

Re-Potenciación y Automatización de la purificadora de aceite dieléctrico KLV-3A marca KATO utilizada en la empresa CELEC EP Termopichincha

Christian Rafael Tapia Arias

Ing. Mario Echeverría, Ing. José Pérez

*Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, Carrera de Ingeniería
Mecatrónica*

Febrero, 2014

christian0365@hotmail.com

RESUMEN

En el presente documento se describe todo el proceso desarrollado para repotenciar y automatizar la purificadora marca KATO utilizada para tratar aceite dieléctrico de los transformadores de potencia. Partiendo del levantamiento técnico en el que se diagnóstica las necesidades de la purificadora, se propone alternativas de diseño y se ejecuta trabajos de mantenimiento mecánico para mejorar la eficiencia del sistema (aumentar el caudal de operación), y se implementa un nuevo sistema de control basado en la automatización del proceso mediante la adición de un PLC para disminuir los tiempos de operación y facilitar el mando (supervisión) del operador sobre la purificadora. Paralelamente se realiza un estudio profundo de las propiedades y características de este fluido mediante el análisis de pruebas basadas en normas ASTM, las mismas que permiten evaluar las condiciones de degradación del aceite dieléctrico y el correcto desempeño de la purificadora.

ABSTRACT

This document describes the procedure to repower and automate a purifier (KATO brand) used to treat dielectric oil from power transformers. It begins with a technical research to find purifier's requirements. This Project proposes design alternatives and implements mechanical maintenance tasks to improve the efficiency of system (increasing the flow of operation). Also, it implements a new control system based on the automation of process, adding a PLC to decrease operation times and to facilitate the use of the purifier to the operator. At the same time, this Project made a deep survey about fluid's properties through tests based on ASTM standards. These standards allow to evaluate the conditions of degradation of dielectric oil and check the correct performance of the purifier.

Palabras clave: Re-Potenciación, Automatización, Purificadora, Aceite dieléctrico, Termopichincha.

I. INTRODUCCIÓN

Los transformadores de potencia, como cualquier componente que forma parte del proceso de generación termoeléctrica, requieren de mantenimiento. Termopichincha cuenta con una purificadora de aceite dieléctrico marca *KATO* de origen japonés para regenerar el fluido que contienen dichos transformadores.

El aceite dieléctrico cumple tres funciones en el interior de un transformador:

- Aislante
- Refrigerante
- Protector

Este medio aislante líquido posee características que ofrecen una excelente rigidez dieléctrica en su entorno, es decir, es capaz de soportar altos esfuerzos de tensión eléctrica sin fallar. Además es considerado un aislante de bajo costo porque no necesita ser reemplazado, su composición química que en su mayor parte está formado por hidrocarburos nafténicos le da a este fluido una excelente estabilidad química, permitiendo regenerarlo periódicamente.

Por otro lado, este fluido es muy eficiente en enfriamiento y transferencia de calor. Su baja viscosidad le permite mantener una buena fluidez, por ende, una libre convección natural del calor en todo el interior del transformador. Tiene un punto de inflamación alto, que es la mínima temperatura a la cual el aceite produce gases que mezclados con el oxígeno pueden ser inflamables.

Gracias a que el aceite dieléctrico es un buen captador de humedad y oxígeno se evita la acumulación de estos dos compuestos en el papel aislante (*kraft*). El papel aislante es el elemento más importante de un transformador, puesto que del estado de degradación del mismo depende la vida útil de un transformador.



Figura 1.1 Transformador de 20 MVA en la subestación de Termopichincha
Fuente: (Autor, 2014)

Todos los trabajos de regeneración de aceite dieléctrico y mantenimiento general de un transformador, están destinados a proteger y mantener en óptimas condiciones el papel aislante;

de esta forma se extenderá la vida útil del transformador.

