

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 628 079**

51 Int. Cl.:

G05B 23/02 (2006.01)

H01F 27/40 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **16.07.2012 PCT/US2012/046926**

87 Fecha y número de publicación internacional: **24.01.2013 WO13012804**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **16.07.2012 E 12814599 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **17.05.2017 EP 2735011**

54 Título: **Procedimiento y sistema de estimación de la vida restante de un transformador**

30 Prioridad:
19.07.2011 US 201113186140

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
01.08.2017

73 Titular/es:
**ARIZONA PUBLIC SERVICE COMPANY (100.0%)
400 North Fifth Street
Phoenix, AZ 85004, US**

72 Inventor/es:
LAMONTAGNE, DONALD, R.

74 Agente/Representante:
CARPINTERO LÓPEZ, Mario

ES 2 628 079 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Procedimiento y sistema de estimación de la vida restante de un transformador

Campo técnico de la invención

5 La presente invención se refiere, en general, al campo de los sistemas de gestión de transformadores y de control de fallos. Más específicamente, la presente invención se refiere al análisis de gases disueltos (DGA) para estimar la vida restante de un transformador.

Antecedentes de la invención

10 Los materiales aislantes hechos de materiales de celulosa, tales como papel kraft, cartón prensado y similares, se usan típicamente en transformadores de potencia llenos de aceite como aislamiento eléctrico para separar diferentes circuitos dentro de un transformador, para proporcionar soporte mecánico a las bobinas, para aislar el núcleo de devanado y la caja externa de los circuitos, y así sucesivamente. Con el fin de realizar estas funciones, los materiales aislantes deben tener una alta rigidez dieléctrica y alta resistencia mecánica. Sin embargo, estos materiales aislantes se degradan gradualmente y pierden resistencia mecánica debido al calentamiento (pirólisis), al oxígeno (oxidación) y a la humedad (hidrólisis), lo que puede afectar adversamente a la vida de un transformador.

15 Por ejemplo, la pérdida de resistencia mecánica debida a la degradación del material aislante hace que el devanado del transformador se vuelva más susceptible a daños mecánicos durante el movimiento, particularmente durante acontecimientos extremos, tales como fallos pasantes. Por consiguiente, la vida de un transformador está limitada a la vida de su material aislante sólido.

20 Una técnica utilizada para medir la capacidad del material aislante de celulosa para soportar las tensiones dentro de un transformador es a través de la medición del grado de polimerización (DP). La celulosa en el material aislante es un polímero de cadena larga con enlaces de glucosa repetidos y una medida del número de estos enlaces de glucosa repetidos por unidad es el grado de polimerización. Un material aislante típico tiene un grado promedio de polimerización de aproximadamente mil cuando es nuevo. Sin embargo, a medida que se rompen los enlaces de glucosa en el material aislante, se reduce el grado de polimerización. Por tanto, el material aislante envejecido, es decir, degradado, con un grado de polimerización de menos de doscientos puede ser demasiado frágil para soportar eficazmente las tensiones mecánicas dentro del transformador. En consecuencia, se puede realizar una prueba para medir el grado de polimerización para evaluar el envejecimiento del aislamiento.

25 En los transformadores de operación, para medir directamente el grado de polimerización, el transformador se desenergiza y se llevan a un laboratorio muestras de material aislante de celulosa a un laboratorio para su análisis. Obviamente, esta metodología de medición directa consume mucho tiempo y es costosa. Una forma indirecta de medir el grado de polimerización es a través de las pruebas de furano. Los furanos son los principales productos de degradación de la celulosa que pueden encontrarse en el aceite aislante del transformador. Las muestras de aceite pueden analizarse para determinar los furanos y se comparan con modelos de furano para obtener una aproximación del grado de polimerización del material aislante. Sin embargo, esta técnica de aproximación no siempre da resultados consistentes. El documento US 2009/043538A1 se refiere a determinar con precisión la velocidad real de generación de gas en un transformador de potencia. Este documento describe cómo los elementos de datos brutos producidos por una unidad de análisis de gases disueltos (DGA) que controlan un transformador que se desvía de los límites normales pueden conducir falsamente a la notificación de condiciones anormales.

Breve descripción de los dibujos

30 Se puede obtener una comprensión más completa de la presente invención haciendo referencia a la descripción detallada y las reivindicaciones cuando se consideran en relación con las figuras, en las que números de referencia similares se refieren a artículos similares a lo largo de las figuras, y

45 la figura 1 muestra un diagrama de bloques de una parte de una instalación en la que tiene lugar el análisis de elementos de datos para estimar la vida restante de un transformador de acuerdo con la presente invención;
 la figura 2 muestra un diagrama de un primer ejemplo de paquete de elementos de datos que representan los gases disueltos en un transformador y producidos por un dispositivo de monitorización que controla uno de los aparatos de la figura 1;
 la figura 3 muestra un diagrama de un segundo ejemplo de paquete de elementos de datos que representan los gases disueltos en un transformador y producidos por el dispositivo de monitorización que controla uno de los aparatos de la figura 1;
 50 la figura 4 muestra un diagrama de un resultado de ejemplo de una ecuación de predicción de regresión armónica que proporciona un ajuste lineal para la porción no armónica de una velocidad de generación de gas;
 la figura 5 muestra un diagrama de ecuaciones utilizadas para estimar una medida de la vida remanente de un transformador en base a un valor de los gases disueltos en el transformador de acuerdo con la presente invención;
 55 la figura 6 muestra un diagrama de flujo de un proceso de análisis de acuerdo con la presente invención;
 la figura 7 muestra un diagrama de las ecuaciones utilizadas para calcular un valor actual de los gases disueltos de acuerdo con el proceso de análisis de la figura 6;

la figura 8 muestra una tabla de una base de datos de seguimiento utilizada para almacenar valores de ajuste para gases disueltos en respuesta a acontecimientos aislados en el transformador;
 la figura 9 muestra un diagrama de las ecuaciones utilizadas para calcular una medida de la vida restante perdida debido a un fallo pasante de acuerdo con el proceso de análisis de la figura 6;
 5 la figura 10 muestra un diagrama de ecuaciones usadas para determinar un valor de ajuste para una cantidad en exceso de gases disueltos producidos a partir de un fallo pasante.
 la figura 11 muestra un diagrama de ecuaciones utilizadas para predecir una duración de tiempo hasta el final de vida de un transformador;
 la figura 12 muestra un diagrama de ecuaciones utilizadas para determinar la capacidad de un transformador para sobrevivir a un fallo pasante futuro basado en su medida actual de la vida restante;
 10 la figura 13 muestra un diagrama de ecuaciones utilizadas para determinar otra medida de la vida restante de un transformador;
 la figura 14 muestra un diagrama de flujo de un proceso de notificación;
 la figura 15 muestra un diagrama de una notificación del estado de envejecimiento de un transformador que puede presentarse a una o más partes responsables; y
 15 la figura 16 muestra un gráfico que representa una velocidad de generación de gases disueltos en el transformador con respecto a la edad del transformador.

Descripción detallada

20 Un procedimiento para estimar la vida restante de un transformador y su sistema correspondiente se proporcionan según las reivindicaciones 1 y 11, respectivamente. Las realizaciones de la invención implican un procedimiento de análisis, un medio legible por ordenador que contiene un código ejecutable y un sistema para evaluar el envejecimiento de materiales aislantes de celulosa y estimar una vida útil restante de transformadores controlados mediante unidades de control. Se describen realizaciones en relación con el control de transformadores situados en subestaciones de una empresa de servicios eléctricos y el control se realiza mediante unidades de análisis de gases disueltos (DGA), realizando una o más de las unidades de DGA control en línea de cada uno de los transformadores. El análisis de acuerdo con la presente invención proporciona una estimación indirecta del grado de polimerización (DP) de material aislante en un transformador analizando una cantidad de gases disueltos y, particularmente, monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO₂) en el aceite del transformador según lo controlado por las unidades de DGA.

30 Por consiguiente, no es necesario extraer un transformador fuera de línea para evaluar la degradación del material aislante en un transformador. Además, esta estimación del DP puede usarse para estimar una medida de la vida útil restante de un transformador en base a los valores de gases disueltos recibidos de las unidades de DGA. Los resultados del análisis pueden utilizarse para determinar un estado de envejecimiento del transformador, para determinar la capacidad de un transformador para sobrevivir a un fallo pasante, para determinar cuándo un transformador puede necesitar reparación o, de otro modo, reemplazo y así sucesivamente.

40 la figura 1 muestra un diagrama de bloques de una parte de una instalación 20 en la que tiene lugar el análisis de elementos de datos y la estimación de la vida restante de los transformadores de acuerdo con una realización. La instalación 20 incluye una pluralidad de subestaciones 22, de las cuales solo se muestran dos. Las subestaciones 22 adicionales están representadas por elipses 24. En cada una de las subestaciones 22 están situados una pluralidad de aparatos, en forma de transformadores 26. Solo se muestran tres transformadores 26 en cada una de las subestaciones 22 para simplificar la ilustración. Sin embargo, debe entenderse que cada una de las subestaciones 22 puede incluir cualquier número de transformadores 26, como es conocido por los expertos en la materia.

45 Cada uno de los transformadores 26 se controla mediante una o más de una pluralidad de unidades de analizador de gases disueltos (DGA) 28. Las unidades de DGA 28 controlan el fluido del transformador, típicamente de un origen de aceite mineral. Las unidades de DGA 28 controlan, por ejemplo, ocho gases que son producto de la degradación del fluido del transformador a base de aceite mineral. Estos ocho gases pueden incluir hidrógeno (H₂), oxígeno (O₂), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), acetileno (C₂H₂), etileno (C₂H₄) y etano (C₂H₆).

50 La instalación 20 incluye además un sistema informático 30 en comunicación con unidades de DGA 28 a través de una red de comunicaciones 32. En una realización preferida, el sistema informático 30 puede estar situado en un centro de control de energía (no mostrado) operado por la instalación eléctrica 20. Sin embargo, el sistema de procesamiento 30 puede, de forma alternativa, subcontratarse a una tercera instalación 20 de control.

55 El sistema informático 30 incluye un procesador 34 para ejecutar un proceso de análisis 36 de acuerdo con la presente invención. El procesador 34 también puede ejecutar un proceso de sondeo opcional 38 y un proceso de notificación 40. El procesador 34 está en comunicación con un dispositivo de entrada 42, un dispositivo de salida 44, un visualizador 46 y un sistema de memoria 48 para almacenar una base de datos del estado del transformador 50 que puede generarse en respuesta a la ejecución del proceso de análisis 36. Estos elementos están interconectados por una estructura de bus 52. Los expertos en la técnica reconocerán que el proceso de análisis 36, el proceso de sondeo 38 y el proceso de notificación 40 no tienen que ser unidades físicas distintas, pero pueden realizarse como un proceso único e integrado. La configuración específica del sistema informático 30 depende, al menos en parte, de
 60

la complejidad de la instalación 20, el número de unidades de DGA 28 que proporcionan datos al sistema de procesamiento 30 y la cantidad de datos que se procesan.

5 El dispositivo de entrada 42 puede abarcar un teclado, un ratón, un dispositivo señalador, un dispositivo de audio (por ejemplo, un micrófono) y/o cualquier otro dispositivo que proporciona entrada al procesador 34. El dispositivo de salida 44 puede abarcar una impresora, un dispositivo de audio (por ejemplo, un altavoz) y/u otros dispositivos que proporcionan salida del procesador 34. Los dispositivos de entrada y salida 42 y 44 también pueden incluir conexiones de red, módems u otros dispositivos utilizados para comunicaciones con otros sistemas informáticos o dispositivos a través de la red de comunicaciones 32.

10 El sistema informático 30 también incluye un medio de almacenamiento legible por ordenador 54. El medio de almacenamiento legible por ordenador 54 puede ser un disco magnético, un disco compacto o cualquier otro sistema de almacenamiento masivo volátil o no volátil legible por el procesador 34. El medio de almacenamiento legible por ordenador 54 también pueden incluir medios legibles por ordenador cooperantes o interconectados, que existen exclusivamente en el sistema informático 30 o están distribuidos entre múltiples sistemas informáticos interconectados (no mostrados) que pueden ser locales o remotos. El proceso de análisis 36, el proceso de sondeo 38 y el proceso de notificación 40 se registran en un medio de almacenamiento legible por ordenador 54 para instruir al procesador 34 para que efectúe funciones de sondeo, análisis y notificación, como se discute a continuación.

15 La instalación 20 también puede incluir dispositivos de notificación 56, de los cuales solo se muestra uno. Los dispositivos de notificación 56 pueden ser dispositivos convencionales de comunicaciones manuales, tales como buscapersonas, teléfonos móviles, asistentes digitales personales, o una combinación de los mismos. Alternativamente, los dispositivos de notificación 56 pueden ser ordenadores de sobremesa o cualquier otro medio para producir un mensaje electrónico a los usuarios de los dispositivos de notificación 56. Los dispositivos de notificación 56 pueden estar en comunicación con el sistema informático 30 a través de la red de comunicaciones 32. La red de comunicaciones 32 puede comunicarse a través de técnicas convencionales inalámbrica y/o no inalámbricas bien conocidas por los expertos en la materia.

25 Cada uno de los dispositivos de notificación 56 puede estar asignado o asociado a un responsable particular 58. En esta ilustración, el responsable 58 puede ser un equipo de mantenimiento de uno o más individuos que son responsables de los transformadores 26 en subestaciones 22 particulares, son los que más conocen las medidas correctoras necesarias para las condiciones particulares de fallo y/o tienen un nivel de autoridad apropiado para tomar decisiones con respecto a los transformadores 26.

30 En general, los analizadores de DGA 28 obtienen muestras de fluido dentro de los transformadores 26 y controlan los gases disueltos en el fluido del que se ha obtenido la muestra. Las muestras pueden tomarse nominalmente cada cuatro horas. Sin embargo, la velocidad de muestreo puede aumentarse a cada hora si se alcanzan umbrales predefinidos para un gas individual o si se alcanza una velocidad de cambio predefinida para un gas individual. El control del gas disuelto en las unidades de DGA 28 implica la medición de valores para cada uno de un número de gases disueltos dentro del fluido del transformador. Estas mediciones se comunican posteriormente como elementos de datos 60 al sistema informático 30 a través de la red de comunicaciones 32. La comunicación de los elementos de datos 60 de las unidades 28 de DGA puede tener lugar automáticamente y/o en respuesta a una señal de sondeo comunicada mediante el proceso de sondeo 38. Como alternativa, los elementos de datos 60 pueden tomarse manualmente. Estas mediciones manuales se pueden introducir manualmente en el sistema de procesamiento 30 mediante la metodología de introducción de datos convencional. Los elementos de datos 60 se analizan mediante el proceso de análisis 36 y los resultados del análisis pueden registrarse en la base de datos de las condiciones del transformador 50 y/o pueden proporcionarse mediante el proceso de notificación 40 a uno o más dispositivos de notificación 56 asignados a una o más partes responsables 58 en forma de un aviso 62.

