



**SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GSE 02
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

GRUPO VIII

GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS

PESQUISA PARA DIAGNÓSTICO DE DEFEITOS NA PARTE ATIVA DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

**Leonardo Torres B. dos Santos *, Gil Fernando B. de Oliveira Jr.,
Gisella M. Vizhñay Zambrano, Helvio J. Azevedo Martins, Mauro Barbosa Trindade**

CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA - CEPEL

RESUMO

Atualmente, várias ferramentas são empregadas na avaliação das condições operativas dos transformadores de potência. Entretanto cada uma apresenta particularidades quanto à sua aplicação, tais como a necessidade de desligamentos, cumprimento de padrões de confiabilidade, disponibilidade, dentre outras.

O presente artigo apresenta a metodologia utilizada na análise dos resultados da aplicação de diversas técnicas de diagnóstico em um grupo de transformadores de potência. Esta metodologia envolve uma técnica de inteligência artificial denominada por "Algoritmos Genéticos", capaz de otimizar os parâmetros avaliados determinando uma ordem de prioridades quanto à possíveis intervenções nos transformadores de acordo com a potencialidade de falhas.

Esta metodologia foi desenvolvida visando a avaliação das condições operacionais de transformadores quanto a presença de defeitos elétricos, térmicos e mecânicos.

PALAVRAS-CHAVE

Transformadores de Potência, Técnicas de Diagnóstico, Manutenção, Hierarquização, Algoritmos Genéticos.

1.0 - INTRODUÇÃO

Dada a complexidade dos transformadores de potência, atualmente existe uma tendência para a utilização de um conjunto de técnicas de avaliação de forma a tornar mais consistente a análise da condição operativa destes equipamentos. Sendo a origem dos defeitos em transformadores de natureza térmica, elétrica e mecânica o uso de técnicas distintas tornam mais eficiente o diagnóstico da parte ativa ou da isolamento sólida e líquida dos mesmos.

É de fundamental importância que a concessionária tenha o conhecimento das condições operacionais de seus equipamentos em suas diversas instalações, sobretudo os transformadores de potência pertencentes a rede básica, para que sejam estabelecidos planos de ação entre os setores de operação e manutenção da empresa de forma a priorizar futuras intervenções relacionadas à manutenção, repotencialização ou até mesmo substituição de tais equipamentos.

Para que as empresas possam atingir um bom nível de controle de seus equipamentos quanto às condições operacionais, é necessário um estudo topológico de todas as subestações envolvidas de modo a determinar o conjunto de transformadores de maior influência, que necessitem da avaliação por técnicas preditivas de diagnóstico em função de seus respectivos históricos de operação e regimes de funcionamento. Além de estudos de sobrecarga, níveis de curto circuito, transitórios e históricos operacionais, outros parâmetros podem

(*) Av. Olinda, s/nº Adrianópolis – sala Labdig 02 – nº 13 – CEP 26053-121 Nova Iguaçu, RJ – Brasil.
Tel: (+55 21) 2666-6269 – Fax: (+55 21) 2666-6382 – Email: ltorres@cepel.br

caracterizar os níveis de prioridade para a intervenção nos transformadores. Dentre os parâmetros utilizados, destacam-se o tempo de operação e sua potência nominal além do resultado das diversas técnicas de diagnóstico aplicadas na avaliação da parte ativa e de todo o sistema de isolamento dos transformadores.

Tratando-se de um problema multi-objetivo, onde cada equipamento possui diversos itens para análise, torna-se necessária a consideração de todos os resultados de forma a se obter uma “classificação” por ordem de prioridade para possíveis intervenções. Quanto maior o número de transformadores envolvidos e o número de parâmetros para análise mais complexa é a solução do problema de hierarquização.

Na determinação da hierarquização são utilizadas técnicas de inteligência artificial dentre as quais destacam-se os algoritmos genéticos, capazes de maximizar ou minimizar simultaneamente determinados objetivos que, no caso dos transformadores, podem estar associados a critérios econômicos, técnicos e estratégicos do sistema aos quais pertencem. Tais critérios podem estar correlacionados e possuir diferentes níveis de importância na análise das condições operacionais de cada transformador.

