



Comité Nacional Paraguayo

**Seminario del Sector Eléctrico Paraguayo 2008
– 29 A 31 DE Octubre DE 2008**



Unión de Ingenieros de la ANDE

**MONITOREO Y DIAGNÓSTICO ON-LINE DE TRANSFORMADOR DE POTENCIA CON
ACEITE VEGETAL**

Marcos E. G. Alves*
Treetech Sistemas Digitais
San Pablo - Brasil

Daniel C. P. Araújo
MCosta
Minas Gerais - Brasil

Álvaro J. A. L. Martins
CEMIG Distribuição S/A
Minas Gerais – Brasil

Marcelo A. Costa
CEMIG Distribuição S/A
Minas Gerais – Brasil

RESUMEN

La substitución de los aceites aislantes minerales por fluidos de origen vegetal en transformadores de potencia ha despertado gran interés en los últimos años. Esto se debe a diversos factores como la elevada temperatura de flameo, la alta solubilidad del agua, que permite que el papel aislante se mantenga más seco, y la no-toxicidad y la biodegradabilidad, que vuelven este tipo de aceite atractivo desde el punto de vista ambiental, entre otras características.

Por estos motivos, Cemig Distribuição ha incluido la utilización de transformadores con aceite vegetal como una de sus iniciativas estratégicas para mejorar sus indicadores de desempeño técnico y económico.

Dado que tales equipos desempeñan papeles esenciales en los sistemas eléctricos de potencia, las eventuales fallas pueden acarrear grandes perjuicios, no sólo por los daños en los equipos, sino también por pérdidas de ingresos, multas contractuales y disminución de la confiabilidad del sistema de potencia. En este contexto, el monitoreo on-line del equipo tiene un papel fundamental para el diagnóstico de su estado, pudiendo en muchos casos detectar fallas, aún en fase incipiente, además de señalar las posibles causas. Con esto pueden evitarse daños mayores al equipo o aún su pérdida total.

Este trabajo presentará las experiencias con el monitoreo on-line de este equipo, incluyendo algunos aspectos específicos relativos al tipo de líquido aislante empleado.

PALABRAS CLAVE

Monitoreo On-Line, aceite Vegetal, Arquitectura Descentralizada, Sistemas Especialistas

TECNOLOGÍA DEL ACEITE VEGETAL

Los aceites vegetales son compuestos orgánicos a base de ésteres, productos agrícolas naturales o sintetizados químicamente por precursores orgánicos. Los fluidos dieléctricos basados en éster sintético, también conocidos como POE, poseen buenas características dieléctricas [1] y son más biodegradables que los aceites minerales basados en hidrocarburos de alto peso molecular (HMWH). Asimismo, tiene excelente estabilidad térmica, buenas propiedades a altas temperaturas, punto de fluidez cercano al del aceite mineral convencional, rigidez dieléctrica y viscosidad similares a la formulación con éster natural. No obstante, presentan punto de combustión más bajo y tasa de biodegradación más lenta que el éster natural. Su alto costo, comparado con otros fluidos resistentes al fuego [2], generalmente limita su uso a subestaciones móviles, transformadores de tracción y otras aplicaciones especiales.

Los ésteres naturales son aceites a base de semillas, incluyendo los líquidos grasos, derivados del glicerol, conocidos como triglicéridos. Fueron considerados inadecuados para uso en transformadores

debido a su alta susceptibilidad a la oxidación. Con el aumento de la demanda por opciones viables, diferentes al aceite mineral, las investigaciones se intensificaron y fueron evaluadas diversas mezclas de aceites. Al encontrar la mejor forma de equilibrarlos, se inició el perfeccionamiento de las características de oxidación y fluidez. Así se inició la selección de aditivos para mejorar el desempeño del fluido.

El éster natural posee viscosidad ligeramente superior a la del aceite mineral, mayor resistencia al fuego y rigidez dieléctrica superior, tanto en el fluido nuevo como tras múltiples operaciones de maniobras bajo carga. El aspecto negativo es su punto de fluidez relativamente alto.