35 En referencia a las figuras 2 y 3, la figura 2 muestra un diagrama de un primer ejemplo de paquete 64 de elementos de datos 60 producido por una de las unidades de DGA 28 (figura 1) que controla uno de los transformadores 26 (figura 1). La figura 3 muestra un diagrama de un segundo paquete 66 de elementos de datos 60 de ejemplo producidos por la unidad de DGA 28 que controla el transformador 26. Cada uno de los paquetes 64 y 66 incluye, deseablemente, un identificador del transformador 68, mostrado en el presente documento como "TA01" que identifica uno de los transformadores 26. Cada uno de Los paquetes 64 y 66 incluye además elementos de datos 60 como valores 70 para cada uno de un número de gases disueltos 72 que están siendo controlados por la unidad de DGA 28. Se pueden incluir información adicional, no mostrada en el presente documento, tal como la hora/fecha de recogida, otros gases disueltos 72 no enumerados en ella y así sucesivamente.

45 Los paquetes 64 y 66 primero y segundo se ilustran en el presente documento para retratar la información que puede proporcionarse desde las unidades de DGA 28 (figura 1) al sistema informático 30 (figura 1) para análisis y posterior notificación selectiva de acuerdo con la presente invención. La configuración particular de elementos de datos 60 y los paquetes 64 y 66 primero y segundo, respectivamente, para transmisiones pueden tomar diversas formas y la transmisión se puede llevar a cabo mediante diversas técnicas conocidas por los expertos en la materia.

55 La figura 2 muestra, generalmente, el primer paquete 64 que representa un estado normal 74 en la que el transformador 26, identificado por "TA01" se comporta normalmente. El estado normal 74 puede determinarse

cuando los valores 70 para cada uno de los gases disueltos 72 están dentro de los límites preestablecidos que definen el estado normal 74. Estos límites preestablecidos pueden proporcionarse en una norma reconocida por la industria, tal como la norma IEEE C57.104-2008 "Guía IEEE para la interpretación de gases generados en transformadores sumergidos en aceite" o de otras fuentes.

5 Por el contrario, en la figura 3 se muestra, generalmente, el segundo paquete 66 que representa un estado anormal 76, en la que el transformador 26, identificado por "TA01" puede comportarse anormalmente. El estado anormal 76 puede determinarse cuando algunos o todos los valores 70 para los gases disueltos 72 han aumentado a niveles de condiciones más críticos. En este ejemplo, el nivel de monóxido de carbono (CO) ha aumentado a un valor que está por encima de los límites normales deseados. La norma reconocida por la industria, norma de la IEEE C57.104-2008
10 "Guía IEEE para la interpretación de gases generados en transformadores sumergidos en aceite", clasifica además el comportamiento de un transformador basado en los valores 70 para gases disueltos 72 como una combinación de cuatro tipos de fallo: descarga de alta energía con arco (HEDA), descarga de baja energía (LED), aceite de sobrecalentamiento (OHO) o degradación de la celulosa (CD).

15 El producto de la degradación de la celulosa en el material aislante de celulosa en los transformadores rellenos de aceite es CO y dióxido de carbono (CO₂). Por consiguiente, los valores 70 para los gases 72 CO y CO₂ pueden notificar ilícitamente un tipo de fallo de degradación de la celulosa. El tipo de fallo de degradación de la celulosa puede proporcionar al usuario alguna indicación de que existe degradación del aislamiento (es decir, envejecimiento anormal), pero no proporciona información sobre la vida útil restante del transformador.

20 El proceso de análisis de datos 36 (figura 1) evita este problema utilizando la medición (es decir, los valores 70) de los gases CO y CO₂ 72 recibidos de las unidades de DGA 28 en línea (figura 1) para estimar un valor del grado de polimerización (DP). A partir de esta estimación del DP, puede hacerse una predicción de la vida útil restante de los transformadores 26 (figura 1). Tal característica puede aumentar la capacidad de una compañía de servicios públicos para programar convenientemente las reparaciones a fin de reducir los costes de mantenimiento, aplazar los gastos de capital ampliando la fecha de reemplazo del transformador, proporcionar advertencia anticipada de desarrollar fallos que podrían conducir a un fallo catastrófico del transformador y a interrupciones no planificadas, y así sucesivamente. Las operaciones del proceso de análisis de datos 36 se discutirán con detalle en relación con la
25 figura 6.

30 La figura 4 muestra un diagrama 78 de un ejemplo de resultado de una ecuación de predicción de regresión armónica que proporciona un ajuste lineal para la porción no armónica de una velocidad 80 de generación de gases. Los transformadores 26 (figura 1) pueden presentar fallos internos dependientes de la carga y presentar velocidades de gasificación cíclica normales debido a la carga cíclica del transformador 26. Por lo tanto, los valores 70 (figura 2) que están por encima de los límites normales debido a la carga cíclica normal pueden introducir errores en cálculos de análisis posteriores. En algunas realizaciones puede ser útil estabilizar las velocidades de gasificación medidas, es decir, identificar una velocidad 80 de generación de gas "en estado estacionario", a partir de características de
35 carga cíclica o periódica.

En un ejemplo, el diagrama 78 incluye un gráfico 82. El gráfico 82 incluye un primer diagrama 84 de valores 86 con respecto al tiempo 88 del gas dióxido de carbono 72 disuelto encontrado en el aceite del transformador y obtenido a partir de los elementos de datos 60 (figura 2). En este ejemplo, el tiempo 88 coincide con las muestras. Es decir, dado que se obtienen muestras del aceite del transformador cada cuatro horas, el valor numérico de seis muestras
40 corresponde a veinticuatro horas. En consecuencia, el valor numérico de mil noventa y cinco muestras corresponde a la mitad de un año, y el valor numérico de dos mil ciento noventa muestras corresponde a un año

45 El primer gráfico 84 representa los valores reales 70 (figura 2) de gas dióxido de carbono 72 encontrados en el aceite del transformador durante un período de tiempo 88. En un ejemplo, el diagrama 78 incluye una solución 90, en la que Y es igual a un valor predicho de gas dióxido de carbono en el tiempo, t, a una ecuación de regresión armónica que tiene una "bondad de ajuste" alta como se representada por un parámetro r^2 92. La gráfica 82 incluye además un segundo gráfico 94 que se genera en respuesta a la solución derivada 90. Así, el segundo gráfico 94 es una representación, o modelo, del "mejor ajuste" de los valores reales de dióxido de carbono modelados usando la solución 90. A efectos ilustrativos, la gráfica 82 también incluye características periódicas de una fluctuación diaria 96, una fluctuación semestral 98 y una fluctuación anual 100 de la carga del transformador.

50 En este ejemplo, los componentes sinusoidales de la fluctuación diaria 96, la fluctuación semianual 98 y la fluctuación anual 100 pueden eliminarse, o cancelarse, de la solución 90, de manera que se puede determinar una tendencia precisa en forma de velocidad de generación de gas "en estado estacionario" 80. La velocidad 80 de generación de gases se puede usar en combinación con los valores estimados del grado de polimerización para determinar la duración hasta que se alcance el final de vida de uno de los transformadores 26, como se discutirá
55 más adelante en relación con la figura 11 y/o trazar una relación de tres vías entre una cantidad de gases disueltos CO + CO₂ 72 formados, una velocidad de generación de los gases de CO + CO₂ y la edad del transformador 26, como se tratará más adelante en relación con la figura 16.

La figura 5 muestra un diagrama 102 de las ecuaciones utilizadas para estimar una medida de la vida restante de uno de los transformadores 26 (figura 1) sobre la base de los valores 70 (figura 2) de los gases disueltos 72 (figura

2) en el aceite del transformador de acuerdo con la presente invención. El diagrama 102 incluye un gráfico 104. El gráfico 104 revela un gráfico 106 de valores 108 de los gases disueltos dióxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO₂) 72 en relación con los valores del grado de polimerización 110. En la actualidad, tanto el papel aislante como el cartón prensado usados en los transformadores rellenos de aceite están formados por materiales de celulosa. Las resistencias mecánicas de estos materiales de celulosa disminuyen debido al deterioro térmico y de oxidación. En consecuencia, se reduce el grado de polimerización. Al mismo tiempo se forman gases 72 y, más críticamente, CO y CO₂.

Se derivó una relación usando la medición directa del grado de polimerización y la formación de gases disueltos CO y CO₂ 72 resultantes de la degradación del papel aislante en un transformador. Los experimentos revelan que el papel aislante produce aproximadamente el ochenta por ciento de los gases disueltos de CO y CO₂ 72 en el aceite del transformador y el cartón prensado produce el veinte por ciento adicional de los gases disueltos de CO y CO₂ 72 en el aceite del transformador. De este modo, la medición directa del grado de polimerización y la formación de gases disueltos CO y CO₂ 72 resultantes de la degradación del papel aislante en un transformador puede ajustarse aproximadamente al veinticinco por ciento para tener en cuenta la formación de los gases disueltos CO y CO₂ 72 desde el cartón prensado. La combinación resultante produce el gráfico 106, es decir, una representación gráfica de la relación entre el grado de polimerización y la formación de los gases disueltos CO y CO₂ 72.

Esta relación entre el grado de polimerización y la formación de los gases disueltos CO y CO₂ 72 se puede estimar adicionalmente mediante una ecuación del grado de ecuación de polimerización 112 presentado en el diagrama 102. Se representa un valor total 114 de la cantidad combinada de los gases disueltos CO y CO₂ 72 mediante la nomenclatura "valor DG_{TOTAL}", y se denomina en el presente documento valor de DG_{TOTAL} 114. El valor de DG_{TOTAL} 114 se expresa en mililitros/gramo. Un valor del grado de polimerización 116 determinado mediante la resolución de la ecuación 112 se representa por la nomenclatura "valor del DP 116". En este caso, la ecuación 112 tiene una "bondad de ajuste" como se representa por un parámetro r² 118. Por consiguiente, la ecuación 112 puede usarse para estimar el valor del DP 116 de uno de los transformadores 26 (figura 1) usando una medida total actual de la cantidad combinada de los gases disueltos CO y CO₂ 72, es decir, DG_{TOTAL} 116.

La ecuación 112 es válida para los valores de DG_{TOTAL} 114 en un intervalo 120 entre 0,101 ml/g y 2,904 ml/g. En consecuencia, la ecuación 112 es válida para los valores del DP 116 entre novecientos y doscientos. Los valores de DG_{TOTAL} 114 muy bajos, inferiores a aproximadamente 0,101 ml/g, pueden informarse como el valor del DP 116 superior a novecientos. De forma similar, los valores de DG_{TOTAL} 114 altos por encima de aproximadamente 2.904 ml/g se informan como el valor del DP 116 que es inferior a doscientos.

Una vez predicho el valor del DP 116, el valor del DP 116 se puede convertir entonces en una medida de la vida útil restante del transformador 26. Facilities Instructions, Standards, and Techniques, Volumen 3-31, "Transformer Diagnostics," Junio de 2003, United States Department of the Interior, Bureau of Reclamations, en la Tabla 6, "Furanos, DP, porcentaje de vida usada, del papel de aislamiento" se proporcionan valores para el grado de polimerización al porcentaje de vida restante. En la tabla 6 se propone un valor de DP de ochocientos por cien por ciento de vida restante. Los valores de la tabla 6 se han ajustado de acuerdo con una realización de modo que el valor del DP 116 de novecientos corresponde a cien por ciento de vida restante para ser consistente con la ecuación 112. Mientras que el valor del DP 116 de doscientos corresponde al final de vida del transformador 26. Los valores ajustados se han estimado mediante una ecuación 122 presentada en el diagrama 102.

El valor del DP 116 se puede aplicar a la ecuación 122 para determinar una medida de la vida útil restante de uno de los transformadores 26. Esta medida de la vida útil restante se presenta en términos de porcentaje de vida restante 124 y está representada por la nomenclatura "% de RL" 124. Las realizaciones expuestas a continuación presentarán a una o más partes responsables 58 (figura 1) el % de RL 124 de la estimación del valor del DP116.

La figura 6 muestra un diagrama de flujo de un proceso de análisis 36 de acuerdo con la presente invención. El proceso de análisis 36 lo ejecuta un procesador 34 (figura 1) para obtener resultados que se pueden usar para estimar un valor del grado de polimerización, es decir, el valor del DP 116 (figura 5), obtener una medida de la vida útil restante, es decir, el % de RL 124, y calcular cualquier medida adicional de envejecimiento del transformador. El proceso de análisis 36 se trata en relación con el análisis de gases disueltos de los elementos de datos 60 recibidos de una de las unidades de DGA 28 (figura 1) que controla uno de los transformadores 26. Sin embargo, el proceso de análisis 36 puede ejecutarse para elementos de datos 60 recibidos de cualquiera de una pluralidad de unidades de DGA 28, cada una de las cuales controla un transformador distinto 26.

El proceso de análisis 36 comienza con una tarea 126. En la tarea 126, el procesador 34 (figura 1) recibe una pluralidad de elementos de datos 60 que se recogieron previamente de una de las unidades de DGA 28 durante un periodo de tiempo deseado. En una realización, uno de los monitores de DGA 28 (figura 1) proporciona elementos de datos 60 que contienen valores 70 (figura 2) para un número de gases 72 (figura 2) cada cuatro horas, proporcionando dos mil ciento noventa muestras (es decir, valores 70 por gas 72) por año. Por consiguiente, esta pluralidad de valores 70 no necesita descargarse de una de las unidades de DGA 28 de una sola vez, sino que, como alternativa, puede haberse recogido periódicamente y guardado en un archivo de datos (no mostrado) en el sistema informático 30 (figura 1) para su procesamiento posterior.

El proceso de análisis 36 continúa con una tarea 128. En la tarea 128, se calcula un valor actual de los gases disueltos CO + CO₂ 72 a partir del elemento 60 de datos recibido.

Haciendo referencia a la figura 7 en relación con la tarea 128, la figura 7 muestra un diagrama 130 de las ecuaciones utilizadas para calcular un valor actual de los gases disueltos CO + CO₂ 72 de acuerdo con la tarea 128 del proceso de análisis 36. El diagrama 130 incluye una ecuación de ejemplo 132 que ilustra la conversión de los valores 70 para los gases disueltos CO + CO₂ 72 teniendo en cuenta el volumen de aceite en el transformador 26 y el peso del material aislante dentro del transformador 28. Un valor de corriente 134 de los gases disueltos CO + CO₂ 72 se representa en el presente documento por la nomenclatura "DG_{ACT} 134" y se presenta en mililitros/gramo.

