Secagem de Transformadores Energizados Através de Atmosfera de Nitrogênio Desidratado.

Luís Cláudio Ribeiro, Bruno Pontes Rodrigues, Elias Gonçalves da Silva, Guilherme C. Gouveia de Lima, José Mak, Flávio Faria, Laurence L. Marques, José E. B. Querido, Roberto L. Crespo Maciel, Viviane Mak Vieira, Ana Lúcia V. Alves.

Resumo – Este projeto utiliza as propriedades higroscópicas da atmosfera de Nitrogênio (N2) de dispositivos de selagem de transformadores, para secagem do óleo isolante e isolamento sólido desses equipamentos. O N2 é um gás seco e higroscópico e quando utilizado em dispositivos de selagem, forma um "colchão" de gás sobre a superfície do óleo internamente ao tanque de expansão. No contato N2/óleo a umidade do óleo é transferida para a atmosfera de N2. Variando-se a carga do transformador, a atmosfera de N2 é inserida ou retirada do tanque de expansão, devido à dilatação do óleo, por variação de temperatura. Essa atmosfera gasosa inserida ou retirada do tanque de expansão passa por um módulo de secagem que retira e descarta a umidade presente na mesma. Essa passagem contínua da atmosfera gasosa pelo módulo de secagem retira paulatinamente a umidade do óleo isolante e conseqüentemente do isolamento sólido do transformador.

***Palavras-chave – Transformador, Nitrogênio,* Secagem de trafos, Selagem, Umidade.**

I. Introdução

Este é o artigo técnico referente ao Projeto de P&D-ITA-008/2010, intitulado "Desenvolvimento de Módulo de Secagem de Transformadores Energizados através de Atmosfera de Nitrogênio Desidratado".

O projeto é Cooperado do Grupo Neoenergia (Itapebi Geração de Energia Elétrica S.A., Afluente Geração de Energia Elétrica S.A., Afluente Transmissão de Energia Elétrica S.A. e Baguari I – Geração de Energia S.A.), CGTI – Centro de Gestão de Tecnologia e Quantum – Comercio e Serviços de Tecnologia e Inovação LTDA, dentro do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Grupo Neoenergia, regido pela ANEEL, com duração inicial de 24 meses e estendido posteriormente para 34 meses.

A idéia para o desenvolvimento do projeto surgiu das dificuldades para a realização de serviços de secagem do isolamento sólido e do óleo mineral isolante de transformadores energizados. A vida útil do transformador isolado em papel e óleo mineral ou vegetal está fortemente associada à presença de umidade no processo de envelhecimento do papel. Existe uma proporcionalidade entre a quantidade de água no óleo e a umidade do papel. Em função disso adota-se o procedimento de retirada da umidade do óleo, podendo ocorrer retrabalho a cada 2 anos. Isto resulta em retirada parcial da umidade presente no enrolamento, através da migração da umidade do papel para o óleo recém tratado.

O novo processo de retirada de umidade do papel através da atmosfera de nitrogênio será continuo, dispensando o tratamento convencional.

Esse processo por ser mais eficiente, resulta em menores custos, de manutenção e de retrabalho. Com a manutenção contínua da qualidade do óleo haverá melhoria de desempenho e de incremento de vida útil do transformador. Haverá também ganho na confiabilidade, com possibilidade de utilização de carregamentos mais elevados, melhorando o fator de utilização destes equipamentos.

Os transformadores existentes possuem um sistema de conservação de baixo desempenho para contenção da contaminação. A taxa de entrada de umidade em seus enrolamentos é elevada mesmo para os mais recentes desenvolvimentos de bolsas ou membranas.

O desenvolvimento do módulo de desidratação do nitrogênio incorporado em equipamentos de conservação de transformadores caracteriza um novo procedimento e novo dispositivo de secagem indireta do núcleo de transformadores em operação.

O sistema se utiliza do ciclo diário de expansão e retração do volume de óleo que provoca a saída e entrada de nitrogênio do tanque de expansão super seco, desidratado pelo módulo de secagem fora do transformador.

A migração da água dos enrolamentos para o óleo e daí para o nitrogênio ocorre devido à diferença de saturação reversa obtida pelo novo processo, configurando uma secagem contínua dos equipamentos e solucionando o problema de envelhecimento acelerado a que esses transformadores estão submetidos.

II. Desenvolvimento da Pesquisa

Inicialmente foi efetuado levantamento bibliográfico sobre o estado da arte com relação à secagem de transformadores e estudo correlatos, que pudessem colaborar com o desenvolvimento do projeto. A seguir foram estudados e avaliados algoritmos e ferramentas computacionais desenvolvidas para medição e controle de umidade em transformadores, visando aplicação no projeto.

Esse trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL, sob número P&D ITA 008/2010.

Luís Cláudio Ribeiro, Bruno Pontes Rodrigues e Elias Gonçalves da Silva e trabalham para o Grupo Neoenergia (e-mail: lribeiro@neoenergia.com, bruno@hebaguari.com.br, esilva@neoenergia.com)

José Mak, Flavio Faria, Laurence L. Marques, José E. B. Querido, Roberto L. C. Maciel e Viviane M. Vieira trabalham para a Quantum Comércio e Serviços de Tecnologia e Inovação LTDA (e-mail: josemak@buenomak.com.br; ffaria@buenomak.com.br; laurence@buenomak.com.br, eduardo@buenomak.com.br, roberto@buenomak.com.br , viviane@buenomak.com.br.).

Guilherme C. G. Lima e Ana Lúcia V. Alves trabalham para o CGTI Centro de Gestão de Tecnologia e Inovação. (email: guilherme@buenomak.com.br e analucia@versattus.com.br).

Iniciados estudos para projeto e fabricação de módulo de secagem a ser incorporado aos dispositivos de selagem atualmente utilizados. Estudados e avaliados componentes necessários e elaborado projeto para o novo módulo de secagem. Definidos ensaios laboratoriais para avaliação do comportamento do óleo isolante em utilização no decorrer dos experimentos.

Especificados e emitidas requisições de compra de componentes para montagem do módulo de secagem a ser incorporado aos dispositivos de selagem existentes.

