



**XXI SNTPEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
23 a 26 de Outubro de 2011
Florianópolis - SC

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

**A EVOLUÇÃO DOS SISTEMAS DE MONITORAMENTO ON-LINE DE TRANSFORMADORES E REATORES
SIGMA NA ELETROSUL**

Marcos Alves*	Luis Lopes	Claudio Severino	Pedro Peroni	Francisco Zacarias Gonçalves	Giuliano Pereira
TREETECH SISTEMAS DIGITAIS	TREETECH SISTEMAS DIGITAIS	ELETROBRAS ELETROSUL	ELETROBRAS ELETROSUL	ELETROBRAS ELETROSUL	ELETROBRAS ELETROSUL

RESUMO

Os ativos de alta tensão de subestações, como transformadores e reatores, são de fundamental importância para a operação segura e continuidade do fornecimento de energia elétrica. Com isso, os sistemas de monitoramento on-line têm sido empregados buscando maior confiabilidade e disponibilidade desses equipamentos, simultaneamente à redução de custos. A Eletrobras Eletrosul iniciou em 2001 a implantação da monitoração on-line para transformadores de potência com o sistema Sigma. Esse trabalho apresenta o histórico de implantação do sistema de monitoramento Sigma na Eletrobras Eletrosul, assim como sua evolução ao longo do tempo, além dos resultados obtidos e benefícios trazidos pelos aperfeiçoamentos do sistema.

PALAVRAS-CHAVE

Monitoração on-line, Diagnóstico, Prognóstico, Manutenção preditiva, Sensores.

1.0 - INTRODUÇÃO

Os equipamentos de alta tensão de subestações, tais como transformadores de potência, reatores de derivação, transformadores de corrente, transformadores de potencial capacitivos, disjuntores de alta tensão e seccionadores são os ativos de produção das concessionárias de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica e, como tal, são de fundamental importância para a operação segura e a continuidade do fornecimento de energia elétrica. Quando operados em condições adequadas e gerenciados de forma precisa, esses ativos tornam-se um dos principais fatores de eficiência operacional, econômica e de competitividade das concessionárias do setor.

Visando garantir uma maior confiabilidade e disponibilidade desses equipamentos, simultaneamente à redução de custos de operação e manutenção e aumento da eficiência da manutenção, os sistemas para monitoramento e diagnóstico on-line de estado dos ativos têm se disseminado na última década, proporcionando uma ferramenta para a migração da manutenção preventiva para preditiva e para a filosofia de manutenção centrada na confiabilidade [1] [2].

Grande destaque tem sido dado aos transformadores de potência e reatores de derivação, visto que esses são considerados os principais ativos de uma subestação, por serem equipamentos essenciais para a geração e transmissão de energia elétrica, por seus elevados custos de reposição e longos tempos de fabricação.

Esse trabalho apresenta um breve histórico da implantação e evolução desses sistemas na Eletrobras Eletrosul e os resultados obtidos.

2.0 - IMPLANTAÇÃO DO MONITORAMENTO ON-LINE DE TRANSFORMADORES NA ELETROSUL

No contexto apresentado acima, e como empresa com tradição no emprego de tecnologias inovadoras e referência em boas práticas de gestão de ativos, a Eletrobras Eletrosul iniciou no ano de 2001 a implantação da monitoração on-line para transformadores de potência, buscando atingir os seguintes objetivos gerais:

- Diagnósticos on-line de estado dos equipamentos de alta tensão
- Redução de risco de falhas;
- Controle e extensão da vida útil;
- Migração para a manutenção preditiva;
- Redução dos custos de manutenção;
- Aumento de disponibilidade dos equipamentos no sistema;
- Redução dos custos por indisponibilidade dos equipamentos;
- Uso otimizado dos ativos;
- Melhor negociação de prêmios de seguros;
- Preservação da imagem corporativa.

A implantação iniciou-se pelos dois transformadores trifásicos de 230/138 kV 150 MVA com comutadores sob carga da subestação de Itajaí [3], mostrados na figura 1, onde foi instalado o sistema Sigma da Treotech, cuja arquitetura básica é mostrada na figura 2.



