



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

Versão 1.0  
XXX.YY  
22 a 25 Novembro de 2009  
Recife - PE

**GRUPO XIII**

**GRUPO DE ESTUDO DE TRANSFORMADORES, REATORES, MATERIAIS  
E TECNOLOGIAS EMERGENTES - GTM**

**DESENVOLVIMENTO DE UM CRITÉRIO PARA AVALIAÇÃO DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA  
ATRAVÉS DE RESPOSTA FREQUÊNCIA**

**Helvio J. A. Martins(\*)    Cintia de Faria Ferreira    Carlos Magno R. Vasques    Luiz Eduardo D. Santos**

**CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica**

**RESUMO**

Este trabalho apresenta um critério baseado no uso de dois parâmetros (correlação e desvio de espectro), aplicado a avaliação de transformadores de potência pelas técnicas de resposta em frequência e impedância terminal. Baseado em mais de 100 equipamentos medidos ao longo de 10 anos, apresentam-se também alguns exemplos práticos de aplicação das técnicas no sistema elétrico Brasileiro.

**PALAVRAS-CHAVE**

Diagnóstico, Impedância Terminal, Resposta em Frequência, Transformadores de Potência.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Dentre as várias técnicas disponíveis aplicáveis a monitoramento e diagnóstico de equipamentos, a obtenção da resposta em frequência tem sido utilizada de forma ampla, em particular para os transformadores de potência, focando principalmente os seguintes pontos: Avaliação durante ensaios de tipo, Identificação de ressonâncias e anti-ressonâncias naturais do equipamento, Auxílio à modelagem do equipamento para estudos de transitório eletromagnético e Avaliação de deslocamentos geométricos dos enrolamentos.

Alterações geométricas dos enrolamentos algumas vezes estão associadas a esforços eletromecânicos devido a curto-circuitos que ocorrem nas vizinhanças da subestação onde o equipamento encontra-se instalado. Uma causa comum refere-se a falha fase-terra resultante de uma descarga atmosférica. Estas alterações são cumulativas e são agravadas pelos efeitos da vibração associada ao envelhecimento natural da isolamento sólida, havendo uma redução significativa da pressão de compressão, e diminuição a suportabilidade a curto-circuitos ao longo da vida útil do transformador, sem que seja caracterizado um defeito. Assim, o transformador permanece em operação até que esta condição ocasione uma falha em seu dielétrico. Um outro fato é que transformadores são especificados e projetados para suportarem os efeitos de curto-circuitos de curta duração em seus terminais, porém, no caso de grandes transformadores o desempenho a curto-circuitos raramente é testado [1].

Quanto ao transporte do equipamento, estando sujeito a vibrações excessivas, quedas ou “trancos” nas operações de carga e descarga, situações nem sempre reavaliadas antes de pôr-se o equipamento em operação. Este trabalho visa contribuir na avaliação de transformadores de potência a partir de dados de impedâncias terminais e resposta em frequência, analisados de forma quantitativa associada a um critério de diagnóstico

**2.0 - BANCO DE DADOS VERSUS PADRÕES**

Nos últimos 10 anos, para quase 100 equipamentos (transformadores e autotransformadores) das mais diversas potências, classes de tensão e fabricantes, o CEPEL realizou medições de resposta em frequência e impedância terminal, consolidando estas informações num banco de dados. Antes da armazenagem, os dados são previamente criticados, qualificados e em alguns casos filtrados ou até inutilizados em função de algum evento (ex. excesso de ruído) que dificulte a futura utilização dos mesmos.

Estes dados têm servido como fonte de referência tanto para concessionárias quanto para fabricantes de equipamentos para avaliação e diagnóstico. Outro aspecto refere-se à análise destes resultados em busca de identificação de padrões de normalidade gerados pelas técnicas, visto que a maioria dos dados refere-se a equipamentos novos ou usados em boas condições de funcionamento, possibilitando algumas análises, como por exemplo: Identificação de padrões de normalidade, a partir da verificação da resposta característica de uma dada família de equipamentos; Comparação entre equipamentos de famílias diferentes ou não e Correlações entre equipamentos.

As Figuras de 1 a 7 mostram alguns exemplos de famílias de equipamentos para as quais foram medidas a resposta em frequência e a impedância terminal. Nas Figuras 1, 2, 5, 6 e 7, a aplicação do sinal foi realizada nos terminais H1-H0 e medido em X1-X2, enquanto que para a Figura 3 a aplicação foi nos terminais X1-X2 e medido em H1-H0. Todos os gráficos relativos à resposta em frequência são normalizados em relação à resposta na frequência de 60 Hz, enquanto que os gráficos para as impedâncias terminais têm suas amplitudes mostradas em Ohms. No Brasil, com raras exceções, a maioria dos equipamentos é construtivamente do tipo “core”, isto é, núcleo envolvido pelos enrolamentos.