Fabricados dois módulos de secagem, que incorporados a dois dispositivos de selagem, originaram dois protótipos de dispositivos de selagem e secagem para instalação em transformadores.

Efetuados ensaios de laboratório nos dois protótipos, com simulação de situações de campo para verificação do comportamento das proteções e das respostas do software de aquisição de dados e de controle.

Após ensaios laboratoriais os dispositivos protótipos foram transportados para o local de instalação e instalados nos dois transformadores pilotos selecionados.

Após instalação em campo foi iniciado o acompanhamento com coletas de dados e ensaios laboratoriais do óleo isolante para avaliação de desempenho.

III. ETAPAS.

A pesquisa foi desenvolvida em etapas realizadas no período de dois anos:

Primeiro Ano: 05 etapas.
Segundo Ano: 05 etapas.

Primeiro Ano:

No primeiro ano do projeto foram estudados e avaliados inicialmente os processos e procedimentos atuais utilizados para secagem do isolamento sólido de transformadores em operação e desenvolvidos algoritmos para medição e controle do teor de umidade nesses equipamentos.

Estudos de aquecimento e avaliação da umidade presente nos enrolamentos de transformadores, realizados em centenas desses equipamentos mostraram que os dados obtidos no histórico de resultados dos ensaios físicos químicos e cromatográficos dos mesmos, quando tratados com ferramenta computacional adequada, possibilitam calcular a umidade presente no isolamento sólido, sem a necessidade de realizar ensaios de aquecimento em campo para determinação da mesma.

O percentual de teor de umidade presente nos enrolamentos do transformador, conforme valor obtido; indica os seguintes níveis de contaminação.

<1,5 % de umidade - O transformador está seco.

>1,5 % <1,8 % - O transformador encontra-se na eminência de ficar úmido.

>1,8 % <2,20 % - O transformador encontra-se medianamente úmido e com possibilidades de formação de bolhas.

>2,20 % - O transformador está úmido, sujeito a formação de bolhas e não confiável para carga. Necessário efetuar-se a secagem dos enrolamentos.

Transformadores com teor de umidade superior a 2,2 % necessitam de ações que possibilitem a rápida retirada dessa umidade, face ao risco de formação de bolhas e possibilidade de falha do equipamento. Nesse caso um processo de secagem criogênico é o mais recomendado para a retirada da umidade.

Para a secagem dos transformadores designados como pilotos no projeto foi desenvolvido um módulo de secagem, o qual foi incorporado a um dispositivo de selagem de transformadores em atmosfera de Nitrogênio já existente (desenvolvido pelos pesquisadores em projeto anterior).

A. Dispositivo de selagem.

O Dispositivo de Selagem para transformadores (SMCT – Sistema de Monitoramento e Conservação de Transformadores) é um equipamento que utiliza uma atmosfera fechada (sem contato com o meio ambiente) de gás Nitrogênio (N2), para a selagem do transformador.

As figuras 01 e 02 abaixo mostram o painel do dispositivo aberto e fechado, durante ensaios em laboratório.

Figura 1 – Painel SMCT aberto.

Figura 2 – Vista Frontal do Painel SMCT.

A atmosfera de selagem é mantida com pressão positiva (0,2 a 15 mbar acima da pressão atmosférica) no interior do tanque de expansão do transformador, para evitar que a umidade presente no ar atmosférico possa penetrar no mesmo através de fissuras ou trincas na estrutura, quando de pressões internas inferiores à externa.

Na selagem, a atmosfera gasosa no interior do tanque de expansão do transformador forma um "colchão" de Nitrogênio sobre a superfície do óleo isolante. No contato entre a massa gasosa e a superfície do óleo isolante o Nitrogênio que é um gás seco e com características higroscópicas, absorve grande parte da umidade contida no óleo.

Durante a operação do transformador o óleo sofre variações de volume (dilatação), em função da variação das temperaturas internas geradas pelo carregamento do transformador. A variação de volume do óleo no tanque de expansão faz com que a atmosfera gasosa no interior do mesmo se expanda ou se comprima, alterando a pressão interna da massa gasosa.

O SMCT mantém uma supervisão constante da pressão da atmosfera de N2 no interior do tanque de expansão. Quando a pressão interna da atmosfera de N2 atinge um dos limites estabelecidos (0,2 ou 15 mbar), o SMTC insere ou retira parte do gás da atmosfera de N2, reequilibrando as pressões para o intervalo estabelecido.

O reservatório de N2 do SMCT tem por função manter a disponibilidade desse gás para inserir ou retirar Nitrogênio do tanque de expansão, em função das pressões internas.

Dessa forma, existe um fluxo constante de gás em movimento entre o tanque de expansão do transformador e o reservatório de Nitrogênio.

Esse fluxo de Nitrogênio que constantemente entra ou sai do tanque de expansão com a variação de carga do transformador, passa pelo módulo de secagem incorporado ao SMCT, onde a umidade contida na massa gasosa é retirada e descartada. Mantendo-se o gás sempre seco, suas características higroscópicas são potencializadas, absorvendo de forma contínua, a umidade do óleo isolante toda vez que entra em contato com a superfície do mesmo no tanque de expansão e eliminando-a quando da passagem pelo módulo de secagem.

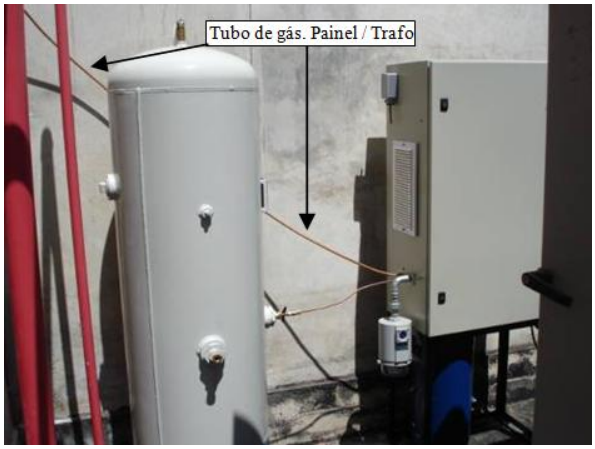

Figura 4 – Tubulação de N2 Painel / Trafo.