El objetivo principal de este trabajo es repotenciar, automatizar y mejorar las características de la purificadora, a fin de que la empresa cuente con un sistema que contribuya a dar un correcto mantenimiento de los transformadores y garantice la vida útil de los mismos, evitando cualquier tipo de desastre que pueda darse a causa de fallas en el aislamiento de un transformador.

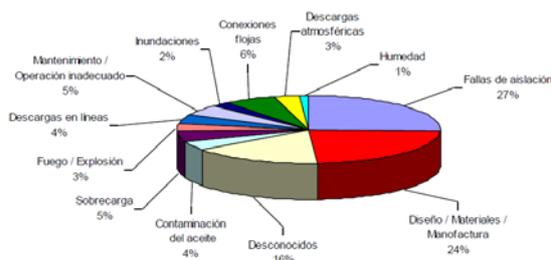


Figura 1.2 Causales de falla en 94 transformadores de potencia durante 1997-2001 difundida por: IMIA W.G.

Fuente: (Alvarez & Del Pozo, 2007, pág. 1)

II. ANÁLISIS Y DIAGNÓSTICO

La purificadora fue adquirida aproximadamente en 1981, desde ese año ha servido para dar mantenimiento a transformadores en todas las centrales que pertenecen a la empresa en todo el Ecuador. Muchas veces la ausencia de planos y la falta de detalle del sistema de control han incurrido para que se manipule de forma incorrecta a la purificadora, aparte del constante deterioro que se ha dado por el indebido

transporte y sujeción de la estructura mediante un montacargas.

Así, se estudió cada parte que conforma el sistema, desde el funcionamiento mecánico hasta la verificación del cableado para deducir el sistema de control que consistía en una lógica de relés; todo esto con la finalidad de elaborar planos detalle del diagrama P&ID, del circuito de potencia y circuito de control.

Se encontraron una serie de problemas e inconvenientes principalmente con motores eléctricos, electroválvulas, filtros, sensores, etc.



Figura 2.1 Purificadora previo a los trabajos del proyecto

Fuente: (Autor, 2014)

Todo el análisis exhaustivo realizado sirvió para diagnosticar las necesidades y requerimientos del sistema, de esta manera se desarrollaron propuestas para la mejora definitiva de la purificadora a partir de un levantamiento técnico.

III. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

Dentro de las propuestas involucradas en el diseño del proyecto fue necesario readecuar el filtro de tierras fuller ya que se cotizó arcilla ultraclear para el tamaño de tamiz 30/60, puesto que dichas tierras nunca han sido reemplazadas. La arcilla en este filtro retiene y acumula el exceso de acidificación y lodos que trae consigo el aceite dieléctrico.



Figura 3.1 Isométrico plano del filtro
Fuente: (Autor, 2014)

Algunos componentes como los disyuntores de potencia que también están sumergidos en aceite no tienen conexión directa a la purificadora, por lo que se introdujo un sistema de recirculación *by-pass* para tratar el fluido de estos elementos.

El principal inconveniente del sistema es el bajo caudal de trabajo con el que funciona normalmente la purificadora, 1200 l/h. Se analizó el 40% del trayecto de la tubería con el fin de calcular la potencia añadida al fluido

con una eficiencia del 80% y de esta forma encontrar la potencia de la bomba mediante la ecuación de la energía de Torricelli para sistema en serie y compararla con el valor que está en la placa de la misma.

$$\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + h_A - h_L = \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{v_2^2}{2g}$$

$$h_A = \frac{P_2 - P_1}{\gamma} + (Z_2 - Z_1) + h_L$$

$$Pot = h_A \times \gamma \times Q$$

$$Pot = 47.3 \text{ m} \times 8436.6 \frac{\text{N}}{\text{m}^3} \times 3.33 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$Pot = 133 \text{ W}$$

$$EM(0.8) = \frac{P_A}{P_1} = \frac{Pot \text{ transmitida al fluido}}{Pot \text{ de entrada a la bomba}}$$

Placa de la bomba $P_1 = 480 \text{ W}$

Calculada $P_1 = 166 \text{ W}$



Figura 3.2 Sistema de bombeo de aceite
Fuente: (Autor, 2014)