Con el fin de calcular adecuadamente el DG_{ACT} 134 en ml/g, los valores conocidos incluyen un volumen 136 de aceite dentro del transformador 26, representado por un parámetro "X", y un peso 138 de material aislante dentro del transformador 26, representado por un parámetro "Y". El volumen 136 y el peso 138 pueden obtenerse de la base de datos de gestión de activos de la compañía de servicios públicos. La unidad de DGA 28 en línea (figura 1) proporciona elementos de datos 60, particularmente valores 70 para los gases disueltos CO + CO₂ 72 en partes por millón. Como se ilustra en la ecuación 132, una suma de valores para los gases disueltos CO + CO₂ 72 en partes por millón se convierte en ml/l, donde un ml/l equivale a mil partes por millón. El volumen 136 de aceite en galones se convierte en litros de aceite, donde un galón de aceite es igual a 3.7854 litros. El nivel de gas, en ml/l, se multiplica por el número de litros de aceite en el transformador 26. El peso 138 de material aislante en libras se convierte en gramos, donde una libra es igual a 453,59237 gramos. Una vez realizadas todas las conversiones, se puede calcular el DG_{ACT} 134, que representa la cantidad total, es decir, actual, de los gases disueltos CO + CO₂ 72 en ml/g para la muestra actual. Los expertos en la técnica reconocerán fácilmente que no es necesario realizar ciertas conversiones cuando el volumen 136 y/o el peso 138 están ya en litros y gramos, respectivamente.

Haciendo referencia de nuevo a la figura 6, después de la tarea 128, el proceso de análisis 36 continúa con una tarea 140. En la tarea 140, se determinan uno o más valores de ajuste para los gases disueltos CO + CO₂ 72 en respuesta a uno o más acontecimientos aislados que se producen en el transformador 26 (figura 1). Estos acontecimientos aislados se denominan en el presente documento como un acontecimiento de mantenimiento y un acontecimiento de fallo pasante.

Durante la vida útil del transformador 26, el transformador 26 puede haber sido sometido a mantenimiento. Por convención, si el aceite del transformador se drenó durante el mantenimiento, el aceite del transformador se habría "procesado" durante el proceso de rellenado del transformador. Este "procesamiento" elimina los gases disueltos 72 del aceite del transformador. La cantidad de gases disueltos CO + CO₂ 72 eliminados durante un acontecimiento de mantenimiento se denomina en el presente documento un valor de ajuste, DG_{MANT.} 142 (véase la figura 8).

Un acontecimiento de fallo pasante es un fallo en un sistema, por ejemplo, un transformador 26, fuera de la zona de protección de, por ejemplo, un relé, donde toda o parte de la corriente de fallo fluye a través de la zona protegida en cuestión. Un acontecimiento de fallo pasante puede ocurrir cuando uno o más conductores eléctricos entran en contacto con tierra y/o entre sí. La corriente de fallo producida por tal acontecimiento de fallo pasante es, típicamente, varias veces mayor en magnitud que la corriente que normalmente fluye a través del circuito. Un acontecimiento de fallo pasante produce daños mecánicos al material aislante. Este daño mecánico resultará en un grado de polimerización reducido, pero no produce gases disueltos. En una realización, se calcula una cantidad equivalente de los gases disueltos CO + CO₂ 72 para un acontecimiento de fallo pasante con el fin de estimar este grado de polimerización reducido. Por consiguiente, un valor para la cantidad equivalente de los gases disueltos CO + CO₂ 72 tal como se calcula en el presente documento representa una reducción del grado de polimerización debido a un daño mecánico de un fallo pasante. El valor para la cantidad equivalente de los gases disueltos CO + CO₂ 72 se refiere en el presente documento como un valor de ajuste, DG_{FLT} 144 (véase la figura 8).

Haciendo referencia a la figura 8 en relación con la tarea 140, la figura 8 muestra una tabla de una base de datos de seguimiento 146 utilizada para almacenar los valores de ajuste DG_{MANT.} 142 y DG_{FLT} 144 para los gases disueltos 72 en respuesta a acontecimientos aislados en el transformador 26. La base de datos de seguimiento 146 incluye, por ejemplo, un campo 150 de identificación del transformador, un campo de fecha/hora 152, un campo de acontecimiento 154, un campo DG_{MANT.} 156 y un campo DG_{FLT} 158. En este ejemplo, el campo de identificación del transformador 150 incluye identificadores del transformador 68, mostrados en el presente documento como "TA01" y "TA02" que identifican transformadores 26. El campo de fecha/hora 152 se muestra con fechas que identifican cuando se produjeron acontecimientos aislados particulares. El campo de acontecimientos 154 incluye identificadores para acontecimientos aislados particulares, por ejemplo, acontecimientos de fallo pasante 160 y acontecimientos de mantenimiento 162.

El campo de DG_{MANT.} 156 incluye un subcampo 161 que enumera una cantidad de CO eliminado durante el acontecimiento de mantenimiento 162 y otro subcampo 163 que enumera una cantidad de CO₂ eliminada durante el mismo acontecimiento de mantenimiento 162. Las cantidades de CO y CO₂ eliminadas durante los acontecimientos de mantenimiento 162 que se producen en cualquiera de los transformadores 26 (figura 1) simplemente se pueden registrar en la base de datos de seguimiento 146. Colectivamente, las cantidades respectivas de CO y CO₂ en cada uno de los subcampos 161 y 163 pueden sumarse para proporcionar DG_{MANT.} 142, an un valor de ajuste representativo de la cantidad total de los gases disueltos CO + CO₂ 72 eliminados durante el acontecimiento de

mantenimiento 162. El campo DG_{FLT} 158 proporciona un valor de ajuste, DG_{FLT} 144, para acontecimientos de fallo pasante 160. El cálculo de los valores de ajuste, DG_{FLT} 144, para los acontecimientos de fallo pasante 160 se tratarán en relación con las figuras 9 y 10.

5 En este ejemplo, los valores de ajuste, $DG_{MANT.}$ 142 para acontecimientos de mantenimiento 162 y los valores de ajuste, DG_{FLT} 144, para acontecimientos de fallo pasante 160 se proporcionan en partes por millón. Sin embargo, debería quedar claro en la discusión posterior que los valores de ajuste $DG_{MANT.}$ and DG_{FLT} 142 y 144, respectivamente, pueden almacenarse en la base de datos de seguimiento 146 en unidades distintas de las mostradas, y las conversiones apropiadas se pueden realizar según sea necesario. Adicionalmente, los expertos en la materia reconocerán que la base de datos de seguimiento 146 y su contenido pueden variar considerablemente con respecto al mostrado.

10 En la figura 9 se muestra un diagrama 164 de las ecuaciones utilizadas para calcular una medida de la vida restante perdida debido a un fallo pasante de acuerdo con el proceso de análisis 36 (FIG. 6). Los fallos pasantes imponen grandes tensiones mecánicas al material aislante dentro del transformador 26 (figura 1) y, por lo tanto, afectan de forma adversa a la vida útil del material aislante a través de una reducción del grado de polimerización. Aunque los gases disueltos de CO + CO₂ 72 no se producen realmente en respuesta a un fallo pasante, se calcula una cantidad equivalente de los gases disueltos de CO + CO₂ 72 para un acontecimiento de fallo pasante 160 (figura 8) que representa esta reducción del grado de polimerización. La cantidad equivalente de los gases disueltos CO + CO₂ 72 se determina para producir valores de ajuste, DG_{FLT} 144 (figura 8) para obtener una medida exacta de una cantidad total de CO + CO₂ en el aceite del transformador.

15 El impacto de la corriente de fallo puede determinarse usando la norma IEEE C57.109-1993, "Guía IEEE para la duración de la corriente de fallo pasante a través del transformador sumergido en líquido", Figuras 1 a 4. IEEE C57.109-1993 divide los transformadores en las clases 1 a IV. Estas clases se crean basándose en el tamaño de los transformadores. Los transformadores de mayor tamaño pertenecen a la clase IV y son transformadores monofásicos de más de 10 megavoltios por amperio (MVA) o transformadores trifásicos mayores de 30 MVA. Es posible que no sea rentable utilizar el control de DGA en línea para transformadores más pequeños que la clase IV. Como tal, la figura 9 proporciona las ecuaciones para los transformadores clase IV solamente. Sin embargo, los expertos en la materia deben reconocer que el concepto puede adaptarse para transformadores que son más pequeños que la clase IV.

20 La norma IEEE C57.109-1993 proporciona límites de operación estándar para transformadores de potencia en forma de curvas de protección contra fallos pasantes. Por ejemplo, la norma IEEE C57.109-1993 proporciona curvas que pueden usarse para determinar la duración máxima de la corriente de fallo pasante para varias categorías de transformadores sumergidos en líquido. La norma IEEE C57.109-1993 proporciona además curvas para cada una de las clases de transformadores que muestran una curva de límite de servicio térmico y una curva de límite de servicio mecánico. Por ejemplo, para los transformadores de clase IV, la curva de límite de servicio mecánico comienza en aproximadamente el 50 % de la corriente máxima de cortocircuito.

25 Con referencia continua a la figura 9, la norma IEEE C57.109-1993 implica que un tiempo máximo de vida a través de la resistencia a fallo pasante K, 166 del transformador 26 (figura 1) puede representarse mediante una ecuación 168, en la que el tiempo, T, es dos segundos e I_{MAX} es la corriente de fallo máxima. De acuerdo con una realización, un porcentaje de vida restante eliminado, % de RL_{FLT} 170, mediante el acontecimiento de fallo pasante 160 (figura 8) es el porcentaje de la resistencia de fallo máxima, K, 166 para el transformador 26. Una corriente de fallo máxima, I_{MAX} 172, puede calcularse mediante una ecuación 174, donde BVA MVA se refiere a megavoltios por amperio base, $V_{SECUNDARIA}$ es la tensión secundaria del transformador 26, y Z_T es la impedancia del transformador 26.

30 La norma IEEE C57.109-1993 implica además que la curva de protección para un transformador de clase IV depende de la impedancia del transformador cuando la corriente de fallo excede aproximadamente el 50 % de la corriente máxima de fallo máxima I_{MAX} 172. Por ejemplo, cuando una corriente de fallo, I_{FLT} 176, es menor que $I_{MAX}/2$, el daño es principalmente térmico y cuando la corriente de fallo, I_{FLT} 176, es mayor que $I_{MAX}/2$, el daño es principalmente mecánico. Consecuentemente, la corriente máxima de fallo, I_{MAX} 172, dividida por dos ($I_{MAX}/2$) se utiliza en el presente documento como un punto de rotura para dos ecuaciones diferentes utilizadas para resolver el porcentaje de vida restante eliminado, % de FL_{FLT} 170.

35 Cuando la corriente de fallo I_{FLT} 176, es mayor que $I_{MAX}/2$, el porcentaje de vida restante eliminado, % de RL_{FLT} 170 se calcula usando una ecuación 178, donde % de RL_{FLT} 170 se calcula como una función de I_{FLT} 176, una duración del fallo, T_{FLT} 180 en segundos y la corriente máxima de fallo, I_{MAX} 172. Por el contrario, cuando la corriente de fallo, I_{FLT} 176, es menor o igual que $I_{MAX}/2$, el porcentaje de vida restante eliminado, % de RL_{FLT} 170 se calcula usando una ecuación 182, donde el % de RL_{FLT} 170 se calcula como una función de la vida a través de la resistencia a fallos, K, 166, determinada a partir de una tabla 184, y la corriente de fallo máxima, I_{MAX} 172.

40 La figura 10 muestra un diagrama 186 de ecuaciones usadas para determinar un valor de ajuste, DG_{FLT} 144, para una cantidad equivalente de gases disueltos debidos a un fallo pasante. En una realización, después de haber eliminado el porcentaje de vida restante, % de RL_{FLT} 170, se determina usando cualquiera de las ecuaciones 178 o 182, como se explica en relación con la figura 9, el valor de ajuste, la DG_{FLT} 144 puede calcularse utilizando la

ecuación del grado de polimerización 112 y el porcentaje de la ecuación de vida restante 122.

En el diagrama 186, se conoce un porcentaje de vida útil restante antes del fallo pasante, denominada en el presente documento como % RL_{PREV} 190. Adicionalmente, se conocen el porcentaje de vida restante eliminado, % de RL_{FLT} 170 y un valor de gas disuelto anterior, denominado en el presente documento DG_{PREV} 192. El valor del gas disuelto anterior, DG_{PREV} 192 puede ser DG_{TOTAL} 114 (figura 5) y el % de RL_{FLT} 170 puede ser el % de RL 124 (figura 5), cada uno de los cuales se determinó durante una repetición previa del proceso de análisis 36 (figura 6). Ahora, el DG_{TOTAL} 114 para la repetición actual del proceso de análisis 36 (figura 6) puede ajustarse a la suma de DG_{PREV} 192 y DG_{FLT} 144, representada por una ecuación 194, y el porcentaje de vida restante, % de RL 124 puede ajustarse a la diferencia entre el porcentaje de porcentaje de vida restante, % de RL_{PREV} 190, y el porcentaje de vida restante eliminado, % de RL_{FLT} 170, tal como se representa mediante una ecuación 196.

La combinación de la ecuación 112 para el grado de polimerización y la ecuación 122 para el porcentaje de vida restante proporciona una ecuación 198 que puede resolverse para DG_{FLT} 144, representada por otra ecuación 200. Así, el valor de ajuste DG_{FLT} 144 representa la cantidad equivalente de gases disueltos (CO + CO₂) 72 debido a un acontecimiento de fallo pasante 160 (figura 160). El valor de ajuste calculado, DG_{FLT} 144, se registra posteriormente en la base de datos de seguimiento 146 (figura 8).

Con referencia de nuevo a la tarea 140 del proceso de análisis (figura 6), después de la determinación de los valores de ajuste de DG_{MANT.} 142 y DG_{FLT} 144, tratados con detalle anteriormente, el proceso de análisis 36 continúa con una tarea 202. En la tarea 202, todos los valores de ajuste DG_{MANT.} 142 (figura 8) y DG_{FLT} 144 (figura 8) de la base de datos de seguimiento 146 (figura 8) para uno en particular de los transformadores 26 (figura 1) se suman y se incluyen con el valor actual de los gases disueltos CO + CO₂, DG_{ACT} 134 (figura 7) para obtener el valor total de los gases disueltos CO + CO₂, valor DG_{TOTAL} 114.

Después de la tarea 202, se realiza una tarea 204. En la tarea 204, se determina el valor del grado de polimerización, valor DP 116, usando el valor DG_{TOTAL} 114 aplicado a la ecuación 112 (figura 5).

