



## MONITORAÇÃO ON-LINE DE TRANSFORMADORES CONVERSORES DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO HVDC NA SE IBIÚNA

**E. G. PERES**  
Furnas Centrais Elétricas  
S.A.  
Brasil

**W. R. DUSO**  
Furnas Centrais Elétricas  
S.A.  
Brasil

**J. S. LATENEK**  
Furnas Centrais Elétricas  
S.A.  
Brasil

**M. E. G. ALVES\***  
Treetech Sistemas Digitais  
Ltda.  
Brasil

**Resumo** – A importância da SE Conversora de Ibiúna para o fornecimento de energia elétrica para São Paulo levou Furnas a optar pela monitoração on-line dos transformadores conversores, inicialmente com a substituição dos sistemas mecânicos de medição de temperatura por monitores eletrônicos e posteriormente com a monitoração completa de um dos transformadores conversores. Este trabalho apresenta os detalhes da instalação e as experiências em campo com a monitoração on-line, incluindo a transmissão de dados dos sensores nos transformadores através de uma rede sem fio com tecnologia Wi-fi.

**Palavras chave:** Transformadores, Conversores, HVDC, Monitoração on-line, Diagnóstico, Prognóstico, Manutenção preditiva

### 1 INTRODUÇÃO

Ibiúna é a subestação onde está localizado o terminal conversor do sistema de transmissão em corrente contínua (HVDC) de Itaipu, ou seja, a subestação de Ibiúna é o terminal onde a corrente contínua é transformada em corrente alternada (345kV 60Hz) para o abastecimento da grande São Paulo.

Este sistema, que transmite em  $\pm 600\text{kVdc}$  metade da capacidade geradora de Itaipu (6.300 MW), é constituído de 8 conversores, sendo que cada 2 conversores formam um pólo e cada 2 pólos formam um bipolo. A subestação possui 24 transformadores conversores em operação, com capacidade instalada de 7200MVA.

Os transformadores conversores de Ibiúna são unidades monofásicas, cada uma com dois enrolamentos primários e um secundário. Como se tratam de conversores de 12 pulsos, os primários dos transformadores devem ser alimentados por dois sistemas trifásicos defasados de  $30^\circ$  elétricos entre si. Para isso, cada banco tem um dos enrolamentos primário das unidades monofásicas ligado em estrela, enquanto o outro primário é ligado em delta. O diagrama trifilar da figura 1 apresenta esta topologia para o pólo 2 do bipolo 1, contendo os conversores 2 e 4, o qual é alimentado em  $+600\text{kVdc}$ . O pólo 1 deste mesmo bipolo apresenta configuração idêntica, exceto que é alimentado em  $-600\text{kVdc}$ .

Cada transformador possui dois comutadores de derivação em carga (OLTC), que são acionados por um mecanismo motorizado comum, visto que deve haver simultaneidade de operação. O sistema de controle automático atua no OLTC quando o ângulo de disparo das válvulas sai da faixa de operação nominal. A figura 2 mostra uma visão geral de um dos transformadores conversores monofásicos.

