

Índice de Salud para Transformadores de Potencia Inmersos en Aceite Mineral con Voltajes entre 69kV y 230kV usando Lógica Difusa

Andrés F. Cerón⁽¹⁾, Diego F. Echeverry⁽¹⁾, Guillermo Aponte⁽¹⁾, Andrés A. Romero⁽²⁾

(1) Grupo de Investigación en Alta Tensión, GRALTA. Universidad del Valle, Ciudad Universitaria Meléndez, Calle 13 N° 100-00, Cali-Colombia. (e-mail: andres.ceron@correounivalle.edu.co).

(2) Instituto de Energía Eléctrica, IEE-UNSJ-CONICET. Universidad Nacional de San Juan - CONICET, Av. Libertador General San Martín 1109 (Oeste), San Juan-Argentina. (e-mail: aromero@iee.unsj.edu.ar).

Recibido Jun. 25, 2014; Aceptado Sep. 22, 2014; Versión final recibida Nov. 21, 2014

Resumen

Este artículo proporciona una metodología para calcular el índice de salud para el sistema de aislamiento papel-aceite en transformadores de potencia con tensión nominal entre 69kV y 230kV, utilizando lógica difusa. Se presenta una revisión detallada de los límites de aceptación existentes, según la normativa vigente, para cada uno de las variables de entrada: contenido de humedad, acidez, rigidez dieléctrica, factor de disipación del aceite, gases disueltos y el contenido de furanos. Con lo anterior se obtienen las funciones de membresía y se relacionan los seis valores de entrada con el valor de salida, que representa el índice de salud del transformador. Usando datos proporcionados por una empresa del sector eléctrico colombiano para una muestra de 18 transformadores de potencia, se calcula el índice de salud y se presenta un análisis de los resultados. El índice de salud puede ser usado para establecer un ranking de los transformadores de potencia para priorizar por ejemplo la asignación de recursos y definir en mejor forma las actividades de mantenimiento.

Palabras clave: transformador de potencia, gestión de activos, índice de salud, lógica difusa

Health Index for Power Transformers Immersed in Mineral Oil with Voltages between 69kV and 230kV Using Fuzzy Logic

Abstract

This article provides a methodology for calculating the health index for oil-paper insulation system in power transformers with rated voltage between 69kV and 230kV, using fuzzy logic. The article also provides a detailed review of the existing limits of acceptance, according to the present standards and for each of the six input variables: moisture content, acidity, dielectric strength, dissipation factor oil, dissolved gas and furan content. With this information, the membership functions are obtained and the six input values are related to the output value, which represents the health index of the transformer. Using data provided by a company of the Colombian electricity sector for 18 power transformers the health index is calculated and the results are analyzed. The health index could be useful for establishing a ranking of the state of power transformers with the aim of better assigning resources and maintenance activities.

Keywords: power transformer, asset management, health index, fuzzy logic

INTRODUCCIÓN

El transformador de potencia es uno de los activos más importantes de la cadena de suministro de energía eléctrica. Este equipo es muy costoso y puede alcanzar hasta el 60% del total de la inversión de una subestación, además es fundamental para la operación de las redes de transmisión y distribución de energía eléctrica (Naderian et al, 2009). Por tanto, es necesario desarrollar técnicas fiables y eficaces para evaluar la condición del transformador y que faciliten la toma de decisiones que inciden en la operación y el mantenimiento del transformador (Ashkezari et al., 2013; Romero et al, 2012). Existen métodos para determinar el índice de salud, los cuales han sido propuestos para la evaluación del estado del transformador de potencia. Tales métodos, son herramientas útiles para combinar la información técnica disponible de un transformador, con el fin de proporcionar un único índice cuantitativo que representa su estado general de salud. Mientras que el índice de salud resultante no refleja el estado de cualquier parte en particular de un transformador con respecto a la reparación, representa el nivel de degradación a largo plazo, una condición no determinada fácilmente mediante inspección rutinaria (Abu Elanien et al., 2012).

El índice de salud permite a las compañías eléctricas clasificar sus transformadores en: 1) los que necesitan inversión inmediata de capital para renovación o reemplazo, 2) los que necesitan renovación o mantenimiento en un futuro próximo, pero no inmediato y 3) los que están en buen estado y no necesitan ninguna acción. El índice de salud, también puede ser útil para la planificación de estrategias de mantenimiento en transformadores que presenten signos de deterioro acelerado no correspondiente a su tasa natural de envejecimiento (Young et al, 2010).

En la literatura se han realizado pocos estudios para obtener el índice de salud para los transformadores (Abu Elanien et al., 2012; Ashkezari et al., 2012; Ashkezari et al., 2013; Naderian et al, 2009; Young et al., 2010), sin embargo, las metodologías descritas en la literatura para calcular el índice de salud todavía sufren algunas limitaciones. Por ejemplo, los índices de salud calculados podrían no ser compatibles, esto se debe a que la importancia y asignación de un factor de ponderación apropiado para cada prueba en el cálculo del índice de salud son de carácter subjetivo, es decir, son basados en la experiencia de los expertos de transformadores, que difiere de un experto a otro, igualmente sucede con la normatividad asociada (Ashkezari et al., 2012).