En cuanto al sistema de control, se propuso un nuevo diseño que incluía el monitoreo continuo de las variables de proceso como presión, temperatura, caudal, nivel y humedad; mediante la implementación de moderna

instrumentación con señal eléctrica de salida de 4-20 mA. Esta señal fue aprovechada en un módulo de entradas análogas de un PLC modular *Twido* de la marca *SCHNEIDER*, el mismo que fue el eje principal de la automatización del proceso mediante la programación ordenada y sistémica del control de todas las variables con la activación de los actuadores.

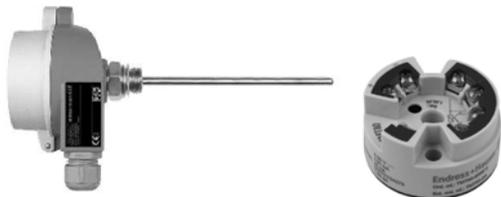


Figura 3.3 RTD y Transmisor de Temperatura
Fuente: (Autor, 2014)

Para que al operador se le facilite el mando de la purificadora, se introdujo una interfaz a través de una pantalla *MAGELIS*, en donde, se decide el modo de operación (Manual o Automático) y se procede a accionar la purificadora. El operador simplemente debe mantener una supervisión constante del proceso en esta HMI.



Figura 3.4 Pantalla Magelis XBT N200
Fuente: (SCHNEIDER, 2013)

La red utilizada para lograr esta interfaz fue MODBUS.

En la construcción y el montaje se ejecutaron trabajos relacionados con el corte de perfiles y planchas mediante plasma, así como taladrado y soldadura *MIG MAG*; todo con el propósito de montar los instrumentos e introducir el nuevo tablero de control.



Figura 3.5 Taladrado y soldadura acople NPT 1/2" para transmisor de humedad
Fuente: (Autor, 2014)

El tablero antiguo estaba totalmente destruido y el cableado era inadecuado, además ninguna de las cargas poseía protección eléctrica alguna. Es así que se planteó la selección de elementos como: disyuntores, guardamotores, relés térmicos, contactores, fuente de voltaje, PLC, panel, entre otros.



Figura 3.6 Tablero de control posterior a los trabajos realizados
Fuente: (Autor, 2014)

IV. PUESTA EN MARCHA Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Previo a todas las pruebas de funcionamiento, fue necesario calibrar los instrumentos con ayuda de calibradores de presión y de procesos, de esta forma se configuraba los rangos exactos de las variables en la programación del PLC. Igualmente se corrigieron ciertos aspectos involucrados en el proceso como el estado de los contactos de los sensores, estado inicial de electroválvulas, rehabilitación de sensores ópticos, en fin, era indispensable asegurarse de que todo esté perfectamente parametrizado antes de encender la purificadora.

Una vez sincronizado todo el proceso se realizaron varias mediciones, obteniendo los siguientes resultados:

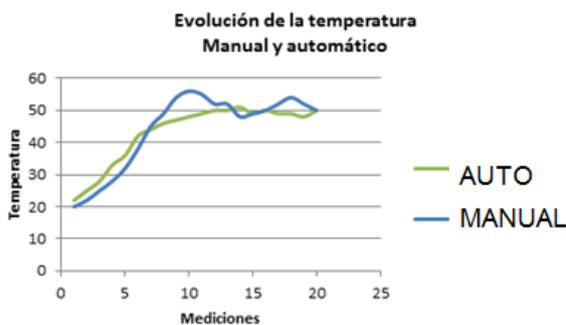


Figura 4.1 Gráfica resultados control de temperatura
Fuente: (Autor, 2014)



Figura 4.2 Gráfica resultados humedad
Fuente: (Autor, 2014)