Una fuente atractiva de ésteres naturales son los aceites de semillas. Disponibles en gran escala y con costo de producción reducido, estas semillas — derivadas de fuentes naturales renovables, al contrario que los aceites minerales — son utilizadas principalmente en géneros alimenticios. La formulación del aceite vegetal no presenta ninguna toxicidad al ser humano y posee un tiempo de degradación mucho menor que los aceites minerales. Asimismo, los productos de su combustión completa son solamente gas carbónico y agua. El fluido puede ser filtrado, reciclado y fácilmente descartado.

CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DEL ACEITE VEGETAL Y MINERAL

A pesar de su viscosidad más alta, el desempeño térmico del éster natural puede ser comparado con el del aceite mineral convencional. En el peor de los casos, la elevación promedio de la temperatura del devanado de los transformadores aislados con aceite vegetal es cerca de 5°C superior [1] a la del aceite de origen mineral. Sin embargo, en la figura 01, se verifica la alta temperatura de flameo y de combustión del aceite vegetal. De esta forma, es posible permitir el aumento de la temperatura de operación del aceite aislante sin afectar la seguridad del transformador.

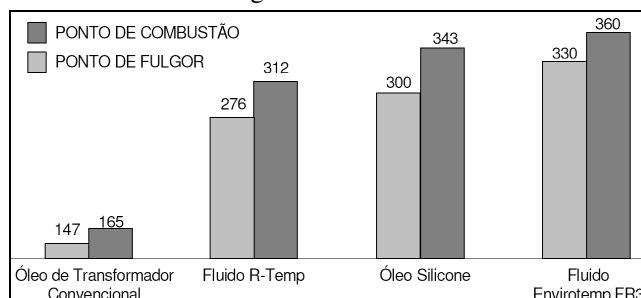


Figura 01 - Comparación de temperaturas de flameo y combustión típicas de los fluidos aislantes

ENVEJECIMIENTO DEL PAPEL AISLANTE EN ACEITE VEGETAL

Un punto importante, con respecto a la adopción del aceite vegetal en transformadores, es la durabilidad del papel aislante, o sea, la forma como el nuevo fluido aislante afecta la vida útil del aislamiento sólido. Estudios publicados [1-3] demuestran que, bajo las mismas condiciones, el envejecimiento del papel kraft en aceite vegetal es mucho más lento que en aceite mineral convencional. Los principales factores de degradación del papel kraft en transformadores son: la temperatura (degradación termoquinética) y la cantidad de agua (degradación termo-hidrolítica).

En términos de saturaciones relativas, se debe obtener un punto de equilibrio entre el papel y el aceite aislante en funcionamiento normal. Los ésteres naturales pueden albergar una mayor cantidad de agua que los aceites minerales, haciendo que haya mayor cantidad de agua desplazada del papel para hacia el fluido. Esta es una de las ventajas de los ésteres naturales utilizados como aislantes, ya que hay un aumento significativo de la vida útil del papel.

La figura 02 muestra una prueba comparativa de la tasa de envejecimiento del papel termoestabilizado con aceite mineral y con éster natural, siendo esta última significativamente más lenta. Se estima que el papel termoestabilizado en un transformador con éster natural, con elevación promedio de temperatura de 85°C, tiene la misma vida útil que un papel idéntico en un transformador con aceite mineral con elevación promedio de temperatura de 65°C. En otras palabras, para una misma vida útil, el papel termoestabilizado impregnado con aceite vegetal puede operar a una temperatura 20°C mayor que el papel con aceite mineral. La importancia de este resultado es enorme en proyectos de nuevos transformadores o en la repotenciación de transformadores usados, dado que el efecto de extensión de

la vida útil del aislamiento representa inmediatamente menores costos del proyecto o el aumento de la vida útil del equipo.

