

Health Index for Transformer Condition Assessment

R. Arias, *Senior Member, IEEE*, and J. Mejia, *Member, IEEE*

Abstract—This research is performed in order to estimate the overall condition of power Transformers, which is considered by 19 test: Site acceptance test, quality oil test and insulation acceptance test. One way is using the Health Index (HI), this technique is useful for maintenance strategy planning. The aim of this research is to represent the new method to assess the conditions of transformer by applying a new developed HI table, which was improved from the conventional method, with Wavelet network and validate by date mining. A case study was used to evaluate the performance of the new develop HI. Therefore, the proposed method can create an efficient preventive maintenance plans for power transformers.

Index Terms—Assessment, Condition, Health index, Transformers.

I. INTRODUCCIÓN

Los índices de salud, es una técnica muy usada para realizar la estrategia de planeación del mantenimiento en sistemas de potencia [01], el tiempo de vida de los transformadores de potencia son de 32 a 55 años con una desviación estándar de 8 años, la cual depende de diseño, carga, degradación del aislamiento del papel y aceite, fallas, alta temperatura y humedad [02], los factores antes mencionados pueden reducir el tiempo de vida de los transformadores de potencia. Por tanto, la identificación de los problemas mediante una identificación y evaluación de la condición de los transformadores son importantes en las actividades por el plan de mantenimiento.

Hay varios métodos para la evaluación de la condición de los equipos en los sistemas de transmisión [03], como son: Análisis de modos de falla (FMEA) [04], confiabilidad centrado en mantenimiento (RCM) [05], [06], también se han tenido esfuerzos en la representación de índices de salud [07], sin embargo, las investigaciones son mejorables, considerando que se requiere determinar la cantidad de variables requeridas y apropiadas para la evaluación, un limitante actual es que solamente se han construido con los resultados de laboratorio (análisis DGA) [1-8], sin embargo no consideraba pruebas eléctricas o de calidad en los estudios actuales.

Los índices de salud (HI) es un método usual y efectivo para crear una prioridad de los equipos críticos y proponer un plan propio de mantenimiento [08]. Este método puede utilizar los resultados de las inspecciones, pruebas de campo y laboratorio. Hay muchos métodos que podrían usar la condición del transformador, gases disueltos (DGA), composición de furanos,

grado de polimerización (DP), calidad del aceite, factor de potencia, inspecciones visuales, el equipo con inspecciones condicionales para los bujes y cargadores bajo carga.

La presente investigación se ha desarrollado para estimar la condición general del transformador de potencia mediante Índices de Salud (HI), considerando los métodos de prueba, Análisis de Gases Disueltos, Factor de Potencia, Calidad de Aceite, gases Furanos, Inspecciones visuales, estado del conmutador bajo carga (OLTC) y los bujes. La evaluación de la condición general de los transformadores se desarrolla considerando los análisis de las pruebas con métodos conocidos IEEE e IEC, descritos en el numeral 2 “método”, considerando por cada análisis basado en redes de onda y método finalizando con una puntuación, que permita determinar la condición y categorización del equipo la cual es validado con un análisis de minería de datos para determinar el árbol de decisión que muestra la mayor influencia y posibles diferencias e interacciones con los modos de falla.

Además de la condición general, el índice de salud determinará el plan de renovación a mediano y largo Plazo de los Transformadores.

II. MÉTODO

A. Redes de Ondas y Análisis Multi-Resolución

Combinando la transformada de onda y las ideas básicas de redes neuronales se combinan en redes de onda. La idea básica es utilizada la excelente localización del tiempo – frecuencia. Para explicar la estructura, empezaremos con introducir la continuidad y ondas discretas para establecer las ondas de transformadas y análisis de multi resolución (MRA).

La función $f(t)$ y la transformada de onda (CWT) se usa para transferir, como se detalla en la ecuación 1.

$$W(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{|a|}} \varphi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (1)$$

donde a y b son real y $*$ denota la conjugación compleja.

El termino está escrito en forma sintetizada es mostrada en la ecuación 2.

$$\frac{1}{\sqrt{|a|}} \varphi \left(\frac{t-b}{a} \right) \quad (2)$$

En la ecuación 2, una segunda función desarrollada ha sido sintetizada en la ecuación 3 [09], como una representación no redundante.

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} d(k, l) * 2^{-\frac{k}{2}} \varphi(2^{-k/2}t - l) \quad (3)$$

Ricardo Manuel Arias Velásquez, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Perú, rariasve@fmi.com. Teléfono: +51 959751665.

Jennifer Vanessa Mejía Lara, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Perú, jennifer.mejia@enel.com. Teléfono: +51 984120056.

