XX SNPTEE
SEMINARIO NACIONAL
DE PRODUCCIÓN Y
TRANSMISIÓN DE
ENERGÍA ELÉCTRICA

Versión 2.0
22 a 25 Noviembre de 2009
Recife - PE

GRUPO DE ESTUDIO TRANSFORMADORES, REACTORES, MATERIALES Y TECNOLOGÍAS EMERGENTES GTM

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

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

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

Daniel C. P. Araújo
MCosta
Minas Gerais – Brasil

Marcos E. G. Alves
Treetech Sistemas Digitales
São Paulo - Brasil

RESUMEN

La sustitución de los aceites aislantes minerales por fluidos de origen vegetal en transformadores de potencia ha despertado un alto grado de interés en los últimos años. Eso se debe a diversos factores como el alto punto de inflamación, la alta solubilidad de agua, que puede permitir que el papel aislante si mantenga más seco, y la no toxicidad y biodegradabilidad, que lo hacen atractivo del punto de vista ambiental, entre otras características.
Por ese motivo, Cemig Distribuição ha incluido la utilización de transformadores con aceite vegetal como una de sus iniciativas estratégicas para la mejoría de sus indicadores de desempeño técnico y económico.
Dato que tales equipos desempeñan papeles esenciales en sistemas eléctricos de potencia, eventuales fallos pueden acarrear grandes perjuicios, no apenas por los daños en los equipos, pero también por pérdidas de ingresos, multas contractuales y disminución de la confiabilidad del sistema de potencia. En este contexto, el monitoreo en-línea del equipo tiene un papel fundamental para el diagnóstico de su estado, pudiendo en muchos casos detectar fallos aún en fase incipiente, además de apuntar las posibles causas. Con eso pueden si evitar daños mayores al equipo o mismo su pérdida total.
Este trabajo presentará las experiencias con el monitoreo en línea de ese equipo, incluyendo algunos aspectos específicos relativos al tipo de líquido aislante empleado.

PALABRAS Clave

Monitoreo En Línea, Aceite Vegetal, Arquitectura Descentralizada, Sistemas Expertos

1.0 - INTRODUCCIÓN

Los aceites vegetales son compuestos orgánicos a la 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 del que los aceites minerales basados en hidrocarburos de alto peso molecular (HMWH). Además, tiene excelente estabilidad térmica, buenas propiedades en altas temperaturas, punto de fluidez próximo al del aceite mineral convencional y rigidez dieléctrica y viscosidades similares a la formulación con éster natural. Sin embargo, presentan punto de combustión más bajo y tasa de biodegradación más lenta que el éster natural. Su alto costo, comparado a otros fluidos fuertes al fuego [2], generalmente limita su uso a subestaciones móviles, transformadores de tracción y otras aplicaciones especiales.
Ésteres naturales son aceites a la base de semillas, incluyendo los líquidos grasos, derivados del glicerol, conocidos como triglicéridos. Fueron considerados inadecuados para uso en transformadores debido a que su alta susceptibilidad a la oxidación. Con el aumento de la demanda por opciones viables al aceite mineral, las investigaciones se intensificaron y fueron evaluadas diversas mezclas de aceites. Al encontrar la mejor forma de equilibrarlos,

(*) Rua Babita Camargos, 568, Contagem, MG – Brasil
Tel: (+55 31) 3329-5251 – Email: macosta@cemig.com.br

se inició el perfeccionamiento de las características de oxidación y fluidez. Así se inició la selección de adictivos para mejoría de desempeño del fluido.
El éster natural posee viscosidad ligeramente superior al del aceite mineral, mayor resistencia al fuego y rigidez dieléctrica superior, tanto en el fluido nuevo cuanto después de múltiples operaciones de conmutación 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 amplia escala y con costo de producción reducido, estas semillas -- derivadas de fuentes naturales renovables, al contrario de los aceites minerales -- son utilizadas principalmente en géneros alimenticios. La formulación del aceite vegetal no presenta ninguna toxicidad al ser humano y tiene tiempo de degradación muy menor de lo que los aceites minerales. Además, los productos de su combustión completa solamente gas carbónico y agua. El fluido puede ser filtrado, reciclado y fácilmente desechable.

