

## Capítulo IX

# Análise de resposta em frequência Diagnóstico de transformadores de potência utilizando análise de resposta em frequência e impedância terminal

Por Marcelo Paulino\*

Este texto descreve os conceitos e princípios da aplicação da análise de resposta em frequência e impedância terminal. Mostra a diferença entre as duas definições (função de transferência e impedância terminal). Comumente esses dois elementos são confundidos e tratados erroneamente como sendo um único elemento. O trabalho também descreve os princípios de avaliação e os algoritmos utilizados como ferramenta que fornece uma referência numérica e ajuda a equipe de teste na tomada de decisão, eliminando erros na análise do resultado. Assim aumenta-se consideravelmente a confiabilidade do ensaio.

### Introdução

Da eletrônica temos a designação de análise da resposta em frequência como o estudo da relação entre dois sinais alternados com a variação da frequência. Sua representação é realizada em notação polar, definindo as funções amplitude e fase da resposta em frequência, evidenciando a relação existente entre as amplitudes e a diferença entre as fases dos sinais de entrada e saída no objeto em teste. As representações gráficas das funções amplitude e fase da resposta em frequência, em escala logarítmica, representam as assinaturas do

objeto em teste diante da variação de frequência.

A indústria elétrica usa essa técnica para avaliar transformadores de potência, por meio da função de transferência, ou seja, da relação das tensões de entrada e saída do objeto em teste e por sua impedância terminal. Análise de resposta em frequência, geralmente conhecida dentro da indústria como FRA, é uma técnica de teste de diagnóstico poderosa. Consiste em medir a função de transferência, também conhecida como resposta em frequência, e a impedância dos enrolamentos. Essas medidas podem ser usadas como um método de diagnóstico para a detecção de defeitos elétricos e mecânicos do transformador em cima de uma larga escala de frequências. Para tal é realizada a comparação entre a função de transferência obtida com assinaturas de referência. Diferenças podem indicar dano ao transformador que pode ser investigado usando outras técnicas ou um exame interno.

Os transformadores são equipamentos essenciais em sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica. Na ocorrência de uma falta no sistema, descarga atmosférica ou uma falta dentro do transformador, podem ser geradas altas correntes circulantes nas bobinas e/ou uma alta tensão

sobre estas. Consequentemente ocasionam danos estruturais, deformações nas bobinas e/ou de isolamento do equipamento, fechando-se curto-circuito entre espiras, entre bobinas ou destas para a carcaça (ponto de terra).

Danos de transporte também podem ocorrer se os procedimentos forem inadequados, podendo conduzir ao movimento do enrolamento e núcleo. O circuito equivalente de um transformador é complexo e composto de resistências, indutâncias e capacitâncias provenientes dos enrolamentos, assim como capacitâncias parasitas entre espiras, entre bobinas e destas para o tanque. Este circuito possui características únicas de resposta em frequência para cada transformador, funcionando como uma impressão digital. Qualquer tipo de dano na sua estrutura interna, tanto na parte ativa (enrolamentos e núcleo) como na parte passiva (estrutura, suportes, tanque etc.), afeta diretamente os parâmetros deste circuito equivalente, o que altera sensivelmente a resposta em frequência deste circuito, que comparado à sua resposta original pode claramente evidenciar a falha. Um problema da análise de resposta em frequência é a falta de procedimento padronizado internacional para que seja feita a comparação das análises dos resultados.

Assim, o problema a ser resolvido é a interpretação das

diferenças entre duas assinaturas do FRA. Uma mudança na função de transferência pode ser interpretada como uma deformação no enrolamento com relativa facilidade. Entretanto, é complicado estimar o correspondente grau de deformação do enrolamento e identificar qual a extensão da variação das medidas do FRA é aceitável para operação do transformador sem falhas.

### **Definições**

#### ***Análise de resposta de frequência (Frequency Response Analysis – FRA)***

Análise de resposta de frequência, comumente chamada de FRA, é uma técnica de diagnóstico utilizada para detectar alterações nas características da estrutura de transformadores de potência, principalmente deformações nas bobinas. Essas modificações podem ser resultados de diversos tipos de problemas elétricos ou mecânicos (danos durante o transporte, a perda de fixação de partes internas, esforços mecânicos causados por curto-circuito, etc.) O teste não é destrutivo e pode ser usado tanto como uma ferramenta para detectar danos de enrolamento, quanto uma ferramenta de diagnóstico para estudo de defeitos observados em outros testes (por exemplo, o

fator de potência do isolamento, análise de gases dissolvidos, impedância de curto-circuito, etc.). FRA consiste na medida da função de transferência e na medida da impedância terminal vista pelo sistema de medida. A medição é feita por uma ampla gama de frequências e os resultados são comparados à assinatura de referência ou "impressão digital" do enrolamento para obtenção de um diagnóstico.

