XX SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA

Versão 1.0
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

**GRUPO-XIII**

**GRUPO DE ESTUDO TRANSFORMADORES, REATORES, MATERIAIS E TECNOLOGIAS EMERGENTES**
**GTM**

# MONITORAÇÃO E DIAGNÓSTICO ON-LINE DE TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA COM ÓLEO 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 Digitais**
**São Paulo - Brasil**

RESUMO

A substituição dos óleos isolantes minerais por fluidos de origem vegetal em transformadores de potência tem despertado um alto grau de interesse nos últimos anos. Isso se deve a diversos fatores como o elevado ponto de fulgor, a alta solubilidade de água, que pode permitir que o papel isolante se mantenha mais seco, e a não-toxicidade e biodegradabilidade, que o tornam atrativo do ponto de vista ambiental, dentre outras características.
Por esse motivo, a Cemig Distribuição tem incluído a utilização de transformadores com óleo vegetal como uma de suas iniciativas estratégicas para a melhoria de seus indicadores de desempenho técnico e econômico.
Dado que tais equipamentos desempenham papéis essenciais em sistemas elétricos de potência, eventuais falhas podem acarretar grandes prejuízos, não apenas pelos danos nos equipamentos, mas também por perdas de receitas, multas contratuais e diminuição da confiabilidade do sistema de potência. Neste contexto, o monitoramento on-line do equipamento tem um papel fundamental para o diagnóstico de seu estado, podendo em muitos casos detectar falhas ainda em fase incipiente, além de apontar as possíveis causas. Com isso podem se evitar danos maiores ao equipamento ou mesmo sua perda total.
Este trabalho apresentará as experiências com a monitoração on-line desse equipamento, incluindo alguns aspectos específicos relativos ao tipo de líquido isolante empregado.

PALAVRAS-CHAVE

Monitoração On-Line, Óleo Vegetal, Arquitetura Descentralizada, Sistemas Especialistas

## 1.0 - INTRODUÇÃO

Os óleos vegetais são compostos orgânicos à base de ésteres, produtos agrícolas naturais ou sintetizados quimicamente por precursores orgânicos. Os fluidos dielétricos baseados em éster sintético, também conhecidos como POE, possuem boas características dielétricas [1] e são mais biodegradáveis do que os óleos minerais baseados em hidrocarbonetos de alto peso molecular (HMWH). Além disso, tem excelente estabilidade térmica, boas propriedades em altas temperaturas, ponto de fluidez próximo ao do óleo mineral convencional e rigidez dielétrica e viscosidades similares à formulação com éster natural. No entanto, apresentam ponto de combustão mais baixo e taxa de biodegradação mais lenta que o éster natural. Seu alto custo, comparado a outros fluidos resistentes ao fogo [2], geralmente limita seu uso a subestações móveis, transformadores de tração e outras aplicações especiais.
Ésteres naturais são óleos à base de sementes, incluindo os líquidos graxos, derivados do glicerol, conhecidos como triglicérides. Eles foram considerados inadequados para uso em transformadores devido a sua alta susceptibilidade à oxidação. Com o aumento da demanda por opções viáveis ao óleo mineral, as pesquisas intensificaram-se e foram avaliadas diversas misturas de óleos. Ao encontrar a melhor forma de equilibrá-los,

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

iniciou-se o aperfeiçoamento das características de oxidação e fluidez. Assim iniciou-se a seleção de aditivos para melhoria de desempenho do fluido.
O éster natural possui viscosidade ligeiramente superior à do óleo mineral, maior resistência ao fogo e rigidez dielétrica superior, tanto no fluido novo quanto após múltiplas operações de chaveamento sob carga. O aspecto negativo é seu ponto de fluidez relativamente alto.
Uma fonte atrativa de ésteres naturais são os óleos de sementes. Disponíveis em larga escala e com custo de produção reduzido, estas sementes — derivadas de fontes naturais renováveis, ao contrário dos óleos minerais — são utilizadas principalmente em gêneros alimentícios. A formulação do óleo vegetal não apresenta nenhuma toxidade ao ser humano e tem tempo de degradação muito menor do que os óleos minerais. Além disso, os produtos de sua combustão completa são somente gás carbônico e água. O fluido pode ser filtrado, reciclado e facilmente descartável.