Analisando-se as curvas de resposta em frequência mostradas na Figura 1, nota-se que os transformadores trifásicos exibem vários pólos, notadamente no entorno das frequências de 4, 80, 300, 800 kHz; bem como alguns pólos entre 1 e 10 MHz, estes últimos, sem contudo caracterizar uma região de predominância de incidência de pólos, provavelmente por influência das particularidades das ligações dos enrolamentos às buchas de alta tensão, bem como o modo de conexão dos instrumentos de medição às buchas dos transformadores.

O aspecto das curvas de impedância terminal para o grupo de equipamentos trifásicos é muito semelhante até pouco antes da frequência de 1 MHz, conforme mostrado na Figura 2, sendo que os mínimos (~4 kHz e ~800 kHz) destas curvas têm seus correspondentes nos pólos das curvas de resposta em frequência. Os valores máximos para a impedância terminal estão em torno de 400 Hz e 6 kHz.

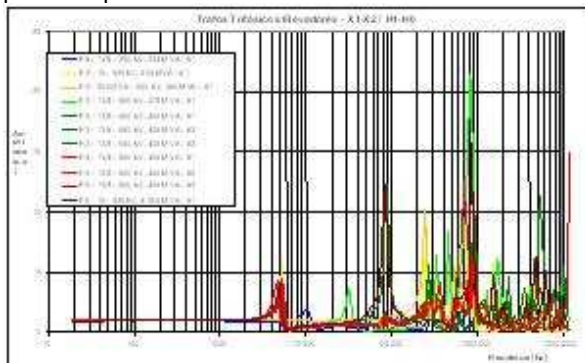


FIGURA 1 – Transformadores Elevadores 3Φ – Resposta em Frequência X1-X2 / H1-H0(aplicação)

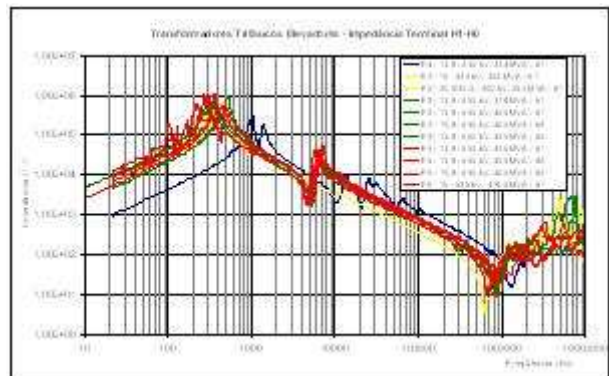


FIGURA 2 – Transformadores Elevadores 3Φ – Impedância Terminal vista de H1-H0

Importante notar que alguns pólos identificados na resposta em frequência não são facilmente identificados pelo ensaio de impedância terminal, por exemplo, 80 kHz, o que sugere uma maior sensibilidade desta técnica para identificação e acompanhamento de parâmetros de interesse, ou mesmo de parâmetros que venham a ser utilizados na modelagem do equipamento. Embora não mostrado, o comportamento dos demais enrolamentos,  $H_2-H_0$  e  $H_3-H_0$ , segue padrões similares àquele mostrado para  $H_1-H_0$ .

Analisando-se as curvas de resposta em frequência mostradas na Figura 3, nota-se que os transformadores trifásicos quando excitados pelo enrolamento de baixa tensão exibem um único pólo em torno da frequência de 5,5 kHz, exceto para o equipamento de F4. O aspecto das curvas de impedância terminal vista de  $X_1-X_2$  para o grupo de equipamentos trifásicos é muito semelhante entre si (Figura 4), porém possui um padrão característico que difere daquele obtido quando visto do enrolamento de alta tensão correspondente ( $H_1-H_0$ ). Até o primeiro mínimo, a menos da relação entre os módulos das impedâncias, as curvas são semelhantes; a partir deste ponto o enrolamento de baixa tensão exhibe um padrão próprio, rico em máximos e mínimos.

A curva de impedância terminal mostrada na Figura 4 traz mais informações que sua correspondente de resposta em frequência, portanto uma situação inversa encontrada quando a análise é feita a partir dos enrolamentos de alta tensão. A análise da impedância terminal mostra curvas semelhantes para todos os equipamentos, sendo os mínimos destas curvas correspondentes aos pólos das curvas de resposta em frequência.

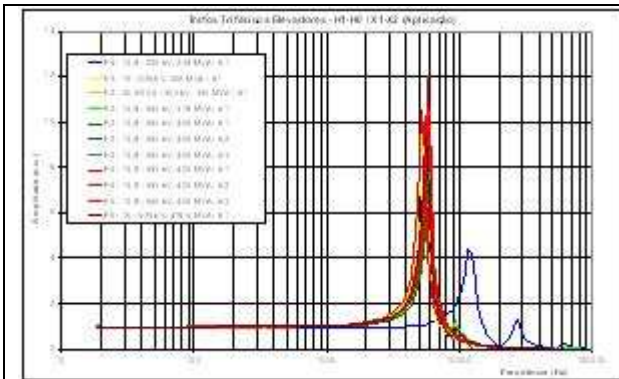


FIGURA 3 – Transformadores Elevadores 3Φ – Resposta em Frequência, H1-H0 / X1-X2 (aplicação)