2.0 - TÉCNICAS DE DIAGNÓSTICO

A metodologia desenvolvida foi aplicada para a avaliação de um grupo de 31 transformadores de potência pertencentes à rede básica, com o objetivo de identificar defeitos na parte ativa além de fragilidades na isolamento sólida e líquida. As técnicas de avaliação empregadas foram: Caracterização no domínio da frequência, emissão acústica, medição da tensão de retorno, determinação do grau de polimerização do papel através do teor de 2-furfuraldeído encontrado no óleo, e análise de gases dissolvidos em óleo mineral isolante.

Sabendo-se que cada técnica isoladamente possui vantagens e desvantagens na obtenção do diagnóstico de transformadores de potência, a avaliação das condições reais de operação destes equipamentos torna-se mais efetiva pela análise conjunta dos resultados individuais.

2.1 Caracterização no Domínio da Frequência

Esta técnica permite caracterizar o transformador numa ampla faixa de frequências, observando em quais frequências ocorrem as ressonâncias e anti-ressonâncias, analisando as amplitudes nestes pontos, além de permitir uma avaliação do deslocamento de enrolamentos devido a transporte e esforços de curto-circuito. Nesta técnica são empregados dois métodos distintos de avaliação: Um compreende a medição das impedâncias terminais em função da frequência, onde os enrolamentos não envolvidos na medição permanecem abertos, além do outro que corresponde à resposta em frequência propriamente dita que consiste na transferência de tensão entre enrolamentos correspondentes com a variação da frequência.

A Figura 1 apresenta a caracterização no domínio da frequência de um dos transformador, aplicando-se um sinal nos terminais de baixa tensão e colhendo-se as respostas nos enrolamentos de alta tensão.

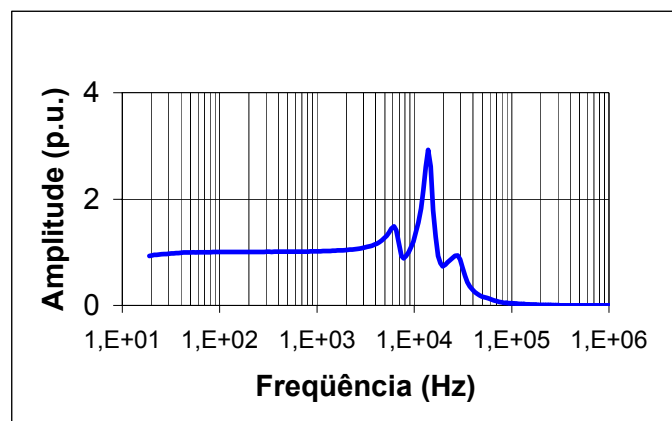


FIGURA 1 – Medição de resposta em frequência em transformador de potência

2.2 Emissão Acústica

Emissão acústica é uma técnica de ensaios não destrutivos, não invasiva, de grande utilidade na detecção de defeitos ativos internos em materiais e equipamentos. Devido às suas características, ela possibilita a detecção e localização de defeitos de origem elétrica ou mecânica e pode ser aplicada sem que seja necessário o

desligamento de transformador. Além disto é relativamente imune à interferências eletromagnéticas. Suas principais limitações são: Presença de ruído acústico intenso no ambiente de ensaio e a necessidade do especialista na análise dos resultados.

2.3 Medição de tensão de Retorno

Os ensaios de tensão de retorno são realizados conforme procedimento específico, determinando-se a umidade relativa presente no isolante sólido (principalmente o papel) para os enrolamentos de alta e de baixa tensão dos transformadores.

Os resultados dos ensaios de tensão de retorno são: Os espectros de polarização para cada enrolamento ou conjunto de enrolamentos, o tempo dominante do espectro (T_c), o valor máximo da tensão de retorno ($U_{r\max}$), a umidade relativa do papel ($\%H_2O$) e a temperatura crítica de operação para o teor de umidade existente no isolamento sólido.

A análise de tais grandezas possibilita maiores informações sobre o processo de envelhecimento acelerado da isolação sólida devido a um sobreaquecimento local na celulose além da concentração de umidade em determinadas regiões.