1.1 Características térmicas del aceite vegetal y mineral

A pesar de su viscosidad más alta, el desempeño térmico del éster natural puede ser comparado al del aceite mineral convencional. En el peor caso, la elevación media de la temperatura del bobinado de los transformadores separados a aceite vegetal es cerca de 5ºC superior [1] al del aceite de origen mineral. Sin embargo, en la figura 01, se verifica el alto punto de inflamación 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.

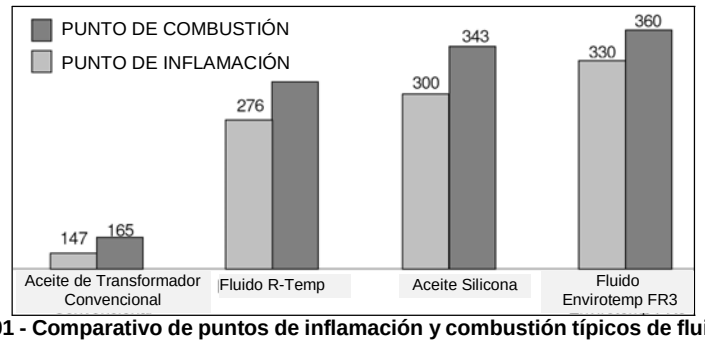

Figura 01 - Comparativo de puntos de inflamación y combustión típicos de fluidos aislantes

1.2 ENVEJECIMIENTO DEL PAPEL AISLANTE EN ACEITE VEGETAL

Una cuestión pertinente a la adopción del aceite vegetal en transformadores es la durabilidad del papel aislante, es decir, 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 del que en aceite mineral convencional. Los principales factores de degradación del papel kraft en transformadores son: temperatura (degradación termocinética) y cantidad de agua (degradación termo-hidrolítica).
En términos de saturaciones relativas, un punto de equilibrio debe ser obtenido entre el papel y el aceite aislante en funcionamiento normal. Ésteres naturales pueden acomodar una cantidad mayor de agua de lo que los aceites minerales, haciendo con que más agua sea desplazada del papel para el fluido. Esta es una de las características ventajosas de los ésteres naturales utilizados como aisladores, pues hay aumento significativo de la vida útil del papel.
La figura 02 muestra un ensayo comparativo de la tasa de envejecimiento del papel termoestabilizado con aceite mineral y con éster natural, siendo esta significativamente más lenta. Se estima que el papel termoestabilizado en un transformador a éster natural con elevación media de temperatura de 85ºC tenga la misma vida útil de un papel idéntico en un transformador a aceite mineral con elevación media de temperatura de 65ºC. En otras palabras, para una misma vida útil, el papel termoestabilizado impregnado con aceite vegetal puede operar una temperatura 20°C mayor que el papel con aceite mineral. La importancia de este resultado es enorme en el proyecto de nuevos transformadores o en la repotenciación de transformadores utilizados, una vez que el efecto de extensión de la vida útil del aislamiento representa inmediatamente menores costos de proyecto o aumento de la vida útil del equipo.

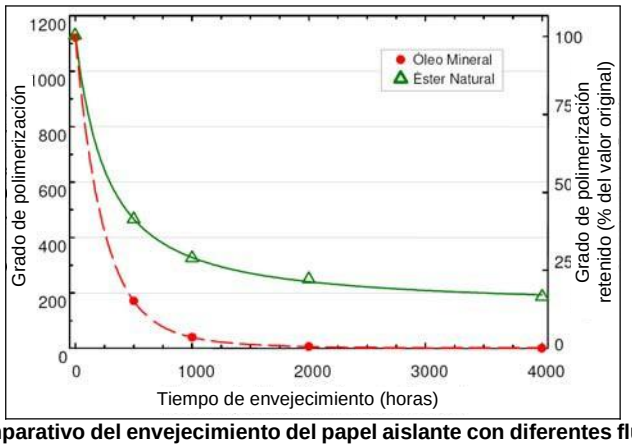

Figura 02: Comparativo del envejecimiento del papel aislante con diferentes fluidos aislante.