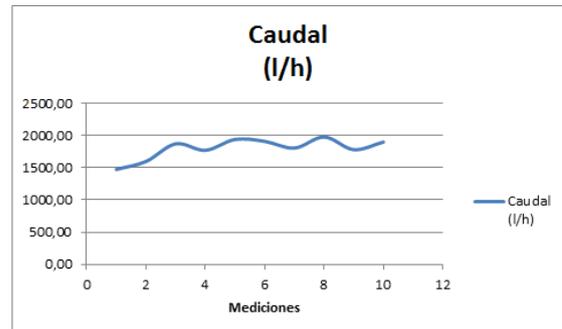


Figura 4.3 Gráfica resultados caudal de operación
Fuente: (Autor, 2014)

V. PRUEBAS DE CALIDAD ASTM PARA ACEITE DIELECTRICO

Antes de realizar mantenimiento de un transformador a través del tratamiento del aceite dieléctrico con la purificadora, es fundamental analizar dicho fluido en un laboratorio de control químico mediante las siguientes pruebas bajo norma ASTM:

- Rigidez Dieléctrica (ASTM D-877): Rampa de voltaje → par electrodos sumergidos.
- Gravedad Específica (ASTM D-1298, ASTM D4052): Densímetro digital.

- Contenido de Agua (ASTM D-1533): Método Karl Fisher - titulación Coulométrica.
- Color (ASTM D-1500): Comparación patrones graduados.
- Número de Neutralización (ASTM D-974): Titulación en solución → obtención de color azul verdoso
- Tensión Interfacial (ASTM D-971): Separación anillo iridio/platino → tensiómetro.

$$IC = \frac{TIF}{NN}$$

$$IC = \frac{30.2}{0.021}$$

$$IC = 1438$$

Calificación	Índice de Calidad (IC)
Aceite excelente	IC ≥ 5000
Aceite bueno	1500 ≤ IC < 5000
Inicio de degradación	600 ≤ IC < 1500
Degradación avanzada	300 ≤ IC < 600
Aceite marginal	150 ≤ IC < 300
Aceite malo	45 ≤ IC < 150
Aceite muy malo	22 ≤ IC < 45
Aceite extremadamente malo	6 ≤ IC < 22
Aceite condición desastrosa	IC < 6

Tabla 5.2 Calificación del aceite según IC

Fuente: (Gallo, 2007, pág. 38)

Todas estas pruebas en conjunto ayudan a determinar el estado de degradabilidad del aceite y permiten tomar una decisión en cuanto al mantenimiento del transformador. Los resultados obtenidos de la muestra de aceite de un transformador en la empresa fueron los siguientes:

PARÁMETRO	UNIDADES	RESULTADOS	CIFRAS TÍPICAS
Gravedad Específica	Adimensional (60/60 °F)	0.9013	0.84-0.91
Viscosidad (37.78°C)	cSt	9.458	8-12
Color	ASTM Color	1.5	< 2
Contenido de agua	ppm	9.68	< 25
Rigidez Dieléctrica	kV	48.9	> 30
Número de neutralización (AN)	mg KOH/g	0.021	< 0.05
Tensión Interfacial	dina/cm	30.2	> 32

Tabla 5.1 Resultados pruebas ASTM

Fuente: (TERMOPICHINCHA, 2014)

Adicionalmente se debe calcular el índice de calidad bajo la siguiente fórmula:

$$IC = \frac{\text{Tensión interfacial}}{\text{Número de neutralización}}$$

Como se puede apreciar en la tabla, el valor de IC correspondiente a la muestra se encuentra en el rango de $600 < IC < 5000$, lo que quiere decir que hay un inicio de la degradación. Esto concuerda con el bajo valor de tensión interfacial que se tiene. Sin embargo no hay que tomar una decisión apresurada, porque el índice de calidad aún está en el límite superior, es decir cercano a 1500.

VI. IMPACTO AMBIENTAL

Durante los años de 1929 a 1977 se introdujeron en este tipo de aceites un compuesto químico llamado PCB (Bifenilos Policlorados), que otorgaban características extraordinarias al aceite en el desempeño de los transformadores, es decir, mantenían una excelente estabilidad y una muy difícil degradabilidad.

