

Boletín 119

ACEITE DIELECTRICO PARA TRANSFORMADORES TRIANGULO DE DUVAL

Boletín técnico N°119
PARTE 3
Ing. Gregor Rojas

ACEITE DIELECTRICO PARA TRANSFORMADORES, TRIANGULO DE DUVAL

PARTE 3

Por:

Ing. Gregor Rojas
GERENTE NACIONAL
MERCADEO Y VENTAS
División materiales eléctricos

1. General.

En este boletín vamos a sumergirnos en el triángulo de Duval, el cual es uno de los métodos más conocidos para interpretar los resultados del análisis de gases disueltos (AGD). Este método nos permite categorizar las fallas de los transformadores según las cantidades relativas de metano, acetileno y etileno.

Para tener más base teórica para adentrarnos en el triángulo de Duval es recomendable ver primero los boletines técnicos 117 y 118 que tratan desde lo conceptual hasta el almacenajes y pruebas sobre los aceites dieléctricos.

La clasificación se puede realizar de forma gráfica, imprimiendo en papel el siguiente cuadro.

Luego, con una regla, dibuja una línea para la cantidad relativa de cada uno de los tres gases relevantes. Las tres líneas deben coincidir en un punto.

En los transformadores de potencia y distribución, el aceite dieléctrico cumple una función esencial como medio de aislamiento y disipación de calor. Su desempeño influye directamente en la vida útil del transformador, la estabilidad dieléctrica del sistema y la resistencia frente a fallas eléctricas o térmicas.

El aceite no solo actúa como aislante eléctrico entre los componentes internos (bobinados, núcleo, conexiones), sino que además absorbe y transporta el calor generado, garantizando que el transformador opere dentro de los rangos térmicos especificados.

2. El Triángulo de Duval.

Lo constituye una herramienta diagnóstica altamente especializada en el ámbito del mantenimiento predictivo de transformadores de potencia, fundamentada en el Análisis de Gases Disueltos (Dissolved Gas Analysis, DGA), y fue desarrollado por el ingeniero Michel Duval en los laboratorios de Hydro-Québec, una de las principales compañías eléctricas de Canadá, reconocida por su liderazgo técnico en gestión de activos eléctricos.

Esta metodología fue concebida para abordar con mayor precisión los desafíos asociados con la detección temprana de fallas internas en transformadores, cuyo sistema aislante compuesto por aceite dieléctrico y papel impregnado es susceptible a procesos de degradación térmica y eléctrica bajo condiciones operativas exigentes.

El Duval Triangle se erige como una herramienta de diagnóstico empírico de primera línea, basada en el comportamiento composicional de tres gases hidrocarbonados de especial interés:

- **Metano (CH₄):** típico de sobrecalentamientos en materiales celulósicos o arcos de baja intensidad;
- **Acetileno (C₂H₂):** marcador inequívoco de descargas eléctricas de alta energía (arcos dieléctricos);
- **Etileno (C₂H₄):** asociado con sobrecalentamientos intensos en aceite o en materiales metálicos.

El principio operativo del triángulo consiste en la normalización porcentual de estos tres gases

respecto de su suma total (excluyendo los demás componentes del cromatograma), permitiendo así ubicar un punto diagnóstico dentro de un triángulo equilátero dividido en zonas predefinidas empíricamente, cada una representativa de un tipo específico de modo de falla dieléctrico.

Esta herramienta se diferencia de otros métodos convencionales por su capacidad para correlacionar patrones de generación de gases con mecanismos físicos subyacentes, tales como:

- **descargas parciales intermitentes** (corona, tracking superficial),
- **descargas disruptivas o arcos eléctricos sostenidos**,
- **sobrecalentamientos localizados** por fallas en contactos, conexiones flojas o cortocircuitos incipientes.

Además, su uso no se limita a transformadores de potencia, sino que ha sido extendido con variantes adaptadas a conmutadores bajo carga (OLTCs), reactores, y transformadores de distribución encapsulados, entre otros activos dieléctricos.

Por su base científica, su fácil aplicabilidad en campo y su compatibilidad con normas internacionales como IEC 60599 e IEEE C57.104, el Triángulo de Duval se ha convertido en un estándar de facto en el diagnóstico avanzado de equipos aislados en aceite, siendo integrado en software de monitoreo continuo y plataformas SCADA, y es considerado una herramienta crítica dentro de estrategias de Asset Management orientado a riesgo (Condition-Based Maintenance, CBM).

