



APLICACIONES INDUSTRIALES

Avances en evaluación del estado y la vida remanente de transformadores de fuerza

Advances in the assessment of the state and the remnant life of power transformers

Jorge Juan Montané García¹, Santiago Alfredo Dorrbercker Drake², Alfredo Manuel del Castillo Serpa²

¹Termoeléctrica Ernesto Ché Guevara, Mayabeque, Cuba

²Universidad Tecnológica de la Habana, José A. Echeverría Cujae. Cuba
Email: jorgemon@ctehabana.une.cu

Recibido: febrero de 2019 Aprobado: julio de 2019

Licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 Internacional



RESUMEN/ ABSTRACT

Como los transformadores de fuerza (TF) son parte principal de los costos de un sistema electroenergético, debe controlarse su estado, envejecimiento y vida remanente, para valorar su condición actual y futura, algo importante en la toma de decisiones de operación, mantenimiento o inversiones, que favorecen un uso óptimo de las finanzas y aseguran la confiabilidad y calidad. Un fallo de aislamiento de un TF implica daños sensibles, genera altos costos de reparación y pérdidas financieras. Al sistema de aislamiento papel-aceite es imposible realizarle mantenimientos, por lo que debe evaluarse su condición, para minimizar el riesgo de fallas y salidas de servicio. Se reseña la importancia de evaluar la probabilidad de vida remanente de TF y se analizan la trayectoria y los resultados conseguidos para su realización. Como resultado final, se establece la necesidad de encontrar un método, en que se pueda utilizar toda la información disponible sobre el estado de los TF, considerándose los factores de degradación.

Palabras clave: aislamiento, envejecimiento, transformadores de fuerza, vida remanente.

Power transformers (PT) represent an extensive part of the costs structure in an electrical system, so it must to control its state, its ageing and its remnant life, in order to estimate its present and future condition, which is very important to take decisions in operation, maintenance or investments, stimulating an optimal use of financial resources and ensuring reliability and quality. A failure in the PT isolation causes big troubles, produces high repair costs and important financial losses. It is impossible to take maintenance actions on paper-oil isolation, so it is very important to assess its condition, in order to minimize the risk of failures and outages. The work presents a review of the importance of assess the probability of remnant life of PT and an analysis of state-of-the-art concerning methods for implementation of the assessment of that probability. Authors also express the necessity to find out a method to estimate the remnant life of PT, which allow using all the available information about its state, considering different degradation factors.

Keywords: ageing, isolation, power transformers, remnant life.

INTRODUCCIÓN

Los transformadores de fuerza (TF) constituyen uno de los elementos más importantes de los sistemas electroenergéticos (SE) y juegan un rol crucial en la confiabilidad de los sistemas eléctricos y en la calidad de la energía entregada, desempeñando un papel decisivo en el logro de un buen y estable funcionamiento de la transmisión de energía eléctrica [1, 2]. Las fallas o interrupciones ocurridas durante la explotación de los TF pueden tener como consecuencias cortes de energía y grandes daños al medio ambiente, debidos a vertimientos de aceite y posibles incendios, o incluso, en casos extremos, la pérdida total de activos costosos en los SE, por lo que estos equipos deben ser supervisados con especial cuidado. En el presente artículo sólo se tratará sobre los TF con sistemas de aislamiento de papel y aceite. Los transformadores secos, que necesitan una evaluación distinta, no serán analizados.

El envejecimiento y sobrecarga de los TF constituyen un problema en los sistemas de suministro de energía eléctrica alrededor del mundo, cuya solución demanda elevados costos en las decisiones que se puedan tomar sobre cada unidad en el SE. Muchos SE construidos en el periodo del 1960 al 1980 se mantienen aún en servicio, por lo que los empresarios deben cuestionarse la necesidad o no de adquisición de nuevos activos. Los métodos tradicionales de reemplazo de equipos, sobre la base del tiempo de operaciones (TO), han cambiado [3]. Por tanto, si una organización del sector eléctrico cuenta con indicadores de riesgo adecuados para realizar la gestión óptima de sus TF, es decir, si está en capacidad de tomar las decisiones correctas en el momento adecuado, entonces estará en condiciones de enfrentar el problema descrito, garantizando así su viabilidad económica, al menos en lo que se refiere a este tipo de activos [4].

De acuerdo con Akolkar, S.M. [5], durante su operación, los TF están sometidos continuamente a los llamados esfuerzos de envejecimiento TEAM (térmicos, eléctricos, ambientales y mecánicos), además de químicos y otros. Desde el inicio de la explotación de un TF, su aislamiento comienza a sufrir esfuerzos térmicos, que ocasionarán su deterioro al transcurrir el tiempo de explotación. Al propio tiempo, el equipo puede experimentar esfuerzos extremos y daños internos de sus componentes principales, debidos a fallas externas [6].

El envejecimiento acelerado del aislante sólido de un TF es la consecuencia de varios fenómenos mecánicos y químicos, como el sobrecalentamiento de los bobinados debido a sobrecargas, fallas en la refrigeración, cambios en la condición del TF debido al ingreso de agua, contaminación con partículas y deterioro del aceite, efectos mecánicos como vibraciones, esfuerzos electromagnéticos debidos a cortocircuitos (CC) y corrientes de conexión, estrés inusual y errores de diseño, construcción y montaje [4]. La degradación térmica, tanto del papel como del aceite, están profundamente vinculadas a la magnitud de la carga que alimenta, pues, en dependencia de la misma, así serán los niveles de temperatura que se alcancen el TF. Las sobrecargas que tienen lugar durante la operación de los TF, producen acortamiento de la vida útil de la máquina por la elevación de las temperaturas que aceleran su envejecimiento [7].

De entre todos los esfuerzos a los que está sometido el aislamiento de los TF, los esfuerzos térmicos son considerados los más importantes y los que ejercen mayor influencia en el deterioro de ese sistema.

Los autores del artículo exponen la importancia de evaluar la vida remanente de los TF, realizan un análisis de los avances en las técnicas y métodos para su determinación y muestran las desventajas de algunos de ellos y la necesidad de encontrar una variante que permita utilizar la información disponible sobre explotación, mantenimiento y los datos obtenidos de los controles e inspecciones de diagnóstico, considerando varios factores de degradación.

En el artículo se señala que, toda vez que al sistema de aislamiento papel-aceite es imposible realizarle mantenimientos, es necesario evaluar su condición, para minimizar el riesgo de fallas y salidas de servicio. Se reseña la importancia de evaluar la probabilidad de vida remanente de TF y se analizan la trayectoria y los resultados conseguidos para su realización. El artículo está dividido en tres partes fundamentales; un primer capítulo dedicado a la vida remanente de TF, donde se expone que la vida remanente de los TF es un asunto de interés para las empresas que brindan el servicio de la electricidad, los fabricantes de transformadores y las empresas de seguros y que el conocimiento de la vida remanente de los TF es un factor decisivo para administrar el riesgo asociado con la confiabilidad de la red y, por supuesto, para brindar un servicio eléctrico de calidad; un segundo capítulo dedicado a la evolución histórica de los métodos más generalizados para establecer **la vida remanente de TF, en el que se muestra** que la industria usa distintas herramientas para la obtención de la vida remanente de los TF, donde se destacan tres tipos: las técnicas que utilizan el análisis físico-químico, el AGD y el análisis de derivados furánicos disueltos en el aceite aislante, las que utilizan análisis estadístico y las técnicas que utilizan inteligencia computacional; finalmente, en las Conclusiones, se resumen los criterios de los autores, así como algunas posibles variantes de solución del problema abordado. Las Conclusiones tienen como premisa que la vida técnica remanente de los TF debe determinarse sin la utilización de métodos que requieran de costoso equipamiento, sino mediante el tratamiento y análisis estadístico de datos y análisis de riesgo, a partir de la información existente. Lo expuesto permitirá la toma de decisiones relativas a la ejecución de mantenimientos o el reemplazo de los equipos.

