“ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DE LA RECUPERACIÓN DE LOS ACEITES DIELÉCTRICOS CON TIERRA FULLER Y DESLODIFICACIÓN DE BOBINADOS EN TRANSFORMADORES”

María Gabriela Briones Martínez[1], Gustavo Bermúdez F[2]
[1]Ingeniera Eléctrica en Potencia 2005
[2]Director de Tesis, Ingeniero Eléctrico en Potencia, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 1971.
M.C. Ingeniería Eléctrica, Univ. Técnica Federico Santa María, Chile 1974; Profesor de la ESPOL desde 1974.

1. RESUMEN

La presente tesis realiza un análisis técnico y económico de la recuperación de los aceites dieléctricos con tierra fuller con su efecto al interior de los transformadores en la deslodificación de sus bobinados como producto del envejecimiento que estos equipos experimentan en su operación con el transcurrir de los años. Mediante esta implementación no sólo se logra mejorar las condiciones operativas de los transformadores sino que también se evita que en el país se produzca un almacenamiento muy grande de aceites dieléctricos lo cual afecta también al medio ambiente.

Por los motivos antes expuestos, se realiza previo al análisis una descripción del proceso de envejecimiento que sufren los aceites dieléctricos así como se detallan los diferentes métodos que se tienen para la recuperación de los mismos utilizando tierra fuller. Finalmente se hace la evaluación técnica y económica de la recuperación de los aceites dieléctricos y la deslodificación de los bobinados frente al costo que tienen los transformadores de potencia.

SUMMARY

The following work makes a technical and economical analysis about Transformer Oil Recovery with Fuller’s Earth in order to desludge transformer’s coils. Sludge is formed as a result of the oxidation process that suffers the oil during its years of service. Oil recovery improves the operational conditions of transformers and prevents an unnecessary accumulation of damaged oil that affects the environment.

This work consists of a detailed explanation of the oxidation process of the oil, followed by a description of the different methods used to recover oil using fuller’s earth. At the end, the economical analysis includes the costs of the recovery and desludging process compared to the price of a new transformer.

2. INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la demanda de energía eléctrica y la operación del Sistema Nacional Interconectado a 230 KV iniciada en el año 1981 establece una pauta del desarrollo que nuestro país ha tenido en lo que corresponde a transformadores de potencia que a ese voltaje ha permitido integrar y servir a los diferentes sectores del país.

Bajo estas condiciones, hoy en día en el país existe una gran cantidad de transformadores de potencia con más de 20 años de vida cuyos aceites dieléctricos, como producto de su envejecimiento, se encuentran deteriorados en función de la carga y del régimen de operación a que se han visto expuestos. Tomando en consideración que un transformador está diseñado para trabajar más de 30 años, se vuelve importante no sólo establecer el control periódico de su aceite sino tomar los correctivos del caso cuando es necesario recuperar o cambiar el aceite del equipo.

Los transformadores de potencia poseen una considerable cantidad de aceite, lo cual origina que su cambio tenga un costo considerable. Frente a lo expuesto, el objetivo de este trabajo es presentar como alternativa al cambio del aceite en un transformador de potencia, el realizar su recuperación y clarificación utilizando para ello tierra fuller realizando a su vez el análisis económico de los procesos a efectuarse. Este trabajo también tiene como fin el realizar un análisis económico del proceso a seguir en el reciclado de los aceites dieléctricos en vista de que el desarrollo de este proceso no está implementado en el Ecuador a pesar del ahorro de divisas que representa ya que los aceites dieléctricos deben ser importados por no producirse en el país.

3. CONTENIDO

3.1 PROCESO DE ENVEJECIMIENTO DE LOS ACEITES DIELÉCTRICOS

Las cuatro funciones del aceite de transformador son:

a. Actuar como un material dieléctrico y aislante.
b. Proveer transferencia de calor y actuar como un medio refrigerante.
c. Proteger el aislamiento sólido y actuar como barrera entre el papel y los efectos dañinos del oxígeno y la humedad.
d. Diagnosticar las condiciones internas del transformador y del aislamiento sólido.

