

Sistema Especialista Para Análise Integrada de Ensaio Experimentais Visando Diagnóstico de Transformadores de Transmissão

C.G. Gonzales, I.N. Silva, T.S. Bonfim, R.A. Flauzino, M.A. Carrapato, D.H. Spatti, E.C. Navarro

Resumo – Este trabalho apresenta um sistema especialista que possibilita a análise integrada de diversos tipos de ensaios que podem ser realizados em transformadores de transmissão de energia elétrica visando o diagnóstico de falhas em tais equipamentos. Cabe-se comentar que esta ferramenta está fundamentada na integração dos dados obtidos durante os ensaios, bem como em dados históricos correspondentes ao transformador que se encontra sob análise. Desta forma, este artigo apresenta o modelo relacional da base de dados desenvolvida para armazenar os dados dos ensaios, bem como o sistema especialista responsável por realizar inferências a partir desta base de dados com a finalidade de que tal ferramenta possa, por meio de sistemas inteligentes, apoiar a decisão do operador.

Palavras-chave – Diagnóstico de falhas, sistemas especialistas, sistemas inteligentes, transformadores de transmissão.

I. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de metodologias dedicadas à detecção e localização de falhas referentes a todos os segmentos do sistema elétrico, abrangendo desde o setor da geração, passando pela transmissão e chegando até o setor da distribuição da energia elétrica tem sido amplamente discutido nas comunidades técnicas e científicas. Desta forma, diversas metodologias têm sido propostas [1-4], tanto para detecção como para localização das falhas.

Destaca-se que o diagnóstico de falhas em transformadores de transmissão é de extrema importância para o sistema elétrico nacional, pois, uma parada não programada destes equipamentos pode acarretar na interrupção do fornecimento de uma grande quantidade de energia elétrica. Por consequência, estas paradas resultariam em prejuízos tanto para os consumidores como para a própria concessionária (seja pela interrupção da energia ou

pela manutenção e reparos do transformador).

Assim, as pesquisas realizadas no âmbito das falhas em sistemas elétricos de potência têm dado grande atenção aos transformadores de transmissão, com o intuito de buscar metodologias que forneçam diagnósticos de falhas que sejam satisfatórios para auxiliar os operadores das concessionárias a tomarem decisões relacionadas à manutenção preventiva do ativo.

Por meio da análise da literatura correlata pode-se verificar e destacar alguns métodos de ensaio de transformadores de transmissão visando a detecção de falhas, isto é:

- análise dos gases dissolvidos no óleo isolante [5-9];
- ensaios de relação de espiras [10];
- ensaios de tensão induzida [11,12].

Assim, neste artigo serão apresentados todos os critérios técnicos e científicos envolvendo a confecção de um sistema especialista responsável pelo gerenciamento de ensaios em transformadores de transmissão, levando-se em consideração todos os aspectos normativos citados em [13,14].

Adicionalmente, serão apresentados resultados advindos da integração de ferramentas convencionais e inteligentes, especialmente aquelas fundamentadas em Sistemas Fuzzy para análises de ensaios. O sistema especialista proposto neste trabalho se configura como um aplicativo computacional com interface gráfica de utilização, voltado para o auxílio na tomada de decisão de manutenção de transformadores de transmissão.

II. ENSAIOS VISANDO O DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM TRANSFORMADORES DE TRANSMISSÃO

Esta seção destina-se a apresentar em maior nível de detalhes as técnicas de ensaio e análise destinadas a avaliar transformadores de potência.

A. Análise de Gases Dissolvidos

O diagnóstico de transformadores a partir da análise do óleo isolante é realizado com o interesse de se verificar a possível deterioração do mesmo. Desta forma, caso o óleo esteja deteriorado, este pode apresentar água e outras substâncias distintas das comumente encontradas em óleos considerados normais [8].

O processo de degradação do óleo mineral pode ser apresentado em três fases distintas. A fase inicial caracteriza-se pela formação de peróxidos quimicamente instáveis, os quais liberam oxigênio e formam os compostos

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do VII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (VII CITENEL), realizado na Costa do Sauípe/BA, no período de 17 a 19 de agosto de 2015.