#### **Método de varredura de frequência (Sweep Frequency Method)**

Consiste na medida direta de uma resposta de frequência por meio da injeção de um sinal de frequência variável. Este sinal é injetado em um terminal de entrada e medida a resposta no terminal de saída. Também designado por análise de resposta em frequência por varredura (SFRA – Sweep Frequency Response Analysis).

#### **Método de impulso de tensão (Impulse Voltage Method)**

Consiste na medida indireta de uma resposta de frequência, realizada pela injeção de um ou mais sinais de impulso de tensão em um terminal de entrada e medida a resposta no terminal de saída. Se mais do que um impulso é utilizado, as formas de onda são diferentes, de modo a proporcionar uma densidade mais uniforme do espectro para calcular os resultados. As medidas, realizadas no domínio do tempo, são transformadas para o domínio de frequência.

#### **Amplitude da função de transferência**

A amplitude da resposta relativa ao sinal injetado determina a função de transferência de tensão, geralmente expresso em dB. O resultado corresponde à medida sobre a admitância testada, com a relação entre a tensão de entrada e a tensão de saída, calculado como:

$$A(\text{dB}) = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{V_{out}}{V_{in}} \right)$$

Em que:

- A(dB): amplitude, em [dB]
- Vout: tensão de entrada
- Vin: tensão de saída

#### **Fase da função de transferência**

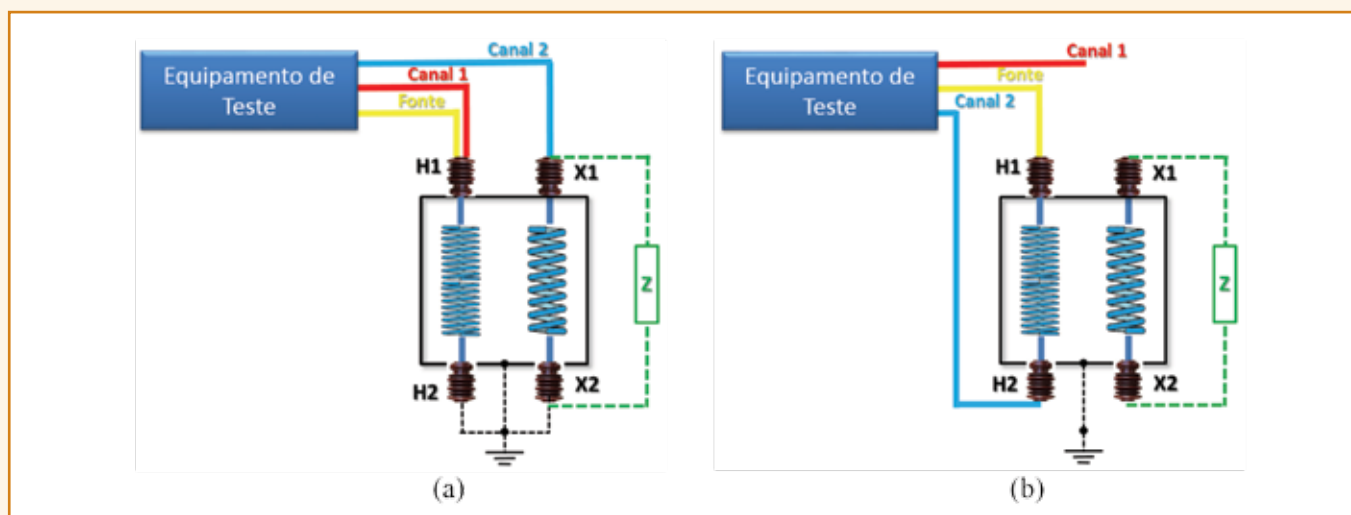
A mudança de ângulo de fase da resposta relativa ao sinal injetado em função da frequência.

#### **Impedância terminal (função impedância)**

Consiste na representação gráfica da impedância própria de uma bobina ou da impedância vista pelo sistema de medida, apresentando a relação entre o sinal de tensão de entrada e o sinal de corrente de entrada em função da frequência, obtendo-se a Função Impedância  $U_i/I_i(f)$  e Função Admitância  $I_i/U_i(f)$ . Sua representação pode ser realizada em forma gráfica como parte real e parte imaginária ou como módulo e ângulo.