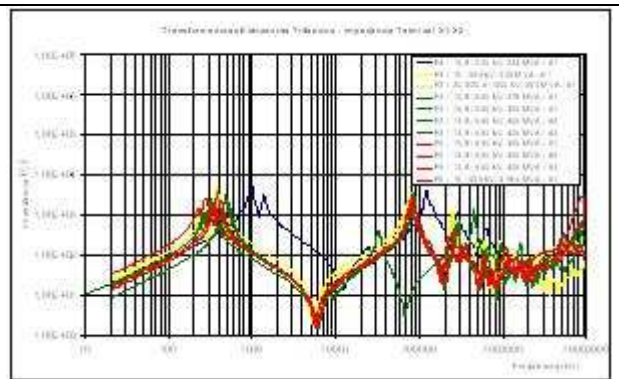


FIGURA 4 – Transformadores Elevadores 3Φ – Impedância Terminal vista de X1-X2

Também na análise das curvas de impedância terminal, ver Figura 5, é possível identificar para uma mesma família de equipamentos, o efeito do fluxo residual, notadamente até aproximadamente 1kHz. A curva de resposta em frequência correspondente é mostrada na Figura 6.

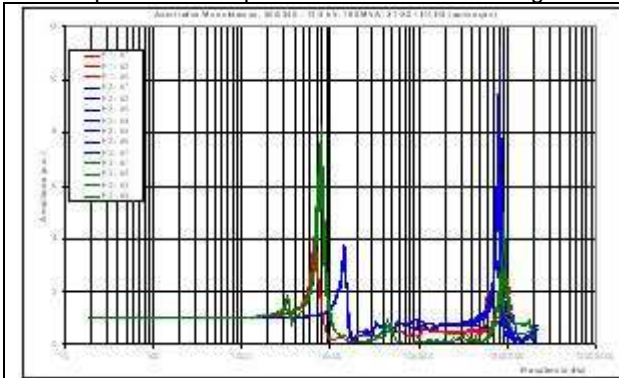


FIGURA 5 – Autotransformadores 1Φ, 186MVA – Impedância Terminal vista de H1-H0

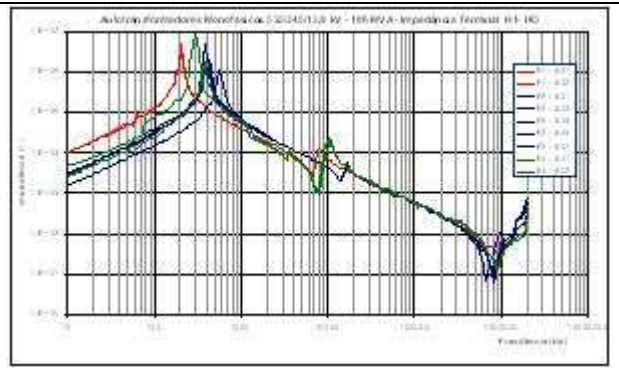


FIGURA 6 – Autotransformadores 1Φ, 186 MVA – Resposta em Frequência X1-X0 / H1-H0 (aplicação)

Para a resposta em frequência os equipamentos de mesmo fabricante exibem respostas semelhantes em amplitude e frequência, sendo as diferenças atribuídas principalmente a tolerâncias de projeto. Observando-se a totalidade de equipamentos, dois pólos se destacam, um no entorno de 10 kHz e outro pouco antes de 1 MHz; havendo leves diferenças entre as curvas de diferentes fabricantes, especialmente nos equipamentos do fabricante F2. Finalmente um exemplo de equipamento do tipo “Shell” (núcleo envolvente) é mostrado na Figura 7.

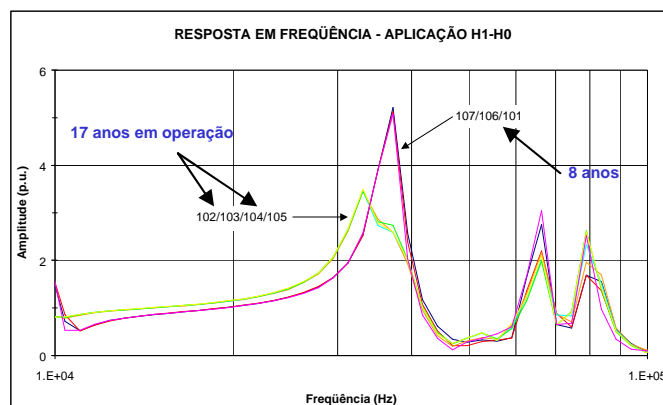


FIGURA 7 – Transformadores Elevadores 1Φ – 19/500 kV, 230 MVA

Estes equipamentos têm a característica predominante de melhor desempenho frente a solicitações dielétricas, dada a melhor distribuição do potencial ao longo dos enrolamentos. Um dado importante é que os pólos (amplificações) encontram-se distribuídos somente até 100 kHz.