Industrialmente eran lo mejor para transformadores en operación, pero en el año de 1960 comienzan a desarrollarse estudios que demuestran su alta peligrosidad, no es hasta el año 1979 que se prohíbe su producción. Entre los años de 1989-2004 nacen convenios como el de Basilea en donde los países adjuntos resuelven tomar medidas estrictas en cuanto al almacenamiento y destrucción de los PCB's.

Los efectos en el ser humano, según la exposición a este químico, pueden ir desde una irritación cutánea hasta desórdenes hepáticos, reproductivos, anomalías fetales en periodos de gestación, incluso pueden llevar fácilmente a un cáncer.

En el medio ambiente se estima que 1 litro de PCB's crea una capa superficial de 2000 m², que son equivalentes a 1 millón de litros de agua. Lo peor ocurre cuando explota un transformador que contiene aceite contaminado con PCB's; la combustión de este compuesto químico forma dioxinas y furanos que son considerados 5 millones de veces más perjudiciales que el cianuro.

En la actualidad es muy difícil destruir los PCB's en el Ecuador, ya que

se requiere de industria avanzada para lograrlo. El manejo en el país está enfocado al almacenamiento e inertización en adecuadas condiciones y bajo estrictas normas de seguridad.

VII. CONCLUSIONES

- El papel aislante es el componente más importante de un transformador de potencia; por tal motivo es indispensable realizar un correcto diagnóstico mediante las pruebas de calidad ASTM para ejecutar un posterior mantenimiento a través de un sistema de regeneración óptimo. De esta forma se contribuye a mantener en buen estado el papel aislante y por ende, extender la vida útil de transformador.
- Con la nueva y moderna instrumentación implementada en la purificadora, se mantiene un monitoreo constante del proceso bajo la supervisión del operador en la HMI; permitiendo disminuir tiempos de operación y facilitando el mando sobre el sistema.
- Se logró reducir la concentración de humedad en el aceite de 40 a 4 ppm en 20 minutos.

- El control de temperatura satisface las necesidades del sistema, garantizando una temperatura adecuada para el proceso de des-humidificación en el tanque principal. Se mantuvo una estabilidad entre 40-50 °C.
- El mantenimiento correctivo desarrollado, las mejoras del sistema mecánico y la implementación del nuevo sistema de control mediante la automatización del proceso; contribuyeron a re-potenciar el sistema, obteniendo un caudal promedio de 1800 l/h, es decir, se consiguió una mejora del 50 % en el caudal nominal de operación.

VIII. BIBLIOGRAFÍA

- Alvarez, R., & Del Pozo, M. (2007). Mantenimiento de transformadores de potencia. *XII ERIAC- Encuentro Regional Ibero-americano del CIGRÉ*. Iguazú, Brasil: CIGRÉ.
- ASTM. (2013). *ASTM International*. Obtenido de <http://www.astm.org/Standards/D923.htm>
- CELEC EP TERMOPICHINCHA. (2013). *CELEC EP TERMOPICHINCHA*. Obtenido de <https://www.celec.gob.ec/termopichincha/index.php/informacion-cooperativa/la-empresa>
- Gallo, E. (2007). Diagnóstico y mantenimiento de transformadores en campo. *Seminario diagnóstico y mantenimiento de transformadores*. Bogotá: Transequipos.
- Kelly, J., Myers, S., & Stebbins, R. (2004). *Transformer Maintenance Guide*. Ohio: TMI (Transformer Maintenance Institute).
- Moreno, A., & Pilco, Y. (2012). *Manual de procedimientos para el manejo de Bifenilos Policlorados (PCB's) en el sector eléctrico ecuatoriano*. Quito-Ecuador: CONELEC.
- Mott, R. (1996). *Mecánica de Fluidos Aplicada*. México: Prentice Hall.
- SCHNEIDER. (2013). Catálogo de productos. *Lista de precios Ecuador*.