#### **Autoadmitância do enrolamento**

Quando um transformador é posto à prova por um teste de resposta em frequência, as conexões são configuradas de tal maneira que quatro terminais são usados. Estes quatro terminais podem ser divididos em dois pares originais, em um par para a entrada e em outro par para a saída. Estes terminais podem ser modelados em um par de terminais duplos ou em uma configuração como uma rede de duas portas. A Figura 2 mostra esse modelo.



**Figura 1 – Esquemas básicos de conexão: (a) Conexão para medida da função de transferência (b) Conexão para medida da impedância terminal.**

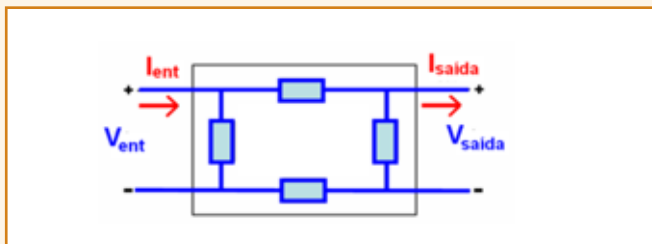


Figura 2 – Representação do quadripolo

$$\begin{bmatrix} I_{ent} \\ I_{saida} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{ent} \\ V_{saida} \end{bmatrix}$$

Na diagonal da matriz [Y],  $Y_{ii}$  é a autoadmitância do nó  $i$ , ou seja, é a soma de todas as admitâncias conectadas ao nó  $i$ . Na prática, esta é a admitância medida pela aplicação de uma tensão a uma extremidade de um enrolamento e da medição da corrente por meio da outra extremidade do enrolamento. Esses resultados são obtidos por meio das medidas de impedância terminal do transformador sob teste.

#### Admitância entre os enrolamentos

Segundo (2),  $Y_{ij}$  é a admitância entre enrolamentos ou a admitância de acoplamento entre os nós  $i$  e  $j$ .

#### Representação da impedância do elemento em teste pela função de transferência

Não se trata da medida de impedância terminal, mas apenas da representação gráfica relativa à impedância vista pelo sistema de medida, segundo os resultados obtidos pela função de transferência. Quando é realizada a medida da função de transferência  $H(j\omega)$ , não é medida a impedância do elemento em teste, ou seja, obtém-se a relação das tensões de entrada e saída e não a impedância

$Z(j\omega)$  deste elemento. A grande maioria dos instrumentos de medida e arranjos de ensaio não fornece a medida da impedância, eles o calculam em função de uma impedância de referência. Quando o instrumento utilizado não é capaz de medir a impedância, utiliza-se o recurso de substituir uma corrente pela tensão de saída. Os arranjos de teste são baseados no circuito apresentado pela Figura 3b, em que  $V_{fonte}$  é o sinal injetado e  $V_{entrada}$  e  $V_{saida}$  são as medidas da tensão de referência e de teste.  $Z_{fonte}$  é a impedância interna do gerador de sinais ou do analisador de redes e  $Z(j\omega)$  é a impedância do enrolamento. Uma impedância  $Z_{fonte}$  é definida como  $50 \Omega$ , por exemplo, e incorporada em  $H(j\omega)$ . As equações 3 e 4 mostram o relacionamento de  $Z(j\omega)$  a  $H(j\omega)$ , com a representação das tensões no domínio da frequência.

$$H(j\omega) = \frac{V_{saida}(j\omega)}{V_{Entrada}(j\omega)} = \frac{50}{Z(j\omega) + 50}$$

$$Z(j\omega) = \frac{50}{H(j\omega)} - 50$$

#### Detecção de falhas no transformador

A impedância do transformador é, principalmente, um valor combinado da composição do enrolamento (resistências, reatância de fuga e capacitâncias) e os componentes de excitação (condutância, susceptância e capacitância). Os componentes indutivos (L) e capacitivo (C) são responsáveis pela característica transitória e pelas de ressonâncias, em que a reatância indutiva é igual a reatância capacitiva. A frequência de ressonância  $f_r$  é dada por (5).