3. Zonas de Diagnóstico del Triángulo de Duval Tipo 1

Cada zona representa un tipo específico de defecto dieléctrico, caracterizado por una firma de gases (CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4) determinada.

El posicionamiento del punto de diagnóstico en el triángulo depende de las proporciones relativas de estos gases (% de cada uno respecto a la suma de los tres).

3.1 PD Descargas Parciales

- **Ubicación:** Zona inferior izquierda del triángulo.
- **Firma típica:** Alta proporción de CH_4 , baja de C_2H_2 y C_2H_4 .
- **Causa:** Ionización de vacío o cavidades dentro del papel aislante o aceite.
- **Consecuencias:** Daños progresivos, generación de agua y productos polares. Riesgo a largo plazo.

3.2 D1 Descargas de Baja Energía

- **Ubicación:** Central inferior del triángulo.
- **Firma típica:** Presencia significativa de C_2H_2 , pero con CH_4 dominante.
- **Causa:** Arqueo intermitente en contactos flojos, conexiones de terminales.
- **Consecuencias:** Generación de carbón localizado, aceleración del envejecimiento.

3.3 D2 Descargas de Alta Energía

- **Ubicación:** Zona superior del triángulo.
- **Firma típica:** Elevadas concentraciones de C_2H_2 (>50%), acompañadas de CH_4 y algo de C_2H_4 .
- **Causa:** Arcos sostenidos, ruptura dieléctrica total.
- **Consecuencias:** Daño severo, carbonización masiva, riesgo de explosión. Indicador de falla crítica.

3.4 T1 Sobrecalentamiento Bajo temp < 300°C

- **Ubicación:** Zona inferior derecha del triángulo.
- **Firma típica:** Predominio de CH_4 y C_2H_4 con bajo C_2H_2 .
- **Causa:** Calentamiento por circulación de corriente en conexiones, pérdidas por resistencia.
- **Consecuencias:** Descomposición lenta de celulosa, aumento de acidez, disminución de rigidez dieléctrica.

3.5 T2 Sobre calentamiento Medio temp entre 300–700°C

- **Ubicación:** Centro derecha del triángulo.
- **Firma típica:** Alta concentración de C_2H_4 , presencia moderada de CH_4 , poco o nada de C_2H_2 .
- **Causa:** Fallos en núcleos magnéticos, puntos calientes en bobinas o núcleo.
- **Consecuencias:** Fisuración del aceite, formación de lodos, inicio de carbonización.

3.6 T3 Sobre calentamiento Severo >700°C

- **Ubicación:** Parte superior derecha del triángulo.
- **Firma típica:** Elevado C_2H_4 y C_2H_2 , disminución relativa de CH_4 .
- **Causa:** Arco térmico en aceite, contactos oxidados, cortocircuito interno severo.
- **Consecuencias:** Degradación violenta del sistema aislante, fallo catastrófico inminente.

3.7 DT Combinación de falla eléctricas y térmicas

- **Ubicación:** Zona central del triángulo (intersección D1–D2–T2).
- **Firma típica:** Mezcla balanceada de los tres gases.
- **Causa:** Falla compuesta (por ejemplo, calentamiento con arqueo).
- **Consecuencias:** Alta complejidad en el diagnóstico. Indica múltiples mecanismos activos.

4 Aplicación Práctica y Normativa

- El análisis se basa en el Anexo A de la norma IEC 60599, que define los límites de cada zona.
- Este enfoque es cuantitativo y gráfico, lo que lo hace altamente efectivo para el monitoreo continuo mediante sistemas SCADA y sensores en línea.
- El uso del triángulo puede combinarse con otros métodos como el análisis de furfuraldehído y la medición de contenido de humedad, para complementar el diagnóstico integral del sistema aislante.

5 Ventajas del Triángulo de Duval en el análisis de gases disueltos (DGA)

5.1 Robustez frente a errores de cuantificación

El Triángulo de Duval no requiere la medición exacta de las concentraciones absolutas de gases disueltos, sino que se basa en las proporciones relativas de tres gases clave: acetileno (C_2H_2), etileno (C_2H_4) y metano (CH_4). Esto lo hace menos sensible a errores de muestreo o calibración, lo que aumenta la fiabilidad del diagnóstico, especialmente en entornos con recursos limitados o datos incompletos.