Para hacer frente a estas limitaciones, la contribución y el objetivo principal del presente artículo es facilitar una metodología que unifica y simplifica el diagnóstico del sistema de aislamiento papel-aceite para transformadores de potencia con tensión nominal entre 69kV y 230kV, reduciendo las apreciaciones del personal a cargo de la gestión de estos equipos. Esto se logra utilizando adecuadamente la teoría de sistemas difusos, en conjunto con la normatividad vigente (CIGRE 445, 2011; IEC 60296, 2003; IEC 60422, 2013; IEC 60599, 2007; IEC 61198, 1993; IEEE C57.104, 2008; IEEE C57.106, 2006; IEEE C57.12.90, 2010; IEEE C57.140, 2006; IEEE C57.152, 2013) y el conocimiento de expertos reconocidos en el tema (Abu Elanien et al., 2012; Flores, 2011; Lin y Gu, 2011; Lundgaard et al., 2004; Martínez, 2010; Naderian et al, 2009; Zhang y Gockenbach, 2008; Interior D., 2003; Army D., 1998). Esto permite clasificar en función de la condición estos equipos, logrando establecer prioridades de mantenimiento. La metodología es empleada para calcular el índice de salud, empleando los resultados de mediciones reales en un parque de transformadores de una compañía eléctrica colombiana.

ÍNDICE DE SALUD

El índice de salud se obtiene de la combinación de la información resultante de pruebas de diagnóstico que se realizan a un transformador de potencia, por lo tanto es necesario contar con un eficiente sistema de adquisición y almacenamiento de los datos (Mariño et al., 2004). Su objetivo, es proporcionar un único índice cuantitativo que representa su estado general de salud. El resultado de este índice varía desde cero (transformadores en óptimas condiciones) hasta uno para (transformadores deteriorados).

Algunas de las metodologías identificadas para calcular el índice de salud del transformador, se basan en establecer relaciones lineales entre los resultados de los diferentes ensayos realizados a este equipo (Lara y Liñán, 2009). En estas metodologías se plantea que a cada resultado se le debe asignar un valor relativo y a cada prueba un peso específico de acuerdo a su importancia; luego se realiza por cada prueba el producto entre valor relativo y el peso específico y finalmente se deben sumar todos los productos obtenidos; el valor resultante de la sumatoria corresponde a la condición del transformador evaluado. De esta forma, se pueden comparar los valores obtenidos para cada transformador y clasificar su estado en función de la condición técnica. Sin embargo, esta técnica presenta dos desventajas: La primera es que los límites de aceptación entregados por la normatividad actual (CIGRE 445, 2011; IEC 60296, 2003; IEC 60422, 2013; IEC 60599, 2007; IEC 61198, 1993; IEEE C57.104, 2008; IEEE C57.106, 2006; IEEE C57.12.90, 2010; IEEE C57.140, 2006; IEEE C57.152, 2013) difieren entre si y además contienen un

margen de incertidumbre, por lo tanto aparece una región difusa entre los límites. La segunda desventaja es que la asignación de pesos a las pruebas se basa en la experiencia, lo cual puede diferir entre un experto a otro. Esta desviación en los pesos, hace que el índice de salud estimado difiera para una misma condición del transformador. Una solución para estas desventajas es la utilización de lógica difusa (Abu Elanien et al., 2012).

Para desarrollar una aplicación de lógica difusa, primero se deben fusificar las entradas, lo que significa convertir límites de aceptación numéricos en funciones lingüísticas, esto significa definir funciones de membresía (Castro et al., 2004). Para cada prueba de diagnóstico, deben identificarse funciones de membresía, las cuales se cruzan entre sí, lo que significa que no se necesitan límites de aceptación exactos, esto resuelve la primera desventaja. Para resolver la segunda desventaja, esta técnica se basa en reglas de inferencia basadas en expresiones no numéricas (lingüísticas), por lo tanto no se necesita un peso para cada prueba de diagnóstico. Lo que si se necesita para diseñar estas reglas, es identificar la criticidad de cada prueba y su relación con la condición del transformador, esto se logra investigando la bibliografía existente. Información detallada sobre los sistemas de lógica difusa se puede encontrar en (Ross, 2010; Sarmiento et al., 2013; Yuan y Klir, 1995). El índice de salud, se obtendrá a partir de los resultados de los siguientes ensayos de campo y de laboratorio (Abu Elanien et al., 2012): rigidez dieléctrica, contenido de humedad, acidez o número de neutralización, factor de disipación, análisis de gases disueltos y contenido de furanos.

Los resultados de las pruebas de rigidez dieléctrica, contenido de humedad, acidez y factor de disipación proporcionan información relevante para determinar la condición del aislamiento líquido (aceite). El estado del aceite es un indicador importante de la salud en un transformador y puede ser crítico para prevenir el envejecimiento prematuro del mismo (CIGRE 445, 2011). El análisis de los gases combustibles disueltos en el aceite permite detectar problemas al interior del transformador como: descargas eléctricas, arcos, y puntos calientes (Yuan et al., 2013). El contenido de furanos proporciona información sobre el estado del aislamiento sólido (papel) del transformador, ya que está relacionado con el grado de polimerización; el estado del papel es uno de los indicadores más importantes en relación a la condición del transformador, un papel envejecido, es señal de que un transformador está en mal estado y por lo tanto su probabilidad de falla es alta (Mtetwa, 2011).

METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DEL ÍNDICE DE SALUD

Inicialmente se crean funciones de membresía para los ensayos escogidos (rigidez dieléctrica, contenido de humedad, acidez, factor de disipación, análisis de gases disueltos y contenido de furanos). Para el análisis de gases disueltos se trabajó con el contenido total de gases combustibles disueltos (TDCG), debido a que los gases individuales o las relaciones de Rogers y Dornenburg son utilizados para diagnosticar tipos de falla mientras que el índice de salud representa un cambio en el estado general del transformador (Naderian et al, 2009). El TDCG representa la suma de los niveles de los gases H₂, CH₄, C₂H₂, C₂H₄, C₂H₆ y CO (IEEE C57.104, 2008).