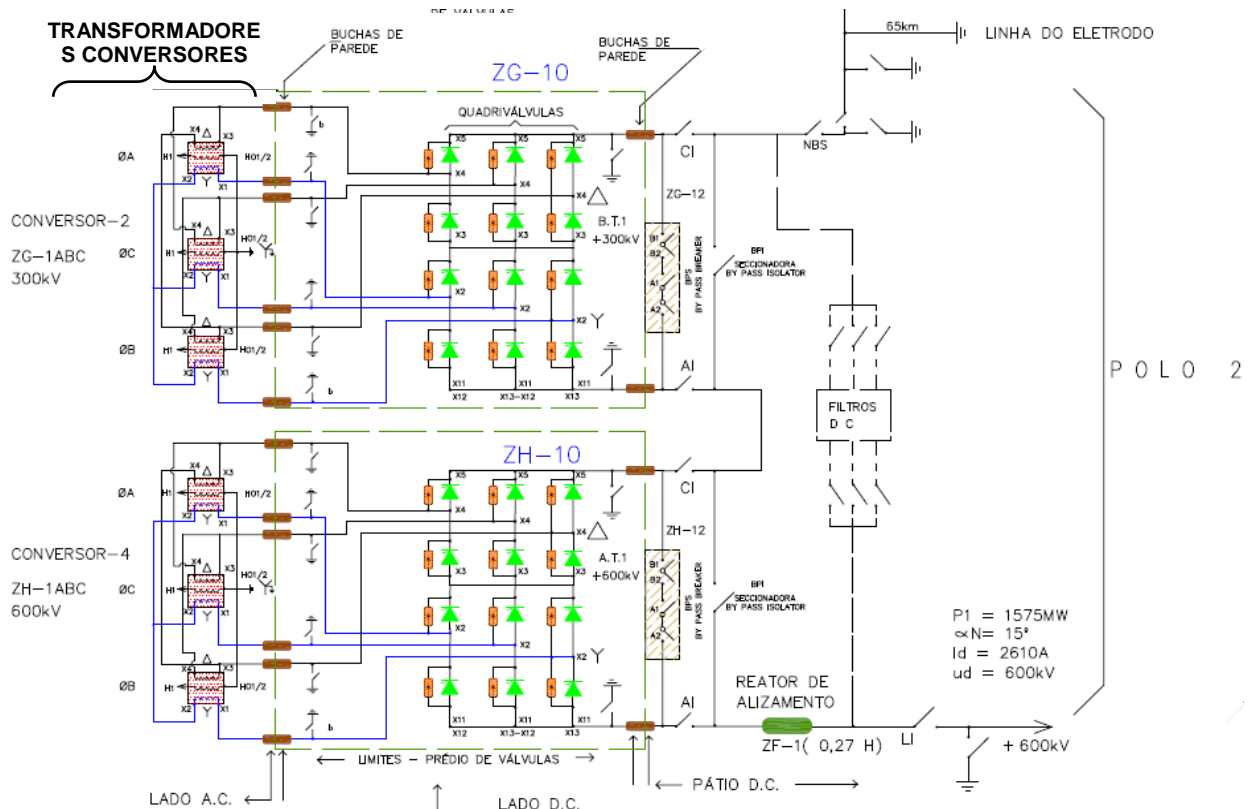


Fig. 1 – Diagrama Trifilar de um Pólo Conversor



Fig. 2 – Vista geral de um transformador conversor monofásico

## 2 MONITORAÇÃO ON-LINE DOS TRANSFORMADORES CONVERSORES

A elevada importância desses transformadores para o sistema elétrico brasileiro, associada às condições de trabalho peculiares e severas a que estão submetidos, como, por exemplo, o elevado conteúdo de harmônicos nas tensões, levou Furnas à implantação da monitoração on-line dessas máquinas, executada em duas etapas principais, como descrito a seguir.

### 2.1 Modernização da Monitoração de Temperaturas

Na primeira etapa de implantação da monitoração on-line foram modernizados os sistemas de supervisão de temperatura de todos os 24 transformadores conversores, com a substituição de todos os termômetros de óleo e enrolamentos originais, mecânicos, por monitores de temperatura digitais, como ilustra a figura 3.

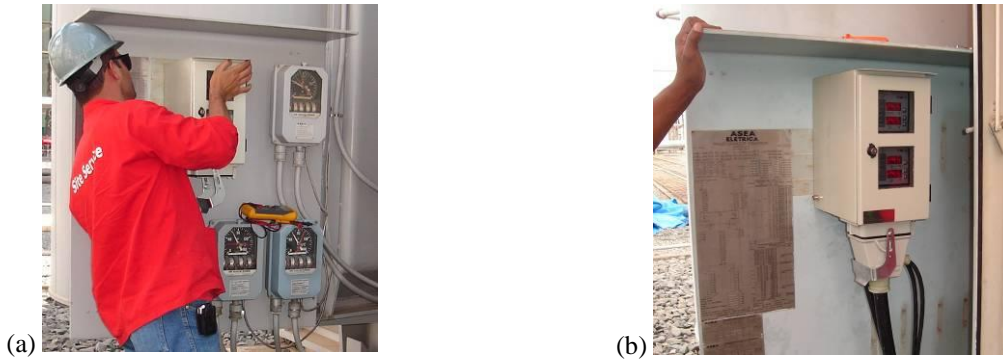


Fig. 3 – Modernização da monitoração de temperatura dos transformadores conversores. (a) Início da substituição dos termômetros mecânicos originais; (b) Monitores de temperatura digitais instalados.