C.G. Gonzales, T.S. Bonfim, M.A. Carrapato e E.C. Navarro estão com a CTEEP (Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista). Email: cgonzale@ctEEP.com.br.

I.N. Silva, R.A. Flauzino e D.H. Spatti estão com a USP (Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação). Email: insilva@sc.usp.br.

oxi-celulósicos com o papel isolante. A fase intermediária caracteriza-se pela formação de gases e, na fase final, a formação de borra, que geralmente consiste em uma substância resinosa resultante da polimerização a partir de ácidos e outros compostos químicos.

Os gases dissolvidos em óleos isolantes são provenientes de defeitos no interior do transformador. O relacionamento desses gases pode ser classificado em função do tipo de defeito, e a sua formação pode indicar a gravidade do defeito. Geralmente, a identificação e a quantificação dos tipos de gases são usadas para a realização de um planejamento da manutenção. Tendo em mãos a identificação dos gases presentes no óleo analisado, diversos métodos são propostos na literatura correlata com o intuito de se avaliar o envelhecimento natural da isolação, bem como a detecção e caracterização de falhas incipientes. A motivação e empenho dedicado a esta metodologia de detecção de falhas em transformadores justifica-se pela quantidade de falhas possíveis de serem identificadas, bem como pela qualidade e confiabilidade dos resultados alcançados [9].

B. Ensaios de Relação entre Espiras

O ensaio de relação entre espiras (conhecido como TTR - *Transformer Turns Ratio*) permite detectar a real relação de transformação do transformador, identificando se algum curto está ocorrendo entre as espiras. Este procedimento é realizado com o transformador desenergizado e pode apontar a necessidade de se realizar a retirada de serviço do equipamento para uma inspeção interna. Tal ensaio pode ser realizado de duas formas: pelo método *Bridge* e pelo método de medição da relação de tensão entrada/saída dos enrolamentos.

Por meio do método *Bridge*, aplica-se uma tensão de fase em um dos enrolamentos utilizando-se o equipamento conhecido como *Bridge*, medindo-se então a relação da tensão induzida neste equipamento. O procedimento é repetido para todas as fases e posições de *tap*, de maneira sequencial. Durante o processo de medição, apenas relações de transformação entre enrolamentos com o mesmo fluxo magnético podem ser medidas. Geralmente, utiliza-se uma tensão alternada de 220 V em frequência nominal da rede; entretanto, outros valores podem ser empregados.

O valor teórico da relação de transformação do transformador a vazio é dado pela tensão no enrolamento de alta tensão dividido pela tensão no enrolamento de baixa tensão. Tal relação é ajustada no transformador padrão, até que se encontre o equilíbrio com 0% de erro.

Pelo método TTR, as tensões nos enrolamentos são medidas ao mesmo tempo para determinação da relação de transformação. Instrumentos para este fim podem ser utilizados e até medições de correntes podem ser usadas para determinação da relação de transformação. As medidas devem apresentar resultados com ruídos inferiores a 0,5%.

Portanto, os ensaios de relação de espiras têm por objetivo a verificação da relação entre o número de espiras do lado de alta tensão do transformador e o número de espiras do lado de baixa tensão [13]. Além disso, o ensaio de

relação de espiras entre enrolamentos deve ser executado com o transformador de potência sem carga e com tensão nominal de operação aplicada sobre o enrolamento que tiver o menor número de espiras. Assim, para os demais enrolamentos deve ser aplicada uma tensão de 0.5% em relação à nominal. Ressalta-se que a norma [13] foi idealizada para transformadores trifásicos conectados em Y a quatro fios, isto é, considera-se o neutro. Portanto, para outros tipos de transformadores e/ou conexões deve-se realizar as devidas transformações numéricas a fim de se adequar os valores conforme mostrado em [14].

No trabalho de [10] foi desenvolvido um protótipo para análise e teste *in loco* de transformadores de distribuição chamado TXWIN. O equipamento permite que o usuário realize um teste do transformador sem carga, teste de perda de carga e teste de relação de transformação de forma automática via uma interface gráfica. Além disso, esta interface também contém outros testes de desempenho para transformadores, a saber: ensaio de medida de resistência, ensaio de alta tensão e ensaio de isolação. Cabe comentar que o protótipo desenvolvido também tem a capacidade de analisar os resultados obtidos por meio dos ensaios, gerar relatórios personalizados (relacionados às análises) e armazenar os dados obtidos para cada um dos ensaios realizados em uma base de dados.