5.2 Clasificación sistemática y visual de fallas

Este método permite una identificación rápida y estandarizada del tipo de falla incipiente (como descargas parciales, arcos eléctricos o sobrecalentamiento) mediante su representación en un diagrama triangular. La visualización gráfica facilita la interpretación técnica inmediata, incluso por personal no experto, y permite la comparación entre muestras históricas.

enfoque cuantitativo, el Triángulo de Duval se adapta fácilmente a sistemas de automatización y monitoreo continuo. Su uso permite integrar el diagnóstico en estrategias de mantenimiento predictivo o basado en condición, optimizando la planificación de intervenciones, minimizando riesgos y costos operativos.

En la siguiente tabla se puede observar la clasificación de fallas según el triángulo de Duval, en ella están las 7.

5.3 Compatibilidad con mantenimiento basado en condición (CBM)

Gracias a su simplicidad, claridad y

Tabla Técnica – Clasificación de Fallas según el Triángulo de Duval

Zona Duval	Tipo de Falla	Firma Típica de Gases (proporciones relativas)	Mecanismo Físico Principal	Temperatura Aproximada	Implicaciones Técnicas
PD	Descargas Parciales	CH ₄ ↑↑, C ₂ H ₂ ↓, C ₂ H ₄ ↓	Ionización gaseosa en cavidades de papel o aceite	< 150 °C	Deterioro lento, formación de ozono y agua, inicio de degradación dieléctrica
D1	Descarga de Baja Energía	C ₂ H ₂ ↑, CH ₄ ↑, C ₂ H ₄ ↓	Arqueo intermitente, superficies contaminadas	300–500 °C	Formación de carbón superficial, daño progresivo en contactos
D2	Descarga de Alta Energía	C ₂ H ₂ ↑↑↑, CH ₄ ↑, C ₂ H ₄ ↑	Arco eléctrico sostenido	> 700 °C	Fallo crítico inminente, emisión intensa de calor y luz, carbonización severa
T1	Sobrecalentamiento Bajo	CH ₄ ↑, C ₂ H ₄ ↑, C ₂ H ₂ ≈ 0	Puntos calientes en conexiones flojas	< 300 °C	Daño térmico leve, descomposición de celulosa, aumento de acidez
T2	Sobrecalentamiento Medio	C ₂ H ₄ ↑↑, CH ₄ ↑, C ₂ H ₂ ↓	Fallas en bobinas o núcleos ferromagnéticos	300–700 °C	Formación de lodos, inicio de carbonización, envejecimiento acelerado
T3	Sobrecalentamiento Severo	C ₂ H ₄ ↑↑↑, C ₂ H ₂ ↑, CH ₄ ↓	Calentamiento localizado extremo	> 700 °C	Ruptura térmica del aceite, riesgo de incendio, colapso dieléctrico
DT	Falla Combinada (Térmica + Eléctrica)	CH ₄ ↑, C ₂ H ₄ ↑, C ₂ H ₂ ↑	Múltiples mecanismos activos (arco + calentamiento)	Variable	Diagnóstico complejo, posible evolución hacia T3 o D2

6. Ejemplos de aplicación del triángulo Duval.

La mejor manera de entender cómo opera el triángulo de Duval es haciendo aplicaciones prácticas a través de ejemplos hipotéticos, a continuación, vamos a desarrollar varios ejemplos basados en las 7 zonas Duval:

6.1 Ejemplo 1.

Veamos un ejemplo. De una medición de laboratorio, obtenemos los siguientes valores de DGA:

- H₂: 8 ppm
- CH₄: 1313 ppm
- C₂H₂: 2908 ppm
- C₂H₄: 616 ppm
- C₂H₆: 420 ppm
- CO: 450 ppm
- CO₂: 1069 ppm

Solo necesitamos los valores de C₂H₂, CH₃ y C₂H₃. Los demás valores no se utilizan en el método del triángulo de Duval.

Ejemplo de cálculo

El porcentaje de C₂H₂ es $2908/(2908 + 1313 + 616) = 0,601 = 60,1\%$.

El porcentaje de CH₄ es $1313/(2908 + 1313 + 616) = 0,271 = 27,1\%$.