2.4 Grau de Polimerização x Teor de 2-furfuraldeído (GP2FAL)

Estas técnicas identificam problemas relacionados à deterioração ou envelhecimento do isolante sólido do transformador. Pode-se, através delas, identificar se o envelhecimento do equipamento está ocorrendo de forma normal ou acelerada, estimando-se com isso a vida residual do mesmo.

Para o GP requer-se a retirada de amostras do papel de algumas regiões do transformador, exigindo, portanto a abertura do equipamento. Normalmente a técnica é utilizada em unidades que passam por processo de manutenção ou repotencialização. A dificuldade de acesso ao papel presente na isolação sólida, devido à necessidade de abertura da unidade transformadora, levou ao desenvolvimento de novas técnicas analíticas não invasivas de avaliação.

A técnica não invasiva mais difundida para avaliação do grau de envelhecimento da isolação sólida e para a definição de uma expectativa de vida em transformadores é a medição do teor de 2-furfuraldeído dissolvido, sendo este um composto gerado somente pela degradação do papel, e que pode ser analisado diretamente no óleo mineral isolante.

Para uma análise crítica da eficiência da medição do teor de 2-fal como técnica analítica de avaliação do grau de deterioração da isolação sólida, torna-se necessário correlacioná-lo com o grau de polimerização (GP) medido na isolação.

2.5 Análise de Gases Dissolvidos em Óleo Mineral Isolante

A cromatografia gasosa permite identificar possíveis defeitos elétricos e/ou térmicos no transformador através da concentração de gases dissolvidos no óleo mineral isolante e requer a retirada de amostras de óleo para análises em laboratório ou no campo.

Normalmente a coleta do óleo é realizada com uma dada periodicidade durante toda a vida do transformador, obtendo-se assim um histórico da evolução de certos gases chaves que são gerados por falhas elétricas e/ou térmicas.

O diagnóstico referente às análises cromatográficas dos transformadores pode ser realizado através de vários métodos que utilizam o conhecimento de especialistas como engenheiros, químicos, fabricantes de equipamentos, ou através de técnicas que utilizam inteligência artificial como ferramenta de apoio à decisão.

Em função de sua elevada confiabilidade e do alto nível de acerto nos diagnósticos de falhas, novos equipamentos e tipos de monitoramento, utilizando a análise de gases dissolvidos no óleo mineral isolante, já estão sendo implementados nas empresas do setor elétrico. Dentre eles destacam-se o cromatógrafo portátil que através de software específico, como o Croma (CEPEL) ou outros existentes, oferece o diagnóstico por diversos métodos já consagrados e o monitoramento on-line.

3.0 - A TÉCNICA DE HIERARQUIZAÇÃO

O problema de hierarquização de transformadores de potência pode ser formulado como um problema de otimização multi-objetivo no qual se pretende selecionar um conjunto de transformadores tal que determinados objetivos associados a critérios técnicos, operacionais e econômicos sejam simultaneamente otimizados.

Os objetivos considerados no processo de hierarquização dos transformadores correspondem aos resultados de ensaios de campo e/ou análises laboratoriais, as características próprias de cada transformador e suas respectivas importâncias para o sistema nos quais estão inseridos. Estes objetivos são representados por funções que após serem otimizadas apresentarão uma solução para o problema de hierarquização de transformadores.

A importância de cada transformador em um subsistema constitui um parâmetro de grande valor, pois engloba conceitos operacionais e econômicos nos quais o equipamento está inserido. Entretanto, a sua obtenção exige um grande controle de diversas grandezas em tempo real por parte das concessionárias e empresas do setor elétrico, podendo futuramente ser considerado também como um parâmetro dentro da técnica de hierarquização de transformadores.

Otimizar os resultados das técnicas significa que cada tipo de diagnóstico resulta em uma “nota” associada a um grau de severidade, portanto os transformadores que obtiverem os maiores resultados estarão em piores condições de operação e com isso serão os primeiros do processo de classificação.

