



GRUPO XIII

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

MONITORAÇÃO ON-LINE DE TRANSFORMADOR REGULADOR DA ITAIPIU BINACIONAL

Eduardo Velázquez C.*

Nora Díaz Mora

Marcos E. G. Alves

ITAIPIU BINACIONAL

UNIOESTE/PTI

TREETECH SISTEMAS DIGITAIS LTDA.

RESUMO

A importância dos transformadores da Subestação da Margem Direita - SEMD da Usina Hidrelétrica da Itaipu - UHI para o fornecimento de energia elétrica ao Paraguai motivou a instalação de um projeto piloto de monitoração on-line em Novembro de 2006, que incluiu a monitoração dos transformadores reguladores R1 e R4 e de três Transformadores de Corrente (TC) de pedestal da linha de transmissão de 500kV-50Hz L-9 Itaipu-Furnas. Este trabalho apresenta as funções de monitoração aplicadas a cada equipamento, assim como a arquitetura utilizada, as soluções empregadas na instalação e os resultados obtidos.

PALAVRAS-CHAVE

Transformadores, Buchas, Monitoração on-line, Diagnóstico, Prognóstico.

1.0 - INTRODUÇÃO

A Itaipu é um empreendimento binacional desenvolvido pelo Brasil e Paraguai no Rio Paraná. A potência instalada da Usina Hidrelétrica de Itaipu – UHI, é de 14.000 MW, com 20 unidades geradoras de 700 MW cada, sendo dez delas em 50 Hz e dez em 60 Hz. O sistema de transmissão de 500 kV a partir da Subestação Isolada a Gás (GIS) interliga a Subestação Conversora de FURNAS em Foz de Iguaçu (Brasil), em 60 Hz, e a Subestação da Margem Direita (SEMD), em 50 Hz, sendo esta última a responsável pelo suprimento de aproximadamente 90% da energia consumida pelo Paraguai.

A SEMD conta com quatro Autotransformadores trifásicos de 550/245kV-375MVA (T1, T2, T3, e T4) e quatro Transformadores Reguladores trifásicos de 245/245kV-375MVA (R1, R2, R3 e R4). As condições de trabalho a que estão submetidos estes transformadores, como as elevadas temperaturas ambientes, solicitações dielétricas normais da operação e elevados carregamentos, especialmente nas horas de pico, podem ocasionar falhas incipientes que se não forem detectadas em tempo hábil, irão ocasionar a perda de uma grande capacidade de transformação de energia, acarretando graves conseqüências, devido a sua importância energética/operacional, inclusive ocasionar problemas de estabilidade do sistema interligado do setor elétrico paraguaio. Visto que a parte ativa destes transformadores está imersa em grandes volumes de óleo isolante (de 70.000 a 80.000 litros), falhas desta natureza são freqüentemente acompanhadas de explosões, incêndios e vazamentos de óleo, arriscando a integridade das pessoas e o meio ambiente, além de provocar severas e incalculáveis conseqüências aos demais equipamentos da SEMD. Além dos prejuízos na qualidade de energia, estão envolvidos elevados custos na recuperação, reparo em fábrica ou compra de novos equipamentos, além dos prejuízos econômicos que demandam a retomada da condição operativa normal até a reposição total do fornecimento de energia.

Nesse sentido e dada a grande importância desses transformadores para o sistema elétrico do Paraguai, foi implementado pela empresa Treetech Sistemas Digitais Ltda., um projeto piloto de monitoramento on-line dos parâmetros mais importantes do Transformador Regulador R1, com a finalidade de avaliar o desempenho do mesmo na detecção das falhas em fase incipiente, o que nem sempre é possível apenas com a manutenção preventiva, com os métodos elétricos e químicos convencionais.

Neste trabalho são detalhadas as funções de monitoração aplicadas a cada equipamento, assim como a arquitetura utilizada, as soluções adotadas na instalação e os resultados obtidos.