A continuación, se realiza una tarea 206. En la tarea 206, el valor del grado de polimerización, valor DP 116, se convierte en una medida de la vida restante para el transformador 26. En particular, la ecuación 122 (figura 5) se resuelve usando el valor del DP 116 para obtener el porcentaje de vida restante, % de RL 124 (figura 5) para el transformador 26.

El proceso de análisis 36 continúa con una tarea 208. En la tarea 208, pueden calcularse medidas adicionales del estado del transformador a partir del porcentaje de vida restante, % de RL 124 y/o para corroborar el porcentaje de vida restante, % de RL 124. Medidas adicionales del estado del transformador pueden incluir, por ejemplo, la predicción de una duración de tiempo hasta el final de la vida del transformador 26, la predicción de una capacidad del transformador 26 para sobrevivir a un acontecimiento de fallo pasante, la predicción de la vida restante basándose en la metodología térmica y así sucesivamente. Estas medidas adicionales del estado del transformador se tratarán a continuación en relación con las figuras 11-13.

Después de la tarea 208, se realiza una tarea 210. En la tarea 210, en la base de datos de las condiciones del transformador 50 (figura 1) se pueden almacenar las diversas medidas de la vida restante, por ejemplo el porcentaje de vida restante, % de RL 124, para el transformador 26 y/o las diversas medidas de la vida restante pueden presentarse a un usuario mediante, por ejemplo visualización 46 (figura 1). La notificación de los resultados del proceso de análisis 36 también puede transmitirse a la parte responsable 58 (figura 1), como se discutirá más adelante en relación con las figuras 14-16.

Después de la tarea 210, una tarea de consulta 212 determina si el proceso de análisis 36 debe continuar. Los elementos de datos 60 pueden estar disponibles a partir del mismo de los transformadores 26 durante un período de tiempo posterior. Además, los elementos 60 de datos pueden estar disponibles para otros transformadores 26 (figura 1) dentro de la instalación 20 (figura 1) para los que se requiere el análisis. De acuerdo con ello, si un usuario desea continuar el análisis en la tarea de consulta 212, el control de proceso vuelve a la tarea 126 para recibir elementos de datos 60 de uno de los monitores de DGA 28 (figura 1) asociados con uno particular de los transformadores 26. Sin embargo, si el usuario desea interrumpir el proceso de análisis 36 en la tarea de consulta 212, el proceso de análisis 36 sale.

La discusión siguiente de las figuras 11-13 proporciona una descripción de ejemplo de medidas adicionales del estado del transformador que se pueden calcular. Debe entenderse que algunos o todos los cálculos tratados con relación a las figuras 11-13 se pueden proporcionar con grado de polimerización, valor de DP 116 (figura 5) y el porcentaje de vida restante, % de RL 124 (figura 5) para su presentación a un usuario.

Con referencia ahora a la figura 11, la figura 11 muestra un diagrama 214 de las ecuaciones utilizadas para predecir una duración hasta el final de vida de uno de los transformadores 26, es decir, FIN DE VIDA (T) 216. Un transformador 26 puede estar diseñado para una vida útil de, por ejemplo, treinta años. Sin embargo, debido a condiciones de funcionamiento adversas, por ejemplo, por acontecimientos de fallo 160 (figura 8), calor, humedad y oxidación, el transformador 26 puede envejecer eficazmente más rápido de lo previsto. En consecuencia, puede ser ventajoso visualizar la vida del transformador, no solo por el porcentaje de vida restante, % de RL, sino,

adicionalmente, por una estimación de cuántos años tiene el transformador 26 hasta que deba reemplazarse. Es decir, un usuario puede encontrar muy informativo para recibir la notificación de que, por ejemplo, a un transformador le queda menos de un ocho por ciento de su vida restante, lo que equivale a tres años de duración hasta el final de la vida.

5 Para estimar la duración hasta el final de la vida útil, FINDEVIDA (T) 216, la ecuación del grado de polimerización 112 puede resolverse para un futuro valor de gas disuelto, DG_{FUTURO} 218, necesario para alcanzar un valor de grado de polimerización (DP) mínimo permisible 116. Debe recordarse en relación con la figura 5 que el valor de DP de doscientos corresponde al final de vida del transformador 26. Por consiguiente, la duración hasta el final de la vida, FINDEVIDA (T) 216 se indica en años para alcanzar el valor de DP 116 de doscientos.

10 En el diagrama 214, se conoce el valor de DP 116 de doscientos.. Adicionalmente, se conoce un valor de gas disuelto anterior, denominado en el presente documento DG_{PREV} 220. El valor anterior del gas disuelto, DG_{PREV} 220, puede ser el DG_{TOTAL} 114 (figura 5) determinado durante una repetición previa del proceso de análisis 36 (figura 6). Por lo tanto, el DG_{PREV} 220 incluye $DG_{MANT.}$ 142 (figura 8) y DG_{FLT} 144 (figura 8). Para encontrar la duración hasta el final de la vida, FINDEVIDA (T) 216, el DG_{TOTAL} 114 puede ajustarse a la diferencia entre DG_{FUTURO} 218 y DG_{PREV} 220, representada por una ecuación 222. Esta diferencia entre DG_{FUTURO} 218 y DG_{PREV} 220 mostrada en la ecuación 222 se aplica al grado de ecuación de polimerización 112, en el que el valor de DP 116 se ajusta a doscientos.

15 La ecuación del grado de polimerización 112 se manipula matemáticamente para resolver el DG_{FUTURO} 218, tal como se representa mediante una ecuación 224. Una vez que se ha calculado el DG_{FUTURO} 218 con relación al valor actual total de los gases disueltos, por ejemplo DG_{PREV} 220, de acuerdo con la ecuación 224, se puede calcular la duración hasta el final de la vida, FINDEVIDA (T) utilizando DG_{FUTURO} 218 y una velocidad de generación de gas 226 para monóxido de carbono (CO) y una velocidad de generación de gas 228 para dióxido de carbono (CO₂). Las velocidades de generación de gas 226 y 228 pueden calcularse como se ha tratado anteriormente en relación con la figura 4, que distingue la velocidad de generación de gas en "estado estacionario", de las características de carga cíclica o periódica. Los expertos en la técnica reconocerán que se pueden emplear alternativamente otras técnicas para determinar las velocidades de generación de gas 226 y 228.

20 En una realización, el DG_{FUTURO} 218 se divide por la suma de las respectivas velocidades de generación de gas 226 y 228, representadas por una ecuación 230 para predecir la duración hasta el final de la vida, FINDEVIDA(T) 216. Por tanto, FINDEVIDA (T) 216 Representa el número de días o años para que uno de los transformadores 26 alcance el valor del grado de polimerización 116 (figura 5) de doscientos, indicando el final de su vida útil restante. FINDEVIDA (T) 216 puede almacenarse posteriormente en la base de datos de las condiciones del transformador 50 (figura 1).

25 La figura 12 muestra un diagrama 232 de ecuaciones utilizadas para determinar la capacidad de un transformador para sobrevivir a un acontecimiento de fallo pasante futuro 160 (figura 8) basado en su medida actual de la vida restante, % de RL 124 (figura 5). De nuevo, debido a condiciones operativas adversas, por ejemplo, acontecimientos de fallo pasante 160, calor, humedad y oxígeno, el transformador 26 puede degradarse a un ritmo acelerado. Por consiguiente, puede ser ventajoso predecir si el transformador 26 es capaz de sobrevivir a un futuro acontecimiento de fallo pasante 160 para tomar decisiones respecto a cuándo y/o si el transformador 26 debe ser reemplazado.

30 Utilizando un ajuste de tiempo de compensación, el T_{CT} 234 para los relés de protección del transformador 26 y un nivel de corriente de fallo predicho, $I_{FLT(FUTURO)}$ 236, basado en la media o la media más una desviación estándar de los acontecimientos de fallo pasante previos 160 (Fig. 8), puede estimarse una predicción de si se puede esperar que el transformador 26 resista el siguiente acontecimiento de fallo pasante 160. En una realización, se puede estimar un porcentaje de vida restante eliminado debido a un futuro acontecimiento de fallo pasante 160, % de $RL_{FLT(FUTURO)}$ 238 utilizando el ajuste de tiempo esperado de compensación del fallo pasante próximo esperado, T_{CT} 234 y el nivel de corriente de fallo predicho, $I_{LT(FUTURO)}$ 236, tal como se representa mediante una ecuación 240.

35 El porcentaje de vida restante eliminado debido a un futuro acontecimiento de fallo pasante 160, % $RL_{FLT(PUTURO)}$ 238 puede compararse con el porcentaje estimado actualmente de vida restante antes de un acontecimiento de fallo pasante futuro, % de RL_{ACT} 242 determinado durante la repetición más reciente del proceso de análisis 36 (figura 6). Si el cálculo del impacto del siguiente acontecimiento de fallo pasante es mayor que el porcentaje de vida restante estimado actualmente, es decir, % de $RL_{FLT(FUTURO)}$ 238 > % de RL_{ACT} 242, puede realizarse una determinación de que es improbable que el transformador 26 sobreviva a un futuro acontecimiento de fallo pasante. En tal caso, se puede presentar un aviso 244 al usuario 58 que lo indique como tal y recomiende reemplazar el transformador 26. Como alternativa, cuando el cálculo del impacto del siguiente acontecimiento de fallo pasante es menor que el porcentaje de vida restante estimado actualmente, es decir, % de $RL_{FLT(FUTURO)}$ 238 < % de RL_{ACT} 242, puede determinarse que es probable que el transformador sobreviva a un futuro acontecimiento de fallo pasante 166. En tal caso, se puede presentar al usuario un aviso 246 que lo indique como tal. El porcentaje de vida restante eliminado debido a un futuro acontecimiento de fallo pasante, es decir, % de $RL_{FLT(FUTURO)}$ 238 y/o cualquiera de los avisos 244 y 246 puede almacenarse posteriormente en la base de datos de las condiciones del transformador 50 (figura 1).

La figura 13 muestra un diagrama 248 de las ecuaciones utilizadas para determinar otra medida de la vida restante del transformador 26. La norma reconocida por la industria IEEE C57.91-1995, "Guía IEEE para cargar

transformadores sumergidos en aceite mineral", sección 5 y anexo I, proporciona una técnica para calcular un porcentaje de pérdida de valor de la vida 250. Esta técnica utiliza la temperatura del punto más caliente dentro del transformador 26 para medir el deterioro del material aislante en el transformador 26 basado en una teoría de la velocidad de reacción de Arrhenius. De acuerdo con una realización, el porcentaje de pérdida de valor de la vida 250 se convierte en un porcentaje de vida restante debido al valor de envejecimiento térmico, % de $RL_{TÉRMINICO}$ 252.

La metodología proporcionada en el diagrama 248 supone que se alcanzará la vida normal del transformador si la temperatura del punto más caliente del transformador es 110 °C durante toda su vida útil y asigna una Por unidad de vida normal de 1. De acuerdo con una realización, Por unidad de vida normal se presenta como cien por cien para ser consistente con el porcentaje de vida restante, % de RL 124 (figura 5) determinado a partir de la ecuación 122 (figura 5). La sección 5 de la norma IEEE C57.91-1995 propone ecuaciones para el "factor de aceleración del envejecimiento" y "envejecimiento equivalente".

Un "factor de aceleración del envejecimiento", F_{AA} 254, se calcula usando una ecuación 256 presentada en el diagrama 248 que representa una temperatura del punto más caliente del devanado, Θ_H , 258. Un valor de "envejecimiento equivalente", F_{EQU} 260 se calcula usando una ecuación 262 también presentada en diagrama 248. A partir de estos valores, el porcentaje de pérdida de vida 250 se puede calcular de acuerdo con la norma IEEE C57.91-1995, Anexo I, y como se representa en el diagrama 248 mediante una ecuación 264. La vida de aislamiento normal es, típicamente, de 180.000 horas a 110 °C basado en la norma IEEE C57.91-1995, Tabla 2. El porcentaje calculado de pérdida de vida 250 se convierte en el porcentaje de vida restante, % $RL_{TÉRMINICO}$ 252 sumando el porcentaje de pérdida de vida 250 en cada intervalo de muestreo, es decir, Δt_n 266 y restando la suma de cien por cien, como se representa en el diagrama 248 mediante una ecuación 268. El porcentaje de vida restante, % de $RL_{TÉRMINICO}$ 252 puede almacenarse posteriormente en la base de datos de las condiciones del transformador 50 (figura 1).

La figura 14 muestra un diagrama de flujo del proceso de notificación 40. El proceso de notificación 40 puede realizarse para informar a una o más partes responsables 58 (figura 1) de los resultados del proceso de análisis 36 incluyendo, por ejemplo, el valor del grado de polimerización (DP) 116 (figura 5), el porcentaje de vida restante, % de RL124 (figura 5), la duración hasta el final de la vida, FINDEVIDA(T) 216 (figura 11), el porcentaje de vida restante, % de $RL_{TÉRMINICO}$ 252 (figura 13), el porcentaje de vida restante eliminado debido a un acontecimiento de futuro fallo pasante, % de $RL_{FLT(FUTURO)}$ 238 (figura 12), la notificación de envejecimiento del transformador, y así sucesivamente. El proceso de notificación presentado en el presente documento tiene fines ilustrativos. Los expertos en la materia comprenderán que la notificación puede realizarse mediante una serie de metodologías.

El proceso de notificación 40 comienza con una tarea 270. En la tarea 270, el procesador 34 (figura 1) accede a la base de datos de las condiciones del transformador 50 (figura 1) y compila las diversas medidas calculadas de la vida del transformador para su presentación a uno o más responsables 58.

Haciendo referencia a las figuras 15-16, la figura 15 muestra un diagrama 272 de aviso 62 de un estado de envejecimiento del transformador que puede presentarse a una o más partes responsables 58 y la figura 16 muestra un gráfico 276 que representa una velocidad de generación de gases 278 de los gases disueltos 72 en el transformador 26 (figura 1) con respecto a una edad 280 del transformador 26. El aviso 62, el gráfico 276 o alguna combinación de los mismos pueden compilarse en la tarea 270 para su presentación a la parte o partes responsables 58.

El aviso 62 incluye un identificador del transformador 68 que identifica uno de los transformadores 26 (figura 1). Las medidas de la vida del transformador presentadas en el aviso 62 incluyen, por ejemplo, el valor estimado del grado de polimerización (DP) 116, el porcentaje de vida restante, % de RL 124 (calculado a partir de los gases disueltos), el porcentaje de vida restante, % de $RL_{TÉRMINICO}$ 252, la duración hasta el final de la vida, FINDEVIDA (T) 216 y el porcentaje de vida restante eliminado debido a un acontecimiento futuro de fallo pasante, % de $RL_{FLT(FUTURO)}$ 238 (figura 12). El aviso 62 puede incluir, adicionalmente, el texto 282 y/o cualquiera de los avisos 244 y 246 (figura 12) en forma del texto que describe el estado del transformador 26.