Um dos objetivos desta etapa foi reduzir o índice de falhas do sistema de medição de temperaturas do óleo e enrolamentos, já obsoletos, e eliminar a necessidade de calibrações periódicas nos mesmos. Adicionalmente, a modernização do sistema de supervisão de temperaturas proporcionou diversas novas funcionalidades:

- Medição redundante da temperatura do topo do óleo, permitindo maior segurança na medição e continuidade de operação em caso de defeito em um dos sensores;
- Temperatura do enrolamento calculada por modelo matemático – maior precisão sem o uso de resistências de aquecimento para simulação;
- Possibilidade de medição de temperaturas adicionais, tais como ambiente e comutador sob carga;
- Auto-calibração das medições;
- Contatos de saída para alarmes, desligamentos e comandos do resfriamento com temporizações;
- Saídas de corrente para indicações remotas de temperatura integradas – eliminam-se transdutores;
- Comando do resfriamento em modo manual ou automático;
- Revezamento automático dos grupos de resfriamento forçado;
- Pré-resfriamento do transformador em caso de aumento da corrente de carga;
- Exercício diário automático dos grupos de resfriamento;
- Memória de massa para medições e eventos;
- Opcionalmente, monitoração do diferencial de temperatura do OLTC para diagnóstico de defeitos;
- Portas de comunicação serial para integração a sistemas remotos.

Esta última funcionalidade em especial – portas de comunicação serial – abre a possibilidade de integração dos monitores de temperatura a um software de Monitoração On-Line, de forma que as medições efetuadas pelo equipamento podem ser utilizadas por algoritmos matemáticos para diagnósticos do estado do transformador. Esta aplicação é ilustrada na figura 4, que indica os algoritmos que podem ser implementados no software de monitoração a partir das informações enviadas pelo Monitor de Temperatura.

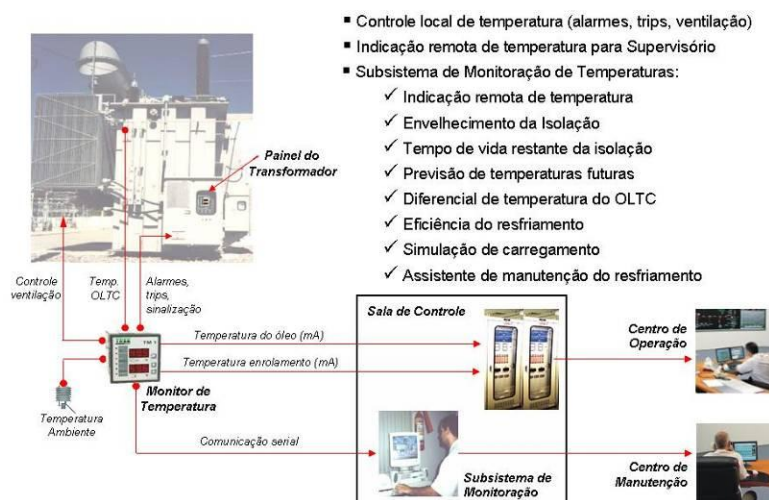


Fig. 4 – Integração da porta de comunicação serial do Monitor de Temperatura a um software de Monitoração On-Line do transformador e os algoritmos de diagnóstico possíveis.

Para execução do software de Monitoração On-Line foi instalado na sala de controle da subestação um servidor, que se interliga às portas seriais dos Monitores de Temperatura nos transformadores. O meio de físico utilizado para essa interligação foram inicialmente cabos tipo par-trançado blindado. Posteriormente, para facilitar a instalação da rede e reduzir seus custos, foi utilizada comunicação sem fios tipo Wi-Fi, que se encontra em operação com resultados plenamente satisfatórios, a despeito do elevado nível de interferência eletromagnética nessa subestação. A figura 5 mostra os componentes para a comunicação sem fio.

