



XVI SNTPEE
Seminário Nacional de Produção e
Transmissão de Energia Elétrica

GRUPO VIII
GRUPO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS (GSE)

GSE/022

21 a 26 de Outubro de 2001
Campinas - São Paulo - Brasil

**MONITORAMENTO E SISTEMA ESPECIALISTA PARA DIAGNÓSTICO
DE EQUIPAMENTOS DE SUBESTAÇÕES**

Humberto A P Silva
Ary Junqueira Filho
Renato S. Cunha
IEE/USP

José Aquiles Baesso Grimoni
Eduardo Pellini
André Hyuti Hirakawa
EPUSP

RESUMO

É apresentado neste trabalho um sistema de monitoramento de disjuntores e transformadores, cujos protótipos já estão instalados em áreas piloto das subestações das concessionárias do convênio de cooperação e desenvolvimento com o IEE/USP. O monitoramento fornece subsídios para o sistema especialista, em implementação, que propiciará avaliações preditivas e favorecerá o gerenciamento coordenado e planejado da manutenção e da operação. Isto diminuirá sensivelmente o grau de interrupções não programadas no fornecimento de energia elétrica e conseqüentemente, intervenções menos onerosas para recuperação de equipamentos.

PALAVRAS-CHAVE

Subestação, Transformador, Monitoramento, Sistema Especialista, Disjuntor.

1.0 INTRODUÇÃO

A CESP, CPFL e CTEEP, juntamente com a EPTE, CGEET e Bandeirante possuem um convênio com o IEE/USP para desenvolver e implantar sistemas de monitoramento de equipamentos com um sistema especialista. O objetivo principal é conhecimento do estado físico do equipamento e o diagnóstico da evolução do desgaste, de forma a ter a informação antecipada de quando o equipamento necessitará de manutenção, e/ou informar se alguma condição momentânea operativa deixará seqüelas graves no equipamento.

2.0 SISTEMA DE MONITORAMENTO

A Figura 1 mostra a arquitetura do sistema de monitoramento, identificando-se em blocos, os sensores, unidades de aquisição de cada equipamento e os computadores das subestações e do escritório central.

2.1 Monitoramento de Transformadores

São monitoradas as seguintes grandezas analógicas e digitais do transformador: tensões de fase, correntes de fase, temperaturas (enrolamento, óleo, ambiente e tanques), gases dissolvidos no óleo, nível de óleo

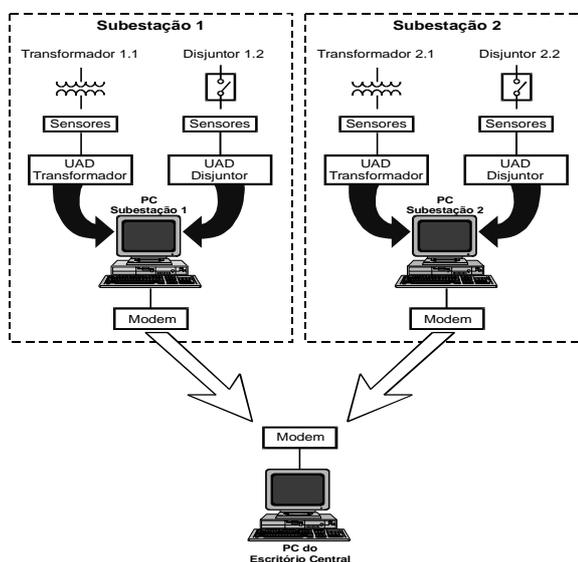


Fig 1 – Arquitetura do sistema de monitoramento

e posição do TAP. Também é feita a oscilografia da corrente do comutador. Além disso, são registradas grandezas digitais, como por exemplo, atuação de ventiladores, alarmes, etc.