El aviso 62 se ilustra en el presente documento para retratar la información relativa a la vida del transformador que puede presentarse mediante la ejecución del proceso de notificación 40 (figura 1) a una o más partes responsables 58 de acuerdo con la presente invención. La configuración particular del aviso 62 puede adoptar diversas formas conocidas por los expertos en la materia y puede o no combinarse con información adicional con respecto al transformador 26, los valores 70 (figura 2) para los diversos gases disueltos controlados 72 (figura 2), y así sucesivamente. Además, el aviso 62 no necesita incluir toda la información presentada en el diagrama 272, sino que puede incluir, en su lugar, algún subconjunto de la misma que sea más útil para la parte responsable 58 apropiada.

El gráfico 276 proporciona una técnica adicional para interpretar las diversas medidas del estado del transformador para uno de los transformadores 26 identificados por el identificador del transformador 68. En particular, el gráfico 276 ilustra una relación de tres vías entre una cantidad de CO + CO₂ total formado, la velocidad de formación de CO + CO₂ (es decir, la velocidad de generación de gases 278) determinada, por ejemplo, como se trata en relación con el diagrama 78 (figura 4) y el tiempo de funcionamiento del transformador 26 (es decir, la edad 280). Una muestra de corriente 284 se traza en el gráfico 276. También se puede representar en el gráfico 276 un número seleccionable

de muestras previas 286. Por consiguiente, las muestras 284 y 286 representan una velocidad de degradación del material aislante dentro de uno de los transformadores 26 en función de la velocidad de generación de gas (278) y un tiempo de funcionamiento (es decir, 280) del transformador (26). Además, en el gráfico 276 se puede proporcionar un nivel límite de precaución 288 y un nivel límite anormal 290 para demarcar un intervalo normal 292, un intervalo de precaución 294 y un intervalo anormal 296 de formación de gases disueltos con respecto a la edad 280.

El nivel límite de precaución 288 se ajusta a 0,304 ml/g y la velocidad de generación de gases de $1,156 \times 10^{-6}$ ml/g · h. Adicionalmente, el nivel límite anormal 290 se fija en 1,071 ml/g y la velocidad de generación de gases de $4,076 \times 10^{-6}$ ml/g · h. De acuerdo con una realización, el nivel límite de precaución 288 corresponde al valor del grado de polimerización (DP) 116 (figura 5) de setecientos y el nivel límite anormal 290 corresponde al valor del DP 116 de cuatrocientos treinta. Los valores del DP 116 para el nivel límite de precaución 288 y el nivel límite anormal 290 pueden sustituirse en la ecuación del grado de polimerización 112 (figura 5) para resolver los respectivos valores de DG_{TOTAL} 114 (figura 5), una cantidad de CO + CO₂ total formados. Utilizando estos valores de DG_{TOTAL} calculados 114 y una vida del transformador de treinta años se obtienen las velocidades de generación de gases de $1,156 \times 10^{-6}$ ml/g · h para el nivel límite de precaución 288 y $4,076 \times 10^{-6}$ ml/g · h para el nivel límite anormal 290. En el gráfico 276, la línea recta del nivel límite de precaución 288 muestra el tiempo (es decir, la edad 280) en el que se alcanza el nivel de precaución de 0,304 ml/g para velocidades particulares de formación de CO + CO₂ (es decir, la velocidad de generación de gas 278). Del mismo modo, la línea recta del nivel límite anormal 290 muestra el tiempo (es decir, la edad 280) en el que se alcanza el nivel anormal de 1,071 ml/g para velocidades particulares de formación de CO + CO₂ (es decir, velocidad de generación de gas 278).

El gráfico 276 muestra el progreso del envejecimiento del transformador durante aproximadamente los primeros diez años. Una vida de diseño típica para un transformador es de treinta años, como se representa en el gráfico 276 mediante un marcador de treinta años 298. En este caso, la muestra actual 284 y todas las muestras anteriores 286 revelan que la velocidad de generación de gas 278 para el transformador 26 (figura 1) está dentro del intervalo normal 292 y que se espera que el transformador 26 funcione durante toda su vida de treinta años. Esta vida está representada por una línea de puntos 300 que cruza el marcador de 30 años 298 pero se mantiene por debajo del nivel de límite de precaución 288. A modo de comparación, una muestra futura 302 revela un aumento de la velocidad de generación de gas 278 que todavía está dentro del intervalo normal 292. Sin embargo, a esta velocidad de generación de gas 278, el transformador 26 puede no funcionar durante toda su vida de treinta años, representado por una línea de puntos 304 que cruza el nivel de límite de precaución 288 antes de cruzar el marcador de treinta años 298. Por el contrario, otra muestra futura 306 puede revelar una disminución de la velocidad de generación de gas 278 y se espera que el transformador 26 funcione durante toda su vida de treinta años, representada, de nuevo, por una línea de puntos 308 que cruza el marcador de 30 años 298 pero se mantiene por debajo del nivel de límite de precaución 288. De este modo, el gráfico 276 proporciona una visualización directa de la velocidad de generación de gas 278 de los gases disueltos CO + CO₂ 72 que se correlaciona con la degradación del material aislante en el transformador 26, dentro de los límites 288 y 290 definidos por los valores estimados del grado de polimerización (DP) 116 (figura 5).

Haciendo referencia de nuevo al proceso de notificación posterior 40 (figura 14) después de la compilación de datos en la tarea 270, el proceso 40 puede continuar con una tarea de consulta 310. En la tarea de consulta 310, se puede hacer una determinación de si la degradación del material aislante en el transformador 26 es mayor que un estado de degradación excesiva. Haciendo referencia brevemente al gráfico 276 de ejemplo presentado en la figura 16, se puede designar un estado de degradación excesiva por el nivel límite de precaución 288. Un ejemplo de un estado de degradación excesiva del material aislante con respecto al nivel límite de precaución 288 está representado por la muestra 302 en la que la velocidad de generación de gas 278 ha aumentado lo suficiente para que el transformador 26 pueda no funcionar durante toda su vida de treinta años, representada por la línea de puntos 304 que cruza el nivel límite de precaución 288 antes de cruzar el marcador de treinta años 298.

Cuando la tarea de consulta 310 revela un estado de degradación excesiva, el proceso 40 continúa con una tarea 312 en la que se puede generar un aviso 314 que indique que el material aislante del transformador está sufriendo una degradación excesiva. Después de la tarea 312, el proceso de notificación 40 continúa con una tarea 316. Como alternativa, cuando el transformador 26 no está sufriendo una degradación excesiva de su material aislante, el proceso de notificación 40 también puede continuar con la tarea 316.

En la tarea 316, la notificación del estado del transformador 26 (figura 1) puede presentarse a la parte responsable 58 (figura 1). Esta notificación puede ser el aviso 62 (figura 1) que tiene parte o la totalidad de la información proporcionada en el diagrama 272 (figura 15). Dependiendo del estado del transformador 26, la notificación 62 puede incluir el aviso 314, los avisos 244 o 246 (figura 15) o cualquier otra redacción considerada más adecuada para comunicar la información necesaria a las partes responsables 58. Esta notificación puede incluir, adicionalmente o alternativamente, el gráfico 276. Por lo tanto, en su totalidad, la notificación en la tarea 316 puede proporcionar a las partes responsables 58 un alto nivel de detalle para tomar las decisiones apropiadas con respecto al mantenimiento del transformador, el reemplazo del transformador, etc. Después de la tarea 316, sale el proceso de notificación 40.

En resumen, la presente invención implica un procedimiento de análisis, un medio legible por ordenador que

5 contiene un código ejecutable y un sistema para evaluar el envejecimiento de materiales aislantes de celulosa y
estimar una vida útil restante de transformadores controlados mediante unidades de control. El análisis de acuerdo
con la presente invención proporciona una estimación indirecta del grado de polimerización (DP) de material aislante
en un transformador analizando una cantidad de gases disueltos y, particularmente, monóxido de carbono (CO) y
dióxido de carbono (CO₂) en el aceite del transformador según lo controlado por las unidades de DGA. Esta
estimación del DP puede usarse para estimar una medida de la vida útil restante de un transformador en base a los
valores de gases disueltos recibidos de las unidades de DGA. Los resultados del análisis pueden utilizarse para
determinar un estado de envejecimiento de un transductor, para determinar la capacidad de un transductor para
sobrevivir a un fallo pasante, para determinar cuándo un transductor puede necesitar reparación o, de otro modo,
10 reemplazo y así sucesivamente.

REIVINDICACIONES

1. Un procedimiento (36) para estimar una vida restante (124) de un transformador (26), controlando dicho transformador (26) mediante por un dispositivo de control (28) y dicho procedimiento (36) que comprende:

- 5 recibir (126) elementos de datos (60) recogidos en dicho dispositivo de control (28) que caracterizan una degradación del material aislante en dicho transformador (26) durante el funcionamiento de dicho transformador (26) durante un periodo de tiempo, siendo recibidos dichos elementos de datos (60) en un sistema de procesamiento (30) desde dicho dispositivo de control (28) y representando dichos elementos de datos (60) una cantidad actual (134) de gases disueltos (72) en dicho transformador (26) que se correlaciona con dicha degradación de dicho material aislante en dicho transformador (26); en el que dichos gases disueltos incluyen monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO₂) en aceite de transformador de dicho transformador, desarrollándose dicho monóxido de carbono y dicho dióxido de carbono en dicho transformador a partir de dicha degradación de dicho material aislante;

caracterizado por:

- 15 la determinación (140) de un valor de ajuste (142, 144) para dichos gases disueltos (72) en respuesta a un acontecimiento de fallo pasante y/o mantenimiento (160, 162) que se produce en dicho transformador (26), en el que dicho valor de ajuste es la suma de la cantidad de monóxido de carbono y dióxido de carbono eliminada durante un acontecimiento de mantenimiento y una cantidad de monóxido de carbono y dióxido de carbono disueltos calculada para un acontecimiento de fallo pasante para representar una reducción en el grado de polimerización del material aislante;
- 20 la adición (202) de dicha cantidad actual (134) de dichos gases disueltos (72) con dicho valor de ajuste (144) para obtener una cantidad total (114) de dichos gases disueltos (72);
- la estimación (204) de un valor del grado de polimerización (116) utilizando dicha cantidad total (114) de dichos gases disueltos (72);
- 25 la conversión (206) dicho valor del grado de polimerización (116) en una medida de dicha vida restante (124); y
- la presentación (316) de dicha medida de dicha vida restante (124) a un usuario (58), en el que dichas operaciones de determinación, adición, estimación, conversión y presentación son realizadas por dicho sistema de procesamiento.

2. Un procedimiento (36) de acuerdo con la reivindicación 1, en el que:

- 30 dicha operación de determinación (140) comprende un acontecimiento de mantenimiento (162) en el que dichos gases disueltos (72) se eliminan del aceite del transformador en dicho transformador durante dicho acontecimiento de mantenimiento (162) y un seguimiento (146) de una cantidad (148) de dichos gases disueltos (72) eliminados de dicho aceite del transformador durante dicho acontecimiento de mantenimiento (162), dicha cantidad (148) correspondiente a dicho valor de ajuste (142); y
- 35 dicha operación de adición (202) incluye sumar dicha cantidad actual (134) y dicho valor de ajuste (142) para obtener dicha cantidad total (114) de dichos gases disueltos (72).

3. Un procedimiento (36) de acuerdo con la reivindicación 1 o 2, en el que:

- dicha operación de determinación (140) comprende un acontecimiento de fallo pasante (160) que da como resultado una reducción de dicho grado de polimerización (116), calculando una cantidad equivalente (144) de dichos gases disueltos (72) para dicho transformador (26), representando dicha cantidad equivalente (144) dicha reducción de dicho grado de polimerización (116) debido a dicho acontecimiento de fallo pasante (160) y siguiendo (146) dicha cantidad equivalente (144) calculada para dicho acontecimiento de fallo pasante (160), correspondiendo dicha cantidad equivalente (144) a dicho valor de ajuste (144); y
- 40 dicha operación de adición (202) incluye sumar dicha cantidad actual (134) y dicho valor de ajuste (144) para obtener dicha cantidad total (114) de dichos gases disueltos (72).

4. Un procedimiento (36) de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, que comprende además:

convertir (208) dicha medida de vida restante (124) en una duración prevista hasta el final de la vida (216) de dicho transformador (26); y

presentar (316) dicha duración prevista hasta el final de la vida (216) a dicho usuario (58).

50 5. Un procedimiento (36) de acuerdo con la reivindicación 4, en el que dicha conversión (208) comprende:

- calcular (224) una cantidad futura (218) de dichos gases disueltos (72) para alcanzar un valor mínimo permisible del grado de polimerización (112) con respecto a dicha cantidad total (114) de dichos gases disueltos (72);
- determinar (78) una velocidad de generación de gas (226, 228) para cada uno de dichos gases disueltos (72); y
- 55 utilizar (230) dicha cantidad futura (218) y dicha velocidad de generación de gas (226, 228) para cada uno de dichos gases disueltos (72) para determinar dicha duración prevista hasta el final de la vida (216) de dicho transformador (26).