2.0 - MONITOREO EN LÍNEA DEL TRANSFORMADOR LLENADO CON ACEITE VEGETAL AISLANTE

Como la tecnología del aceite vegetal se encuentra aún en fase de experimentación y ensayos frente a los diversos esfuerzos eléctricos, termomecánicos y químicos, el monitoreo en línea fue considerada de fundamental importancia para la evaluación de su desempeño en transformadores de potencia.
El sistema de monitoreo en línea efectúa también la colecta y almacenamiento de todas las informaciones monitoreadas, permitiendo que sean desarrolladas estudios posteriores, englobando el análisis en una amplia gama de situaciones. El transformador elegido para la instalación del sistema de monitoreo fue un transformador Tusa, reformado en 2007 por la ABB, y llenado con aceite vegetal aislante en el tanque principal y también en la llave conmutadora. En la tabla 01, son presentados 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)
Tipo de Tensión:	138 kV
Año de Fabricación:	1977 (2007)
Volumen de Aceite:	15.500 litros
Tipo de Aceite:	Aceite vegetal aislante Biotemp, de fabricación ABB

3.0- ARQUITECTURA DEL SISTEMA DE MONITOREO EN LÍNEA

Después de la constatación de todas las necesidades y consulta de la literatura [4-8], se elaboró una especificación que las contemple y considere el estado del arte en sistemas de monitoreo en línea, guiando la elección de los dispositivos y de la arquitectura empleada.

3.1 ADQUISICIÓN en línea de mediciones

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

Tabla 02: Principales características de la Arquitectura Descentralizada empegada

Los sensores son IED's (Intelligent Electronic Devices) que envían las informaciones directamente al bloque de tratamiento de datos del sistema de monitoreo
Sistema modular, facilitando futuras expansiones y mantenimiento
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 los costos adicionales
No existe un elemento centralizador – se evitan posibles puntos de falla adicionales
Falla en un IED causa pérdida solo de parte de las funciones – demás IED's permanecen en servicio
Temperatura de operación -40 a +85ºC, adecuados para instalación en el patio, junto al transformador
Instalación junto al transformador, en el patio – apenas comunicación serial (par-tranzado, fibra óptica o modem celular GPRS) para interconexión con el bloque de tratamiento de datos del sistema de monitoreo
Nivel de aislamiento típico 2,5kV – proyectado para el ambiente de subestaciones de alta tensión.

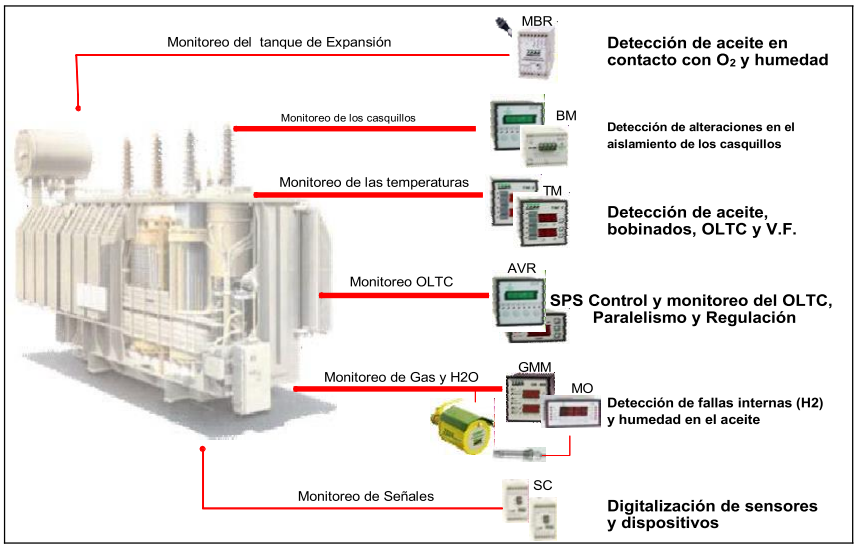

Figura 03: Diagrama de los sensores utilizados en el monitoreo.

La tabla 03 detalla las mediciones efectuadas por cada uno de los sensores del tipo IED instalados en el transformador.