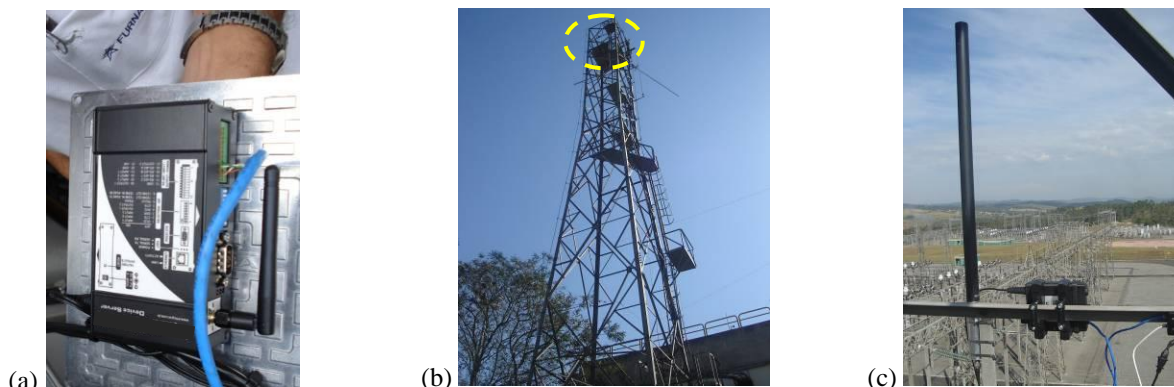


Fig. 5 – Componentes de Comunicação do Sistema de Monitoração. (a) Módulo de comunicação Wi-fi instalado ao lado dos monitores de temperatura e demais sensores, no corpo do transformador; (b) Torre próxima à sala de controle onde foi instalado o Access Point para comunicação com os sensores nos transformadores; (c) Detalhe do Access Point com antena e sua visada para a subestação.

Para a segurança de acesso à rede Wi-fi foi adotada a filtragem de endereços MAC no Access Point, de tal forma que somente equipamentos com MAC previamente cadastrado conseguem conectar-se. Como medida adicional, foi utilizada a criptografia de dados WEP.

## 2.2 Monitoração On-Line dos Transformadores do Conversor 4

Uma das principais características do sistema de monitoração implantado na SE Ibiúna é a sua modularidade, o que permite o fácil acréscimo de novas funções de monitoração ou mesmo de novos equipamentos. Aproveitando-se dessa característica, a segunda etapa de implantação da monitoração on-line para os transformadores consistiu no acréscimo de diversos sensores no Conversor 4, assim como seus respectivos módulos de software de monitoração. A tabela I a seguir relaciona os sensores instalados e suas respectivas funções, incluindo o Monitor de Temperatura que já existia nesse transformador.

TABELA I. SENSORES INSTALADOS NO TRANSFORMADOR CONVERSOR 4, SUAS RESPECTIVAS MEDIÇÕES E FUNCIONALIDADES AUTÔNOMAS LOCAIS

Sensor	Medições Efetuadas	Funções Locais Autônomas
Monitores de Temperaturas TM1 e TM2	- Temperatura do Óleo - Temperatura do ponto mais quente dos Enrolamentos - Corrente de carga	- Alarme e desligamento por temperatura do Óleo - Alarme e desligamento por temperatura dos Enrolamentos - Controle automático e manual do Resfriamento Forçado - Pré-resfriamento do Transformador por aumento da carga - Exercício diário dos ventiladores - Diferencial de temperatura do Comutador Sob Carga
Monitor de Buchas BM	- Capacitância das buchas - Tangente delta das buchas	- Tendência de evolução da Capacitância - Tendência de evolução da Tangente Delta - Tempo para alarmes por Capacitâncias Altas/Muito Altas - Tempo para alarmes por Tangentes Delta Altas/Muito Altas
Monitor de Gás dissolvido no Óleo	- Teor de hidrogênio dissolvido no óleo do transformador (ppm) - Temperatura do óleo no ponto de medição de hidrogênio	- Tendência de evolução do Teor de hidrogênio no óleo - Alarmes por hidrogênio no óleo Alto ou Muito Alto - Alarmes por tendência de evolução de H <sub>2</sub> no óleo Alta
Módulos de Digitalização de sinais DM1/DM2	- Medição de estado de contatos secos de alarme - Medição de nível de óleo do transformador	

Sensor	Medições Efetuadas	Funções Locais Autônomas
Monitor de Umidade no Óleo do OLTC	- Saturação relativa (%) de água no óleo - Teor de água no óleo (ppm) - Temperatura do óleo	- Tendência de evolução do Teor de água no óleo - Alarmes saturação (%) de água no óleo Alta ou Muito Alta - Alarmes por Teor de água no óleo Alto ou Muito Alto - Alarmes por tendência de evolução do Teor de água Alta
Monitor de Umidade no Óleo do Transformador	- Saturação relativa (%) de água no óleo - Teor de água no óleo (ppm) - Temperatura ambiente - Temperatura do óleo	- Tendência de evolução do Teor de água no óleo - Alarmes saturação (%) de água no óleo Alta ou Muito Alta - Alarmes por Teor de água no óleo Alto ou Muito Alto - Alarmes por tendência de evolução do Teor de água Alta
Relé de Ruptura da Bolsa	- Ruptura da bolsa do tanque de expansão	- Alarme por ruptura da bolsa
Monitor de Temperaturas DTM	- Temperatura do Óleo nas entradas dos trocadores de calor - Temperatura do Óleo nas saídas dos trocadores de calor	
Indicador de Posição PI	- Posição de tap do Comutador sob Carga	

Baseado nas medições dos sensores acima, o software de monitoração os seguintes Módulos de Engenharia mostrados na tabela II para tratamento dos dados, com o objetivo de prover ao usuário os diagnósticos e prognósticos do estado do transformador.

