

<https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/ingenieria/index>

www.ucr.ac.cr / ISSN: 2215-2652

Ingeniería

Revista de la Universidad de Costa Rica

ENERO/ JUNIO 2023 - VOLUMEN 33 (1)



EDITORIAL
UCR

Metodología para Evaluar la Condición de Transformadores Eléctricos de Potencia Basada en un Índice de Salud

Methodology to Assess the Condition of Electrical Power Transformers Based on a Health Index

Óscar Núñez Mata

Escuela de Ingeniería Eléctrica

Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica

Email: oscar.nunezmata@ucr.ac.cr

ORCID: [0000-0002-5410-6121](https://orcid.org/0000-0002-5410-6121)

Gustavo Adolfo Gómez-Ramírez

Escuela de Ingeniería Electromecánica

Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica

Email: ggomez@itcr.ac.cr

ORCID: [0000-0001-9195-072X](https://orcid.org/0000-0001-9195-072X)

Fauricio Acuña Rojas

Itecna S.A., San José, Costa Rica

Email: facuna@itecnacr.com

ORCID: [0000-0002-4959-7026](https://orcid.org/0000-0002-4959-7026)

César González Solís

CEG Soporte y Mantenimiento Electromecánico, San José, Costa Rica

Email: cesar.gonzalez@ceg-cr.com

ORCID: [0000-0002-6305-5055](https://orcid.org/0000-0002-6305-5055)

Recibido: 29 de marzo de 2022

Aceptado: 19 de noviembre 2022

Resumen

El desarrollo de sistemas de monitoreo de condición que sigue la evolución del desgaste de los transformadores de potencia es esencial para una operación segura y confiable de los sistemas eléctricos. Contar con herramientas de monitoreo de condición se ha convertido en una prioridad de las compañías eléctricas, siendo esto una tarea compleja, ya que la operación del transformador combina distintas solicitaciones. Algunos autores proponen el uso de índices de salud, que recogen, en un solo parámetro, la condición del activo. Para la obtención del índice, se utilizan resultados de pruebas que verifican el estado de las partes. Este será la base para evaluar la salud global y facilitar la identificación de modos de falla. Este trabajo propone una herramienta novedosa que evalúa los transformadores de potencia basada en un índice de salud, sobre la base de una suma de puntajes ponderados. Este enfoque de separar el transformador en dos zonas busca facilitar su diagnóstico y la evaluación. Se logró determinar con criterio experto la importancia de cada prueba, apoyado en la normativa internacional. Los resultados obtenidos en los casos de estudio mostraron un buen desempeño del índice de salud al evaluar cinco transformadores de potencia. El valor del índice de salud calculado para cada transformador coincidió con los resultados de las evaluaciones ejecutadas



posteriormente a la realización de las pruebas. Esto indica que avanzar hacia el uso de un índice de salud para evaluar el estado del transformador puede mejorar el seguimiento de la condición de estos equipos.

Palabras Clave:

Análisis de falla; análisis químico; prueba de aislamiento; sistemas eléctricos de potencia; transformador de potencia.

Abstract

The development of condition monitoring systems that follow the evolution of power transformer aging is essential for safe and reliable operation of electrical systems. Having condition monitoring tools has become a priority for power companies, this being a complex task, since the operation of the transformer combines different requests. Some authors propose the use of health indices, which collect, in a single parameter, the condition of the equipment. To obtain the index, test results are used to verify the condition of the parts. This will be the basis for evaluating global health and facilitating the identification of failure modes. This work proposes a novel tool that evaluates power transformers based on a health index, based on a sum of weighted scores. This approach of separating the transformer into two zones seeks to facilitate its diagnosis and evaluation. It was possible to determine with expert criteria the importance of each test, supported by international regulations. The results obtained in the case studies showed a good performance of the health index when evaluating five power transformers. The value of the health index calculated for each transformer coincided with the results of the evaluations carried out after the tests were executed. This indicates that moving towards the use of a health index to assess the transformer can improve the monitoring of the condition of this equipment.

Keywords:

Chemical analysis; failure analysis; insulation testing; power systems; power transformer.

1. INTRODUCCIÓN

El transformador de potencia (TP) es uno de los componentes principales de las subestaciones en los sistemas eléctricos de potencia y representan una costosa inversión, alcanzando hasta el 60 % del costo total de la subestación [1], [2], [3]. La evaluación de la condición del TP ayuda a aumentar su disponibilidad, al garantizar un seguimiento adecuado que busca prolongar su vida útil por medio de rutinas de mantenimiento y reparación [4], [5]. El estado de condición de un TP, también llamado “estado de salud”, está influenciada por múltiples factores, incluidas las sollicitaciones de tipo química, eléctrica y mecánica, que operan de manera simultánea [6], [7]. Diferentes autores han propuesto soluciones para abordar los desafíos de la evaluación de un TP durante su vida útil, al utilizar un parámetro adimensional conocido como Índice de Salud (*HI*). La idea es realizar el seguimiento de la condición del TP con un enfoque integral, que combina: resultados de observaciones operativas, inspecciones de campo, pruebas en sitio y de laboratorio, transformando todo en información útil para la toma de decisiones [8], [9], [10]. Calcular un *HI* conlleva distintas tareas como incluir las mediciones obtenidas de las pruebas, al considerar el tipo e importancia de cada una, para la evaluación del estado del transformador.

Los métodos de evaluación de la condición dependen de la realización de varias pruebas de diagnóstico eléctrico, físico y químico, que miden parámetros tales como: pruebas dieléctricas, medición de descargas parciales, análisis de gases disueltos (DGA), temperatura del punto caliente, parámetros de calidad del aceite, vibraciones del tanque y del devanado, y movimientos del devanado [4]. Por ejemplo, algunos autores han propuesto metodologías de evaluación indirectas, que analizan el material dieléctrico para calcular la vida útil residual del TP [11], [12], [13].