2.2 Monitoramento de Disjuntores

No disjuntor são monitoradas as seguintes grandezas analógicas: pressão (ar comprimido, sist. hidráulico, SF6) e a temperatura ambiente. Os sinais monitorados para as grandezas digitais englobam os principais contatos auxiliares de comando. As oscilografias rápidas são realizadas para as seguintes grandezas: correntes de fase, bobina de abertura, fechamento e de segurança, pressão dos pólos e percurso dos contatos dos pólos. E para a oscilografia lenta, a corrente do motor do sistema de acionamento.

2.3 Unidades Protótipos

Para viabilizar o desenvolvimento de um efetivo Sistema Especialista, foram escolhidos estrategicamente equipamentos e subestações onde seriam instalados os protótipos de Sistema de Monitoramento. Foram escolhidos:

- SE Cabreúva - CTEEP
Transformador TR-6, 138/13,8kV, 12,5MVA
Disjuntor 440 kV do reator 2
- SE Campinas-Centro - CPFL
Transformador 22610, 138/11,95kV, 50MVA
Disjuntor 138 kV do transformador
- SE ETT Nordeste - EPTE
Unidade do banco de transformador de 345-138kV.

3.0 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Foi desenvolvido pelo IEE/USP um sistema de aquisição de dados de equipamentos de subestações elétricas de potência, que permite a leitura e registro de grandezas analógicas e digitais em tempo real. Esse sistema é composto por dois módulos: O módulo de aquisição e o módulo de supervisão.

- Módulo de aquisição: é composto pelas UADs (Unidades de Aquisição de Dados), equipamentos responsáveis pela leitura e registro das variáveis monitoradas. Esses equipamentos são instalados no pátio próximos aos equipamentos monitorados, dentro de armários apropriados, com blindagem eletromagnética. Possuem autonomia de armazenamento local das leituras realizadas, permitindo que o equipamento funcione mesmo na ausência de comunicação com o módulo de supervisão.
- Módulo de supervisão: é composto pelos programas supervisórios executados na estação servidora, instalada na sala de comando da SE, e é responsável pela tarefa de transferência dos dados armazenados nas UAD's, para o Banco de dados do Sistema de Monitoramento, localizado no EC.

A comunicação entre os dois módulos é realizada através de um canal de comunicação serial, utilizando fibra ótica como meio físico, o que garante um alto grau de imunidade eletromagnética, evitando problemas na comunicação. As variáveis monitoradas foram divididas em quatro grupos, conforme suas características e forma de amostragem:

- Eventos digitais lentos – variáveis tipicamente binárias, com tempo de acionamento lento.
- Eventos digitais rápidos – variáveis tipicamente binárias, com taxa de amostragem de até 1ms.
- Leituras analógicas – variáveis tipicamente analógicas (tempo contínuo), que possuem constante de tempo relativamente grande, podendo ser aquisitadas a cada minuto, sem perda de informação pela baixa taxa de amostragem.
- Oscilografia rápida – variáveis tipicamente analógicas (tempo contínuo), para registro da forma de onda, sendo disparadas pelo cruzamento de limites pré-programados. Frequência de amostragem de 5KHz e duração de 2s.
- Oscilografia lenta – variáveis tipicamente analógicas (tempo contínuo), para determinação da curva

característica do acionamento de motores. Frequência de amostragem de 100 Hz e duração de 13s.

Na primeira etapa do sistema foram desenvolvidos dois tipos de UADs: a UAD de transformador baseada em um CLP (Controlador lógico programável), que permite a aquisição de variáveis: analógicas, eventos digitais lentos e oscilografia lenta; e a UAD de disjuntor baseada em um computador industrial IBM-PC compatível, que permite a aquisição de variáveis: analógicas, eventos digitais, oscilografia rápida e oscilografia lenta.