Fig. 1. Primeiros transformadores monitorados na SE Itajaí, 138/13,8 kV 150 MVA

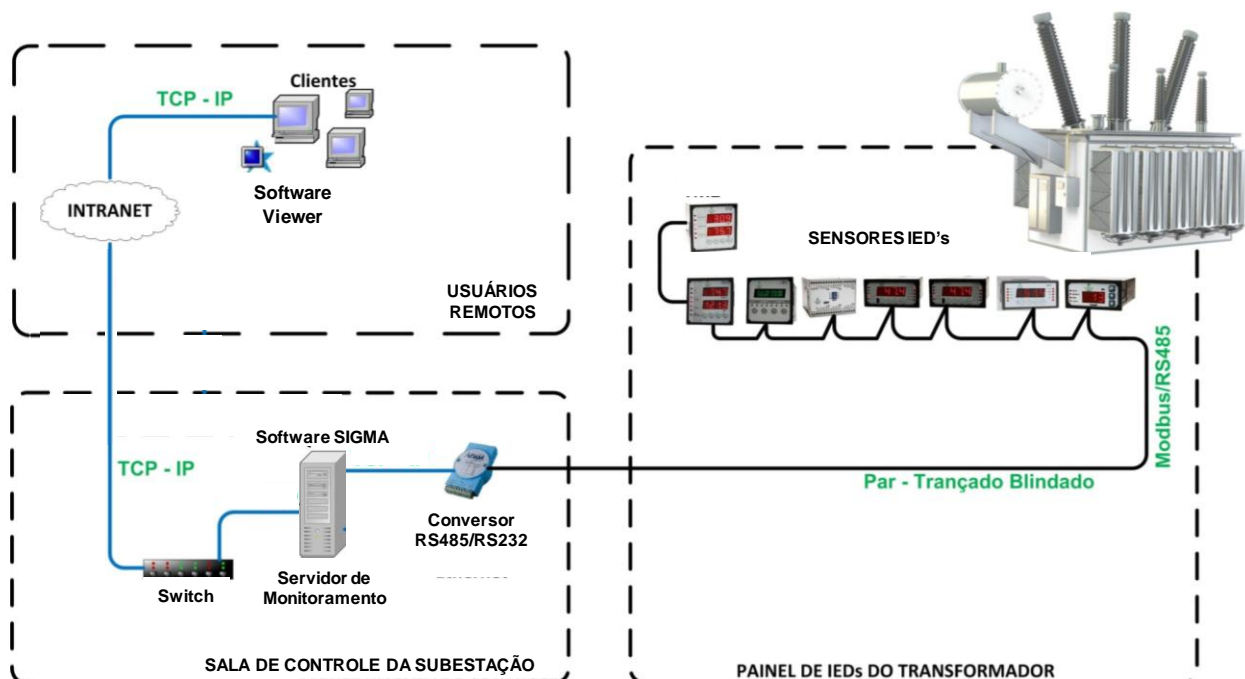


Fig. 2. Arquitetura original do sistema de monitoramento on-line implantado na SE Itajaí.

As principais características dessa solução, observadas na figura 2, são:

- Utilização de arquitetura descentralizada, com sensores do tipo IED, eliminando a necessidade de um elemento centralizador (CLP ou outro) no corpo do transformador [4] [5];
- Sensores do tipo IED projetados e testados especificamente para o ambiente de pátio de subestação, garantindo a confiabilidade e durabilidade do sistema [4] [5];
- Comunicação dos sensores IEDs com o servidor de monitoramento tipo RS485, meio físico par-trançado blindado;
- Conversão do meio de comunicação de RS485 para RS232 para conexão ao servidor de monitoramento;
- Utilização de um servidor de monitoramento independente na sala de controle de cada subestação;
- Conexão do servidor de monitoramento à rede corporativa (intranet) da Eletrosul, para permitir o acesso remoto dos usuários ao sistema de monitoramento;
- Instalação de um software de visualização remoto no computador de cada usuário remoto, o qual se conecta ao servidor de monitoramento.