El punto importante es la dilatación y la traslación de los parámetros no son continuos, pero no son valores discretos. La ecuación 3 corresponde a ejemplos coordinador (a,b) en la red, donde los valores consecutivos son escalas discretas como intervalos de 2 valores. La secuencia de 2 dimensiones d(k,l) es referido a la transformada de onda discreta (DWT). La DWT es aún una transformada de señal continua, la discretización es solamente en parámetros a, b en este sentido son análogos a las series Fourier como se detalla en la ecuación 4.

$$\delta_{j,n} = \varphi(2^{-j}x - n) \tag{4}$$

donde φ ; n pertenece a Z ; n son los parámetros de traslación y j es la dilatación. En particular, la representación significa que la función f(t) en $L^2(R)$ espacio podría ser aproximado con diferentes precisiones dependiendo en la resolución del espacio en la cual la función aproximada es la ecuación (05).

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \mu(j, l) \varphi(2^{-j}t - l) \tag{5}$$

donde la función f(t) denota la aproximación de la función en resolución j y $\mu(j,l)$ son coordenadas de la función de escala en el sub espacio. Los detalles agregados son aproximaciones.

Estos nuevos subespacios W_i la cual contiene los detalles, son orto-normales y tienen orto-normalidad básicas. Además, si la función f(t) está definido sobre una pequeña región se detalla en la ecuación 6.

$$f_k(t, \mu) = \sum_{l=L}^U \mu(j_0, l) \varphi(2^{-j}t - l) \tag{6}$$

Para U, L pertenecen Z.

La ecuación 06 representa las redes de onda que pueden ser usados como una aproximación de una función desconocida, usando las funciones de onda como una básica. Una representación gráfica es demostrada en la fig. 1. Lo cual representa los datos de entrada desarrollados y los aportes de las diferentes variables en el modelo, la cual permite realizar predicción aplicando redes neuronales para series de tiempo y análisis de minería de datos [22].

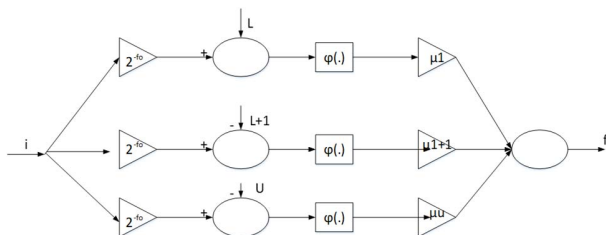


Fig. 1: Representación de redes de onda. Fuente: [09]

B. Pruebas para los Transformadores de Potencia

El presente numeral desarrolla los parámetros que influyen en la condición general del transformador, el cual requiere de tres tipos de pruebas: pruebas eléctricas, pruebas aislamiento del aceite y calidad del aceite.

- Pruebas Eléctricas del Transformador

La prueba eléctrica determina la condición del bobinado siendo el factor de potencia del aislamiento. Este método detecta la integridad del aislamiento del bobinado y bujes.

La evaluación de la condición del transformador de potencia, índice de salud es el resultado obtenido de los diferentes métodos de pruebas, con la disponibilidad de datos y la experiencia del personal operativo. El índice de salud HI es clasificado en cinco niveles, muy bueno, bueno, regular, pobre muy pobre. Este método es usado para identifica cuan bueno es el estado de la condición del transformador.

La prueba eléctrica es usada para la inspección de la condición del bobinado, siendo el factor de potencia del aislamiento, esta prueba detecta la integridad del aislamiento del bobinado y determina el factor de potencia del aislamiento total incluyendo bobinado y bujes. El porcentaje del factor de potencia es calculado de la medición del valor de la tensión, corriente y potencia. En la ecuación 7 se encuentra el porcentaje del factor de potencia.

$$\% FP = P*100/VI \tag{7}$$

El límite no debe exceder 0.5 % a 20°C, los límites del factor de potencia son mostrados en la Tabla 1 y 2.

TABLA I
LÍMITES DE FACTOR DE POTENCIA DEVANADO

Límites de factor de potencia % FP a 20° C				
IH	CH	CHL	CL	Capacitancia
Muy bueno	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 2 %
Bueno	0.5 – 1.0	0.5 – 1.0	0.5 – 1.0	2.1 – 5 %
Regular	1.1 – 1.5	1.1 – 1.5	1.1 – 1.5	5 – 8 %
Pobre	1.6 – 2.0	1.6 – 2.0	1.6 – 2.0	8 – 10 %
Muy Pobre	> 2	> 2	> 2	> 10 %

TABLA II
LÍMITES DE FACTOR DE POTENCIA EN BUJES

Factor de Potencia Bujes		
IH	C1 %	C1 Capacitancia
Muy bueno	0 – 0.5	0 %
Bueno	0.5 – 0.7	0 – 5 %
Regular	0.7 – 1.0	5 – 8 %
Pobre	1.0 – 2.0	8 – 10 %
Muy Pobre	> 2 o negativo	> 10 %

- Pruebas de Análisis del Aislamiento del Aceite

La prueba de aislamiento del aceite es realizada para la inspección de condición del aislamiento del aceite. La evaluación de la integridad consiste en:

1. Análisis de Gases Disueltos

El método de análisis de gases disueltos es usado para el análisis de concentraciones y el proceso de descomposición para los siguientes gases: H₂; CH₄; C₂H₆; C₂H₄; [10], el papel de aislamiento CO, CO₂ [11]. La interpretación de los resultados se implementa con una técnica de interpretación de acuerdo a las normas IEC 60599 [12] e IEEE C57.104 [13].