A medida que el aceite envejece, disminuye su capacidad para cumplir estas funciones. Como consecuencia de esto, aparecen productos de oxidación en el aceite los cuales se precipitan formando depósitos de lodo en el transformador. Este lodo impide el flujo del aceite a través de las bobinas lo que impide una apropiada transferencia de calor provocando un sobrecalentamiento que reduce la vida útil del transformador. Entre los factores que aceleran la oxidación de los aceites dieléctricos se encuentran los siguientes:

- Contenido de Oxígeno
- Calor
- Humedad
- Metales
- Celulosa
- Productos de Oxidación

Es difícil evitar la presencia de celulosa en el papel, catalizadores metálicos, o el esfuerzo eléctrico, sin embargo, el mantenimiento del aceite dieléctrico nos ayuda a controlar muchas de las otras condiciones que aceleran el proceso del envejecimiento del mismo. Las pruebas de diagnóstico realizadas al aceite dieléctrico forman parte de un correcto programa de mantenimiento. Estas pruebas deben realizarse mínimo una vez al año y son muy útiles para predecir cuándo un equipo debe ser removido de servicio antes de que ocurra una falla.

a. Examen Visual
b. Color
c. Densidad Relativa
d. Punto de Anilina
e. Número de Neutralización
f. Tensión Interfacial
g. Inhibidor de Oxidación
h. Rigidez Dieléctrica
i. Humedad en el Aceite
j. Factor de Potencia
k. Análisis de Gases Disueltos
l. Análisis de Metales Disueltos
m. Análisis de Compuestos Furanos
n. Análisis de PCB

Cabe recalcar que ninguna prueba por sí sola debe tomarse como un indicativo aisladamente confiable para tomar cualquier decisión en materia de mantenimiento. Por este motivo es necesario considerar el conjunto de pruebas más importantes que miden la degradación y contaminación de los aceites presentadas a continuación:

PRUEBAS ASTM MÁS IMPORTANTES PARA ACEITES AISLANTES EN OPERACIÓN			
Método de Prueba	**Criterios de Evaluación**	**Información Suministrada**	**Acción a Tomar (resultados inaceptables)**
Rigidez Dieléctrica D-877 (kV)	Aceptable ≥ 30 Cuestionable: 25-30 Inaceptable < 25	Contenido de impurezas y agua	Filtrado y Deshidratación con Vacío
Número de Neutralización D-974 (mg KOH/g)	Aceptable ≤ 0.05 Cuestionable: 0.05-0.1 Inaceptable > 0.1	Contenido de ácidos y lodos	Recuperación del aceite con tierra fuller y limpieza con aceite caliente.
Tensión Interfacial D-971 (Dinas/cm)	Aceptable ≥ 32 Cuestionable: 28-32 Inaceptable < 28	Contenido de contaminantes polares ácidos	
Color D-1500	Aceptable ≤ 3.5 Inaceptable > 3.5	Cambio marcado en un año indica anomalía	
Contenido de Agua D-1533 (ppm)	Aceptable < 30 Cuestionable: 30-35 Inaceptable ≥ 35	Contenido de agua en el aceite	Deshidratación con Vacío
Densidad Relativa D-1298	Aceptable: 0.84-0.91 Cuestionable: < 0.84 Inaceptable > 0.91	Necesidad de revisar contaminantes	Investigar
Contenido de Inhibidor D-4768	Aceptable ≥ 0.2% Cuestionable: 0.1-0.2% Inaceptable < 0.1%	Nivel de defensa contra productos de oxidación	Reinhibición del aceite
Factor de Potencia a 100º C D-924	Aceptable < 3% Cuestionable: 3%-4% Inaceptable > 4%	Presencia de agua, ácidos, contaminantes.	Mantenimiento Completo del Aceite

Conjuntamente con las pruebas anteriores es recomendable realizar la prueba de contenido de PCB (Bifenilos Policlorados) a todos los transformadores inmersos en aceite con el fin de determinar si el aceite está contaminado con PCB, especialmente antes de realizar el tratamiento al aceite. La Agencia de Producción Ambiental (EPA) establece que un aceite mineral libre de PCB debe contener menos de 50 ppm de PCB.