Las funciones de membresía que se obtuvieron a partir de la normatividad existente (CIGRE 445, 2011; IEC 60296, 2003; IEC 60422, 2013; IEC 60599, 2007; IEC 61198, 1993; IEEE C57.104, 2008; IEEE C57.106, 2006; IEEE C57.12.90, 2010; IEEE C57.140, 2006; IEEE C57.152, 2013) y la información de algunos expertos (Abu Elanien et al., 2012; Flores, 2011; Lin y Gu, 2011; Lundgaard et al., 2004; Martinez, 2010; Naderian et al, 2009; Zhang y Gockenbach, 2008; Interior D., 2003; Army D., 1998) son descritas a continuación:

Rigidez Dieléctrica

Es la medida de la capacidad del aceite para soportar tensión eléctrica. Sirve para indicar la presencia de agentes tales como agua, suciedad, contaminación de fibras celulósicas o partículas en el aceite. Un valor de tensión de ruptura dieléctrica bajo, puede indicar la presencia de una concentración significativa de uno o más de estos agentes (IEEE C57.140, 2006). Sin embargo, un alto valor de tensión de ruptura dieléctrica, necesariamente no indica la ausencia de contaminantes, pero puede ser indicio de concentraciones no tan grandes de estos agentes, por lo tanto no se deben tomar decisiones a partir de los resultados de esta prueba sin el acompañamiento de otros ensayos. Por ejemplo la humedad en combinación con el oxígeno y el calor pueden destruir el aislamiento sólido (papel) mucho antes de que la rigidez dieléctrica del aceite se vea comprometida (IEEE C57.106, 2006).

Dos métodos se utilizan principalmente para la prueba de rigidez dieléctrica. El primer método, fue publicado originalmente en 1946 y es el propuesto en la norma ASTM D-877 (2007), sin embargo este método no es muy sensible a la presencia de agua disuelta en aceite por debajo del 80% de saturación. El segundo

método, es el propuesto en la norma ASTM D-1816 (2012), el cual es más sensible a los efectos de la humedad en solución, especialmente cuando las fibras de celulosa están presentes en el aceite. Por esta razón, la ASTM D-1816 se recomienda para aceites filtrados, desgasificados y deshidratados. La ASTM D-877, sólo debe utilizarse para la prueba de aceptación de aceites recibidos de proveedores en vagones cisterna, camiones cisterna o tambores (IEC 60422, 2013).

La condición del aceite del transformador con respecto a la rigidez dieléctrica se divide en tres tipos: bueno, aceptable y malo. Según la norma IEEE C57-152 (2013) y para 1mm de gap, el límite de aceptación para aceites en servicio es mínimo 28kV, mientras que para aceites nuevos antes de energización es mínimo 30kV, por lo tanto un valor aceptable de rigidez dieléctrica estará entre estos dos límites. En la Fig. 1 se muestra las funciones de membresía para la prueba de rigidez dieléctrica.

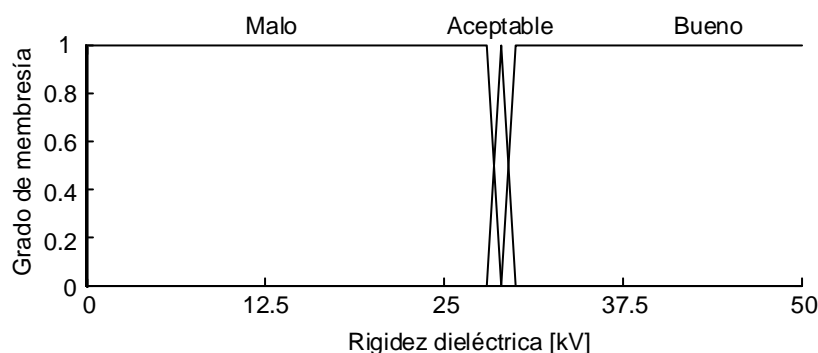


Fig. 1. Funciones de membresía para la rigidez dieléctrica

Contenido de Humedad

Este ensayo se realiza según la norma ASTM D-1533 (2012). Se mide la cantidad de agua presente en el aceite a través de la titulación coulométrica de Karl Fischer. Este método de prueba es conocido por su alto grado de sensibilidad con detecciones hasta de 10 μ g de agua. El contenido de humedad en un transformador afecta tanto al papel como al aceite, por ejemplo, un alto contenido de humedad puede reducir la resistencia mecánica de la celulosa, así como la rigidez dieléctrica del aceite mineral.

La condición del aceite del transformador con respecto al contenido de humedad se divide en tres tipos: bueno, aceptable y malo. Según la norma IEEE C57-152 (2013), el límite de aceptación para aceites en servicio es máximo 25ppm y para aceites nuevos antes de energización es máximo 10ppm. De acuerdo a (Abu Elanien et al., 2012; IEC 60422, 2013; Naderian et al, 2009) un valor aceptable de contenido de humedad es 20ppm. Las funciones de membresía obtenidas se muestran en la Fig. 2.