La prueba de DGA se emplea como una herramienta para determinar la condición del transformador [32]. Esto indica muchos problemas y puede identificar el deterioro del aislamiento del aceite [33]. Este diagnóstico utilizando la concentración total e individual de gases y la tendencia diaria, según norma IEEE C57.104, también se realiza el diagnóstico

utilizando la relación de gases según norma IEC 60599, se muestra las tablas 3 y 4 con el detalle de la concentración total e individual [34], [35].

TABLA III
DIAGNÓSTICO UTILIZANDO CONCENTRACIÓN TOTAL E INDIVIDUAL DE GASES
NORMA. IEEE C57.104

Diagnóstico utilizando las concentraciones de gases individuales totales y tendencia creciente de gases				
Factor	IH	H2	C2H2	C2H4
100	Muy bueno	10	5	5
30	Bueno	11-100	6-35	6-50
20	Regular	101-700	36-50	51-100
10	Pobre	701-1800	51-80	101-200
0	Muy Pobre	>1800	>81	>200
Factor	IH	CO	CO2	CH4
100	Muy bueno	<30	<500	0-50
30	Bueno	31-350	500-2500	51-120
20	Regular	351-570	2501-6000	121-400
10	Pobre	571-1400	6001-10,000	401-1000
0	Muy Pobre	>1400	>10,000	>1000
Factor	IH	C2H6	TGC	TGC
100	Muy bueno	0-10	--	ppm/día < 1
30	Bueno	11-65	720	1-5
20	Regular	66-100	721-1,920	6-10
10	Pobre	101-150	1921-1,920	11-30
0	Muy Pobre	>150	>4,630	>30

2. Furanos

El deterioro de la celulosa a causa de los 2845 estudio 2845 nts de furanos debido al calentamiento, oxidación, acidez y humedad [24]. Por lo cual se puede aproximar a un cálculo de vida remanente en base al grado de polimerización de la norma IEC 61198 [23]. Los estudios de furanos, se basa en el 2845 estudio de correlación entre el contenido de 2- furaldehido (FAL) y el grado de polimerización de acuerdo a las investigaciones de Heisler y Bazer [14] de acuerdo a la ecuación 8.

$$DP = (325 * (19/13 - \log_{10}(2FAL))) \tag{8}$$

La ecuación 08, DP se establece entre 100 y 900 [25]. De acuerdo a Chendong [15], detalla la ecuación 09.

$$DP = (1/0.0035) * (1.51 - \log_{10}(\text{furans})) \tag{9}$$

La ecuación 09 varía entre 150 y 1000 [26]. De acuerdo a de Pablo [16] detalla la ecuación 10.

$$DP = ((1850)/(2FAL + 2.3)) \tag{10}$$

La ecuación 10, varía entre 150 y 600 [26]. El análisis de 2 - furaldehido (FAL) nos diagnostica la descomposición del papel en el aceite del transformador [27]. Se presentan los límites indicados en la tabla 5.

- Calidad Aceite

Las pruebas de calidad de aceite se representan con las pruebas eléctricas recomendadas por las normas IEC 60505-2011 [18] e IEEE C.57-106-2006 [19], [32].

La prueba de calidad de aceite es realizada para chequear la condición general del aislamiento del aceite [28]. La evaluación de la calidad es realizada considerando 5 pruebas: Rigidez Dieléctrica [36], tensión interfacial (IFT), Número de Neutralización (NN) o acidez, agua contenida o saturación de agua en el aceite y color [29].

TABLA IV
DIAGNÓSTICO UTILIZANDO RELACIÓN DE GASES SEGÚN NORMA IEC 60599

HI	Descripción	C2H2 / C2H4	CH4 / C2H4	C2H4 / C2H6
100	Muy Bueno	ND	< 0.1	<0.2
30	Bueno	> 1	0.1-0.5	>1
20	Regular	0.6-2.5	0.1-1	>2
10	Pobre	<0.1	>1	1-4
0	Muy Pobre	<0.2	>1	>4

TABLA V
DIAGNOSTICO UTILIZANDO 2 - FAL

Factor	IH	PPM	PPM/Año
100	Muy bueno	2FAL < 0.5	<0.020
30	Bueno	0.5 ≤ 2FAL < 1.0	> 0.020
20	Regular	1.0 ≤ 2FAL < 1.5	> 0.035
10	Pobre	1.5 ≤ 2FAL < 2.0	> 0.040
0	Muy pobre	2FAL ≥ 2.0	> 0.050

El estado general del transformador, es conocido como el índice de salud es realizado por la evaluación de cada criterio [30], [36], [37], según las pruebas, ver tabla 6.