TABELA II. MÓDULOS DE ENGENHARIA PARA DIAGNÓSTICOS E PROGNÓSTICOS DE ESTADO DO TRANSFORMADOR

Módulos de Engenharia	Diagnósticos e Prognósticos Efetuados
Envelhecimento da Isolação	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Perda de Vida Útil da Isolação</li> <li>• Taxa de perda de vida útil</li> <li>• Extrapolação do tempo de vida restante, em anos.</li> </ul>
Previsão de Temperatura Futura	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura do enrolamento depois da estabilização térmica</li> <li>• Previsão de ocorrência de alarmes ou desligamentos</li> <li>• Cálculo do tempo restante para alarmes e desligamentos.</li> </ul>
Eficiência do Resfriamento	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cálculo de temperatura esperada para o óleo em função da carga, temperatura ambiente e grupo de resfriamento em operação</li> <li>• Comparação com a temperatura real medida e alarme em caso de baixa eficiência do resfriamento - temperatura medida muito acima da esperada</li> </ul>
Manutenção dos Grupos de Resfriamento	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Horas de operação dos grupos de resfriamento desde o início da operação</li> <li>• Horas de operação dos grupos de resfriamento desde a última manutenção</li> <li>• Média de horas de operação diária do resfriamento</li> <li>• Extrapolação de tempo restante para inspeção ou manutenção</li> <li>• Avisos com antecedência para inspeção ou manutenção.</li> </ul>
Água no Óleo e no Papel	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Teor de água no Óleo</li> <li>• Teor de água no Papel</li> <li>• Aceleração da perda de vida da isolamento por excesso de água</li> <li>• Temperatura de Formação de Bolhas por excesso de água no papel</li> <li>• Temperatura de Formação de Água Livre por excesso de água no óleo</li> </ul>
Diferencial de Temperatura do OLTC	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diferencial de temperatura instantâneo dos comutadores</li> <li>• Diferencial de temperatura filtrado dos comutadores</li> </ul>
Cromatografia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Medição on-line de hidrogênio dissolvido no óleo</li> <li>• Alarmes por teor de H<sub>2</sub> alto, muito alto ou tendência de aumento</li> <li>• Banco de dados de análises gás-cromatográficas off-line</li> <li>• Cálculo das taxas de aumento de gases</li> <li>• Laudos para as análises gás-cromatográficas conforme IEC60599 e Duval</li> </ul>
Físico-químico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Banco de dados de ensaios físico-químicos off-line no óleo</li> <li>• Laudos automáticos conforme NBR10576</li> </ul>

### 3 EXPERIÊNCIA DE CAMPO COM A MONITORAÇÃO ON-LINE

A primeira etapa de instalação do sistema de monitoração dos transformadores conversores, que abrangeu a substituição dos termômetros mecânicos por Monitores de Temperatura, foi efetuada no período de 2006 a 2007. A segunda etapa da instalação, em que foram adicionados os demais sensores para a monitoração completa do Conversor 4, foi efetuada em Julho/2008.

A figura 6 apresenta alguns detalhes da instalação dos sensores e adaptações necessárias para tal, uma vez que os transformadores foram fabricados na década de 1980 e não possuíam as previsões para tal. A instalação como um todo foi bem sucedida, com os sensores operando conforme esperado após sua colocação em serviço.