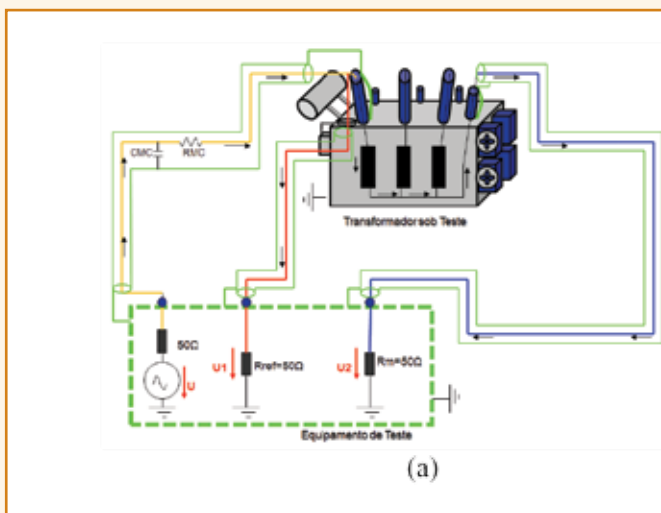


Figura 3 – (a) Princípio básico de conexão para medida do SFRA. (b) Circuito básico para teste.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Conforme descrito, as técnicas de análise de resposta em frequência são capazes de detectar diversos pontos de ressonância. Portanto, é possível estimar as localizações das alterações locais que não puderam ser detectados por meio de técnicas de diagnóstico convencionais.

### **Algoritmos para análise**

Um problema da análise de resposta em frequência é a falta de procedimento padronizado internacional para que seja feita a comparação das análises dos resultados. Assim, o problema a ser resolvido é a interpretação das diferenças entre duas assinaturas do FRA. Uma mudança na função de transferência pode ser interpretada como uma deformação no enrolamento com relativa facilidade. Entretanto, é complicado estimar o correspondente grau de deformação do enrolamento e identificar qual extensão da variação das

medidas do FRA é aceitável para operação do transformador sem falhas. As análises são feitas por pessoas capacitadas, porém, há o risco de serem julgadas de maneira subjetiva. Por isso, a necessidade de um algoritmo que permita a determinação qualitativa e quantitativa de duas assinaturas de FRA relacionadas com uma determinada faixa de frequência. Para iniciarmos a discussão sobre os modelos matemáticos aplicados a análise de falha nos testes de reposta em frequência, definimos FT como função de transferência.

#### **Desvio entre funções de transferência**

O cálculo do desvio ou erro entre uma FT de referência e uma FT de teste é o método mais fácil de mostrar as diferenças. Chamaremos essa diferença de função erro representada por  $\Delta O(f)$ .

$$\Delta_0(f) = |FT_{Ref}(f)| - |FT_{Test}(f)|$$

A desvantagem deste método é que a função erro é calculada de maneira não uniforme pela faixa de

frequência. É necessário realizar uma normalização da função erro para ficar independente da resposta da função erro aplicada às funções de transferências consideradas. Uma possibilidade é padronizar o valor médio da FT de referência,  $|FT_{ref}(f)|$  como mostrado em (5). Com isto, o peso da função erro é o mesmo em toda a faixa de frequência. A esperança  $E[\Delta_1(f)]$  descreve o erro relativo médio da FT de teste. Se a FT de teste e a FT de referência forem idênticas seu valor será zero. Também se  $\Delta_0(f)$  for zero, isso significará apenas ruído.

$$E[\Delta_1(f)] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta_{1,i}(f)$$

O desvio padrão é uma medida da variação do erro que significa a distribuição estatística dos valores da função erro, dada pela raiz quadrada positiva da variância. O desvio padrão é zero para uma diferença constante entre as funções de transferências.

$$\sigma[\Delta_1(f)] = \sqrt{\text{Var}(\Delta_1(f))} = E[(\Delta_1(f) - E[\Delta_1(f)])^2]$$

#### Fator de correlação cruzada

O fator de correlação é a medida da similaridade entre duas curvas. No caso de variáveis discretas aleatórias, é definida como o quociente entre a covariância (Cov) e o desvio padrão ( $\sigma$ ) dessas variáveis.

$$\rho(X, Y) = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\sigma_X \cdot \sigma_Y} = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\sqrt{\text{Var}(X) \cdot \text{Var}(Y)}}$$

O fator de correlação pode assumir valores apenas entre -1 e +1. Uma completa correlação linear positiva (negativa) de duas variáveis aleatórias é dada por um valor de +1(-1) e uma correlação não linear é dada pelo valor do fator de correlação igual a zero. O fator descreve o nível de dependência linear entre duas variáveis aleatórias. Se duas variáveis aleatórias são consideradas como dois vetores N-dimensionais, o fator de correlação pode ser interpretado como o cosseno do ângulo entre os dois vetores.