Los valores de las calificaciones del HI Índice de Salud, son agrupadas de muy bueno, bueno, regular, pobre y muy pobre, y los factores son determinados según escala logarítmica que va de 100, 30, 20, 10 y 0, como se puede apreciar en la tabla 7.

C. Inspecciones Visuales

La inspección visual proporciona principalmente una inspección externa cada mes [31]. El chequeo historial de carga, condición general, bujes, tanque conservador, tanque principal, radiador y sistema de enfriamiento, de acuerdo a la tabla 7 con 10 criterios para la afectación del criterio de inspección [32].

- Índice de salud

Finalmente, se construye la tabla 8, sobre el índice de salud de acuerdo a las metodologías [20], se determina un factor 100 con una condición muy bueno y una duración mayor de 15 años de vida remanente, una calificación 30, con un equipo observado con un periodo de 5 a 15 años, con una condición bueno, 20 regular con un periodo de atención de 2 a 5 años, 10 pobre con una duración de 1 a 2 años y 0 muy pobre con una atención urgente menor a 1 año [38], [39].

III. SIMULACIONES DEL MODELO

Para validar la capacidad de las redes de ondas, en la estimación del transformador del índice de salud, una simulación fue realizada con una familia de transformadores y

reactores en 500 kV, para las pruebas de índices de salud correspondiente.

Para validar la capacidad de la propuesta en la estimación de índices de salud, para el diagnóstico y datos detallado en la fig. 2 con los factores agrupados, las agrupaciones correspondientes y evaluación consolidada, considerando las redes de onda.

TABLA VI
DIAGNOSTICO UTILIZANDO CALIDAD DE ACEITE

Prueba	< 69 kV	69kV< V< 220 kV	>220 kV	Factor HI	IH
Rigidez dieléctrica ASTM D1816	> 46	> 53	> 56	100	Muy bueno
	44 - 46	51 - 53	54 - 56	30	Bueno
	42 - 44	49 - 51	52 - 54	20	Regular
	< 42	< 49	< 52	10	Pobre
Tensión Interfacial	> 32	> 40	> 40	100	Muy bueno
	27 - 32	32 - 40	32 - 40	30	Bueno
	22 - 27	25 - 32	25 - 32	20	Regular
	< 22	< 25	< 25	10	Pobre
Color	< 1.5			100	Muy bueno
	1.5 - 2.0			30	Bueno
	2.0 - 2.5			20	Regular
	≥ 2.5			10	Pobre
Número de neutralización	≤ 0.05	≤ 0.005	≤ 0.005	100	Muy bueno
	0.051 - 0.07	0.006 - 0.01	0.005 - 0.01	30	Bueno
	0.07 - 0.10	0.01 - 0.05	0.01 - 0.05	20	Regular
	0.1 - 0.2	0.05 - 0.1	0.05 - 0.1	10	Pobre
	Contenido de agua en aceite	< 25	< 15	< 10	100
	25 - 30	15-20	10-15	30	Bueno
	30 - 35	20-25	15-20	20	Regular
	> 35	> 25	> 20	10	Pobre

TABLA VII
CRITERIOS DE LA CONDICIÓN DEL TRANSFORMADOR

N°	Criterios de condición del transformador
1	Análisis de Gases Disueltos (DGA)
2	Historial de carga
3	Factor de potencia
4	Calidad del aceite
5	Análisis de Furanos
6	Condición general
7	Bujes
8	Tanque conservador
9	Tanque principal
10	Radiador del sistema de enfriamiento

Una red de ondas indicada en la fig. 2 es representada. La red consiste en 19 nodos en la capa interior y fue entrenada bajo un estándar con algoritmos.

Las pruebas de diagnóstico fueron tomadas de los sistemas de transmisión en Perú. Los datos fueron: Factor de potencia del devanado, bujes, H2, C2H2, C2H4, CO, CO2, CH4, C2H6, TGC, C2H2/C2H4, CH4/C2H4, C2H4/C2H6, furanos, rigidez dieléctrica, tensión interfacial, color, número de neutralización y contenido de agua en aceite.

TABLA VIII
ÍNDICE SALUD DEL TRANSFORMADOR

Factor	Condición	Requerimiento	Color	IH (años)
100	Muy bueno	Mantenimiento normal	100	> 15
30	Bueno	Mantenimiento normal	30	5 - 15
20	Regular	Incremente el diagnóstico y prueba	20	2 - 5
10	Pobre	Iniciar el planeamiento de reemplazo mantenimiento mayor "overhaul"	10	1 - 2
0	Muy Pobre	Riesgo de falla alta	0	< 1