É importante comentar que os ensaios TTR devem ser realizados com base nos padrões IEC76, BS171 e/ou ANSI C57.

C. Ensaios de Tensão Induzida

O ensaio de tensão induzida tem por objetivo checar o isolamento entre as fases do transformador, entre as espiras do enrolamento e, também, entre os terminais de entrada do enrolamento e o terra. Durante o ensaio, normalmente, uma tensão é aplicada no lado de baixa, enquanto que o lado de alta é deixado aberto e aterrado em um ponto comum.

Desde que a tensão empregada durante os ensaios seja superior à tensão de operação do lado de baixa do transformador, a frequência da tensão do ensaio necessita ser no mínimo duas vezes maior que a frequência de operação para que seja evitada a sobre-saturação do núcleo. A tensão de ensaio é escolhida de acordo com o enrolamento com maior tensão de operação. Também é possível realizar ensaios mantendo-se tensões próximas das operativas do enrolamento em questão.

A tensão de ensaio pode ser medida utilizando-se um divisor de tensão ou um transformador de potencial conectado ao lado de alta.

É importante destacar que o período de ensaio não pode ser inferior a 15 segundos.

O ensaio de tensão induzida pode ser considerado bem sucedido quando nenhum surto, colapso de tensão ou aumento de corrente for observado. Os ensaios são considerados de longa duração ou curta duração de acordo com a tensão de referência de 72,5 kV, conforme descrito na norma IEC 60076-3. Em transformadores com tensão de operação igual ou inferior a 72,5 kV, medidas de descargas parciais não são imperativas. Entretanto, para

transformadores com tensão superior a 72,5 kV, faz-se necessária a aquisição de medidas de descargas parciais durante o ensaio de tensão induzida.

III. DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

Uma vez detectado que o transformador apresenta anomalias, é necessário classificá-las. As principais metodologias para o diagnóstico das falhas são:

- **Método de Rogers:** este método é uma forma empírica para detecção de falhas, fundamentando-se na relação dos gases CH_4/H_2 , C_2H_2/C_2H_4 e C_2H_4/C_2H_6 . Recomenda-se o emprego de outro método de avaliação da concentração de gases em transformadores, para que comparações possam ser realizadas. Maiores detalhes sobre esse método podem ser conferidos em [15];
- **Método de Dornenburg:** Assim como o Método de Rogers, o Método de Dornenburg é um método empírico, no qual se sugere a existência de três tipos de falhas: térmica, corona e formação de arcos (Norma IEEE C57.104-1991). Neste método, utiliza-se como referência para classificação das falhas as relações entre concentrações de gases específicos obtidas através da cromatografia gasosa. São elas: CH_4/H_2 , C_2H_2/C_2H_4 e C_2H_6/C_2H_2 e C_2H_2/CH_4 . Maiores detalhes podem ser conferidos em [16];
- **Método do Gás Chave:** O Método do Gás Chave tem esse nome em virtude de estar associado a cada falha um tipo de gás, denominado de gás chave. Esse método se baseia na evolução de uma falha no transformador, pois a concentração dos gases associadas à essa falha ultrapassarão os valores normais de degradação da isolamento em relação aos estabelecidos em ensaio de laboratório. Para a falha de formação de arco, o acetileno é o gás chave. As descargas parciais de baixa energia produzem hidrogênio e metano, com pequenas quantidades de etano e etileno. O óleo superaquecido produz etileno e metano, juntamente com quantidades menores de hidrogênio e etano. A celulose superaquecida libera grandes quantidades de dióxido e monóxido de carbono e caso a falha envolva uma estrutura impregnada de óleo formarão também metano e etileno. A decomposição eletrolítica da água ou a decomposição da água associada com a ferrugem resulta na formação de grandes quantidades de hidrogênio [15];
- **Relação dos códigos IEC:** Nas análises de gases dissolvidos, os códigos IEC foram estudados por décadas chegando à conclusão de que alguns tipos de gases, tais como o hidrogênio e metano, provocam descargas elétricas no óleo mineral isolante. Esses estudos foram aperfeiçoados quando certas relações de gases foram padronizadas. Com isso, em 1978, a IEC criou a Relação dos Códigos IEC, onde essas relações

foram classificadas e tabuladas. Códigos são então alocados de acordo com o valor obtido para cada relação e correspondendo assim a uma falha classificada, conforme pode ser detalhadamente encontrado em [17];