El mantenimiento completo del aceite dieléctrico consta de cuatro fases: el filtrado y deshidratación con vacío, la recuperación del aceite con tierra fuller, la remoción de lodos mediante la recirculación de aceite caliente en el interior del transformador y finalmente la adición del inhibidor de oxidación. Es importante no confundir los términos recuperación y reacondicionamiento. El reacondicionamiento del aceite es la remoción de humedad, partículas sólidas y gases disueltos a través del proceso de termovacío que comprende el filtrado, calentamiento y vacío realizado al aceite. Por otra parte la recuperación del aceite es la remoción de los contaminantes ácidos, coloidales y productos de oxidación a través de tratamientos absorbentes en donde la tierra fuller juega un rol muy importante restaurando y clarificando el aceite deteriorado.

3.2 TRATAMIENTO DE ACEITE CON TIERRA FULLER

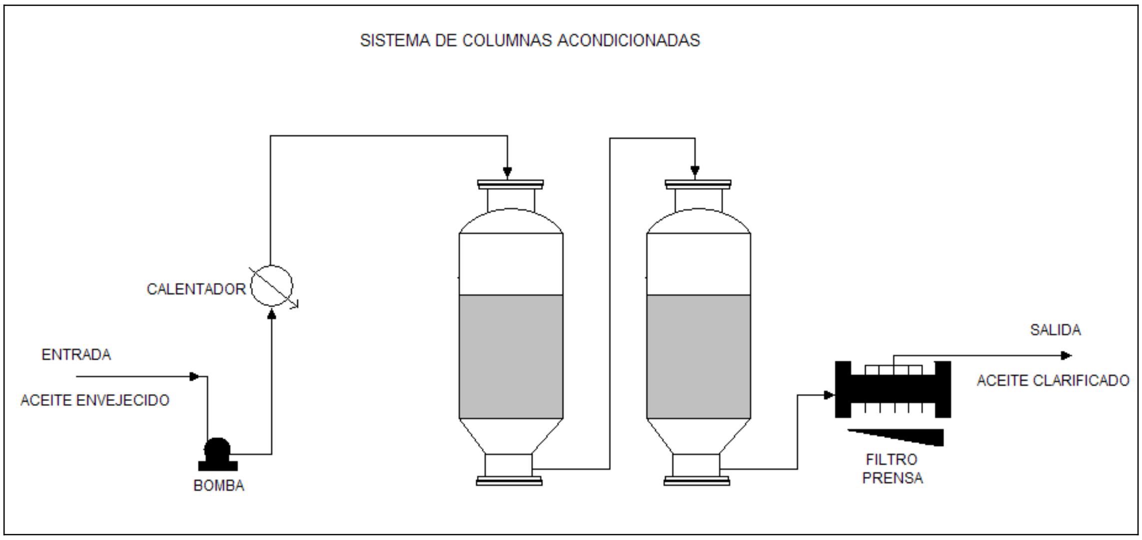
El término tierra fuller se refiere a una clase natural de arcilla absorbente, cuyo principal constituyente es la arcilla atapulguita utilizada satisfactoriamente para recuperar aceites de transformador por su alta capacidad de absorción de compuestos polares y de clarificación de los mismos. Mineralmente, la arcilla es encontrada como silicato de aluminio y magnesio hidratado.

La tierra fuller está clasificada en varios grados, según el tamaño de las partículas dadas en meshes: 15-30, 30-60, 50-80 en productos granulares y 100-200 para productos de polvo fino.