## 1.1 Características térmicas do óleo vegetal e mineral

Apesar de sua viscosidade mais alta, o desempenho térmico do éster natural pode ser comparado ao do óleo mineral convencional. No pior caso, a elevação média da temperatura do enrolamento dos transformadores isolados a óleo vegetal é cerca de 5ºC superior [1] à do óleo de origem mineral. No entanto, na figura 01, verifica-se o alto ponto de fulgor e de combustão do óleo vegetal. Desta forma, é possível permitir o aumento da temperatura de operação do óleo isolante sem afetar a segurança do transformador.

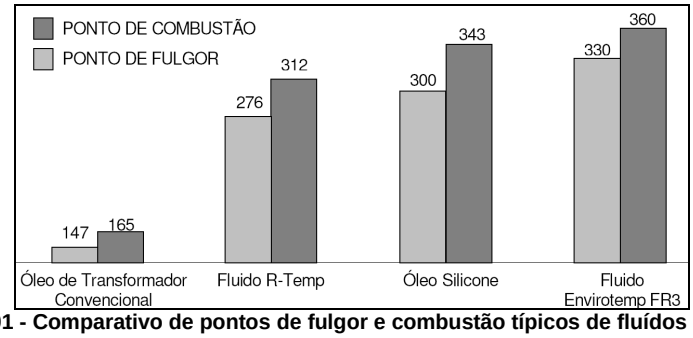


**Figura 01 - Comparativo de pontos de fulgor e combustão típicos de fluídos isolantes**

## 1.2 ENVELHECIMENTO DO PAPEL ISOLANTE EM ÓLEO VEGETAL

Uma questão pertinente à adoção do óleo vegetal em transformadores é a durabilidade do papel isolante, ou seja, a forma como o novo fluído isolante afeta a vida útil da isolação sólida. Estudos publicados [1-3] demonstram que, sob as mesmas condições, o envelhecimento do papel kraft em óleo vegetal é muito mais lento do que em óleo mineral convencional. Os principais fatores de degradação do papel kraft em transformadores são: temperatura (degradação termocinética) e quantidade de água (degradação termo-hidrolítica).
Em termos de saturações relativas, um ponto de equilíbrio deve ser obtido entre o papel e o óleo isolante em funcionamento normal. Ésteres naturais podem acomodar uma quantidade maior de água do que os óleos minerais, fazendo com que mais água seja deslocada do papel para o fluido. Esta é uma das características vantajosas dos ésteres naturais utilizados como isolantes, pois há aumento significativo da vida útil do papel.
A figura 02 mostra um teste comparativo da taxa de envelhecimento do papel termoestabilizado com óleo mineral e com éster natural, sendo esta significativamente mais lenta. Estima-se que o papel termoestabilizado em um transformador a éster natural com elevação média de temperatura de 85ºC tenha a mesma vida útil de um papel idêntico num transformador a óleo mineral com elevação média de temperatura de 65ºC. Em outras palavras, para uma mesma vida útil, o papel termoestabilizado impregnado com óleo vegetal pode operar a uma temperatura 20℃ maior que o papel com óleo mineral. A importância deste resultado é enorme no projeto de novos transformadores ou na repotenciação de transformadores usados, uma vez que o efeito de extensão da vida útil da isolação representa imediatamente menores custos de projeto ou aumento da vida útil do equipamento.