3.1 Banco de Dados do Monitoramento

Foi desenvolvido pelo IEE/USP um banco de dados relacional, intitulado "Monitoramento", para armazenamento das informações do sistema e fisicamente implementado utilizando-se o MS-SQL Server, "rodando" em uma plataforma Windows NT. O banco de dados é executado localmente em cada SE e posteriormente replicado para o EC, através do mecanismo de réplica, também desenvolvido pelo IEE. O módulo de banco de dados é composto pelos gerenciadores MS-SQL Server (SE's e EC), os programas de suporte (MI-Monitor e MI-Config) e o mecanismo de réplica.

O MI-Monitor é o programa de visualização dos dados armazenados, permitindo a consulta parametrizada dos dados e a visualização na forma tabular ou gráfica das informações.

O MI-Config é o programa para edição de dados cadastrais dos equipamentos e das configurações para as UADs.

Mecanismo de réplica é o conjunto de aplicativos, scripts e arquivos de batch que são utilizados no processo de transferência das informações entre o servidor da SE e o servidor do EC, utilizando a linha telefônica.

4.0 SISTEMA ESPECIALISTA

A base que fornece subsídios ao Sistema Especialista (SESPEC), detalhado na figura 2, é o Sistema de Monitoramento descrito no item 2.0, acrescido de dados obtidos *off-line* pelas concessionárias ao longo da vida do equipamento.

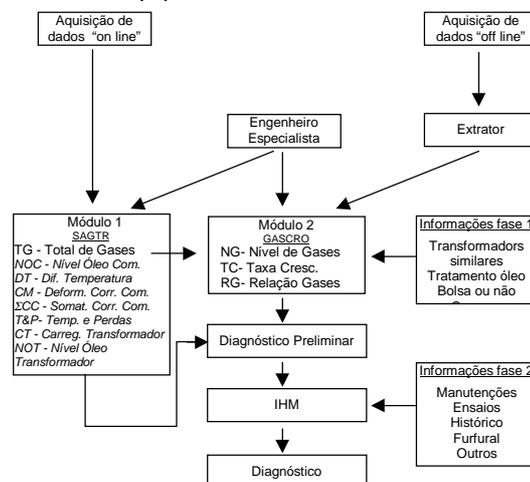


Fig. 2: Fluxograma de Processo SESPEC.