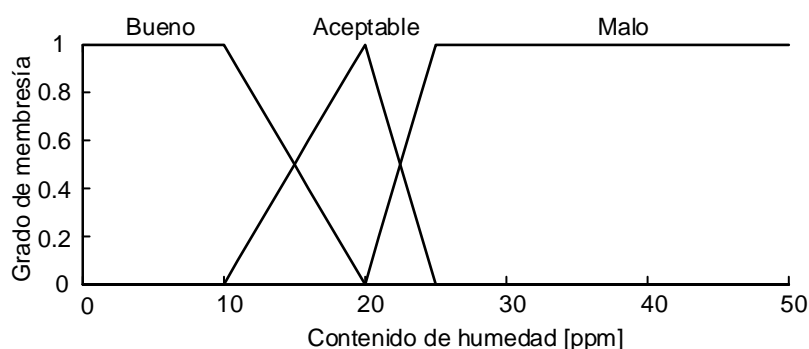


Fig. 2. Funciones de membresía para el contenido de humedad

Acidez o Número de Neutralización

Este ensayo se realiza según la norma ASTM D-974 (2012). El número de neutralización es la cantidad de miligramos de hidróxido de potasio necesarios para neutralizar la acidez de un gramo de muestra de aceite aislante. Los compuestos ácidos, producto de la degradación del aceite, son sustancias polares que inciden en el deterioro del papel aislante. Los productos de oxidación, el lodo y el contenido agua son agentes perjudiciales para deteriorar las propiedades del aceite, causar corrosión, trancar la refrigeración y acelerar la descomposición del material aislante de los devanados. Por ejemplo, los lodos se depositan sobre los devanados y canales de refrigeración, lo cual afecta la transferencia de calor y hace que aumente la

temperatura y la velocidad de oxidación del aceite. Un número de neutralización alto indica la presencia de compuestos ácidos en el aceite que son el producto de la oxidación junto con los lodos y el agua.

La condición del aceite del transformador con respecto al número de neutralización se divide en tres tipos: bueno, aceptable y malo. Según la norma IEEE C57-152 (2013), el límite de aceptación para aceites en servicio es máximo 0.15mgKOH/g y para aceites nuevos antes de energización es máximo 0.015mgKOH/g. De acuerdo a (CIGRE 445, 2011; IEC 61198, 1993; IEEE C57.104, 2008) un valor aceptable de número de neutralización oscila entre 0.04mgKOH/g y 0,1mgKOH/g. Las funciones de membresía obtenidas se muestran en la Fig. 3.

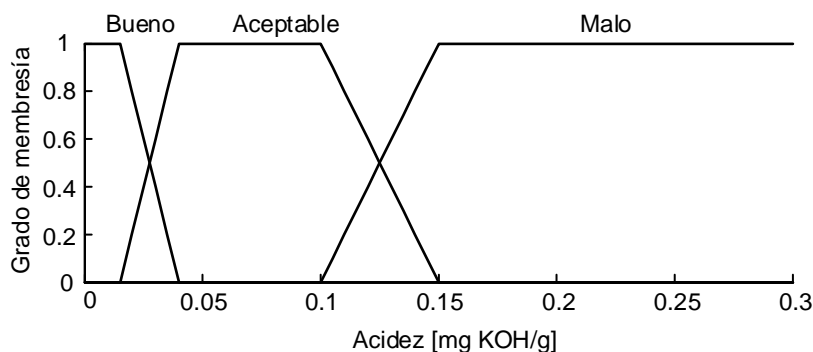


Fig. 3. Funciones de membresía para la acidez

Factor de Disipación

Este ensayo se realiza según la norma ASTM D-924 (2008) referida a una temperatura de 25°C. La potencia disipada se transfiere al aceite del transformador en forma de energía térmica, lo que aumenta la temperatura global del transformador y puede acelerar su proceso de envejecimiento. El factor de disipación o factor de potencia, es una medida de las pérdidas dieléctricas disipadas en forma de calor en el aceite cuando se somete a un campo eléctrico alterno. Un factor de disipación bajo indica pérdidas dieléctricas muy pequeñas. Esta prueba puede ser útil para la indicación de cambios en la calidad del aceite, como producto de la contaminación por deterioro en servicio, esta técnica se ha utilizado durante mucho tiempo como prueba de rutina y para fines de diagnóstico. La medición del factor de potencia se realiza con tensiones hasta de 10kV.

Según la norma IEEE C57-152 (2013), el límite de aceptación para aceites en servicio es máximo 0.5% y para aceites nuevos antes de energización es máximo 0.05%. De acuerdo a (CIGRE 445, 2011; IEC 61198, 1993; IEEE C57.104, 2008) un valor aceptable de factor de disipación puede ser máximo 0.1%. Las funciones de membresía obtenidas se muestran en la Fig. 4.

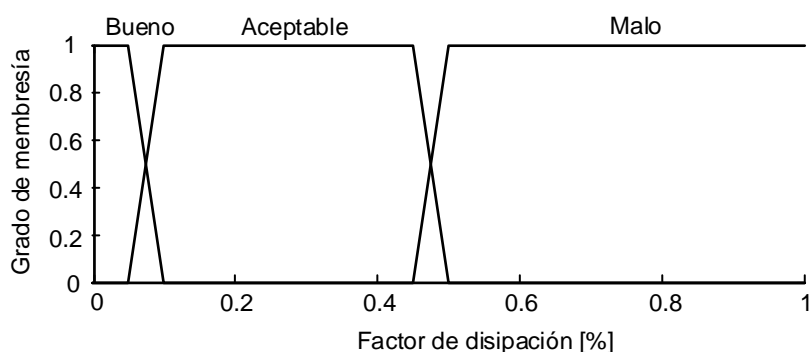


Fig. 4. Funciones de membresía para el factor de disipación

Análisis de Gases Disueltos

Un transformador de potencia en condiciones normales de operación genera gases. Sin embargo la concentración de estos gases puede incrementar por dos casos (Naderian et al, 2009): 1) debido a la presencia de una anomalía o falla en el interior del transformador por sobrecalentamiento, descargas parciales, arcos internos, etc. 2) por envejecimiento del transformador. El aceite genera gases como acetileno (C₂H₂), hidrógeno (H₂), metano (CH₄), etileno (C₂H₄) y etano (C₂H₆), mientras que la celulosa o papel genera CO y CO₂ (IEC 60599, 2007). La evaluación de la concentración de estos gases se realiza a

través del análisis de gases disueltos (DGA). Existen varias técnicas de evaluación de los resultados de DGA como las relaciones de Rogers, las relaciones de Dornenburg y los gases clave (Flores, 2011; Naderian et al, 2009). Estas técnicas se utilizan para caracterizar tipos de falla, sin embargo, como el propósito de este trabajo es evaluar el estado general de salud del transformador, se trabajará sólo con el contenido total de gases disueltos (TDCG) obtenido a través del DGA (IEEE C57.104, 2008).