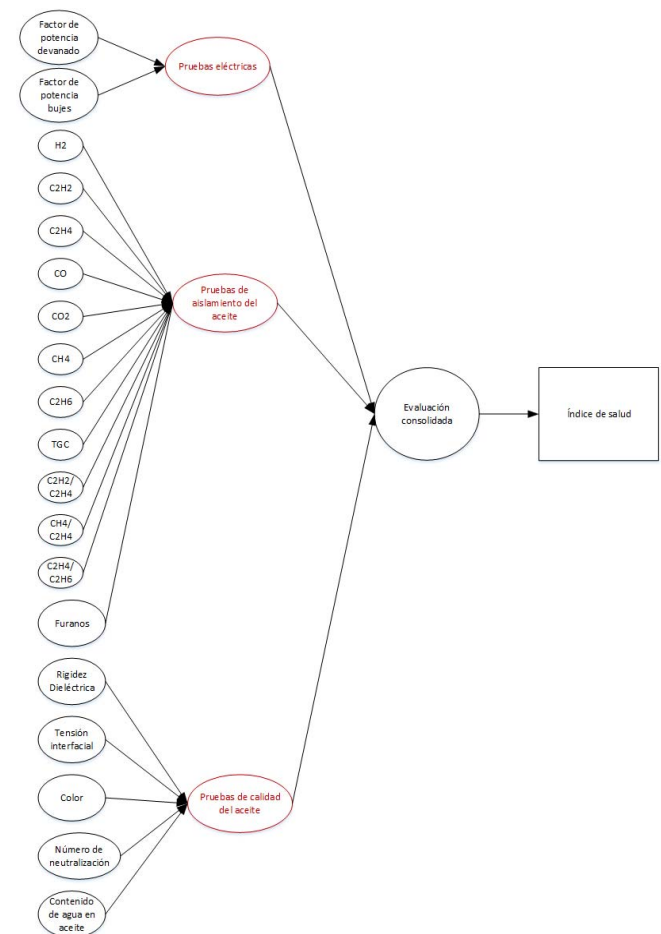


Fig. 2. Redes de onda usados para índices de salud en transformadores y reactores.

El método aplicado a la ingeniería es desarrollado en la referencia [21]. Los valores del índice de salud son entre 0 a 100%. Un índice de salud de uno representa una banda de

operación óptima del transformador [22]. Un índice de salud de 0, representa un transformador con un alto riesgo de falla con una alta probabilidad de evento de falla.

En la fig. 3 ilustra la relación entre los índices de salud usando las redes de onda ortogonales y los nombres del documento. Como los índices de salud muestran el deterioro del transformador.

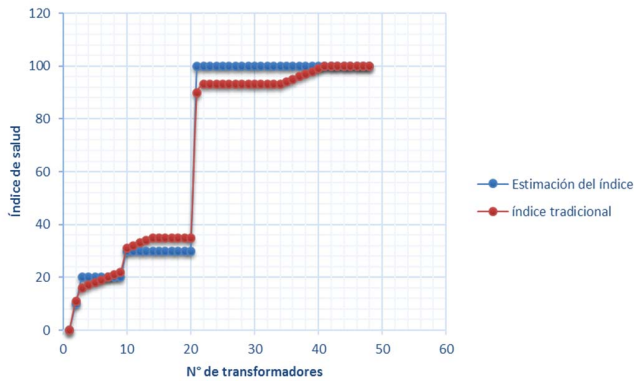


Fig. 3. Redes de ondas estimada vs los índices de salud.

La fig. 4 nos muestra el árbol de toma de decisión, con el componente de mayor aporte, nos indica que, en la familia de degradación acelerada, los furanos determinan el factor IH, cuya mayor influencia inicia con el metano, la cual se ve influenciada por el etano y tiene 2 tipos de modo de falla una causada por Metano y etileno (baja y alta energía respectivamente) y también total de furanos por montaje inadecuado causado específicamente por el contenido de 2-FAL. Este análisis puede realizar un análisis específico por familia y el aporte de cada uno de los componentes, así como la influencia en el diagnóstico de las fallas funcionales en las familias asociadas y las causas.

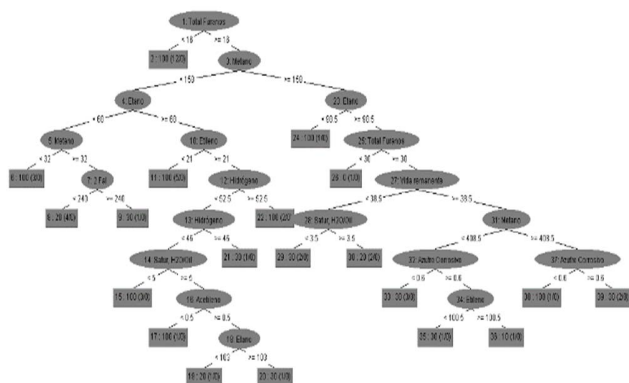


Fig. 4. Árbol de toma de decisión.

IV. EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO

Se realiza la evaluación del desempeño del modelo, con la metodología de ondas, lo cual se muestra en la tabla 9. En la tabla 9, se puede determinar de una forma muy práctica la priorización de los equipos de acuerdo a las condiciones.