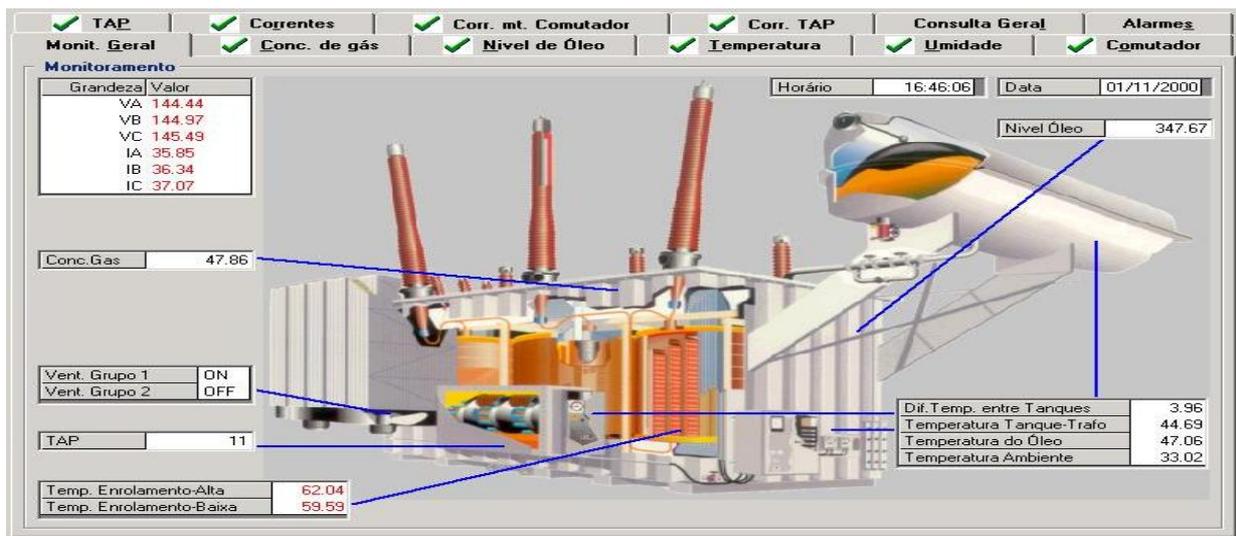


Fig. 3. Tela geral do SAGTR (Sistema de Análise de Grandezas em Tempo Real)

Desta forma, criou-se uma estrutura que aglutina em dois grupos, Módulo 1 para as grandezas *on-line*, e Módulo 2, para as grandezas *off-line*, que são incorporadas ao Módulo de Aquisição do Conhecimento do Sistema Especialista em forma de “fatos” (informações estáticas ou dinâmicas incondicionais sobre o processo).

O sistema especialista que incorpora os módulos 1 e 2 é acionado de três maneiras:

- Pelo especialista humano;
- Pelo sistema *on-line*;
- Pelo sistema *off-line*.

Estas informações ficam disponíveis ao usuário especialista para consultas a fim de se correlacionar defeitos nos equipamentos em diversas situações; e podem auxiliar no processo de otimização das rotinas do sistema especialista.

No módulo interface homem-máquina, o relatório com diagnóstico preliminar (gerado com a combinação dos três parâmetros *a*, *b* e *c*), é analisado pelo especialista que faz inferências no banco corporativo (módulo informação fase 2). Nesta parte são consultados: ensaios elétricos, históricos de deslocamentos, datas de energização e desligamento, carregamentos, ocorrências com o transformador ou com a subestação, alimentadores, manutenções preventivas ou corretivas efetuadas, cromatografia líquida, eventuais problemas com equipamentos similares, reparos em fábrica, ensaios físico-químicos do óleo isolante, particularidades do local de instalação do transformador e quaisquer outras informações que o especialista julgar necessário.

Nos itens a seguir estão apresentados os elementos que compõem o Sistema Especialista aplicável ao transformador. Para o disjuntor, os módulos similares encontram-se em fase de desenvolvimento.

O Sistema de Análise de Grandezas com Medições em Tempo Real (SAGTR) é implementado com estrutura operacional de tempo real e executado no computador da subestação, cuja tela inicial é mostrada na figura 3. O objetivo deste módulo é permitir que as

variáveis medidas em campo, através do Sistema de Aquisição de Dados, possam ser analisadas, possibilitando a geração de sinais de alerta quando os eventos ou valores estejam além da faixa de operação normal.

4.1 Módulo 1 - Sistema de Análise de Grandezas com Medições em Tempo Real (SAGTR).

Estes sinais de alerta possuem vários níveis de severidade, e uma vez ultrapassado o primeiro nível, já é possível fazer projeções no tempo, com base nas taxas de progressão computadas, para previsão de eventuais iminentes problemas no equipamento. A projeção do comportamento de cada variável é obtida através da aplicação de uma regressão linear de janela variável. Isto porque cada grandeza monitorada possui uma constante de tempo diferenciada e, além disso, o comportamento pode variar com o período do dia, o dia da semana ou a estação do ano, entre outros fatores.

Para a análise do transformador, o SAGTR possibilita a verificação e a projeção em forma de tendências para as seguintes variáveis:

- Diferencial de Temperatura entre os Tanques do Transformador e Comutador;
- Deformação da Corrente do Motor do Comutador;
- Somatório das Correntes Comutadas ao Quadrado;
- Medição Total de Gases;
- Medição do TAP do Comutador;
- Nível de Óleo do Tanque do Comutador;
- Medição da Umidade Relativa no Óleo do Tanque do Transformador;
- Determinação das Temperaturas dos Enrolamentos Primário e Secundário e Perda de Vida do Transformador;
- Análise de Carregamento do Transformador;
- Nível de Óleo do Tanque do Transformador.