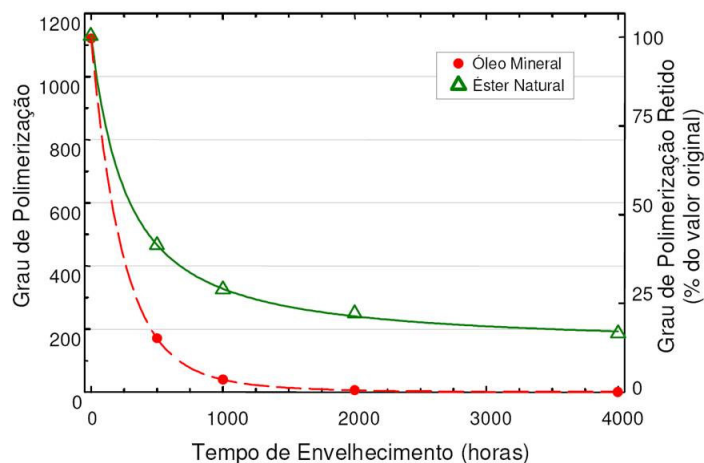


Figura 02: Comparación del envejecimiento del papel aislante con diferentes fluidos aislantes.

MONITOREO ON-LINE DEL TRANSFORMADOR RELLENADO CON ACEITE VEGETAL AISLANTE

Como la tecnología del aceite vegetal se encuentra aún en su fase experimental y de pruebas frente a los diversos esfuerzos eléctricos, termomecánicos y químicos, el monitoreo on-line fue considerado como de fundamental importancia para la evaluación de su desempeño en transformadores de potencia.

El sistema de monitoreo on-line efectúa también la recolección y el almacenamiento de datos para todas las variables monitoreadas, permitiendo que se desarrollen estudios posteriores, involucrando el análisis en una amplia gama de situaciones.

El transformador escogido para la instalación del sistema de monitoreo fue un transformador Tusa, reformado en 2007 por ABB, su llenado fue realizado con aceite vegetal aislante en el tanque principal y también en el conmutador bajo carga. En la tabla 01, se presentan algunos datos relativos a este transformador.

Tabla 01: Datos del transformador monitoreado

Tipo:	Transformador Trifásico Regulador
Tensión:	138 kV – 13,8 kV
Potencia:	25 MVA
Fabricante:	Tusa (Reformado por ABB en 2007)
Clase de Tensión:	138 kV
Año de Fabricación :	1977 (2007)
Volumen del aceite:	15.500 litros
Tipo de aceite:	Aceite vegetal aislante Biotemp, de fabricación ABB

ARQUITECTURA DEL SISTEMA DE MONITOREO ON-LINE

Tras la revisión de todas las necesidades y consulta de la literatura [4-8], se elaboró una especificación que las contemplase y que considerara lo último en sistemas de monitoreo on-line, guiando así la elección de los dispositivos y la arquitectura empleada.

ADQUISICIÓN ON-LINE DE LAS MEDICIONES

Para la medición de las variables en el transformador se escogió una arquitectura descentralizada, como lo ilustra la figura 03, donde se observan módulos especializados para cada medición deseada. Esta arquitectura presenta varias características interesantes, mostradas en la tabla 02.