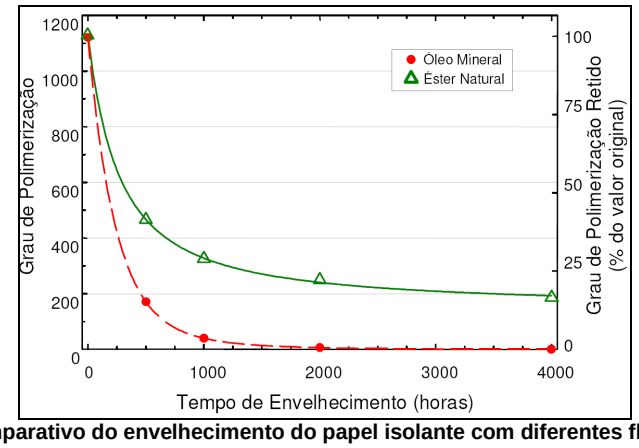


**Figura 02: Comparativo do envelhecimento do papel isolante com diferentes fluidos isolantes.**

## 2.0 - MONITORAÇÃO ON-LINE DO TRANSFORMADOR PREENCHIDO COM ÓLEO VEGETAL ISOLANTE

Como a tecnologia do óleo vegetal se encontra ainda em fase de experimentação e testes frente aos diversos esforços elétricos, termomecânicos e químicos, a monitoração on-line foi considerada de fundamental importância para a avaliação de seu desempenho em transformadores de potência.
O sistema de monitoração on-line efetua também a coleta e armazenamento de todas as informações monitoradas, permitindo que sejam desenvolvidos estudos posteriores, englobando a análise em uma ampla gama de situações.
O transformador escolhido para a instalação do sistema de monitoração foi um transformador Tusa, reformado em 2007 pela ABB, e preenchido com óleo vegetal isolante no tanque principal e também na chave comutadora. Na tabela 01, são apresentados alguns dados relativos a este transformador.

**Tabela 01: Dados do transformador monitorado**

| | |
|---|---|
| Tipo: | Transformador Trifásico Regulador |
| Tensão: | 138 kV – 13,8 kV |
| Potência: | 25 MVA |
| Fabricante: | Tusa (Reformado pela ABB em 2007) |
| Classe de Tensão: | 138 kV |
| Ano de Fabricação: | 1977 (2007) |
| Volume do Óleo: | 15.500 litros |
| Tipo de Óleo: | Óleo vegetal isolante Biotemp, de fabricação ABB |

## 3.0 - ARQUITETURA DO SISTEMA DE MONITORAÇÃO ON-LINE

Após a constatação de todas as necessidades e consulta da literatura [4-8], elaborou-se uma especificação que as contemplasse e considerasse o estado da arte em sistemas de monitoração on-line, guiando a escolha dos dispositivos e da arquitetura empregada.

### 3.1 AQUISIÇÃO on-line de medições

Para a medição das variáveis no transformador foi escolhida uma arquitetura descentralizada, como ilustra a figura 03, onde se observam módulos especializados para cada medição desejada. Essa arquitetura apresenta várias características interessantes, mostradas na tabela 02.

**Tabela 02: Principais características da Arquitetura Descentralizada empregada**

| |
|---|
| Os sensores são IED's (Intelligent Electronic Devices) que enviam as informações diretamente ao bloco de tratamento de dados do sistema de monitoração |
| Sistema modular, facilitando futuras expansões e manutenção |
| IED's já existentes nos sistemas de controle e proteção podem ser integrados aos sistemas de monitoração e aquisição de dados, evitando custos de sensores adicionais |
| Não existe um elemento centralizador – evitam-se custos adicionais |
| Não existe um elemento centralizador – evitam-se possíveis pontos de falha adicionais |
| Falha em um IED acarreta perda apenas de parte das funções – demais IED's permanecem em serviço |
| Temperatura de operação -40 a +85ºC, adequados para instalação no pátio, junto ao transformador |
| Instalação junto ao transformador, no pátio – apenas comunicação serial (par-trançado, fibra ótica ou modem celular GPRS) para interligação com o bloco de tratamento de dados do sistema de monitoração |
| Nível de isolação típico 2,5kV – projetado para o ambiente de subestações de alta tensão. |

