



POSGRADOS

MAESTRÍA EN _____

ELECTRICIDAD

RPC-SO-22-No.325-2018

OPCIÓN DE
TITULACIÓN:

ARTÍCULO PROFESIONAL DE ALTO NIVEL

TEMA:

EFICIENCIA Y RENDIMIENTO DE TRANSFORMADORES DE
DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA CONSIDERANDO LAS PROPIEDADES
DIELÉCTRICAS DE REFRIGERANTES DE ORIGEN VEGETAL Y
MINERAL

AUTOR:

CRISTHIAN OLIVER ZUÑIGA GUACHICHULCA

DIRECTOR:

JUAN MIGUEL MORALES OLIVA

GUAYAQUIL - ECUADOR
2022

Autores:



Cristhian Oliver Zuñiga Guachichulca
Ingeniero Eléctrico
czunigag@est.ups.edu.ec

Director:



Juan Miguel Morales Oliva
Master en Ingeniería de Instalaciones Energéticas y Nucleares
Ingeniero Nuclear
jmoraleso@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS
©2022 Universidad Politécnica Salesiana.
GUAYAQUIL – ECUADOR - SUDAMÉRICA
CRISTHIAN OLIVER ZUÑIGA GUACHICHULCA

EFICIENCIA Y RENDIMIENTO DE TRANFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA CONSIDERANDO LAS PROPIEDADES DIELECTRICAS DE REFRIGERANTES DE ORIGEN VEGETAL Y MINERAL

Eficiencia y Rendimiento de Transformadores de Distribución Eléctrica Considerando las Propiedades Dieléctricas de Refrigerantes de Origen Vegetal y Mineral

Cristhian Zuñiga, Juan Morales

Abstract—The distribution transformer is one of the most important equipment in an electrical system since it makes possible the consumption of electrical energy at a residential and commercial level [1], its cooling medium is commonly mineral oil from petroleum, used for good dielectric capacities, low price and high cooling performance of the equipment, in addition to having good availability as a transformer oil [2]. This oil is a non-renewable resource and is not biodegradable in such a way that the use of this insulator represents a problem for the environment. Mineral oil has a low fire point, so this is also a disadvantage for the execution of the works [3], putting the entire property at risk in the event of a failure in the transformer. For this reason, it is proposed to look for an alternative with oil of vegetable origin FR3 from renewable and biodegradable resources, guaranteeing the good operation, high efficiency, safety and high dielectric capacity of the transformer [4]. The objective of this project is to compare the technical-economic characteristics between mineral oil and vegetable oil. This under techniques guaranteed by the manufacturer and laboratory tests performed on a single-phase distribution transformer. The methodology that will be used is an introduction to both oils, technical sheets of suppliers, comparing physical and chemical aspects, a description of the laboratory tests to be carried out, to finally compare the results obtained and conclude based on those results. [4]. Technical tests were performed on both dielectric oils, routine tests, where very similar results were obtained. The tests were performed three times for each respective test, giving similar results. The results in each test are the average of the three data obtained. The only test where a significant difference was obtained is in the rupture stress, in this test a much higher stress level was obtained in the mineral oil, compared to the vegetable oil. We can conclude that these data provide evidence in favor of mineral dielectric oil, but with a tendency for this to change over the years.

Index Terms—IEEE, IEEEtran, Distribution Transformer, L^AT_EX, Oil Mineral, Oil Vegetal.

I. INTRODUCCION

Los transformadores son equipos fundamentales dentro de un sistema eléctrico. Estos equipos conforman los sistemas de transmisión y distribución de energía eléctrica.

Los transformadores inmersos en aceite han empleado mayoritariamente aceite mineral (derivado del petróleo) como refrigerante y elemento aislante. Este tipo de aceites posee ventajas mayoritariamente en el ámbito económico, sin embargo al ser un derivado del petróleo tiene una baja propiedad

biodegradable. En los últimos años se han presentado varias alternativas de aceites dieléctricos. Una de estas alternativas es el aceite vegetal [5].

Una de las desventajas que tienen las fábricas de transformadores al momento de elegir el uso de aceite vegetal como dieléctrico, es que al ser un aceite relativamente nuevo no se cuenta con un histórico o una base de datos de pruebas eléctricas a estos transformadores.

En este artículo se analizaron ventajas y desventajas que tiene el aceite dieléctrico vegetal en comparación con el tradicional aceite mineral. Se compararon propiedades eléctricas y económicas de estos dos tipos de aceites dieléctricos, propiedades como rigidez dieléctrica, punto de inflamación, viscosidad, tensión entre fases; para de esta manera garantizar el correcto funcionamiento y alta eficiencia del transformador.