Analizando con minería de datos un set de 10198 datos, los cuales han sido notificados con resultados de las pruebas a los equipos inductivos se muestran los análisis en la fig. 5.

Con el chequeo de los números de serie de los transformadores, han incluido una mejora de los índices de salud para determinar los factores que pueden determinar un índice de criticidad de equipos, lo cual puede apreciarse en la fig. 3 y fig. 4. Finalmente, con minería de datos se establecen las influencias del índice de salud y la calificación de los equipos con los aportes correspondientes a cada elemento en la fig. 5 determinando una influencia directa y sólida en la verificación con un coeficiente de correlación de 95.6% en la familia de equipos.

TABLA IX
DESARROLLO DEL MODELO DEL TRANSFORMADOR

Calificación	IH	Ubicación Técnica	Tensión	Edad
1	0	CARA500TRF74-AUTOT-R	500	6
2	10	CHMB500REA20-REACT-T	500	6
3	20	CARA500TRF73-AUTOT-R	500	6
4	20	CARA500TRF73-AUTOT-S	500	6
5	20	CARA500TRF73-AUTOT-T	500	6
6	20	CARA500TRF74-AUTOT-S	500	6
7	20	CARA500REA17-REACT-T	500	6
8	20	CHMB500REA19-REACT-R	500	6
9	20	TRJL500REA24-REACT-T	500	4
10	30	TRJL500REA21-REACT-R	500	6
11	30	TRJL500REA21-REACT-S	500	6
12	30	TRJL500REA21-REACT-T	500	6
13	30	CHMB500REA18-REACT-R	500	6
14	30	CHMB500REA19-REACT-S	500	6
15	30	CHMB500REA19-REACT-T	500	6
16	30	CHMB500REA20-REACT-R	500	6
17	30	LNIN500REA25-REACT-T	500	4
18	30	LNIN500REA25-REACT-R	500	4
19	30	TRJL500REA24-REACT-R	500	4
20	30	TRJL500REA24-REACT-S	500	4
21	100	CARA500TRF73-AUTOT-R	500	6
22	100	CHIA500TRF72-AUTOT-R	500	6
23	100	CHIA500TRF72-AUTOT-S	500	6
24	100	CHIA500TRF72-AUTOT-T	500	6
25	100	CARA500TRF74-AUTOT-T	500	6
26	100	CHIA500TRF72-AUTOT-R	500	6
27	100	CARA500REA17-REACT-R	500	6
28	100	CARA500REA17-REACT-S	500	6
29	100	CARA500REA17-REACT-R	500	6
30	100	TRJL500REA21-REACT-R	500	6
31	100	TRJL500TRF85-AUTOT-R	500	6
32	100	TRJL500TRF85-AUTOT-S	500	6
33	100	TRJL500TRF85-AUTOT-T	500	6
34	100	TRJL500TRF85-AUTOT-R	500	6
35	100	CHMB500REA18-REACT-S	500	6
36	100	CHMB500REA18-REACT-T	500	6
37	100	CHMB500REA18-REACT-R	500	6
38	100	CHMB500REA20-REACT-S	500	6
39	100	CHMB500TRF84-AUTOT-R	500	6
40	100	CHMB500TRF84-AUTOT-S	500	6
41	100	CHMB500TRF84-AUTOT-T	500	6
42	100	CHMB500TRF84-AUTOT-R	500	6
43	100	LNIN500REA25-REACT-R	500	4
44	100	LNIN500REA25-REACT-S	500	4
45	100	LNIN500TRF91-AUTOT-R	500	4
46	100	LNIN500TRF91-AUTOT-S	500	4
47	100	LNIN500TRF91-AUTOT-T	500	4
48	100	LNIN500TRF91-AUTOT-R	500	4

V. CONCLUSIONES

La propuesta del método de estimación de índices de salud IH usando redes de ondas ortogonales ha demostrado una alta eficiencia para representar un activo complejo como un transformador de potencia. IH cuantifica la condición del equipo basado en numerosos criterios de condición que están relacionados con factores de degradación a largo plazo que acumulativamente conducen al final de vida de un transformador de potencia. El nuevo método propuesto nos permite estructurar de una forma más práctica una categorización con variados componentes, para lograr una mejor priorización en la toma de decisiones, con una estrategia de planeación multi variable.

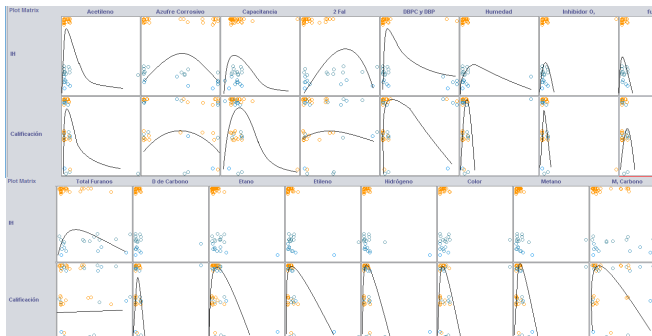


Fig. 5. Aporte e influencia del índice de salud y calificación del equipo por componentes.