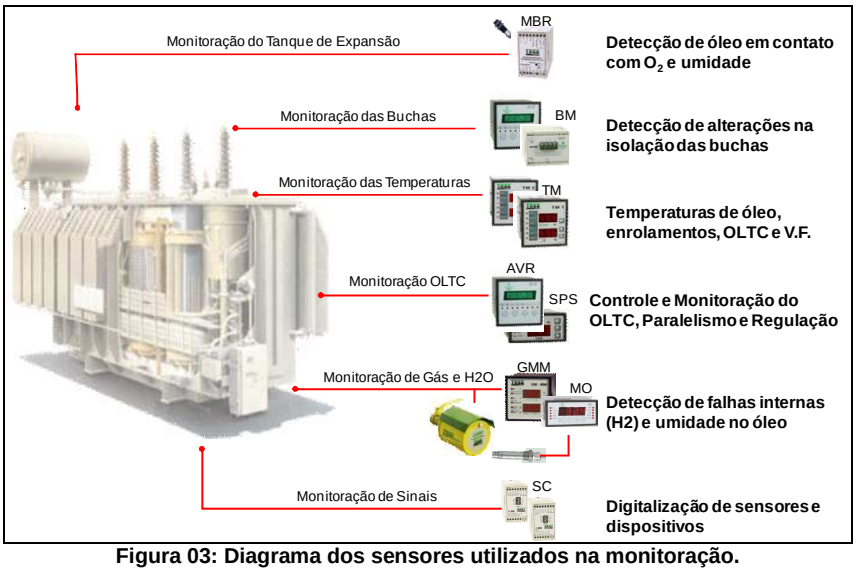


**Figura 03: Diagrama dos sensores utilizados na monitoração.**

A tabela 03 detalha as medições efetuadas por cada um dos sensores do tipo IED instalados no transformador.

**Tabela 03: Medições efetuadas pelos sensores tipo IED**

| IED's | Dados Aquisitados |
|---|---|
| **Monitor de Temperatura** | - Temperatura do óleo<br>- Temperaturas do ponto mais quente dos enrolamentos<br>- Correntes de carga<br>- Alarmes e desligamentos por temperaturas altas |
| **Monitor de Gás no óleo** | - Hidrogênio dissolvido no óleo do transformador<br>- Alarmes por gás alto/muito alto<br>- Temperatura do óleo no ponto de medição |
| **Monitor de Umidade do Transformador** | - Saturação relativa (%) de água no óleo do transformador<br>- Teor de água no óleo do transformador (ppm)<br>- Temperatura ambiente<br>- Temperatura do óleo no ponto de medição |
| **Monitor de Umidade do Comutador** | - Saturação relativa (%) de água no óleo do comutador sob carga<br>- Teor de água no óleo do comutador sob carga (ppm)<br>- Temperatura do óleo no ponto de medição |
| **Relé de Membrana** | - Ruptura da bolsa do tanque conservador |
| **Transdutor de Tensão e Corrente** | - Tensões do motor do comutador<br>- Correntes do motor do comutador<br>- Potências ativa/reativa/aparente do motor do comutador |
| **Módulos de aquisição de dados** | - Contatos de alarme (relé buchholz, válvula de alívio, níveis de óleo, etc.)<br>- Estado dos grupos de ventilação forçada<br>- Comutador sob carga em operação<br>- Tempo de operação do comutador sob carga |
| **Monitor de Buchas** | - Capacitância das buchas<br>- Tangente delta das buchas |
| **Relé Regulador de Tensão** | - Tensões de fase<br>- Correntes de fase<br>- Potências ativa/reativa/aparente |

## 4.0 - TRANSMISSÃO REMOTA ON-LINE DE MEDIÇÕES

Uma vez instalados os sensores no transformador, é necessário que as medições sejam transferidas a um sistema de tratamento de dados, onde serão efetuados os cálculos e os algoritmos para se obterem informações úteis, tais como os diagnósticos e prognósticos de estado do transformador. A arquitetura empregada para essa função é mostrada na figura 04.