As variáveis monitoradas, de acordo com a especificação técnica da Eletrosul, são mostradas na tabela 1 [3].

Tabela 1 - Variáveis monitoradas nos transformadores da SE Itajaí, conforme especificação Eletrosul

Variável	Sensor
Temperatura do topo do óleo	Monitor de temperatura
Temperatura dos enrolamentos (hot-spot)	
Temperatura ambiente	
Temperatura do óleo na chave de carga do comutador sob carga	
Percentuais de carga	
Temperatura do óleo na parte inferior do tanque	Monitor de temperatura
Capacitância da isolação	Monitor de Buchas
Tangente Delta da isolação	
Gases dissolvidos no óleo	Monitor de gás
Teor de água dissolvida no óleo no transformador	Monitor de umidade
Teor de água dissolvida no óleo no comutador	Monitor de umidade
Ruptura da membrana/bolsa do tanque de expansão	Relé de ruptura de membrana/bolsa
Tensões de linha	Transdutor digital
Correntes de linha	
Tensões dos ventiladores/bombas	Transdutor digital
Correntes dos ventiladores/bombas	
Tensões do motor do comutador sob carga	Transdutor digital
Correntes do motor do comutador sob carga	
Posição de tap do comutador sob carga	Indicador de posição de tap
Estágios de resfriamento on/off	Módulo de aquisição de dados
Tempo de operação do comutador	
Contatos de alarme: - Relé buchholz, - Válvula de alívio de pressão, - Nível de óleo, etc.	

De posse dessas variáveis, o software Sigma efetua o tratamento dos dados para a obtenção de informações úteis para o diagnóstico e prognóstico do estado dos transformadores. As funções de engenharia, compostas por modelos matemáticos e algoritmos que efetuem o tratamento dos dados são mostradas na tabela 2 [3].

Tabela 2 - Modelos de Engenharia para diagnóstico e prognóstico do estado dos transformadores

Modelo de Engenharia	Diagnósticos e Prognósticos
Vida útil da isolação	Vida útil restante da isolação (%)
	Tendência de perda de vida da isolação (%/dia)
	Tempo de vida restante da isolação (anos)
Previsão de gradiente final de temperatura	Temperatura futura do hot-spot após estabilização
	Tempo para alcançar temperatura de alarme
	Tempo para alcançar temperatura de desligamento
Gases no óleo	Tendência de evolução do gás no óleo (principalmente H ₂)
	Alarmes por tendência de evolução e concentrações de gás altas ou muito altas
Cromatografia / Físico-químico	Laudo de ensaios de gás-cromatografia off-line
	Laudo de ensaios físico-químicos off-line
Umidade no óleo e no papel	Selagem do transformador – ruptura da bolsa de borracha do tanque de expansão
	Teor de água no óleo (ppm)
	Tendência de evolução do teor de água (ppm/dia)
	Teor de água no papel (% da massa seca)
	Fator de aceleração da perda de vida da isolação por hidrólise
Temperatura de formação de bolhas	Temperatura de formação de bolhas
	Temperatura de formação de água livre
Eficiência do resfriamento	Temperatura do topo do óleo calculada
	Diferença entre temperaturas medida e calculada
	Eficiência do sistema de resfriamento
Diferencial de temperatura do comutador	Diferencial de temperatura instantâneo
	Diferencial de temperatura filtrado
	Alarmes por diferenciais de temperatura elevados
Torque e tempo de operação do motor do comutador	Torque máximo do motor em cada região da comutação
	Tempo de operação do mecanismo do comutador
	Alarmes por valores de torque e tempo de operação fora dos padrões
Assistente de manutenção do comutador	Número de operações do comutador
	Somatória da corrente comutada
	Tempo de serviço do comutador
	Previsão de tempo restante para manutenção do comutador
	Avisos com antecedência para manutenção do comutador
Assistente de manutenção da ventilação forçada	Tempo de operação dos grupos de ventilação, total e após a última manutenção
	Previsão de tempo restante para manutenção da ventilação
	Avisos com antecedência para manutenção da ventilação

Posteriormente, essa mesma solução expandiu-se para 27 (vinte e sete) outros transformadores e reatores da empresa. A tabela 3 lista os equipamentos monitorados.

