

Capítulo II

Repetibilidade dos resultados de SFRA

Por Marcelo Eduardo de Carvalho Paulino*

Os transformadores são constituídos por uma complexa rede de resistências, capacitância e indutâncias internas. A injeção de um sinal senoidal em uma larga escala de frequência resulta em assinaturas que, quando comparadas, podem mostrar alterações nessa rede RLC, que podem estar relacionadas a faltas ou defeitos. Este artigo faz uma introdução sobre a análise de resposta em frequência, mostrando definições e conceitos básicos.

No capítulo anterior, foram apresentadas definições sobre a Análise de Resposta de Varredura de Frequência (SFRA). No mesmo texto, consta que a avaliação dos resultados é baseada em comparações de diferentes representações gráficas dos elementos testados e foram mostrados exemplos de assinaturas. Entretanto, antes de pensarmos na avaliação de suas assinaturas, ou seja, em como identificar falhas no transformador, nós devemos pensar em como obter essas assinaturas de modo confiável e adequado, além de permitir a repetibilidade das medidas. Uma vez que o SFRA é um método comparativo, é de vital importância que as medições do mesmo objeto sob as mesmas condições produzam resultados idênticos, independentemente do nível de ruído externo.

Somente um grau muito elevado de repetibilidade pode assegurar que desvios mesmo pequenos de traços comparados de SFRA sejam relacionados a alterações dentro do transformador observado, e não a imprecisões dentro do esquema de medição.

As conexões entre o dispositivo de medição e os terminais do transformador sob teste, bem como a técnica de aterramento, exercem uma grande influência sobre a reprodutibilidade. Além da conexão, são apresentados alguns fatores que afetam a repetibilidade e devem ser observados.

Defeitos em transformadores

Comparando as assinaturas e determinadas as diferenças entre elas, determinando a frequência de ocorrência, podem-se determinar padrões de falta e defeitos nos transformadores.

O teste de reposta em frequência deve ser realizado:

- Antes e depois do transporte do transformador
- Após o transformador ter sofrido os efeitos de altas correntes (por exemplo, corrente de falta próxima ao transformador)
- Se a análise dos gases dissolvidos no transformador indicarem altas temperaturas internas (falhas no núcleo)

Uma vez realizado o teste, ele pode detectar os seguintes defeitos:

- Deformação da bobina - axial e radial
- Falha no núcleo magnético (laminiação “curto-circuitada”)
- Faltas do núcleo para a terra
- Conexões internas quebradas ou abertas
- Colapso parcial do enrolamento
- Espiras “curto-circuitadas” e abertura do enrolamento
- Localização da falta no enrolamento

Dada a ocorrência de uma falta, os esforços mecânicos, axiais ou radiais, tendem a deformar os enrolamentos.

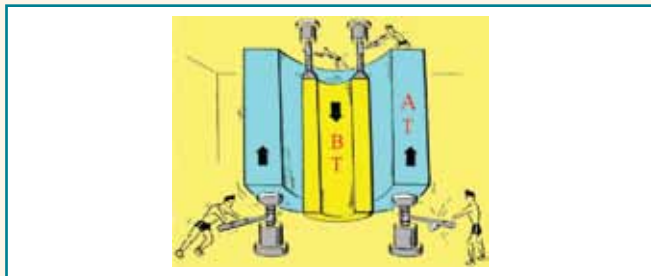


Figura 1 – Representação de esforços axiais mecânicos em enrolamentos de transformador

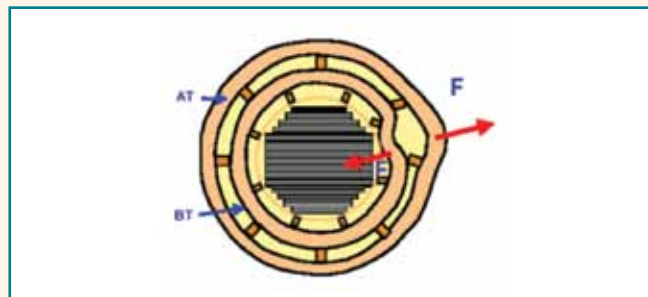


Figura 3 – Representação de esforços mecânicos em um ponto dos enrolamentos do transformador