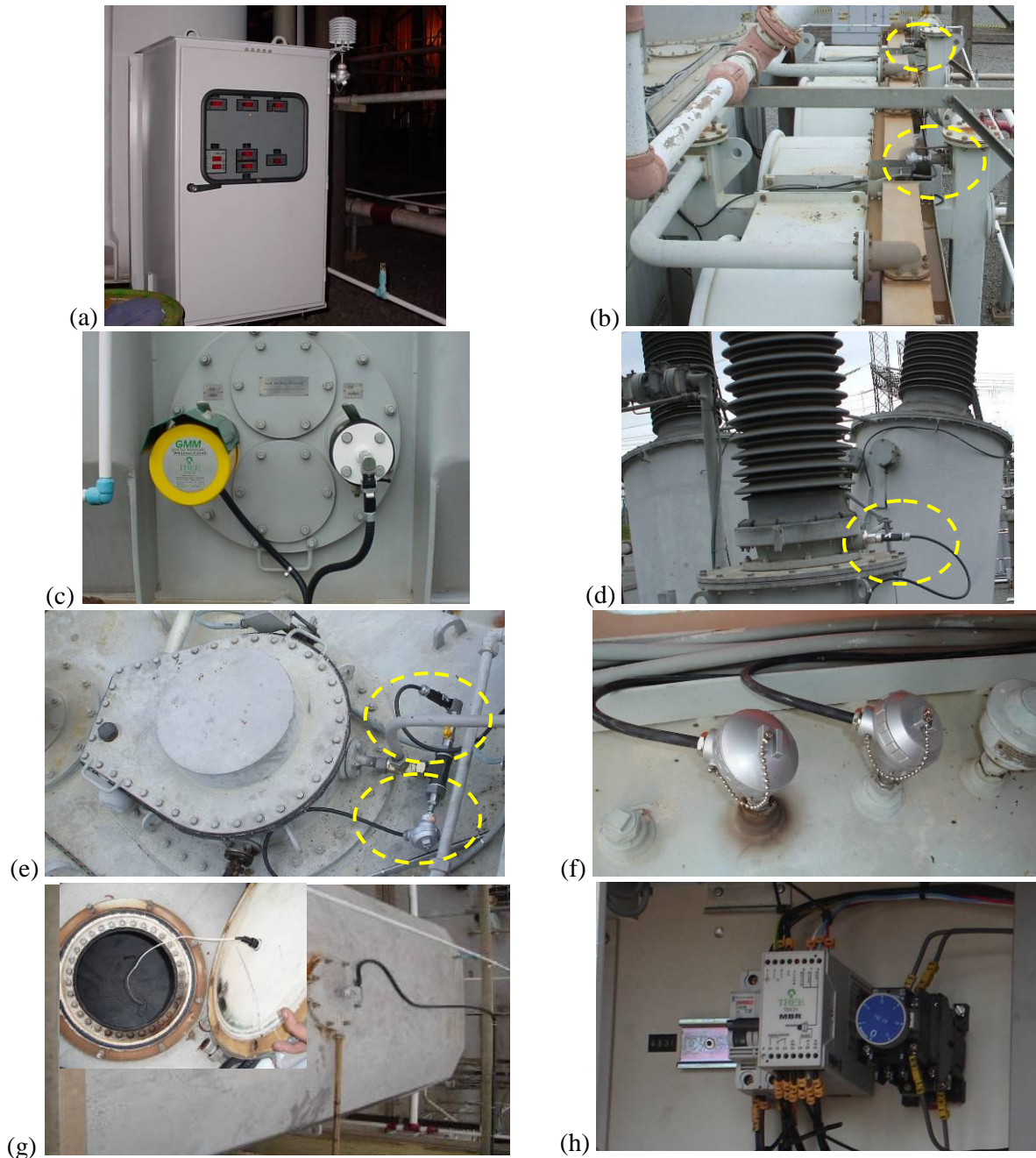


Fig. 6 – Instalação em campo dos sensores de Monitoração. (a) Painel com equipamentos de monitoração e sensor de temperatura ambiente; (b) Sensores de temperatura do óleo na entrada e saída dos trocadores de calor; (c) Sensores de gás e umidade no óleo do trafo; (d) Conexões aos taps das buchas; (e) Sensores de umidade e de temperatura do óleo do OLTC; (f) Sensores de temperatura redundantes para o topo do óleo; (g) Sensor de ruptura de bolsa; (h) Relé de ruptura de bolsa.

Uma vez comissionado, o sistema de monitoração iniciou a gravação das medições em banco de dados, como pode ser visto no exemplo da figura 7, onde se mostra um gráfico de temperaturas do óleo e enrolamento e teores de água no óleo do transformador e do comutador sob carga.