Muchos casos de comparativa entre propiedades dieléctricas del aceite mineral [3] y aceite vegetal [6] se realizan con los dieléctricos nuevos antes de su uso y aplicación validando únicamente las fichas técnicas de los fabricantes. Se realizaron pruebas de laboratorio a un transformador monofásico de distribución:

Potencia 25kVA
 Serie 135195
 Voltaje primario 7970V
 Voltaje secundario 240/120V
 Frecuencia 60 Hz
 Regulación de taps +1/-3x2.5
 Clase de voltaje primario 15kV
 Clase de voltaje secundario 1.2kV
 BIL Primario 95kV
 BIL Secundario 30kV

Se realizaron todas las pruebas de rutina para un transformador monofásico según como indica la norma NTE INEN 2111.

Pruebas de rutina: Tensión de Ruptura del aceite; Resistencia de Aislamiento; Prueba de Cortocircuito; Prueba sin carga; Perdidas Totales; Rendimiento a plena carga. Estas pruebas se realizaron en el laboratorio de pruebas de C.A. Moretran, para de esta forma hacer trabajar al transformador al cien por ciento de su capacidad nominal.

Luego de las pruebas que se realizaron en el laboratorio y con los datos obtenidos se procede a hacer la comparación técnica

y la conclusión de los resultados.

II. ACEITE DIELECTRICO VEGETAL VS ACEITE DIELECTRICO MINERAL

El aceite aislante cumple un objetivo muy importante en los transformadores ya que estos cuentan con buenas propiedades dieléctricas y de transferencia de calor, por lo cual son usados como refrigerante y aislante con la parte activa del transformador.

Uno de los puntos mas importantes a tener en cuenta al momento de utilizar aceite mineral o aceite vegetal como liquido dieléctrico en los transformadores, es cómo se comporta el envejecimiento del papel aislante a diferentes temperaturas de operación que pueden llegar a alcanzar los transformadores. El papel celulosa empleado en el aislamiento de los devanados de los transformadores sumergidos en aceite dieléctrico, se degrada considerablemente mas lentamente con el uso de aceites dieléctricos vegetal en comparación con el uso de aceite mineral convencional[7].

A. Fluido Mineral

Este aceite al ser un derivado del petróleo es considerado un recurso no renovable, por lo que en un futuro no pueda ser usado más, esto ha llevado hoy en día diversas investigaciones para desarrollar aceites alternativos. Además de que los aceites minerales son muy agresivos con el medio ambiente. Una de las ventajas de los aceites minerales, es que al ser usados desde siempre y ser procedentes de los derivados del petróleo, este aceite es mucho más común encontrarlos y más económicos a la hora de ser procesados[8].

La vida útil de estos aceites se ve afectada por distintos factores tales como el calentamiento del transformador producto de la corriente que circula por los devanados, lo que ocasiona un envejecimiento acelerado del aceite. La contaminación de estos aceites es producido por el contacto con los diversos materiales que son usados en la construcción del transformador, tales como: adhesivos orgánicos, cauchos de sellado, papel, etc [9].

B. Fluido Vegetal

Los aceites aislantes procedentes de las semillas vegetales son llamados a ser los sustitutos a los aceites minerales. El aceite vegetal en comparación con el aceite mineral, representa el 25 [%] del Impacto del aceite Mineral en su proceso de fabricación[5].

Estos aceites tienen ciertas ventajas en comparación a los aceites minerales, tienen una biodegradabilidad más rápida, sin peligro de agua, con puntos de inflamación más altos. Las diferentes características químicas y físicas del aceite vegetal requieren consideraciones especiales[10]. Los aceites vegetales en servicio, al igual que los aceites minerales, cuando alcanzan un cierto estado de degradación también pueden ser regenerados, así aumentando su vida útil[11]. Una de las desventajas de los aceites vegetales, al ser un producto relativamente nuevo el costo de elaboración es más alto en comparación con un aceite mineral. Además del uso para

ciertas aplicaciones especiales es limitado, en la actualidad ya se ha comenzado a usar aceite vegetal en transformadores de potencia de alta reactancia, aunque en menor medida.

En estudios experimentales realizados sobre un aceite vegetal, la velocidad de degradación térmica del papel Kraft, sumergido en este aceite, fue menor que la velocidad de degradación del papel en aceite mineral aislante, para temperaturas superiores a 130 °C , por lo que se puede apreciar que el papel aislante se conserva mejor a comparación con el aceite mineral. Aunque a temperaturas inferiores a 130 °C el comportamiento de ambos aceites se puede considerar igual[12].

C. Atributos comparativos entre Aceite Vegetal y Aceite Mineral

El aceite dieléctrico vegetal, en este caso del tipo FR3 tiene una enorme ventaja en comparación al aceite mineral. Este tipo de aceite FR3 tiene un punto de inflamación y combustión que sobrepasa los 300 grados celsius[13].