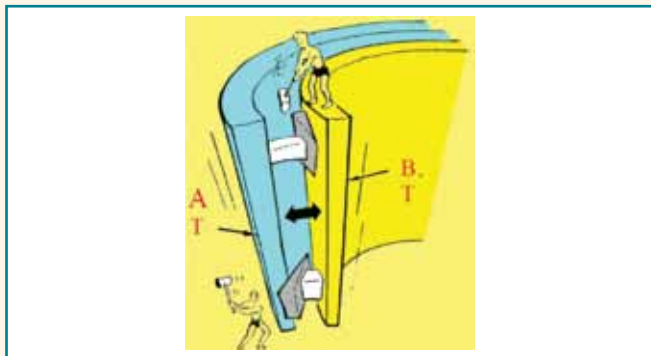


Figura 2 – Representação de esforços radiais em enrolamentos de transformador

A seguir são apresentados esquemas e fotos com defeitos mecânicos. Como a força mecânica no enrolamento é proporcional ao quadrado da corrente, ficam evidentes as deformações internas no transformador frente a um degrau de corrente.



Figura 4 – Defeito em enrolamentos de transformador

No caso de esforços axiais, a deformação nos enrolamentos é dada segundo a Figura 5:

utilizado, pontos de injeção de sinal, arranjo dos cabos, erros de medida, etc.

C. Fatores estocásticos

Os fatores estocásticos podem ou não ser controlados, por exemplo, comportamento eletromagnético e remanescente no núcleo do transformador.

Sobre o instrumento de teste do SFRA

A utilização de um sistema de teste ou um equipamento adequado é essencial para o sucesso da medida. Várias características do equipamento têm impacto direto sobre os resultados, como a tensão de saída, a precisão, o aterramento, a técnica de conexão, o uso de dois ou três cabos, os ajustes do teste (números de pontos medidos, distribuição de pontos medidos, supressão de ruído, impedância de entrada) e a calibração.

D. Diferentes tensões de saída

A Figura 11 mostra a medida realizada no enrolamento de 230 KV de um transformador de 100 MVA com tensões de teste de 2,83 V e 10 V.

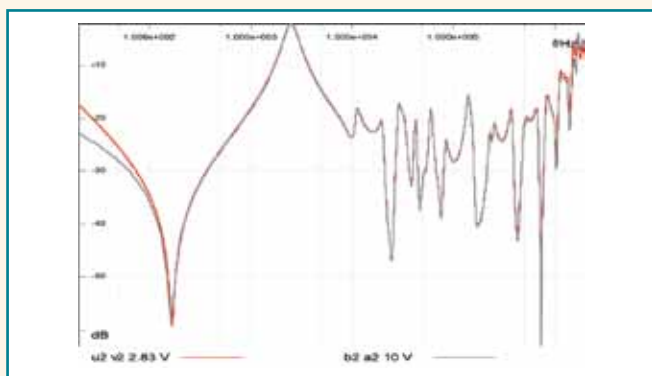


Figura 11 – Medidas com tensões diferentes

E. Aterramento inadequado do teste

A realização de aterramento inadequado provoca alterações na assinatura e pode levar a conseqüente erro de análise. A Figura 12 mostra como se apresenta os desvios devido ao aterramento não adequado.