VIDA REMANENTE DE TRANSFORMADORES DE FUERZA

Para evaluar el comportamiento de la vida de los aislamientos tipo papel-aceite en los TF, de manera combinada, se debe obtener información de la explotación y acciones por las que haya transitado el equipo durante su vida, siendo de importancia capital los registros de operación, los cuales posibilitan investigar su comportamiento histórico o para el análisis de las fallas que hubiesen ocurrido.

Por todo esto, se hace necesario establecer parámetros integrales que permitan instaurar un sistema de evaluación del envejecimiento de los equipos. Para garantizar que los TF mantengan un servicio duradero y con la menor cantidad posible de fallas, se les deben realizar numerosos ensayos de diagnóstico, con vistas a tomar acciones correctivas durante su tiempo de operación. Para TF sumergidos en aceite, particularmente, para aquellos que permanecen en servicio durante más de quince (15) años, es aconsejable también realizar la estimación del tiempo de vida remanente de los mismos [5].

Según Aliani, E. y A.A. Romero-Quete [8], existen tres aspectos que permiten definir el fin de vida de un TF:

- Obsolescencia (fin de vida funcional);
- Imposibilidad de lograr una mayor rentabilidad, al establecer que los costos de operación y mantenimiento del equipo superan los de adquisición de un TF nuevo (fin de vida económica);
- Imposibilidad del TF de cumplir con su función de servir como enlace confiable entre partes del sistema que se encuentran a distintos niveles de tensión, pues se estima que el equipo es inadecuado o inutilizable, es decir, cuando las fallas o riesgo de fallas se vuelven inaceptables (fin de la vida confiable).

Los autores del presente artículo consideran pertinente destacar su no coincidencia con lo señalado en la primera pleca anterior, pues la obsolescencia no implica necesariamente el fin de vida funcional. Un TF envejecido u obsoleto puede, como ocurre en todo el mundo, continuar en servicio, siempre que sus restantes condiciones lo permitan.

Desafortunadamente, estimar la vida remanente del aislamiento de un TF no es una tarea fácil, pues no es posible extraer muestras de papel de su parte activa para hacer determinaciones directas. Por otro lado, la temperatura en un TF no es homogénea y las condiciones del papel impregnado en aceite, por ejemplo, su contenido en humedad, varían dentro del equipo. Todo ello hace que la estimación de la vida remanente sea muy compleja [9].

La determinación del contenido de compuestos furánicos en el aceite del TF es un método de ensayo comúnmente utilizado para el diagnóstico del grado de envejecimiento del papel impregnado en aceite del equipo. A diferencia, por ejemplo, del monóxido y dióxido de carbono (CO y CO_2), que se producen durante la degradación o envejecimiento del aislamiento de celulosa y también del aceite mineral, los compuestos furánicos son exclusivamente generados como subproducto de las reacciones de degradación o envejecimiento del aislamiento de celulosa, lo que hace que los resultados del diagnóstico sean más confiables. El contenido de furanos de los aceites ha sido estudiado durante años y algunos autores han propuesto modelos teóricos para estimar el grado de polimerización (GP) del papel a partir del contenido de furanos, pero el análisis y la interpretación de los resultados no es tan claro y se necesita más trabajo para obtener un método más útil [9].

La norma CEI 60599 [10], aporta métodos de interpretación y valores de referencia para gases disueltos en aceite, pero no incluyen recomendaciones para la interpretación de los resultados del contenido de furanos detectados. El Grupo de Trabajo D1.01.13 de la CIGRÉ publicó el informe "*Furanic Compounds for Diagnosis*" [11], en el cual se señalan algunas de las dificultades del método y se dan recomendaciones para mejorar su potencial de uso, indicando, como uno de los principales objetivos en este campo, la necesidad de crear bases de datos con los valores típicos para los TF [9].

La vida remanente de los TF es un asunto de interés para las empresas que brindan el servicio de la electricidad, los fabricantes de transformadores y las empresas de seguros. El conocimiento de la vida remanente de los TF es un factor decisivo para administrar el riesgo asociado con la confiabilidad de la red y, por supuesto, para brindar un servicio eléctrico de calidad. La evaluación de la vida de cualquier equipo tiene relación con su proceso de envejecimiento. Un TF llega al final de su vida cuando es incapaz de llevar a cabo su función, que consiste en servir de enlace confiable entre las distintas partes de un SE que están a diferentes niveles de tensión [12].

Toda vez que el papel impregnado con aceite se utiliza con gran profusión como aislamiento de los devanados del TF, el fin de la vida útil del mismo está estrechamente relacionado con el fin de la vida útil de todo el TF. Es por este motivo que en la industria rige la premisa que "la vida del transformador es la vida del papel" [4, 12].

Robalino Soto, I.M. [13], señala que las pérdidas de energía en los TF aparecen como consecuencia del calor en el núcleo y las bobinas. Este calor debe ser disipado, antes de que las temperaturas lleguen a niveles críticos y causen el deterioro del aislamiento, provocando la pérdida de vida de los equipos. Las temperaturas de los TF sirven para determinar cuánta carga soportan y el tiempo que debe transcurrir antes de que el aislamiento se deteriore hasta el punto de fallar y, de este modo, relacionar con la pérdida de vida del TF en condiciones de carga superiores a la nominal. Las fallas en los TF debidas al deterioro del aislamiento por diversas causas, como el calentamiento a temperaturas altas, por sobrecargas o por deudas de mantenimiento y otras causas, inciden de forma directa en la vida útil de los equipos. Como el TF es un elemento vital de cualquier sistema eléctrico, se debe tener en cuenta que las temperaturas de funcionamiento estén dentro de niveles aceptables y, de esta manera, impedir el rápido deterioro del aislamiento del equipo y causar daños mayores. Para esto debe prestarse especial atención al correcto funcionamiento del sistema de enfriamiento (garantizar el estado normal de motores y bombas, asegurando el correcto funcionamiento de los rodamientos, la calibración de los manómetros y termómetros) y otras labores. Además, debe mantenerse una carga adecuada del TF, evitando en todo momento los regímenes anormales de la misma. Es necesaria, además, la determinación de la vida útil de los TF, a fin de garantizar una correcta planificación, operación y funcionamiento de los sistemas eléctricos en general. El aislamiento papel-aceite se degrada con el tiempo; este proceso depende de las condiciones térmicas, eléctricas, contenido de agua y oxígeno y otras condiciones internas en el TF.

Otros aspectos, como fallos externos al TF, también repercuten en la condición de operación del material aislante, por lo que monitorearlos se vuelve más importante cuando el aislamiento interno del TF se encuentra en estado de envejecimiento [14], (en los TF de tensiones de 220 kV y menos no es conveniente, desde el punto de vista económico, introducir sistemas de monitoreo en línea desde el comienzo de su explotación, sino cuando se estén acercando al plazo de vencimiento de su vida útil, o cuando existen síntomas asociables a problemas con su estado [15]). Es decir, la expectativa de vida útil de un TF está determinada por muchos factores, tales como: el diseño, la historia de eventos, condiciones de operación, estado actual y futuras condiciones de operación y eventos [14]. Por otro lado, el envejecimiento de los TF ha sido descrito en las guías de carga del *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE) [16] y la Comisión Electrotécnica Internacional (CEI) [17], cuyas filosofías básicas datan de más de 50 años; de acuerdo a ellas, el envejecimiento y la duración de vida del aislamiento de los TF pueden ser descritos casi exclusivamente por la degradación de las propiedades mecánicas del papel aislante entre las espiras del devanado debido a esfuerzos térmicos [14].

Debido a la naturaleza aleatoria de las fatigas que se presentan en TF en servicio, es improbable que se pueda predecir con certeza el momento preciso en el cual un TF fallará. Sin embargo, si se logra cuantificar adecuadamente el valor remanente de alguna de las propiedades del material aislante sólido del equipo, tales como la rigidez mecánica, el *GP*, las fatigas operacionales y otras, podría ser posible determinar el momento en el cual las circunstancias sean tales que una falla puede ocurrir [14].