Según la norma IEC 60599 (2007), el límite de aceptación del TDCG en el aceite de un transformador de potencia debe estar entre 560ppm y 1250ppm, mientras que la norma IEEE C57.104 (2008) plantea que este valor puede ser máximo 720ppm. Según (Abu Elanien et al., 2012), un aceite en buena condición debe tener como máximo un TDCG de 300ppm. Las funciones de membresía obtenidas se muestran en la Fig. 5.

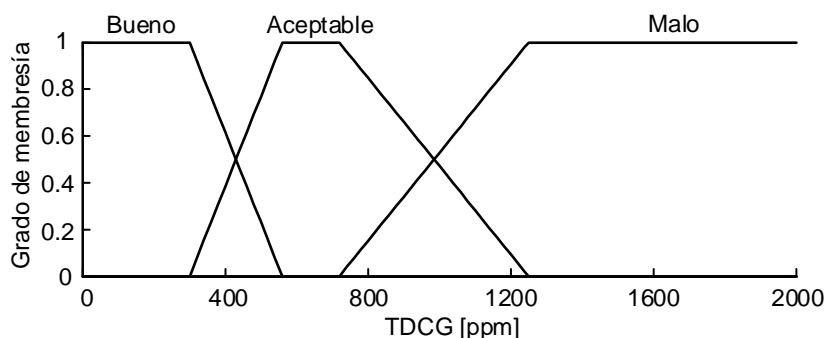


Fig. 5. Funciones de membresía para el TDCG obtenido del DGA

Análisis de Contenido de Furanos

El deterioro de la estructura química del papel como consecuencia de una mayor temperatura de operación del transformador y un alto contenido de humedad, disminuye el grado de polimerización (DP) lo cual es proporcional a un mayor contenido de compuestos furánicos disueltos en el aceite, especialmente del compuesto 2-furaldehido cuya proporción es más del 90% comparada con la de los demás furanos. El contenido de 2-furaldehido (2-FAL) se considera el factor más importante en la evaluación de la salud del transformador, ya que evalúa directamente la salud del aislamiento sólido (papel) (Army D., 1998).

Algunos estudios se han realizado a partir de datos obtenidos de muestras de laboratorio y transformadores fuera de servicio, ya sea para reparación o investigación. Con esta información se desarrollaron modelos matemáticos que relacionan la concentración del compuesto furánico (2FAL) con el valor de DP. Uno de los modelos es mostrado en la Ecuación 1, que fue desarrollada con base en datos recolectados de transformadores con papel kraft.

$$DP = \frac{1.51 - \log_{10}(2FAL_{ppm})}{0.0035} \text{ [ppm]} \quad (1)$$

Donde DP= grado de polimerización [ppm] y 2FAL= contenido de 2-furaldehido [ppm]

Según la norma IEEE C57.140 (2006), un aceite en buena condición debe tener como máximo un contenido de 2-FAL de 0.1ppm, al aplicar la Ecuación 1 esto equivale a un grado de polimerización (DP) mayor de 700; lo cual representa un aislamiento sólido (papel) con una resistencia mecánica de la celulosa cercana al 100% de su valor inicial, es decir, el valor medido para papel nuevo (Martinez, 2010). Según (Abu Elanien et al., 2012; Zhang y Gockenbach, 2008), un aceite con una condición aceptable tendrá un DP entre 700 y 400 (papel con retención de resistencia mecánica cercana al 70%), un aceite con una condición regular tendrá un DP entre 560 y 290 (papel con retención de resistencia mecánica cercana al 50%), un aceite con una condición mala tendrá un DP entre 200 y 320 (papel con retención de resistencia mecánica cercana al 20%) y un aceite con una condición muy mala tendrá un DP menor a 200 (papel con retención de resistencia mecánica cercana a 0%). Los valores equivalentes de 2-FAL en relación con los rangos de DP se muestran en la Tabla 1. Las funciones de membresía obtenidas se muestran en la Fig. 6.

Tabla 1. Relación entre contenido de 2-FAL y DP

| Condición | Muy malo | Malo | Regular | Aceptable | Bueno |
|-------------|----------|-------------|-------------|-------------|--------|
| DP [ppm] | < 200 | 200 - 320 | 290 - 560 | 400 - 700 | > 700 |
| 2-FAL [ppm] | > 6.46 | 6.46 - 2.45 | 3.13 - 0.35 | 1.29 - 0.12 | < 0.12 |