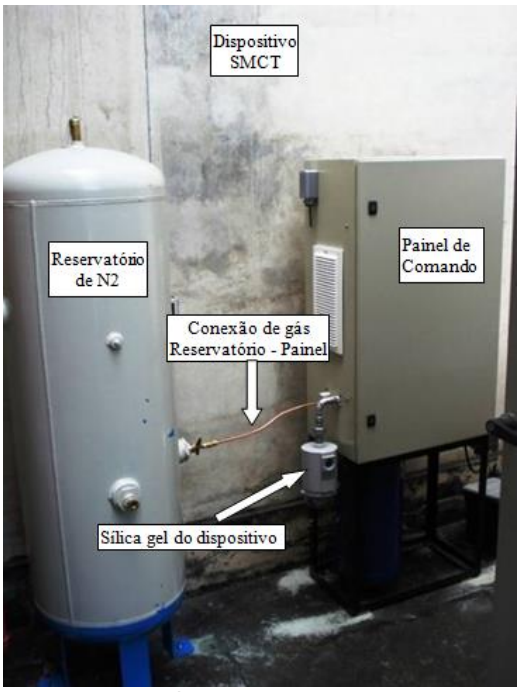

Figura 3 – Reservatório e Painel do Dispositivo.

B. Módulo de Secagem.

O módulo de secagem incorporado ao dispositivo de selagem retira umidade do isolamento sólido do transformador, através da secagem da atmosfera de Nitrogênio utilizada na selagem do mesmo.

O SMCT efetua o processo de selagem do transformador e controla a quantidade de nitrogênio (N2) dentro do tanque de expansão, mantendo sempre uma pressão interna estável no intervalo entre 0,2 e 15 mbar acima da pressão atmosférica.

Esse processo de injeção ou retirada de N2, dá origem a um fluxo de gás constante, em um ou outro sentido, entre reservatório de N2 e tanque de expansão do Transformador.

O módulo de Secagem incorporado ao SMCT efetua a secagem do fluxo de gás entre reservatório de N2 e tanque de expansão do transformador, proporcionando condições de secagem contínua da massa gasosa no sentido SMCT - Transformador ou Transformador - SMCT.

Em contato com a superfície do óleo no interior do tanque de expansão, o Nitrogênio retira umidade do óleo. Ao retornar ao reservatório de Nitrogênio, o gás passa pelo sistema de secagem, que retira a umidade presente. O mesmo procedimento se repete quando o gás sai do reservatório para inserção no tanque de expansão, garantindo assim que a massa gasosa utilizada para a selagem esteja sempre seca.

A câmara de secagem do SMCT é dotada inicialmente de um filtro coalescente (peneira molecular), que retira grande parte da umidade existente na atmosfera de N2 que passa por ela e também elimina compostos de vapores de óleo ou ácidos.

Num segundo estágio, a massa gasosa é aquecida e passa por um conjunto de "Módulos Peltier", que através de placas resfriadas de - 40 a - 60o C negativos; condensa e retira os vapores de água que a peneira molecular não conseguiu eliminar.

A temperatura da atmosfera de N2 na entrada da câmara de secagem é mantida acima de 35o C, para que sejam criadas condições adequadas para atingir um ponto de orvalho de – 40o C, tornando o processo de retirada de umidade mais eficiente.

A umidade retirada do gás durante a passagem pelo sistema de secagem é concentrada em um reservatório onde pode ser visualizada. Essa umidade retirada é medida, registrada e armazenada no banco de dados pelo dispositivo, antes de ser descartada.

O ciclo de passagem da massa de gás pelo módulo de secagem durante a operação do transformador é que possibilita retirar paulatinamente e de forma contínua, a umidade presente no óleo isolante do transformador e conseqüentemente no isolamento sólido.

A figura 3 a seguir, mostra o desenho do esquema funcional da câmara de secagem.

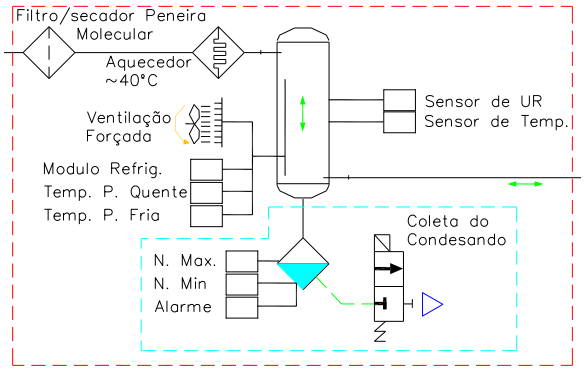

Figura 5 - Esquema Funcional – Câmara de Secagem.

Foram fabricados para os experimentos dois módulos de secagem, que incorporados aos dispositivos de selagem de transformadores, deram origem a dois protótipos de dispositivos de selagem e secagem de transformadores.

A Figura 4 a seguir mostra a disposição física de componentes do módulo de secagem no interior do dispositivo de selagem e secagem.

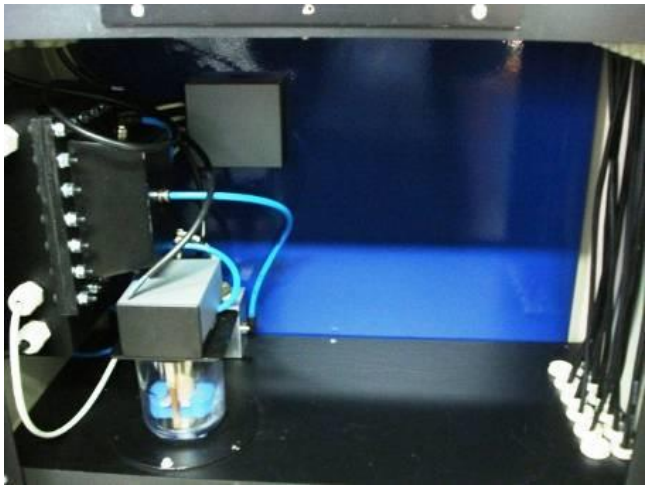

Figura 6 – Posicionamento e componentes do Módulo de Secagem.

