



**XXIII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GTM/28
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO – XIII

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

ESTUDO DE CASO DE MEDIÇÃO DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA EM TRANSFORMADOR ENERGIZADO

Vinícios Bacil(*)
Institutos LACTEC

Gustavo Henrique da Costa Oliveira
UFPR

José Arinos Teixeira Júnior
Institutos LACTEC

Marcio Rot Sans
Institutos LACTEC

Marcelo Antonio Ravaglio
Institutos LACTEC

Rodrigo Santos
Copel

Luiz Henrique Costa de Verney
Copel

RESUMO

Neste artigo será abordada a técnica de resposta em frequência através da varredura de frequência (SFRA) com o transformador energizado, cujo principal objetivo é realizar o diagnóstico do transformador sem tirá-lo de operação. Neste artigo serão utilizados os taps capacitivos de buchas condensivas de alta tensão do transformador como ferramenta para injeção dos sinais necessários para o ensaio de SFRA. Como resultado, serão apresentados, através de experiências práticas, a aplicação do método de diagnóstico on-line em transformadores de potência com a inclusão de cargas ligadas ao transformador, e, com isso, fazer recomendações para a técnica de ensaio pelo método on-line.

PALAVRAS-CHAVE

Análise de resposta em frequência, *sweep frequency response analysis* - SFRA, bucha condensiva, diagnóstico on-line, transformador de potência.

1.0 - INTRODUÇÃO

A análise de resposta em frequência aplicada a transformadores de potência é uma ferramenta de diagnóstico que pode dar indícios de deformação do núcleo ou dos enrolamentos desses equipamentos [1]. Uma das principais técnicas de análise de resposta em frequência é o SFRA (*Sweep Frequency Response Analysis*), onde sinais senoidais (com variação de frequência) são injetados em um dos terminais do transformador, e medidos em outro terminal qualquer, dependendo do enrolamento que se deseja medir. A frequência de ensaio do SFRA é variada de 20 Hz até 2 MHz, de acordo com [2]. A partir da medição das tensões de entrada (sinal aplicado) e saída do transformador pode-se calcular a impedância, também conhecida como impedância terminal, ou a relação entre as tensões, também conhecida como ganho de tensão ou função transferência.

O conceito básico para diagnóstico de transformadores é a comparação entre curvas de resposta em frequência de mesma configuração, porém medidas em instantes de tempo diferentes. A presença de alterações entre estas duas ou mais curvas podem ser indícios de alterações no transformador.

Para realização dos ensaios de resposta em frequência, o transformador deve ser desenergizado e desconectado do sistema, para que não ocorram influências de conexões e demais impedâncias do sistema nas medidas realizadas. Alternativamente a este método de medição com o transformador desenergizado (off-line), técnicas de resposta em frequência são aplicadas ao transformador energizado (on-line), utilizando divisores capacitivos alocados na subestação, ou ainda, de modo mais simples, utilizando *tap* capacitivos de buchas condensivas para

injeção de sinais de frequência variável, conforme [3] e [4]. Esta técnica possui como vantagem a disponibilidade do transformador (sem parada para realização das medidas), aplicabilidade do diagnóstico em tempo real ou em qualquer momento que se faça necessário e consequentemente diminuição dos custos com manutenção e falta de disponibilidade do equipamento.

A análise da aplicabilidade da técnica de injeção de sinais no *tap* (SFRA *on-line*) será aqui avaliada através de um estudo de caso em um transformador regulador de 6 MVA, 72 kV, verificando-se a influência de cargas ligadas aos terminais de alta tensão do equipamento, portanto, considerando-o como transformador elevador, simulando uma condição real de funcionamento. Ao final dessa análise, será possível apresentar as vantagens e desvantagens da técnica de diagnóstico bem como recomendações para a realização de ensaio de SFRA *on-line* em transformadores.

Este artigo está estruturado como segue. Na Seção 2, discorre-se sobre o método de resposta em frequência *on-line*, onde será apresentada a metodologia para realização de ensaios com o transformador energizado. Na Seção 2 será apresentada a ferramenta estatística de comparação entre respostas em frequência. Na Seção 3 será apresentado um estudo de caso, enquanto na Seção 4 serão apresentados os resultados referentes à aplicação do estudo *on-line*. Na Seção 5 serão apresentadas as conclusões à cerca do tema.