El porcentaje de C₂H₄ es $616/(2908 + 1313 + 616) = 0,127 = 12,7\%$.

Las líneas correspondientes se dibujan paralelas al etiquetado de los ejes.

El punto de intersección se encuentra en la zona denominada D1, que significa descarga de baja energía o chispa.

Códigos de falla

La lista completa de códigos de falla se puede ver aquí:

Ing. Gregor Rojas

- ✓ PD: descarga parcial
- ✓ T1: falla térmica por debajo de 300 grados centígrados
- ✓ T2: falla térmica entre 300 y 700 grados centígrados
- ✓ T3: falla térmica por encima de 700 grados centígrados
- ✓ D1: descarga de baja energía (chispas)
- ✓ D2: descarga de alta energía (arco eléctrico)
- ✓ DT: mezcla de fallas térmicas y eléctricas

Observe cómo cada combinación posible de valores de DGA resultará en una clasificación de falla. No hay ninguna zona designada como normal.

El triángulo de Duval solo se puede utilizar para la clasificación de fallas, pero no para su detección. Es decir, antes de realizar cualquier procedimiento asegúrese de que su transformador esté realmente defectuoso.

El Triángulo de Duval es una excelente técnica que ha demostrado su eficacia para diagnosticar fallas internas en transformadores de potencia.

Uno de los principales desafíos de este método es que no existe una región en el triángulo que indique un estado de envejecimiento normal del transformador.

Por lo tanto, este método no es tan eficaz para identificar un cambio de un estado normal a uno defectuoso. No obstante, el método del triángulo de degradación de baja energía (LEDT) puede proporcionar una tendencia desde el funcionamiento normal hasta el desarrollo de una falla.

El Triángulo de Duval 1 se puede utilizar en un índice de salud como el que se aplica en el Modelo de índice de edad del transformador para evaluar la salud de este.

En una versión actualizada, el Triángulo de Duval 4 está compuesto por tres gases: hidrógeno (H_2), metano (CH_4) y etano (C_2H_6), que son más específicos para baja energía o temperatura (PD, T1 y T2) [2].

El Triángulo de Duval 5 está compuesto por los gases Metano (CH_4), Etileno (C_2H_4) y Etano (C_2H_6) que se forman más específicamente para la identificación de fallas de alta temperatura para determinar más información sobre fallas térmicas en papel y aceite [2].

6.2 Ejemplo 2

Paso 1

Obtener los datos del análisis de gases disueltos (DGA)

Un transformador de potencia fue sometido a un análisis DGA y se obtuvieron las siguientes concentraciones en ppm:

Gas	Concentración (ppm)
Metano (CH_4)	120
Etileno (C_2H_4)	80
Acetileno (C_2H_2)	20

Paso 2

Calcular los porcentajes relativos de los tres gases requeridos

El Triángulo de Duval 1 se basa únicamente en los siguientes gases:

- CH_4 (Metano)
- C_2H_4 (Etileno)
- C_2H_2 (Acetileno)

Total de gases:

$$\text{Total} = CH_4 + C_2H_4 + C_2H_2 = 120 + 80 + 20 = 220$$

Porcentaje de cada gas:

Ing. Gregor Rojas

$$\%CH_4 = 120/220 \times 100 \approx 54.5\%$$

$$\%C_2H_4 = 80/220 \times 100 \approx 36.4\%$$

$$\%C_2H_2 = 20/220 \times 100 \approx 9.1\%$$

Paso 3

Ubicar el punto en el Triángulo de Duval

Con los porcentajes obtenidos:

- CH_4 : 54.5%
- C_2H_4 : 36.4%
- C_2H_2 : 9.1%

Este punto se encuentra en la zona T2 del Triángulo de Duval, que corresponde a:

Falla térmica de media temperatura (300 - 700 °C)