O módulo de secagem está localizado na prateleira intermediária do painel de comando, controle e supervisão do SMCT. Nessa prateleira estão situados o módulo do sensor de umidade e temperatura da atmosfera de N2, o módulo de secagem, o reservatório de coleta da água condensada no processo e o purgador com bóias, dotado de hatch switcht

Na Figura 4 acima a caixa de cor preta é o módulo de secagem e nela está inserido o módulo de Peltier, que contém uma placa onde um dos lados fornece temperaturas elevadas e o outro lado fornece temperaturas negativas.

O fluxo de atmosfera de N2 que é inserido ou retirado do tanque de expansão, após passar pelo sistema de aquecimento é introduzido no módulo de secagem, passando pelo lado de temperaturas negativas da placa, onde a umidade contida no gás congela sobre a placa fria.

A placa fria atinge temperaturas negativas de até – 20º C e após a segunda solicitação consecutiva do sistema para inserir ou retirar gás do circuito de pressurização da atmosfera de N2 do trafo, o sistema de secagem inicia um período de trabalho de 90 minutos.

Se as solicitações de variação de pressurização permanecem atuantes dentro de determinados intervalos de tempo, o sistema de secagem permanece ligado durante os 90 minutos e após esse tempo, se desliga durante um período de 20 minutos para que o gelo formado sobre a placa fria se derreta pela troca de calor com o outro lado da placa que se mantinha aquecido.

A água formada pelo degelo da placa fria é transferida para o recipiente de recolhimento da água drenada. Durante esse período de degelo o secador fica fora de serviço e qualquer entrada ou saída de gás solicitada pelo sistema de pressurização para o tanque de expansão, é impedida de passar pelo módulo de secagem, para evitar que a atmosfera gasosa se contamine com a umidade que está sendo liberada pela placa fria. Nesse intervalo de tempo o gás que sai do reservatório de N2 para o tanque de expansão ou do tanque de expansão para o reservatório de vácuo, não passa pelo módulo de secagem.

Esse período de 90 minutos de funcionamento do sistema de secagem pode se reduzir automaticamente a apenas 30 minutos, se dentro de determinado intervalo de tempo o número de solicitações de variação de pressurização do sistema se tornar muito reduzido.

A caixa cinza na parede ao fundo é o módulo de determinação de umidade e temperatura da atmosfera de N2, onde se encontram instaladas as sondas de medição correspondentes. A outra caixa cinza vista sobre o recipiente transparente abriga fiações de conexão.

O recipiente transparente é o local de coleta da água resultante da secagem. Esse recipiente possui uma bóia com imã acoplado, que flutua sobre a água recolhida. À medida que o nível de água sobe a bóia também sobe, aproximando o imã da hatch switch. Quando o recipiente de coleta atinge seu volume máximo de coleta (118 ml), o imã aciona a hatch switch, a qual descarta a água do recipiente e informa ao CLP a conclusão da operação de descarte. O CLP acumula o registro dos descartes e totaliza o resultado do volume de água retirado.

Segundo Ano:

O segundo ano de realização do projeto foi iniciado com o transporte e instalação dos dois protótipos de dispositivos de selagem e secagem em campo. Os protótipos foram instalados em dois transformadores pilotos selecionados para o acompanhamento dos experimentos.

No período de acompanhamento foram coletadas amostras de óleo para ensaios físicos químicos e efetuadas leituras periódicas dos dados registrados pelo software instalado nos dispositivos de selagem e secagem.

As maiores dificuldades no transcorrer do projeto ocorreram no início do acompanhamento da instalação em campo.

Os dispositivos necessitavam de alimentação confiável, em tensão 220/127 VAC (1 circuito com 2 fases e outro com Fase e neutro) e no local verificou-se que a fonte disponibilizada não atendia os requisitos. Foi solicitada a fabricação de transformadores auxiliares para viabilizar a alimentação e isso provocou atrasos no início do acompanhamento de campo. Após colocação dos dispositivos em operação ocorreram bloqueios constantes dos mesmos por falta de alimentação alternada. A causa do problema demorou a ser identificada, visto que em todas as ocorrências o pessoal técnico da UHE informou não ter havido falta de alimentação alternada nos serviços auxiliares.

Para proteção dos transformadores em caso de qualquer falha nos dispositivos de selagem e secagem, os mesmos são dotados de proteção por eletroválvula, que bloqueia e retira de operação o dispositivo em caso de falha, e faz com que o sistema de conservação do transformador retorne à sua condição original de fábrica, com respiração através do depósito de sílica gel.

Serviços auxiliares em corrente alternada de UHEs, geralmente são alimentados em primeira instância, pelos próprios grupos geradores. Todavia, por motivos de segurança operacional, são estabelecidas fontes alternativas para os casos de paradas de máquinas ou ocorrências no sistema e para tal utilizam-se como segunda opção de alimentação, fontes alternadas de origem externa ou mesmo grupos geradores diesel, como terceira opção.

As transferências de alimentação entre essas fontes são realizadas de forma automática e com pique de tensão durante a troca de fonte, visto que as mesmas não trabalham em paralelo.

No caso dos dispositivos de selagem e secagem as eletroválvulas do sistema de proteção percebem essa falta instantânea de tensão, desligam e bloqueiam automaticamente os dispositivos, fazendo com que o transformador retorne às suas condições originais de respiração pela sílica gel.

Após desligamento os dispositivos necessitam ser desbloqueados para retorno à operação, porém como não foram instaladas sinalizações à distância, e os equipamentos se encontram distantes da área de circulação de pessoas, o pessoal técnico não fica sabendo que os mesmos se encontram bloqueados. Normalmente o dispositivo permanece bloqueado e sem registrar informações por longos períodos, até que seja providenciado seu desbloqueio e retorno à operação.

Para solucionar o problema do desbloqueio, os pesquisadores alteraram o software de controle, de forma a efetuar o reset automático dos bloqueios logo que confirmado o retorno da alimentação, fazendo com que os dispositivos retornem à operação.