Teniendo en cuenta lo referido anteriormente y debido a la importancia capital que asumen los TF en las redes eléctricas y la necesidad de minimizar los costos de su operación y mantenimiento o de adquisición de nuevos equipos, se hace necesario poder calcular de manera confiable el tiempo de vida remanente de estos costosos activos, minimizando también la acción que sobre los TF realizan los esfuerzos de envejecimiento que sufren desde el momento de su puesta en servicio. Es sumamente importante, por tanto, establecer parámetros integrales que permitan evaluar el envejecimiento del sistema aislante de los TF, lo que equivale a evaluar el envejecimiento de los equipos propiamente dichos. Ni los resultados del AGD en el aceite ni el del análisis de derivados furánicos disueltos en el mismo son factores que permiten con certeza juzgar sobre el envejecimiento de los TF y, como las fallas que presentan estos equipos en servicio son de naturaleza aleatoria, es poco probable conocer con anticipación el momento de las mismas, pero esto se modifica positivamente si se logra conocer el valor remanente de alguna propiedad del aislante sólido.

Evolución histórica de los métodos para establecer la vida remanente de transformadores de fuerza

Las empresas eléctricas en todo el mundo se esfuerzan por obtener el mayor provecho de los equipos existentes, sin recurrir, sólo en casos extremos, a reemplazos de los mismos. La población envejecida de grandes TF requiere, por tanto, de técnicas para detectar fallas incipientes y realizar actividades de mantenimiento predictivo, que permitan extender la vida operacional de los equipos y minimizar la posibilidad de ocurrencia de fallas catastróficas [18].

Los fabricantes a menudo definen la vida esperada de los TF entre 25 y 40 años. Muchos TF en servicio en el mundo se acercan a esa cifra, por lo que es importante estimar su tiempo de vida remanente, a fin de prevenir salidas de servicio prematuras de los mismos. Conocer la condición de los TF constituye un factor esencial en la toma de decisiones acerca de los mantenimientos y las reposiciones de estos equipos [19], por lo que es de suma importancia conocer, con la mayor exactitud posible, el tiempo de vida remanente de los TF, para poder planificar adecuadamente su gestión.

Si bien el envejecimiento es un efecto natural asociado al paso del tiempo y funcionamiento normal en los materiales electrotécnicos, la actual gestión de los activos y recursos en la industria plantea la necesidad de conocer la vida remanente de los equipos y de supervisar su envejecimiento. En el caso de los TF, los programas de mantenimiento aplicados buscan incrementar su disponibilidad y reducir los costos de mantenimiento correctivo. Es por ello que no son suficientes las técnicas utilizadas sólo para detectar averías, sino que también es necesario desarrollar herramientas que permitan conocer con cierta precisión el grado de deterioro del equipo [9]. Es difícil estimar la vida remanente de un TF, de forma absoluta en años, debido a que existen muchas incertidumbres presentes, por ejemplo, una clara definición de “fin de vida” y el conocimiento acerca de los futuros esfuerzos que soportará el equipo. Hasta ahora, el análisis de vida de un TF se ha basado en el cálculo de la vida remanente de su aislamiento y no en la del transformador como tal. Sin embargo, el punto de “final de vida” del aislamiento es todavía una variable desconocida. Mucho debate se ha originado internacionalmente acerca de los valores esperados de “vida normal” y del criterio de “final de vida” [14].

Dado que la población de TF en servicio se ha envejecido, debe prestársele mucha atención a su disponibilidad y confiabilidad. Por tanto, la condición y la evaluación del riesgo de los TF adquieren cada vez mayor importancia en el mejoramiento de su explotación, a fin de extender su vida útil, reducir los costos y tomar las mejores decisiones técnicas y económicas, con respecto a la gestión del ciclo de vida de estos equipos. Para evaluar y clasificar los TF en base a su condición y para apoyar las decisiones relativas a su reacondicionamiento o reemplazo, ha sido desarrollado el Índice de Salud (IS), que, según Cerón, A.F. *et al.* [20], se obtiene de la combinación de la información resultante de ensayos de diagnóstico que se realizan a un TF, por lo que es necesario contar con un eficiente sistema de adquisición y almacenamiento de datos.

El IS tiene el objetivo de proporcionar un único índice cuantitativo que representa el estado general de salud del TF y sus valores oscilan entre cero (transformadores en óptimas condiciones) hasta uno para (transformadores deteriorados). Para el cálculo del IS se utilizan, según Abu-Elanien, A.E.B., M.M.A. Salama, y M. Ibrahim [21], los resultados del análisis de furanos, del AGD y del análisis físico-químico realizados al aceite.

En general lo desarrollado hasta la actualidad está basado en el empleo de las guías de carga y el análisis del *GP*, que constituyen técnicas inaccesibles para países que confronten dificultades de solvencia económica, por lo cual es necesario implantar en nuestro país un método, basado en la información histórica y de diagnóstico de los TF, que permita evaluar la probabilidad de vida técnica remanente de los equipos, con vistas a poder tomar oportunamente decisiones acertadas acerca de la realización de actividades de mantenimiento o reemplazo de los mismos.

En Flores, W., *et al.* [12], se indica que, en la búsqueda por obtener un valor numérico aproximado de la vida del TF, la industria ha desarrollado dos métodos:

- Las guías de carga, basadas en el modelo de Arrhenius-Dakin, que analizan el proceso de despolimerización en función de la degradación térmica del papel [4].
- La obtención del *GP*, ya sea de manera directa o mediante la obtención de la cantidad de furanos contenidos en el aceite.

Guía de carga de la IEEE

En la guía de carga de la IEEE se señala que, debido a la gran cantidad de factores que tienen influencia en los efectos acumulativos de la temperatura sobre el material aislante, aún no ha sido posible predecir con un grado aceptable de precisión la vida útil del aislamiento del TF, incluso bajo condiciones controladas y, mucho menos, bajo las condiciones variables que se presentan con el equipo en servicio. También, la misma guía menciona que: “la relación entre la vida del aislamiento y la vida del transformador es una interrogante que se mantiene sin resolver, ya que se sabe que, bajo ciertas condiciones, la vida del transformador puede exceder a la vida del aislamiento” [14]. Si bien esto en la práctica sucede con moderada frecuencia, todo transformador, cuyo aislamiento haya consumido su plazo de vida útil, puede seguir en algunas circunstancias operando, pero siempre bajo riesgo, pues cualquier CC u otra falla externa pueden en este caso provocar severos daños, que conllevarían la salida inmediata de servicio del equipo, con las consecuencias anteriormente señaladas.

Grado de polimerización

El *GP*, representa el número de monómeros β de glucosa ($C_6H_{10}O_5$) en la molécula de la celulosa del papel; su valor está relacionado con la rigidez mecánica del papel. Durante la fabricación de un TF, el *GP* del papel se encuentra entre 1000 y 1300; el secado lo reduce a 950 y el envejecimiento en servicio lo reduce más. A un *GP* entre 950 y 500, la rigidez mecánica es constante, pero en el margen de 500...200, esta rigidez decrece en proporción directa al *GP*. A un *GP* de 150, la rigidez mecánica se reduce a 20% de su valor inicial y, debajo de este valor, el papel no tiene rigidez mecánica alguna, por lo que en la industria se considera que debajo de un *GP* = 200, el papel pierde todas sus propiedades mecánicas y el TF es susceptible a daños [12].

Es conocido que existe una correlación entre el grado de polimerización (*GP*) y el contenido de furanos en el aceite de un TF. En la bibliografía se encuentran varios modelos [4, 9, 11, 14, 19, 20, 22], por lo que es de vital importancia clasificarlos y tener un claro concepto de sus diferencias, para utilizar el que mejor represente la correlación *GP*-furanos en la evaluación de la vida del TF. Cuando se degrada el papel aislante ubicado en el interior del TF, el valor del *GP* disminuye y se producen CO, CO₂ y furanos, entre otros compuestos, a raíz de cuya presencia se han elaborado tres métodos, con los cuales se pueden detectar cambios en la condición de la celulosa del papel: medición del *GP*, de los compuestos furánicos (furanos) y de los gases disueltos en el aceite (CO, CO₂). Los últimos dos son considerados métodos indirectos, ya que las pruebas no se realizan directamente en una muestra de papel obtenida del devanado, sino en el aceite muestreado [22].