(*) Av. Tancredo Neves, 6731 – Foz do Iguaçu – PR – CEP 85866-900 – Brasil – evc@itaipu.gov.py

2.0 - MONITORAÇÃO ON-LINE DOS TRANSFORMADORES REGULADORES R1 E R4

A implantação do projeto piloto de monitoramento on-line dos transformadores da SEMD teve início com a monitoração dos principais parâmetros do Transformador Regulador R1 (Figura 1), seguida de uma expansão do sistema para a monitoração de gases dissolvidos no óleo do Regulador R4. Para o desenvolvimento do projeto e implantação do sistema de monitoramento foi fundamental levar em consideração a experiência acumulada do pessoal da Itaipu na manutenção desses equipamentos, bem como para a determinação dos subsistemas do transformador que apresentam os maiores impactos para a operação em caso de falhas.



FIGURA 1 – Transformador regulador R1

2.1 Subsistema Buchas – Monitoração de Capacitância e Tangente Delta

A grande importância das buchas deriva da própria função que desempenham, visto que devem ser capazes de transportar a corrente dos transformadores em regime normal e de sobre carregamento, manter o isolamento, seja para a tensão nominal ou sobre tensões e ao mesmo tempo resistir aos esforços mecânicos solicitados [1], visto que as mesmas são empregadas para a passagem do condutor de alta tensão a través de uma superfície aterrada, como neste caso o tanque principal do transformador

As falhas das buchas estão diretamente relacionadas com o desempenho dos materiais como apontado por Velázquez e Díaz Mora [1]. Estes autores discutem sobre as falhas mais comuns nas buchas, as causas, conseqüências e os parâmetros para sua detecção, assim com a relação direta entre as falhas e a degradação sofrida pelos materiais utilizados na fabricação desses equipamentos, sejam eles poliméricos, cerâmicos ou metálicos.

Durante a operação normal de um transformador, diversos fenômenos externos podem dar origem a sobretensões transitórias, tais como surtos de manobra e impulsos atmosféricos, e as buchas devido à função de interface que desempenham são, naturalmente, as primeiras a sofrer essas solicitações em seu dielétrico. Este fato, associado às tensões normais de operação a que são submetidas permanentemente, faz com que as buchas sejam apontadas nas estatísticas como um dos principais pontos de falha em transformadores de potência. Nesse sentido, uma pesquisa internacional realizada pelo Comitê 12 do Cigré em 1983 revelou que do total dos desligamentos forçados e programados em transformadores equipados com comutador sob carga em subestações, um índice de 12,3% pode ser atribuído às buchas [2].

Por outro lado, a falha de uma bucha é uma situação de extremo risco para a integridade física das pessoas e outros equipamentos adjacentes, além de causar danos graves ao transformador onde está instalada, chegando à perda total do mesmo em casos extremos.

Por esses motivos, a monitoração on-line de estado das buchas foi um dos subsistemas selecionados para os transformadores reguladores da SEMD. Uma vez que as buchas de alta tensão têm construção do tipo capacitiva, com diversas camadas isolantes intercaladas por camadas condutoras, como mostrado na Figura 2, a medição on-line de alterações na capacitância e na tangente delta da isolação fase-terra permite a detecção da grande maioria dos defeitos ainda em fase incipiente [3].

Os transformadores reguladores da SEMD apresentam uma característica especial, visto que no lado Carga, existem os Dispositivos de Potencial de Bucha (DPBs), que estão conectados aos taps das buchas. Neste caso é efetuada apenas a monitoração das capacitâncias, uma vez que a tangente delta é bastante sensível às imprecisões introduzidas pelos circuitos internos dos DPBs. Para essas aplicações, o fabricante (Tretech) desenvolveu uma solução especialmente adaptado para monitoração das capacitâncias das buchas, na qual, são utilizadas as saídas dos DPBs, com tensão nominal de 115V.

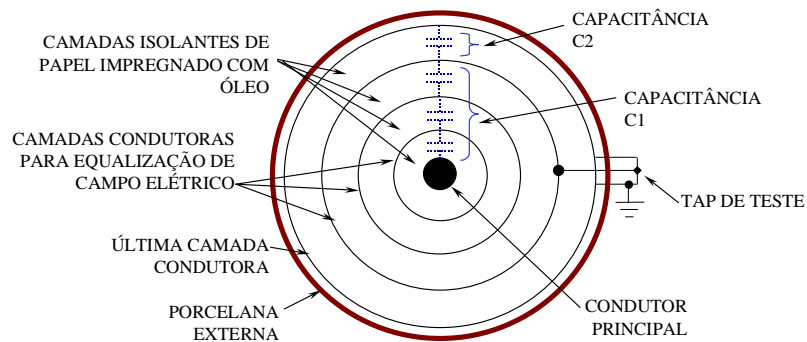


FIGURA 2 – Representação em corte radial de uma bucha capacitiva

No lado Fonte destes transformadores onde não existem os DPBs, como mostrado na Figura 3, o sistema de monitoração é conectado diretamente ao tap capacitivo da bucha, de forma a medir diretamente a corrente de fuga do dielétrico e assim monitorar as variações de capacitância e tangente delta da bucha.