2.0 - ANÁLISE DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA COM TRANSFORMADOR ENERGIZADO

Os ensaios de resposta em frequência mais utilizados são aplicáveis em transformadores desenergizados e desconectados do sistema elétrico. Alternativamente, estudos recentes estão sendo aplicados em transformadores energizados, conforme abordado em [3], [4]. Com isso, torna-se possível a avaliação do equipamento em tempo real (*on-line*), sem desligamentos.

Uma dessas técnicas de resposta em frequência é a de varredura de frequências, conhecida como SFRA *on-line* [5], [6] e [7], na qual ondas senoidais de frequência variável são injetadas no *tap* capacitivo de buchas condensivas, com amplificação, de acordo com [5], ou sem amplificação, através de um gerador de funções ou um analisador de redes. A tensão resultante pode ser medida no neutro do enrolamento através de um TC de alta frequência, conforme [6], ou ainda, no *tap* de outra fase, de acordo com [8]. A transferência de tensão ou impedância terminal do enrolamento é calculada e é definida como a resposta em frequência do transformador.

De acordo com [8], para transformadores ligados em delta nos terminais de alta tensão, a configuração de ensaio proposta é a injeção de sinais no *tap* de uma das fases com medição no *tap* de outra fase. Se o transformador possuir ligação em estrela os sinais são injetados no *tap* de uma das fases e medidos no *tap* do neutro ou em um TC instalado diretamente no neutro, de acordo com [4]. Geralmente, para aplicações em alta frequência, utiliza-se Bobinas de Rogowski, de alta corrente e alta frequência, o qual será utilizado neste trabalho, conforme Figura 1.

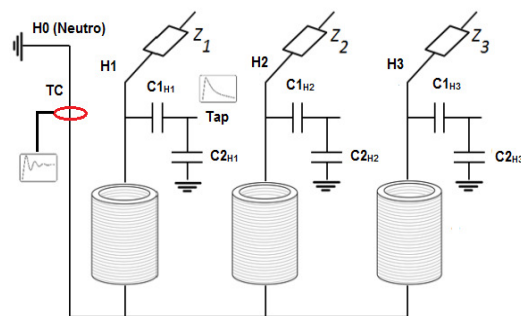


Figura 1. Respostas em frequência injetando sinal no *tap* com medição da corrente de saída no aterramento do neutro [8]

No entanto, para que seja possível a injeção de sinais através dos taps, visto que altas tensões surgem quando estes estão desaterrados, é necessária a inclusão de uma impedância Z_P em paralelo com a capacitância C_2 da bucha, de acordo com a Figura 2, de forma a reduzir a tensão na derivação capacitiva, não submetendo os equipamentos acoplados nesse ponto ao potencial elevado. Deste modo a tensão no *tap* capacitivo pode ser dada pela Equação 1.

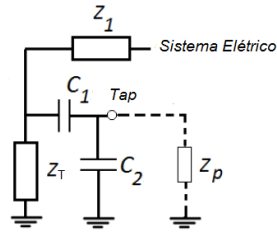


Figura 2. Impedância Z_p introduzida em paralelo com a capacitância C_2 da bucha [8]

$$V_{tap} = \frac{Z_p // \frac{1}{j\omega C_2}}{Z_p // \frac{1}{j\omega C_2} + \frac{1}{j\omega C_1}} V_{fase} \quad (1)$$

A impedância Z_p é, portanto, utilizada como um circuito de proteção, sendo a atenuação do sinal dependente do valor dessa impedância. No entanto, esta não deve ser utilizada arbitrariamente apenas com base na queda de tensão, mas também deve-se verificar seu comportamento frente à banda de frequência de ensaio.

Deste modo, como a banda de frequência indicada para ensaios on-line é da faixa de 1 kHz a 2 MHz, o circuito de proteção deve também atuar como um filtro para sinais fora desta faixa. Esse filtro pode ser do tipo passa-faixa, onde os sinais de 60 Hz e eventualmente seus múltiplos ímpares provenientes do sistema energizado serão rejeitados, e também as altas frequências que podem ocorrer em medidas realizadas em campo. O projeto de cada filtro depende do sistema a qual este será inserido, de modo que seja levada em conta a suportabilidade dielétrica dos componentes envolvidos.