El método directo para determinar el estado del papel aislante de un TF consiste en obtener una muestra del interior de la cuba. Este proceso es complejo, pues involucra sacar de servicio al TF, levantar su campana y tomar las muestras. La degradación del papel no es uniforme a lo largo del devanado; la pérdida de características se da principalmente en las cercanías del punto más caliente, por lo que, por regla general, la muestra del papel más deteriorado es precisamente la más difícil de obtener, pues este punto se encuentra en el interior del devanado, por lo que es necesario desarmar el TF para poder conseguirla. El estudio de los compuestos furánicos disueltos en el aceite es un método no invasivo y, si es aplicado sobre un TF cuya historia de operación y mantenimiento es conocida, permite tener una aproximación bastante buena del estado del aislamiento sólido [4].

En los TF fabricados en la Unión Soviética que adquirió Cuba antiguamente, en la parte superior del núcleo magnético del transformador, conocida comúnmente como “yugo”, se fijaba en la fábrica productora una muestra de cartón electroaislante. Transcurrido alrededor de un año o más después de la puesta en servicio del equipo, a través de una escotilla especialmente ubicada al efecto, se extraía la muestra, sin necesidad de bajar el nivel de aceite del TF y se medía el *GP* del electrocartón. Aunque la muestra no podía tomarse precisamente en el punto más caliente del TF, el resultado de este ensayo mostraba, con cierta certeza, el estado interno del equipo, lo que permitía planificar con mayor exactitud las acciones de mantenimiento a realizar al arribar el TF al plazo conclusivo de su primer ciclo de mantenimiento.

Desafortunadamente esa práctica en la actualidad ha desaparecido, por lo que se agudiza la necesidad de utilizar métodos indirectos para apreciar el *GP*.

La relación entre el contenido de furanos y el *GP* ha sido ampliamente demostrada para papel no térmicamente mejorado; los papeles térmicamente tratados (TUP) generan compuestos furánicos en una proporción menor, por lo que es necesario definir un indicador que reemplace a la entrada “contenido de furanos” en el proceso de evaluación del estado del TF para los que cuentan con papel TUP, pues no existe consenso sobre la relación entre el contenido de compuestos furánicos en el aceite y la degradación de papel de este tipo[4].

Para utilizar el contenido de furanos en la evaluación del estado de un TF es necesario considerar aspectos constructivos, la temperatura de operación, las condiciones ambientales externas, la edad calendario y el entorno químico al interior del equipo. Para lograr efectividad en la evaluación del estado de un TF, además del contenido de furanos, es necesario integrar otros ensayos aplicados al equipo [4].

Previamente a la realización del ensayo de derivados furánicos disueltos en el aceite de un TF, debe examinarse con exhaustividad el historial del equipo, pues, si el aceite ha sido tratado, los resultados sufrirán alteraciones. Sobre el particular, Medina, R.D.[4] señala: además, en caso de que el aceite se haya sustituido o se le haya realizado alguna acción de mantenimiento, como el filtrado, la purificación y otras, la información que brinda el análisis del contenido de furanos no refleja el estado del aislamiento, perdiéndose parte del historial; es decir, el mantenimiento o sustitución de aceite elimina el historial del contenido de furanos, por lo que debe realizarse un ajuste a las nuevas mediciones, para poder obtener información relevante.

De lo anterior se desprende que el ensayo de derivados furánicos disueltos en el aceite de los TF no constituye una herramienta concluyente para poder juzgar sobre el estado real de los equipos y su envejecimiento. En adición, en Cuba se utilizan aún en la actualidad muchos TF de procedencia soviética, que cuentan con filtros termosifónicos o simplemente termosifones. Estos accesorios están compuestos por cilindros metálicos rellenos de silicagel, sustancia que neutraliza los componentes resultantes del envejecimiento del aislamiento, tomando del aceite los ácidos producidos por la oxidación del aceite y el papel y reteniéndolos en su superficie, es decir, realizando la adsorción del aceite [23-25]. Si se cambia la silicagel con la periodicidad establecida, es decir, una vez al año, el aceite se mantendrá limpio de derivados furánicos, que se retienen en la superficie de los granos de silicagel, lo que es muy aconsejable desde el punto de vista del mantenimiento a los TF, pero es muy perjudicial para el diagnóstico, pues no es posible, en este caso, juzgar sobre el envejecimiento real del aislamiento. Ahora bien, si en un momento dado se comienza a violar la periodicidad en el cambio de silicagel y esta llega a saturarse, los derivados furánicos se precipitarán rápidamente al aceite, por lo que un ensayo de derivados furánicos mostrará en este caso un súbito y acelerado envejecimiento del aislamiento, algo que dista de ser real, pues este fenómeno estaba ocurriendo ya desde hacía algún tiempo, pero no era posible determinarlo por las causas ya expuestas.

La industria usa distintas técnicas para la obtención de un valor de vida de los TF. En la literatura se pueden encontrar varias propuestas:

- Técnicas que utilizan métodos tradicionales de diagnóstico
- Técnicas que utilizan análisis estadístico
- Técnicas que utilizan inteligencia computacional.

La condición del aislamiento interno de papel y aceite es determinante en el trabajo de los TF. Durante años, a fin de evaluar el envejecimiento de este sistema, se han desarrollado varios métodos. En la actualidad, existe toda una variedad de técnicas de diagnóstico, en las cuales las señales eléctricas se monitorean mediante los cambios mecánicos o eléctricos causados por las fluctuaciones de la resistividad, la inductancia o capacitancia o la contaminación del aislamiento por la humedad o bioproductos aceleradores del envejecimiento; es decir, se utilizan el análisis físico-químico, el AGDy el análisis de derivados furánicos disueltos en el aceite aislante. Por ejemplo, Fofana, I. y Y. Hadjadj [26], describen tanto técnicas utilizadas tradicionalmente como técnicas avanzadas de diagnóstico y sus esquemas de interpretación.

En Cáceres Pizarro, J. [27], se presenta un estudio de algunos ensayos realizados a los aceites dieléctricos que se encuentran en los TF y que constituyen las herramientas necesarias para conocer el estado y la condición en las que se encuentran los mismos; por lo tanto, servirán para facilitar el análisis y la toma de decisiones en los mantenimientos tanto preventivos, correctivos o de monitoreo. Se presenta una descripción de los elementos aislantes que se encuentran en los TF, así como su descomposición, debido al envejecimiento y los elementos que influyen en el proceso de descomposición. Se estudiarán las diferentes causas de envejecimiento de los principales componentes de un TF, para lo cual se toman como referencia análisis fisicoquímicos y cromatográficos realizados durante 5 años por la empresa ABB (2011-2016). Se considera para este análisis la vida funcional del sistema de aislamiento (papel y aceite), los esfuerzos a los que son sometidos, el tipo de aceite que usa y las diferentes partes afectadas de cada TF; en base a esto y al minucioso análisis químico y físico del aceite se determinarán varios factores de riesgo en la operación. En Recuay Salazar, R.R.[28], se presenta el Análisis Cromatográfico de Gases como un procedimiento recomendado para Mantenimiento Predictivo en TF, dado que este es uno de los componentes más importantes en una instalación eléctrica.

Asimismo, se provee el sustento teórico de su procedencia, los métodos usados y su importancia y como prevalece frente a otra prueba como la Prueba de Furanos, dando testimonio de un caso real y la recomendación de su uso por una empresa que investiga. En Lata, J.P., *et al.* [29], se describen los ensayos tradicionales utilizados para evaluar el Índice de Salud de los TF, sobre la base de la humedad, la acidez, la fortaleza dieléctrica, el factor de disipación, el AGD y el *GP*.