6. Un procedimiento (36) de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, que comprende además:
 predecir (208), en respuesta a dicha medida de vida restante (124), que dicho transformador (26) es improbable que resista un acontecimiento (160) futuro de fallo pasante; y
 comunicar (316) un aviso (244) a dicho usuario (58) de que dicho transformador (26) es improbable que resista dicho acontecimiento (160) futuro de fallo pasante.
7. Un procedimiento (36) de acuerdo con la reivindicación 6, en el que dicha operación de reducción (208) comprende:
 estimar (240) una segunda medida de una vida restante (238) eliminada debido a dicho acontecimiento futuro(160) de fallo pasante;
 comparar dicha segunda medida de la vida restante (238) eliminada debido a dicho acontecimiento futuro de fallo pasante con dicha medida de dicha vida restante (242); y
 comprobar que dicho transformador (26) es improbable que resista dicho acontecimiento (160) futuro de fallo pasante cuando dicha medida (242) es menor que dicha segunda medida (238).
8. Un procedimiento (36) de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en el que dicha medida de dicha vida restante (124) es una primera medida de dicha vida restante (124), y dicho procedimiento (36) comprende además:
 recibir periódicamente (208) una temperatura de devanado (258) de dicho transformador (26);
 calcular (262) un factor de envejecimiento efectivo (260) del aislamiento del transformador en respuesta a dicha temperatura de devanado (258);
 determinar (268) una segunda medida de dicha vida restante (252) en respuesta a dicho factor de envejecimiento efectivo (260) de dicho aislamiento de transformador; y
 correlacionar (270) dichas primera y segunda medidas de dicha vida restante (124, 252).
9. Un procedimiento (36) de acuerdo con la reivindicación 1, que comprende además:
 determinar (78), a partir de dichos elementos de datos (60), una velocidad de generación de gas (80) para dichos gases disueltos (72); y
 determinar (276) una velocidad de degradación de dicho material aislante como una función de dicha velocidad de generación de gas (278) y un tiempo de funcionamiento (280) de dicho transformador (26).
10. Un procedimiento (36) de acuerdo con la reivindicación 9, que comprende además:
 determinar (310) que dicha velocidad de degradación de dicho material aislante es un estado de la velocidad de degradación excesiva; y
 transportar (316) un aviso (312) de dicho estado de velocidad de degradación excesiva a dicho usuario (58).
11. Un sistema de procesamiento (30) para estimar una vida restante (124) de un transformador (26) controlado por un dispositivo de control (28) que comprende:
 un procesador (34);
 un elemento de entrada (42), en comunicación con dicho procesador (34), para recibir elementos de datos (60) desde dicho dispositivo de control (28), estando asociados dichos elementos de datos (60) con el funcionamiento de dicho transformador (26) durante un periodo de tiempo;
 medios para instruir dicho procesador (34) para realizar operaciones que comprenden:
 recibir (126) dichos elementos de datos (60) recogidos en dicho dispositivo de control (28) que caracterizan una degradación del material aislante en dicho transformador (26) durante el funcionamiento de dicho transformador (26) durante un periodo de tiempo, siendo recibidos dichos elementos de datos (60) en un sistema de procesamiento (30) desde dicho dispositivo de control (28) y representando dichos elementos de datos (60) una cantidad actual (134) de gases disueltos (72) en dicho transformador (26) que se correlaciona con dicha degradación de dicho material aislante en dicho transformador (26); incluyendo dichos gases disueltos (72) monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO₂) en aceite de transformador de dicho transformador (26), desarrollándose dicho monóxido de carbono y dicho dióxido de carbono en dicho aceite del transformador a partir de dicha degradación de dicho material aislante;
 calcular (128) dicha cantidad actual (134) de dichos gases disueltos en respuesta a un peso (138) de dicho material aislante y un volumen (136) de dicho aceite de transformador en dicho transformador;
- 50 caracterizado por:**
 la determinación (140) de un valor de ajuste (142, 144) para dichos gases disueltos (72) en respuesta a un acontecimiento de fallo pasante o mantenimiento (160, 162) que se produce en dicho transformador (26), en el que dicho valor de ajuste es la suma de la cantidad de monóxido de carbono y dióxido de carbono eliminada durante un acontecimiento de mantenimiento y una cantidad de monóxido de carbono y dióxido de carbono

- disueltos calculada para un acontecimiento de fallo pasante para representar una reducción en el grado de polimerización del material aislante;
 la adición (202) de dicha cantidad actual (134) de dichos gases disueltos (72) con dicho valor de ajuste (142, 144) para obtener una cantidad total (114) de dichos gases disueltos (72);
 5 la estimación (204) de un valor del grado de polimerización (116) utilizando dicha cantidad total (114) de dichos gases disueltos (72);
 la conversión (206) dicho valor del grado de polimerización (116) en una medida de dicha vida restante (124);
 la conversión (208) de dicha medida de vida restante (124) en una duración prevista hasta el final de la vida (216) de dicho transformador (26); y
 10 la presentación (316) de dicha medida de dicha vida restante (124) y dicha duración prevista hasta el final de la vida (216) de dicho transformador (58).
12. Un sistema (30) de acuerdo con la reivindicación 11, en el que:
- dicho sistema comprende un medio de almacenamiento legible por ordenador (54) acoplado a dicho procesador;
 y
 15 dichos medio para instruir a dicho procesador (34) para realizar operaciones comprende un código ejecutable (36) registrado en dicho medio de almacenamiento legible por ordenador (54).
13. Un sistema (30) de acuerdo con reivindicación 11 o 12, en el que dicho medio para instruir dicho procesador (34) para llevar a cabo operaciones instruye adicionalmente a dicho procesador para realizar las operaciones de:
- 20 identificar (140) un acontecimiento de mantenimiento (162) en el que dichos gases disueltos (72) se eliminan del aceite del transformador en dicho transformador (26) durante dicho acontecimiento de mantenimiento (162);
 seguir (146) una cantidad (148) de dichos gases disueltos (72) retirados de dicho aceite del transformador durante dicho acontecimiento de mantenimiento (162), correspondiendo dicha cantidad (148) a dicho valor de ajuste (142); y
 25 sumar (202) dicha cantidad actual (134) y dicho valor de ajuste (142) para obtener dicha cantidad total (114) de dichos gases disueltos (72).
14. Un sistema (30) de acuerdo con reivindicación 11 o 12, en el que dicho medio para instruir dicho procesador (34) para llevar a cabo operaciones instruye adicionalmente a dicho procesador para realizar las operaciones de:
- 30 identificar (140) un acontecimiento de fallo pasante (160) que da como resultado una reducción de dicho grado de polimerización (116);
 calcular una cantidad equivalente (144) de dichos gases disueltos (72) para dicho transformador (26), representando dicha cantidad equivalente (144) dicha reducción de dicho grado de polimerización (116) debido a dicho acontecimiento de fallo pasante (160);
 seguir (146) de dicha cantidad equivalente (144) calculada para dicho acontecimiento de fallo pasante (160), correspondiendo dicha cantidad equivalente (144) a dicho valor de ajuste (144); y
 35 sumar (202) dicha cantidad actual (134) y dicho valor de ajuste (144) para obtener dicha cantidad total (114) de dichos gases disueltos (72).
15. Un sistema (30) de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 11 a 14, en el que dicho medio para instruir dicho procesador (34) para llevar a cabo operaciones instruye adicionalmente a dicho procesador para realizar las operaciones de:
- 40 calcular (224) una cantidad futura (218) de dichos gases disueltos (72) para alcanzar un valor mínimo permisible del grado de polimerización (112) con respecto a dicha cantidad total (114) de dichos gases disueltos (72);
 determinar (78) una velocidad de generación de gas (226, 228) para cada uno de dichos gases disueltos (72); y
 utilizar (230) dicha cantidad futura (218) y dicha velocidad de generación de gas (226, 228) para cada uno de
 45 dichos gases disueltos (72) para determinar dicha duración prevista hasta el final de la vida (216) de dicho transformador (26).
16. Un sistema (30) de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 11 a 14, en el que dicho medio para instruir dicho procesador (34) para llevar a cabo operaciones instruye adicionalmente a dicho procesador para realizar las operaciones de:
- 50 determinar (78), a partir de dichos elementos de datos (60), una velocidad de generación de gas (278) para dichos gases disueltos (72); y
 determinar (276) una velocidad de degradación de dicho material aislante como una función de dicha velocidad de generación de gas (278) y un tiempo de funcionamiento (280) de dicho transformador (26).

FIG. 1

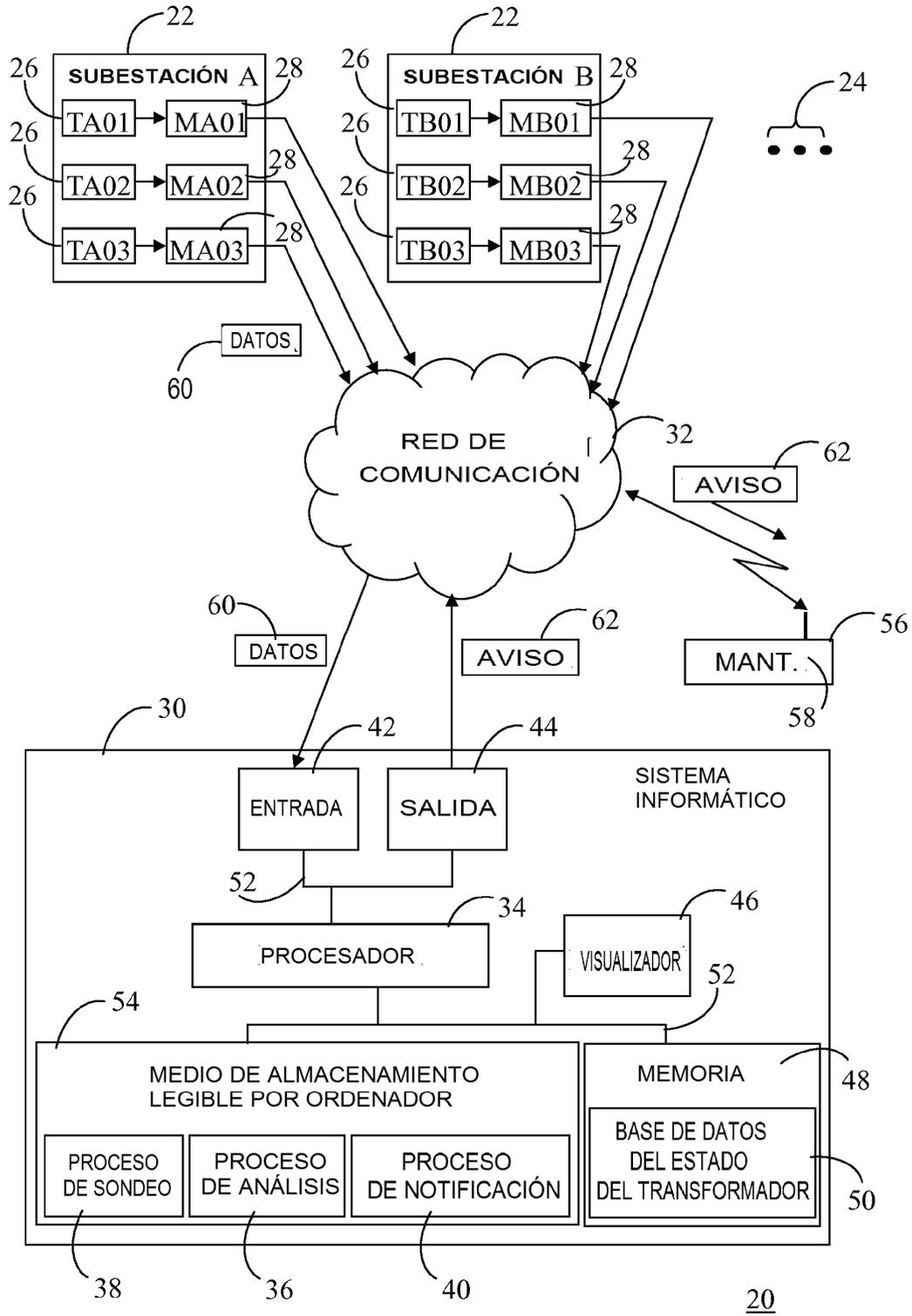


FIG. 2

74

60

72

ID DEL TRANSFORMADOR	H ₂	O ₂	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆
TA01	10	750	55	400	25	0	2	10

64

68

70

FIG. 3

76

60

72

ID DEL TRANSFORMADOR	H ₂	O ₂	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆
TA01	35	900	310	1100	6	0	0	0