FIGURA 3 – Conexão direta do sistema de monitoração ao tap de bucha do lado Fonte

Em caso de evolução de defeitos nas buchas, o sistema de monitoração dispõe de diversos níveis de alarme, como citados a seguir, que proporcionam à engenharia de manutenção elementos para a tomada de decisão quanto às ações corretivas a adotar.

- Tendência de evolução de tangente delta, com indicação de tempo previsto, em dias, para ocorrência dos dois próximos alarmes.
- Tangente delta alta e muito alta
- Tendência de evolução de capacitância alta, com indicação de tempo previsto, em dias, para ocorrência dos dois próximos alarmes.
- Capacitância alta e muito alta
- Auto-diagnóstico do sistema de monitoração, incluindo perda de sinal do tap da bucha.

2.2 Subsistema Parte Ativa – Monitoração de Gases Dissolvidos

A medição e análise de gases dissolvidos no óleo isolante de transformadores de potência vêm sendo utilizada há décadas para o diagnóstico de defeitos internos no equipamento, podendo detectar falhas relacionadas a sobreaquecimentos, descargas parciais, arcos internos, dentre outros. Tradicionalmente, essa análise é efetuada através da retirada de amostras de óleo, que são levadas a laboratório para determinação dos gases dissolvidos no óleo por ensaio de gás-cromatografia.

Dentre os vários gases gerados pelas falhas, o hidrogênio se destaca como um gás chave, por ser gerado em quase todos os tipos de defeitos internos em um transformador. Uma vez detectada a elevação no teor de hidrogênio, o sistema de monitoração emite um alarme que indica à engenharia de manutenção a necessidade de retirada de amostra de óleo e realização da cromatografia em laboratório. Os resultados destes ensaios são então inseridos no Módulo de Engenharia Cromatografia do sistema, que efetua a análise dos gases de forma off-line e emite um laudo baseado nos critérios de análise mais aceitos no mercado, tais como a norma IEC60599 e o método de Duval, dentre outros selecionados pelo usuário.

No caso do projeto piloto dos transformadores reguladores, a monitoração on-line de gases dissolvidos no óleo foi implementada aproveitando um sensor de gases (Hydran) já existente no Regulador R4 (Figura 4) que foi integrado ao sistema aproveitando-se a infra-estrutura já existente para o Regulador R1. Isto foi possível graças às características de modularidade e expansibilidade da arquitetura descentralizada do sistema de monitoração aberto empregado (Sigma), possibilitando assim a integração de sensores de outros fabricantes.

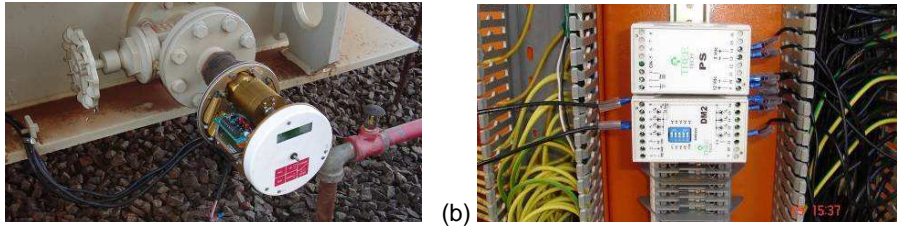


FIGURA 4 – Integração do monitor de gás existente no regulador R4 ao sistema de monitoração. (a) Sensor de hidrogênio; (b) Módulo de aquisição de dados para integração.