Existen dos métodos de adsorción por medio de tierra fuller: el método de contacto y el método de percolación. El proceso de contacto consiste en mezclar el aceite a ser purificado con tierra fuller en polvo bajo condiciones de tiempo y temperatura controladas. Luego de completarse la adsorción, la tierra es separada del aceite purificado.

En el otro proceso, conocido como percolación, el aceite es pasado a través de una columna de tierra fuller granular. En este método el espesor de la columna de tierra fuller dependerá de la unidad a utilizarse la cual puede ser de tipo cartucho y de tipo torre o columnas acondicionadas. La percolación de tipo torre o refinación es similar al método con cartuchos con la diferencia de que el aceite es pasado verticalmente a través de la capa de tierra fuller en vez de horizontalmente.

La tierra utilizada es arcilla atapulguita de 30 a 60 mesh o bauxita Porocel de 20 a 60 mesh. La capa de adsorbente debe tener una relación altura-diámetro de 3 a 1. Se conoce que para recuperar un galón de aceite, se necesitan aprox. 2.5 libras de arcilla.



La tierra fuller luego del proceso es un silicato de aluminio y magnesio impregnado de base nafténica de aceite mineral aislante que desprende gases que obliga a tomar medidas de precaución. Desafortunadamente las reglamentaciones existentes en el país no establecen puntualmente la utilización que se debe dar a la tierra fuller saturada.

En vista de lo anterior, se ha hecho consultas a varias firmas internacionales entre las que se destaca la compañía Transequipos (Colombia) con muchos años de experiencia la cual efectúa el aprovechamiento de la tierra fuller entregándola a plantas de asfalto. Otra opción que realiza Transequipos es una vez que la tierra fuller se encuentra saturada, es retirada de los tanques de deslodificación de la unidad de tratamiento y almacenada. Luego de almacenar una cantidad de tierra considerable ésta es trasladada a la compañía Holcim S.A. de Colombia que posee un horno de producción de cemento ubicado en donde se efectúa el tratamiento de estos residuos para darles una disposición final y segura sin generar ningún tipo de residuo adicional.

3.3 DESLODIFICACIÓN DE LOS TRANSFORMADORES EN EL PROCESO DE REGENERACIÓN CON TIERRA FULLER

El problema se origina cuando múltiples capas de lodo se depositan periódicamente en las bobinas y núcleo del transformador por un largo período de tiempo y en varios grados de oxidación avanzada. La recuperación mencionada anteriormente devuelve al aceite sus propiedades aislantes, sin embargo no remueve el lodo producto de la oxidación del aceite de la celulosa de la cual están formadas las bobinas del transformador.

Cuando el aceite de transformador es calentado a la temperatura de punto de anilina (72º a 82º C), éste se convierte en un efectivo solvente de sus propios productos de oxidación. La limpieza con aceite caliente se optimiza gracias al poder solvente que posee el aceite recuperado el cual ataca los depósitos de lodo en el interior del transformador.

El proceso de limpieza con aceite caliente requiere de un equipo de recuperación móvil conectado al transformador mediante mangueras. Este sistema combina el calentamiento continuo, el tratamiento de percolación con tierra fuller, la deshidratación con vacío y un filtrado final.

Para lograr la remoción de todo el sedimento es necesario conectar el transformador al equipo de regeneración formando un sistema de circuito cerrado. El aceite del transformador es calentado mientras fluye por el mismo. Luego el aceite pasa a través de un filtro para remover sus contaminantes y el agua, hasta finalmente ser tratado con tierra fuller antes de pasar nuevamente al transformador. El número de recirculaciones a través del transformador depende de la cantidad de lodo, pero usualmente es de 6 a 20. El tratamiento continúa hasta que los resultados de las pruebas realizadas al aceite sean óptimos.

Luego de pasar por las columnas de tierra fuller, el aceite es filtrado e introducido en una cámara de vacío. Aquí el aceite se mantiene a una temperatura de 92º C y a un vacío constante de 25 a 29 pulgadas de mercurio para su deshidratación y desgasificación.