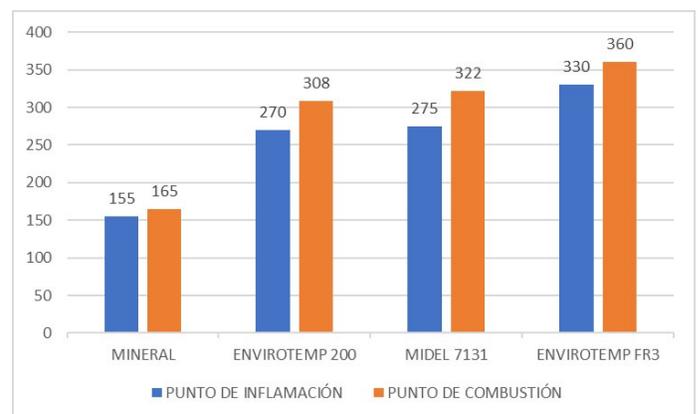


Fig. 1. Puntos de inflamación y combustión de fluidos dieléctricos[13].

Otra de las grandes ventajas que posee el aceite vegetal es que este aceite es mucho mas amigable con el medio ambiente. Este aceite es desarrollado con productos renovables (semillas vegetales), lo cual lo hace muy fácil biodegradable. En la tabla 1 se detalla el impacto que el aceite vegetal produciría a los distintos tipos de medio ambiente[13].

Atributos	Resultados	Métodos
Biodegradación Acuática [%]	≥ 99	EPA OPPTS 835.3100
Fácil Biodegradación [%]	≥ 99	EPA OPPTS 835.3110
Toxicidad Acuática aguda	No toxico	OECD 203
Toxicidad Oral aguda	No toxico	OECD 420
Contenido de material biológico [%]	≥ 95	USDA Biopreferred Program
Emisión de carbono en el ciclo de vida total	Carbono Neutro	Departamento de Comercio NIST BEES V4.0
Impacto Ambiental Total	25% del Impacto de aceite Mineral	Departamento de Comercio NIST BEES V4.0

TABLE I

ATRIBUTOS AMBIENTALES DEL ACEITE VEGETAL FR3[13].

Otro de los aspectos que también se deben tomar en cuenta es como afecta el tipo de aceite con los demás elementos de la fabricación de un transformador, en este caso el papel aislante[9]. En la tabla 2 se muestra que en un transformador con aceite vegetal FR3, la vida útil del papel aislante es mucho mayor en relación a cuando se utiliza aceite mineral.

Base fin de Vida	170°C		
	Aceite Mineral	Aceite FR3	Base IEEE
Resistencia a la tracción retenida			
	50%	240	1300
25%	490	4000	323
Grado de Polimerización			
	200%	480	3400
			746

TABLE II

VIDA ÚTIL DEL PAPEL AISLANTE DEL TRANSFORMADOR MEDIDA EN HORAS[13].

Otro de los puntos que también se tiene que analizar es no solo como o que tanto afectan estos aceites una vez que ya están siendo utilizados. Es necesario analizar desde que son elaborados hasta el final de su vida útil, eso quiere decir que se debe tomar en cuenta aspectos como la producción y transporte en la elaboración de estos aceites. En la tabla 3 se detallan los gases de efecto invernadero que son liberados en el ciclo de vida completo del aceite mineral y aceite vegetal FR3.

Categoría	Gramos por Unidad	
	Aceite Mineral	Aceite FR3
Materia Prima	1048184	-381590
Producción	544363	160212
Transporte	122478	71498
Utilización	154124	153450
Fin de Vida	30825	30690
Total	1899973	34260

TABLE III

GASES DE EFECTO INVERNADERO ATRIBUIDO A CADA ACEITE EN SU CICLO DE VIDA COMPLETO. [13]

III. METODOLOGÍA PRUEBAS DE RUTINA

A. Prueba de Tensión de Ruptura

Esta prueba nos permite saber si en el aceite dieléctrico se encuentran presentes impurezas como polvo, humedad o alguna partícula ajena que pueda funcionar como agente conductor en el aceite dieléctrico. Para realizar esta prueba es necesario tener cierta rigurosidad hermética al momento de tomar la muestra de aceite en la cual se realizará la prueba. Para realizar la prueba de rigidez dieléctrica se necesita una válvula de muestreo para obtener la muestra de aceite, la cual se pasará a un recipiente que no contenga ninguna impureza, para posterior realizar la prueba de rigidez dieléctrica en el laboratorio. Esta prueba de tensión debe cumplir la norma ASTM-D-1816, esta dice:

“Dejar que la muestra y el recipiente de prueba se encuentren a temperatura ambiente. Los exámenes de laboratorio a temperatura ambiente (20 a 30°C). Para asegurar una muestra homogénea, inviertala suavemente y remuévala varias veces. La agitación rápida es indeseable, ya que se puede introducir una cantidad excesiva de aire en el líquido. Dentro de 1 minuto después de la agitación, use una pequeña porción de la muestra para enjuagar la celda de prueba. Escurrir el enjuague. Dentro de los 30 s de enjuague, llene la celda lentamente con la parte restante de la muestra. La celda debe estar llena al cerrar la tapa o el deflector no permitir el contacto del aire con el líquido aislante. Espere al menos 3 minutos pero no más de 5 minutos entre llenando la copa y aplicando voltaje para la primera prueba. Para los aceites aislantes eléctricos de alto 89 punto designación, ésteres y ésteres sintéticos, el tiempo de espera antes de la aplicación de voltaje será de al menos 30 minutos. Se procede a aumentar el voltaje aumentando desde cero a la velocidad de 0,5 kV / s 65% hasta que el fallo se produce como se indica mediante el funcionamiento del equipo de circuito interrumpido; Registrar el valor de voltaje rms más alto que ocurrió inmediatamente antes de cada ruptura[14]. Ocasionalmente pueden producirse descargas momentáneas que no resulten en el funcionamiento del equipo de interrupción; éstos no se tendrán en cuenta hasta que el voltaje a través de la muestra colapsa a menos de 100 V. Se debe llevar a cabo cuatro pruebas adicionales menores de 60V pero no mayores de 90V antes de aplicar de voltaje para averías sucesivas. (Durante los intervalos antes de la aplicación de tensión, entre averías, y en el momento que la tensión está siendo aplicada, en la hélice circulará el aislante líquido.) Si se excede este rango y hay suficiente volumen de aceite de prueba, repetir el análisis con una nueva muestra de aceite. Si un volumen es insuficiente de la muestra de ensayo, el resultado se puede informar con un comentario adicional de que el rango de las averías excede el rango permitido. Cuando se desea simplemente determinar si la fuerza del dieléctrico está por encima o por debajo de un nivel especificado, cinco desgloses son requeridos, siempre que los cinco valores estén todos arriba o abajo este nivel”[15].

B. Resistencia de Aislamiento

Esta prueba consiste en realizar una medición de aislamiento a los devanados con respecto a tierra o entre devanado primario y secundario. Para transformadores de distribución la medición como resultado es en megaohms. Esta prueba debe seguir las normativas.

Para esta prueba de rutina se necesita tener en cuenta el nivel de humedad del ambiente en el que se va a realizar la prueba. Los resultados serán analizados bajo la norma INEN 2127:2013, IEEE C57.12.9[16].

Como se indica en la norma: “Las pruebas de resistencia de aislamiento se deben realizar con todos los circuitos de igual voltaje sobre la tierra conectados entre sí. Los circuitos o grupos de circuitos de diferentes tensiones sobre el suelo deben probarse por separado. Ejemplos de procedimientos incluyen lo siguiente:

- Alto voltaje a bajo voltaje y tierra, bajo voltaje a alto voltaje y tierra.
- El voltaje debe aumentarse en incrementos de 1 kV a 5 kV y mantenerse durante 1 minuto.
- La prueba debe des-continuar inmediatamente si la corriente comienza a aumentar sin estabilizarse.
- Una vez completada la prueba, todos los terminales deben estar conectados a tierra durante el tiempo suficiente para permitir cualquier carga atrapada a decaer a un valor insignificante”[14].

C. Prueba de Cortocircuito

Esta prueba es realizada para determinar los parámetros de circuito equivalente del transformador de distribución. La prueba consiste en energizar el transformador por el devanado de alta tensión mientras el devanado de baja tensión esta cortocircuitado.

Las pérdidas con carga, como indica en la norma INEN 2116:2013: “Son aquellas que se producen debido a una carga específica conectada a un transformador. Las pérdidas con carga incluye las pérdidas en los bobinados y elementos de protección, si los hubiere, debido a la corriente de carga y, las pérdidas parásitas debido a las corrientes de Eddy inducidas por el flujo de dispersión en los bobinados, en el núcleo, en los protectores magnéticos, en las paredes del tanque y otras partes conductivas. Las pérdidas por dispersión también pueden ser causadas por corrientes circulantes en bobinados conectados en paralelo o traslapados[14]. El procedimiento para realizar la medición de las pérdidas con carga es cortocircuitando uno de los bobinados de alto o bajo voltaje, y aplicando un voltaje al otro bobinado para causar la circulación de una corriente específica en estos. Las pérdidas de potencia dentro del transformador bajo esas condiciones, son iguales a las pérdidas con carga del transformador a la temperatura de ensayo y a una corriente específica de carga”[17].

Procedimiento:

- Cortocircuitar los bornes de baja tensión.

2) Alimentar el transformador por los bornes de alta tensión con un voltaje relativamente pequeño.

3) Medir la tensión, corriente y potencia en el lado de alta tensión[14].

Para esta prueba de rutina se necesita tener en cuenta el nivel de humedad del ambiente en el que se va a realizar la prueba. Los resultados serán analizados bajo la norma INEN 2116:2013[16].

D. Prueba sin Carga

Esta prueba es realizada para determinar la impedancia de vacío, esto es una característica importante en los transformadores, puesto que la impedancia es uno de los parámetros fundamentales del circuito equivalente del transformador. Esta prueba debe cumplir la norma NTE INEN 2113:2013, que dice:

Procedimiento:

- Los bornes de baja tensión se dejan abiertos.
- Se conectan equipos de medición en los bornes de alta tensión.
- Se aplica tensión a los bornes de baja tensión.
- Se analizan las mediciones obtenidas en los equipos.