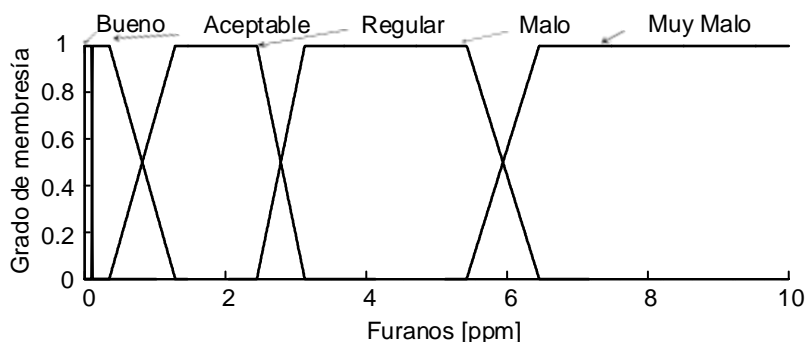


Fig. 6. Funciones de membresía para el análisis de contenido de furanos

Índice de Salud del Transformador

El índice de salud del transformador se dividió en cinco condiciones: muy buena, buena, aceptable, mala y muy mala. La condición “muy buena” va desde 0 hasta 0.25, “buena” va desde 0.2 hasta 0.4, “aceptable” va desde 0.35 hasta 0.7, “mala” va desde 0.65 hasta 0.9 y “muy mala” va desde 0.85 hasta 1.0, las funciones de membresía para el índice de salud se muestran en la Fig. 7 (Abu Elanien et al., 2012).

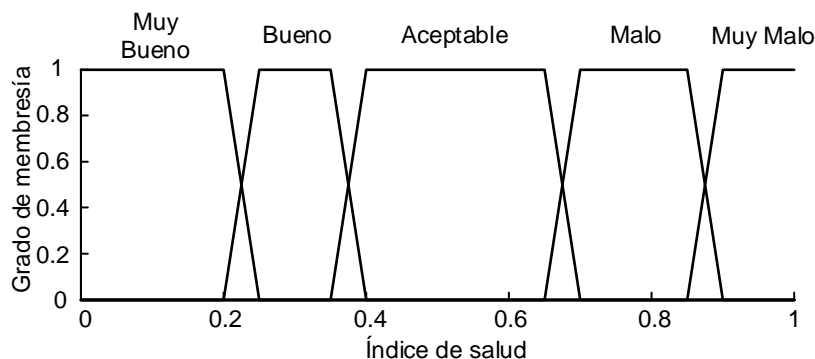


Fig. 7. Funciones de membresía del índice de salud

Posteriormente, en la caja de herramientas de lógica difusa del programa Matlab (Mathworks, 2014), se utilizó el método de inferencia difusa máximo-mínimo (Mamdani y Assilian, 1975), para implementar la metodología e ingresar las reglas de inferencia difusa que relacionan los seis valores de entrada lingüísticos con la salida lingüística que representa el índice de salud del transformador. Tales reglas se obtuvieron del artículo presentado por Abu-Elanien et al. (2012), donde las 33 reglas propuestas por el autor, fueron construidas en base al conocimiento de expertos en el tema. Para estos expertos, el contenido de furanos (2-FAL) tiene mayor prioridad sobre las otras pruebas debido a que sus resultados permiten evaluar el estado del aislamiento sólido, la siguiente prueba en prioridad es el TDCG, mientras que factor de disipación, acidez, contenido de humedad y la rigidez dieléctrica se les asignó una prioridad más baja. Sin embargo, en la implementación de esta metodología, algunas de las 33 reglas difusas, en las cuales una parte de las funciones de membresía de entrada se agrupan entre paréntesis y se operan a través del operador “OR”, para luego combinarse con las restantes entradas, fueron desagregadas hasta alcanzar un total de 80 reglas. Esto último, debido a que en el software utilizado no es posible ingresarlas con la estructura en que las presenta el autor.

Una vez obtenida la función de membresía de salida que representa la salud del transformador, se realiza el proceso de defusificación aplicando el método del centroide, con la finalidad de obtener un valor numérico del índice de salud.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la Tabla 2 se presentan los datos de entrada proporcionados por una empresa del sector eléctrico colombiano y el índice de salud calculado para una muestra de 18 transformadores de potencia. Los transformadores 1, 2, 4, 8, 12 y 14 que tienen condición de “mala” tienen una alta probabilidad de falla, pero no tan alta como el transformador 7 cuya condición es “muy mala”. La sustitución de estos transformadores se debe planificar en el futuro cercano. Los transformadores 5, 6, 9, 11, 13, 15, 16, 17 y 18 que están en condición “aceptable” no necesitan ser reemplazados en el corto plazo; Sin embargo, su condición no les permite que se dejen sin ningún tratamiento, se deben realizar pruebas de control. Para el transformador 3, cuya condición es “buena” se debe seguir monitoreando para conocer la variación en el tiempo de su

condición. Finalmente, dado que el índice de salud es muy bajo para el transformador 10, en condición de “muy buena” no se requiere ningún cuidado especial más allá de un mantenimiento regular.

En el caso del transformador 7, con condición “muy mala”, a pesar de que los resultados de las pruebas de contenido de humedad, acidez, rigidez dieléctrica y factor de disipación están dentro de valores aceptables, reporta un valor de contenido total de gases disueltos elevado, así mismo, el alto contenido de furanos equivale a un grado de polimerización de 259 ppm, lo que indicaría un estado de deterioro avanzado del papel aislante.