La limpieza es más eficiente si el transformador se encuentra energizado ya que la frecuencia de 100/120 ciclos causa la vibración de las láminas del transformador lo que ayuda a desprender fácilmente el lodo del interior del equipo. El calor producido en un transformador energizado es de gran ayuda para que el aceite alcance rápidamente su temperatura de punto de anilina, logrando que el calentador trabaje eficientemente.

Cuando se alcanza el grado final de la limpieza con aceite caliente, tal como lo determinan las pruebas de laboratorio realizadas al aceite recuperado, se procede a la adición del inhibidor de oxidación al aceite caliente en la última recirculación para restaurar la pérdida de inhibidor causado por el proceso de envejecimiento del aceite, su contacto con la tierra fuller y el efecto del calentamiento y vacío. El inhibidor, comprado en forma de lámina y mezclado a una concentración apropiada en un tanque, es introducido en el transformador a través de una válvula solenoide. El tanque está diseñado de tal forma que el 0.3% de inhibidor DBPC (2,6-ditercio-butil fenol) por peso del aceite, sea adicionado con exactitud en cada unidad.

Tecnología Fluidex

Fluidex ha desarrollado un sistema especial de equipos de procesamiento de aceite, capaces de realizar las labores relacionadas al tratamiento del aceite en sitio incluso con transformadores energizados. El tratamiento incluye la regeneración del aceite a través de su desgasificación, secado y filtrado, sin embargo, su principal función es la remoción de ácidos, lodos, contaminantes y la decoloración dejando el aceite con una excelente estabilidad de oxidación y reduciendo la tendencia a la formación de gases.

La tecnología Fluidex ofrece muchas ventajas sobre sistemas tradicionales de recuperación permitiendo la reutilización de las camas de Tierra Fuller entre 200 a 300 veces. La reactivación es totalmente automatizada, lo que permite procesar grandes cantidades de aceite utilizando la misma tierra fuller, la cual no necesita ser removida por un período de hasta dos años. Cuando la tierra fuller es finalmente removida como arena seca y neutra, puede ser utilizada como material de construcción.

DESCRIPCIÓN	SISTEMA CONVENCIONAL	TECNOLOGÍA FLUIDEX
Pérdida de aceite durante el tratamiento en %.	6	0.2
Cantidad de desperdicio en % del aceite tratado.	10	0.1
Número de veces en que la misma tierra fuller puede ser reutilizada.	1	300
Cantidad de tierra fuller que debe ser desechada durante 2 años de operación en libras.	900000	3000
Calidad de la arcilla desechada.	Peligrosa	No peligrosa
Grado de Automatización.	Limitado	Completo
Número de operadores requeridos por 24 horas.	48	2

De la aplicación realizada por la Compañía Fluidex en la utilización de la máquina de tratamiento de aceite con tierra fuller se establece por parte de la misma los siguientes resultados luego de efectuar la recuperación del aceite:

PRUEBA	MÉTODO	UNIDAD	CONDICIÓN INICIAL	CONDICIÓN FINAL
Acidez	ASTM D974	mg KOH/g	0.25	< 0.03
Color	ASTM D1500	Visual	Café/Turbio	Amarillo Claro
Rigidez Dieléctrica	ASTM D877	KV	< 30	>70
Humedad	ASTM D1533	ppm	< 2000	5
Factor de Potencia	ASTM D924	-	< 1%	<0.5%
Tensión Interfacial	ASTM D971	Dinas/cm	< 15	>35
Contenido de Gas	ASTM D3612	ppm	>700	<700

3.4 EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL PROCESO DE RECUPERACIÓN DE LOS ACEITES CON TIERRA FULLER Y DESLODIFICACIÓN DE LOS BOBINADOS

Para la valorización del aceite dieléctrico que poseen los transformadores se ha tomado como base el costo que hoy en día tiene un tanque de 55 galones de aceite dieléctrico el mismo que asciende al valor de $ 260 más IVA, es decir, un costo por galón de $ 5.29.