### 3.0 - AVALIAÇÃO E DIAGNÓSTICO

Normalmente a avaliação de algum equipamento utilizando-se funções de transferência, obtidas a partir de medições de resposta em frequência ou impedância dos terminais, é feita de modo comparativo e qualitativo. Os procedimentos adotados para aplicação das devidas medições seguem geralmente uma das situações:

- Se a amostra for única, isto é, desconhece-se qualquer outra similar, e o equipamento é trifásico, utiliza-se a comparação por simetria à fase central;
- Sendo possível identificar uma família à qual o equipamento pertence é possível compará-lo a outros;
- No caso de haver um histórico de medições do equipamento, deixa de ter importância o fato de ser único ou pertencer a uma determinada família, pois é possível uma análise por comparação ao longo do tempo.

Serão enumerados a seguir dois modos que se sobressaem na literatura para comparação de curvas representativas de funções de transferência. O coeficiente de correlação ( $-1 \leq r \leq 1$ ) pode ser usado para medir a afinidade entre duas curvas de funções de transferência, denotadas por  $x$  e  $y$ , com  $n$  pontos de frequência cada uma, conforme a equação a seguir.

$$r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{x_i - \bar{x}}{\sqrt{\text{var}(x)}} \right) \left( \frac{y_i - \bar{y}}{\sqrt{\text{var}(y)}} \right)$$

Onde,

$\bar{x}$  e  $\bar{y}$  - são valores relativos as médias das funções  $x$  e  $y$ ;

$\text{var}(x)$  e  $\text{var}(y)$  - são as variâncias das funções  $x$  e  $y$ ;

$n$  - número de pontos medidos de cada função de transferência.

A aplicação do coeficiente de correlação para comparação entre curvas oriundas de experimentos relativos a medições de impedância terminal é citada em [2], onde o autor sugere que correlações inferiores a 0,9950 são indicativas de defeitos. Numa investigação mais profunda sobre modos de comparação de curvas [3], mostra-se uma limitação importante deste método, a qual está relacionada a forma das curvas comparadas. Curvas múltiplas uma da outra, embora deslocadas em amplitude ou fase, podem gerar um falso diagnóstico.

Uma outra abordagem para comparação de duas curvas é utilizada em [4] com a equação para desvio de espectro, que mede a afinidade entre uma dada curva e uma curva média obtida do conjunto de curvas de interesse, não havendo informação sobre valores limites a partir dos quais configura-se um indicativo de defeito. No caso da fórmula abaixo, "m" foi considerado igual a 2.

$$\sigma = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{\left( \frac{x_i - (x_i + y_i)/2}{(x_i + y_i)/2} \right)^m + \left( \frac{y_i - (x_i + y_i)/2}{(x_i + y_i)/2} \right)^m}$$

Qualquer que seja o método escolhido para comparação entre as curvas, é fundamental que as mesmas tenham sido previamente tratadas e qualificadas, eliminando-se preferencialmente na fase de medição possíveis fontes de interferência. Esta fase é crucial, tanto assim que um trabalho de comparação de medição de curvas de impedância terminal para um determinado equipamento [5], envolvendo laboratórios conceituados de algumas entidades internacionais, resultou na obtenção de resultados semelhantes somente até a frequência de 300 kHz.

A busca de algum critério que possa ser aplicado objetivando um diagnóstico a partir da comparação entre duas situações, expressas por suas curvas de impedância terminal e/ou resposta em frequência tem sido objeto de estudo [6], conforme mostrado na Tabela 1 .

TABELA 1 – CRITÉRIO PARA DIAGNÓSTICO [6]

Faixa Frequência	Indicativo
< 2 kHz	Núcleo magnético
2 kHz – 20 kHz	Interação entre enrolamentos
20 kHz – 1 MHz	Efeitos relativos à geometria do enrolamento sob teste
> 1 MHz	Conexões (enrolamento e/ou medição)

### 4.0 - METODOLOGIA PROPOSTA

As curvas de cada uma das funções de transferência (FT) medidas são inicialmente comparadas com as originais, calculando-se para cada década de frequência, tanto o coeficiente de correlação quanto o desvio de espectro em busca de alguma alteração significativa. Entende-se por alteração significativa aquela que ultrapassa um

determinado limite, por exemplo, a tolerância de projeto [7], obtida para um grupo de transformadores de mesmo projeto e família de fabricação.

Neste trabalho, para estabelecimento dos limites utiliza-se um valor mínimo de correlação ( $r_{\min}$ ) e um valor máximo para o desvio espectral ( $\sigma_{\max}$ ), obtidos para cada família de equipamentos. Para avaliação utiliza-se uma composição dos parâmetros conforme mostrado na Tabela 2 a seguir: É de se esperar que à medida que o equipamento envelheça as funções de transferência originais se modifiquem, sendo necessário de tempos em tempos uma calibração do sistema associada a alguma inspeção interna da unidade (se possível). A Figura 8 sintetiza o procedimento utilizado para avaliar e diagnosticar um equipamento.