La vida útil esperada de un transformador está determinada principalmente por su sistema de aislamiento, relacionado con el tipo de materiales dieléctricos utilizados y cómo fue fabricado [12], [14]. El sistema de aislamiento se diseña con base en factores determinados por la forma y características de la parte activa (núcleo y devanados) y los gradientes de temperatura indicados [15], [12]. La vida útil típica de un TP alcanza unos 25 a 40 años, la cual, finalmente, dependerá de cómo se opere el transformador [16], [17], [18], [19].

La vida útil esperada estará relacionada con las fallas a las que esté sometido el equipo, ya que estas tienen el potencial de acelerar el envejecimiento, al aumentar la probabilidad de falla y al reducir el tiempo de operación [15], [19]. El CIGRE realizó un estudio de las principales causas de fallas de los grandes transformadores de potencia en [20], seguidas de una consecuencia catastrófica. El estudio arrojó datos que indican que el 45 % de los cortes forzados de los grandes transformadores estaban relacionados con modos de falla de origen dieléctrico [21]. Es así como la evaluación del estado de los transformadores de potencia mediante un *HI* está atrayendo la atención de las organizaciones de servicios de energía para mejorar su desempeño técnico y financiero, al evitar, en la medida de lo posible, fallas catastróficas [22], [23].

En la literatura se han desarrollado diferentes enfoques para el cálculo de un *HI* relacionados con el seguimiento del estado de los transformadores de potencia [21], [24], [25], [26], [27], [28]. Los métodos informados actualmente se pueden dividir en dos enfoques principales. En primer lugar, los enfoques tradicionales, basados en una función lineal en la que el *HI* se calcula

utilizando el promedio ponderado de diferentes pruebas de rutina y de diagnóstico, método conocido como: suma de puntajes ponderados (SPP) [21]. Los enfoques tradicionales deben lidiar con la incertidumbre para determinar el peso de cada prueba [29]. En segundo lugar, se han realizado varias propuestas para calcular el *HI* utilizando métodos de inteligencia artificial (IA) [4]. Los enfoques basados en IA requieren del uso de métodos de clasificación o regresión basados en datos, tales como redes neuronales artificiales [30], [1], [24], sistemas de inferencia neuro difusa adaptativos [31], máquinas de vectores de soporte [32] o similares [33]. Los *HI* basados en SPP son ampliamente aceptados y puestos en servicio por las empresas de servicio público de energía; mientras que los *HI* basados en algoritmos de IA han sido ampliamente utilizados en el ámbito académico.

Para un conjunto dado de factores de diagnóstico, se prepara una base de datos de aproximadamente cientos a varios cientos de transformadores. Un *HI* define la condición de cada transformador en esa base de datos. La clasificación *HI* puede ser realizada por expertos en servicios públicos, proveedores de servicios o métodos IA. La base de datos se divide en datos de entrenamiento y de prueba. Los datos de entrenamiento se utilizan para el proceso de aprendizaje del método de IA.

En este proceso, los métodos de IA reconocen la relación entre los factores de diagnóstico elegidos y el *HI* de los transformadores. Después de la etapa de aprendizaje exitosa, el modelo de IA se valida mediante una comparación entre el *HI* calculado del método de IA con el valor de *HI* de los datos de prueba [8]. Dado que algunas pruebas pueden ser de alto costo, no se realizan con mucha frecuencia, lo que afecta la precisión del *HI* propuesto utilizando los enfoques de IA.

En este artículo, se propone un método novedoso para calcular un *HI* de transformadores de potencia, basado en un enfoque de SPP, analizando el transformador en dos zonas. Esto es, el *HI* se divide en dos subíndices, que permiten determinar el índice de salud total mediante una serie de pruebas fuera-de-línea, que se realizan normalmente en los TP (pruebas de rutina). Por un lado, el primer subíndice es un *HI* funcional, que involucra pruebas eléctricas generales, tales como: resistencia del devanado, relación de transformación, corriente de excitación, así como el análisis de gases disueltos. Por otro lado, el segundo subíndice es un *HI* dieléctrico, que se basa en las pruebas de aceite y la prueba del factor de potencia. Finalmente, el *HI* total se calcula ponderando ambos subíndices. Se espera que el *HI* propuesto mejore la confiabilidad y ayude a guiar las decisiones de administración de los activos, al permitir a los operadores desarrollar estrategias de mantenimiento y el eventual reemplazo (basado en la condición del transformador). Al separar el análisis del transformador en un *HI* funcional y un *HI* dieléctrico se facilita el diagnóstico de la unidad, que da un mejor apoyo a la toma de decisiones y a los análisis de fallas.

En este trabajo se comprobó la metodología propuesta, al utilizar una base de datos que contiene las pruebas diagnósticas de campo, recolectadas entre los años 1996 y 2018, realizadas por una empresa de servicio. Los datos se tomaron de transformadores de potencia que operan en empresas eléctricas de servicio público e industriales. Los datos se utilizaron tanto para establecer los *HI* de cada TP, así como para realizar el análisis de resultados. Los valores obtenidos para los *HI* se contrastaron con los registros de cada transformador para analizar la efectividad de la

metodología, bajo un enfoque de criterio experto. Se comprobó la efectividad del *HI*, al detectar correctamente la condición de la unidad evaluada, según los datos registrados de pruebas y evaluaciones realizadas.

El resto de este artículo está organizado de la siguiente manera: en la Sección II se presenta la propuesta metodológica. En la Sección III se muestra la evaluación de la propuesta por medio de casos de estudio y el análisis de los resultados. Finalmente, en la Sección IV se presentan las conclusiones y trabajos futuros.

