%). La situación se hace aún más exigente si hay que probar mezclas de gases con un nivel extremadamente alto de gases explosivos. Tales instalaciones necesitarían que se adoptaran medidas de seguridad adicionales, por ejemplo, disponer de equipos con aprobación ATEX en la preparación del gas en aceite.

Los valores de percentil 90 de varias fuentes muestran valores relativamente bajos en comparación con los rangos de medición especificados. Sin embargo, se han informado, en algunos casos, concentraciones extremadamente altas de metano, etano y etileno en el caso de una falla T3 en aceite^[6]. Esto es típico en transformadores con un pequeño volumen de aceite.

Tabla 4 Valores típicos de percentil 90 encontrados en transformadores que funcionan normalmente^[6, 7, 8].

FUENTE	NÚMERO DE DGA	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	CO	CO ₂
CIGRE TB771	>300 000	118	85	111	56	5	700	6,300
IEEE C57.104*	>800 000	40-100	20-110	15-150	25-90	2	500-900	3,500-9,000
IEC 60599	N/A	50-150	30-130	20-90	60-280	2-20	400-600	3,800-14,000

*Datos divididos por la antigüedad del transformador y la relación O₂/N₂

Tabla 5 Ejemplos de concentraciones de gas en aceite y la concentración necesaria en fase gaseosa para preparar un estándar de gas en aceite. También se presenta el límite inferior de explosividad de los gases.

GAS	CONCENTRACIÓN DE GAS EN ACEITE, PPM	CONCENTRACIÓN DE GAS EN GAS, PPM (K A +70°C, IEC 60567)	LEL PPM (EN AIRE)
METANO	20,000	45,455	50,000
ETANO	20,000	9,569	30,000
ETILENO	20,000	13,605	27,000
ACETILENO	20,000	21,505	25,000
MONÓXIDO DE CARBONO	20,000	166,667	125,000
HIDRÓGENO	20,000	270,270	40,000

Comparación del monitor en línea y el DGA de laboratorio

Al evaluar un monitor en línea comparándolo con referencias del laboratorio, se debe tener en cuenta la calidad de las muestras y la imprecisión de los procedimientos de laboratorio. Además, es importante recordar que cada método de análisis, ya sea de laboratorio o un monitor en línea, tiene sus propias incertidumbres asociadas. Deben tenerse en cuenta al comparar los resultados y hacer conclusiones sobre el rendimiento del monitor.

Como conclusión, debido a las incertidumbres que están vinculadas al análisis de gases disueltos, ya sea en línea o fuera de línea, debe esperarse que haya algunas diferencias en los resultados, incluso si la muestra y el método de muestreo fueran ideales^[1]. Es

posible que haya una desviación significativa si los métodos usados siguen estándares diferentes. Los factores que afectan a las incertidumbres incluyen:

- Métodos de calibración
- Métodos de extracción de gases
- Coeficientes de reparto de los gases
- Calidad de la muestra de aceite
- Factores humanos
- Estándar de referencia utilizado

Lamentablemente, no hay ningún estándar que ayude a evaluar el rendimiento de los monitores en línea en el campo. Sin embargo, el grupo de trabajo D1/A.2.47 de CIGRE ha publicado un procedimiento detallado que describe el modo en que podrían ejecutarse estas pruebas: *Procedimiento para evaluar la precisión de los resultados de los monitores de gas y de laboratorio*

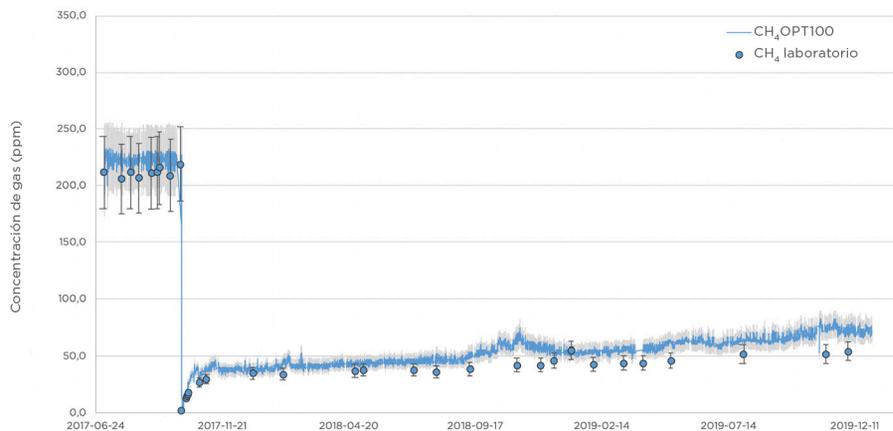


Figura 5 metano (CH_4) datos de 2,5 años del monitor OPT100 de Vaisala y referencias de laboratorio. Especificación del monitor 10% en gris y 15% de incertidumbre para el laboratorio (promedio^[2]).

en el apéndice F del folleto técnico 783, *Sistemas de monitoreo de DGA*^[1]. El procedimiento también incluye una evaluación del rendimiento del laboratorio. Quizás no sea una descripción ideal de la prueba, pero definitivamente es el criterio de evaluación in situ más completo para los monitores en línea publicado por una organización independiente.

A continuación se presenta otro ejemplo de cómo evaluar un monitor. En lugar de examinar las lecturas en un solo punto, los datos de monitoreo se evalúan durante un largo período. En este caso, hay solo un gas, el metano, como ejemplo. Los datos del monitor OPT100 DGA de Vaisala se representan a lo largo de 2,5 años con una especificación de precisión de $\pm 10\%$. Dado que no se conocía la incertidumbre del laboratorio, se utilizó $\pm 15\%$, según los ejemplos de precisión de laboratorio promedio publicados en IEC 60567^[2]. Para comparar un análisis de laboratorio con un DGA en línea, es más importante comparar las tendencias que las mediciones reales, considerando al mismo tiempo un posible sesgo entre ambas. Si las tendencias son similares y las áreas con incertidumbre se superponen, se puede concluir que los dos métodos diferentes concuerdan.

Referencias

- 1 CIGRE Folleto técnico 783
- 2 IEC 60567 4 ed., 2011
- 3 ASTM D3612
- 4 IEC 60567 3 ed., 2005
- 5 CIGRE Folleto técnico 409
- 6 CIGRE Folleto técnico 771
- 7 IEEE C57.104
- 8 IEC 60599 3 ed., 2015



3-3433818



Av. Beni, C/ Mururé, 2055.
Santa Cruz, Bolivia.