A alternativa utilizada possibilita o retorno do equipamento à operação, mas não evita o bloqueio ocasionado pelo pique quando de transferências entre as fontes do serviço auxiliar em corrente alternada, visto que a proteção da eletroválvula não pode ser retirada, por ser uma condição de segurança para o transformador em caso de falha do dispositivo.

Na UHE onde se encontram instalados os transformadores pilotos, as solicitações de paradas de máquinas são constantes em virtude das programações do ONS. Dessa forma, as transferências entre fontes de serviços auxiliares ocorrem diariamente, ou até algumas vezes por dia, o que causa grande número de bloqueios nos equipamentos de selagem e secagem.

O bloqueio constante do dispositivo trás inconvenientes para o dispositivo, visto que a cada bloqueio, a pressão positiva de N2 contida no sistema de preservação se perde na atmosfera. Com isso a perda diária de N2 é bastante elevada e o gás existente no reservatório se esvai rapidamente, exigindo constantes reposições. Por esse motivo os dispositivos de selagem e secagem instalados nos transformadores pilotos selecionados foram bloqueados e mantidos fora de operação logo após o término dos experimentos.

Para que possam ser instalados em UHEs, os dispositivos de selagem e secagem necessitarão de alternativas de alimentação que possibilitem contornar as dificuldades verificadas com a utilização de alimentação em corrente alternada. Entre essas alternativas são citadas a alimentação em corrente contínua ou ainda em corrente contínua com utilização de inversores.

C. Ensaios de Laboratório.

Nas tabelas a seguir estão registrados os resultados dos ensaios de laboratório para os dois transformadores em acompanhamento.

Tabela 1 - Resultados de ensaios físicos químicos(TE2).

TE2 - ABB **Série 59936**	Unidade de medida	Amostra V0 24/07/12	Amostra V1 24/10/13	Amostra V2 11/12/13	Amostra Vf 21/02/14	Valor de Norma Óleo Mineral
1- Teor de água Medido	mg/kg= ppm	7	8	24	7	-
2- Teor de água corrig 20° C	mg/kg= ppm	-	6	18	6	8,0 máx.
3- FP a 100°C:	%	0,14	0,06	0,33	0,48	20,0 máx.
4- Rigidez Dielétrica calota	KV	75	72	49	75	50 Mín IEC
5- Indice de Neutralização	mgKOH/g	0,01	0,01	0,01	0,02	0,15 máx.
6- Tensão Interfacial a 25° C	mN/m	41,2	43,2	45,5	41,4	22 mín
7- Cor	-	0,5	0,5	1,0	0,5	-
8- Dens.Relativa 20/4 ° C	g/ml	0,890	0,891	0,888	0,890	0,900 máx.
9- Aspecto Visual	-	Límpido	Límpido	Límpido	Límpido	-

Como apresentado na tabela acima, as coletas de amostras de óleo para ensaios físicos químicos ocorreram nas datas de 24/07/2012 (V0), 24/10/2013 (V1), 11/12/2013 (V2) e 21/02/2014 (Vf).

A amostra V0 foi coletada no transformador TE2, antes da instalação do dispositivo de selagem e secagem no local. Tal amostra visava verificar o estado do fluído isolante do transformador antes da instalação do dispositivo de selagem e secagem. Nessa amostragem também foram efetuados ensaios de outros parâmetros do transformador (Cromatografia gasosa, Enxofre Corrosivo e PCBs), apenas para verificação de suas condições gerais de operação.

Verifica-se pela análise dos resultados dos ensaios físicos químicos obtidos nas diversas coletas, que de forma geral, os parâmetros em acompanhamento não apresentaram variações significativas nas amostragens efetuadas.

Na amostra V2, verificou-se presença de valores fora dos limites de Norma para os parâmetros "Teor de água" e "Rigidez Dielétrica". Na ocasião concluiu-se que os resultados sinalizavam para uma possível contaminação da amostra na coleta, ou mesmo falha de procedimento com esgotamento insuficiente do óleo a ser vertido antes da coleta.

Na amostragem seguinte (Vf) foi solicitada atenção especial na coleta, com emissão de alerta sobre a possibilidade de erro. Os resultados de laboratório registraram resultados normais, confirmando que realmente ocorreu alguma anormalidade com a amostra V2 coletada anteriormente.

Tabela 2 - Resultados de ensaios físicos químicos(TSA4).

TSA4 - Comtrafo **Série 213026**	Unidade de medida	Amostra V0 24/07/12	Amostra V1 24/10/13	Amostra V2 11/12/13	Amostra Vf 21/02/14	Valor de Norma Óleo Mineral
1- Teor de água Medido	mg/kg= ppm	19	16	9	16	-
2- Teor de água corrig 20º C	mg/kg= ppm	11	-	7	10	8,0 máx.
3- FP a 100°C:	%	0,10	0,16	1,25	0,69	20,0 máx.
4- Rigidez Dielétrica calota	KV	67	64	71	58	50 Mín IEC
5- Indice de Neutralização	mgKOH/g	0,03	0,03	0,02	0,03	0,15 máx.
6- Tensão Interfacial a 25º C	mN/m	31,5	30,5	38,5	30,9	22 mín
7- Cor	-	1	1	0,5	1	-
8- Dens.Relativa 20/4 º C	g/ml	0,887	0,888	0,890	0,888	0,900 máx.
9- Aspecto Visual	-	Límpido	Límpido	Límpido	Límpido	-

Para o TSA4 também foi coletada a amostra V0 antes da instalação do dispositivo de selagem e secagem no mesmo. Essa amostra inicial visava verificar o estado do fluído isolante do TSA4 antes da instalação do dispositivo de selagem e secagem. Nesse transformador também foram executados ensaios adicionais (Cromatografia gasosa, Enxofre Corrosivo e PCBs), visando verificar suas condições gerais de operação.

A análise dos resultados obtidos nas diversas coletas mostra que de forma geral os parâmetros em acompanhamento não apresentaram variações significativas de resultados nas amostragens efetuadas.

Os resultados obtidos no parâmetro "Teor de água" para as amostragens realizadas estão no limite de Norma, ou próximos dele. Tais valores indicam que o fluído isolante desse transformador necessita de tratamento para redução do teor de água e deve ser acompanhado com maior atenção.