Para esta prueba de rutina se necesita tener en cuenta el nivel de humedad del ambiente en el que se va a realizar la prueba[16]. Los resultados serán analizados bajo la norma NTE INEN 2114[14].

E. Rendimiento a Plena Carga

Esta prueba de rendimiento a plena carga debe cumplir con el reglamento ecuatoriano RTE INEN 141 “Requisitos de seguridad y eficiencia energética para transformadores de distribución”. Esta norma dice lo siguiente:

- En las pruebas de perdidas en vacío para transformadores de distribución, deben cumplir las normas de ensayo NTE INEN 2113 y NTE INEN 2111 vigentes[14].
- En las pruebas a plena carga para transformadores de distribución, deben cumplir las normas NTE INEN 2116 y NTE INEN 2111 vigentes[14].

Para el cálculo de la eficiencia se deben tener en cuenta las perdidas en vacío y a plena carga, estos resultados deben ser referidos a un factor de carga del 80% con respecto a las medidas al 100% y deben ser corregidos a 85 grados Celsius y un factor de potencia unitario[16].

$$\%E = \frac{100x(P \times KVA \times 1000)}{(P \times KVA \times 1000) + NL + (LL \times P^2 \times T)}$$

Fig. 2. Ecuación de porcentaje de eficiencia.

P = Carga por unidad
 kVA = kVA (nominal)
 NL = Pérdidas en vacío a temperatura ambiente W
 LL = Pérdidas debidas a la carga a temperatura de referencia (a 85 grados Celsius,) W
 T = Factor de corrección para las pérdidas de carga a 70 grados Celsius (0,952332)

IV. PRUEBAS ELÉCTRICAS PARA COMPARATIVA DE DIELECTRICOS

Las pruebas se realizaron en el laboratorio de C.A Moretran con equipos calibrados para que la precisión de los resultados sea la correcta, estos ensayos se hicieron a un transformador monofásico de distribución de 25 KVA Serie: 135195, y bajo unas condiciones ambientales alrededor de los 30 grados celsius y 75% de humedad en el ambiente. La alternativa de uso de dieléctrico de origen vegetal versus mineral, no solo presenta ventajas en el aspecto ambiental, también trae beneficios eléctricos. Se obtuvieron datos de las pruebas en ambos dieléctricos para la comparativa y aportar datos a los propietarios de estos transformadores, de tal forma que la decisión de uso dieléctrico vegetal no solo se considere por ser amigable con el medio ambiente, sino que también sea un beneficio técnico y económico a mediano y largo plazo[16]. Hay que acotar que estos resultados obtenidos son validos para este tipo de transformador utilizado, dejando abierto el análisis para otros tipos de transformadores.

A. Liquido Aislante Tensión de Ruptura

La tensión de ruptura obtenida en la prueba bajo la norma ASTM-D-1816 de ambos dieléctricos es diferente. Una tensión de ruptura dieléctrica alta como resultado, no nos indica la ausencia completa de contaminantes en el aceite. Como se demuestra en la figura 3, podemos concluir en base a esos resultados que las impurezas o contaminantes presentes en el aceite no son considerables para afectar el voltaje de ruptura del aceite dieléctrico[16].

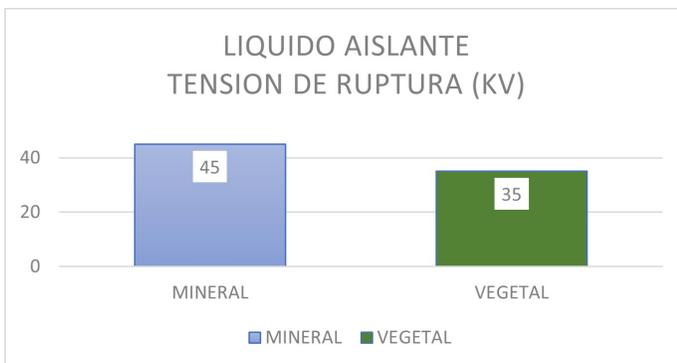


Fig. 3. LIQUIDO AISLANTE TENSION DE RUPTURA. FUENTE: AUTOR

B. Resistencia de Aislamiento

Como se observa en la figura 4 y figura 5, los resultados obtenidos están directamente relacionados al aceite dieléctrico

utilizado, puesto que el mismo transformador fue probado en las mismas condiciones de temperatura, diseño, voltaje aplicado y equipos. Este tipo de prueba puede verse afectado en su resultado por la humedad presente en el ambiente y por la temperatura ambiente.