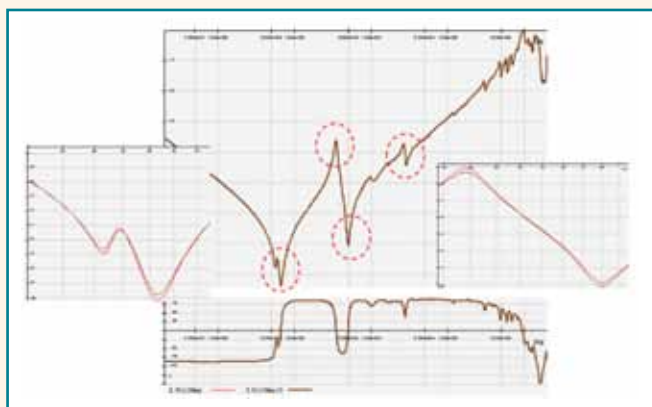


Figura 12 – Efeito do aterramento não adequado

F. Tensão ou fluxo residual no núcleo

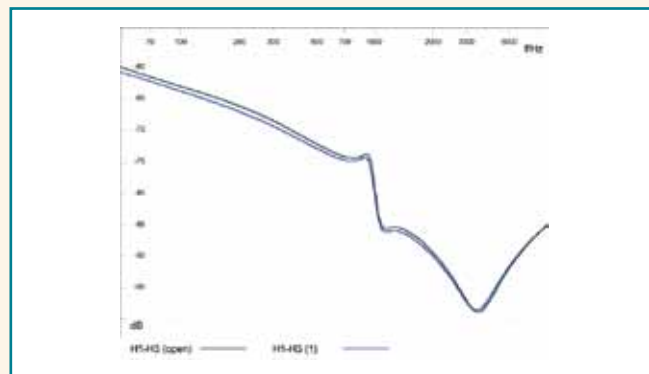


Figura 13 – Erro de medida devido ao remanescente

G. Calibração do instrumento de teste

A falta de calibração do equipamento de teste pode provocar não repetibilidade da medida. Apesar de aparentemente a assinatura ser idêntica, uma aproximação mostra o desvio nas medidas.

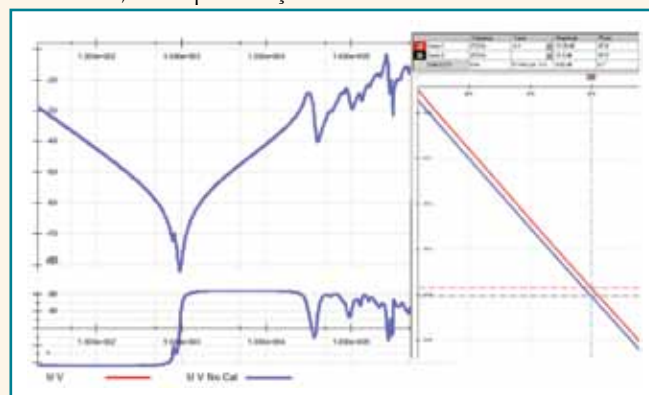


Figura 14 – Erro de calibração

H. Ajuste do teste

Os ajustes do teste, tais como o número de pontos a ser medido e a distribuição desses pontos pela escala de frequência, terão impacto direto na formação da assinatura e mais tarde na análise da medida. A Figura 15 mostra uma possível distribuição e na quantidade de pontos.

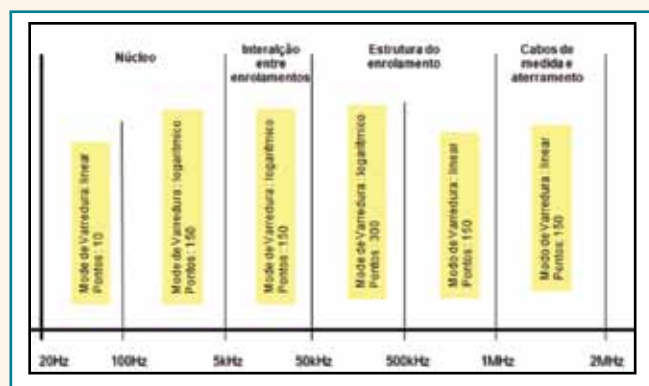


Figura 15 – Distribuição da medida no range de frequências – Omicron electronics

Nota-se que, além da quantidade diferente, altera-se também o modo de varredura (linear ou logarítmico). A diferença entre o uso da varredura proposta na Figura 15 e uma varredura puramente logarítmica é mostrada na Figura 16.



Figura 16 – Comparações de diferentes varreduras

1. Técnica de conexão

A conexão realizada pela maioria dos dispositivos utilizados até o momento envolve ligações com cabos que introduzem altas indutâncias no circuito medido. Esta é uma das causas de vários testes não conseguirem chegar a escalas mais altas de frequência, pois introduzem cada vez mais ruídos na medida, comprometendo a repetibilidade das respostas. A Figura 17 mostra exemplo de conexão usual e identifica os principais componentes. Observa-se um cabo coaxial para injeção de sinal conectado à bucha do lado de alta tensão e outra ponta de prova destinada para a medida é conectada com um fino cabo de cobre do flange metálico da bucha para o potencial de terra ou do tanque. Assim, comprova-se que a conexão realizada pelos equipamentos convencionais transforma-se em verdadeira antena, captando as interferências externas que podem se sobrepor fortemente aos sinais medidos.