2.3 Subsistema Parte Ativa – Monitoração de Envelhecimento Térmico

O principal material utilizado para isolamento nos enrolamentos de transformadores de potência é o papel, cujas fibras de celulose são compostas por longas cadeias de anéis de glucose (Figura 5). A quantidade de anéis nessa cadeia é o Grau de Polimerização (GP), que em isolações novas é da ordem de 1000 a 1400. A degradação do material causa a redução gradual do GP, geralmente considerando-se que foi atingido o fim de vida quando este é inferior a 200. Embora as características dielétricas da isolação não se alterem substancialmente quando isso ocorre, suas propriedades mecânicas são reduzidas de forma acentuada, deixando o transformador suscetível a falha quando da ocorrência de esforços mecânicos, por exemplo, na eventualidade de um curto-circuito numa linha de transmissão.

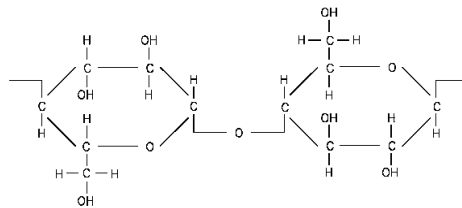


FIGURA 5 – Anéis de glucose constituintes da molécula de celulose

Três mecanismos principais podem contribuir para a degradação da celulose: a pirólise, a hidrólise e a oxidação [4], os quais são potencializados, respectivamente, com a elevação da temperatura, do teor de água e do teor de oxigênio. Com o oxigênio e a umidade em condições controladas, a pirólise torna-se o fator predominante para a perda de vida útil da isolação.

Como em um transformador a temperatura não se distribui uniformemente, o sistema de monitoração utiliza a temperatura calculada para o ponto mais quente do enrolamento (hot-spot) para o cálculo on-line da perda de vida, pois esse é o local em que ocorrerá a maior degradação. Para isso, foi instalado no regulador R1 um Monitor de Temperatura, que efetua o cálculo da temperatura do enrolamento a partir das medições obtidas no topo do óleo e da corrente de carga (Figura 6).

Além do percentual de vida útil restante, o sistema determina o tempo para que o fim de vida teórico seja atingido, baseado na taxa média de perda de vida em um período de tempo ajustável pelo usuário. Quando o tempo de vida restante é inferior a um limite ajustado, o sistema de monitoração emite um alarme informando à engenharia de manutenção da necessidade de ações corretivas.



Figura 6 – Medição de temperaturas. (a) Sensor de temperatura do topo do óleo; (b) Monitor de temperatura do óleo e do ponto mais quente do enrolamento; (c) Sensor de temperatura ambiente.

2.4 Subsistema Parte Ativa – Monitoração do Envelhecimento por Água no Papel

Como exposto no item 2.3, um dos fenômenos causadores da deterioração do papel isolante dos enrolamentos é a umidade, num fenômeno denominado hidrólise. Segundo Fabre e Pichon [5] a hidrólise atua como um fator catalisador da perda de vida térmica da isolação (pirólise).

Portanto, o teor de água no papel isolante é um parâmetro importante para a monitoração da perda de vida da isolação, e sua determinação é feita a partir de um Módulo de Engenharia do software do sistema de monitoração,

um modelo matemático que usa como variáveis de entrada as medições de umidade no óleo e temperaturas do óleo e enrolamento do transformador. A umidade é medida através de um sensor imerso no óleo, instalado em uma válvula como mostra a Figura 7, e as temperaturas são obtidas do Monitor de Temperaturas (Figura 6).

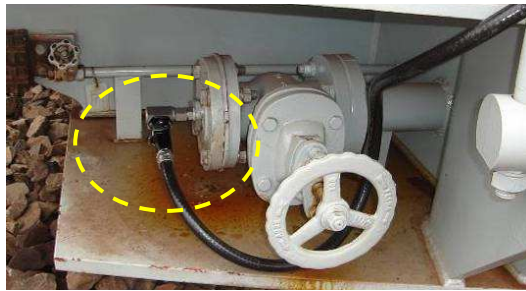


FIGURA 7 – Sensor de umidade na válvula de drenagem do regulador R1

Em caso de detecção de teor de água elevado no papel, de forma a causar aceleração da perda de vida da isolamento, o sistema de monitoração emite um alarme informando à engenharia de manutenção da necessidade de ações corretivas.