TABELA 2 – PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO

r	$\sigma$	Situação
$> r_{\min}$	$< \sigma_{\max}$	Normal
$< r_{\min}$	$> \sigma_{\max}$	Defeito
$> r_{\min}$	$> \sigma_{\max}$	Defeito <sup>(*)</sup>

(\*) – Casos em que as curvas podem ser múltiplas entre si.

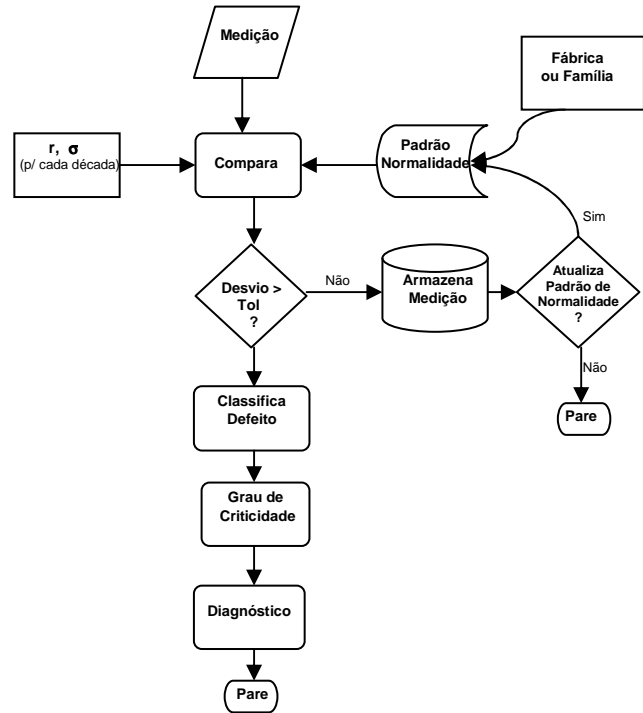


FIGURA 8 – Fluxograma para avaliação e diagnóstico

5.0 - EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

5.1 Exemplo #1 - Transporte

Durante o transporte de um autotransformador de 224 MVA, entre a fábrica e a subestação, uma situação inesperada forçou uma parada abrupta num acostamento em desnível. Como consequência do impacto houve um deslocamento da parte ativa, principalmente no enrolamento de AT como mostram a Figura 9 e Tabela 3.

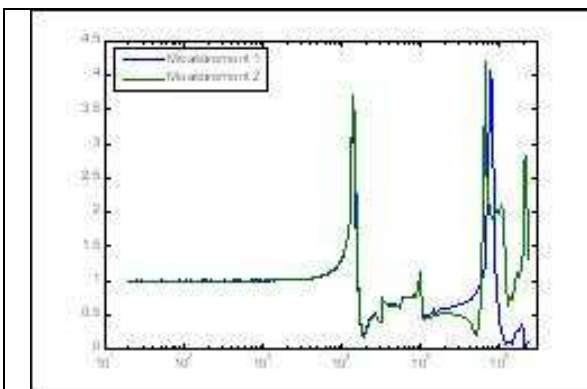


FIGURA 9– Resposta em Frequência

TABELA 3  
COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO E DE DESVIO DE ESPECTRO

Faixa de Frequência	Resposta em Frequência		Impedância Terminal	
	r	$\sigma$	r	$\sigma$
10Hz – 100Hz	0,999	0,002	0,999	0,001
100Hz – 1kHz	1,000	0,001	1,000	0,001
1kHz – 10kHz	0,999	0,003	0,999	0,003
10kHz – 100kHz	0,991	0,033	0,991	0,033
100kHz – 1MHz	0,787	0,284	0,799	0,256
1MHz – 2MHz	0,772	1,069	0,805	0,930

5.2 Exemplo #2 – Avaria Durante Transporte

As Figuras 10 e 11 abaixo mostram um caso complexo, pois envolve alterações em duas faixas de frequências,



para um transformador elevador, novo, de 13,8/550 kV, 405 MVA, que foi danificado durante transporte entre a fábrica e a usina hidroelétrica da concessionária, quando rompeu-se um dos apoios transversais de madeira existente entre o fundo do tanque do transformador e a carreta, provocando uma pequena queda sobre o pranchão da própria carreta.