De modo a estabelecer uma classificação por prioridade, foi desenvolvido através de uma técnica de inteligência artificial denominada “algoritmos genéticos” uma rotina de programação inspirada na sua essência em conceitos naturais como a “seleção” e a “evolução de espécies”, na qual grupos de transformadores podem ser priorizados nos planos de manutenção das empresas, de acordo com um algoritmo que considere os múltiplos parâmetros obtidos de cada transformador.

Os algoritmos genéticos são geralmente aplicados a problemas de difícil ou complexa solução, nos quais processos triviais de busca ou análise não são capazes de fornecer resultados satisfatórios. Sua técnica se baseia em conceitos biológicos da “genética”, onde todo o algoritmo se estrutura de tal forma a buscar as soluções ótimas de forma evolutiva, de acordo com uma dada função objetivo, ou com múltiplos critérios, os quais se pretende maximizar ou minimizar.

Um algoritmo genético padrão é formado basicamente por operadores genéticos que incorporam conceitos evolutivos como a “seleção” tipo roleta (seleção das soluções probabilisticamente melhores), de “cruzamento” (intercâmbio de informações entre cada par de soluções selecionadas), e de “mutação” (alteração de uma informação dentro de uma determinada solução).

Além dos operadores, tais algoritmos possuem uma função objetivo, na qual todos os parâmetros são avaliados a cada ciclo do programa, e uma representação de cada solução obtida nestes ciclos, denominada de “cromossomo”, de acordo com a própria filosofia da técnica de inteligência artificial. Este “cromossomo”, após um número de ciclos de otimização pré-determinado no algoritmo, carrega em sua representação toda a informação necessária capaz de apresentar para o problema uma solução otimizada que atenda as condições impostas pela função objetivo.

Conforme citado anteriormente, nem todos os parâmetros de análise do algoritmo genético correspondem aos resultados das técnicas de diagnóstico. Alguns dados como o tempo de operação e a potência nominal do transformador são características próprias de cada equipamento da rede básica e são considerados como funções constantes para o algoritmo.

Entretanto, considerando estes dois parâmetros em especial, o critério de hierarquização foi obtido da seguinte forma: A maximização do tempo de operação dos equipamentos significa que os transformadores mais antigos estão sujeitos a uma maior deterioração de seus respectivos isolamentos sólidos, maiores taxas de evolução dos gases combustíveis além de maiores chances de ter alguma atividade de descarga parcial ou sobreaquecimento na parte ativa. Os transformadores de maior potência nominal em geral demandam maiores custos de manutenção, pois normalmente estão conectados a importantes cargas do sistema. Sendo assim, o algoritmo determina uma ordem dentre os transformadores avaliados, na qual os de maior potência nominal são priorizados.

Com relação aos resultados das técnicas de diagnóstico, algumas das técnicas descritas anteriormente não foram consideradas como parâmetros do algoritmo, pois somente alguns transformadores foram por elas avaliados. Tal fato ocorreu com as medições de tensão de retorno e resposta em frequência, principalmente por se tratarem de técnicas invasivas. Desta forma, as medições consideradas foram a análise de gases dissolvidos, o teor de 2-furfuraldeído em óleo mineral isolante e o ensaio de emissão acústica.

3.1 Avaliação dos Resultados das Técnicas de Diagnóstico

Após a quantificação dos resultados das diversas técnicas de diagnóstico aplicadas, os valores obtidos foram pré-processados para que o algoritmo de otimização pudesse considerá-los. No caso da análise de gases dissolvidos em óleo mineral isolante, os resultados obtidos de cada transformador foram submetidos a diversos critérios de diagnóstico: O método Laborelec, o critério da IEC, redes neurais, lógica fuzzy e o método CEGB. Esta análise foi processada com a utilização do software Croma, desenvolvido no CEPEL. Como resultado, gerou-se uma nota dentro de uma escala crescente de severidade. Os dados relativos aos diversos diagnósticos resultaram em um percentual de gravidade de cada transformador. Os transformadores com maior percentual de gravidade teriam então prioridade para intervenções e manutenções.