2.5 Subsistema Parte Ativa – Monitoração de Formação de Bolhas

Além da aceleração do envelhecimento da isolamento, o excesso de água no papel traz o risco de formação de bolhas na presença de altas temperaturas, por exemplo, devido a sobrecargas emergenciais. Como criam regiões de baixa rigidez dielétrica, a evolução de bolhas a partir da água presente no papel representa um risco de falha dielétrica do equipamento, dados os elevados campos elétricos entre espiras.

A partir do teor de água no papel, calculado no Módulo de Engenharia exposto no item 2.4, o sistema efetua o cálculo da temperatura a partir da qual existe o risco de formação de bolhas [6]. Para maior segurança, considerando os erros naturais do modelo matemático deste projeto, é utilizada uma margem de segurança, de forma a gerar um alarme se a temperatura do ponto mais quente apenas aproxima-se da temperatura de formação de bolhas.

Além de monitorar as temperaturas atuais, verificando se a mesma alcançou a margem de segurança para formação de bolhas, o sistema de monitoração verifica também se, nas condições atuais de carga e temperatura ambiente, a temperatura do enrolamento evoluirá para atingir estes valores de risco.

2.6 Subsistema Tanque Conservador – Monitoração de Ruptura de Membrana

Como exposto no item 2.3, o terceiro fator para a deterioração da celulose empregada para a isolamento dos enrolamentos é a oxidação. Para manter a concentração de oxigênio no óleo em níveis seguros, sem que ocorra o envelhecimento acelerado da isolamento, os transformadores são equipados com um sistema de selagem (bolsa ou membrana) que mantém o óleo isolado da atmosfera, ao mesmo tempo em que permite sua expansão e contração devido às variações de temperatura. Isso, no caso do Transformador Regulador R1, é obtido através de uma membrana de borracha no interior do tanque de expansão, que evita o contato do óleo, em sua face externa, com o ar no seu lado externo.

Portanto, para que esse sistema seja efetivo, é preciso garantir a integridade da membrana, uma vez que seu rompimento, além de poder comprometer a expansão do óleo em caso de obstrução, permitirá o contato do óleo com o ar, contaminando-o com oxigênio e umidade. Para isso foi instalado no Transformador Regulador R1 um sensor em cima da membrana, no interior do tanque de expansão, como mostra a Figura 8, o qual detecta a presença de líquido, indicando assim sua ruptura. Neste caso o sistema de monitoração emite um alarme para a engenharia de manutenção.



FIGURA 8 – Instalação do sensor de ruptura de membrana do tanque de expansão. (a) Sensor sobre a membrana, no interior do tanque; (b) Caixa de ligação no topo do tanque; (c) Conexão do cabo do sensor.

2.7 Subsistema Óleo Isolante – Monitoração de Umidade

A presença de água em excesso na isolação, além de atuar como catalisador do envelhecimento e trazer o risco de formação de bolhas em altas temperaturas, apresenta o risco adicional de formação de água livre no óleo em caso de baixas temperaturas. Isso está associada ao fato de que, ao diminuir a temperatura do óleo, diminui também sua capacidade de absorver água (solubilidade de água no óleo).

Desta forma, ao diminuir a temperatura aumenta o percentual de saturação de água no óleo, ainda que a quantidade de água presente não varie. Se a temperatura diminui a ponto da saturação atingir ou ultrapassar 50%, a água pode não conseguir mais permanecer dissolvida no óleo, ocorrendo então sua separação, ou seja, a formação de água livre.

O sistema de monitoração verifica continuamente, para a saturação de água atual informada pelo sensor de umidade on-line (Figura 7), qual a temperatura em que ocorreria a formação de água livre, emitindo um alarme se a temperatura do óleo medida aproximar-se do valor calculado. Para tal é estabelecida uma margem de segurança de forma similar à monitoração de formação de bolhas.

2.8 Subsistema Resfriamento – Monitoração de Eficiência

O resfriamento adequado de um transformador é fundamental para sua operação segura e sem perda acelerada de vida útil da isolação na presença de cargas elevadas. É essencial, portanto, que o resfriamento opere devidamente, retirando de forma eficiente o calor gerado.