2. CÁLCULO DEL ÍNDICE DE SALUD

El índice de salud de un transformador es un parámetro integral que reúne una variedad de datos de monitoreo de condición para indicar el estado general (de salud) de un transformador. En este capítulo, se presenta el método de cálculo del índice de salud, el cual se basa en la suma de puntajes ponderados de una serie de pruebas realizadas al transformador. El cálculo es apoyado en: i) distintos estándares de entidades reconocidas; ii) recomendaciones de los fabricantes; y iii) juicio de expertos para establecer los criterios de evaluación. El método general para calcular el índice de salud se muestra en la Fig. 1.



Fig. 1. Diagrama de bloques de la metodología de cálculo del HI. Basado en [34]

La metodología propuesta en la Fig. 1 considera los siguientes aspectos:

- **Datos de condición:** se refiere a las pruebas realizadas al transformador que evalúan su condición.
- **Función de condición:** se refiere al valor asignado en un rango, para cada prueba específica. Por un lado, si una prueba da un resultado altamente deficiente, el valor asignado será el más bajo posible. Por otro lado, si el resultado es el mejor posible, el valor asignado será el más alto del rango seleccionado.
- **Peso:** depende de la importancia de la prueba realizada y su relevancia para el diagnóstico del transformador.
- **Cálculo del *HI*:** es la suma de puntajes ponderados de todas las pruebas realizadas, que indica la condición de salud del transformador.

Los valores para la Función de Condición y el Peso, incluidos en la metodología mostrada en la Fig. 1, se establecen siguiendo las recomendaciones incluidas en las normativas IEEE e IEC, así como en los reportes de la literatura técnica especializada.

El cálculo del HI para el transformador se realiza utilizando la ecuación (1), en la que se toman en cuenta todos los parámetros y factores obtenidos para la formulación de su estado de condición [35].

$$HI = \frac{\sum_{j=1}^n K_j HIF_j}{\sum_{j=1}^n 4K_j} \times 100\% \quad (1)$$

donde:

HIF_j = Factor del índice de salud de la prueba j , asignado de acuerdo con la prueba realizada, según el CUADRO I. El valor posible del HIF_j para cada parámetro estará entre 0 y 4.

K_j = Factor de peso asignado a la prueba j , que va de 1 a 10, la cual considera la importancia de los resultados de la prueba en la condición del transformador.

n = Número máximo de pruebas utilizadas.

CUADRO I
VALORES DEL FACTOR DEL ÍNDICE DE SALUDO HIF. BASADO EN [36]

HIF	Condición
4	Muy bueno
3	Bueno
2	Regular
1	Pobre
0	Muy pobre

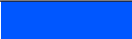




Según la ecuación (1), el cálculo del HI es la suma de la multiplicación entre el factor del índice de salud en cada parámetro, dividido por la suma total de pesos de cada parámetro utilizado y multiplicado por la puntuación máxima. El resultado del HI es un número entre cero y cien por ciento. El valor de cero por ciento se considera como la peor condición, y cien por ciento es la mejor condición posible.

El análisis del TP se divide en dos subíndices, como lo muestra la ecuación (2), la cual se usa para calcular un índice de salud total (que aplica a todo el TP). En primer lugar, el subíndice funcional se obtiene a partir de pruebas eléctricas generales como resistencia del devanado, relación de transformación, corriente de excitación y DGA. En segundo lugar, el subíndice dieléctrico se obtiene a partir del análisis de aceite dieléctrico y la prueba de factor de potencia al TP. De esta manera se puede evaluar el TP considerando dos zonas, lo que beneficia la ubicación de las fallas (en caso de presentarse).

$$HI_{total} = 0,5 \times HI_{funcional} + 0,5 \times HI_{dieléctrico} \quad (2)$$

El CUADRO II muestra la propuesta de evaluación final, junto con un código de colores que busca facilitar el análisis del TP de manera gráfica.

CUADRO II
EVALUACIÓN DE CONDICIÓN DEL HI TOTAL. BASADO EN [37]

<i>% HI</i>	<i>Condición</i>	<i>Vida útil remanente esperada</i>	<i>Recomendación</i>	<i>Código de colores</i>
86 - 100	Muy bueno	Más de 15 años	Programar mantenimiento normal	
71 - 85	Bueno	Más de 10 años	Programar mantenimiento normal	
51 - 70	Regular	Hasta 10 años	Incrementar las pruebas de diagnóstico	
31 - 50	Pobre	Menos de 10 años	Comenzar a planificar el reemplazo o reparación considerando el alto riesgo	
0 - 30	Muy pobre	Fin de vida útil	Evaluar el riesgo de inmediato	

A continuación, se presenta el cálculo de cada subíndice.

Cálculo del subíndice de salud funcional

En este subíndice se evalúan las pruebas incluidas en el CUADRO III en la cual se indican los Factores de Peso de cada una, el cual depende de lo crítico de la prueba y de su relación con la vida útil restante.

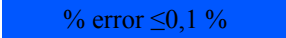
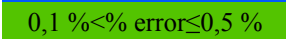
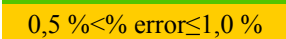


CUADRO III
FACTORES DE PESO DE CADA PRUEBA FUNCIONAL. BASADO EN [21]

<i>Prueba</i>	<i>Factor de peso (K)</i>	<i>HIF</i>
Relación de transformación	8	4,3,2,1,0
Resistencia de devanados	6	4,3,2,1,0
Corriente de excitación	5	4,0
Análisis de gases disueltos	10	4,3,2,1,0

Las pruebas utilizadas para el cálculo del $HI_{funcional}$ se desarrollan a continuación.

Relación de transformación: este parámetro se evalúa a partir de la prueba *TTR* (*Transformer Turns Ratio*). El CUADRO IV muestra los valores del factor del índice de salud. El porcentaje de error (*% error de TTR*) se calcula entre los valores teóricos y reales de la prueba *TTR*.