El enlace del método entre la transformada de onda y Multi - Análisis de Resolución (MRA) enfoque y combina los diversos factores y los que se combinan en una condición. Además de los datos de prueba habituales que se han utilizado en el pasado, se puede contar un número de órdenes de trabajo de mantenimiento correctivo. Utilizado para evaluar el estado de salud física de los transformadores.

Finalmente, el trabajo es una herramienta fundamental para la gestión de activos, que permite establecer las prioridades basados en diagnósticos e información, para dinamizar la interpretación del conocimiento de los activos físicos del más importante componente del sistema de transmisión de energía, el transformador.

AGRADECIMIENTOS

Reconocimiento a la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa por el apoyo y desarrollo de la presente investigación. Asimismo, a las empresas Freeport-McMoRan Inc y ENEL.

REFERENCES

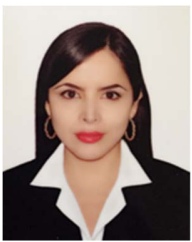
- [1] W. Wattakapaiboon, N. Pattanadach. The new developed health index for transformer condition assessment. 2016 International conference on condition monitoring and diagnosis – Xi'an – China. 2016. 32 – 35.
- [2] CIGRE Working Group 37-27. Ageing of the system impact on planning. (2000) 1 – 41.
- [3] R.M.A Velásquez, J.V.M. Lara. Electrical Assessment by lightning phenomenon in power lines of double circuit. IEEE Latin America Transactions. (2016) 14. 5. 2217-2225.
- [4] Mohsen Akbari, P. Khazaei, I. Sabetghadam and P. Karimifard. Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) for Power Transformers, 28th Power System Conf. Iran, 2013
- [5] H. A. Aldhubaib and M. A. Salama. A Novel Approach to Investigate the Effect of Maintenance on the Replacement Time for transformers, IEEE Trans. on Power Delivery, (2014) 29, 1603-1612.
- [6] G. Wolf, T. Loczi and A. Vilimi. Risk and Reliability - focused Maintenance Paks NPP-s for the Maintenance Strategy Technical Meeting on Maintenance Optimization to Improve Nuclear Power Plant Performance, I Technical Meeting on Maintenance Optimization to Improve Nuclear Power Plant Performance. (2014)
- [7] A. N. Jahromi, R. Piercy, S. Cress and W. Fan. An Approach to Power Transformer Asset Management Using Health Index, IEEE Insul. Mag., (2009) 25.
- [8] A. Naderian, S. Cress, and R. Peircy. An approach to determine the health index of power transformers. Proc. IEEE Int. Symp. Electrical Insulation, Canada, pp. 192–196, 2008.
- [9] M. Ahmed, M. Elkhatib and M. Salama. Transformer health index estimation using orthogonal wavelet network. 2015 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC) 2015. 210-124. 10.1109/EPEC.2015.7379937
- [10] A. Siada and S. Islam. A New Approach to Identify Power Transformer Criticality and Asset Management Decision Based on Dissolved Gas-in-Oil Analysis. IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation. (2012) 19. 3. 1007–1012.
- [11] N. A. Baker, A. Abu-Siada and S. Islam. A Review of Dissolved Gas Analysis Measurement and Interpretation Techniques, IEEE Electr. Insul. Mag. (2014) 30. 3. 39-49.
- [12] International Standard IEC 60599 Edition 2.1. 2007-05. Mineral oil-impregnated electrical equipment in service. (2007) 1-69.
- [13] IEEE-SA Standards Board IEEE Std. C57.104-2008. IEEE Guide for the interpretation of Gases Generated in Oil – Immersed Transformers. (2008)
- [14] A. Heisler and A. Banzer. Zustandsbeurteilung von Transformatoren mit Furfuro-Bestimmung.” Frankfurt, Germany, ew, Heft. (2003) 16. 102. 58–59.
- [15] X. Chendong. Monitoring paper insulation ageing by measuring fur-fural contents in oil. 7th Int. Symp. High Voltage Eng., Dresden, Germany. (1991) 74. 06. 26–30.
- [16] A. De Pablo. Interpretation of furanic compounds analysis Degradation models. CIGRE WG D1.01.03, former WG. 15-01, Task Force 03Paris, France. (1997).
- [17] A. B. Shkolnik and R. T. Rasor. Statistic al insights into furan interpretation using a large dielectric fluid testing database. IEEE Power Energy Soc. Transm. Distrib. Conf. Expo., Orlando. (2012)
- [18] International Standard IEC 61198 Edition 1.0. 1993-09. Mineral insulating insulates. Methods for the determination of 2-furfural and related compounds. (1993) 1-28.
- [19] International Standard IEC 60505:2011 Edition 4.0. Evaluation and qualification of electrical insulation systems. (2011) 1-151.
- [20] IEEE Transformers Committee. IEEE Std. C57.106-2006. IEEE Guide for Acceptance and Maintenance of Insulating Oil in Equipment. (2007).
- [21] A. Jahromi, R. Piercy, S. Cress, J. Service, and W. Fan. An approach to power transformer asset management using health index,” Electrical Insulation Magazine, IEEE. (2009) 25 20-34.
- [22] Y. Chen, B. Yang, and J. Dong. Time-series prediction using a local linear wavelet neural network. Neurocomputing. (2006) 69. 449-465.
- [23] International Standard 61198:1993-9 edition 1.0. Methods for the determination of 2-furfural and related compounds. (1993) 09. 1-28.
- [24] CIGRE Working Group 37-27 “Ageing of the system impact on planning” December 2000. Pag.6 to 39.
- [25] R. M. Arias Velásquez, J. V. Mejía Lara, Robot unit for cost and time balance using automatic inspection on overhead lines. 2016 IEEE ANDESCON. (2016). 1-4.
- [26] Ricardo Manuel Arias Velasquez, Jennifer Vanessa Mejia Lara, Expert System for Power Transformer Diagnosis. Intercon 2017 (2017), 1-4.
- [27] Ricardo Manuel Arias Velásquez, Jennifer Vanessa Mejía Lara, Circuit breakers 500 kV degradation in substation reactors caused by inductive current. Eng. Fail. Anal. 90 (2018) 64-81.
- [28] Ricardo Manuel Arias Velásquez, Jennifer Vanessa Mejía Lara, Ruptures in overhead ground wire — Transmission line 220 kV. Eng. Fail. Anal. 87 (2018) 1-14.
- [29] Ricardo Manuel Arias Velasquez, Jennifer Vanessa Mejia Lara, Implementation of knowledge management in energy companies. Intercon 2017. (2017), 1-4.
- [30] Ricardo Manuel Arias Velásquez, Jennifer Vanessa Mejía Lara, Principal Components Analysis and Adaptive Decision System Based on Fuzzy