Tabla 2. Índices de salud calculados

| No. | Año de instalación | Tensión nominal [kV] | Resultados de las pruebas de diagnóstico | | | | | | Índice de salud | |
|-----|--------------------|----------------------|--|-------------------|--------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|---------------|-----------------|-------------------|
| | | | Contenido de humedad [ppm] | Acidez [mg KOH/g] | Rigidez dieléctrica [kV] | Factor de disipación [%] a 25 °C | Análisis de gases disueltos [ppm] | Furanos [ppm] | Valor numérico | Valor Lingüístico |
| 1 | 1992 | 115/13,2 | 11.0 | 0.024 | 57.0 | 0.0000 | 792 | 3.304 | 0.789 | Mala |
| 2 | 1992 | 115/13,2 | 10.0 | 0.020 | 59.0 | 0.0000 | 830 | 4.571 | 0.796 | Mala |
| 3 | 1995 | 115/13,2 | 6.0 | 0.035 | 58.0 | 0.0060 | 12 | 0.813 | 0.395 | Buena |
| 4 | 1992 | 115/13,2 | 6.7 | 0.038 | 49.4 | 0.0100 | 871 | 3.051 | 0.758 | Mala |
| 5 | 1994 | 115/13,2 | 6.7 | 0.005 | 57.5 | 0.0000 | 674 | 1.499 | 0.525 | Aceptable |
| 6 | 1992 | 115/34,5 | 3.9 | 0.129 | 15.9 | 0.5554 | 975 | 1.714 | 0.637 | Aceptable |
| 7 | 1992 | 115/13,2 | 11.5 | 0.058 | 56.7 | 0.1010 | 1113 | 3.995 | 0.876 | Muy Mala |
| 8 | 1995 | 115/13,2 | 10.8 | 0.020 | 41.5 | 0.0000 | 819 | 3.351 | 0.794 | Mala |
| 9 | 1995 | 115/34,5 | 13.4 | 0.009 | 56.2 | 0.0140 | 1094 | 1.185 | 0.65 | Aceptable |
| 10 | 1995 | 115/34,5 | 11.9 | 0.009 | 57.6 | 0.0250 | 157 | 0.165 | 0.14 | Muy Buena |
| 11 | 1992 | 115/13,8 | 24.9 | 0.131 | 40.1 | 0.3511 | 1067 | 2.020 | 0.663 | Aceptable |
| 12 | 1994 | 115/34,5 | 4.9 | 0.083 | 11.1 | 0.4261 | 40426 | 1.276 | 0.769 | Mala |
| 13 | 1994 | 115/34,5 | 26.8 | 0.074 | 10.7 | 0.3691 | 54859 | 0.802 | 0.62 | Aceptable |
| 14 | 1996 | 115/13,8 | 8.6 | 0.019 | 46.3 | 0.0000 | 711 | 2.989 | 0.702 | Mala |
| 15 | 1992 | 115/13,8 | 19.8 | 0.110 | 29.0 | 0.8700 | 287 | 2.466 | 0.563 | Aceptable |
| 16 | 1992 | 115/13,2 | 15.5 | 0.062 | 34.3 | 0.0264 | 1161 | 1.113 | 0.665 | Aceptable |
| 17 | 1994 | 115/34,5 | 14.1 | 0.020 | 44.5 | 0.0000 | 788 | 2.446 | 0.549 | Aceptable |
| 18 | 1996 | 115/13,8 | 8.6 | 0.019 | 46.3 | 0.0000 | 233 | 2.502 | 0.539 | Aceptable |

CONCLUSIONES

De los resultados presentados en la Tabla 2, se observa que para aquellos transformadores con un alto valor de contenido de furanos y también de contenido total de gases combustibles disueltos, el índice de salud obtenido alerta sobre una condición del aislamiento del transformador “mala” o “muy mala”, incluso aunque los resultados de las demás pruebas se encuentren en límites de aceptación “aceptables” o “buenos”. Esto demuestra la prioridad con la que se desarrollaron las reglas de inferencia del sistema difuso y a su vez la importancia del aislamiento sólido para el diagnóstico de los transformadores de potencia.

Del transformador número 10 de la Tabla 2, cuyo índice de salud equivale a una condición “muy buena” se observa que para cada uno de los resultados de las pruebas, sus límites de aceptación corresponden a “bueno”.

La obtención del índice de salud también puede ser usada para establecer un ranking de los transformadores de potencia, en función de la condición de su aislamiento papel-aceite para priorizar por ejemplo la asignación de los recursos económicos y definir las actividades de mantenimiento.

Es necesario contar con el histórico de pruebas para poder evaluar la evolución del índice de salud de los transformadores de potencia en el tiempo, esto permitiría que el análisis de los resultados sea más confiable y acertado, y además realizar el seguimiento de la evolución de la salud de cada transformador y del parque en general.

REFERENCIAS

Abu-Elanien A., Salama M., Ibrahim M., Calculation of a Health Index for Oil-Immersed Transformers Rated Under 69 kV Using Fuzzy Logic, doi: 10.1109/TPWRD.2012.2205165, IEEE Transactions on Power Delivery (en línea), Vol 27, No 4, 2029-2036 (2012)

Ashkezari A.D., Hui M., Ekanayake C., Saha T.K., Multivariate analysis for correlations among different transformer oil parameters to determine transformer health index, doi: 10.1109/PESGM.2012.6345231, Power and Energy Society General Meeting (en línea), 1-7, United States (2012)

Ashkezari A.D., Hui M., Saha T.K., Ekanayake C., Application of fuzzy support vector machine for determining the health index of the insulation system of in-service power transformers, doi: 10.1109/TDEI.2013.6518966, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation (en línea), Vol 20, No 3, 965-973, United States (2013)

ASTM D1533, American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Water in Insulating Liquids by Coulometric Karl Fischer Titration, 1-5, United States (2012)

ASTM D1816, American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Liquids Using VDE Electrodes, 1-5, United States (2012)

ASTM D877, American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Liquids Using Disk Electrodes, 1-6, United States (2007)

ASTM D924, American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Dissipation Factor (or Power Factor) and Relative Permittivity (Dielectric Constant) of Electrical Insulating Liquids, 1-7, United States (2008)

ASTM D974, American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Acid and Base Number by Color-Indicator Titration, 1-7, United States (2012)

Castro A., Vera F., Quintana J., Control Difuso de Flujo de Fluidos en una Estación de Laboratorio, Información tecnológica, Vol. 15(3), 45-52(2004)