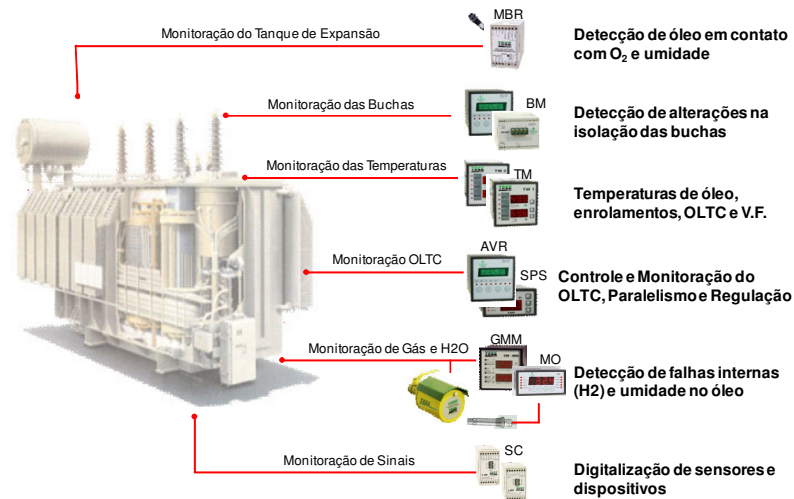


Figura 03: Arquitectura descentralizada del monitoreo on línea.

Tabla 02 : Principales características de la Arquitectura Descentralizada empleada

Los sensores son IED's (<i>Intelligent Electronic Devices</i>) que envían la información directamente al bloque de tratamiento de datos del sistema de monitoreo
Sistema modular, facilitando futuras expansiones y mantenimiento
Los IED's ya existentes en los sistemas de control y protección pueden ser integrados a los sistemas de monitoreo y adquisición de datos, evitando costos de sensores adicionales
No existe un elemento centralizador – se evitan costos adicionales
No existe un elemento centralizador – se evitan posibles puntos de falla adicionales
Falla en un IED acarrea solo la pérdida de parte de las funciones – los demás IED's permanecen en servicio
Temperatura de operación -40 a +85°C, adecuados para la instalación en el patio, junto al transformador
Instalación junto al transformador, en el patio – solo comunicación serial (par-trenzado, fibra óptica o modem celular GPRS) para interconexión con el bloque de tratamiento de datos del sistema de monitoreo
Nivel de aislamiento típico de 2,5kV – diseñado para el ambiente de subestaciones de alta tensión.

La siguiente tabla 03 especifica las mediciones efectuadas por cada uno de los sensores tipo IED, instalados en el transformador.

Tabla 03: Mediciones efectuadas por los sensores tipo IED

IED's	Datos Adquiridos
Monitor de Temperatura	- Temperatura del aceite - Temperaturas del punto más caliente de los devanados - Corriente de carga - Alarmas y desconexiones (disparos) por altas temperaturas
Monitor de Gas en el aceite	- Hidrógeno disuelto en el aceite del transformador - Alarmas por gas alto/muy alto - Temperatura del aceite en el punto de medición
Monitor de Humedad del Transformador	- Saturación relativa (%) de agua en el aceite del transformador - Cantidad de agua en el aceite del transformador (ppm) - Temperatura ambiente - Temperatura del aceite en el punto de medición
Monitor de humedad del Conmutador	- Saturación relativa (%) de agua en el aceite del conmutador bajo carga - Cantidad de agua en el aceite del conmutador bajo carga (ppm) - Temperatura del aceite en el punto de medición
Relé de Membrana	- Ruptura de la membrana del tanque conservador

Transductor de Tensión y Corriente	<ul style="list-style-type: none"> - Tensiones del motor del conmutador - Corrientes del motor del conmutador - Potencias activa/reactiva/aparente del motor del conmutador
Módulos de adquisición de datos	<ul style="list-style-type: none"> - Contactos de alarma (relé buchholz, válvula de alivio, niveles de aceite, etc.) - Estado de los grupos de ventilación forzada - Conmutador bajo carga en operación - Tiempo de operación del conmutador bajo carga
Monitor de Bushings	<ul style="list-style-type: none"> - Capacitancia de los bushings (pasatapas o bujes) - Tangente delta de los bushings (pasatapas o bujes)
Relé Regulador de Tensión	<ul style="list-style-type: none"> - Tensiones de fase - Corrientes de fase - Potencias activa/reactiva/aparente

TRANSMISIÓN REMOTA ON-LINE DE LAS MEDICIONES

Una vez instalados los sensores en el transformador, es necesario que las mediciones sean transferidas a un sistema de adquisición de datos, donde se efectuarán los cálculos y los algoritmos para obtenerse informaciones útiles, tales como los diagnósticos y pronósticos del estado del transformador. La arquitectura empleada para esa función se muestra en la figura 04.