Pelos resultados obtidos com a aplicação da técnica de emissão acústica, os transformadores foram classificados nos seguintes níveis:

- A – Condição de operação segura.
- B – Condição aceitável. O equipamento deve ser mantido sob observação.
- C – Condição insegura. São necessárias intervenções corretivas.
- D – Condição inaceitável. Integridade comprometida. Equipamento em serviço deve ser retirado de operação.

A partir da classificação acima, foi associado um nível de gravidade crescente de 1 a 4 para cada transformador. Tais níveis foram inseridos no algoritmo como um dos parâmetros provenientes das técnicas de diagnóstico em equipamentos.

Os dados provenientes do teor de 2-furfuraldeído foram analisados utilizando-se o software GP2FAL, desenvolvido no CEPEL. Através de formulação matemática torna-se possível a correlação do teor de 2-fal contido no óleo com o grau de polimerização (GP) do papel isolante, e conseqüentemente, a indicação da perda de vida percentual do transformador. Seguindo esta análise, os transformadores que obtiverem maiores valores percentuais apresentam condições mais críticas de operação. Estes resultados foram também inseridos no algoritmo como mais um parâmetro de análise na função objetivo. A função do algoritmo genético foi a de pré-processar todos os resultados das técnicas e dados simultaneamente e otimizar a função objetivo buscando a solução ótima para classificar o grupo de transformadores por ordem de prioridade para intervenções futuras.

A Tabela 1 apresenta o resultado final da hierarquização realizada utilizando os dados dos transformadores:

TABELA 1 – Resultado da Hierarquização dos Transformadores

Ranking	Idade	Potência	E.A.	A.G.D.	2-FAL
1	35	63	0	78,77	19,60
2	35	75	4	75,00	10,70
3	7	75	2	71,58	1,40
4	35	250	1	64,72	8,60
5	35	250	1	63,88	10,50
6	35	63	0	61,15	14,30
7	13	300	0	57,55	3,90
8	11	50	0	57,19	1,50
9	25	100	2	53,95	8,60
10	35	100	1	53,95	7,10
11	25	100	1	53,95	6,90
12	35	65	1	45,45	15,60
13	11	50	0	45,41	1,50
14	7	75	2	45,37	4,40
15	35	63	1	45,37	50,10
16	13	300	0	35,35	3,90
17	14	100	1	27,79	1,60
18	35	65	0	27,77	28,50
19	31	50	1	65,72	7,80
20	35	63	0	61,15	33,00
21	35	250	3	50,00	13,60
22	35	250	2	50,00	9,60
23	14	100	2	50,00	12,30
24	31	50	2	50,00	9,10
25	14	100	2	50,00	6,20
26	35	250	1	50,00	11,50
27	14	100	1	50,00	6,00
28	35	65	1	40,40	27,90
29	35	250	3	27,77	7,40
30	13	300	0	27,77	5,70
31	11	50	0	27,77	1,50

4.0 – COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

Considerando que a natureza das falhas na parte ativa de transformadores de potência abrangem defeitos de natureza térmica, elétrica, e mecânica, torna-se cada vez mais importante que diferentes metodologias de diagnóstico sejam correlacionadas para que se obtenha um bom nível de acerto quanto às condições operacionais de diversos equipamentos elétricos. Quanto maior o número de parâmetros obtidos de um único transformador, melhores são as chances de se obter sucesso no seu diagnóstico.

Tratando-se de um problema multi-objetivo, pois cada transformador possui diversos parâmetros que influenciam sua condição operacional, a ferramenta “Algoritmos Genéticos” foi utilizada para considerá-los de forma diferenciada e definir um grau de prioridade, visando futuras intervenções.

A aplicação desta ferramenta corresponde a uma metodologia de apoio à decisão muito útil para as empresas do setor elétrico permitindo definir a maneira mais equilibrada de gerir seus investimentos. Investimentos em programas de manutenção seriam definidos de acordo com o resultado da classificação fornecido pelo algoritmo, utilizando parâmetros de ordem técnica e outros de ordem construtiva e operacional.