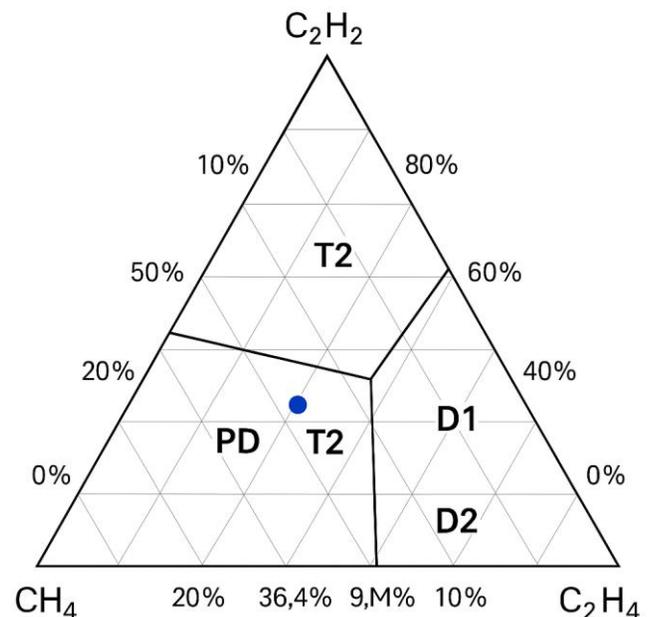


Figura 1. Aplica al ejemplo 2

Paso 4

Interpretación

La presencia predominante de metano y etileno, junto con una pequeña cantidad de acetileno, indica que probablemente hay:

- ✓ Calentamiento de materiales celulósicos o del aceite dieléctrico.
- ✓ No hay evidencia clara de arco eléctrico (lo cual generaría mayor acetileno).

Acción sugerida:

- ✓ Revisar ventilación y sobrecargas.
- ✓ Programar inspección térmica.
- ✓ Aumentar la frecuencia del monitoreo DGA.

6.3 Ejemplo 3

Posible descarga eléctrica de alta energía (arco eléctrico)

Paso 1

Datos del análisis DGA

Se tomaron muestras de aceite de un transformador que presentó ruidos inusuales y olor a quemado, cuyos resultados fueron:

Gas	Concentración (ppm)
CH ₄ (Metano)	250
C ₂ H ₄ (Etileno)	130
C ₂ H ₂ (Acetileno)	620

Paso 2

Calcular los porcentajes relativos

Total=250+130+620=1000 ppm

%CH₄=250/1000×100=25%

%C₂H₄=130/1000×100=13%

%C₂H₂=620/1000×100=62%

Paso 3

Localización en el Triángulo de Duval

Con estos porcentajes:

- CH₄: 25%
- C₂H₄: 13%
- C₂H₂: 62%

El punto se ubica en la zona D2, que indica en la figura xx. Descarga eléctrica de alta energía (arco intenso)

Paso 4

Interpretación

- ✓ Alta proporción de acetileno (C₂H₂) es característico de arcos eléctricos severos.
- ✓ Puede deberse a contactos flojos, picos de tensión o aislamiento deteriorado.

Acción sugerida:

- Desenergizar el transformador inmediatamente para inspección interna.
- Verificar conexiones y estado del aislamiento.
- Considerar pruebas de aislamiento (tan delta, resistencia, etc.).

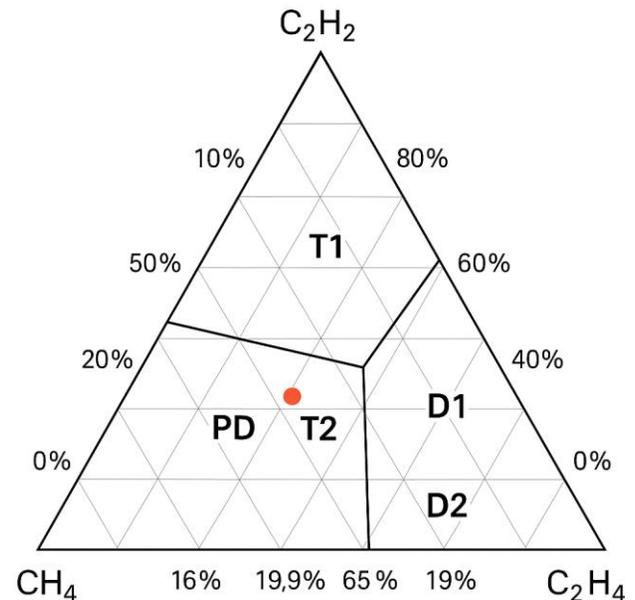


Figura 2. Aplica al ejemplo 3

6.4 Ejemplo 4

Descarga parcial (corona)

Paso 1

Datos del análisis de gases (DGA)

Un transformador en servicio estable muestra signos de envejecimiento del aislamiento. El análisis de gases disueltos entrega:

Gas	Concentración (ppm)
CH ₄ (Metano)	300
C ₂ H ₄ (Etileno)	20
C ₂ H ₂ (Acetileno)	0

Paso 2

Cálculo de porcentajes relativos

$$\text{Total} = 300 + 20 + 0 = 320 \text{ ppm}$$

$$\% \text{CH}_4 = 320 / 300 \times 100 \approx 93.75\%$$

$$\% \text{C}_2\text{H}_4 = 20 / 20 \times 100 \approx 6.25\%$$

$$\% \text{C}_2\text{H}_2 = 0\%$$

Paso 3

Ubicación en el Triángulo de Duval con esos valores:

- CH₄: 93.75%
- C₂H₄: 6.25%
- C₂H₂: 0%

Este punto se encuentra dentro de la zona PD, correspondiente a:

Descarga parcial o efecto corona

Paso 4

Interpretación

- ✓ La alta proporción de metano sin presencia de acetileno ni etileno sugiere una descarga débil o de bajo nivel de energía.
- ✓ Suele asociarse a burbujas, fisuras en el aislamiento sólido, o defectos en la impregnación del papel.

Acción sugerida:

- Verificar el estado del aislamiento.
- Realizar mediciones de descargas parciales (PD test).
- Continuar con monitoreo frecuente para observar evolución.

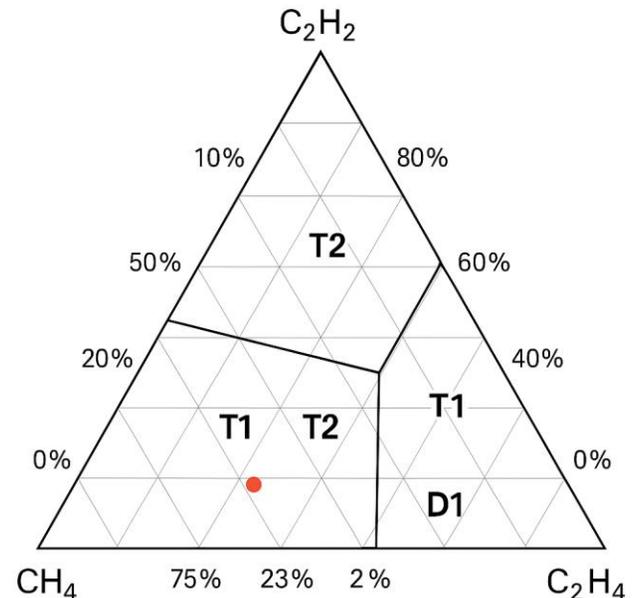


Figura 3. Aplica al ejemplo 4

6.5 Ejemplo 5

Falla térmica de media temperatura (T2)

Paso 1

Resultados del análisis DGA

Se toman muestras de aceite de un transformador que ha operado bajo sobrecarga térmica. Los gases disueltos obtenidos son los siguientes:

Gas	Concentración (ppm)
CH ₄ (Metano)	180
C ₂ H ₄ (Etileno)	250
C ₂ H ₂ (Acetileno)	20

Paso 2

Cálculo de los porcentajes

$$\text{Total} = 180 + 250 + 20 = 450 \text{ ppm}$$

$$\%CH_4 = 180/450 \times 100 = 40\%$$

$$\%C_2H_4 = 250/450 \times 100 \approx 55.6\%$$

$$\%C_2H_2 = 20/450 \times 100 \approx 4.4\%$$

Paso 3

Localización en el Triángulo de Duval

Con estos porcentajes:

- CH₄: 40%
- C₂H₄: 55.6%
- C₂H₂: 4.4%

Este punto se encuentra dentro de la zona T2, que representa:

Falla térmica entre 300 °C y 700 °C

Paso 4

Diagnóstico

- ✓ La elevada producción de etileno con metano indica una degradación del papel y aceite a temperaturas medias.
- ✓ No hay signos de arco (acetileno bajo).

Acciones sugeridas:

- Verificar si la carga ha excedido el diseño térmico.
- Evaluar ventilación, temperatura ambiente y disipadores térmicos.
- Considerar monitoreo continuo de temperatura y DGA periódico.

Espero que este boletín cubra tus expectativas si tienes alguna duda escribe a los correos de Gedisa que aparecen en su web site.