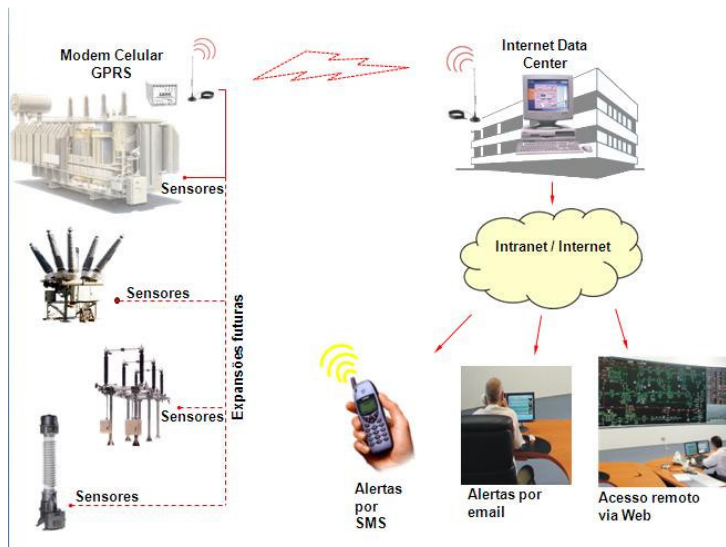


Figura 04: Arquitectura para transmisión de mediciones, tratamiento de datos y acceso remoto al sistema de monitoreo on-line.

Como se observa en la figura 04, los sensores en el transformador de potencia son interconectados entre si y con el modem celular GPRS en una red de comunicación serial. Las expansiones futuras del sistema de monitoreo, para incluir nuevos sensores en el transformador o nuevos equipos de la subestación (disyuntores, TC's, TP's, pararrayos, etc.) se pueden realizar fácilmente, simplemente se adicionan los nuevos sensores a la red de comunicación existente.

Enseguida, el modem transmite las mediciones de los sensores al software de monitoreo utilizando la red de telefonía celular, a través del protocolo de transmisión de datos GPRS (General Package Radio Services), el mismo utilizado, por ejemplo, para transacciones con tarjetas de crédito con terminales inalámbricos. La información se recibe en una computadora localizada en un IDC (Internet Data Center), descrito a continuación.

TRATAMIENTO DE DATOS PARA EL DIAGNÓSTICO Y PRONÓSTICOS

Los datos suministrados por los sensores IED's localizados en el transformador son recibidos por una computadora donde se corre el software de monitoreo Sigma4web de Treotech. En esta aplicación se optó por correr el software en una computadora localizada en un Internet Data Center (IDC) contratado y administrado por Treotech. El IDC es una empresa independiente, especializada en

almacenamiento y servicios de procesamiento de datos, que cuenta con toda la infraestructura necesaria para la confiabilidad y disponibilidad del sistema de monitoreo, incluyendo:

- Servidores con alta disponibilidad (24h x 7 días/semana);
- Contingencia para fallas de energía, con estabilizadores y grupos generadores de emergencia;
- Banda de acceso a Internet redundante, garantizando la disponibilidad de acceso al sistema;
- Backups diarios automáticos;
- Firewall;
- Protocolo https (sitio Web seguro), por medio del patrón SL (Secure Sockets Layer);
- Seguridad física, con rígido control de acceso.