Tabla 03: Mediciones efectuadas por los sensores tipo IED

IED's	Dados Adquisitivos
Monitor de Temperatura	- Temperatura del aceite - Temperaturas del punto más caliente de los bobinados - Corrientes de carga - Alarmas y desconexión por temperaturas altas
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 - Tenor 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 do conmutador bajo carga - Tenor de agua en el aceite del conmutador bajo carga (ppm) - Temperatura del aceite en el punto de medición
Relé de Membrana	- Ruptura de la bolsa del tanque conservador
Transductor de Tensión y Corriente	- Tensiones del motor del conmutador - Corrientes del motor del conmutador - Potencias activa/reactiva/aparente del motor do conmutador
Módulos de adquisición de datos	- 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 Casquillos	- Capacitancia de los casquillos - Tangente delta de los casquillos
Relé Regulador de Tensión	- Tensiones de fase - Corrientes de fase - Potencias activa/reactiva/aparente

4.0 - TRANSMISIÓN REMOTA EN LÍNEA DE MEDICIONES

Una vez instalados los sensores en el transformador, es necesaria que las mediciones sean transferidas a un sistema de tratamiento de datos, donde serán efectuados los cálculos y los algoritmos para lograrse informaciones útiles, tales como los diagnósticos y pronósticos de estado del transformador. La arquitectura criada para esa función es mostrada en la figura 04.

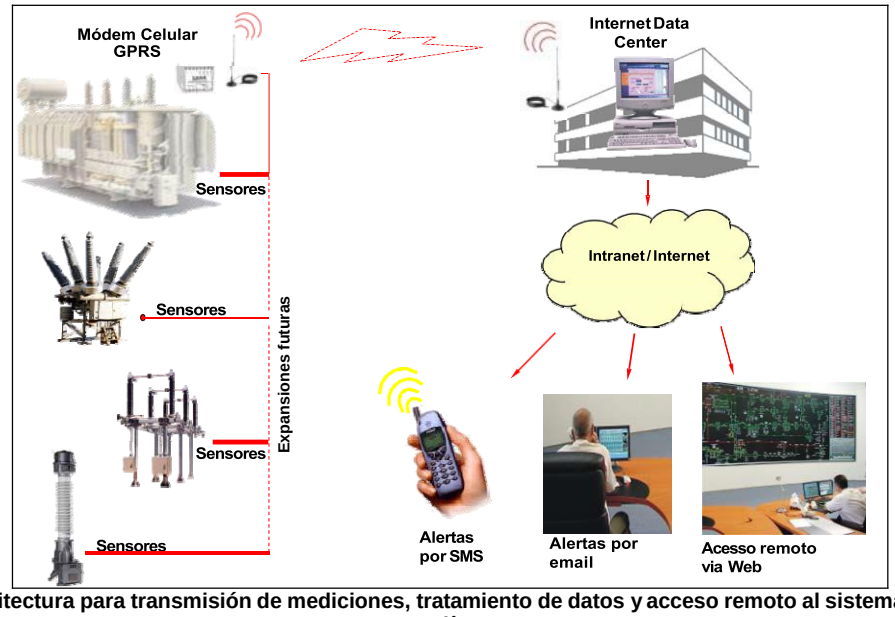

Figura 04: Arquitectura para transmisión de mediciones, tratamiento de datos y acceso remoto al sistema de monitoreo en línea.

Como se nota en la figura 04, los sensores en el transformador de potencia son interconectados entre sí y con el módem celular GPRS en una red de comunicación serial. Futuras expansiones del sistema de monitoreo, para inclusión de nuevos sensores en el transformador o de nuevos equipos de la subestación (disyuntores, TC's, TP's, pararrayos, etc.) pueden ser realizadas fácilmente, simplemente añadiendo los nuevos sensores en la red de comunicación.
Enseguida, el módem transmite las mediciones de los sensores para el software de monitoreo utilizando la red de telefonía celular, a través del protocolo de transmisión de dados GPRS (General Package Radio Services), que es el mismo utilizado, por ejemplo, para transacciones con tarjetas de crédito utilizando terminales inalámbrico. Las informaciones son recibidas en una computadora ubicada en un IDC (Internet Data Center), descrito a continuación.