Tabela 3 – Sistemas de monitoramento on-line Sigma implantados na Eletrosul

Subestação	Transformadores	Reatores	Tensão (kV)	Potência
Itajaí	3	0	230/138 - 13,8	150MVA
Siderópolis	1	0	230/69 - 13,8	88MVA
Xanxerê	2	0	230/138 - 13,8	150MVA
Campos Novos	6	0	525/230 - 13,8	224MVA
Biguaçu	2	0	230/138 - 13,8	150MVA
Gravataí III	4	0	230/69 - 13,8	55MVA
Nova Santa Rita	3	0	525/230 - 13,8	224MVA
Santo Ângelo	3	3	525/230 - 13,8 550 (reator)	224MVA 54MVA _r
Dourados	1	0	230/138 - 13,8	75MVA

3.0 - EVOLUÇÃO DOS SISTEMAS DE MONITORAMENTO ON-LINE

Como é natural, por se tratar, na época de início de implantação (2001), de uma tecnologia recente, o sistema Sigma sofreu um processo de evolução, no qual a Eletrobras Eletrosul teve um importante papel ao interagir nos novos desenvolvimentos, aperfeiçoamentos e customizações realizados no sistema.

Nesse processo o sistema foi submetido a customizações para atender às necessidades específicas da Eletrobras Eletrosul, como, por exemplo, a inclusão de um algoritmo de diagnóstico por gás-cromatografia proprietário da empresa, assim como aperfeiçoamentos para facilitar a usabilidade do sistema. A seguir são apresentados alguns exemplos da evolução do sistema.

3.1 Customização com método de diagnóstico de DGA da Eletrosul

A análise de resultados de ensaios de gás-cromatografia é realizada na Eletrosul utilizando-se uma metodologia proprietária, desenvolvida em função da experiência da empresa com essa técnica. Devido à característica do software de monitoração ser aberto, o mesmo permite o acréscimo de novas funções de monitoração do usuário, o que foi efetuado então com essa técnica de análise de gás-cromatografia proprietária da Eletrosul.

3.2 Expansões do sistema

Aproveitando-se as características de modularidade e expansibilidade do sistema Sigma, e por ser esse um sistema aberto, o mesmo sofreu expansões para acréscimo de sensores.

Inicialmente foram agregados ao sistema os sensores IED para monitoração on-line de capacitância e tangente delta das buchas, visto que esses sensores foram instalados no transformador em uma segunda etapa.

Posteriormente, foram agregados ao sistema de monitoramento diversos sensores on-line de gases dissolvidos no óleo (basicamente H₂) que já existiam no parque da Eletrosul. Também nesse caso foi aproveitado o fato do sistema ser aberto para o desenvolvimento de um driver de comunicação específico para esses sensores, que utilizavam protocolo de comunicação proprietário do fabricante. Como os sensores se encontravam em outras subestações da empresa, foi utilizada a rede intranet da Eletrosul para trafegar os dados desses sensores até o servidor de monitoramento, na sala de controle da SE Itajaí.

3.3 Envio de alertas por email

Para evitar a necessidade de supervisão contínua do sistema por um operador, foi agregada ao sistema a possibilidade de envio automático de emails para endereços previamente cadastrados. Dessa forma, evita-se o gasto de tempo da engenharia de manutenção quando não há diagnósticos de problemas.

3.4 Upgrade com tecnologias Web 2.0

Como explanado no item 2.0, o sistema inicialmente implantado na Eletrosul utilizava para acesso remoto aos dados um software visualizador, que devia ser instalado no computador remoto de cada usuário.

Essa solução, embora funcionalmente perfeita, apresentava alguns inconvenientes, como a limitação de acesso ao sistema somente a partir de computadores previamente preparados, o gasto de tempo do pessoal de TI para a instalação do software visualizador para os usuários e também para as atualizações, quando necessário.