Las normas existentes ofrecen límites aceptables para cada ensayo, en dependencia del nivel de tensión eléctrica. Con esta información, pueden definirse las mejores acciones de mantenimiento o remplazo de TF. En Brambila, D. y L.V. Gijón [30] se muestran los resultados del análisis de los gases principales de dos muestras de aceite dieléctrico de dos TF mediante la técnica del AGDy con la utilización de los métodos del triángulo de Duval, los gases claves, los límites, tasas y valores del Total de Gases Combustibles Disueltos y las relaciones de Dornenburg y Rogers, con las que puede encontrarse la causa y, una vez esto logrado, fundamentar una solución ante una posible avería en los TF, sin necesidad de retirarlos del servicio.

En Morais, N. [31], se concibe e implementa una metodología que permite estimar la vida remanente de los TF, lo que posibilita conformar un plan adecuado de mantenimiento o reemplazo de los equipos. Para realizar la estimación se evalúa la degradación, con el análisis del 2-furaldehído contenido en el aceite y la medición del *GP*. La viabilidad del método se comprueba mediante la realización de ensayos en un TF real con información conocida y la comparación de resultados, cuando los cambios en el aceite no son considerados y cuando estos cambios son tomados en cuenta.

Las técnicas para el diagnóstico del estado del aislamiento de los TF que utilizan análisis estadístico toman en cuenta la confiabilidad y pueden ser usadas con pocos datos, pero brindan una amplia visión del estado de los TF y son de fácil aplicabilidad. Abbasi, E. y O.P. Malik [6], hacen un acercamiento a la evaluación de la tasa de fallas de los TF, tomando en consideración las inspecciones y los resultados de los ensayos. En este trabajo se utiliza el método estadístico convencional del trazado en un gráfico de los daños, para encontrar el mejor modelo estadístico que indique la información de los ocasionados por el envejecimiento. Luego, mediante la exploración de la correlación entre el ISdel TF y su edad, se establece un método para ajustar la tasa de fallas, sobre la base de la evaluación de la condición. El estudio de TF en servicio y otros dañados ofrece la certeza de la viabilidad del método. Mientras tanto, en Hillary, W.D.A.G., *et al.* [19], se presenta un modelo matemático para estimar la vida remanente de los TF a través de la evaluación del contenido de furanos en el aceite y el *GP* del papel aislante. En Jongen, R., *et al.* [32], se presenta un método estadístico para estimar el envejecimiento de distintos elementos del TF en función de reportes de fallas de unidades de una misma población, con lo que se presenta información que respalda la toma de decisiones de operación.

Por último, se han desarrollado técnicas para evaluar el estado de los TF que utilizan inteligencia computacional, con el uso de pocas variables. En Cerón, A.F., *et al.* [20], se proporciona una metodología para calcular el IS para el sistema de aislamiento papel-aceite en TF con tensión nominal entre 69 y 230 kV, utilizando lógica difusa y se presenta un análisis de los resultados. El IS de los TF puede ser utilizado para priorizar, por ejemplo, la asignación de recursos y definir en mejor forma las actividades de mantenimiento de los mismos. En Kirylchik Yevmenchik, V. [33], se expresa que un costo elevado del mantenimiento y recambio de los TF en las subestaciones eléctricas hace que las empresas se preocupen cada vez más por establecer un plan de mantenimiento preventivo y evitar los posibles fallos en la medida de lo posible. A su vez, la complejidad de establecer la prioridad de los activos lleva a las decisiones erróneas y con ello gastos innecesarios. Para establecer el orden de preferencia dentro de los activos, algunas compañías optan por realizar un estudio de los indicadores de salud y criticidad que proporcionan información suficiente para realizar matrices de riesgo y tomar las decisiones pertinentes al mantenimiento de los activos. En el trabajo se explica uno de los métodos de cálculo de esos indicadores.

En Manassero, U., *et al.* [34], se expresa que la reducción de la vida útil del aislante en los TF se ve afectada por varios factores de índole eléctrica, química y térmica. Se desarrolla un algoritmo de cálculo del envejecimiento de TF, que evalúa la degradación del aislante, desde el punto de vista del efecto causado por su estado de carga. Adicionalmente a los valores de temperatura del punto más caliente del devanado y de envejecimiento del aislamiento obtenidos, el algoritmo calcula el tiempo que se ha superado en el TF la temperatura de referencia de 100°C y cuánto ha envejecido durante ese tiempo y la tendencia de los años de vida remanente que le quedan al TF. El programa constituye una herramienta clave en la toma de decisiones para el recambio de unidades y mantenimientos predictivos del parque de TF.

En Dar, N.A. y K. Kaur [35], se realiza una revisión de las técnicas de evaluación, entre las cuales existen algunas llamadas "técnicas artificiales", para predecir las fallas, a fin de incrementar la vida útil de los TF, incluyendo el AGD y sus métodos de interpretación y el *GP*, que sirven de base para la utilización de las redes neuronales artificiales (RNA), la lógica difusa o lógica Fuzzy y los sistemas expertos. En Forouhari, S. and A. Abu-Siada [36], se expresa que la tensión interfacial y el número ácido o de neutralización están correlacionados con el número de años en servicio del TF y se utilizan como señal de la necesidad de un tratamiento del aceite y se presenta un nuevo y efectivo modelo, basado en lógica difusa, para estimar la vida remanente de los TF, sobre la base de los valores de la tensión interfacial y el número de neutralización del aceite aislante. En Romero-Quete, A.A., E.E. Mombello y G. Rattá [37], se afirma que la estimación de la pérdida de vida es útil en la gestión de TF. Un método no invasivo es estimar la edad funcional del papel aislante del TF, mediante las guías de carga. Para esto, el perfil de temperatura del punto caliente es calculado a partir de características técnicas del equipo, los perfiles de carga y temperatura ambiente y un conjunto de ecuaciones diferenciales. En la práctica, la información disponible para este análisis es incompleta.

En dicho artículo se presenta un método para estimar la carga histórica y los perfiles de temperatura ambiente del TF, cuando existe falta de datos. Para este fin, se emplea una RNAy simulaciones de Monte Carlo. Se determina la edad efectiva de un TF en base a la degradación térmica del papel. El método es aplicado a un TF de 30 MVA de potencia.

Los resultados son analizados en una sección de validación para finalmente dar las conclusiones del trabajo. Entre los aportes se realiza una comparación entre modelos para el cálculo de la temperatura en el punto más caliente, el uso de RNA para generar perfiles de carga y, además, se propone una metodología para generar perfiles de temperatura ambiente usando información histórica disponible. Este modelo considera únicamente la degradación térmica del TF.

Bogdan Gorgan, B., *et al.* [38], presentan el cálculo de la vida remanente del aislamiento de papel de los TF y, en consecuencia, de los propios TF, realizado sobre la base de dos modelos, relacionados con la degradación térmica del papel aislante: la guía de carga de la IEC y el modelo de degradación del papel, que puede mejorarse mediante la introducción de resultados de análisis de derivados furánicos. La vida remanente se obtiene a partir de la confiabilidad del aislamiento de celulosa.

Zhou, D., *et al.* [39], afirman que el modelaje estadístico del tiempo de vida útil es importante en la gestión del reemplazo de los TF envejecidos. Tanto la información acerca de la supervivencia, como la información sobre fallas, son reconocidas como importantes en el mejoramiento de los niveles de exactitud de los modelos de tiempo de vida, mientras las fallas de TF sean escasas y la mayor parte de los mismos estén aún en condiciones de operación. En el trabajo se argumenta la importancia de diferenciar las fallas aleatorias de las fallas debidas al envejecimiento y se analiza la diferencia en los requisitos de información para el modelaje de ambos diferentes tipos de fallas, además de compararse mediante simulaciones de Monte Carlo. El modelo de fallas del ciclo de vida de los TF puede elaborarse mediante la combinación de los modelos para las fallas aleatorias y para las fallas debidas al envejecimiento. Se presenta un caso de estudio que muestra cómo, a través de un análisis post mortem, ambos modelos de fallas pueden ser diferenciados, lo que ayuda a mejorar la exactitud del modelo combinado.