CUADRO IV
HIF PARA LA PRUEBA *TTR*. BASADO EN [38]

<i>HIF</i>	<i>% error de TTR</i>
4	 % error $\leq 0,1$ %
3	 $0,1$ % < % error $\leq 0,5$ %
2	 $0,5$ % < % error $\leq 1,0$ %
1	 $1,0$ % < % error $\leq 2,0$ %
0	 % error $\geq 2,0$ %

Es necesario probar al menos en tres posiciones de los cambiadores de tomas, y se deberá usar el peor valor de *HIF* para efectos del análisis.

Resistencia de devanados: esta prueba se realiza para los devanados de alta tensión y de baja tensión por separado. Se realizan mediciones de resistencia en cada devanado y se comparan entre sí. El porcentaje de error (*% error resistencia*) presentado es la diferencia máxima entre las mediciones. El CUADRO V muestra los valores del factor del índice de salud para la prueba de resistencia de devanados.

CUADRO V
HIF PARA LA PRUEBA RESISTENCIA DE DEVANADOS. BASADO EN [38]

<i>HIF</i>	<i>%error resistencia</i>
4	<i>%error ≤ 1,0%</i>
3	<i>1,0% < %error ≤ 2,0%</i>
2	<i>2,0% < %error ≤ 3,0%</i>
1	<i>3,0% < %error ≤ 5,0%</i>
0	<i>%error ≥ 5,0%</i>

Se toma el *HIF* más bajo entre la resistencia del devanado de alta y baja tensión.

Corriente de excitación: esta es una prueba con un resultado binario, esto es: i) si el patrón en *H1*, *H2* y *H3* es L-H-L o H-L-H (según el CUADRO VI) sobre los valores de corriente obtenidos en la prueba, el *HIF* es 4; y ii) cualquier otro patrón obtenido el *HIF* es 0.

CUADRO VI
PATRÓN DE LA CORRIENTE DE EXCITACIÓN. BASADO EN [16]

	<i>H1</i>	<i>H2</i>	<i>H3</i>
<i>Patrón</i>	Alto (H)	Bajo (L)	Alto(H)
	Bajo (L)	Alto (H)	Bajo (L)

Análisis de gases disueltos: la prueba DGA (*Dissolved Gas Analysis*) se analiza de acuerdo con el CUADRO VII para obtener el *HIF*. Cada gas tiene su propio puntaje (*S_j*) y peso (*W_j*). Usando la ecuación (3) se obtiene el factor *DGAF*, de acuerdo con el CUADRO VIII.

$$(\%)DGAF = \frac{\sum_{H_2}^{j=CO_2} S_j \times W_j}{\sum_{H_2}^{j=CO_2} S_{maxj} \times W_j} \times 100 \tag{3}$$

CUADRO VII
HIF PARA LA PRUEBA DGA. BASADO EN [36], [39], [40]

<i>HIF</i>	<i>%DGAF</i>
4	<i>DGAF ≤ 20%</i>
3	<i>20% < DGAF ≤ 30%</i>
2	<i>30% < DGAF ≤ 40%</i>
1	<i>40% < DGAF ≤ 50%</i>
0	<i>DGAF ≥ 50%</i>

CUADRO VIII
PUNTAJES Y PESOS PARA PRUEBA DGA [ppm]. BASADO EN [35]

Gas		Puntaje (S_j)						Peso W_j (1-5)
		1	2	3	4	5	6	
		Bueno			Pobre			
Hidrógeno	H_2	≤ 100	101-200	201-300	301-500	501-700	>700	2
Metano	CH_4	≤ 75	76-125	126-200	201-400	401-600	>600	3
Etano	C_2H_6	≤ 65	66-80	81-100	101-120	121-150	>150	1
Etileno	C_2H_4	≤ 50	51-80	81-100	101-150	151-200	>200	3
Acetileno	C_2H_2	≤ 3	4-7	8-35	36-50	51-80	>80	5
Dióxido de carbono	CO	≤ 350	351-700	701-900	901-1100	1101-1400	>1400	1
Monóxido de carbono	CO_2	≤ 2500	≤ 3000	≤ 4000	≤ 5000	≤ 6000	>7000	1

Finalmente, el $HI_{funcional}$ se obtiene con los datos de HIF y K obtenidos de todas las pruebas, utilizando la ecuación (1).

Cálculo del subíndice de salud dieléctrico

Al igual que en el cálculo del $HI_{funcional}$ a las pruebas del $HI_{dieléctrico}$ se les asigna un valor entre 1 y 10, de acuerdo con cada prueba realizada. El CUADRO IX muestra el Factor de Peso para cada prueba.

CUADRO IX
FACTOR DE PESO DE CADA PRUEBA DIELECTRICA. BASADO EN [38]

Prueba	Factor de peso (K)	HIF
Factor de potencia	10	4,3,2,1
Calidad del aceite, contenido de humedad y factor de potencia del líquido	6	4,3,2,1
Contenido de inhibidor de oxidación	3	4,3,2,1
Contenido de compuestos furánicos	8	4,3,2,1

Las pruebas utilizadas para el cálculo del $HI_{dieléctrico}$ se desarrollan a continuación.

Factor de potencia: El CUADRO X muestra los datos utilizados para obtener el factor del índice de salud para la prueba de factor de potencia.