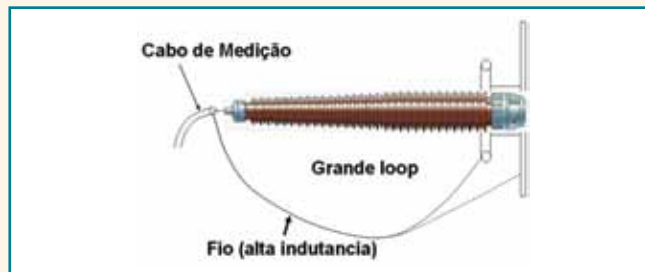


Figura 17 – Conexões usuais de equipamento de teste

Isto compromete sobremaneira a repetibilidade dos resultados finais. O trabalho realizado pela equipe do WG A2-26 Cigré mostrou as alterações que ocorrem devido à ocorrência das ressonâncias adicionadas ao sistema de medida por causa da configuração das conexões.

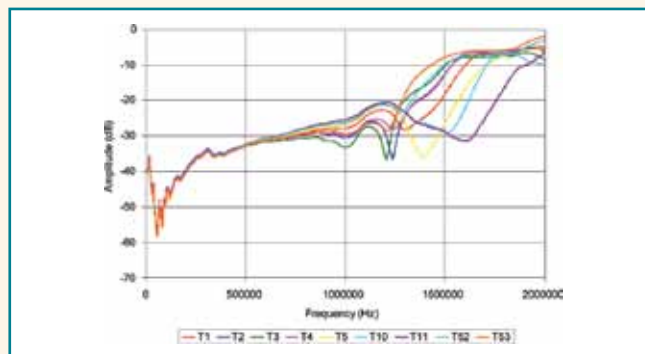


Figura 18 – Comparação para determinação de repetibilidade com vários equipamentos de teste

A Figura 18 mostra o resultado de uma comparação executada para avaliar a repetibilidade das medidas com o arranjo padrão, com diferentes instrumentos de medida de diferentes fabricantes com seus próprios conectores e cabos de cada fabricante. Nesta situação, a repetibilidade ocorre até 500 kHz aproximadamente. A Figura 19 mostra os mesmos equipamentos de teste utilizando uma só estrutura de conexão para todos. Observa-se, neste caso, a repetibilidade em até 1,5 MHz aproximadamente.

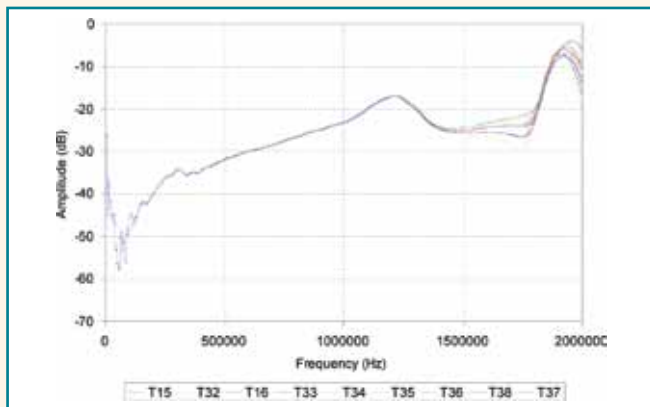


Figura 19 – Comparação com vários equipamentos de teste e com uma única estrutura de conexão

A conexão adequada não deve utilizar cabos finos. Devem ser utilizadas cintas com baixa resistência ôhmica e baixa indutância, mostrada na Figura 20.