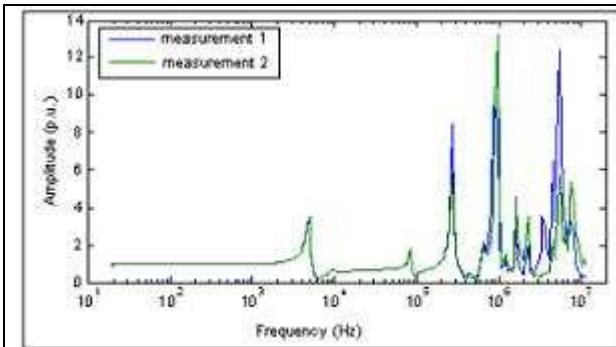


FIGURA 10 – Transformador Elevador 3Φ – 13,8/550 kV, 405 MVA, Resposta em Frequência X1-X1/H1-H0 (aplicação)

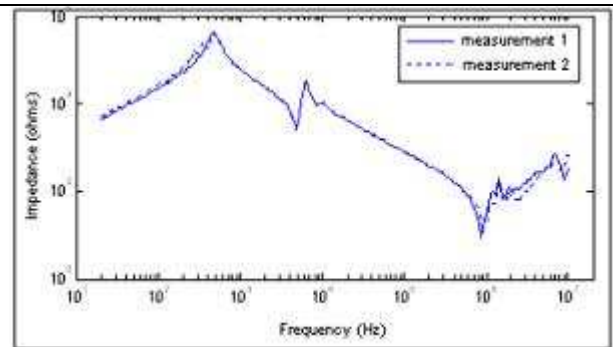


FIGURA 11 – Transformador Elevador 3Φ – 13,8/550kV, 405 MVA, Impedância Terminal vista de H1-H0

Para as duas curvas, uma relativa a resposta em frequência entre o enrolamento de alta tensão e o de baixa tensão, e outra a impedância terminal do enrolamento de alta tensão, é mostrado na Tabela 4 a seguir os coeficientes de correlação e de desvios de espectro.

TABELA 4 – COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO E DESVIO DE ESPECTRO

Faixa de Frequência	Resposta em Frequência		Impedância Terminal	
	r	$\sigma$	r	$\sigma$
10Hz – 100Hz	1,0000	0,0016	1,0000	0,1190
100Hz – 1kHz	1,0000	0,0019	0,9790	0,1309
1kHz – 10kHz	0,9996	0,0106	0,9998	0,0079
10kHz – 100kHz	0,9999	0,0048	0,9999	0,0102
100kHz – 1MHz	0,9216	0,1305	0,9998	0,0791
1MHz – 4MHz	0,7947	0,4881	0,8951	0,2659

A análise das curvas de impedância para as duas primeiras décadas indica algum problema com o núcleo, reforçado pelo fato de que o equipamento não fora energizado. Pelas curvas de resposta em frequência este defeito não é percebido. A curva de resposta em frequência tem alteração em amplitude e fase nos pólos para faixas de frequência acima de 100 kHz, caracterizando também alguma alteração no enrolamento.

### 5.3 Exemplo #3 – Interação entre Transformador e Sistema

A partir da aplicação das técnicas de medição de Impedância Terminal e de Resposta em Frequência, foi possível avaliar de que forma o projeto de um equipamento influi nos dados obtidos por estas duas técnicas, e identificar que tipo de interação pode existir entre o transformador e as manobras de equipamentos na subestação. Na Figura 12 é mostrada a vista superior de linhas aéreas curtas interligando os transformadores elevadores a subestação. Os "links" de interligação de cada banco de transformadores aos equipamentos de manobras têm comprimentos distintos, e os bancos foram fornecidos por três diferentes fabricantes.

Os transformadores posicionados no "link" de menor comprimento falhavam de modo intempestivo, embora nenhuma das técnicas de monitoramento disponível na época sinalizasse alguma anormalidade. A Figura 13 mostra a comparação da resposta em frequência medida em transformadores de 3 diferentes fabricantes. Sendo que para o fabricante B, foram registradas falhas em algumas unidades. Percebe-se a diferença entre os espectros obtidos para os quatro equipamentos analisados (projetos distintos). É interessante destacar a influência da reforma feita em um transformador do fabricante C. Nota-se que houve uma reformulação de projeto durante a reforma, devido à diferença entre o espectro deste transformador (representado em azul na Figura 13), e o espectro de um de seus "irmãos" (em verde). Ainda a partir da Figura 13, pode-se identificar uma larga faixa de ressonância entre as frequências de 500 a 800 kHz nos equipamentos do fabricante B.

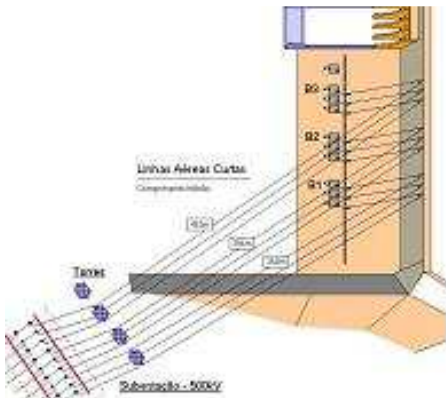


FIGURA 12 - Arranjo dos transformadores/"links"

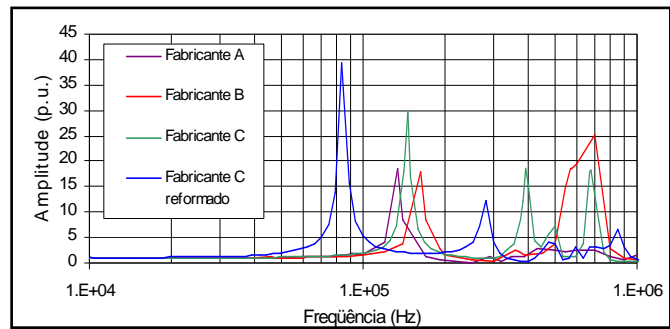


FIGURA 13 - Comparação resposta em frequência de transformadores de diferentes fabricantes. Aplicação do sinal em H (delta) e medição em X (estrela).