A continuación se ha procedido a escoger capacidades de transformadores tipo de 69 y 138 KV utilizados por las empresas eléctricas del país con el fin de establecer la relación entre el costo del Transformador de Potencia y el costo de su aceite tal como se detalla a continuación:

COSTO DEL ACEITE QUE CONTIENEN LOS TRANSFORMADORES DE POTENCIA		
Capacidad del Transformador	**Contenido de Aceite litros (galones)**	**Costo del Aceite (dólares)**
5 MVA – 69/13.8 KV	6144 (1536)	$ 8,125
10 MVA – 69/13.8 KV	8389 (2097)	$ 11,093
24 MVA – 69/13.8 KV	15400 (3850)	$ 20,366
85 MVA – 138/13.8 KV	24000 (6000)	$31,740

COSTO REFERENCIAL DE LOS TRANSFORMADORES DE POTENCIA		
Capacidad del transformador	**Marca**	**Costo del Transformador Valor CIF (dólares)**
5 MVA	ABB	$ 70,000
10 MVA	ABB	$ 127,000
24 MVA	ABB	$ 240,000
85 MVA	GE - PROLEC	$ 678,000

De los costos detallados en las tablas anteriores se establece las siguientes relaciones:

COSTO DEL ACEITE DIELÉCTRICO VS. COSTO DEL TRANSFORMADOR DE POTENCIA		
Capacidad del Transformador	**Relación de Costos**	**%**
5 MVA	8,125 / 70,000	11.60
10 MVA	11,093 / 127,000	8.73
24 MVA	20,366 / 240,000	8.48
85 MVA	31,740 / 678,000	4.68

Como se puede observar la relación del costo del aceite vs. el costo del equipo se va reduciendo conforme aumenta la capacidad de potencia del transformador, sin embargo, no deja de ser un costo considerable el valor del aceite que posee el equipo.

Asimismo se establece que los costos para el cambio del aceite se incrementan considerablemente al incluir todas las actividades que conlleva el cambio del aceite del equipo. Además este valor se incrementa aún más al considerar su impacto en la confiabilidad del servicio eléctrico ya que para este trabajo el equipo debe salir de operación con un lucro cesante alto ya que en muchas ocasiones se pone en riesgo el abastecimiento de energía a los usuarios de las empresas eléctricas.

Todas estas actividades indicadas en la práctica tienen un costo promedio en el mercado dependiendo del costo del equipo tal como se detalla a continuación:

- Para transformadores de 5 MVA .... 10% del costo total del equipo.
- Para transformadores de 10 MVA .... 8% del costo total del equipo.
- Para transformadores de 24 MVA .... 6% del costo total del equipo.
- Para transformadores de 85 MVA .... 4% del costo total del equipo.

Al valorarse estas actividades y sumarlas al costo del aceite se tiene que el valor final incluyendo el IVA para el cambio de los aceites de los transformadores tipo señalados en la sección 6.3 conjuntamente con su relación respecto al costo del transformador es el siguiente:

RELACIÓN ENTRE EL COSTO DEL CAMBIO DE ACEITE DIELÉCTRICO Y EL COSTO DEL TRANSFORMADOR DE POTENCIA		
Capacidad del Transformador	**Relación de Costos**	**%**
5 MVA	(8,125 + 7,000) / 70,000	21.60
10 MVA	(11,093 + 10,160) / 127,000	16.73
24 MVA	(20,366 + 14,400) / 240,000	14.48
85 MVA	(31,740 + 27,120) / 678,000	8.68

Con el fin de determinar los costos para recuperar aceites en mal estado y deslodificar los bobinados de los transformadores de potencia se toma para el presente caso el ejemplo de un transformador de 85 MVA – 138/13.8 KV que posee 6000 galones de aceite con las siguientes características físico químicas.