Mamaní, M.L., *et al.* [40], afirman que la falla de un TF puede producir serios daños colaterales en el SE en el que opera. La probabilidad de fallas de un TF envejecido se incrementa si el equipo se sobrecarga, lo que podría solucionarse si se cambia el equipo por otro de mayor potencia o se instala otro TF en paralelo al mismo. Sin embargo, los TF son activos costosos, por lo que las inversiones en nuevos equipos deben planificarse cuidadosamente, requiriéndose herramientas poderosas para justificar estas inversiones. En este contexto, el cálculo del envejecimiento térmico del papel aislante constituye un indicador clave para establecer la vida remanente del TF. Esta información permite definir el tipo de inversión y para cuándo debe programarse. El trabajo se basa en el método de determinación de la edad térmica del TF, previamente desarrollado por los autores y luego en el cálculo de la fecha probable de fin de vida confiable del equipo, mediante la utilización de una RNA para pronosticar la demanda futura de carga. Finalmente, se desarrolla un análisis económico, a fin de comparar las dos opciones posibles de inversión.

Las referencias sobre el estado del arte de la evaluación de la probabilidad de vida remanente de TF hasta la actualidad contemplan la utilización de distintas herramientas para el cálculo de un valor de vida de los equipos, pues la determinación de forma directa del *GP*, que permite, de una manera simple, poder juzgar sobre el estado real de los TF, implica sacar de servicio los mismos, levantar su campana y tomar muestras de papel aislante, mientras el ensayo de derivados furánicos disueltos en el aceite de los TF, que hace posible calcular de manera indirecta el *GP*, no constituye una herramienta concluyente para poder juzgar sobre el estado de los TF y su envejecimiento. Por tanto, se han desarrollado distintas técnicas, como las que utilizan el análisis físico-químico, el AGD y el análisis de derivados furánicos disueltos en el aceite aislante, que permiten definir las mejores acciones de mantenimiento o reemplazo de TF, las técnicas que, utilizando análisis estadístico, toman en cuenta la confiabilidad, brindando, con su fácil aplicabilidad, una amplia visión del estado de los TF y las técnicas que utilizan inteligencia computacional y, con el uso de pocas variables, permiten priorizar la asignación de recursos y definir en mejor forma las actividades de mantenimiento de los equipos, calcular la fecha probable de fin de vida confiable de los mismos y definir posibles opciones de inversión. Todas estas técnicas son en el momento actual inaccesibles para el país, debido a sus condiciones económicas, lo que hace necesario implantar un método, basado en la información histórica y de diagnóstico de los TF, que permita evaluar su probabilidad de vida técnica remanente, para poder tomar con tiempo decisiones acertadas sobre el mantenimiento o reemplazo de los mismos.

CONCLUSIONES

En el presente artículo se ha presentado una reseña de los principales conceptos y consideraciones actuales, relativas a la importancia de la evaluación de la probabilidad de vida técnica remanente de transformadores de fuerza, así como un detallado y minucioso análisis del estado del arte relativo a los métodos para la realización de esta evaluación y del estado actual en que se encuentran los equipos.

De lo anterior se concluye lo siguiente:

- Las propuestas para evaluar el *GP* considerando fenómenos de baja y alta temperatura, no brindan toda la información necesaria para realizar la estimación, de forma práctica, de la probabilidad de vida técnica remanente de transformadores de fuerza.

- No se encontraron publicaciones que consideren la variación en la humedad del papel, debida a los incrementos de esta en el aceite y a los cambios en la temperatura en el interior del TF.
- La evaluación de la vida remanente de los TF se basa fundamentalmente en el análisis de compuestos furánicos disueltos en el aceite, pero se presentan limitaciones, como, por ejemplo, el contenido de estos compuestos en el aceite pierde efectividad cuando se realiza un reacondicionamiento o sustitución del aceite aislante, lo que implica que el ensayo de derivados furánicos disueltos en el aceite de los TF no constituye una herramienta concluyente para poder juzgar sobre el estado real de los equipos y su envejecimiento.
- En los modelos de degradación del sistema aislante no se considera la variación en el ambiente físico-químico, incluida la variación en la humedad en el papel, sino sólo el fenómeno térmico, que, según las referencias encontradas, por sí sólo trae como resultado el deterioro del aislamiento con el transcurso del tiempo.
- No están suficientemente argumentados los procedimientos que relacionan los posibles estados comprendidos durante la vida útil de los TF con la información obtenida de los ensayos aplicados.
- No se toman en cuenta las incertidumbres asociadas al envejecimiento, como la pérdida de características dieléctricas en el sistema papel-aceite o la reducción de la capacidad de refrigeración, aunque en el último caso se producen fenómenos térmicos que influyen indudablemente en el deterioro acelerado del aislamiento.
- Se requiere utilizar guías de carga para estimar la degradación térmica de los TF, pues la mayoría no poseen un registro histórico de los perfiles de carga ni un mecanismo para medir directamente la temperatura en el interior de la cuba, lo que reafirma la importancia de contar con bases de datos adecuadas de la explotación y mantenimiento de los equipos y de desarrollar sensores adecuados que permitan contar con toda la información posible, en tiempo real, sobre el estado de los TF en explotación.

Teniendo en cuenta que gran parte de la población de TF en funcionamiento alrededor del mundo se halla en sus etapas finales de vida, sus propietarios invierten solo lo estrictamente necesario en su mantenimiento y operación, por lo que se encuentran muy interesados en conocer, con el mínimo de incertidumbre, o manejando la misma de manera objetiva, el tiempo de vida remanente de los TF, dado el imperativo de reducir las pérdidas económicas, elevar la satisfacción de los clientes y evitar los daños al medio ambiente que producen las averías en los TF. De lo anterior se deriva la necesidad de desarrollar un método que posibilite determinar, de manera confiable, a partir de la información de explotación, mantenimiento y diagnóstico, la probabilidad de vida técnica remanente de transformadores de fuerza. Deben ser considerados varios factores de degradación, pues tener en cuenta sólo uno de ellos limitaría la estimación de la vida remanente del equipo. El método debe ser capaz de utilizar toda esta información y estimar la vida remanente del TF. La probabilidad de vida técnica remanente de los TF debe determinarse sin la utilización de técnicas que requieran de costoso equipamiento, sino mediante el tratamiento y análisis estadístico de datos y análisis de riesgo, a partir de la información existente, todo lo cual permitirá la toma de decisiones relativas a la ejecución de mantenimientos o el reemplazo de los equipos.

REFERENCIAS

- [1]. Martins, M.A., "Condition and risk assessment of power transformers: a general approach to calculate a Health Index". *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, 2014. v.26, n.1, p. 9-16. [Consultado en septiembre de 2018] Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/266677864_Condition_and_risk_assessment_of_power_transformers_A_general_approach_to_calculate_a_Health_Index, DOI: 10.1016/j.ctmat.2014.09.002
- [2]. MTE-AG, "Sistemas de Monitoreo de Transformadores", M.T.E. AG, Editor. Zug, Suiza. 2015, p. 8. [Consultado en septiembre de 2018]. [Consultado en septiembre de 2018] Disponible en: <https://www.mte.ch/products/transformer-monitoring>
- [3]. Abbasi, E. "Developing Practical Methods for Ageing and Failure Probability Modeling of Mineral Oil Immersed Power Transformers Using Smart Utility Data". (Doctor of Philosophy Thesis in order to obtain the degree of Doctor of Philosophy), University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada. (2017). [Consultado en septiembre de 2018] Disponible en: <https://prism.ucalgary.ca/handle/11023/3834>, DOI: <http://dx.doi.org/10.11575/PRISM/25628>
- [4]. Medina, R.D., "Desarrollo de indicadores para el análisis de riesgo en parques de transformadores de potencia dentro de un contexto de gestión de activos físicos", in Facultad de Ingeniería 2017, Universidad Nacional de San Juan, Argentina San Juan, Argentina p. 247. [Consultado en septiembre de 2018] Disponible en: cired.net/publications/cired2015/.../CIRED2015_0054_final.pdf
- [5]. Akolkar, S.M. and B.E. Kushare, "Remaining Life Assessment of Power Transformer". *Journal of Automation and Control*, 2014. v.2, n.2, p. 4. [Consultado en septiembre de 2018] Disponible en: <http://pubs.sciepub.com/automation/2/2/2/>, doi:10.12691/automation-2-2-2.
- [6]. Abbasi, E. and O.P. Malik, "Failure rate estimation of power transformers using inspection data", in 2016 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS). 2016, IEEE Beijing, China p. 4. [Consultado en septiembre de 2018] Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7764150/>, DOI: [10.1109/PMAPS.2016.7764150](https://doi.org/10.1109/PMAPS.2016.7764150)