Como exemplificado nas figuras 4 e 5, cada uma das variáveis pode ser apresentada em forma de gráfico, com opção para exibição em Tabela, permitindo uma análise detalhada, em tempo real, bem como verificações dos valores históricos através da opção de Consulta.

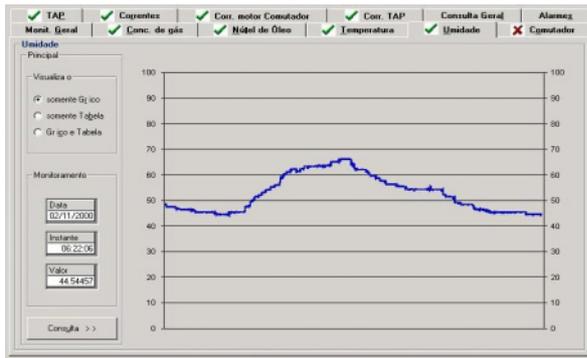


Fig. 4. Tela de visualização das grandezas monito-radas. Equip.: Transformador - Opção: Umidade.

As sinalizações de Níveis de Alertas de cada variável são apresentadas em uma janela específica de status, projeções e tendências.

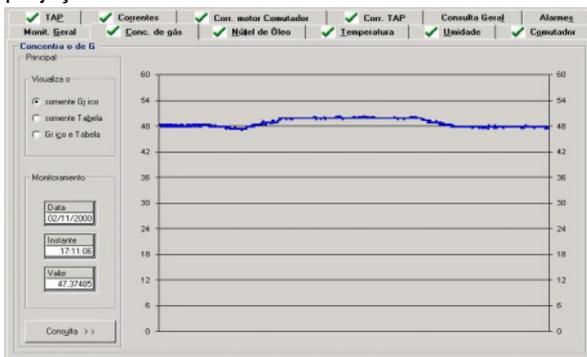


Fig. 5. Tela de visualização das grandezas monito-radas. Equip.: Transformador - Opção: Conc. Gases.

O conteúdo destas janelas também são armazenados em arquivos no formato texto para gerar relatórios e registrar os eventos, incorporado-os ao Módulo de Aquisição do Conhecimento do Sistema Especialista.

4.2 Módulo 2 - Sistema de Análise Cromatográfica de Gases (GASCRO).

O programa utiliza, nas amostras de cromatografia gasosa, critérios de diagnósticos tradicionais aliados ao uso de lógica difusa (Fuzzy) e Sistemas Especialistas. Os resultados são apresentados através de relatórios completos contendo os níveis dos gases dissolvidos, taxas de crescimento, comentários do sistema especialista de regras e gráficos.

O programa também fornece informações a um banco de dados contendo todos os diagnósticos efetuados e índices associados, constituindo uma ampla base de conhecimento que pode ser usada para correlacionar com maior precisão os defeitos e suas principais causas e apontadores.

4.2.1 O Programa

O software GASCRO foi desenvolvido com os seguintes compromissos:

- Interagir com uma base de dados contendo os dados dos transformadores, cromatografias realizadas e ocorrências registradas em cada unidade;
- Possuir interface intuitiva e amigável com o usuário;

- Realizar o diagnóstico a partir da escolha de duas amostras de cromatografias de um determinado transformador, utilizando critérios de diagnóstico tradicionais;
- Efetuar o diagnóstico atual e diagnósticos preventivos (prognóstico) de defeitos no equipamento, analisando os níveis, taxas de crescimento e relações entre os gases;
- Permitir a interação do usuário especialista no procedimento de diagnóstico;
- Possuir um método de 'personalização' da rotina de diagnóstico para adequar o programa à metodologia particular de uma dada empresa;
- Gerar relatórios com todos os dados pertinentes ao diagnóstico para posterior impressão e análise;
- Armazenar os diagnósticos já efetuados no Módulo de Aquisição do Conhecimento do Sistema Especialista.