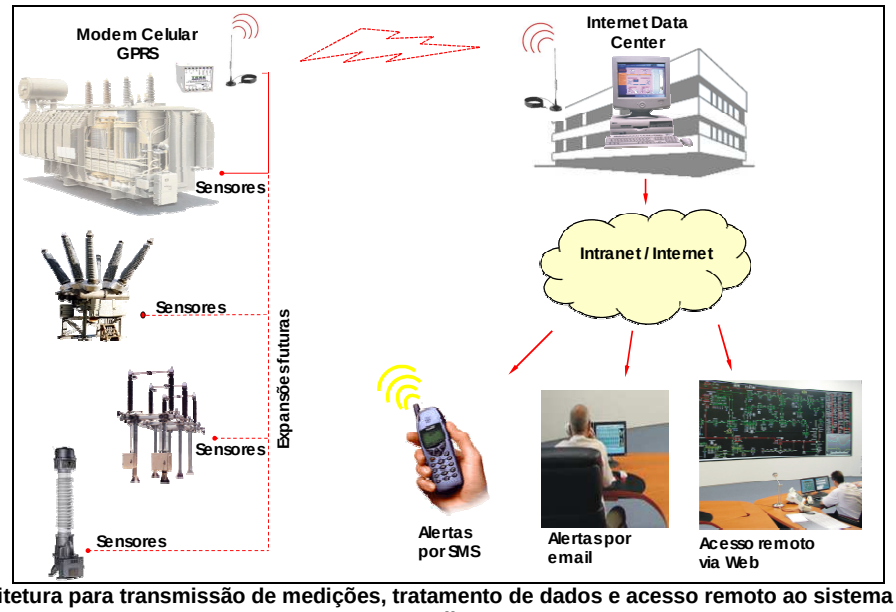


**Figura 04: Arquitetura para transmissão de medições, tratamento de dados e acesso remoto ao sistema de monitoração on-line.**

Como se observa na figura 04, os sensores no transformador de potência são interligados entre si e com o modem celular GPRS em uma rede de comunicação serial. Futuras expansões do sistema de monitoração, para inclusão de novos sensores no transformador ou de novos equipamentos da subestação (disjuntores, TC's, TP's, pára-raios, etc.) podem ser realizadas facilmente, simplesmente acrescentando os novos sensores na rede de comunicação.
Em seguida, o modem transmite as medições dos sensores para o software de monitoração utilizando a rede de telefonia celular, através do protocolo de transmissão de dados GPRS (General Package Radio Services), que é o mesmo utilizado, por exemplo, para transações com cartões de crédito utilizando terminais sem fio. As informações são recebidas em um computador localizado em um IDC (Internet Data Center), descrito a seguir.

## 5.0 - TRATAMENTO DE DADOS PARA DIAGNÓSTICO E PROGNÓSTICO

Os dados fornecidos pelos sensores IED's localizados no transformador são recebidos por um computador onde é executado o software de monitoração. Nesta aplicação optou-se por executar o software em um computador localizado em um Internet Data Center (IDC) contratado e administrado pela pelo fornecedor da aplicação.
O IDC é uma empresa independente, especializada em armazenagem e serviços de processamento de dados, que conta com toda a infra-estrutura necessária para a confiabilidade e disponibilidade do sistema de monitoração, incluindo:

- Servidores com alta disponibilidade (24h x 7 dias/semana);
- Contingência para falta de energia, com no-breaks e grupos geradores de emergência;
- Banda de acesso à internet redundante, garantindo a disponibilidade de acesso ao sistema;
- Backups diários automáticos;
- Firewall;
- Protocolo https (site seguro), por meio do padrão SSL (Secure Sockets Layer);
- Segurança física, com rígido controle de acesso.