- [7]. Girón González, J.P., ``Análisis de la reducción de vida del sistema de aislamiento basado en el tiempo y la temperatura causados por los efectos de las sobrecargas en transformadores de potencia sumergidos en aceite, in Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica 2011 Universidad de San Carlos de Guatemala: Ciudad Guatemala. p. 147. [Consultado en septiembre de 2018] Disponible en: www.biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0773_EA.pdf
- [8]. Aliani, E. and A.A. Romero-Quete, ``Consideraciones para la gestión de transformadores de potencia, en el marco de la ISO 55000'', in 2014 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON). 2014, IEEE: Bariloche, Argentina p. 6. [Consultado en septiembre de 2018] Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/269272734_Consideraciones_para_la_gestion_de_transformadores_de_potencia_en_el_marco_de_la_ISO_55000, DOI: [10.1109/ARGENCON.2014.6868556](https://doi.org/10.1109/ARGENCON.2014.6868556)
- [9]. Urquiza C., D.J., ``Aportaciones al diagnóstico de transformadores de potencia mediante el análisis de compuestos furánicos en el aceite'', in Departamento de Ingeniería Eléctrica. 2017, Universidad Carlos III de Madrid: Leganés. p. 203. [Consultado en septiembre de 2018] Disponible en: https://www.google.com/cu/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiXmeDYjabkAhUoxVvKkHVN0BuQQFjABegQIBBAC&url=https%3A%2F%2Farchivo.uc3m.es%2Fbitstream%2Fhandle%2F10016%2F25874%2Ftesis_domingo-javier_urquiza_cuadros_2017.pdf%3Fsequence%3D1%26isAllowed%3Dy&usq=AOvVaw1zsGBD5gNDh2RM6-S_RhEm
- [10]. CEI, ``Mineral oil-impregnated electrical equipment in service – Guide to the interpretation of dissolved and free gases analysis''. CEI: Geneva, Switzerland. 2015, p. 38. [Consultado en septiembre de 2018] Disponible en: <https://webstore.iec.ch/publication/23323>
- [11]. Lessard, M.-C., et al., ``Furanic Compounds for Diagnosis'', in Technical Brochures, W. D1.01.13, Editor. CIGRÉ: Paris, France. 2012, p. 70. [Consultado en septiembre de 2018] Disponible en: <https://e-cigre.org/publication/494-furanic-compounds-for-diagnosis>
- [12]. Flores, W., *et al.*, Vida de transformadores de potencia sumergidos en aceite: Situación actual. Parte I. Correlación entre la vida y la temperatura. IEEE Latin America Transactions, 2007. v.5, n.1, p. 5. [Consultado en septiembre de 2018] Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4445711>
- [13]. Robalino Soto, I.M., Vida útil del transformador, in Facultad de Ingeniería Eléctrica. Escuela Politécnica Nacional: Quito, Ecuador. 1998, p. 336. [Consultado en septiembre de 2018] Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/6194/1/T1371.pdf>
- [14]. Flores, W.C., ``Estimación de la vida técnica remanente de transformadores de potencia sumergidos en aceite, utilizando conocimiento experto y análisis de riesgo'', in Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de San Juan: San Juan, Argentina. 2011, p. 279. [Consultado en septiembre de 2018] Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/282250615_Estimacion_de_la_vida_tecnica_remanente_de_transformadores_de_potencia_sumergidos_en_aceite_utilizando_conocimiento_experto_y_analisis_de_riesgo
- [15]. Bederiak, Y.S. and Y.L. ``Bogatirev Postroi ye ye system monitor ingasilovixh transformator''. 2011, p.16. [Consultado en septiembre de 2018] Disponible en: <http://silovoytransformator.ru/stati/postroenie-sistem-monitoringa-siloviyh-transformatorov.htm>
- [16]. IEEE, ``Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers'', in Std C57.91-1995. Transformer Committee of the IEEE Power Engineering Society: New York, USA. 1995, p. 108. [Consultado en septiembre de 2018] Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4445711>
- [17]. CEI, Loading guide for oil-immersed power transformers. IEC: Geneva, Switzerland. 2005, p. 122. [Consultado en septiembre de 2018] Disponible en: http://www.barghnews.com/files/fa/news/1397/11/27/74027_675.pdf
- [18]. Abu-Bakar, N. and A. Abu-Siada, ``Fuzzy logic approach for transformer remnant life prediction and asset management decision''. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation 2016. v.23, n.5, p. 10. [Consultado en septiembre de 2018] Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/311433169_Fuzzy_logic_approach_for_transformer_remnant_life_prediction_and_asset_management_decision, doi:10.1109/TDEI.2016.005936.
- [19]. Hillary, W.D.A.G., *et al.*, ``A tool for estimating remaining life time of a power transformer'', in 2017 Moratuwa Engineering Research Conference (MERCOn). 2017: Moratuwa, Sri Lanka. p. 6. [Consultado en septiembre de 2018] Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/318478128_A_tool_for_estimating_remaining_life_time_of_a_power_transformer?iepl%5BviewId%5D=OgJDpxH3zxJzFEBereRE0y6xU5&iepl%5BSingleItemViewId%5D=uBhdB81fFXeUuhKA3fjERTBg&iepl%5BpositionInFeed%5D=1&iepl%5BhomeFeedVariantCode%5D=ncls&iepl%5BactivityId%5D=1000495770636288&iepl%5BactivityType%5D=service_add_recommendation_publication&iepl%5BactivityTimestamp%5D=1532977983&iepl%5BrecActVar%5D=similar_publications_by_very_recent_publication_interaction_v1%3Esimilar_publications_by_very_recent_publication_interaction_v1&iepl%5BrecScore%5D=99.601570129395&iepl%5Bcontexts%5D%5B0%5D=homeFeed&iepl%5BtargetEntityId%5D=PB%3A318478128&iepl%5BinteractionType%5D=publicationTitle