#### Padrão chinês de análise do FRA – Norma DL/T911-2004

DL/T911-2004 é uma norma para análise da resposta em frequência usada na República Popular da China. Para maiores detalhes o usuário pode visitar o website [www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn) da empresa China Electric Power Publishing Co. O algoritmo avalia a similaridade de duas respostas em frequência de enrolamentos de transformadores (duas assinaturas) pelo cálculo dos fatores RLF, RMF e RHF (ver Tabela 1 – Fatores de avaliação de enrolamentos de acordo com a norma DL/T911-2004). Para entendimento básico do cálculo que envolve esse algoritmo, o cálculo dos fatores é mostrado a seguir.

cepp.com.cn da empresa China Electric Power Publishing Co. O algoritmo avalia a similaridade de duas respostas em frequência de enrolamentos de transformadores (duas assinaturas) pelo cálculo dos fatores RLF, RMF e RHF (ver Tabela 1 – Fatores de avaliação de enrolamentos de acordo com a norma DL/T911-2004). Para entendimento básico do cálculo que envolve esse algoritmo, o cálculo dos fatores é mostrado a seguir.

$$D_x = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \left[ X(k) - \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \right]^2$$

$$D_y = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \left[ Y(k) - \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} Y(k) \right]^2$$

$$LR_{xy} = \frac{D_x \times D_y}{\left( \sqrt{D_x D_y} \right)}$$

$$R_{xy} = \begin{cases} 10 & \text{se } 1 - LR_{xy} < 10^{-10} \\ -\lg(1 - LR_{xy}) & \text{em outros casos} \end{cases}$$

Em que  $X(k)$  e  $Y(k)$  são sequências comparáveis da resposta em frequência com comprimento  $N$ . O fator  $R_{xy}$  avalia em diferentes valores das escalas os fatores de avaliação do enrolamento, conforme os dados mostrados na Tabela 1. Usando os fatores de avaliação do enrolamento apresentados, as condições de deformação do enrolamento do transformador são definidas na Tabela 2.

**TABELA 1 – FATORES DE AVALIAÇÃO DE ENROLAMENTOS DE ACORDO COM A NORMA DL/T911-2004**

Fator de avaliação do enrolamento	Escala de frequência
RLF	1 kHz ..... 100 kHz
RMF	100 kHz ..... 600 kHz
RHF	600 kHz ..... 1 MHz

**TABELA 2 – AVALIAÇÃO DE ENROLAMENTOS DE ACORDO COM A NORMA DL/T911-2004**

Grau de Deformação do Enrolamento	Fator de Avaliação do Enrolamento
Enrolamento normal (Normal winding)	RLF $\geq 2,0$ E RMF $\geq 1,0$ E RHF $\geq 0,6$
Deformação leve (Slight deformation)	2,0 > RLF $\geq 1,0$ OU 0,6 $\leq$ RMF < 1,0
Deformação óbvia (Obvious deformation)	1,0 > RLF $\geq 0,6$ OU RMF < 0,6
Deformação severa (Severe deformation)	RLF < 0,6

A norma chinesa mostra-se uma boa tentativa para apoiar as avaliações de ensaios de resposta em frequência, mas atualmente não podemos assegurar sua plena utilização sem a análise do testador. Uma possível solução seria a integração de vários algoritmos.

## Referências

- PAULINO, M. E. C. *Diagnóstico de Transformadores e Comparações entre Algoritmos para Análise de Resposta em Frequência*. V WORKSPOT- International Workshop on Power Transformers, Belém, PA, Brasil, 2008.
- CIGRÉ Report 342 WG A2.26. *Mechanical condition assessment of transformer windings: Guidance Technical Brochure CIGRE Study Committee A2 – Work Group A2.26*, 2008.
- PAULINO, M. E. C. et al. *Aplicações de Análise de Resposta em Frequência e Impedância Terminal para Diagnóstico de Transformadores*. XIII ERIAC – Décimo Terceiro Encontro Regional Ibero-americano do CIGRÉ, Foz do Iguaçu, Argentina, 2009.
- SANO, T. K. M. *Influence of Measurement Parameters on FRA Characteristics of Power Transformers” Proceedings of the 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*. Beijing, China, April 21-24, 2008.
- *Frequency Response Analysis on Winding Deformation of Power Transformers, The Electric Power Industry Standard of People’s Republic of China, Std. DL/T911-2004, ICS27.100, F24*, 2005.
- *IEEE PC57.149/D6, Draft Trial Use Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil Immersed Transformers*, abril 2009.

---

\* MARCELO EDUARDO DE CARVALHO PAULINO é engenheiro eletricitista e especialista em manutenção de sistemas elétricos pela Escola Federal de Engenharia de Itajubá (EFEI). Atualmente, é gerente técnico da Adimarco |mecpaulino@yahoo.com.br.

### Continua na próxima edição

Confira todos os artigos deste fascículo em  
[www.oseletrico.com.br](http://www.oseletrico.com.br)

Dúvidas, sugestões e comentários podem ser encaminhados para o e-mail  
[redacao@atituedeeditorial.com.br](mailto:redacao@atituedeeditorial.com.br)