Para evitar esses inconvenientes, e em sintonia com as mais modernas tendências de *cloud-computing*, em que os aplicativos são executados apenas nos servidores remotos, utilizando-se como interface local apenas o navegador de internet (*browser*), a interface do sistema de monitoramento Sigma foi atualizada para o emprego das tecnologias denominadas Web 2.0.

Com isso, deixou de existir a necessidade de instalação de um software específico nos computadores dos usuários, que passaram a utilizar somente o navegador de internet já existente. Dessa forma, quaisquer atualizações efetuadas no sistema se restringem aos servidores de monitoramento, não afetando os computadores dos usuários, e o acesso ao sistema se torna possível a partir de qualquer computador na rede intranet da Eletrosul, desde que o usuário esteja de posse de seu login e senha.

A segurança do acesso ao sistema pode ser mantida através do uso do protocolo de conexão criptografada HTTPS, além da exigência de login e senha para acesso.

3.5 Comunicação sem fio com os sensores

Com o objetivo de reduzir o custo e facilitar a instalação dos sistemas de monitoramento, a viabilidade de utilização de comunicação sem-fio entre os sensores no transformador e a sala de controle da subestação foi verificada através de um piloto na SE Santo Ângelo, por ocasião da implantação do sistema em um banco de transformadores, com a utilização do padrão Wi-fi. Foram integrados sensores de gás já existentes, juntamente com novos monitores de capacitância e tangente delta das buchas. Os dados são transmitidos diretamente a um roteador, ligado à rede corporativa e aquisitados no software Sigma4.

O desempenho da aplicação se mostrou plenamente satisfatório, demonstrando a viabilidade de uso dessa tecnologia, com grande potencial para redução de custos e do tempo de instalação.

3.6 Acréscimo de modelo de Engenharia

A arquitetura aberta e modular do sistema de monitoramento permitiu também a inclusão de um novo item de Engenharia, para simulação de carregamento. A simulação é possível em dois modos:

- Baseado nas condições atuais de carga em temperatura, com o usuário inserindo apenas o novo valor de carregamento hipotético;
- Baseado em curvas hipotéticas de evolução de carga e temperatura ambiente num período de 24h.

Em ambos os modos o usuário pode verificar as conseqüências de situações hipotéticas em termos de temperaturas atingidas e perda de vida útil relacionada, podendo comparar a máxima temperatura que seria atingida com a temperatura de formação de bolhas devido à umidade, também calculada pelo software de monitoramento. 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.

3.7 Conectividade a outros sistemas

A evolução dos sistemas de monitoramento Sigma dotou os mesmos de capacidade de troca de dados com outros sistemas existentes na Eletrosul, tais como o sistema supervisor SAGE.

Essa conectividade é possível através de diferentes métodos, selecionados de acordo com a necessidade e conveniência da aplicação. Exemplos de possibilidades são: bancos de dados SQL ou em outros padrões, OPC, web services, protocolos de comunicação abertos (por exemplo, Modbus, DNP3.0, TCP/IP), dentre outros.

4.0 - RESULTADOS

A utilização de sistemas de monitoramento on-line de transformadores e reatores apresenta diversas características que podem trazer benefícios para a manutenção desses equipamentos, como a redução de risco de falhas catastróficas, o controle e extensão da vida útil, a migração da manutenção preventiva para a preditiva, com conseqüente aumento de disponibilidade dos equipamentos e redução dos custos por indisponibilidade e redução dos custos de manutenção, dentre outros.

No entanto, o sistema de monitoramento apresenta-se como uma ferramenta útil não apenas para a engenharia de manutenção, mas também para a operação e planejamento, devido às funções de simulação de carregamento e previsão de temperatura futura em função da carga atual, associadas aos diagnósticos de estado do equipamento, que provêem indicação do risco de utilização do equipamento em sobrecarga, por exemplo.