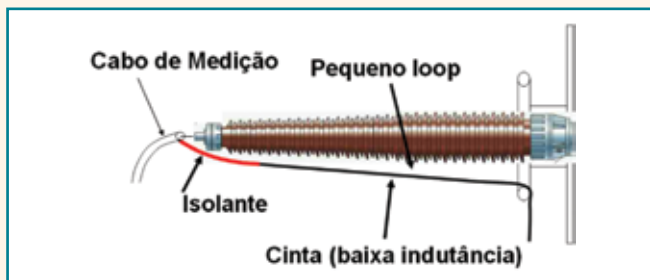


Figura 20 – Conexão adequada para o teste

Comparado ao método convencional descrito anteriormente, a Omicron electronics propõe uma tecnologia única para a realização do ensaio de SFRA com o equipamento FRAnalyzer. Ele promove uma conexão como mostrada nas Figuras 21 e 22, em que são utilizadas duas cintas colocadas rentes à descida da bucha resultando em baixas indutâncias no circuito. Além disso, graças à disposição de dois condutores de aterramento, utilizando os conectores especiais criados pela Omicron, a indução é reduzida a níveis mínimos.

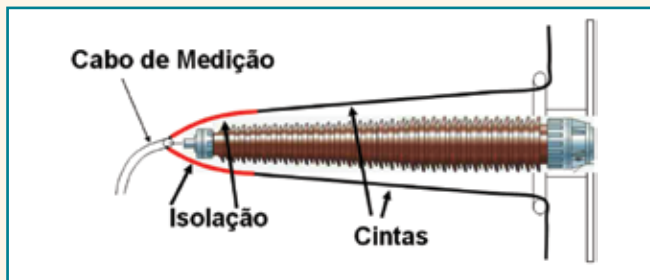


Figura 21 – Conexão do ponto de medida para o tanque com duas fitas (cintas)

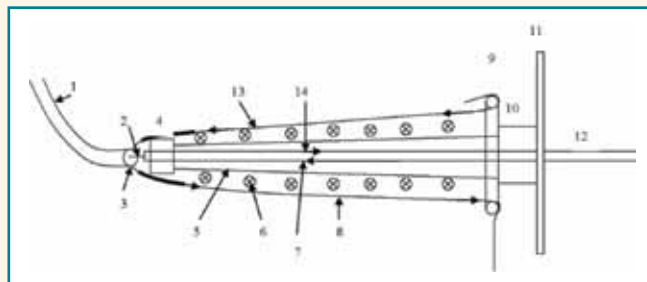


Figura 22 – Conexões realizadas pelo FRAnalyzer – designação dos componentes

Um campo de perturbação magnético pode interferir no circuito medido. As duas cintas e o condutor interno da bucha formam duas espiras para os sinais induzidos por este campo induzido. As correntes de interferência induzidas no condutor interno da bucha e as tensões induzidas possuem direções opostas. Isto resulta em redução das perturbações pela anulação dos efeitos de campo magnéticos com sentidos também opostos.

A Figura 23 mostra a configuração padrão para o FRAnalyzer:

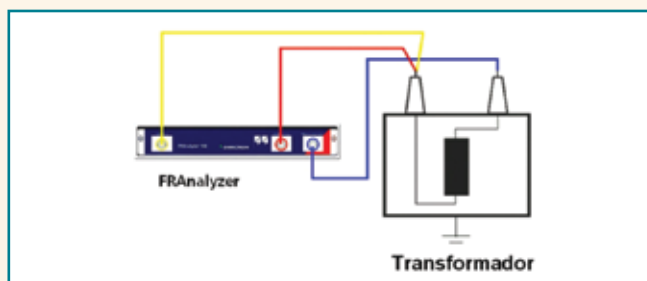


Figura 23 – Diagrama esquemático de conexões padrão do FRAnalyzer

Para realizar tal conexão, foi criada uma tecnologia baseada em conectores especiais especialmente criados para o uso de cabos coaxiais de medida e das cintas de aterramento, mostrado na Figura 24.



Figura 24 – Conexão dos cabos de teste no terminal do transformador.

A conexão para o sinal do gerador de sinais (amarelo) e o cabo em que é realizada pelo canal de referência (vermelho). Os dois conectores são colocados em um adaptador BNC 2x1. Podem-se observar os parafusos com as fitas de aterramento conectadas cada uma de um lado do ponto de injeção dos cabos coaxiais. A Figura 25 mostra a conexão para medida da tensão de saída (azul) do elemento sob teste com detalhes.



Figura 25 – Conexão dos cabos de medida no terminal do transformador

J. Erros de medida

Os erros de medida são geralmente causados por contatos ruins nas garras de medida e pontos de aterramento, ajustes inadequados para supressão de ruídos, curto circuito do sinal de medida. Entretanto, o conhecimento básico dos resultados esperados é a melhor ferramenta para evitar erros de medida. A maioria dos erros é detectada durante a realização da análise e dos relatórios. Esses erros deveriam ser identificados em campo, no momento do ensaio.