É interessante destacar a influência da reforma feita em um transformador do fabricante C. Nota-se que houve uma reformulação de projeto durante a reforma, devido à diferença entre o espectro deste transformador (representado em azul na Figura 13), e o espectro de um de seus "irmãos" (em verde). Mediu-se as formas de onda de manobras de disjuntores nas buchas dos transformadores e identificação de faixas frequências típicas (Tabela 5), assim como medições ao longo de um enrolamento são de equipamento do fabricante B.

TABELA 5 – ALGUMAS FREQUÊNCIAS NATURAIS EM PARTES DO ENROLAMENTO

TAPS			BOBINAS		
Ponto	Freq. (kHz)	Amplificação (p.u.)	Ponto	Freq. (kHz)	Amplificação (p.u.)
H <sub>1</sub> -6	560	1.5	H <sub>1</sub> -34	90	3.6
H <sub>1</sub> -6	730	2.0	H <sub>1</sub> -34	270	2.4
6-7	150	6.3 a 7.5	H <sub>1</sub> -34	560	3.0
6-7	530	2.0	H <sub>1</sub> -34	570	3.0
6-7	730	4.2 a 4.6	H <sub>1</sub> -34	730	3.5 a 4.5
6-7	600	2.0	1-H <sub>0</sub>	730	1.5
2-6	150	2.0	1-H <sub>0</sub>	760	14.5
2-6	630	5.5	1-H <sub>0</sub>	820	9.0
2-6	730	3.0	16-32	90	2.9
2-6	750	1.8 a 1.9	16-32	300	1.8
2-6	820	1.2	16-32	500	1.8
2-3	150	2.0	16-32	720	2.9
2-3	630	5.5	16-32	760	2.3 a 3.3
2-3	730	3.7	16-32	820	3.7 a 4.0
2-3	750	2.1 a 2.2	H <sub>1</sub> -18	90	3.6 a 3.8
2-3	820	1.3 a 1.4	H <sub>1</sub> -18	530	2.4 a 3.8
6-4	160	7.5	H <sub>1</sub> -18	730	3.7
6-4	730	3.0	H <sub>1</sub> -18	760	16.2 a 16.6
6-4	750	1.7 a 3.1	H <sub>1</sub> -18	820	5.1 a 5.3
6-4	820	1.1 a 2.0	1X <sub>1</sub> -1X <sub>2</sub>	300	1.4
4-2	90	2.6	1X <sub>1</sub> -1X <sub>2</sub>	650	4.1
4-2	160	7.5 a 7.8	1X <sub>1</sub> -1X <sub>2</sub>	730	8.6
-	-	-	1X <sub>1</sub> -1X <sub>2</sub>	760	4.1 a 11.0
-	-	-	1X <sub>1</sub> -1X <sub>2</sub>	820	6.5
Faixas de Frequências Geradas por Manobras de Disjuntores (kHz)					
75 to 85		112 to 162		817 to 897	

Nas solicitações geradas pelos disjuntores, durante as manobras, foi possível perceber que as componentes com frequências mais críticas, com amplitude significativa, se encontravam exatamente na faixa de ressonância dos equipamentos do fabricante B. Isto tornava a condição de funcionamento do equipamento bastante crítica, conforme mostrado na Tabela 3. Os equipamentos do fabricante B obrigatoriamente passaram a operar conectados ao link mais longo, fazendo com que as frequências naturais de oscilação das manobras de disjuntores não mais coincidisse com aquelas naturais dos transformadores. Esta solução perdura até o momento, sem que tenha havido outras falhas de transformadores.

## 6.0 - CONCLUSÕES

- O trabalho mostra alguns padrões de resposta em frequência e impedância terminal para algumas famílias importantes de equipamentos utilizados no Brasil. Os padrões são influenciados mais pela potência e aplicação do equipamento do que pelo fabricante.
- As técnicas de Resposta em Frequência e Impedância Terminal são complementares.
- O uso simultâneo do coeficiente de correlação e do desvio de espectro, calculados para cada década de frequência pode ser considerado uma ferramenta útil para avaliação de transformadores. A técnica ainda carece de melhoria no aspecto quantitativo do defeito identificado.
- Finalmente alguns exemplos de aplicação da técnica (resposta em frequência e impedância terminal) associada a um critério foram aplicados a casos de avaria durante transporte e interação entre transformador e sistema elétrico.