A estrutura deste módulo é mostrada na figura 7.

A seguir comenta-se com mais detalhes cada elemento desta estrutura. Na figura 6, mostra-se a janela principal do programa, onde o usuário deve selecionar o transformador desejado para ser efetuado o diagnóstico.

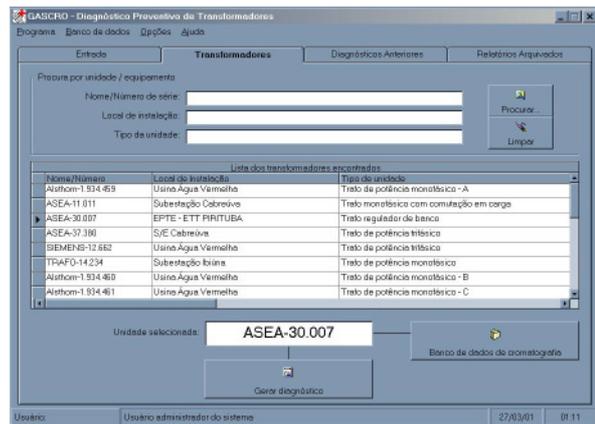


Fig. 6. Tela principal do programa GASCRO onde é feita a seleção do equipamento para análise.

2.2 Banco de Dados do Gascro

O programa opera com dados provenientes de um banco de dados MS-SQL Server, rodando sob MS-Windows NT 4.0, onde são armazenadas todas as informações pertinentes ao sistema especialista de diagnóstico. Estas informações podem ser fornecidas manualmente a partir da interface do programa, ou automaticamente, através de 'extratores' que retiram as informações necessárias a partir do banco de dados corporativo das empresas.

As informações contidas no banco de dados são:

- Cadastro dos transformadores;
- Cadastro das cromatografias de cada transformador;
- Cadastro de ocorrências em cada transformador;
- Base de conhecimento do software.

O cadastro de transformadores armazena os dados de cada equipamento, tais como: nome, número, tipo, dados do fabricante, quantidade de óleo e presença de ligação entre tanque e comutador de derivações.



Fig. 7. Estrutura do software GASCRO de diagnóstico preventivo de transformadores de potência.

No banco de dados de cromatografias são armazenados os registros dos gases dissolvidos provenientes das análises cromatográficas do óleo isolante de cada trafo. Os gases considerados são: H₂, O₂, N₂, CO, CO₂, CH₄, C₂H₂, C₂H₄ e C₂H₆, além do registro de leitura do sensor Hydran presente no transformador monitorado. No banco de dados de ocorrências constam todas as intervenções efetuadas na unidade: desde manutenções rotineiras, até paradas para regeneração do óleo, lavagem do tanque, emergências, atuações de proteções e relações de diagnósticos já efetuados no passado. Na base de conhecimento são armazenados todos os diagnósticos já realizados pelo programa, juntamente com os índices e relações que apontaram tal diagnóstico. Esta base de conhecimento é manipulada diretamente pelo programa.

4.2.3 Consultas à Base de Dados

O programa GASCRO possui ferramentas próprias para consulta manual a todas as bases de dados ligadas ao software. O usuário pode resgatar todos os dados de determinada unidade, verificar diagnósticos já processados, consultar a base de conhecimento e acessar todos os relatórios já gerados pelo programa. A figura 8 mostra uma consulta ao banco de dados de