Parâmetros técnicos seriam àqueles referentes ao resultado das medições de campo pelas diversas técnicas de diagnóstico, e os de ordem construtiva e operacional seriam o tempo de operação do equipamento, custos de manutenção e sua influência para o sistema de acordo com a sua potência. A metodologia utilizada pelo CEPEL, baseada na aplicação de algoritmos genéticos aos resultados das técnicas de diagnóstico empregadas, permitiu de forma satisfatória a hierarquização do grupo de transformadores avaliados.

4.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Leyen, B., C.; Salles, R., C.; Silva, A., N.; Cerqueira Filho, W., R., "Medição de Resposta em Frequência e Impedância Terminal em Transformadores de Potência", - Relatório Técnico ALAB-1240/99, 29.NOV.1999.
- (2) Coelho, C., A., C., A Comprehensive Survey of Evolutionary-Based Multi-Objective Optimization Techniques. Knowledge and Information Systems, Vol. 1, No. 3, pp. 269 – 308, 1999."
- (3) Martins, H. J. A.; Levy, A.F. S.; Neves, A., Olivieri, M. M.; Diagnóstico Integrado de Transformadores de Potência – Aplicação VIII Encontro Regional Latino Americano da CIGRÉ Ciudad del Este - Paraguai Jun/99 XV SNPTEE - Foz do Iguaçu Out/99.
- (4) Martins, H. J. A., Neves, A; Novas Técnicas Aplicadas ao Diagnóstico de Transformadores de Potência Seminário ABRAMAN Belo Horizonte - MG Jun/2000.
- (5) Cerqueira, W., Neves, A., Martins, H. J. A; Medição de Resposta em Frequência e Impedância Terminal com Técnica de Diagnóstico Aplicada a Transformadores de Potência III ENEAT - Encontro Nacional de Alta Tensão Campina Grande - PB Jun/2000.
- (6) Neves, A., Martins, H. J. A; Utilização da Técnica de Tensão de Retorno para Determinação do Teor de Umidade em Transformadores de Potência III ENEAT - Encontro Nacional de Alta Tensão Campina Grande - PB Jun/2000 CIER - Comissão de Integração Elétrica Regional Buenos Aires - Argentina Nov/2000 .

5.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Leonardo Torres Bispo dos Santos

Nascido no Rio de Janeiro, RJ em 16 de Fevereiro de 1977.

Engenheiro Eletricista pela Universidade Federal Fluminense – UFF, em 2001.

Cursando Mestrado em Engenharia Elétrica desde 2006 na PUC – RJ.

Empresa: CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, desde 2006.

Pesquisador do Departamento de Instalações e Equipamentos no Laboratório de Diagnóstico de Equipamentos em Adrianópolis, Nova Iguaçu - RJ.

Gil Fernando Braga de Oliveira Júnior.

Nascido em Jaú, SP em 4 de Julho de 1961.

Engenheiro Eletricista.

Empresa: CTEEP - Companhia de transmissão de Energia Elétrica Paulista, desde 1984.

Pertence ao grupo de Gestão de Manutenção da CTEEP.

Gisela Margarita Vizhñay Zambrano.

Nascida em Guayaquil, Equador em 1974.

Cursando Doutorado em Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ.

Empresa: CEPEL – Bolsista do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica.

Helvio Jailson Azevedo Martins.

Nascido no Rio de Janeiro, RJ em 11 de Julho de 1955.

Engenheiro Eletricista pela Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, em 1979.

M.Sc. em Engenharia Elétrica pela COPPE/ UFRJ em 1987.

Doutorando em engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ em Fev. 2007

Empresa: CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica.

Pesquisador do Departamento de Instalações e Equipamentos e Chefe do Laboratório de Diagnóstico de Equipamentos em Adrianópolis, Nova Iguaçu, R.J.

Mauro Barbosa Trindade.

Nascido no Rio de Janeiro, R.J. em 23 de Junho de 1954.

Engenheiro Metalúrgico pela Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, em 1977.

M.Sc. em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela COPPE/ UFRJ em 1981.

Empresa: CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica.

Pesquisador do Departamento de Instalações e Equipamentos do Laboratório de Diagnóstico de Equipamentos em Adrianópolis, Nova Iguaçu, R.J.