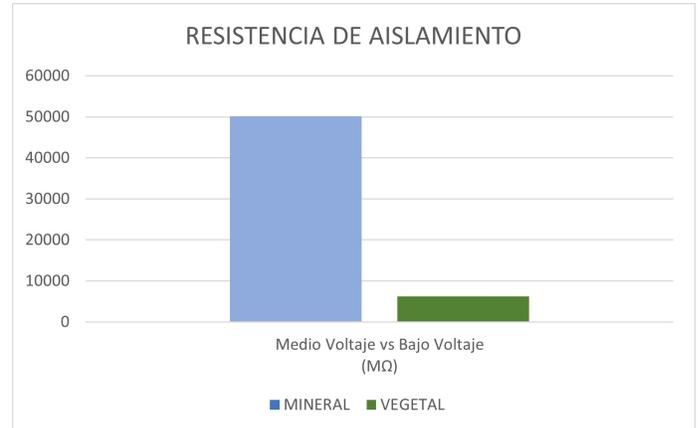


Fig. 4. RESISTENCIA DE AISLAMIENTO MT vs BT. FUENTE: AUTOR



Fig. 5. RESISTENCIA DE AISLAMIENTO BT vs GRND. FUENTE: AUTOR

C. Prueba de Cortocircuito

El resultado de las pérdidas de cortocircuito con el dieléctrico vegetal son un poco más bajas que con el dieléctrico mineral. Esto debido a que al poner en cortocircuito los devanados y energizar con tensión de cortocircuito hasta obtener la corriente nominal del transformador de tal forma que se obtienen las pérdidas en el cobre de la bobina y al tener un medio refrigerante distinto hace que la respuesta a la medición con dieléctrico vegetal sea ligeramente menor en comparación a los resultados de la prueba realizada al dieléctrico mineral. En la figura 6 se observa esa pequeña diferencia[17].

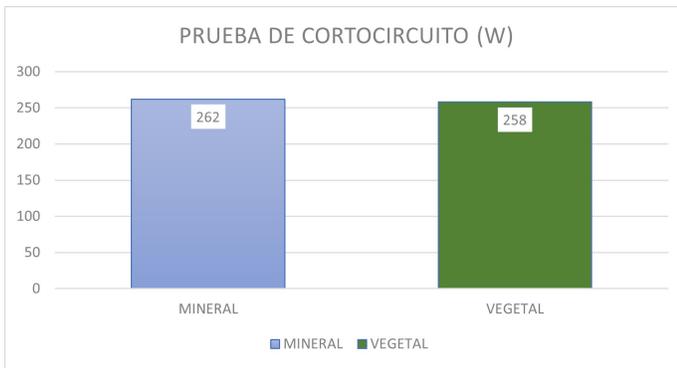


Fig. 6. Prueba de Cortocircuito. FUENTE: AUTOR

D. Prueba sin Carga

Como se demuestra en en la figura 7 las pérdidas de vacío para ambos casos son iguales, puesto que como tal el dieléctrico no influye en la corriente sin carga que se produce en el transformador para realizar esta medición[18].

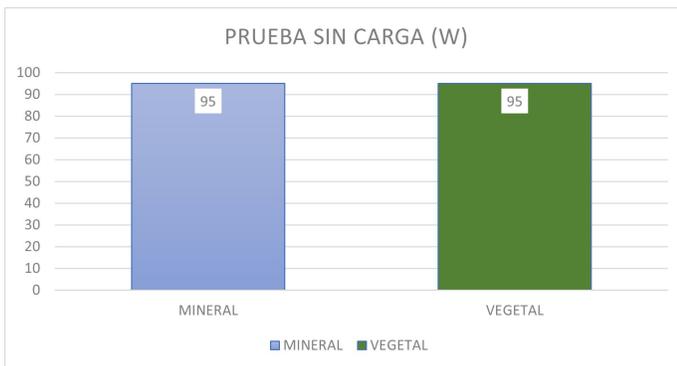


Fig. 7. Prueba sin Carga. FUENTE: AUTOR

E. Pérdidas Totales

Las pérdidas totales se obtiene al sumar las pérdidas de vacío y las pérdidas de cortocircuito. Para criterios de aprobación de las pérdidas máximas admisibles se toma en cuenta la norma NTE INEN 2114, en este caso las pérdidas totales son menores con dieléctrico vegetal, como se observa en la figura 8 [18].

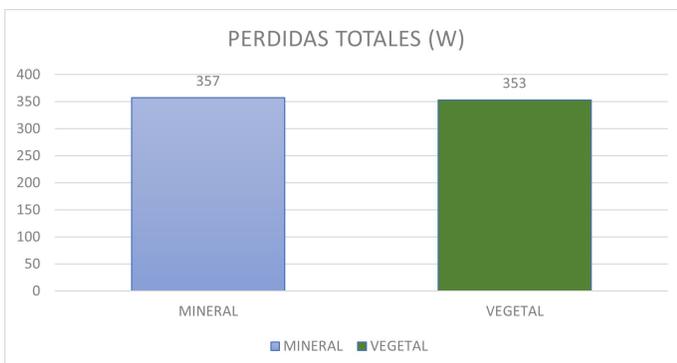


Fig. 8. Pérdidas Totales. FUENTE: AUTOR

F. Rendimiento a Plena Carga

Para el cálculo de la eficiencia se deben tener en cuenta las pérdidas en vacío y a plena carga, estos resultados deben ser referidos a un factor de carga del 80% con respecto a las medidas al 100% y deben ser corregidos a 85 grados Celsius y un factor de potencia unitario, como se observa en la figura 9[19].