- Logic for Power Transformer. Fuzzy Information and Engineering. 9 (2017) 4. 493-514.
- [31] Ricardo Manuel Arias Velásquez, Jennifer Vanessa Mejía Lara, The need of creating a new nominal creepage distance in accordance with heaviest pollution 500kV overhead line insulators. Eng. Fail. Anal. 86 (2018) 21-32.
- [32] Ricardo Manuel Arias Velásquez, Jennifer Vanessa Mejía Lara, Reliability, availability and maintainability study for failure analysis in series capacitor bank. Eng. Fail. Anal. 86 (2018) 158-167.
- [33] Ricardo Manuel Arias Velásquez, Jennifer Vanessa Mejía Lara, Life estimation of shunt power reactors considering a failure core heating by floating potentials. Eng. Fail. Anal. 86 (2018) 142-157.
- [34] Ricardo Manuel Arias Velásquez, Jennifer Vanessa Mejía Lara, Secondary arc and critical time of fault clearance in overhead lines. IEEE Latin America Transactions. 16 (2018) 3, 859-868.
- [35] Ricardo Manuel Arias Velásquez, Jennifer Vanessa Mejía Lara, Corrosive Sulphur effect in power and distribution transformers failures and treatments. Eng. Fail. Anal. 92 (2018) 240-267.
- [36] Ricardo Manuel Arias Velásquez, Jennifer Vanessa Mejía Lara, Current transformer failure caused by electric field associated to circuit breaker and pollution in 500 kV substations. Eng. Fail. Anal. 92 (2018) 163-181.
- [37] Ricardo Manuel Arias Velásquez, Jennifer Vanessa Mejía Lara, Bushing failure in power Transformers and the influence of moisture with spectroscopy test, Eng. Fail. Anal. 94 (2018) 300-312.
- [38] R.M.A. Velásquez, J.V.M. Lara, Methodology for overhead line conductor remaining life. IEEE T&D Latin America 2018. (2018) 1 – 5.
- [39] C. Hu, G. Jain, P. Tamirisa, T. Gorka, Method for estimating capacity and predicting remaining useful life of lithium-ion battery.



Ricardo Manuel Arias Velásquez es graduado en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa (UNSA), Segundo título profesional en Ingeniería de Proyectos por la UNSA, Maestría en Ciencias con mención en Ingeniería de Proyectos y gerencia por la UNSA, doctorado en ingeniería por la Pontificia Universidad

Católica del Perú (PUCP). Labora en Freeport-McMoRan Inc en el cargo de Supervisor de Potencia y Transmisión, para las minas de Latinoamérica de la corporación.



Jennifer Vanessa Mejía Lara es graduada en Ingeniería Eléctrica por la Universidad Nacional de Colombia, Maestría en Ciencias con mención en Ingeniería de Proyectos por la Universidad Nacional de San Agustín (UNSA) y doctorado en ingeniería por la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP). Labora en ENEL Green Power como

Gerente de Proyectos.