O período de acompanhamento dos dispositivos ainda é muito pequeno para que os fluídos isolantes dos transformadores apresentem variações significativas de degradação dos parâmetros medidos.

D. Medições de Campo.

Os dados de campo foram obtidos a partir de leituras dos registros do software de acompanhamento instalado nos dispositivos de selagem e secagem.

As leituras dos parâmetros em acompanhamento foram registradas em intervalos de 15 minutos durante o período em que os dispositivos permaneceram em operação. Apesar dos curtos períodos de acompanhamento registrados nas medições, a quantidade de registros obtida é bastante grande, o que não possibilita sua apresentação total em tabelas ou neste artigo.

Em vista disso, foram exemplificados em tabelas, apenas alguns dados de início e final de períodos medidos e algumas situações em que os registros fornecem informações de maior importância.

Os períodos onde foram obtidos registros de dados são apresentados nas tabelas a seguir para o TE2 e TSA4.

Tabela 3 - Ocorrências com o dispositivo do TE2.

Data	Hora	Press.Atm N2 em mbar	Press. Reserv. N2 em mbar	Temp. Amb. ºC	Temp. Atm. N2 em ºC	UR Atm. N2 em %	Observações
15/06/13	11:44	12,40	4,20	24,90	24,20	29,10	Início
15/06/13	14:29	14,30	4,40	26,10	27,00	16,20	Bloqueio
18/06/13	14:59	10,60	4,30	26,70	26,40	17,50	Reativado
18/06/13	17:44	3,40	3,90	24,70	26,70	49,00	Bloqueio
19/06/13	08:44	0,80	3,90	23,60	23,30	69,20	Reativado
19/06/13	09:59	7,10	3,90	24,40	25,20	68,90	Bloqueio
17/07/13	14:14	2,20	3,90	31,00	27,20	73,50	Reativado
17/07/13	14:44	3,30	3,90	27,40	28,10	73,50	Bloqueio
19/07/13	14:14	1,20	3,80	33,80	27,60	72,20	Reativado
19/07/13	22:44	5,60	2,90	22,60	29,10	28,10	Bloqueio
31/07/13	10:44	4,90	2,90	23,70	22,80	67,90	Reativado
31/07/13	17:59	5,00	3,00	24,90	31,50	22,20	Bloqueio
09/11/13	14:44	6,90	3,00	28,60	28,60	17,20	Reativado
11/11/13	11:59	4,00	0,50	23,30	27,70	21,50	Bloqueio
11/12/13	15:59	8,50	0,50	29,8	30,90	15,60	Reativado
11/12/13	17:29	10,70	**0,10**	28,70	30,50	15,60	Bloqueio
16/01/14	09:45	-	-	-	-	-	Inserido gás. Não reativado
21/02/14	11:00	-	-	-	-	-	Bloqueio pela equipe.

Tabela 4 - Ocorrências com o dispositivo do TSA4.

Data	Hora	Press.Atm N2 em mbar	Press. Reserv. N2 em mbar	Temp. Amb. ^{O}C	Temp. Atm. N2 em ^{O}C	UR Atm. N2 em %	Observações
15/06/13	10:45	0,80	3,9	25,8	25,5	84,1	Início
15/06/13	14:29	9,6	4,1	32,2	29,9	75,2	Bloqueio
18/06/13	14:44	10,5	4,0	29,8	29,7	53,6	Reativado
18/06/13	17:44	4,1	3,9	26,4	27,8	61,3	Bloqueio
19/06/13	08:44	2,0	3,9	23,9	24,2	74,8	Reativado
19/06/13	09:59	6,8	3,9	24,9	25,9	74,2	Bloqueio
17/07/13	13:44	4,1	4,0	37,9	29,7	72,5	Reativado
17/07/13	14:29	3,4	4,0	30,4	29,9	63,9	Bloqueio
18/07/13	14:14	1,10	3,8	23,9	25,6	73,8	Reativado
18/07/13	22:29	7,1	3,8	21,9	23,8	62,9	Bloqueio
19/07/13	13:59	2,3	4,0	40,0	31,0	70,2	Reativado
19/07/13	22:44	3,1	3,8	23,1	25,0	50,0	Bloqueio
14/12/13	12:59	3,8	1,8	30,5	30,6	52,0	Reativado
09/01/14	23:44	2,00	0,4	23,6	25,9	43,0	Bloqueio
16/01/14	09:44	6,6	4,5	27,4	26,5	77,5	Inserido Gás e Reativado
21/02/14	10:44	11,3	2,1	28,7	29,7	45,7	Bloqueio pela equipe.

As tabelas acima registram os períodos de entrada e saída de operação dos dispositivos durante o acompanhamento.

Nelas pode-se verificar que a quantidade de registros obtidos para o TE2 é pequena, visto que depois de colocado em operação, o dispositivo sofreu diversos bloqueios por transferência de alimentação entre fontes dos serviços auxiliares e posteriormente por baixa pressão de N2 no reservatório, com prejuízos na aquisição de dados. Dessa forma, para o TE2, foram obtidas apenas leituras de períodos diários.

Para o TSA4, após ajustado o software para amenizar o problema de bloqueio durante transferências entre fontes de alimentação dos serviços auxiliares, foram obtidos registros dos períodos de 14/12/13 a 09/01/14 e de 16/01/14 a 21/02/14.

Para o TE2, apesar de ter sido amenizado o problema de bloqueio do dispositivo por "pique" na alimentação alternada, o mesmo sofreu bloqueio dois dias após o retorno à operação, por baixo nível de gás no reservatório. Essa perda de pressão no reservatório foi motivada pelos constantes bloqueios do dispositivo (mesmo com o ajuste do software para retorno à operação), visto que nessas ocasiões o gás N2 sob pressão contido nas tubulações do sistema de conservação, eram drenados para o ar atmosférico. Em 16/01/14, foi complementado o volume de gás no reservatório desse dispositivo, porém, o mesmo permaneceu bloqueado e fora de operação porque as ações para sua reposição no sistema não foram executadas corretamente.