CUADRO X
 HIF PARA LA PRUEBA FACTOR DE POTENCIA. BASADO EN [38]

HIF	% Factor de potencia
4	FP $\leq 0,5$ %
3	$0,5$ % $<$ FP $\leq 0,7$ %
2	$0,7$ % $<$ FP $\leq 1,0$ %
1	$1,0$ % $<$ FP $\leq 2,0$ %
0	FP $\geq 2,0$ %

Análisis de aceite físico y químico: El CUADRO XI se utiliza para obtener la puntuación S_j de los datos y el peso W_j de acuerdo con los resultados de las pruebas. Con la ecuación (4), se obtiene el Factor de Calidad del Aceite o OQF (*Oil Quality Factor*).

$$OQF = \frac{\sum_{j=1}^6 S_j \times W_j}{\sum_{j=1}^6 W_j} \times 100\% \tag{4}$$

CUADRO XI
CALIFICACIÓN DE DISTINTAS PRUEBAS. BASADO EN [38]

Prueba	Rango	Puntaje S_j	Peso W_j
Rigidez dieléctrica [kV]	≥ 45	1	3
	35-45	2	
	30-35	3	
	≤ 30	4	
Tensión interfacial [N/m]	≥ 25	1	2
	20-25	2	
	15-20	3	
	≤ 15	4	
Número de acidez	$\leq 0,05$	1	1
	0,05-0,1	2	
	0,1-0,2	3	
	$\geq 0,2$	4	
Contenido de humedad [ppm]	≤ 15	1	4
	15-20	2	
	20-25	3	
	≥ 25	4	
Color	$\leq 1,5$	1	2
	1,5-2,0	2	
	2,0-2,5	3	
	$\geq 2,5$	4	
Factor de potencia del líquido @25 °C [%]	$\leq 0,1$	1	3
	0,1-0,5	2	
	0,5-1,0	3	
	$\geq 1,0$	4	

Finalmente, el factor de calidad del aceite se evalúa de acuerdo con el CUADRO XII.

CUADRO XII
HIF PARA EL OQF. BASADO EN [41]

HIF	%OQF
4	OQF $\leq 1,2\%$
3	$1,2\% < OQF \leq 1,5\%$
2	$1,5\% < OQF \leq 2,0\%$
1	$2,0\% < OQF \leq 3,0\%$
0	OQF $\geq 3,0\%$

Contenido de inhibidor de oxidación: Los resultados se dan en porcentaje del total de inhibidor por peso del aceite. El valor del factor del índice de salud se muestra en el CUADRO XIII.

CUADRO XIII
HIF PARA EL CONTENIDO DE INHIBIDOR DE OXIDACIÓN. BASADO EN [42],
 [39], [40]

<i>HIF</i>	% de contenido de inhibidor de oxidación
4	INH \leq 0,25%
3	0,25% < INH \leq 0,20%
2	0,20% < INH \leq 0,15%
1	0,15% < INH \leq 0,10%
0	INH \geq 0,10%

Contenido de furano: El grado de polimerización *DP* (*Degree of Polymerization*) calculado se utiliza para representar el estado general. El CUADRO XIV muestra los valores para el factor del índice de salud.

CUADRO XIV
HIF PARA DP. BASADO EN [42]

<i>HIF</i>	<i>DP</i>
4	DP > 700
3	700 \geq DP > 560
2	560 \geq DP > 425
1	425 \geq DP > 250
0	DP \leq 250

Finalmente, el $HI_{\text{dieléctrico}}$ se obtiene con los factores *HIF* y *K* obtenidos de todas las pruebas dieléctricas, por medio de la ecuación (1).

A continuación, se presentan los resultados de la aplicación de la metodología a cinco transformadores reales de los cuales se conocía su historial de mantenimiento y condición.

3. CASOS DE ESTUDIO Y DISCUSIÓN

Los transformadores de potencia evaluados son todos trifásicos, 60 Hz, en aceite y tienen una antigüedad entre cuatro y veintiséis años de uso. Los siguientes son los datos básicos de placa:

- **Caso 1:** 10 MVA – 34,5/4,16 kV – fabricado en 1996.
- **Caso 2:** 10 MVA – 24,9/6,6 kV – fabricado en 1998.
- **Caso 3:** 4 MVA – 24,9/4,16 kV – fabricado en 1999.
- **Caso 4:** 10 MVA – 24,9/6,6 kV – fabricado en 2002.
- **Caso 5:** 5 MVA – 24,9/0,8 kV – fabricado en 2018.

La información utilizada en estos casos de estudio es parte de la base de datos de la compañía de servicio que participó en este trabajo. Las pruebas realizadas en cada uno tienen una antigüedad menor a los tres años.

La valoración de los transformadores se realizó por medio de la metodología de cálculo de los $HI_{funcional}$, $HI_{dieléctrico}$ y HI_{total} . En los CUADROS XV y XVI se muestran los valores HIF para el cálculo del $HI_{funcional}$ y $HI_{dieléctrico}$. Esta evaluación concluye con el cálculo del HI_{total} mostrado en el CUADRO XVII. Las cifras están escritas siguiendo el código de colores establecido (que buscan facilitar el análisis).

CUADRO XV
RESULTADOS DEL $HI_{funcional}$

Caso de estudio	HIF Relación transformación	HIF		HIF Corriente de excitación	$HI_{funcional}$
		Resistencia de devanados	HIF DGA		
1	4	0	3	4	71%
2	4	0	4	4	79%
3	3	4	3	4	84%
4	3	0	4	4	72%
5	4	0	2	4	62%

CUADRO XVI
RESULTADOS DEL $HI_{dieléctrico}$

Caso de estudio	HIF		HIF Contenido de furanos	HIF Factor de potencia	$HI_{dieléctrico}$
	Fisicoquímica, contenido de humedad y factor de potencia del líquido	Contenido de inhibidor de oxidación			
1	1	4	1	4	61%
2	4	4	3	3	83%
3	4	3	3	4	90%
4	3	4	3	4	87%
5	4	0	3	0	44%

CUADRO XVII
RESULTADO DEL HI_{total}

Caso	$HI_{funcional}$	$HI_{dieléctrico}$	HI_{total}	Diagnóstico de la unidad
1	71%	61%	66%	Condición regular, se recomienda la realización de más pruebas de diagnóstico
2	79%	83%	81%	Condición buena, se puede continuar con las rutinas de mantenimiento normal
3	84%	90%	87%	Condición muy buena, se puede continuar con las rutinas de mantenimiento normal
4	72%	87%	80%	Condición buena, se puede continuar con las rutinas de mantenimiento normal
5	62%	44%	53%	Condición pobre, se sugiere planificar acciones mayores según corresponda

Del CUADRO XVII, se concluye que el TP del caso 3 obtuvo la mejor valoración. Mientras que el caso 5 obtuvo los valores más bajos, tanto en los subíndices funcional y dieléctrico, como en el HI_{total} . El análisis realizado para cada TP es el siguiente:

- **Caso 1:** este transformador fue inspeccionado posterior a la realización de las pruebas por sus niveles altos de humedad y furanos y presentaba un deterioro avanzado, lo que concuerda con el valor del HI_{total} obtenido.