Las siguientes, son las principales ganancias obtenidas con esa solución, en la cual el software de monitoreo *Sigma4web* es hospedado en un IDC, en vez que en las instalaciones de Cemig, considerando que el sistema de monitoreo es una herramienta para la ingeniería de mantenimiento:

- Garantía de actualización del software de monitoreo, dado que la ejecución del mismo en el IDC es administrada directamente por su fabricante;
- Garantía de actualización del hardware (servidores, etc.) a medida que crece el software de monitoreo, por ejemplo, con la inclusión de otros transformadores;
- Garantía de integridad de los datos, debido a los backups realizados de forma automática;
- Garantía de ejecución continua del software, sin riesgo de paradas por fallas de energía. Posibilidad (opcional) de servidores redundantes;
- Garantía de acceso a la información del monitoreo desde cualquier sitio, sea en las regionales de Cemig, que abarcan una gran área geográfica, sea fuera de la empresa – por ejemplo, durante viajes o fuera del horario comercial, en cualquier parte del mundo;
- Se evita la sobrecarga del equipo de IT interno de la empresa con el mantenimiento regular del sistema, lo que incluiría la ejecución de backups, supervisión de funcionamiento de estabilizadores, actualizaciones de software (sistema operacional, antivirus, software de monitoreo, etc.), administración de firewalls, etc.
- Se evitan gastos elevados en la adquisición, mantenimiento y actualización periódica de hardware y licencias de software.

FUNCIONES DEL SOFTWARE DE TRATAMIENTO DE DATOS SIGMA4WEB

Las principales funciones de este software se pueden agrupar en dos categorías, funciones de Digitalización de datos y funciones de Monitoreo:

- Funciones de Digitalización de datos:
 - Adquisición on-line de datos de los sensores
 - Presentación on-line de mediciones, alarmas y estados.
 - Almacenamiento de las mediciones, alarmas y estados en bancos de datos históricos.
 - Consulta de las mediciones, alarmas y estados almacenados en bancos históricos en forma de gráficos o tablas.
 - Envío automático de avisos o alarmas por e-mail o SMS.
- Funciones de Monitoreo:
 - Tratamiento de los datos a través de algoritmos
 - Tratamiento de los datos a través de modelos matemáticos
 - Obtención de diagnósticos del estado actual del transformador
 - Obtención de pronósticos del estado futuro del transformador
 - Detección de defectos, aún en fase incipiente.

Como se observa arriba, las funciones de Monitoreo tienen por objetivo transformar las mediciones de los sensores en informaciones útiles para el mantenimiento, que son los diagnósticos y pronósticos del

estado del equipo. Para ello, Sigma4web posee los denominados “Módulos de Ingeniería”, en los cuales se encuentran los algoritmos y modelos matemáticos para el diagnóstico y pronósticos.

Así como ocurre con los IED's utilizados para la adquisición de las mediciones, también las funciones de monitoreo (Módulo de Ingeniería) del sistema están organizadas de forma modular, permitiendo que se elijan libremente las funciones que se desea instalar, además de facilitar futuras expansiones simplemente agregando nuevos módulos de software y sus correspondientes IED's. Los Módulos de Ingeniería utilizados en la aplicación están descritos en la tabla 04 a continuación.

Tabla 04: Módulos de Tratamiento de datos para Monitoreo, Diagnóstico y Pronóstico