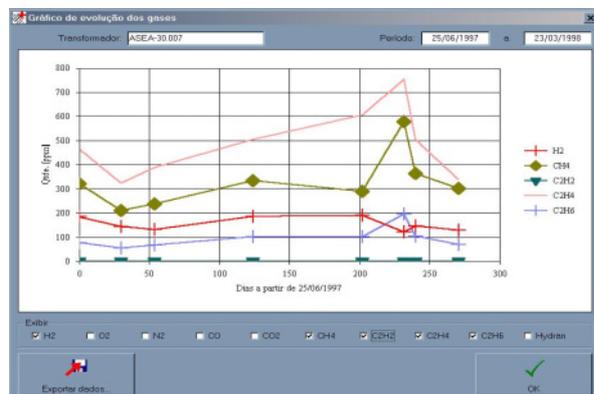


Fig. 8. Gráfico de evolução dos gases dissolvidos cromatografia de um determinado transformador em forma de um gráfico de evolução dos gases dissolvidos.

Além da consulta manual, a janela principal pode 'disparar' o procedimento de diagnóstico para a unidade selecionada.

4.2.4 Execução de Diagnósticos

Inicialmente o usuário deve selecionar duas amostras de cromatografias do óleo presentes no banco de dados. Estas cromatografias possuem os níveis dos gases dissolvidos em partes por milhão (ppm), além da data e do ponto de retirada da amostra (registro superior, registro inferior, relé Bucholz) no equipamento. O número de dias entre as amostras é exibido automaticamente na mesma janela (figura 9).

Fig. 9. Escolha das amostras de cromatografia gasosa do óleo isolante do transformador selecionado.

O software possui implementados os seguintes critérios: IEC/IEEE, PUGH, ROGERS e LABORELEC. Escolhidos os critérios, o usuário pode "disparar" as rotinas de processamento do sistema especialista. No diagnóstico do equipamento, o software analisa os níveis dos gases dissolvidos no óleo isolante, suas taxas de crescimento em relação à amostra passada, as porcentagens relativas dos gases mais relevantes, total de gases combustíveis, etc. Os dados resultantes são submetidos aos algoritmos que realizam efetivamente os diagnósticos.

No processo, o GASCRO procura identificar, além do diagnóstico atual, prognósticos de outros defeitos que estejam ocorrendo na unidade. Para isso, todos os algoritmos foram implementados utilizando-se lógica Fuzzy.

Os resultados das análises são processados, a seguir, por um sistema de regras. Este sistema classifica as amostras dos gases e taxas de crescimento em níveis alto, médio ou baixo e determina se o diagnóstico resultante é coerente ou não. Nesta validação do diagnóstico são utilizadas as ocorrências no passado da unidade e análise das taxas de crescimento.

Ao final do procedimento de diagnóstico, o programa exibe um sumário das informações, cálculos, relações e grandezas utilizadas.

Neste sumário existem diversos campos para texto que permitem que o usuário especialista faça comentários a respeito de cada análise efetuada pelo programa. Ainda, o sistema de regras em VBScript pode comentar automaticamente o diagnóstico efetuado nestes mesmos campos. Na figura 10, a seguir, mostra-se uma tela deste sumário de informações contendo a análise dos níveis dos gases nas amostras presente e passada.

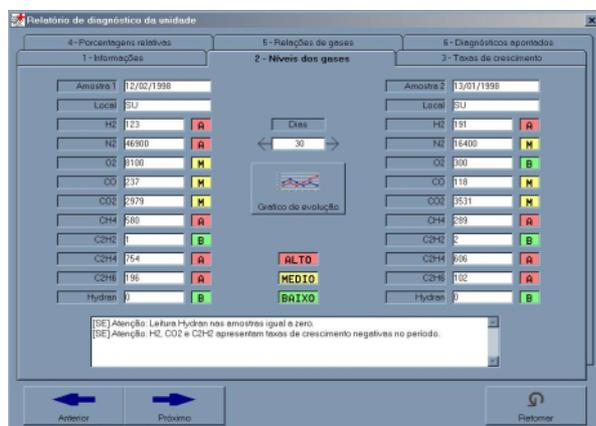


Fig. 10. Tela de análise dos níveis dos gases dissolvidos no óleo isolante do transformador.