5.0 - TRATAMIENTO DE DATOS PARA DIAGNÓSTICO Y PRONÓSTICO

Los datos suministrados por los sensores IED's ubicados en el transformador son recibidos por una computadora donde es ejecutado el software de monitoreo. En esta aplicación se optó por ejecutar el software en una computadora ubicada en Internet Data Center (IDC) contratado y administrado por la por el proveedor de la aplicación.
El IDC es una empresa independiente, especializada en almacenaje 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 x7 días/semana);
- Contingencia para falta de energía, con no-breaks y grupos generadores de emergencia;
- Banda de acceso a internet redundante, garantizando la disponibilidad del acceso al sistema;
- Backups diarios automáticos;
- Firewall;
- Protocolo https (sitio seguro), por medio del estándar SSL (Secure Sockets Layer);
- Seguridad física, con rígido control de acceso.

Las principales ganancias logradas con esa solución, en que el software de monitoreo es hospedado en un IDC al revés de en las instalaciones de Cemig, fueron los siguientes, considerando que el sistema de monitoreo es una herramienta para la ingeniería de mantenimiento:

- Garantía de actualización del software de monitoreo, una vez que la ejecución del mismo en IDC es administrada directamente por su fabricante;
- Garantía de actualización de los hardwares (servidores, etc.) en la medida del crecimiento del software de monitoreo, por ejemplo, con la inclusión de otros transformadores;
- Garantía de integridad de los dados, debido a los backups realizados de forma automática;
- Garantía de ejecución continúa del software, sin riesgo de paradas por falta de alimentación. Posibilidad (opcional) de servidores redundantes;
- Garantía de acceso a las informaciones del monitoreo desde cualquier localidad, 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 TI interno de la empresa con el mantenimiento regular del sistema, lo que incluiría la ejecución de backups, supervisión de funcionamiento de no-breaks, actualizaciones de softwares (sistema operativo, antivirus, software de monitoreo, etc.), administración de firewalls, etc.;
- Se evitan altas gastos con la adquisición, mantenimiento y actualización periódica de hardwares y permisos de software.

6.0 - FUNCIONES DEL SOFTWARE DE TRATAMIENTO DE DATOS SIGMA4WEB

Las principales funciones de este software pueden ser agrupadas en dos categorías, funciones de Digitalización de Datos y funciones de Monitoreo.
Funciones de Digitalización de datos:

- Adquisición en línea de datos dos sensores;
- Presentación en línea 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 diagnóstico del estado actual del transformador;
- Obtención de pronóstico del estado futuro del transformador;
- Detección de defectos aún en fase incipiente.

Como se nota anteriormente, 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 eso, Sigma4web tiene los denominados “Módulos de Ingeniería”, en el cual están los algoritmos y modelos matemáticos para diagnósticos y pronósticos.
Así como ocurre con los IED's utilizado para la adquisición de las mediciones, también las funciones de monitoreo (Módulo de Ingeniería) del sistema están organizadas de forma modular, permitiendo que se es libremente cuales las funciones 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	• Pérdida de Vida Útil del Aislamiento • Tasa de pérdida de vida útil • Extrapolación del tiempo de vida restante, en años.
Sigma Forecast	• Previsión de Temperaturas Futuras • Previsión de ocurrencia de alarmas o desconexiones • Cálculo del tiempo restante para alarmas y desconexiones
Sigma Efficiency	• Eficiencia de los sistemas de enfriamiento natural y forzado • Alarmes en caso de baja eficiencia del enfriamiento
Sigma Fan	• Horas de operación de los grupos de enfriamiento forzado desde el inicio da operación • Horas de operación de los grupos de enfriamiento forzado desde el último mantenimiento • Promedio de horas de operación diaria del enfriamiento • Extrapolación de tiempo restante para inspección o mantenimiento • Avisos con antecedencia para inspección o mantenimiento
Sigma Hydro	• Tenor de agua en el Aceite y en el Papel • Aceleración de la pérdida de vida 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	• Medición en línea de hidrógeno disuelto en el aceite • Alarmas por tenor de H2 alto, muy alto o tendencia de aumento