Por essa razão, o sistema de monitoração implementado possui o Módulo de Engenharia para verificação da eficiência dos sistemas de resfriamento natural e forçado. Esse módulo opera comparando a temperatura do topo do óleo medida, obtida do Monitor de Temperatura, com o valor esperado para a mesma, calculado em função da temperatura ambiente, da corrente de carga e do estágio do resfriamento em operação (Figura 6).

Se a temperatura medida estiver acima da esperada, é emitido aviso de baixa eficiência do sistema.

2.9 Subsistema Resfriamento – Manutenção de Ventiladores

Os ventiladores desempenham função essencial para a operação dos transformadores reguladores, pois a falha dos mesmos limitaria o carregamento máximo a que pode ser submetido o transformador. Por esse motivo, o sistema de monitoração possui o Módulo de Engenharia para Manutenção da Ventilação Forçada, que através da medição dos tempos de operação dos ventiladores fornece informações e alertas úteis para auxílio da manutenção, tais como: tempos de serviço de cada grupo de ventilação, tempos médios diários de funcionamento e tempos previstos para atingir o número de horas para inspeção ou manutenção.

2.10 Módulo de Simulação de Carregamento

Vista a possibilidade de operação dos transformadores reguladores em sobrecarga em caso de contingências, o sistema de monitoração possui um Módulo de Engenharia para simulações de carregamentos, onde o usuário pode verificar as conseqüências de situações hipotéticas em termos de temperaturas atingidas, perda de vida útil e risco de formação de bolhas.

Em todas as simulações o usuário pode modificar o modo de comando do resfriamento (automático ou manual) e as temperaturas para acionamento e histerese do resfriamento.

3.0 - MONITORAÇÃO ON-LINE DE TRANSFORMADORES DE CORRENTE

Aproveitando-se a infra-estrutura já existente para o transformador regulador R1, e graças às características de modularidade e expansibilidade da arquitetura descentralizada do sistema de monitoração instalado, o mesmo foi expandido com a integração da monitoração on-line de capacitância e tangente delta da isolação de três Transformadores de Corrente (TC) de pedestal da linha de transmissão de 500kV-50Hz L-9 Itaipu-Furnas da SEMD, mostrado na Figura 9a.

O arranjo da isolação desses TCs dá origem a uma capacitância de ordem de grandeza similar à das buchas capacitivas dos transformadores. Como nos TCs da SEMD o terminal de aterramento da blindagem da isolação está acessível, e o mesmo se comporta de forma similar ao tap capacitivo das buchas, a monitoração capacitância e tangente delta da isolação dos TCs pode ser efetuada utilizando o mesmo tipo de sensor usado nas buchas (Figura 9b), obtendo-se assim as mesmas funções de monitoração descritas no item 2.1.

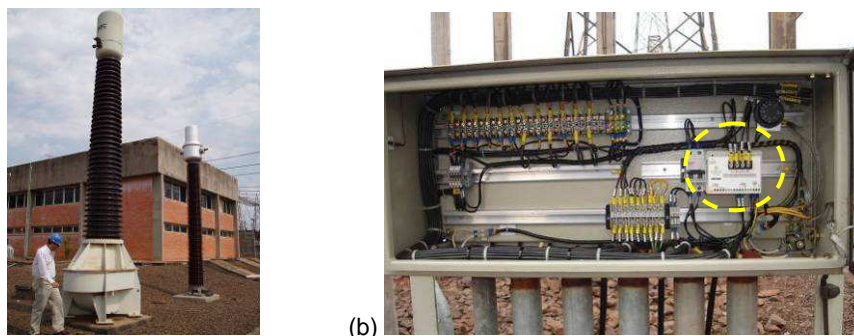


FIGURA 9 – Monitoração de TC's. (a) TC de pedestal 500kV; (b) Módulo de medição na caixa de passagem para monitoração de capacitância e tangente delta da isolação.

4.0 - ARQUITETURA DO SISTEMA E RESULTADOS OBTIDOS

O sistema de monitoramento piloto instalado na SEMD possui uma arquitetura modular e descentralizada, características que permitiram a expansão do projeto a outros equipamentos da SEMD como foi o caso do Transformador Regulador R4 e dos Transformadores de Corrente (TC) de pedestal da linha de transmissão de 500kV-50Hz L-9 Itaipu-Furnas, conforme mostra o diagrama da Figura 10.