Módulos de Ingeniería	Funciones Monitoreadas
Sigma Ageing	<ul style="list-style-type: none"> • Pérdida de Vida Útil del Aislamiento • Tasa de pérdida de vida útil • Extrapolación del tiempo de vida restante, en años.
Sigma Forecast	<ul style="list-style-type: none"> • Previsión de Temperaturas Futuras • Previsión de ocurrencia de alarmas o desconexiones (disparos) • Cálculo del tiempo restante para alarmas y desconexiones (disparos)
Sigma Efficiency	<ul style="list-style-type: none"> • Eficiencia de los sistemas de refrigeración natural y forzado • Alarmas en caso de baja eficiencia de la refrigeración
Sigma Fan	<ul style="list-style-type: none"> • Horas de operación de los grupos de refrigeración forzada desde el inicio de la operación • Horas de operación de los grupos de refrigeración forzada desde el último mantenimiento • Promedio de horas de operación diaria de la refrigeración • Extrapolación del tiempo restante para inspección o mantenimiento • Avisos anticipados para inspección o mantenimiento.
Sigma Hydro	<ul style="list-style-type: none"> • Cantidad de agua en el aceite y en el Papel • Aceleración de la pérdida de vida útil del aislamiento por exceso de agua • Temperatura de Formación de Burbujas • Temperatura de Formación de Agua Libre • Alarmas por riesgo de formación de Burbujas o de agua libre
Sigma Chroma	<ul style="list-style-type: none"> • Medición on-line de hidrógeno disuelto en el aceite • Alarmas por cantidad de H2 alto, muy alto o tendencia de aumento • Banco de datos de análisis gas-cromatográficas off-line • Cálculo de las tasas de aumento de gases • Decisiones automáticas para los análisis gas-cromatográficas off-line
Sigma Torque	<ul style="list-style-type: none"> • Torque del motor del Conmutador bajo Carga
Sigma Simulation	<ul style="list-style-type: none"> • Simulación de carga basado en las condiciones de carga y temperatura actuales • Simulación de carga con curvas de carga y temperatura ambiente del usuario
Sigma Specialist	<p>Análisis de los avisos y alarmas emitidos por el sistema de monitoreo para indicación de:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Probables causas (diagnóstico) • Acciones recomendadas • Consecuencias futuras (pronóstico)

EXPERIENCIA CON EL SISTEMA DE MONITOREO ON-LINE

El montaje del sistema de monitoreo de gas y humedad fue efectuado durante la instalación del transformador en SE Pará de Minas 1, en diciembre de 2007 y enero de 2008. En la figura 05 se muestran algunas fotos de la instalación de éstos dispositivos.