- **Caso 2:** según las inspecciones realizadas posteriormente en el transformador, su condición era buena, lo que concuerda con el valor del HI_{total} obtenido. Sin embargo, dado el bajo puntaje obtenido en la prueba de resistencia de devanados, los trabajos posteriores incluyeron la verificación de las conexiones de los devanados para detectar posibles problemas.
- **Caso 3:** según las inspecciones realizadas posteriormente en el transformador, su condición era buena, lo que concuerda con el valor del HI_{total} obtenido. No se tomaron acciones correctivas concretas.
- **Caso 4:** según las inspecciones realizadas posteriormente en el transformador, su condición era buena, lo que concuerda con el valor del HI_{total} obtenido. Sin embargo, dado el bajo puntaje obtenido en la prueba de resistencia de devanados, los trabajos posteriores incluyeron la verificación de las conexiones de los devanados para detectar posibles problemas.
- **Caso 5:** según las inspecciones realizadas, el transformador presentaba una condición dieléctrica degradada, lo que concuerda con los valores obtenidos. En vista de los bajos valores de los análisis físico y químicos, de la condición del aceite dieléctrico y del contenido de compuestos furánicos, se realizaron mayores análisis para confirmar la degradación avanzada del aceite dieléctrico y/o papel.

Todos los casos evaluados fueron contrastados con los registros de cada transformador, confirmando los resultados de los índices de salud calculados. Los resultados muestran cómo un HI puede recoger información del activo para un diagnóstico integral, que oriente la toma de decisiones. Además, se sugirió a la empresa de servicio participante en este estudio registrar los valores obtenidos de los subíndices e índice de salud a lo largo del tiempo, para realizar análisis de tendencias.

4. CONCLUSIONES

Hoy en día, las compañías eléctricas requieren contar con herramientas de análisis y diagnóstico de condición de sus activos, que guíen la adecuada toma de decisiones respecto al mantenimiento y operación. En este trabajo, se presentó una metodología de evaluación de los transformadores de potencia. La metodología propone determinar la condición general de un transformador por medio de un índice de salud, basado en la suma de puntajes ponderados. El análisis se separó en dos subíndices, uno para evaluar aspectos funcionales y otros aspectos dieléctricos, considerando distintas pruebas de diagnóstico generales, el análisis dieléctrico y del aceite. La metodología propuesta combina diferentes pruebas de variables operativas y análisis de aceite, y los resultados se relacionan con las zonas de falla principales, donde la condición del transformador de potencia podría ser afectada. El índice de salud cuantifica la condición basado en distintos criterios incluidos en la normativa reconocida, que están relacionados con los factores de degradación del transformador que se acumulan en el tiempo, y que lo pueden

llevar al fin de su vida útil. Se deben considerar las variables más significativas del transformador de potencia.

Los resultados obtenidos en un grupo de cinco transformadores mostraron que el índice de salud propuesto fue sensible a cambios en las puntuaciones de las pruebas individuales realizadas. Esto se comprobó contrastando los resultados del índice de salud con las inspecciones realizadas posterior a las pruebas. Esto significa que los valores para los pesos y puntajes incluidos en el cálculo del índice de salud, y la metodología misma, lograron recoger la condición de los transformadores usados en los casos de estudio.

Como parte de los trabajos futuros, se propone desarrollar más pruebas que permitan realizar ajustes a los pesos y puntajes incluidos en la metodología. Además, se deberán considerar técnicas avanzadas de procesamiento de información para determinar el estado del transformador. Por ejemplo, la investigación debe centrarse en la gestión de datos históricos masivos a través de la minería de datos. Finalmente, el uso de esta metodología podría aplicarse en la gestión de activos productivos para el retiro de transformadores de potencia y futuros reemplazos.

5. ROLES DE LOS AUTORES

- Oscar Núñez Mata: idea inicial de la investigación, revisión del estado del arte, desarrollo de las primeras discusiones, diseño de la propuesta metodológica, análisis de resultados.
- Gustavo A. Gómez Ramírez: revisión del estado del arte, desarrollo de las primeras discusiones, análisis de resultados.
- Fauricio Acuña Rojas: desarrollo de las primeras discusiones, análisis de resultados, aplicación de la metodología.
- César González Solís: aplicación de la metodología, análisis de resultados.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se realizó gracias al apoyo del proyecto de investigación: “Detección de fallas, control e integración de sistemas de energías renovables no convencionales con almacenamiento energético para redes inteligentes”, código C1467 de la Universidad de Costa Rica.

NOMENCLATURA

CIGRE: acrónimo en francés de *Conseil International des Grands Réseaux Électriques*.

DGA: análisis de gases disueltos por el acrónimo en inglés de *Dissolved Gas Analysis*.

DP: grado de polimerización por el acrónimo en inglés de *Degree of Polymerization*.

HI: índice de salud, por el acrónimo en inglés de *Health Index*.

HIFj: factor del índice de salud de cada prueba, por el acrónimo en inglés de *Health Index Factor*.

IA: inteligencia artificial.