Os principais ganhos obtidos com essa solução, em que o software de monitoração é hospedado em um IDC ao invés de nas instalações da Cemig, foram os seguintes, considerando que o sistema de monitoração é uma ferramenta para a engenharia de manutenção:

- Garantia de atualização do software de monitoração, uma vez que a execução do mesmo no IDC é administrada diretamente pelo seu fabricante;
- Garantia de atualização dos hardwares (servidores, etc.) na medida do crescimento do software de monitoração, por exemplo, com a inclusão de outros transformadores;
- Garantia de integridade dos dados, devido aos backups realizados de forma automática;
- Garantia de execução contínua do software, sem risco de paradas por falta de alimentação. Possibilidade (opcional) de servidores redundantes;
- Garantia de acesso às informações da monitoração desde qualquer localidade, seja nas regionais da Cemig, que abrangem uma grande área geográfica, seja fora da empresa – por exemplo, durante viagens ou fora do horário comercial, em qualquer parte do mundo;

- Evita-se a sobrecarga da equipe de TI interna da empresa com a manutenção regular do sistema, o que incluiria a execução de backups, supervisão de funcionamento de no-breaks, atualizações de softwares (sistema operacional, antivírus, software de monitoração, etc.), administração de firewalls, etc.;
- Evitam-se gastos elevados com a aquisição, manutenção e atualização periódica de hardwares e licenças de software.

## 6.0 - FUNÇÕES DO SOFTWARE DE TRATAMENTO DE DADOS SIGMA4WEB

As principais funções deste software podem ser agrupadas em duas categorias, funções de Digitalização de Dados e funções de Monitoração.
Funções de Digitalização de dados:

- Aquisição on-line de dados dos sensores;
- Apresentação on-line de medições, alarmes e estados;
- Armazenamento das medições, alarmes e estados em bancos de dados históricos;
- Consulta das medições, alarmes e estados armazenados em bancos históricos em forma de gráficos ou tabelas;
- Envio automático de avisos ou alarmes por e-mail ou SMS.

Funções de Monitoração:

- Tratamento dos dados através de algoritmos;
- Tratamento dos dados através de modelos matemáticos;
- Obtenção de diagnóstico do estado atual do transformador;
- Obtenção de prognóstico do estado futuro do transformador;
- Detecção de defeitos ainda em fase incipiente.

Como se observa acima, as funções de Monitoração têm por objetivo transformar as medições dos sensores em informações úteis para a manutenção, que são os diagnósticos e prognósticos do estado do equipamento. Para isso, o Sigma4web possui os denominados “Módulos de Engenharia”, no qual estão os algoritmos e modelos matemáticos para diagnósticos e prognósticos.
Assim como ocorre com os IED's utilizado para a aquisição das medições, também as funções de monitoração (Módulo de Engenharia) do sistema estão organizadas de forma modular, permitindo que se escolham livremente quais as funções se deseja instalar, além de facilitar futuras expansões simplesmente agregando novos módulos de software e seus correspondentes IED's. Os Módulos de Engenharia utilizados na aplicação estão descritos na tabela 04 a seguir.

**Tabela 04: Módulos de Tratamento de Dados para Monitoração, Diagnóstico e Prognóstico**

| Módulos de Engenharia | Funções Monitoradas |
|---|---|
| **Sigma Ageing** | • Perda de Vida Útil da Isolação<br>• Taxa de perda de vida útil<br>• Extrapolação do tempo de vida restante, em anos. |
| **Sigma Forecast** | • Previsão de Temperaturas Futuras<br>• Previsão de ocorrência de alarmes ou desligamentos<br>• Cálculo do tempo restante para alarmes e desligamentos. |
| **Sigma Efficiency** | • Eficiência dos sistemas de resfriamento natural e forçado<br>• Alarmes em caso de baixa eficiência do resfriamento |
| **Sigma Fan** | • Horas de operação dos grupos de resfriamento forçado desde o início da operação<br>• Horas de operação dos grupos de resfriamento forçado desde a última manutenção<br>• Média de horas de operação diária do resfriamento<br>• Extrapolação de tempo restante para inspeção ou manutenção<br>• Avisos com antecedência para inspeção ou manutenção. |
| **Sigma Hydro** | • Teor de água no Óleo e no Papel<br>• Aceleração da perda de vida da isolação por excesso de água<br>• Temperatura de Formação de Bolhas<br>• Temperatura de Formação de Água Livre<br>• Alarmes por risco de formação de bolhas ou de água livre |
| **Sigma Chroma** | • Medição on-line de hidrogênio dissolvido no óleo<br>• Alarmes por teor de H2 alto, muito alto ou tendência de aumento |