O TSA4 permaneceu em operação após o ajuste do software para amenizar o bloqueio do dispositivo por "pique" na alimentação alternada até 09/01/14, quando sofreu bloqueio por baixo nível de gás no reservatório. Em 16/01/14, foi complementado o nível de gás no reservatório, e o mesmo retornou à operação normal.

Para o TE2 essa curva também foi gerada com os dados obtidos, porém como nesse caso o volume de dados era muito pequeno e os períodos de aquisição muito espaçados, a curva gerada não era muito significativa.

O software foi programado para realizar a armazenagem das informações coletadas periodicamente a cada 15 minutos, gerando uma quantidade significativa de dados para avaliação dos resultados.

Os dados coletados para o TSA4 foram inseridos no software de análise do dispositivo de selagem e secagem e os resultados geraram a curva característica da variação da umidade absoluta da atmosfera de N2 durante o período de atuação do dispositivo.

A figura 7 abaixo apresenta a curva característica da variação da umidade absoluta da atmosfera de N2, para o TSA4.

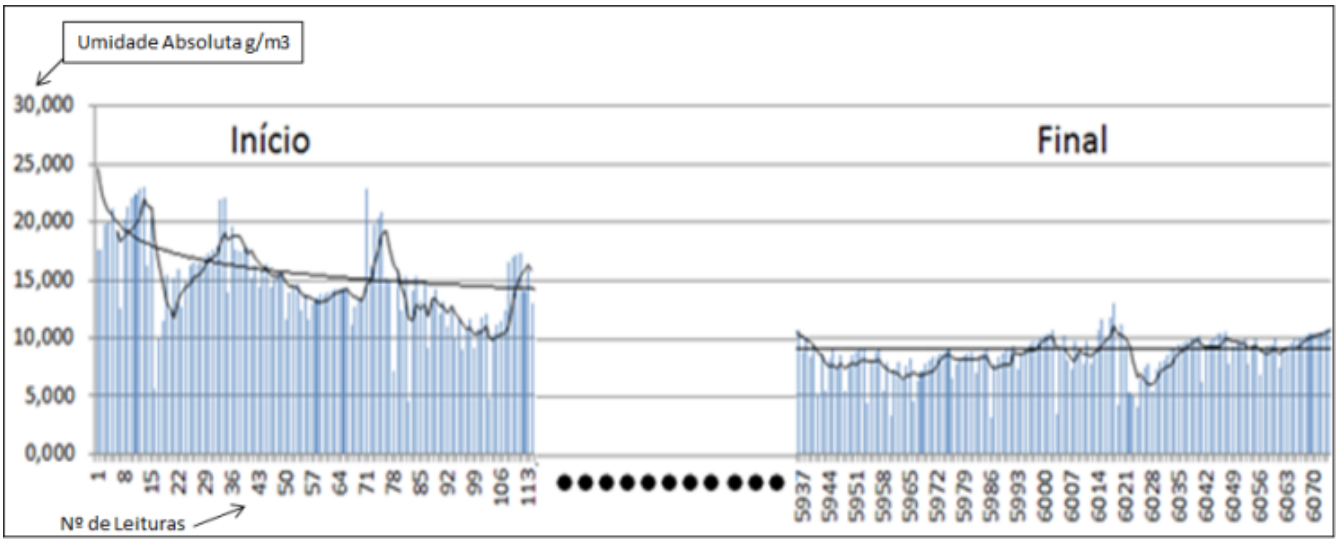

Figura 7 – Leituras TSA4 (Umidade Absoluta na atm de N2 – g/m3)

IV. CONCLUSÕES

Foi desenvolvido módulo de secagem para incorporação em dois equipamentos protótipos de dispositivos de selagem e secagem de transformadores, destinados à instalação nos transformadores TE2 e TSA4 da UHE Itapebi.

Os módulos de secagem e os protótipos foram estudados, projetados e desenvolvidos pelos pesquisadores do projeto e exaustivamente ensaiados e testados em laboratório antes de sua instalação em campo.

Os ensaios físicos químicos do óleo dos transformadores em acompanhamento apresentaram resultados normais no período.

A análise resultante do software em utilização mostrou que a umidade absoluta da atmosfera de N2 ao longo do período de acompanhamento sofreu redução paulatina de valores à medida que o modulo de secagem permanecia operando, conforme demostrado na curva característica de umidade absoluta da atmosfera de N2, mostrada na figura 7.

Como a atmosfera de N2 está em contato com a superfície do óleo isolante e absorve a umidade do mesmo, a passagem dessa atmosfera de N2 pelo módulo de secagem, promove indiretamente a secagem do óleo isolante.

Em vista dos protótipos terem apresentado desempenho dentro do esperado, na redução do teor de umidade do óleo isolante, pode-se afirmar que o módulo de secagem desenvolvido para o projeto, é viável tecnicamente.

V. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] McNUTT, W.; BASSETTO F., A.; GRIFFIN, P. Tutorial on Electrical-Grade Insulating Papers in Power Transformers. 1993 Doble Clients Committees Fall Meeting.

[2] GRIFFIN, PJ. Water in Transformers – so What. National Grid Conference on Condition Monitoring in High Voltage Substations, Dorling, maio 1995.

[3] OOMMEN, T.V.; PETRIE, E.M.; LINDGREN, S.R. Bubble Generation in Transformer Windings under Overload Conditions. Proceedings of the Sixty-second Annual International Conference of Doble Clients, 1995, sec. 8.5.

[4] DAVYDOV, V.G.; ROIZMAN, O.M.; BUNWICH, W.J. Transformer Insulation Behavior during Overload. Proceedings of EPRI Substation Equipment Diagnostics Conference, New Orleans, 1997.

[5] MAK, J. Influência da Cor na Temperatura de Operação de Transforma-dores, CPFL, ago, 1979.

[6] MONTSINGER, V.M. & WETHERILL, E L. Manual Standard del Ingeniero Electricista, A.E. Knowlton, v. 1, p. 683 – 704, 1930.

[7] IEEE A Guide for Evoluating the Effect of Solar Radiation on Outdoor Metal - Clad Switchgear, no. 144.