IEEE: acrónimo en inglés de *Institute of Electrical and Electronics Engineers*.

IEC: acrónimo en inglés de *International Electrotechnical Commission*.

Kj: factor de peso asignado a cada prueba.

OQF: factor de calidad del aceite por el acrónimo en inglés de *Oil Quality Factor*.

Sj: puntaje o ponderación.

SPP: suma de puntajes ponderados.

TP: transformador de potencia.

TTR: acrónimo en inglés de *Transformer Turns Ratio*.

Wj: factor de peso.

REFERENCIAS

- [1] A. Abu-Elanien, M. Salama, y M. Ibrahim “Determination of transformer health condition using artificial neural networks” presentado en *International Symposium on Innovations in Intelligent SysTems and Applications*, 2011, pp. 1–5, doi: 10.1109/INISTA.2011.5946173.
- [2] S. Ghoneim y I. Taha, “Comparative study of full and reduced feature scenarios for health index computation of power transformers” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 181326–181339, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3028689.
- [3] M. Dong et al., “A novel maintenance decision making model of power transformers based on reliability and economy assessment” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 28778–28790, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2897606.
- [4] K. Benhmed, A. Mooman, A. Younes, K. Shaban, y A. El-Hag, “Feature selection for effective health index diagnoses of power transformers” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 33, no. 6, pp. 3223–3226, 2017, doi: 10.1109/TPWRD.2017.2762920.
- [5] P. Bohatyrewicz, J. Płowucha, y J. Subocz, “Condition assessment of power transformers based on health index value” *Applied Sciences*, vol. 9, no. 22, 2019, doi: 10.3390/app9224877.
- [6] A. Ashkezari, H. Ma, C. Ekanayake, y T. Saha, “Multivariate analysis for correlations among different transformer oil parameters to determine transformer health index” presentado en *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2012, pp. 1–7, doi: 10.1109/PESGM.2012.6345231.
- [7] G. Gómez-Ramírez, “Metodología para el análisis y retiro de activos: transformadores de potencia” *Revista Tecnología en Marcha*, vol. 28, no. 3, p. 116-126, 2015, doi: 10.18845/tm.v28i3.2416.
- [8] S. Kittan, S. Kornhuber, P. Kastel, G. Nitsche, G. Valtin, y M. Weise, “Review and implementation of transformer health index methods in line with the development of a condition assessment tool”

- presentado en *International Conference on Diagnostics in Electrical Engineering, Diagnostika*, 2018, pp. 5–8, doi: 10.1109/DIAGNOSTIKA.2018.8526034.
- [9] R. Arias y J. Mejia, “Health index for transformer condition assessment” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 16, no. 12, pp. 2843–2849, 2018, doi: 10.1109/tla.2018.8804247.
- [10] A. Selva et al., “Application of statistical distribution models to predict health index for condition-based management of transformers” *Applied Sciences*, vol. 11, no. 6, pp. 1–20, 2021, doi: 10.3390/app11062728.
- [11] L. Acuña-Barrantes y G. Gómez-Ramírez, “Metodología indirecta para la estimación de vida útil residual de transformadores de potencia a partir de la evaluación de los materiales dieléctricos” *Revista Tecnología en Marcha*, vol. 33, no. 3, pp. 45–56, 2020, doi: 10.18845/tm.v33i3.4485.
- [12] G. Jiménez-Araya y G. Gómez-Ramírez, “Comportamiento de los aislamientos sólidos de transformadores de potencia en condiciones ambientales no controladas” *Tecnología en Marcha*, vol. 29, no. 3, pp. 99–116, 2016, doi: tm.v29i3.2891.
- [13] S. Li y H. Dong, “Transformer apparent age estimation based on probabilistic health index” presentado en *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Asia, ISGT*, 2019, no. 1, pp. 3936–3940, doi: 10.1109/ISGT-Asia.2019.8881798.
- [14] R. Prasajo, N. Maulidevi, B. Soedjarno, y S. Suwarno, “Health index analysis of power transformer with incomplete paper condition data” presentado en *4th International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems, CATCON*, 2019, pp. 3–6, doi: 10.1109/CATCON47128.2019.CN0073.
- [15] H. De Faria, J. Costa, y J. Olivas, “A review of monitoring methods for predictive maintenance of electric power transformers based on dissolved gas analysis” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 46, pp. 201–209, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.02.052.
- [16] W. Wattakapaiboon y N. Pattanadech, “The new developed Health Index for transformer condition assessment” presentado en *CMD 2016 - International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, pp. 32–35, 2016, doi: 10.1109/CMD.2016.7757760.
- [17] R. Murugan y R. Ramasamy, “Understanding the power transformer component failures for health index-based maintenance planning in electric utilities” *Engineering Failure Analysis*, vol. 96, pp. 274–288, 2019, doi: 10.1016/j.engfailanal.2018.10.011.
- [18] J. Foros y M. Istad, “Health index, risk and remaining lifetime estimation of power transformers” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 35, no. 6, pp. 2612–2620, 2020, doi: 10.1109/TPWRD.2020.2972976.
- [19] R. Soni y B. Mehta, “Review on asset management of power transformer by diagnosing incipient faults and faults identification using various testing methodologies” *Engineering Failure Analysis*, vol. 128, no. February, p. 105634, 2021, doi: 10.1016/j.engfailanal.2021.105634.
- [20] S. Tenbohlen et al., “Transformer reliability survey”, *CIGRE, Technical Brochure*, vol. 642, pp. 94–102, 2015
- [21] A. Azmi, J. Jasni, N. Azis, y M. Kadir, “Evolution of transformer health index in the form of mathematical equation” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 76, no. March, pp. 687–700, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.03.094.
- [22] M. Islam, G. Lee, S. Hettiwatte, y K. Williams, “Calculating a health index for power transformers using a subsystem-based GRNN approach” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 33, no. 4, pp. 1903–1912, 2018, doi: 10.1109/TPWRD.2017.2770166.
- [23] O. N. Mata, F. A. Rojas, C. G. Solís, y G. G. Ramírez, “Assessment of Power Transformers using