Pruebas	Valores Iniciales	Valores Finales después del Proceso
Color	4.5	1.5
Acidez	0.30 mg KOH	0.05 mg KOH
Tensión Interfacial	20 dinas/cm	35 dinas/cm
Rigidez Dieléctrica	20 KV	40 KV
Contenido de Humedad	45 ppm	20 ppm
Contenido de PCB	Negativo	Negativo
Factor de Potencia (20º C)	> 1.5 %	0.1 %

Bajo estas condiciones los costos que implican la ejecución de este trabajo con 15 recirculaciones son los siguientes:

- 96 sacos de arcilla $ 960

- Inhibidor $ 6804

- Utilización de equipos para el proceso de regeneración y filtrado. (incluye adquisición de 4 filtros de 0.5 micrones) $ 10875

- Costo de eliminación de la tierra fuller saturada en planta de de asfalto. Incluye costo de manipuleo, limpieza y transporte. $ 480

- Pruebas eléctricas del transformador de potencia $ 2400

- Pruebas de cromatografía de gases disueltos en el aceite $ 250

- Pruebas físico químicas al aceite, contenido de agua y factor de potencia de aislamiento. Pruebas Cromatográficas de PCB. $ 400

- Subtotal	$ 22169
- 12% IVA	$ 2660
- Costo de Recuperación y Filtrado del Aceite.	$ 24829

Conociendo que la adquisición de los 6,000 galones de aceite nuevo tiene un costo de $ 31,740 (6,000 x $ 5.29) incluido el IVA, se tiene que la relación R_B entre el costo de la regeneración con deslodificación y el costo de la adquisición del aceite nuevo es la siguiente:

$$R_B = 24829 / 31740 = 0.78 = 78\%$$

Como se podrá observar la relación R_B establece que el costo del aceite regenerado con deslodificación sigue siendo menor que la colocación de aceite nuevo, sin embargo para efectos de análisis esta relación es meramente referencial ya que el logro que se obtiene mediante este proceso es la remoción de lodos de los bobinados que va más allá de la simple clarificación del aceite dieléctrico ya que de esta manera se está alargando la vida útil del transformador. Por esta razón la relación que debe analizarse es la que corresponde a la comparación de esta actividad con el costo del transformador de potencia la misma que viene dada a continuación:

$$R_C = 24829 / 678000 = 0.0366 = 3.66\%$$

Como se podrá observar los logros que se tienen mediante este proceso no sólo son económicos sino también permiten alargar la vida útil que tienen los transformadores los mismos que son muy importantes para la distribución de la energía eléctrica en todo el país.

4. CONCLUSIONES

- Mediante el proceso de recuperación con tierra fuller se logra la absorción de ácidos, agua, alcoholes, aldehídos, furanos y toda clase de moléculas polares que deterioran considerablemente las condiciones físico químicas del aceite aislante, logrando con este proceso clarificar el aceite dieléctrico.

- Implementado el proceso de recuperación de los aceites dieléctricos se establece también la aplicación del principio de utilización de la tierra fuller para efectuar la deslodificación de los bobinados de los transformadores lo cual permite aumentar los años de vida útil de los equipos ya que sus condiciones aislantes mejoran considerablemente.

- En el análisis económico realizado al proceso se establece que el costo de la recuperación de aceites almacenados corresponde al 46% del costo del aceite nuevo, mientras que el costo de recuperación de los aceites y la deslodificación de los bobinados corresponden al 78% del costo del aceite nuevo y al 3.66% del costo de adquisición del transformador sin ser desconectado, lo cual establece la conveniencia técnica y económica de efectuar este proceso.

5. BIBLIOGRAFÍA

- S.D. Myers, Transformer Maintenance Guide, 2004
- Ernesto Gallo Martínez, Diagnóstico y Mantenimiento de Transformadores en Campo, Transequipos, Colombia, 1998
- Puramin C.A., Conozca el Aceite de su Transformador, 1994
- www.sdmyers.com
- www.morganschaffer.com
- www.fluidex.co.za