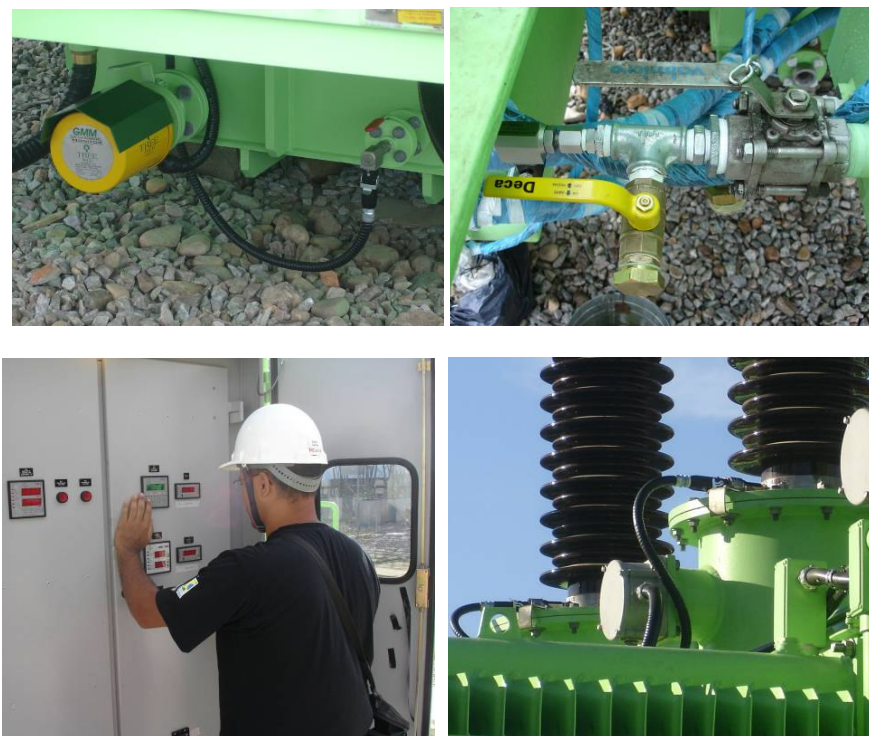


Figura 05 - Instalación de los sensores en el transformador

Inmediatamente después de la entrada en servicio del transformador, se comenzó a evaluar el desempeño del sistema. Enseguida se vió la necesidad de identificar las constantes reales de solubilidad del aceite utilizado, de forma que los sensores presentasen valores correspondientes con el aceite vegetal. A través de las mediciones almacenadas en el banco de datos del sistema de monitoreo y de los análisis físico-químicos y cromatográficos del aceite es posible identificar y valorar estas constantes de forma precisa y así calibrar los sensores. La tabla 05 muestra valores mostrados por el sistema de monitoreo después de la calibración con las constantes correctas. Estos valores fueron comparados con los análisis físico-químicos y cromatográficos realizados por el laboratorio de Cemig, presentando excelentes resultados, con errores menores que 2% del valor de referencia, mostrando así la eficacia y precisión del sistema.

Tabla 05: Valores presentados durante el monitoreo de H₂ y H₂O

	T ₀ °C	RS %	H ₂ O PPM	H ₂ PPM
Tanque	33,4	1,8	20	N/A
	42,9	2,0	27	18
Conmutador	29,0	7,5	86	N/A

CONCLUSIONES

La utilización del aceite vegetal como medio aislante y refrigerante en transformadores de potencia de alta tensión es reciente, si se la compara con el aceite mineral. Es por esto, que es necesario el seguimiento constante de su desempeño, tanto para prevenir posibles fallas como para conocer mejor su comportamiento a lo largo del tiempo, en situaciones reales de trabajo.

La utilización de un sistema de monitoreo on-line de alto desempeño y bajo costo atiende esta necesidad. Este sistema debe ser cuidadosamente especificado, para obtener realmente el desempeño deseado, factor muy importante, dado que el fluido aislante a ser monitoreado es el aceite vegetal.

La experiencia con el monitoreo de este transformador con aceite vegetal ha mostrado ser bastante promisoría, alcanzando los resultados esperados y principalmente, dando las herramientas para un mejor entendimiento del aceite vegetal y sus particularidades.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. Patrick McShane, Marcelo Neves Martins: Desarrollo y aplicación de fluido dieléctrico de base vegetal para transformadores de distribución y potencia. IV Conferencia Doble, Belo Horizonte, Brasil, agosto 2003.
- [2] D. A. Halleberg: Les-flammable liquids used in transformer. IEEE Ind. Applicat. Mag., pp 459-463, Jan/Feb 1999.
- [3] IEEE Standard test procedure for thermal evaluation of oil-immersed distribution transformers life test. ANSI/IEEE C57.100-1986, 1986.
- [4] R. Farquharson, GE HARRIS Energy Control Systems, "Technology Solutions for Improving the Performance Reliability of Substations and T&D Networks", 2001 Western Power Delivery Automation Conference, April 10-12, 2001, Spokane, Washington
- [5] Alves, M, "Sistema de monitoreo on-line de transformadores de potencia", Revista Eletricidade Moderna, mayo, 2004
- [6] Daniel C. P. Araújo, et al, "Sistemas de Monitoreo y Diagnóstico de Transformadores de Subestaciones", Décimo Segundo Encuentro Regional Iberoamericano del CIGRÉ, Foz do Iguaçu-Pr, Brasil - 20 a 24 de mayo de 2007
- [7] Daniel C. P. Araujo, Alvaro J. A. L. Martins y Neymard A. Silva "Las Ventajas de la Revitalización de Transformadores de Potencia Utilizando Repotenciación y aceite Vegetal", Anales del Seminario Brasileño de Sistemas Eléctricos, SBSE 2006, Campina Grande, Paraíba, Brasil, http://www.sbse2006.ufcg.edu.br/anales/132_sbse2006_final.pdf
- [8] Siemens, "Nuevos Conceptos en Sistemas de Energía de Alta Confiabilidad" Siemens Energia, Encarte Especial, Enero, 2001