- **Triângulo de Duval:** O Triângulo de Duval foi primeiramente desenvolvido em 1974 e é fundamentado na concentração de três gases hidrocarbonetos: Metano (CH_4), Etileno (C_2H_4) e Acetileno (C_2H_2). Esses três gases correspondem ao aumento de energia necessária para geração de gases nos transformadores em funcionamento. Tanto o etileno quanto o acetileno representam falhas relacionadas a altas temperaturas e altas energias (arcos); o hidrogênio representa falhas relacionadas à baixa energia (descargas parciais), onde é produzido em grande quantidade, e o metano também representa falhas de baixa energia, porém em menor quantidade que o hidrogênio. Trata-se de um método gráfico, representado por um triângulo dividido em sete zonas, tal como pode ser acompanhado em [15].

IV. CONCEITUAÇÃO SISTÊMICA

A base desta proposta são os Sistemas Fuzzy, ferramentas capazes de tratar de maneira robusta e eficiente os ambientes imersos em incertezas e imprecisões. A ideia de sistema, para fornecer uma solução de análise de ensaios de transformadores, fora arquitetada modularmente, para que progressivamente outros ensaios possam ser incorporados. Este paradigma de desenvolvimento consiste na mais nova filosofia de desenvolvimento de softwares de engenharia, pois precisam agregar não somente os aspectos técnico-científicos das ferramentas, mas também devem possuir capacidades de operação conjunta com outros softwares, sistemas, etc. A Fig. 1 apresenta de maneira simplificada todos os módulos que compõem a ferramenta de Análise Integrada de Ensaios em Transformadores, denominada CTEEP A2I Trafo.

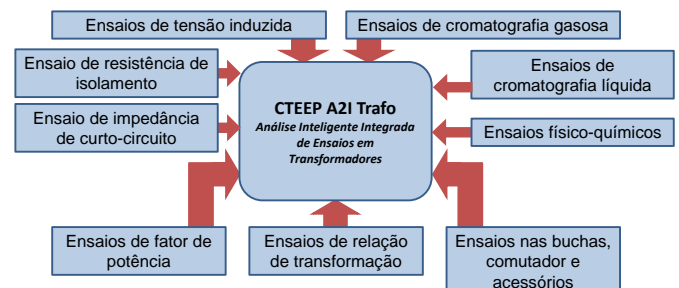


Fig. 1. Sistemas constituintes do software de análises de ensaios.

O desenvolvimento de sistemas constituídos por módulos operacionais assíncronos requer a adoção de alternativas que permitam flexibilizar a comunicação entre os módulos, sendo que se adotou implementar toda a inteligência em nível de banco de dados. A implementação prática foi feita por meio de uma camada de abstração de banco de dados,

permitindo no futuro alterações modificando apenas a sua camada de abstração. As análises integradas são realizadas utilizando-se ferramentas inteligentes que mapeiam os principais métodos de análises de ensaios físico-químicos e também de cromatografia gasosa, tal como representado pela Fig. 2.

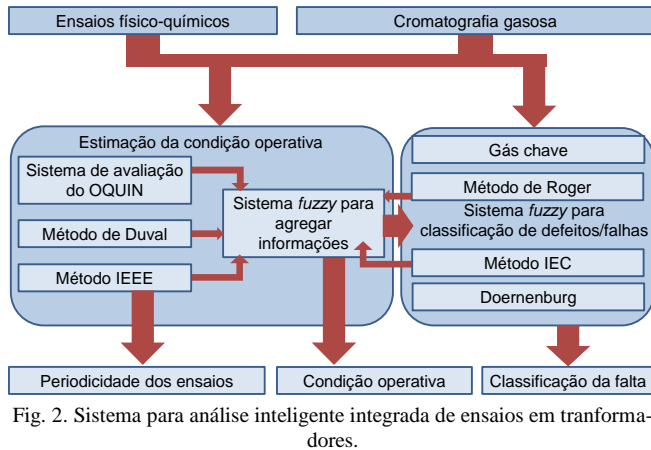


Fig. 2. Sistema para análise inteligente integrada de ensaios em transformadores.