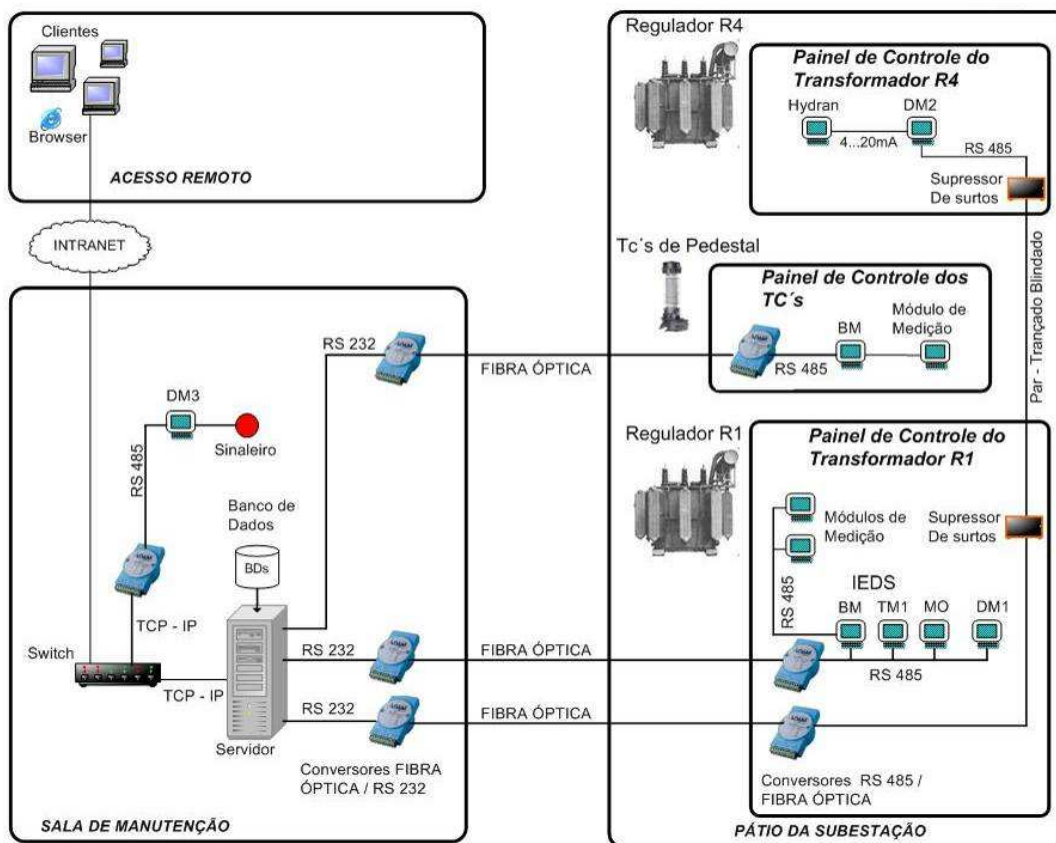


FIGURA 10 – Arquitetura do sistema de monitoração implantado na SEMD

O servidor de monitoração localizado na sala de manutenção na própria SEMD é conectado à Intranet de Itaipu, de forma que os acessos aos dados, informações, diagnósticos e prognósticos possam ser realizados desde qualquer computador na rede da empresa.

Para evitar a necessidade de um acompanhamento contínuo do sistema de monitoração, o mesmo está equipado com um mecanismo para o envio automático, em caso de qualquer anormalidade, de mensagens de alarmes predefinidos, via e-mail e telefonia celular, além da possibilidade de acesso às informações via Internet.

Uma vez comissionado, em Novembro de 2006, o sistema de monitoração iniciou a gravação das medições em banco de dados, como exemplifica a Figura 11, onde se observam em forma de gráfico as evoluções de

temperaturas ambiente, do óleo e do enrolamento e a perda de vida útil para um período de 20 dias, nos primeiros meses de operação do sistema.