[8] ABNT Procedimentos para Carregamento de Transformadores de Potência, NBR 5416/97, 1997.

[9] GRIFFIN, P.J.; SOKOLOV, V.; VANIN, B. Moisture Equilibrium and Moisture Migration within Transformer Insulation System, CIGRE SC12 "Transformer" Colloquium, Budapeste, julho 1999.

[10] DU, Y.; ZAHN, M.; LESIEURE, B.; MAMISHEV, A.; LINDGREN, S. Moisture Equilibrium in Transformer Paper-Oil System, IEEE Electrical Insulation Magazine, jan/fev. 1999, v.15, n.1

[11] OOMMEN, T.V. On-Line Moisture Monitoring in Transformers and Oil Processing Systems. CIGRE Symposium, Berlin, 1993, Paper 110-03.

[12] KAUFMAN, R.B.; SHIMANSKY, C.; MC FADIEN, E.J. Gas and Moisture Equilibrium in Transformer Oil, Transactions AIEE, 1955, v.74, p.111.

[13] SOKOLOV, V.; VANIN, B.; GRIFFIN, P.J. Tutorial on deterioration and Rehabilitation of Transformer Insulation, CIGRE WG 12.18 "Life Management" Colloquium, Lodz, Polônia, 1998.

[14] MCNUTT, W. J.; ROUSE, T. O.; KAUFMANN, G. H. Mathematical modelling of bubble evolution in transformers, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, fev. 1985, v. PAS-104, n. 2.

[15] SUBCOMITÊ DE MANUTENÇÃO. "Influência dos sistemas de preservação na vida útil dos óleos isolantes e equipamentos elétricos" Capítulo 4 do Volume 1 do relatório do GCOI.SCM.CFQ.006 - Informe do 8º encontro técnico do CFQ e SCM.GTMS.022 - Informe do 22º Encontro Técnico do GTMS.

[16] OSAKA TRANSFORMER CO. LTD. "Oil Deterioration Preventing Devices for Transformers" - Catálogo Técnico - Technical Features.

[17] MOSER, H. P. - "Transformerboard" Special print of Scientia Electrica – Vermont, U.S.A.

[18] MILASCH, Milan -. "Manutenção de transformadores em líquido isolante" 4ª reimpressão-1993 - Editora Edgard Blücher Ltda.

[19] NOGUEIRA, J. M. e JERMOLOVICH, L. A. - "Química Orgânica" - Escola de Engenharia Mauá.

[20] MANO, Eloísa Biasotto - "Introdução a Polímeros" - 4ª reimpressão 1990 - Editora Edgard Blücher Ltda.

[21] PERRY, Robert H. - "Chemical Engineers Handbook" Fifth Edition - McGraw Hill Kogakusha, Ltd..

[22] Regulamento Técnico CNP 06/79 - Revisão 2

[23] Portaria DNC Nº 46/94.

[24] BASSETTO F., A. et al. - "Diagnostic assessment of the condition of insulating systems in power transformers." in: SUBSTATION EQUIPAMENT DIAGNOSTICS CONFERENCE 8, Nova Orleans 1999. Anais. Palo Alto, EPRI, 1999, 9 p.

[25] BASSETTO F., A. et al. - "Effects of preservation systems on the condition of the insulating systems in power transformers." C. TECHCON 99 - Nova Orleans, 1999. Anais. Sacramento TJ/H2B 1999, 11 p.

[26] BASSETTO F., A. e MAK, J. - "Maintenance practices to improve loading and to extend life of power transformers." in: TECHCON 96 Nova Orleans, 1996. Anais. Sacramento, TJ/H2B 1996, 9 p.

[27] BASSETTO F., A. e MAK, J. - "Medidas que podem dobrar a vida útil de transformadores de potência." - Eletricidade Moderna, v. 258, p. 28, julho, 1.995.

[28] SUNDIN, D. W. - "Biologic Decomposition of Liquid Dielectrics." Elektrik Magazine, (publicação da União Russa de Engenheiros de Sistemas de Potência).Moscou, fevereiro,1.992.

[29] BASSETTO F., A. et al. - "How the products from insulating oil degradation can affect the life of power trans-

formers." in: CIGRÉ SESSION, Paris, 1992. Anais, Paris, CIGRÉ, 1.992, paper nº 12-104.
[30] CLARK, F.M., - "Factors Affecting the Mechanical Deterioration of Cellulose Insulation." AIEE Transactions, vol.61, Oct.1942, pp. 742-749.
[31] MORYAMA, A., - "Selagem de Transformadores - Um tópico de Engenharia". Relatório Técnico, Frontenge, São Paulo, Jun 2002, 120 p.
[32] LAMPE, W. et al. - "Continuous Purification and Supervision of Transformer Insulation systems in service."
[33] SOKOLOV, V.; BASSETTO F., A. e MAK, J. – "Estudo sobre a influência da umidade na possibilidade de falhas de transformadores" Elektro - Julho 2000, 46 p.
[34] 11-07-RTecE1-CGTI-ITA 08-2010-Modulo Secagem A1-01-rev00.
[35] 11-10-RTecE2-CGTI-ITA 08-2010-Modulo Secagem A1-02-rev00.
[36] 11-11-RTecE3-CGTI-ITA 08-2010-Modulo Secagem A1-03-rev00.
[37] 12-01-RTecE4-CGTI-ITA 08-2010-Modulo Secagem A1-04-rev00.
[38] 12-06-RTecE5-CGTI-ITA 08-2010-Modulo Secagem A1-05-rev00.
[39] 12-07-RTecE1-CGTI-ITA 08-2010-Modulo Secagem A2-01-rev01.
[40] 14-02-RTecE2-CGTI-ITA 08-2010-Modulo Secagem A2-02-rev00.
[41] 14-02-RTecE3-CGTI-ITA 08-2010-Modulo Secagem A2-03-rev00.
[42] 14-03-RTecE4-CGTI-ITA 08-2010-Modulo Secagem A2-04-rev00.
[43] 14-03-RTecE5-CGTI-ITA 08-2010-Modulo Secagem A2-05-rev00.