A confecção de cada uma das ferramentas representadas pela Fig. 2 levou em consideração aspectos teóricos e também práticos dos principais métodos de análises de ensaios, mapeados por meio de funções inteligentes fuzzy.

V. RESULTADOS COMPUTACIONAIS

O mecanismo de integração de análises de ensaios do CTEEP A2I Trafo é um dos principais atrativos desta ferramenta. O acesso ao menu de ensaios é exemplificado pela Fig. 3. Ao navegar por sobre os links apresentados na Fig. 3, por exemplo, em “Inserir ensaio” / “Óleo isolante”, o usuário tem a disposição uma lista de cadastro dos tipos de ensaios.

Para fins de estudo de caso envolvendo a interface gráfica, destaca-se os resultados provenientes de análise de ensaios cromatográficos advindos do reator RE-2, fase branca, da subestação Bandeirantes. Os ensaios cromatográficos indicaram a presença de falha térmica, tal como representada pela Fig. 4.

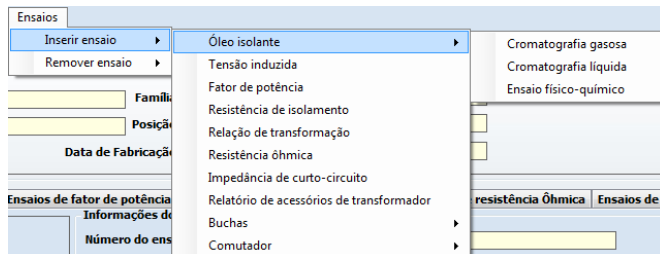


Fig. 3. Tela de cadastro de ensaios de óleo isolante.

| Equipamento | Posição | Fase | Código | GRO | | | | |
|--|--------------|----------|--------------|-------------|----------|----------|----------|----------|
| REATOR | RE-2 | BRANCA | 147753 | C5 | | | | |
| Fabricante | Nº de Série | Tipo | Potência MVA | Tensão (KV) | | | | |
| ASEA | 56.924 | | 32 | 345 | | | | |
| Volume (litros) | Subestação | | | | | | | |
| 12.100 Lts | BANDEIRANTES | | | | | | | |
| Resultados das análises em p.p.m | | | | | | | | |
| Ensaio | 5747 | 6762 | 0835 | 1452 | 1843 | 1074 | 1304 | 1400 |
| Data da coleta | 10/11/12 | 04/12/12 | 06/05/13 | 09/09/13 | 09/10/13 | 29/03/14 | 17/04/14 | 30/04/14 |
| Data do ensaio | 03/12/12 | 07/12/12 | 14/05/13 | 12/09/13 | 22/10/13 | 07/04/14 | 28/04/14 | 09/05/14 |
| Ponto de coleta | RI | RI | RI | RI | RI | RI | RI | RI |
| Hidrogênio (H2) | 114 | 129 | 120 | 122 | 181 | 170 | 145 | 154 |
| Oxigênio (O2) | 2883 | 4925 | 1708 | 2185 | 3666 | 5925 | 5487 | 3722 |
| Nitrogênio (N2) | 62558 | 90304 | 42830 | 48361 | 48047 | 58605 | 57990 | 49792 |
| Metano (CH4) | 330 | 332 | 406 | 512 | 537 | 683 | 609 | 584 |
| Monox. Carbono (CO) | 359 | 359 | 312 | 332 | 266 | 245 | 216 | 200 |
| Diox. Carbono (CO2) | 2786 | 2685 | 3367 | 2426 | 3176 | 3245 | 3149 | 3251 |
| Etileno (C2H4) | 346 | 335 | 440 | 405 | 981 | 1292 | 1291 | 1329 |
| Etano (C2H6) | 289 | 254 | 442 | 282 | 489 | 546 | 539 | 551 |
| Acetileno (C2H2) | 3 | 2 | 4 | 4 | 5 | 7 | 6 | 6 |
| Total de Gases | 89760 | 99321 | 49829 | 52829 | 58148 | 70718 | 69430 | 59589 |
| Total Gases Combustíveis | 1441 | 1407 | 1524 | 1857 | 2459 | 2943 | 2805 | 2824 |
| Os resultados acima indicam a ocorrência de falha térmica. | | | | | | | | |

Fig. 4. Resultados de ensaios cromatográficos.