Na figura 11 é mostrada a tela final, contendo os diagnósticos finais apontados.

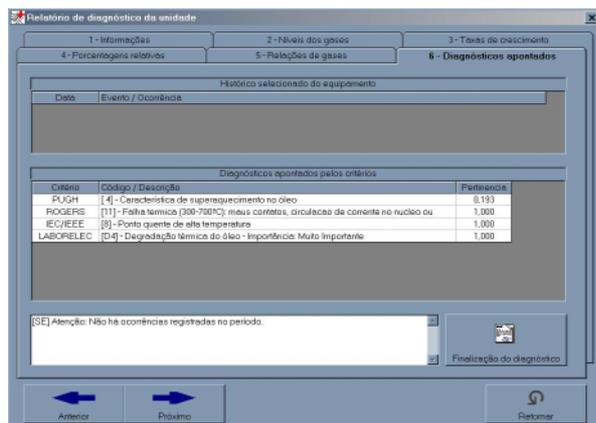


Fig.11. Telas de Diagnóstico do Sist. Especialista

Nesta última tela do sumário de informações há um botão que acessa os mecanismos de geração de relatório e a adição do diagnóstico à base de conhecimento do programa.

Os relatórios resultantes podem ser impressos e analisados posteriormente.

A rotina de adição do diagnóstico à base de conhecimento perfaz a etapa de aprendizado do programa. Todos os diagnósticos, com seus comentários e valores calculados, são armazenados em um banco de dados agregando os conhecimentos adquiridos ao longo da utilização do software.

4.0 CONCLUSÕES

O Sistema Especialista deverá ser uma ótima ferramenta para as equipes de manutenção das concessionárias de energia elétrica. Trata-se de um sistema aberto que permitirá ao usuário também desenvolver suas próprias ferramentas para adequá-lo ao parque de equipamentos. O sistema de monitoramento fornece subsídios para o sistema especialista, e integrados, propiciam uma grande vantagem de se ter um gerenciamento de manutenção e operação planejados, coordenado, e conseqüentemente menos oneroso para as empresas de energia elétrica.

Outro atrativo deste trabalho está na redução de custo de sensores e softwares comerciais que geralmente são importados. Boa parte dos sensores usados nos protótipos são encontrados no mercado nacional, até mesmo tendo sido alguns deles, desenvolvidos durante o projeto. O software, por ser de domínio próprio, também barateia o custo total do sistema. Foram desenvolvidos no projeto os seguintes equipamentos:

- Percurso dos contatos principais dos disjuntores;
- Transdutor I/V para corrente do motor do comutador ou disjuntor;
- Transdutor codificador de "TAPs";
- Placas de isolamento e condicionamento de sinal;
- Oscilógrafos para os disjuntores e transformadores.

BIBLIOGRAFIA

- (1) Diogo, A. C., Asano, M., Lemos, L. E. F., Castro, G. L., Kanashiro, A. G. - Monitoramento de Subestações – A experiência CESP SNPTEE, 1999.
- (2) Kanashiro, A. G., Castro, G. L., Malagodi, C. V. S. - Sistema de Monitoramento de Equipamentos de Subestações: Desenvolvimento e Implantação. SNPTEE, 1999.
- (3) Grimoni, J. A B ; Junqueira, Ary, Castro, G. L., Silva, Humberto A. P., Relatório Técnico Sistema Especialista: IEE/USP 2000.
- (4) Normas IEC 519, NBR 7274 , ANSI/IEEE C57.104-1991 e Laborelec sobre Análise Cromatografica de Gases em Transformadores
- (5) C. E. Lin; J. M. Ling; C. L. Huang "An Expert System for Power Transformer Fault Daiagnosis Using Dissolved Gas Analysis" – IEEE Transactions on Power Delivery – Vol No 8, No 1, january 1993, pages 231-38.