Outro exemplo de utilidade do sistema de monitoramento pôde ser observado a partir da falha de uma bucha de 245 kV na SE Santo Ângelo. Nesse caso, a evolução do defeito na bucha ocorreu de forma extremamente rápida, não deixando tempo para a retirada de operação antes da falha, diferente do que se espera normalmente para os defeitos em buchas [6]. No entanto, a presença do sistema de monitoramento com o armazenamento de medições em bancos de dados permitiu a análise posterior da ocorrência, levando a conclusões que seriam impossíveis sem o sistema de monitoramento – como o fato da evolução do defeito ter ocorrido de forma muito rápida.

Com isso, o sistema de monitoramento permitiu o aumento do conhecimento a respeito da evolução desse tipo de defeito, assim como o aperfeiçoamento do próprio sistema e dos procedimentos em casos desse tipo.

5.0 - CONCLUSÕES

Esse trabalho apresentou o histórico de implantação, ampliação, customização e operação dos sistemas de monitoramento Sigma na Eletrobras Eletrosul, assim como sua evolução ao longo do tempo, incluindo as arquiteturas empregadas para o sensoriamento dos equipamentos, as arquiteturas para transmissão de dados, os meios de comunicação e as interfaces dos usuários.

Foram apresentados ainda os resultados obtidos e os benefícios trazidos pelas evoluções e aperfeiçoamentos do sistema ao longo do tempo, permitidas em grande parte pela arquitetura aberta, descentralizada e modular do Sigma.

Considerando a importância dos transformadores e reatores no parque da Eletrosul para o SIN, a implantação do sistema monitoramento on-line para esses equipamentos, assim como a possibilidade de evolução do sistema e de seus usos ao longo do tempo é de grande importância para o aumento da confiabilidade do sistema elétrico e continuidade do fornecimento, além de contribuir para reduções de custo que contribuem para a modicidade tarifária.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Amom, Jorge, Alves, Marcos, Vita, André, Kastrup Filho, Oscar, Ribeiro, Adolfo, et. al., “Sistema de Diagnósticos para o Monitoramento de Subestações de Alta Tensão e o Gerenciamento das Atividades de Manutenção: Integração e Aplicações”, X ERLAC - Encontro Regional Latinoamericano do CIGRÉ, Puerto Iguazu, Argentina, 2003.
- [2] Alves, Marcos, “Sistema de Monitoração On-Line de Transformadores de Potência”, Revista Eletricidade Moderna, Maio/2004.
- [3] Alves, Marcos, “Field Experience with On-Line Monitoring of Two 150MVA 230kV Transformers with On-Load Tap Changers”, Cigre SC A3 International Technical Colloquium, September/2007.
- [4] V. Vasconcellos, M. Alves, “Especificação de Sistemas de Monitoração On-line para Transformadores de Potência Baseados em uma Arquitetura Descentralizada”, V Workspot, Brasil, Abril 2008.
- [5] Lavieri Jr., Arthur, Hering, Ricardo, “Novos Conceitos em Sistemas de Energia de Alta Confiabilidade”, Encarte Especial Siemens Energia, [http:// mediaibox.siemens.com.br/upfiles/232.pdf](http://mediaibox.siemens.com.br/upfiles/232.pdf), Janeiro/2001.
- [6] 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.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

**Marcos E. G. Alves**

Nascido no Rio de Janeiro, RJ, em 15 de Julho de 1975, trabalha com a Treetech desde 1992. Especializado em sistemas de controle e monitoramento de transformadores de potência, coordena o departamento de PD&I. Formou-se engenheiro elétrico em 2001 pela Universidade São Judas Tadeu, SP, e em 2005 concluiu o Mestrado na área de Energia e Automação da Universidade de São Paulo (USP). Está cursando atualmente o doutorado em Energia pela mesma universidade.

**Luis Lopes**

Luis R. Lopes Nascido em São Paulo, SP, em 08 de Março de 1970, trabalha com a Treetech desde 1995. Especializado em sistemas de controle e monitoramento de transformadores de potência, trabalha no departamento de Engenharia de Aplicação. Formou-se bacharel em sistemas de informação em 2005 pela Faculdade Eniac, Guarulhos – SP.

Claudio Severino**Pedro Peroni****Francisco Zacarias Gonçalves****Giuliano Pereira**