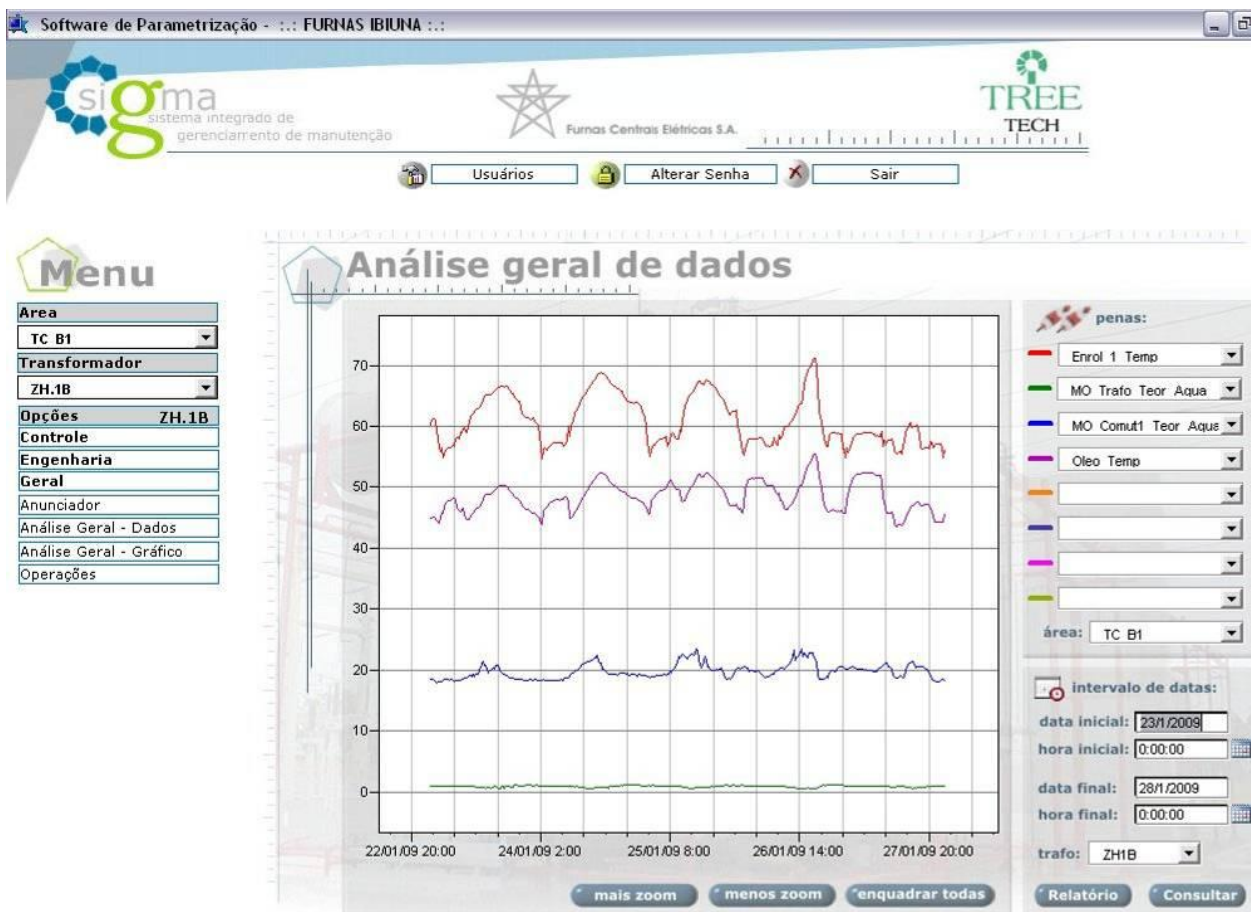


Fig. 7 – Exemplo de medições gravadas em banco de dados histórico

Devido à grande área geográfica atendida por Furnas, além do grande número de transformadores utilizados, um dos principais requisitos necessários a um sistema de monitoração é o acesso remoto às informações. Para permitir esse acesso desde qualquer de suas instalações, o meio de comunicação escolhido foi a rede Intranet já existente na empresa.

Para isso, o servidor de monitoração localizado na sala de controle é conectado à Intranet, com o acesso aos dados, informações, diagnósticos e prognósticos realizado desde qualquer computador na rede da empresa.

Além disso, com os transformadores em condições normais de operação, o que se espera que ocorra na maior parte do tempo, o sistema de monitoração permanecerá em condição estática, vindo a emitir algum diagnóstico de defeito apenas eventualmente.

Para evitar a necessidade de um acompanhamento contínuo do sistema, o que acarretaria uma grande perda de tempo da equipe de manutenção, o sistema de monitoração foi equipado com um mecanismo de envio automático de e-mails em caso de qualquer anormalidade. Para isso devem ser previamente cadastrados no sistema os endereços de e-mail das pessoas a serem alertadas.