- a Methodology Based on Health Indices” presentado en *2021 IEEE International Conference on Automation/XXIV Congress of the Chilean Association of Automatic Control (ICA-ACCA)*, 2021, pp. 2–7, doi: 10.1109/ICAACCA51523.2021.9465245.
- [24] R. Prasojo, A. Setiawan, Suwarno, N. Maulidevi, y B. Anggoro, “Development of analytic hierarchy process technique in determining weighting factor for power transformer health index” presentado en *2nd International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems: Towards Sustainable and Reliable Power Delivery, ICHVEPS*, 2019, pp. 1–5, doi: 10.1109/ICHVEPS47643.2019.9011040.
- [25] A. De la Fuente et al., “Strategic view of an assets health index for making long-term decisions in different industries” presentado en *Safety and Reliability - Safe Societies in a Changing World - 28th International European Safety and Reliability Conference, ESREL*, 2018, pp. 1151–1156, doi: 10.1201/9781351174664-146.
- [26] W. Jian, Z. Wenbing, G. Chao, B. Demeng, y W. Kuihua, “The new developed health index for power transformer condition assessment” presentado en *5th Asia Conference on Power and Electrical Engineering, ACPEE*, 2020, pp. 1880–1884, doi: 10.1109/ACPEE48638.2020.9136344.
- [27] S. Li, G. Hu, B. Gao, Y. Yang, y G. Wu, “A probabilistic framework for transformer health condition assessment” presentado en *IEEE International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, 2018, vol. May, pp. 212–217, doi: 10.1109/ICPADM.2018.8401221.
- [28] M. Islam, G. Lee, y S. Hettiwatte, “A review of condition monitoring techniques and diagnostic tests for lifetime estimation of power transformers” *Electrical Engineering*, vol. 100, no. 2, pp. 581–605, 2018, doi: 10.1007/s00202-017-0532-4.
- [29] K. Ibrahim, R. Sharkawy, H. Temraz, y M. Salama, “Selection criteria for oil transformer measurements to calculate the Health Index” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 23, no. 6, pp. 3397–3404, 2016, doi: 10.1109/TDEI.2016.006058.
- [30] M. Ahmed, M. Elkhatib, M. Salama, y K. Bashir, “Transformer Health Index estimation using orthogonal wavelet network”, presentado en *Electrical Power and Energy Conference (EPEC)*, 2015.
- [31] H. Zeinoddini-Meymand y B. Vahidi, “Health index calculation for power transformers using technical and economical parameters” *IET Science, Measurement and Technology*, vol. 10, no. 7, pp. 823–830, 2016, doi: 10.1049/iet-smt.2016.0184.
- [32] K. Mohamadeen, R. Sharkawy, y M. Salama, “Binary cat swarm optimization versus binary particle swarm optimization for transformer health index determination” presentado en *ICET 2nd International Conference on Engineering and Technology*, 2015, pp. 0–4, doi: 10.1109/ICEngTechnol.2014.7016812.
- [33] A. D. Ashkezari, H. Ma, T. Saha, y C. Ekanayake, “Application of fuzzy support vector machine for determining the health index of the insulation system of in-service power transformers” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 20, no. 3, pp. 965–973, 2013, doi: 10.1109/TDEI.2013.6518966.
- [34] K. Chitnavis y N. Bhasme, “Review of critical analysis for life estimation of power transformer” presentado en *4th International Conference on Power, Control and Embedded Systems, ICPCES*, 2017, pp. 1–6, doi: 10.1109/ICPCES.2017.8117632.
- [35] A. Naderian, S. Cress, R. Piercy, F. Wang, y J. Service, “An approach to determine the health index of power transformers” presentado en *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, 2008, pp. 192–196, doi: 10.1109/ELINSL.2008.4570308.
- [36] J. Haema y R. Phadungthin, “Condition assessment of the health index for power transformer” presentado en *Power Engineering and Automation Conference, PEAM 2012*, pp. 2–5, 2012, doi: 10.1109/PEAM.2012.6612413.

- [37] R. Heywood y T. McGrail, “Clarifying the link between data, diagnosis and Asset Health Indices” presentado en *IET Conference Publications*, 2015, vol. 2015, no. CP669, pp. 1–6, doi: 10.1049/cp.2015.1748.
- [38] A. Jahromi, R. Piercy, S. Cress, y W. Fan, “An approach to power transformer asset management using health index” *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 25, no. 2, pp. 20–34, 2009, doi: 10.1109/MEI.2009.4802595.
- [39] M. Angkapiyasiri, P. Fuangpian, T. Suwanasri, y C. Suwanasri, “Condition evaluation of power transformer by analysis of insulating oil tests” presentado en *ECTI-CON 15th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, 2019, pp. 341–344, doi: 10.1109/ECTICon.2018.8620011.
- [40] M. Al Hamdani, R. Azis Prasojo, Suwarno, y A. Abu-Siada, “Power transformer degradation condition and insulation index estimation based on historical oil data” presentado en *2nd International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems: Towards Sustainable and Reliable Power Delivery, ICHVEPS*, 2019, pp. 1–5, doi: 10.1109/ICHVEPS47643.2019.9011135.
- [41] M. Horning, J. Kelly, S. Myers, y R. Stebbins, *Guía para el mantenimiento del transformador*, 3ra ed. Nueva York: Transformer Maintenance Institute (TMI), 2005.
- [42] I. Margalló Gasco, “Diagnóstico del consumo de vida de un transformador a través del análisis de compuestos furánicos” tesis de Bch. Sc., Dept Ingeniería Eléctrica, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España, 2012.