## 7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] LAPWORTH, J. A., 1995, "Mechanical Condition Assessment of Power Transformers Using Frequency Response Analysis". *Double International Conference*.
- [2] RYDER, S. A., 2002, "Methods for Comparing Frequency Response Analysis Measurements". *IEEE International Symposium on Electrical and Insulating*, Boston, USA, 7 – 10 April.
- [3] KIM, W. J., PARK, B., SEUNG J., KIM, S., 2005, "Fault Diagnosis of Power Transformer Using an Improved Frequency Response Analysis". *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 20, n. 1, January.
- [4] BAK-JENSEN, J., BAK-JENSEN, B., MIKKELSEN, S. D., 1995, "Detection of Faults and Ageing Phenomena in Transformer by Transfer Functions", *IEEE Transactions on Power Delivery*, v.10, n.1, pp. 308-314, January.
- [5] WGA2.26, 2006, "Mechanical Condition Assessment of Transformer Windings using Frequency Response Analysis (FRA)". *Electra*, n. 228, pp.30-52, October.
- [6] SOFIAN, D. M., "Transformer FRA Interpretation for Detection of Winding Movements", PhD Thesis, The University of Manchester, July 2007.
- [7] CHRISTIAN, J., FESER, K., 2004, "Procedures for Detecting Winding Displacements in Power Transformers by the Transfer Function Method", *IEEE Transactions on Power Delivery*, v.19, n.1, pp. 214-220, January.

## 8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

**Helvio Jailson Azevedo Martins:** Nasceu em Nova Friburgo – RJ, em Julho de 1955. Graduado em Engenharia Elétrica (sistemas de potência) pela UFRJ, 1979, onde também obteve o grau de Mestrado em Engenharia Elétrica (Alta Tensão), 1987; e Doutor em Engenharia Elétrica em 2007, desenvolvendo tese sobre monitoramento de deslocamentos geométricos de enrolamentos de transformadores de potência utilizando a resposta em frequência associada a algoritmos de inteligência artificial. Iniciando experiência profissional na ex-PTEL- Projetos e Estudos de Engenharia, participando de estudos de planejamento da interligação do sistema elétrico brasileiro e projetos de subestações. No CEPEL desde 1985, atuando no desenvolvimento de técnicas de ensaios aplicadas a avaliação de equipamentos elétricos de AT. Atualmente desenvolve pesquisas relacionadas a métodos e técnicas para monitoramento, avaliação e diagnóstico de equipamentos elétricos. É autor de diversos trabalhos, nacionais e internacionais, participando ativamente de alguns grupos de trabalho do Cigré.

**Cintia de Faria Ferreira:** Nascida em Vassouras – RJ , em outubro de 1982. Graduiu-se na Universidade Severino Sombra em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Potência, em 2007. Atualmente, exerce suas atividades no CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica), realizando pesquisas voltadas à avaliação e diagnóstico de estados operativos dos equipamentos elétricos de alta tensão, contribuindo para o desenvolvimento de métodos e técnicas. E-mail: [cintiaf@cepel.br](mailto:cintiaf@cepel.br)

**Carlos Magno Rodrigues Vasques:** Nasceu em Volta Redonda – RJ , em Agosto de 1978. Graduiu-se em Engenharia Eletrônica e Computação pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004. Encontra-se atualmente em programa de Mestrado na Universidade Federal do Rio de Janeiro, atuando na área de processamento de sinais e inteligência computacional. Iniciou suas atividades profissionais no CEPEL em janeiro de 2005 envolvendo-se em atividades de análise e estudo de projetos de equipamentos elétricos utilizados em áreas classificadas bem como o acompanhamento de produtos junto aos fabricantes. Atualmente participa de pesquisas voltadas ao desenvolvimento de métodos e técnicas para monitoramento, avaliação e diagnóstico de equipamentos elétricos através da aplicação das técnicas de medição de sinais no domínio da frequência (transferência de tensão e impedância). É co-autor de alguns trabalhos nacionais. E-mail: [cmagno@cepel.br](mailto:cmagno@cepel.br)

**Luiz Eduardo Dias Santos:** Nascido no Rio de Janeiro – RJ, em junho de 1960. Graduiu-se na Escola Técnica Federal Celso Suckow da Fonseca – RJ em Eletrotécnica, em 1980. Ingressou na Universidade Veiga de Almeida em 1982 cursando engenharia elétrica até o 5º período. De outubro de 1982 até a presente data, exerce suas atividades no CEPEL, onde inicialmente participou na área de potência ensaiando equipamentos elétricos de alta tensão para o setor elétrico nacional e internacional no período de 1982 até 1999. Atualmente, participa realizando pesquisas voltadas à avaliação e diagnóstico de estados operativos dos equipamentos elétricos de alta tensão, contribuindo para o desenvolvimento de métodos e técnicas. E-mail: [leds@cepel.br](mailto:leds@cepel.br)