	• Banco de dados de análisis de las cromatográficas de gas off-line • Cálculo de las tasas de aumento de gases • Laudos automáticos para los análisis de las cromatográficas de gas off-line
Sigma Torque	• Torque del motor del Conmutador Sob Carga
Sigma Simulation	• Simulación de carga basada en las condiciones de carga y temperatura actuales • Simulación de carga con curvas de carga y temperatura ambiente del usuario
Sigma Specialist	Análisis de los avisos y alarmas emitidos por el sistema de monitoreo para indicación de: • Probables causas (diagnóstico) • Acciones recomendadas • Consecuencias futuras (pronóstico)

7.0 - EXPERIENCIA CON EL SISTEMA DE MONITOREO EN LÍNEA

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

Figura 05 - Instalación de los sensores en el transformador

Después de la entrada en servicio del transformador, el desempeño del sistema empezó a ser evaluado. Luego se constató la necesidad del levantamiento de las reales constantes de solubilidad del aceite utilizado, de forma que los sensores presentan valores conducentes 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 cromatográficas del aceite es posible levantar estas constantes de forma necesita y entonces calibrar los sensores. La tabla 05 muestra valores muestreados por el sistema de monitoreo después de la calibración con las constantes correctas. Estos valores fueron comparados con los análisis físico-químicos y cromatográficas realizadas por el laboratorio de Cemig y presentaron excelentes resultados, con errores menores que 2% del valor de referencia, mostrando la eficacia y precisión del sistema.

Tabla 05: Valores presentados durante el monitoreo de H_2 y H_2O

	T_0 °C	$RS_{\%}$	H_2O PPM	H_2 PPM
Tanque	33,4	1,8	20	N/A
	42,9	2,0	27	18
Conmutado	29,0	7,5	86	N/A

8.0 - CONCLUSIONES

La utilización del aceite vegetal como medio aislante y refrigerante en transformadores de potencia de alta tensión es reciente se comparada al aceite mineral. De esta forma es necesario el acompañamiento constante de su desempeño, tanto para precaver posibles fallos como para conocer mejor su comportamiento a lo largo del tiempo en situaciones reales de trabajo.
La utilización de un sistema de monitoreo en línea de alto desempeño y bajo costo viene al encuentro de esta necesidad. Este sistema debe ser cuidadosamente especificado de modo a realmente obtener el desempeño deseado, factor este muy importante, visto que el fluido aislante a ser monitoreado es lo aceite vegetal.
La experiencia con el monitoreo de este transformador con acepte vegetal se ha mostrado bastante promisoria, alcanzando los resultados esperados y principalmente, probando las herramientas para el mejor entendimiento del aceite vegetal y sus particularidades.

9.0 - BIBLIOGRAFÍA

[1] C. Patrick McShane, Marcelo Neves Martins: Desenvolvimento e aplicação de fluido dielétrico de base vegetal para transformadores de distribuição e potência. IV Conferência Double, Belo Horizonte, Brasil, agosto 2003.
[2] D. A. Halleberg: Less-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 potência", Revista Eletricidade Moderna, maio, 2004
[6] Daniel C. P. Araújo, et al, "Sistemas de Monitoramento e Diagnóstico de Transformadores de Subestações", Décimo Segundo Encontro Regional Ibero-americano do CIGRÉ, Foz do Iguaçu-Pr, Brasil - 20 a 24 de maio de 2007
[7] Daniel C. P. Araujo, Alvaro J. A. L. Martins e Neymard A. Silva "As Vantagens da Revitalização de Transformadores de Potência Utilizando Repotenciação e Aceite Vegetal", Anais do Seminário Brasileiro de Sistemas Elétricos, SBSE 2006, Campina Grande, Paraíba, Brasil, http://www.sbse2006.ufcg.edu.br/anais/132_sbse2006_final.pdf
[8] Siemens, "Novos Conceitos em Sistemas de Energia de Alta Confiabilidade" Siemens Energia, Encarte Especial, Janeiro, 2001