CIGRE 445, International Council for Large Electric Systems, Guide for Transformer Maintenance, 1-123, French (2011)

Department of the Army TM 5-686, Power Transformer Maintenance and Acceptance Testing (1998)

Flores W., Estimación de la vida técnica remanente de transformadores de potencia sumergidos en aceite utilizando conocimiento experto y análisis de riesgo, Tesis de Doctorado, Universidad Nacional de San Juan (2011)

IEC 60296, International Electrotechnical Commission, Fluids for electrotechnical applications – Unused mineral insulating oils for transformers and switchgear, 1-22, Ginebra, Suiza (2003)

IEC 60422, International Electrotechnical Commission, Mineral insulating oils in electrical equipment – Supervision and maintenance guidance, 1-98, Ginebra, Suiza (2013)

IEC 60599, International Electrotechnical Commission, Mineral oil-impregnated electrical equipment in service – Guide to the interpretation of dissolved and free gases analysis, 1-74, Ginebra, Suiza (2007)

IEC 61198, International Electrotechnical Commission, Mineral insulating oils - Methods for the determination of 2-furfural and related compounds, 1-28, Ginebra, Suiza (1993)

IEEE C57.104, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers, 1-39, New York, United States (2008)

IEEE C57.106, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Guide for Acceptance and Maintenance of Insulating Oil in Equipment, 1-36, New York, United States (2006)

IEEE C57.12.90, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution Power and Regulating Transformers, 1-100, New York, United States (2010)

IEEE C57.140, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Guide for the Evaluation and Reconditioning of Liquid Immersed Power Transformers, 1-77, New York, United States (2006)

IEEE C57.152, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Guide for Diagnostic Field Testing of Fluid-Filled Power Transformers Regulators and Reactors, 1-121, New York, United States (2013)

- Interior D., Transformer Diagnostics, Facilities Instructions Standards and Techniques, Vol 3-31, 1-71 (2003)
- Lara H., Liñan R., Clasificación del Estado Operativo de Transformadores de Potencia Mediante el Desarrollo e Implementación de una Metodología basada en los Resultados de Pruebas de Rutina, Congreso Internacional en Alta Tension y Aislamiento Electrico, 1-6, Medellin, Colombia (2009)
- Lin P., Gu J., Research on Transformer Condition-based Maintenance System using the Method of Fuzzy Comprehensive Evaluation, World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol 5, No 8, 452-457 (2011)
- Lundgaard L., Hansen W., Linhjell D., Painter T., Aging of oil-impregnated paper in power transformers, doi: 10.1109/TPWRD.2003.820175, IEEE Transactions on Power Delivery (en línea), Vol 19, No 1, 230-239 (2004)
- Mamdani E., Assilian S., An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller, doi: 10.1016/S0020-7373(75)80002-2, International Journal of Man-Machine Studies (en línea), Vol 7, No 1, 1-13 (1975)
- Mariño P., Poza F., Ubeira M., Machado F., Sistema de Adquisición y Almacenamiento de Datos para Monitorización del Estado de Transformadores de Potencia, doi: 10.4067/S0718-07642004000200017, Información tecnológica (en línea), Vol 15, No 2, 95-100 (2004)
- Martínez E., Diagnóstico y mantenimiento a transformadores en campo, 2a Edición, 1-238, Gerencia & Diseño LTDA, Bogotá D. C., Colombia (2010)
- Mathworks, Fuzzy Logic User Guide (2014), http://www.mathworks.com/help/pdf_doc/fuzzy/fuzzy.pdf. Acceso: 14 de noviembre (2014)
- Mtewa N., Accuracy of furan analysis in estimating the degree of polymerization in power transformers, A research report submitted to the Faculty of Engineering and the Built Environment University of the Witwatersrand, 1-23 (2011)
- Naderian A., Cress S., Piercy R., Wang F., Service J., An Approach to Determine the Health Index of Power Transformers, doi: 10.1109/ELINSL.2008.4570308, Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation ISEI (en línea), 192-196 (2008)
- Romero A., Mombello E., Ratta G., An overview on power transformer management: Individual Assets and Fleets, doi: 10.1109/TDC-LA.2012.6319081, Sixth IEEE PES Transmission and Distribution Latin America Conference and Exposition (en línea), 1-7 (2012)
- Ross T., Fuzzy logic with engineering applications, Third edition, 1-607, Wiley, New Mexico, United States (2010)
- Sarmiento H., Isaza C., Kempowsky-Hamon T., LeLann M., Estimación de Estados Funcionales en Procesos Complejos con Base en Agrupamiento Difuso, doi: 10.4067/S0718-07642013000200010, Información tecnológica (en línea), Vol 24, No 2, 79-98 (2013)
- Young J., Ma L., Wu L., Tang J., Huo L., A new method to determine condition index for equipment condition assessment, doi: 10.1109/PHM.2010.5413492, Prognostics and Health Management Conference PHM '10 (en línea), 1-6 (2010)
- Yuan B., Klir G., Fuzzy sets and fuzzy logic theory and applications, 1-591, Prentice Hall, New Jersey, United States (1995)
- Yuan L., Ming-jie T., Feng-Jiao W., Guan-Jun Z., Shu-Hong W., Sumarno, Aging assessment of power transformer based on multi-parameters, International Journal on Electrical Engineering and Informatics, Vol 5, No 1, 34-44 (2013)
- Zhang X., Gockenbach E., Asset-Management of Transformers Based on Condition Monitoring and Standard Diagnosis, doi: 10.1109/MEI.2008.4581371, IEEE Electrical Insulation Magazine (en línea), Vol 24, No 4, 26-40 (2008)