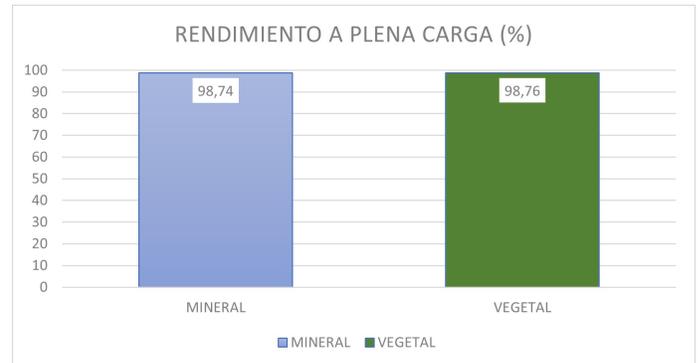


Fig. 9. Rendimiento a Plena Carga. FUENTE: AUTOR

G. Comparativa Económica de Dieléctricos

Como se puede apreciar la diferencia entre el aceite mineral y el aceite vegetal es muy notoria a favor del aceite vegetal. En la tabla 4 que se muestran a continuación se hace una comparativa económica entre el aceite dieléctrico vegetal y mineral. Estos valores representan los costos en la fabricación de un transformador de distribución monofásico de 25 kVA. Estos valores fueron facilitados por C.A. MORETRAN [24].

Descripción	Porcentaje del coste final	
	Aceite Mineral	Aceite FR3
Aceite Dieléctrico	4.12%	11.72%
Materiales Bobina	28.74%	27.54%
Núcleo Magnético	22.79%	21.84%
Equipos de Protección	15.06%	14.43%
Tanque CSP 1F	11.35%	10.87%
Varios (Cables, Flejes, Bridas, etc)	12.99%	8.43%
Mano de Obra	4.95	5.17%
TOTAL	100%	100%

TABLE IV
COMPARATIVA ECONÓMICA EN LA FABRICACIÓN DE UN TRANSFORMADOR 1F CON ACEITE Y ACEITE MINERAL [24].

Como se había comentando capítulos anteriores, el aceite dieléctrico Vegetal tiene un precio superior al aceite mineral, pero con el transcurso de los años la diferencia de precio entre el aceite mineral y el aceite vegetal ha ido disminuyendo. El precio del Aceite Vegetal es de aproximadamente 2.75 veces el precio del galón del Aceite Mineral. Se pudo conocer con estos datos que el costo aproximado de la fabricación de un transformador con aceite vegetal como dieléctrico es apenas un 8.5% mas del costo de un transformador con aceite mineral.

V. CONCLUSIÓN

Se presentaron las principales ventajas y desventajas del aceite vegetal como dieléctrico en los transformadores de distribución. Se realizaron comparativas no solo en el ámbito am-

biental, también se realizaron comparativas técnico-económica entre el aceite mineral y vegetal.

En el ámbito ambiental está muy claro que el uso del aceite mineral es nada amigable con el medio ambiente siendo este un problema el cual se quiere eliminar con el uso del aceite vegetal. Además, cabe mencionar que el punto de inflamación del aceite vegetal es mucho mayor a comparación con el aceite mineral, esta propiedad del aceite vegetal le da una ventaja a la hora de ser instalado el transformador.

Se analizaron los costos de fabricación de un transformador de distribución usando aceite vegetal en lugar del tradicional aceite mineral. Se obtuvo como resultado que el precio de fabricación de un transformador con aceite mineral es todavía más económico que con aceite vegetal, pero esa diferencia de costos tiende a disminuir con el paso de los años ya que, con el uso más frecuente del aceite vegetal como dieléctrico en los transformadores, los precios de fabricación disminuirán.

Los resultados del uso del aceite vegetal tienen un efecto negativo con los demás elementos que forman parte en la elaboración de un transformador. Se obtuvo como resultado que la vida útil del papel aislante es mucho mayor en relación a cuando se utiliza aceite mineral.

Se realizaron pruebas eléctricas de laboratorio a ambos aceites dieléctricos, que se describieron en el capítulo tres. En donde se obtuvieron resultados muy similares con ambos aceites dieléctricos. Cabe destacar que las pruebas de rutina fueron realizadas a un solo transformador con las características antes mencionadas, resultando como un limitante en los análisis de los resultados. Las pruebas fueron realizadas tres veces dando resultados similares en cada prueba respectivamente. Los resultados mostrados en cada prueba son el promedio de los tres datos obtenidos.

Cabe mencionar que una prueba importante como lo es la de calentamiento no se pudo realizar por falta de disponibilidad en los equipos destinados a realizar esta prueba. Esta prueba es importante ya que nos mostraba el comportamiento térmico del transformador con el uso del aceite dieléctrico vegetal. Esta limitante en este artículo queda como una apertura a futuros artículos a realizarse basados en este mismo tema.