| | |
|---|---|
| | • Banco de dados de análises gás-cromatográficas off-line<br>• Cálculo das taxas de aumento de gases<br>• Laudos automáticos para as análises gás-cromatográficas off-line |
| **Sigma Torque** | • Torque do motor do Comutador Sob Carga |
| **Sigma Simulation** | • Simulação de carregamento baseada nas condições de carga e temperatura atuais<br>• Simulação de carregamento com curvas de carga e temperatura ambiente do usuário |
| **Sigma Specialist** | Análise dos avisos e alarmes emitidos pelo sistema de monitoração para indicação de:<br>• Prováveis causas (diagnóstico)<br>• Ações recomendadas<br>• Conseqüências futuras (prognóstico) |

## 7.0 - EXPERIÊNCIA COM O SISTEMA DE MONITORAÇÃO ON-LINE

A montagem do sistema de monitoração de gás e umidade foi feita durante a instalação do transformador na SE Pará de Minas 1, em dezembro de 2007 e janeiro de 2008. Na figura 05 estão algumas fotos da instalação dos dispositivos.

**Figura 05 - Instalação dos sensores no transformador**

Logo após a entrada em serviço do transformador, o desempenho do sistema começou a ser avaliado. Logo se constatou a necessidade do levantamento das reais constantes de solubilidade do óleo utilizado, de forma que os sensores apresentassem valores condizentes com o óleo vegetal. Através das medições armazenadas no banco de dados do sistema de monitoração e das análises físico-químicas e cromatográficas do óleo é possível levantar estas constantes de forma precisa e então calibrar os sensores. A tabela 05 mostra valores amostrados pelo sistema de monitoração após a calibração com as constantes corretas. Estes valores foram comparados com as análises físico-químicas e cromatográficas realizadas pelo laboratório da Cemig e apresentaram excelentes resultados, com erros menores que 2% do valor de referência, mostrando a eficácia e precisão do sistema.

**Tabela 05: Valores apresentados durante a monitoração de $H_2$ e $H_2O$**

| | $T_0$ ℃ | RS% | $H_2O$ PPM | $H_2$ PPM |
|---|---|---|---|---|
| **Tanque** | 33,4 | 1,8 | 20 | N/A |
| | 42,9 | 2,0 | 27 | 18 |
| **Comutador** | 29,0 | 7,5 | 86 | N/A |

## 8.0 - CONCLUSÕES

A utilização do óleo vegetal como meio isolante e refrigerante em transformadores de potência de alta tensão é recente se comparada ao óleo mineral. Desta forma é necessário o acompanhamento constante de seu desempenho, tanto para prevenir possíveis falhas como para conhecer melhor seu comportamento ao longo do tempo em situações reais de trabalho.
A utilização de um sistema de monitoramento on-line de alto desempenho e baixo custo vem ao encontro desta necessidade. Este sistema deve ser cuidadosamente especificado de modo à realmente obter o desempenho desejado, fator este muito importante, visto que o fluido isolante a ser monitorado é o óleo vegetal.
A experiência com a monitoração deste transformador com óleo vegetal tem se mostrado bastante promissora, atingindo os resultados esperados e principalmente, provendo as ferramentas para o melhor entendimento do óleo vegetal e suas particularidades.

## 9.0 - BIBLIOGRAFIA

[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 monitoração 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 Óleo 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