66

68

70

FIG. 4

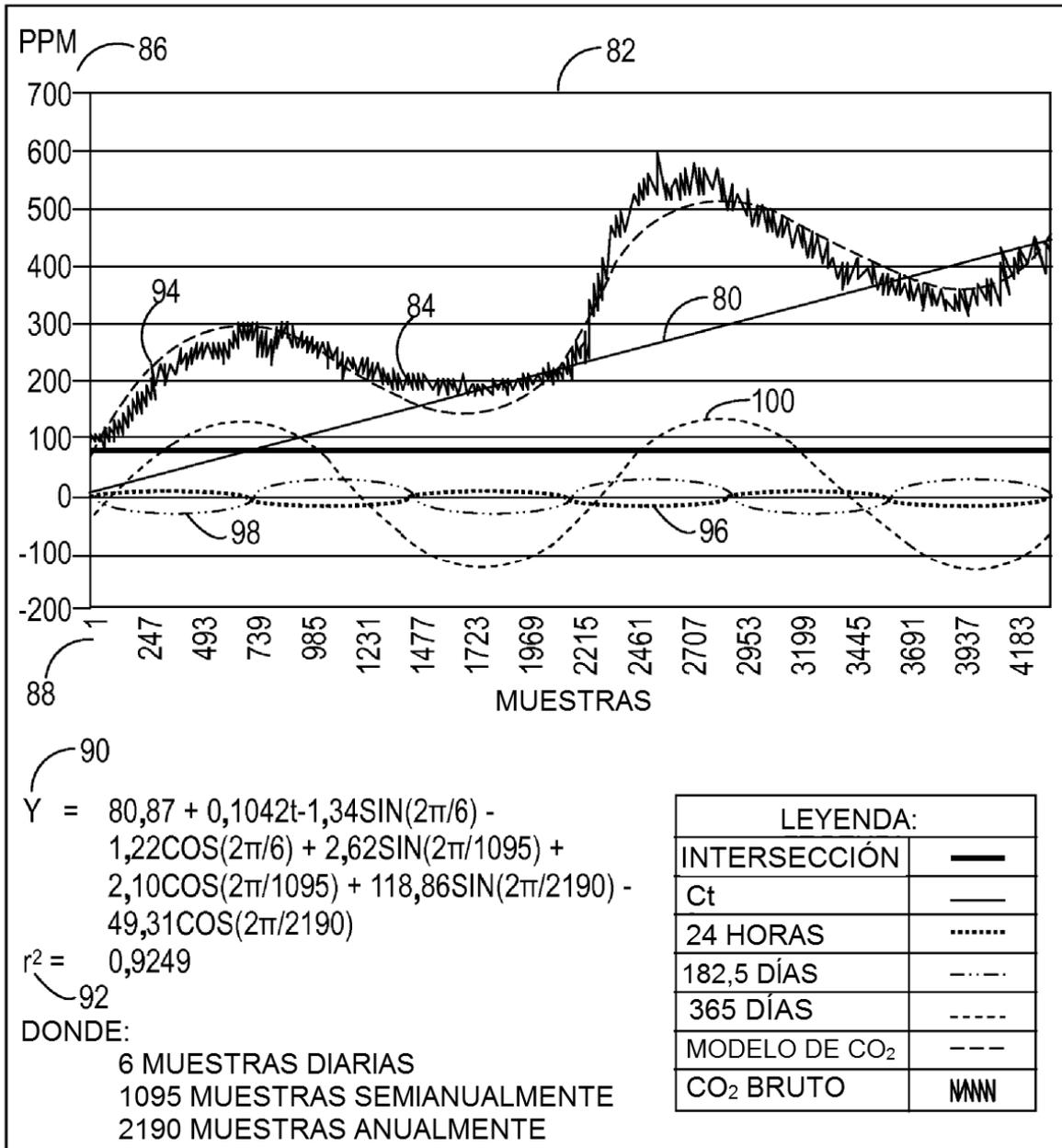


FIG. 5

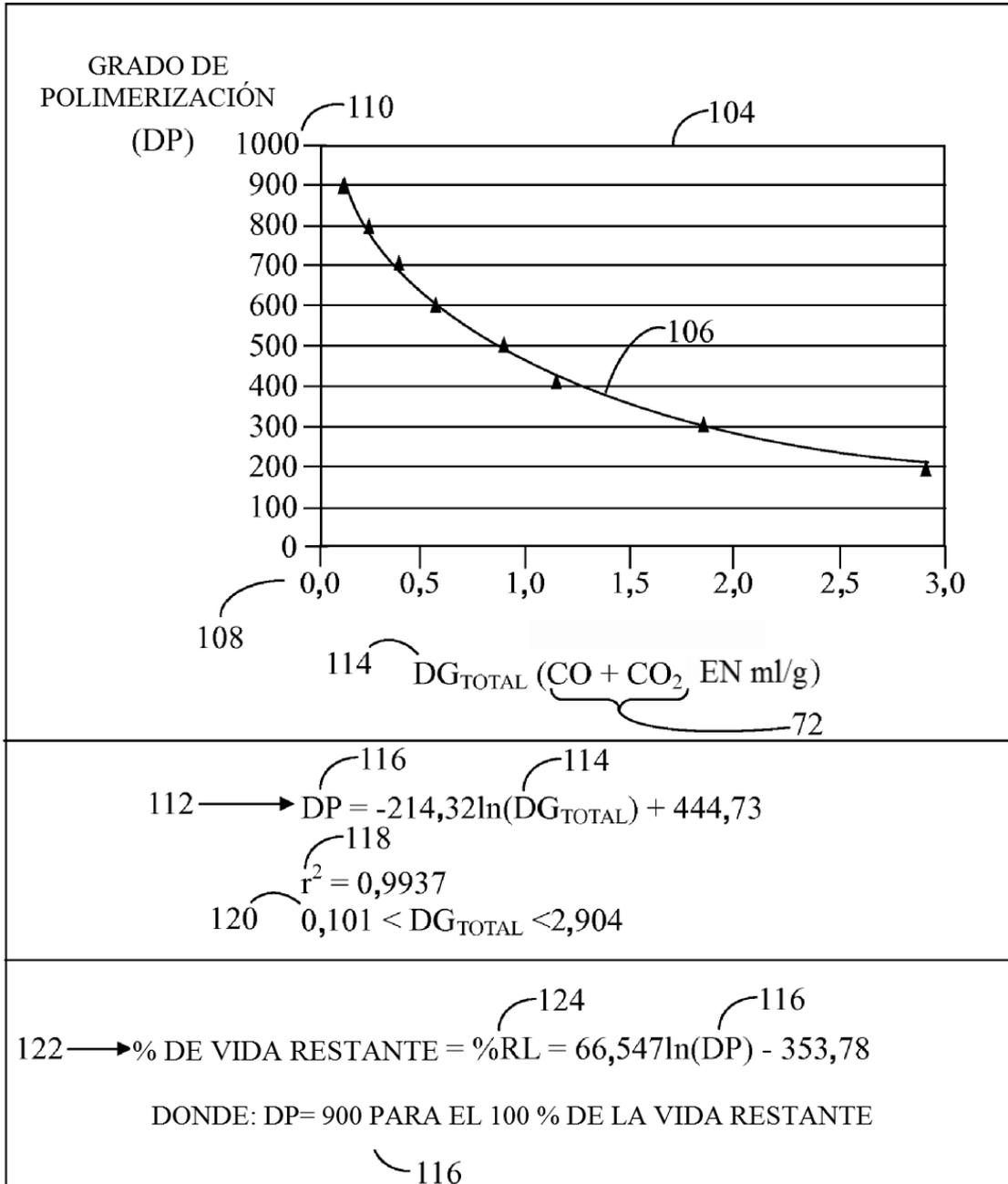


FIG. 6

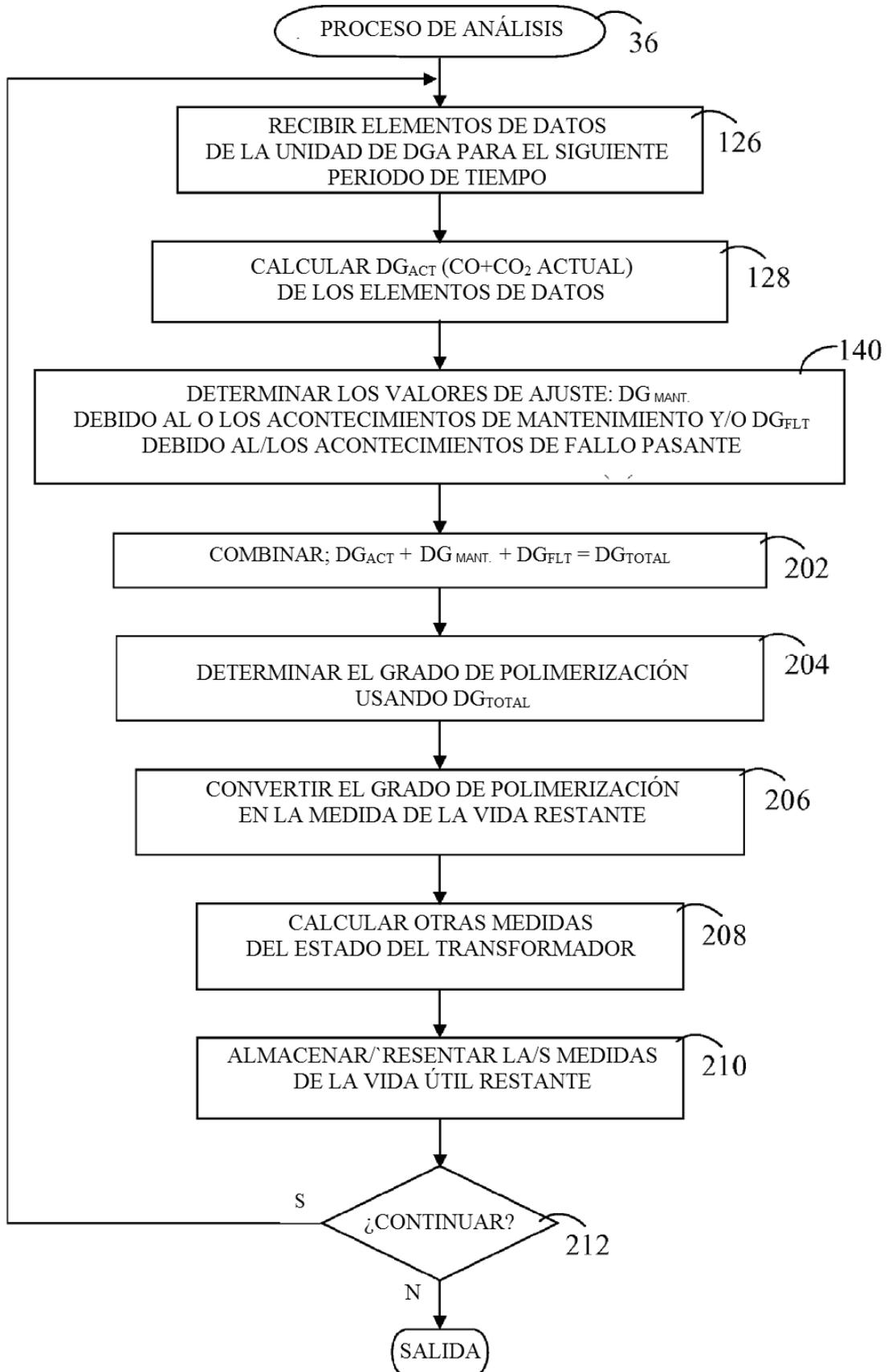


FIG. 7

CONVERTIR LOS ELEMENTOS DE DATOS
EN GASES DISUELTOS EN MILILITROS POR GRAMO
EN RELACIÓN CON EL VOLUMEN DE ACEITE Y EL PESO DEL MATERIAL AISLANTE
DENTRO DEL TRANSFORMADOR

$$\text{DG}_{\text{ACT}} \text{ (ml/g)} = \frac{\frac{[(\text{CO} + \text{CO}_2) \text{ (ppm)}]}{1000} * [\text{X}(\text{gal})] * 3,7854(1/\text{gal})}{[\text{Y}(\text{lb})] * 453,59237(\text{g/lb})}$$

DONDE:
 (CO + CO₂)= ELEMENTOS/VALORES DE DATOS EN PARTES POR MILLÓN
 X= VOLUMEN DE ACEITE DENTRO DEL TRANSFORMADOR
 Y= PESO DEL MATERIAL AISLANTE DENTRO DEL TRANSFORMADOR

FIG. 8

ID	FECHA/ HORA	ACONTECIMIENTO	DG _{MANT.}		DG _{FLT} (ppm)
			CO (ppm) ELIMINADO	CO ₂ (ppm) ELIMINADO	
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
TA01	14/3/1999	FALLO PASANTE			154
TA01	7/11/2003	FALLO PASANTE	148	148	212
TA01	2/12/2003	MANT.	227	923	
TA02	15/6/2002	FALLO PASANTE	162	148	191
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

FIG. 9

170

ENCONTRAR LA VIDA RESTANTE ELIMINADA DEBIDO AL FALLO PASANTE: %RL_{FLT}

RESISTENCIA AL FALLO PASANTE (K) DE LA VIDA MÁXIMA DEL TRANSFORMADOR:

172 $K = I_{MÁX}^2 T$ 172 ← 168

172 DONDE: $I_{MÁX}^2 =$ CORRIENTE DE FALLO MÁXIMO
T = 2 SEGUNDOS

DETERMINAR EL % DE RL_{FLT} COMO PORCENTAJE DE LA RESISTENCIA AL FALLO PASANTE (K) DE LA VIDA MÁXIMA DEL TRANSFORMADOR

CALCULAR LA CORRIENTE DE FALLO MÁXIMA:

172 $I_{MÁX} = \frac{MVA \text{ BASE}}{\sqrt{3} \times V_{SECUNDARIA} \times Z_T}$ ← 174

DONDE: BASE MVA ES MEGAVOLTIOS POR AMPERIO BASE
V_{SECUNDARIA} ES LA TENSIÓN SECUNDARIA DEL TRANSFORMADOR
Z_T ES LA IMPEDANCIA DEL TRANSFORMADOR

DAÑO MECÁNICO:

172 $I_{FLT} > I_{MÁX}/2$ 172 176 180 ← 178

POR TANTO: $\%RL_{FLT} = \frac{I_{FLT}^2 \times T_{FLT}}{I_{MÁX}^2 \times 2 \text{ SEGUNDOS}}$

176 DONDE: I_{FLT} ES LA CORRIENTE DE FALLO
180 T_{FLT} ES LA DURACIÓN DEL FALLO, SEGUNDOS 172

DAÑO TÉRMICO:

176 $I_{FLT} \leq I_{MÁX}/2$ ← 182

POR TANTO: $\%RL_{FLT} = \frac{K}{I_{MÁX}^2 \times 2 \text{ SEGUNDOS}}$ 170 172 166

DONDE: K SE DETERMINA A PARTIR DE LA TABLA
 I_{FLT_PU} ES LA CORRIENTE DE FALLO EXPRESADA EN TIEMPOS DE LA CORRIENTE BASE NORMAL

$I_{BASE} = \frac{MVA \text{ BASE}}{\sqrt{3} \times V_{SECUNDARIA} \times Z_T}$ 184