Atualmente, o desafio dos fabricantes de equipamentos de teste e pesquisadores é a implantação de uma detecção automática de erros de medida no software de teste de FRA. A seguir são mostrados alguns exemplos de erros de medida.

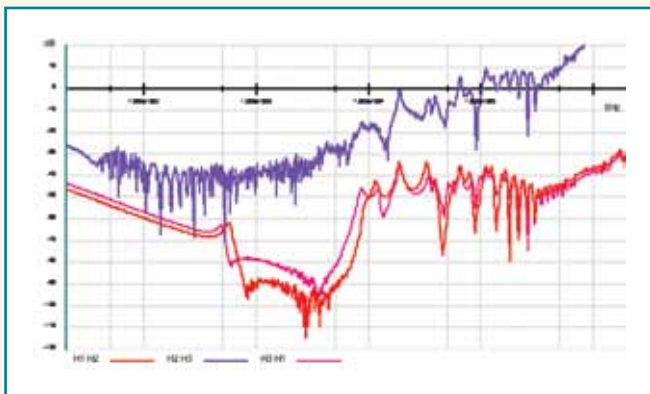


Figura 26 – Curto-circuito do sinal de medida



Figura 27 – Ponto de curto-circuito do sinal de medida, referente à Figura 26

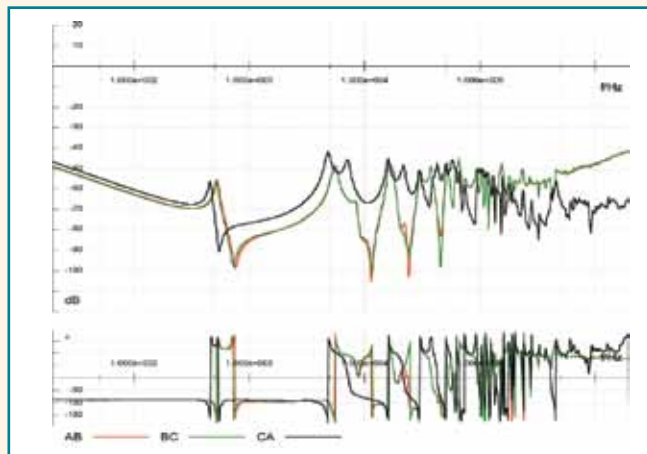


Figura 28 – Contato ruim do ponto de aterramento



Figura 29 – Ponto de contato de aterramento referente à Figura 28

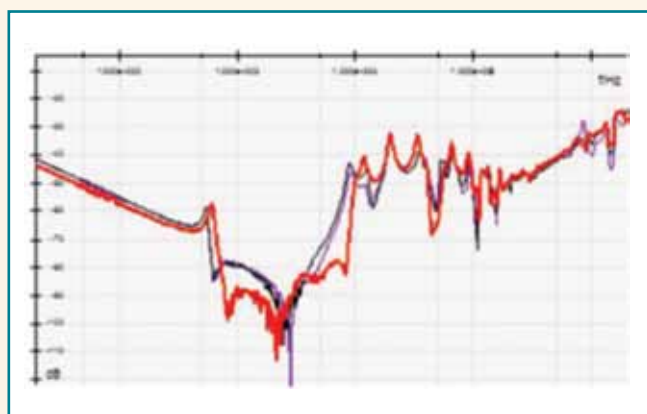


Figura 30 – Ajustes inadequados para supressão de ruídos – ajuste de largura de banda de 300 kHz

* MARCELO EDUARDO DE CARVALHO PAULINO é engenheiro electricista e especialista em manutenção de sistemas elétricos. É instrutor certificado pela Omicron Electronics, membro do CE B5 do Cigré-Brasil e gerente técnico da Adimarco | marcelo@adimarco.com.br

CONTINUA NA PRÓXIMA EDIÇÃO

Confira todos os artigos deste fascículo em www.osetoareletrico.com.br
Dúvidas, sugestões e comentários podem ser encaminhados para o e-mail redacao@atitudeeditorial.com.br