De posse das informações dos ensaios cromatográficos, carregados na base de dados do CTEEP A2I Trafo, é possível ao usuário visualizar uma análise sumarizada e também detalhada sobre cada ensaio, tal como visualizado na Fig. 5.

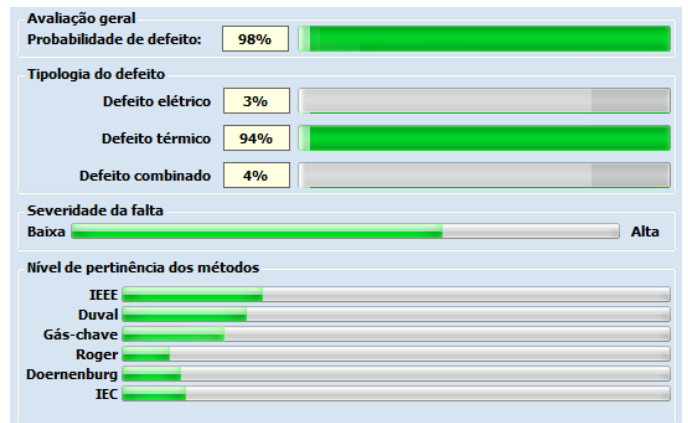
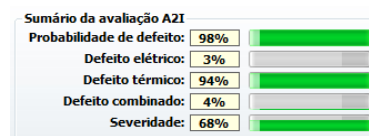


Fig. 5. Análise geral dos ensaios.

Já na Fig. 6 tem-se a tela com a análise individual de cada método de análise de gases dissolvidos.

Os detalhes da evolução histórica do transformador podem ser acompanhados na Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9 e Fig. 10.

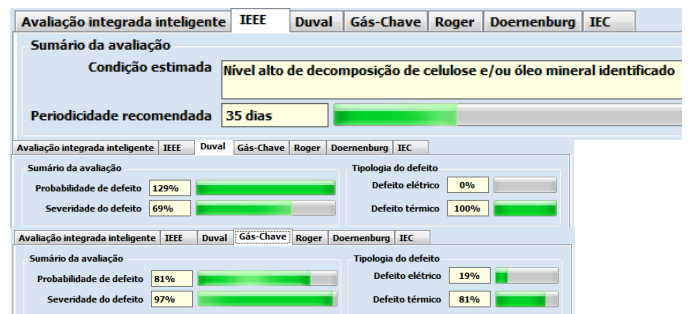


Fig. 6. Análise individual de cada método.

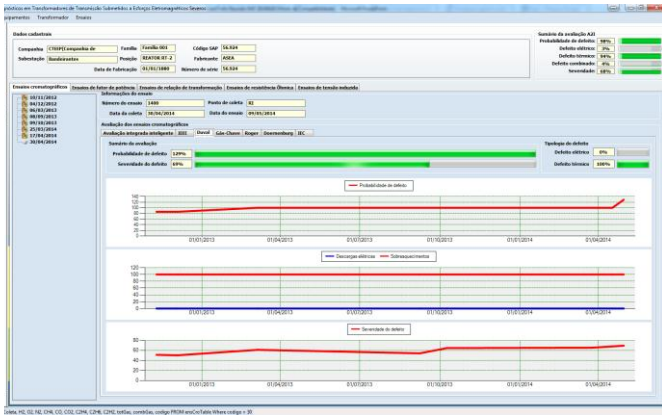


Fig. 7. Análise histórica de ensaios realizados.