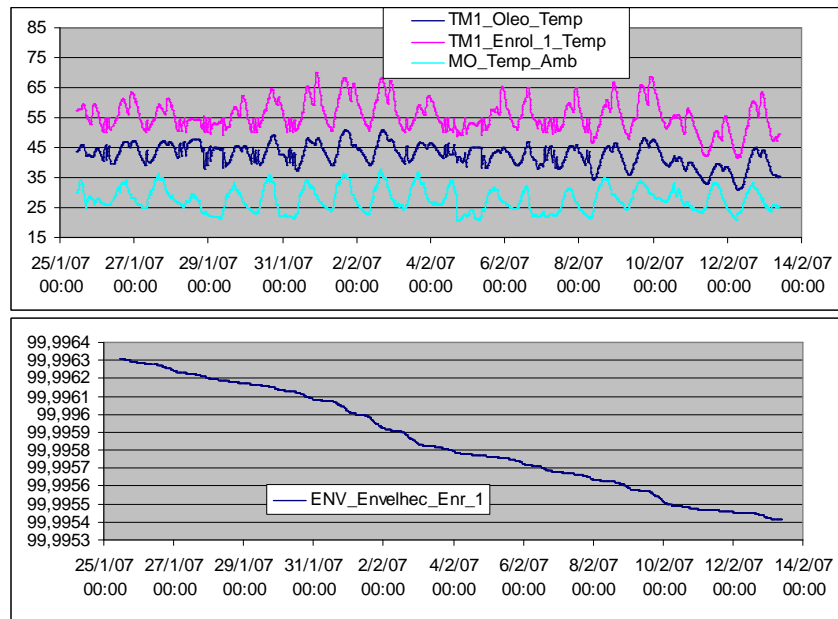


FIGURA 11 – Exemplos de medições gravadas em banco de dados histórico

5.0 - CONCLUSÕES

A avaliação de funcionamento do sistema de monitoramento piloto, efetuada por Itaipu desde sua instalação em Novembro de 2006 até final de 2008, permitiu verificar a aplicabilidade desse sistema com as vantagens inerentes a um sistema descentralizado e modular, facilitando as atividades necessárias para instalação, manutenção e/ou atualizações necessárias.

Com base nos resultados obtidos pode-se concluir que o sistema de monitoramento reúne os requisitos técnicos necessários para auxiliar na redução do risco de falhas e a redução dos desligamentos para manutenção preventiva, por exemplo, para ensaios em buchas, com conseqüente aumento de disponibilidade dos transformadores da SEMD para o sistema elétrico.

O sistema de monitoramento demonstrou ser bastante versátil, especialmente do ponto de vista da integração com sensores de outros fabricantes, como foi o caso do Sensor de Gases dissolvidos Hydran 201Ti da GE, que foi instalado pela Itaipu no Regulador R4 em 2004.

Como é normal nesse tipo de aplicação, adaptações foram necessárias durante a instalação e ao longo do projeto, como foi o caso da monitoração das buchas equipadas com DPB, para as quais se desenvolveu no Monitor de buchas BM da Treotech uma técnica especial de monitoração. Uma prova de sensibilidade e funcionamento dessa solução foi obtida quando da ocorrência de um mau-contato na fiação interna de um DPB, a qual foi corretamente indicada pelo sistema de monitoração.

6.0 - REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- (1) Velázquez C.E. e Diaz Mora, N., "Desempeño de Aisladores Pasantes y Consecuencia de Riesgos de Fallas en Transformadores de Potencia". -VIII SESEP- Seminario del Sector Eléctrico Paraguayo, 29 a 31 de Octubre del 2008.
- (2) Revista ELECTRA, Ref. no. 88, "An International Survey on Failures in Large Power Transformers in Service". Paris: CIGRE, 1983.
- (3) Melo, Marcos A. C., Alves, Marcos, "Experiência com Monitoração On-Line de Capacitância e Tangente Delta de Buchas Condensivas", XIX SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Rio de Janeiro, Brasil, 2007.
- [4] McNutt, W. J., "Insulation Thermal Life Considerations for Transformer Loading Guides", IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 7, No. 1, pp. 392-401, January 1992.
- (5) Fabre, J., Pichon, A., "Deteriorating Processes and Products of Paper in Oil. Application to Transformers", CIGRE Paper 137, 1960.
- (6) Oommen, T. V., Petrie, E. M., Lindgren, S. R., "Bubble Generation in Transformer Windings Under Overload Conditions", Doble Client Conference, Boston, 1995.