El ensayo donde se obtuvo una diferencia significativa es en la prueba de tensión de ruptura, en donde se obtuvo un nivel de tensión mucho mayor con el aceite mineral. Una tensión de ruptura dieléctrica alta como resultado, no nos indica la ausencia completa de contaminantes en el aceite. Lo que podemos concluir en base a esos resultados es que las impurezas o contaminantes presentes en el aceite no son considerables para afectar el voltaje de ruptura del aceite dieléctrico.

Estos resultados aportan evidencia a favor del uso de aceite mineral, todavía resulta más óptimo en comparación con el aceite vegetal, pero con una tendencia a que esto cambie con el transcurso de los años y los avances tecnológicos que se realicen. El aceite vegetal terminará siendo mucho más rentable y viable como aceite dieléctrico en los transformadores de distribución.

REFERENCES

- [1] I. E. de Normalización, "NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 2110 :2013 TRANSFORMADORES. DEFINICIONES.," pp. 1–16, 2013.
- [2] N. T. Ecuatoriana, T. E. I. Requisitos, and P. Edición, "NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 2133:98 TRANSFORMADORES. ACEITES AISLANTES PARA TRANSFORMADORES E INTERRUPTORES. REQUISITOS.," pp. 1–9, 1998.
- [3] S. J. Refining CO., "ACEITE 2018," California, 2017.
- [4] Agrícola Cargill, "Hoja de datos de seguridad Fluido Envirottemp FR3," pp. 1– 12, 2013.
- [5] Diego Navas, Héctor Ramírez, Diego Echeverry, "Aplicación del aceite dieléctrico de origen vegetal en transformadores eléctricos," pp. 1-24, 2012.
- [6] C. Agrícola, "Fluidos Dieléctricos Fluido Envirottemp FR3," pp. 1–8, 2013.
- [7] Energética Hoy, "El aceite vegetal como dieléctrico: Una solución rentable y ecológica," 2018
- [8] Amigdael Calderon, Juan Pérez, Ramiro Pérez, "Análisis comparativo del uso de aceite mineral y aceite vegetal en transformadores de distribución," 2020
- [9] Natasa Bernard y Biljana Cucek "Compatibility of Mineral Insulating Oil with Transformer Construction Materials" pp. 1-3; June 2017.
- [10] Schneider Electric, "¿Cuales son las diferencias entre los aceites vegetales y minerales como dieléctricos en los transformadores?" 2019
- [11] H. M. Wilhelm, G. B. Stocco and S. G. Batista Jr, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 20 (2013) 128.
- [12] M. Martins, A. Gomes, IEEE Electr. Insul. Mag. 28 (2012) 22.
- [13] Cargill Incorporated, "FR3 ® Dielectric Fluid Data Sheet - Cargill," pp. 1–8, 2021.
- [14] Trabajo de titulación CZ-DA, "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN TRANSFORMADOR MONOFÁSICO DE DISTRIBUCIÓN DE 15KVA TIPO TANQUE PARA EL LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN DE LA UPS - GYE" 2018
- [15] A. INTERNATIONAL, ASTM D1816 - 04: Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Oils of Petroleum Origin Using VDE Electrodes, 2004. [En línea]. Available: <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/D1816-04.htm>.
- [16] IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY, "IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformer" 2021
- [17] Instituto Ecuatoriano de Normalización, "TRANSFORMADORES. IMPEDANCIA Y PÉRDIDAS CON CARGA. MÉTODOS DE ENSAYO:" 2013.
- [18] Instituto Ecuatoriano de Normalización, "NORMA TÉCNICA ECUATORIANA INEN 2114: 2004 - TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN NUEVOS MONOFÁSICOS. VALORES DE CORRIENTE SIN CARGA, PÉRDIDAS Y VOLTAJE DE CORTOCIRCUITO." 2004.
- [19] REGLAMENTO TÉCNICO ECUATORIANO RTE INEN 141, "REQUISITOS DE SEGURIDAD Y EFICIENCIA ENERGÉTICA PARA TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN" 2014
- [20] A. Darwin C. Perrier, and P. Foliot, "The use of natural ester fluids in transformer," in Proc. MATPOST Conf., Lyon, France, Nov. 15–16, 2007, paper 0036.
- [21] Instituto Ecuatoriano de Normalización, "NORMA TÉCNICA ECUATORIANA INEN 2111: 2013 - TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN. PRUEBAS ELÉCTRICAS.," pp. 1–9, 2013.
- [22] Natasa Bernard, Biljana Cucek, "Compatibility of mineral insulating oil with transformer construction materials," 2017
- [23] Instituto Ecuatoriano de Normalización, "NORMA TÉCNICA ECUATORIANA INEN 2113: 2013 - TRANSFORMADORES. DETERMINACIÓN DE PÉRDIDAS Y CORRIENTE SIN CARGA. MÉTODOS DE ENSAYO" 2013.
- [24] LABORATORIO DE PRUEBAS ELÉCTRICAS DE LA FABRICA MORETRAN, "Comparativa de precios entre aceite mineral y vegetal" 2022. <https://moretran.ec>