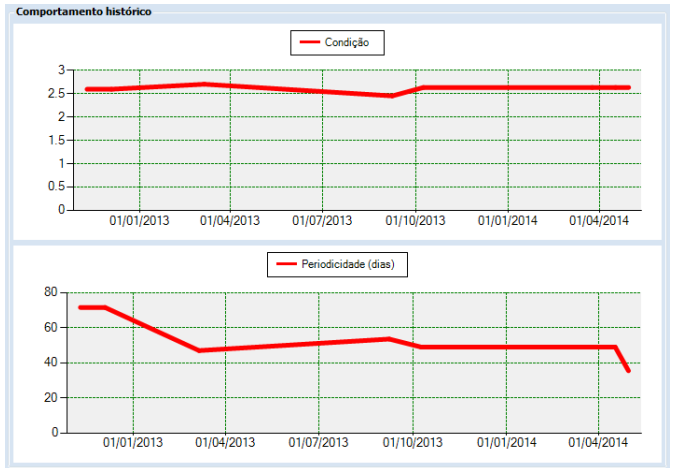


Fig. 10. Detalhe de ensaios realizados (II).

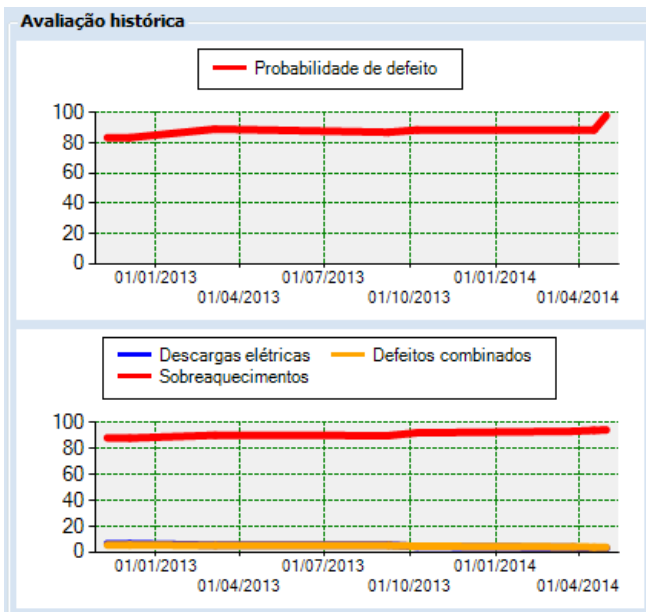


Fig. 8. Detalhe de ensaios realizados.

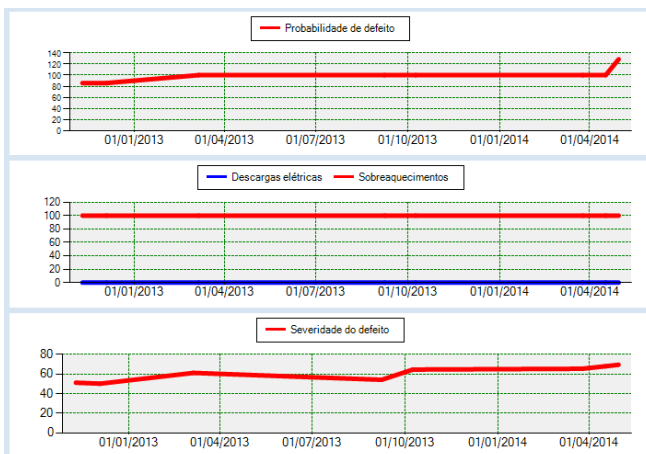


Fig. 9. Detalhe de ensaios realizados (I).

VI. CONCLUSÕES

Os elevados custos envolvendo as falhas dos transformadores de transmissão, bem como as suas manutenções, são os principais motivadores para o desenvolvimento de novas ferramentas capazes de tratar com todas as variáveis e fenômenos envolvendo uma parada não programada destes equipamentos. De fato, o problema é complexo e apresenta inúmeros desafios, principalmente quanto à generalidade da ferramenta a ser desenvolvida, frente às mais variadas situações de falhas que podem ser monitoradas por meio de um sistema que realize o diagnóstico do transformador de potência.

Todos os mecanismos de avaliação da condição dos transformadores foram aplicados em outros dispositivos elencados como pilotos, cabendo salientar a efetiva performance das ferramentas desenvolvidas frente aos resultados alcançados para todos os transformadores.