A figura 8 adiante apresenta alguns exemplos de telas típicas com medições e diagnósticos on-line do sistema de monitoração.

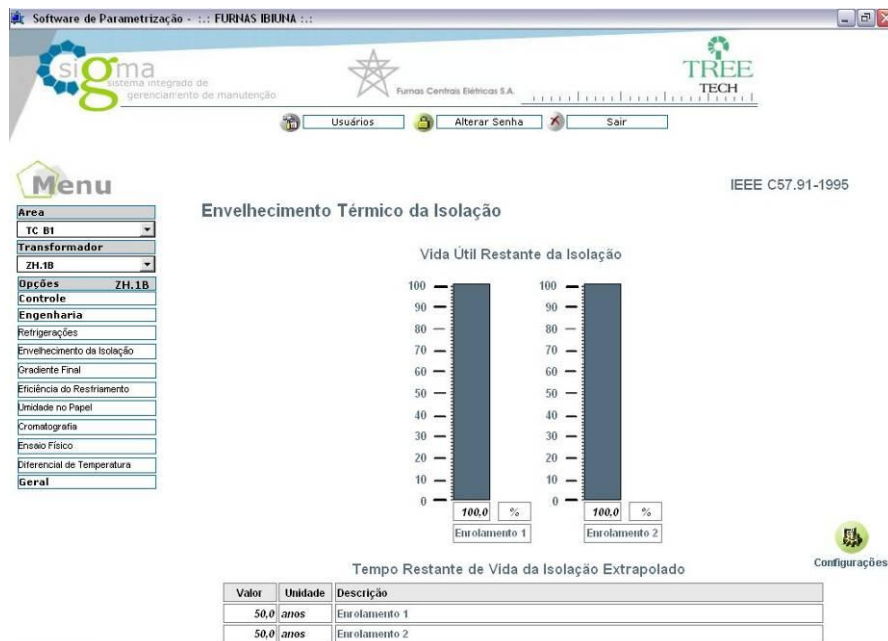


Fig. 8 – Tela típica de diagnóstico do sistema de monitoração

#### 4 CONCLUSÕES

As experiências com a implantação da monitoração on-line e seus resultados práticos obtidos em transformadores Conversores HVDC têm permitido avaliar os benefícios e a efetividade da arquitetura descentralizada dos sensores, dos meios de comunicação e da solução de software empregados, bem como a robustez dos equipamentos eletrônicos instalados na SE Ibiúna, que vem mostrando bons resultados.

Dentre os benefícios proporcionados pelo sistema de monitoração instalado podemos citar:

- Eliminação dos caros e demorados procedimentos anuais de calibração de termômetros;
- Extensão da vida útil dos transformadores ao se detectarem rapidamente condições que poderiam levar à degradação acelerada, como por exemplo, a ruptura da bolsa do tanque conservador;
- Redução do risco de falhas catastróficas através, por exemplo, da monitoração on-line do hidrogênio no óleo;
- Aumento de disponibilidade do equipamento para o sistema elétrico, devido à redução das paradas para manutenção preventiva, por exemplo, para ensaios em buchas;
- Conseqüentemente, redução dos custos de manutenção e, eventualmente, de contratação de seguros, dentre outros.

Considerando-se que se encontra em estudo no Brasil a aplicação da tecnologia HVDC para a transmissão de energia de novos empreendimentos hidrelétricos no norte do país, a experiência com a monitoração on-line de transformadores conversores na SE Ibiúna poderá ser de grande valia para o aumento da confiabilidade e máximo desempenho dessas novas aplicações.

#### 5 REFERENCIAS

- [1] Albuquerque, Roberto, Alves, Marcos, “Monitoração On-Line de um Banco de Autotransformadores 345-138/13,8kV 150MVA com Comutação Sob Carga”, XIX SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Rio de Janeiro, Brasil, 2007.
- [2] 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.
- [3] Alves, Marcos, Araújo, Daniel C. P., Martins, Alvaro J. A. L., Costa, Marcelo A., “Monitoração e Diagnóstico On-Line de Transformador de Potência com Óleo Vegetal”, V Workspot – Workshop on Power Transformers, Belém, Brasil, 2008.
- [4] Alves, Marcos, Silva, Gilson, “Experiência de Campo com Monitoração On-Line de um Transformador 343MVA 230kV com 2 Comutadores sob Carga”, IV Workspot – Workshop on Power Transformers, Recife, Brasil, 2005.