I_{FLT_PU}	Z _T	K
4,1	12%	1,650
4,9	10%	1,320
6,2	8%	1,230
7,0	7%	1,275
8,0	6%	1,150
9,8	5%	1,250
NA	≤4%	$I_{FLT}^2 T$

FIG. 10

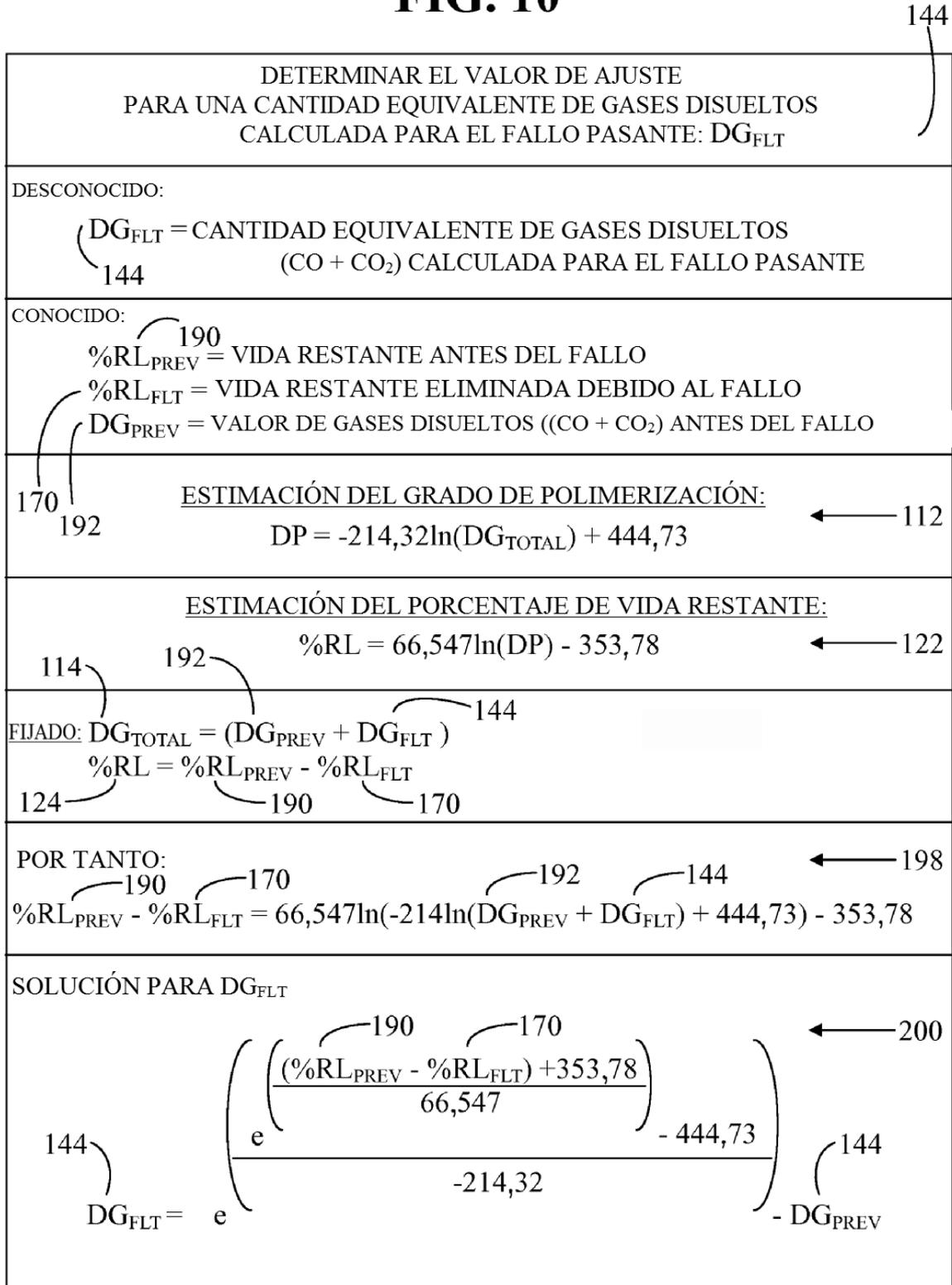


FIG. 11

PREDECIR LA DURACIÓN HASTA EL FIN DE VIDA DEL TRANSFORMADOR: FINDEVIDA (T) 216	
DESCONOCIDO:	218 DG_{FUTURO} = ESTIMACIÓN DE UN VALOR FUTURO REQUERIDO DE FASES DISUELTOS TOTALES AL FINAL DE LA VIDA DEL TRANSFORMADOR 216 $FINDEVIDA(T)$ = DURACIÓN DE TIEMPO PREVISTA HASTA EL FINAL DE LA VIDA DEL TRANSFORMADOR
CONOCIDO:	116 $DP = 200$ 220 DG_{PREV} = VALOR DE GASES DISUELTOS (CO + CO ₂) TOTALES MÁS RECIENTE
ESTIMACIÓN DEL GRADO DE POLIMERIZACIÓN: $DP = -214,32 \ln(DG_{TOTAL}) + 444,73$ ← 112	
FIJADO:	$DG_{TOTAL} = DG_{FUTURO} - DG_{PREV}$ ← 222
POR TANTO:	$200 = -214,32 \ln(DG_{FUTURO} - DG_{PREV}) + 444,73$ ← 112
RESOLVER PARA DG_{FUTURO}	$DG_{FUTURO} = e^{\left(\frac{444,73 - 200}{214,32}\right)} + DG_{PREV}$ ← 224
RESOLVER PARA FINDEVIDA(T):	$FINDEVIDA(T) = \frac{DG_{FUTURO} \text{ (ml/g)}}{VELOCIDAD_{CO} \text{ (ppm/día)} + VELOCIDAD_{CO_2} \text{ (ppm/día)}}$ ← 230
DONDE:	226 $VELOCIDAD_{CO}$ (ppm/día) = VELOCIDAD DE GENERACIÓN DE GASES PARA CO 228 $VELOCIDAD_{CO_2}$ (ppm/día) = VELOCIDAD DE GENERACIÓN DE GASES PARA CO ₂

FIG. 12

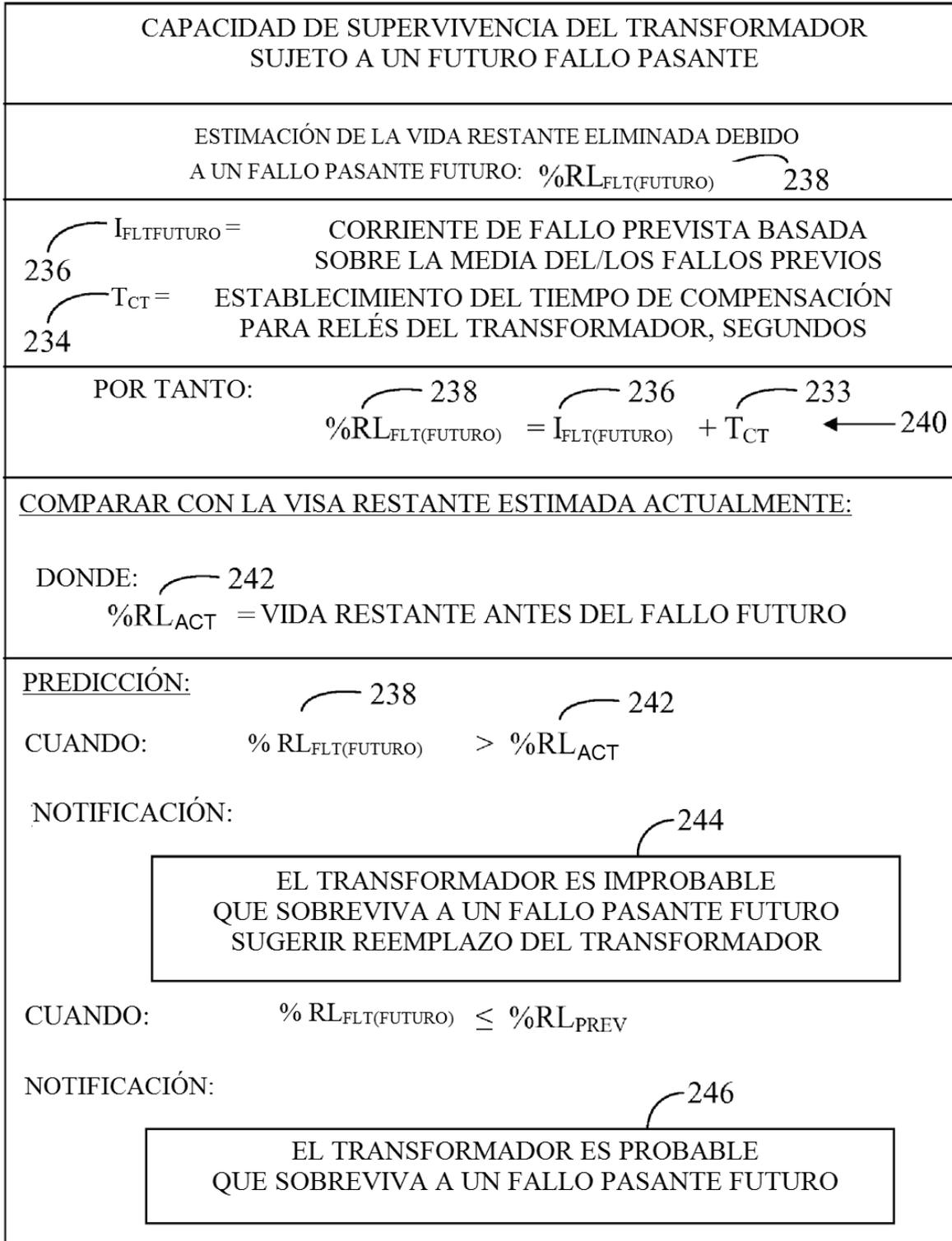


FIG. 13

252

UTILIZAR EL PROCEDIMIENTO TÉRMICO PARA DETERMINAR OTRA MEDIDA DE LA VIDA RESTANTE: % RL _{TÉRMICA}	
RECIBIR: TEMPERATURA DEL PUNTO MÁS CALIENTE DEL DEVANADO DEL TRANSFORMADOR, °C: Θ_H	
CALCULAR EL FACTOR DE ACELERACIÓN DEL ENVEJECIMIENTO, F_{AA} :	
$F_{AA} = \text{EXP} \left(\frac{1500}{383} - \frac{1500}{\Theta_H} \right)$	← 256
CALCULAR EL FACTOR DE ENVEJECIMIENTO EQUIVALENTE, F_{EQA} :	
$F_{EQA} = \frac{\sum_{n=1}^N F_{AA_n} \Delta t_n}{\sum_{n=1}^N \Delta t_n}$	← 262
DONDE:	
F_{EQA}	ES EL FACTOR DE ENVEJECIMIENTO EQUIVALENTE PARA EL PERIODO DE TIEMPO TOTAL
n	ES EL ÍNDICE DEL INTERVALO DE TIEMPO, t
N	ES EL NÚMERO TOTAL DE INTERVALOS DE TIEMPO
F_{AA_n}	ES EL FACTOR DE ACELERACIÓN DEL ENVEJECIMIENTO PARA LA TEMPERATURA QUE EXISTE DURANTE EL INTERVALO DE TIEMPO
Δt_n	ES EL INTERVALO DE TIEMPO, HORAS
CALCULAR EL % DE PÉRDIDA DE VIDA:	
$\% \text{ PÉRDIDA DE VIDA} = \frac{F_{EQA} \times \Delta t_n \times 100}{\text{VIDA DE AISLAMIENTO NORMAL}}$	← 264
CONVERTIR EL % DE PÉRDIDA DE VIA EN % DE VISA RESTANTE; % RL _{ENVEJECIMIENTO} :	
$\% \text{RL}_{TÉRMICA} = 100\% - \% \text{ de pérdida de vida}$	← 268

FIG. 14

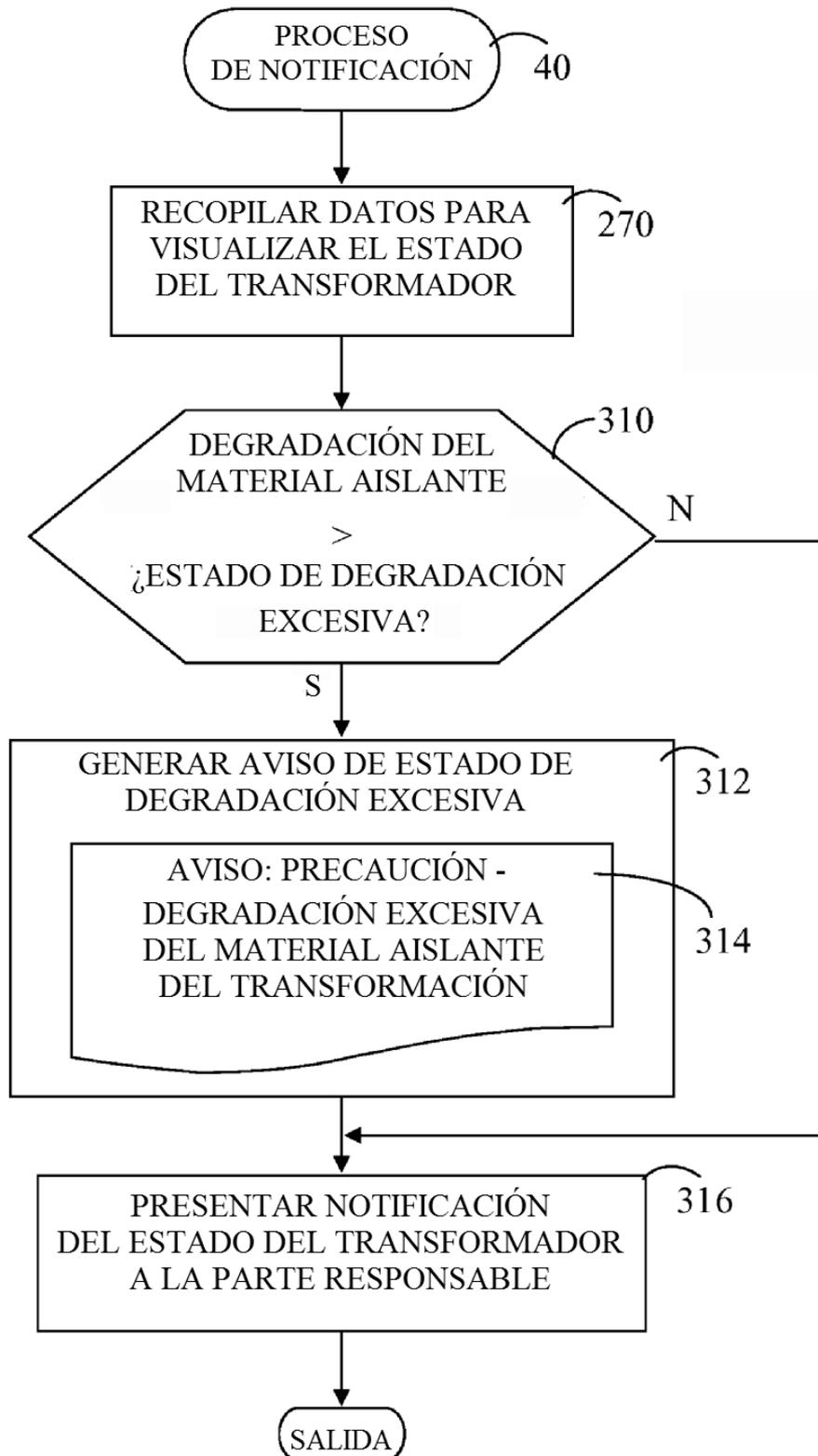
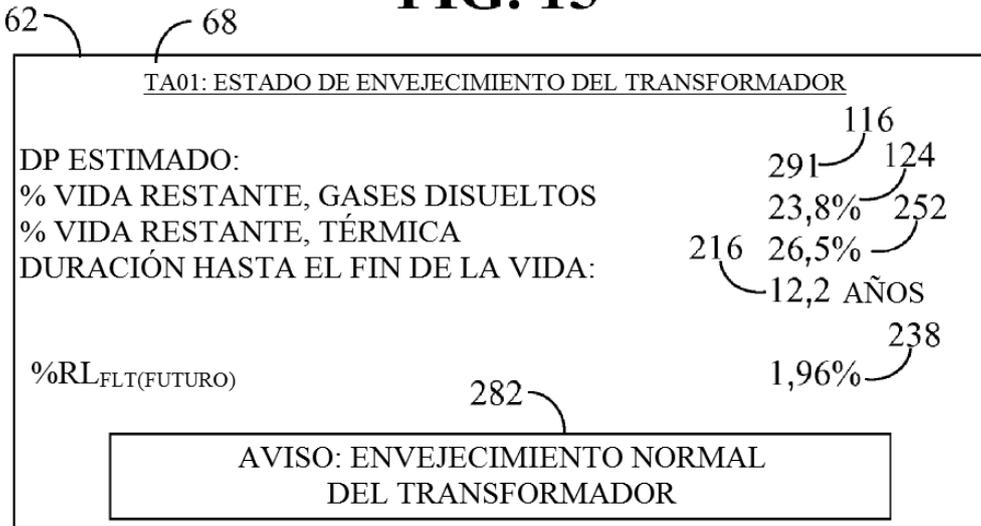


FIG. 15



272

FIG. 16