Além disso, é importante destacar que cada sistema fuzzy desenvolvido torna-se especialista em aproximar um método, sendo a resposta da condição global estimada após cada sub-módulo produzir sua respectiva resposta.

Finalmente, todos os formulários de banco de dados, bem como relatórios gráficos, visam atender completamente as necessidades das concessionárias quanto ao cadastro deste tipo de informação, fornecendo uma solução de software gráfica e de fácil utilização.

VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] X. Wang, B. Li, H. T. Roman, O. L. Russo, K. Chin and K. R. Farmer, "Acousto-optical PD Detection for Transformers", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 21, pp. 1068-1073, 2006.
- [2] S. M. Markalous, S. Tenbohlen and K. Feser, "Detection and Location of Partial Discharges in Power Transformers using Acoustic and Electromagnetic Signals", *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 15, no. 6, pp. 1576-1583, 2008.
- [3] E. Mohammadi, M. Niroomand, M. Rezaeian and Z. Amini, "Partial Discharge Localization and Classification Using Acoustic Emission Analysis in Power Transformer", *31st International Telecommunications Energy Conference*, 2009.

- [4] G. F. C. Veloso, L. E. B. Silva, G. Lambert-Torres and J. O. P. Pinto, "Localization of Partial Discharges in Transformers by the Analysis of the Acoustic Emission", *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2006.
- [5] J. R. Guardado, J. L. Naredo, P. Moreno e C. R. Fuerte, "A comparative study of neural network efficiency in power transformers diagnosis using dissolved gas analysis", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 16, no. 4, pp. 643-647, 2001.
- [6] M. Duval, "A Review of faults detectable by gas-in-oil analysis in transformers", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 18, pp. 8-17, 2002.
- [7] M. M. Imamura, "Uma Abordagem Neural Para Identificação de Gases Dissolvidos em Óleo Isolante de Transformadores em Função de Parâmetros Físico-Químicos", *Dissertação de Mestrado em Engenharia Industrial*, Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2000.
- [8] M. Milasch, "Manutenção de Transformadores em Líquido Isolante", *Editores Edgar Blucher Ltda*, 1984.
- [9] H. Herman, M. J. Shenton, G. C. Stevens e R. J. Heywood, "A new approach to condition assessment and lifetime prediction of paper and oil used as transformer insulation", *Proceedings of 7th International Conference on Solid Dielectrics*, pp. 473-476, 2001.
- [10] S. P. Zhu, J. Shi, Y. S. Lim, C. I. Tan e Y. K. Cheong, "Transformer Testing and Analysis with a Window-based Graphic User Interface", *International Conference on Energy Management and Power Delivery*, pp. 410-415, 1995.
- [11] A. J. Kachler, "On-Site Diagnosis of Power and Special Transformers", *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, pp. 362-367, 2000.
- [12] H. Mohseni, A. S. Akmal, J. Jadidian, E. Hashemi, E. Agheb, A. Naieny, A. Ghorbandaeipour e K. Niayesh, "Induced Voltage Test of Distribution Transformers Using State Frequency Inverters", *IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition*, pp. 1-5, 2008.
- [13] IEEE Std. C57.12.90-1993, "IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers and IEEE Guide for Short-Circuit Testing of Distribution and Power Transformers", 1993.
- [14] IEEE Std. C57.12.00-2006 for Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers, "IEEE Standard for Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers", 2007.
- [15] Hettiwatte, S.N.; Fonseka, H.A., "Analysis and interpretation of dissolved gases in transformer oil: A case study". CMD 2012 – IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, pp. 35-38, 2012.
- [16] Souahlia, S.; Bacha, K.; Chaari, A., "SVM-based decision for power transformers fault diagnosis using Rogers and Doernenburg ratios DGA". SSD 2013 – IEEE 10th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices, pp. 1-6, 2013.
- [17] Ahmed, M.R.; Geliel, M.A.; Khalil, A., "Power transformer fault diagnosis using fuzzy logic technique based on dissolved gas analysis". MED 2013 – IEEE 21st Mediterranean Conference on Control & Automation, pp. 584 - 589, 2013.