- [20]. Cerón, A.F., *et al.*, ``Índice de Salud para Transformadores de Potencia Inmersos en Aceite Mineral con Voltajes entre 69 kV y 230 kV usando Lógica Difusa``. Información Tecnológica, 2015. v.26, n.2, p. 10. [Consultado en septiembre de 2018] Disponible en: <https://scielo.conicyt.cl/pdf/infotec/v26n2/art13.pdf>, doi:10.4067/S0718-07642015000200013.
- [21]. Abu-Elanien, A.E.B., M.M.A. Salama, and M. Ibrahim, ``Calculation of a Health Index for Oil-Immersed Transformers Rated Under 69 kV Using Fuzzy Logic``. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012. v.27, n.4, p. 8. [Consultado en septiembre de 2018] Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/232038358_Calculation_of_a_Health_Index_for_Oil-Immersed_Transformers_Rated_Under_69_kV_Using_Fuzzy_Logic, doi:10.1109/TPWRD.2012.2205165.
- [22]. Flores, W., *et al.*, ``Vida de transformadores de potencia sumergidos en aceite. Situación actual. Parte II. Correlación entre resultados de ensayos físico-químicos``. IEEE Latin America Transactions 2007. v.5, n.8, p. 8. [Consultado en septiembre de 2018] Disponible en: https://www.academia.edu/32482866/Vida_de_transformadores_de_potencia_sumergidos_en_aceite_Situaci%C3%B3n_actual._Parte_II._Correlaci%C3%B3n_entre_resultados_de_ensayos_f%C3%ADsico-qu%C3%ADmicos, doi:10.1109/T-LA.2007.4445711.
- [23]. Montané G., J.J., ``Caracterización del Mantenimiento a los Transformadores de Fuerza de la CTE de Santa Cruz del Norte y Recomendaciones para su mejoramiento`` , in Facultad de Ingeniería Eléctrica. 2012, Instituto Superior Politécnico, José A. Echeverría: Habana. p. 101. [Consultado en septiembre de 2018] Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/328538434_Caracterizacion_del_mantenimiento_a_los_transformadores_de_fuerza_de_la_CTE_de_Santa_Cruz_del_Norte_y_recomendaciones_para_su_mejoramiento
- [24]. Briones Martínez, M.G., ``Análisis técnico y económico de la recuperación de los aceites dieléctricos con tierra Fuller y desludificación de bobinados en transformadores`` , in Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación. 2005, Escuela Superior Politécnica del Litoral. p.1-11. [Consultado en septiembre de 2018] Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/28791553_Analisis_Tecnico_Y_Economico_De_La_Recuperacion_De_Los_Aceites_Dieléctricos_Con_Tierra_Fuller_Y_Desludificacion_De_Bobinados_En_Transformadores
- [25]. Artero, J.R. ``Mantenimiento moderno en transformadores de potencia``. in Décimo Tercer Encuentro Regional Iberoamericano de CIGRÉ. 2009. Puerto Iguazú, Argentina. [Consultado en septiembre de 2018] Disponible en: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKEwi97Pjym6bkAhUiuVkkHY7fA_4QFjAAegQIARAC&url=http%3A%2F%2Fprof.usb.ve%2Fbueno%2FTransformadores%2FA2-110.pdf&usq=AOvVaw0NCAmqJfIRYqtHqoQjSh5t
- [26]. Fofana, I. and Y. Hadjadj, ``Electrical-Based Diagnostic Techniques for Assessing Insulation Condition in Aged Transformers. Energies``. 2016, v.9, n.679, p. 26. [Consultado en septiembre de 2018] Disponible en: <http://www.mdpi.com/1996-1073/9/9/679/pdf>
- [27]. Cáceres Pizarro, J., ``Análisis físico químico y cromatográfico en transformadores de potencia y de distribución en la planta de licuefacción de gas Melchorita-Perú LNG`` , in Facultad de Ingeniería Mecánica, Eléctrica, Electrónica y Sistemas, Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica. 2017, Universidad Nacional del Altiplano-Puno: Puno, Perú. p. 94. [Consultado en septiembre de 2018] Disponible en: <https://docplayer.es/96120345-Universidad-nacional-del-altiplano-puno.html>
- [28]. Recuay Salazar, R.R., ``Experiencias de campo en análisis cromatográfico`` , in Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. 2011, Universidad Nacional de Ingeniería: Lima Perú. p. 60. [Consultado en septiembre de 2018] Disponible en: <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/9188>
- [29]. Lata, J.P., *et al.*, ``Transformer Common Test Description for Condition Management`` , in International Conference on Automatica (ICA-ACCA). 2016, IEEE. p. 7. [Consultado en septiembre de 2018] Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/311609321_Transformer_common_test_description_for_condition_management
- [30]. Brambila, D. and L.V. Gijón, ``Predicción de fallas en los transformadores de potencia mediante la técnica de cromatografía de gases`` , in Departamento de Ingeniería Eléctrica. 2015, Instituto Politécnico Nacional-Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica-Unidad Profesional "Adolfo López Mateos": México, D. F. p. 109. [Consultado en septiembre de 2018] Disponible en: <http://tesis.ipn.mx/handle/123456789/21906>
- [31]. Morais, N., ``Estimating the Remaining Lifetime of Power Transformers Using Paper Insulation Degradation`` , in Faculdade de Engenharia 2018, Universidade do Porto: Porto, Portugal. p. 59. [Consultado en septiembre de 2018] Disponible en: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKEwjgkNCl nabkAhUu1lkKH eOZDfcQFjAAegQIABAC&url=https%3A%2F%2Fsigarra.up.pt%2Ffeup%2Fpt%2Fpub_geral.show_file%3Fpi_doc_id%3D169231&usq=AOvVaw1Nh7QE-TCeM9eSYjhjX9xL

- [32]. Jongen, R., *et al.*, "A statistical approach to processing power transformer failure data", in 19th International Conference on Electricity Distribution. 2007, C I R E D: Vienna, Austria. p. 4. [Consultado en septiembre de 2018] Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/232612891_A_statistical_approach_to_processing_power_transformer_failure_data
- [33]. Kirylchik Yevmenchik, V., "Aplicación de la metodología de cálculo de índice de salud de activos a transformadores de potencia. Propuestas de mejora", in Dep. Organización Industrial y Gestión de Empresas I, Escuela Técnica Superior de Ingeniería 2017, Universidad de Sevilla: Sevilla, España. [Consultado en septiembre de 2018] Disponible en: <https://hdl.handle.net/11441/69380>
- [34]. Manassero, U., *et al.* "Envejecimiento de la aislación eléctrica en transformadores de potencia". Desarrollo de un algoritmo de cálculo según guías de carga IRAM 2473 e IEEE C57. 91-2002. in 4° Simposio Argentino de Informática Industrial. 2015. Rosario, Argentina. [Consultado en septiembre de 2018] Disponible en: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/59128>
- [35]. Dar, N.A. and K. Kaur, "Insulation Life Assessment of High Voltage Transformer: A Review". International Journal of Emerging Trends in Engineering and Development 2018. v.2, n.8, p. 7. [Consultado en septiembre de 2018] Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/323543844_Insulation_Life_Assessment_of_High_Voltage_Transformer_A_Review?iepl%5BviewId%5D=MiRuxouzQp230reFSRf6pkZa&iepl%5BsingleItemViewId%5D=4Li4o9RhoYEAlyZxE1DgTeal&iepl%5BpositionInFeed%5D=6&iepl%5BhomeFeedVariantCode%5D=ncls&iepl%5BactivityId%5D=1024656861696000&iepl%5BactivityType%5D=service_add_recommendation_publication&iepl%5BactivityTimestamp%5D=1538738435&iepl%5BrecActVar%5D=similar_publications_by_very_recent_publication_interaction_v1%3Esimilar_publications_by_very_recent_publication_interaction_v1&iepl%5BrecScore%5D=83.118850708008&iepl%5Bcontexts%5D%5B0%5D=homeFeed&iepl%5BtargetEntityId%5D=PB%3A323543844&iepl%5BinteractionType%5D=publicationTitle, doi:<https://dx.doi.org/10.26808/rs.ed.i8v2.01>.
- [36]. Forouhari, S. and A. Abu-Siada, "Remnant Life Estimation of Power Transformer Based on IFT and Acidity Number of Transformer Oil", in 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM). 2015, IEEE. p. 4. [Consultado en septiembre de 2018] Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7295331>
- [37]. Romero-Quete, A.A., E.E. Mombello, and G. Rattá, "Assessing the loss-of-insulation life of power transformers by estimating their historical loads and ambient temperature profiles using ANNs and Monte Carlo simulations". DYNA, 2016. v.83, n.197, p. 10. [Consultado en septiembre de 2018] Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532016000300014, DOI: <http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v83n197.48134>
- [38]. Bogdan Gorgan, B., *et al.*, "Calculation of the Remaining Lifetime of Power Transformers Paper Insulation", in 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM). 2012, IEEE: Brasov, Romania. p. 8. [Consultado en septiembre de 2018] Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/261272041_Calculation_of_the_remaining_lifetime_of_power_transformers_paper_insulation
- [39]. Zhou, D., *et al.*, "Data Requisites for Transformer Statistical Lifetime Modelling-Part II: Combination of Random and Aging-Related Failures". IEEE Transactions on Power Delivery, 2014. v.29, n.1, p. 7. [Consultado en septiembre de 2018] Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/260722119>, doi:10.1109/TPWRD.2013.2270116.
- [40]. Mamani, M.L., *et al.*, "Power transformer management-investment planning considering loss of life of the insulating paper". 2014, CIGRE. p. 8. [Consultado en septiembre de 2018] Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4445711>