3.0 - COMPARAÇÃO ENTRE RESPOSTAS EM FREQUÊNCIA

Como descrito anteriormente, a análise de resposta em frequência é um método de análise comparativa, sendo que o ensaio deve ser realizado antes e após um determinado evento (curto-circuito, VFTO, por exemplo) ou intervenção (manutenção corretiva, transporte, por exemplo). Desta maneira, torna-se necessária a criação de respostas normalizadas, chamadas de respostas característica ou ainda identidade do transformador, cujo objetivo é compará-las futuramente com outras respostas obtidas ao longo da vida útil do equipamento. Alterações nas curvas comparadas, tanto horizontal como verticalmente, podem ser indícios de alterações nos enrolamentos do transformador. Ou seja, uma curva típica de um transformador apresenta múltiplos picos e vales ao longo da frequência, e, através da análise comparativa, pode-se verificar que mudanças na quantidade de distribuição e a posição dos picos e vales da forma de onda em relação à curva característica podem deflagrar deformações nos enrolamentos do transformador, que podem diminuir o tempo de vida útil do equipamento, levando-o à falha.

De acordo com a IEC 60076-18, as alterações causadas nas ressonâncias características do transformador podem dividir-se em quatro regiões de análise:

- A região de baixa frequência, até aproximadamente 2 kHz, é determinada principalmente pelo núcleo, ou seja, pelas indutâncias de magnetização do núcleo e capacitâncias para a massa, além da magnetização residual do núcleo.
- A região de média frequência por sua vez, de 2 a 20 kHz, é determinada por interações entre os enrolamentos, ou seja, depende do arranjo e conexões dos enrolamentos (delta, estrela e outros tipos de conexões).
- Nas altas frequências, de 20 kHz a 2 MHz, a influência é dada principalmente pela característica individual de cada enrolamento e conexões internas, ou seja, indutâncias parasitas do enrolamento, capacitâncias série do enrolamento e capacitância dos pontos de terra do enrolamento, por isso, nessa região a capacitância série é o fator preponderante na determinação da curva de resposta em frequência. Em geral observa-se várias ressonâncias nessa região de estudo.
- À partir de 2 MHz as medidas são influenciadas principalmente por conexões e cabos de medição. Dessa maneira as medidas nessa área de interesse possuem menor repetibilidade sofrendo influência direta do arranjo de medição, pontos de conexão dos aterramentos e comprimentos das buchas.

Para uma melhor comparação, análises estatísticas foram aplicadas a estas análises, tais como o Fator de Covariância Normalizado (NCF) apresentado em [9], que tem como resultado o Coeficiente Relativo R_{XY} da comparação entre duas curvas, este coeficiente é então relacionado com o grau de deformação dos enrolamentos do transformador de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1. Relação entre o Coeficiente Relativo e o Grau de Deformação dos Enrolamentos do Transformador

Grau de Deformação dos Enrolamentos	Coeficiente Relativo R
Deformação Severa	$R_{LF} < 0,6$
Deformação Óbvia	$1,0 > R_{LF} \geq 0,6$ ou $R_{MF} < 0,6$
Deformação Leve	$2,0 > R_{LF} \geq 1,0$ ou $0,6 \leq R_{MF} < 1$
Enrolamento Normal	$R_{LF} \geq 2,0$ e $R_{MF} \geq 1,0$ e $R_{HF} \geq 0,6$

onde:

R_{LF} é o coeficiente relativo de baixa frequência (1kHz~100 kHz) de curva;

R_{MF} é o coeficiente relativo de média frequência (100kHz~600 kHz) de curva;

R_{HF} é o coeficiente relativo de alta frequência (600kHz~1000 kHz) de curva.

4.0 - SFRA ON-LINE: ESTUDO DE CASO

Nesta seção será desenvolvido um estudo de caso para aplicação da ferramenta de SFRA on-line, apresentada anteriormente. Para esta análise foi escolhido como objeto de estudo um transformador de 6 MVA de 72 kV – 6,9 kV, fabricado em 1983. Este transformador designado como T-2 possui ligação estrela (com neutro acessível) na alta tensão (provido de buchas condensivas) e delta na baixa tensão, 33 posições de comutador sob carga (OLTC) e 5 posições de comutador à vazio (DETC). Está instalado na subestação do LACTEC, conforme Figura 3.

O instrumento de medição utilizado nos ensaios é um equipamento comercial, próprio para ensaios de SFRA, fabricante Megger™, tipo FRAX 101, que atende as recomendações da IEC, com tensão de saída de 20 V (pico a pico), taxa de amostragem de 100 MS/s e seus respectivos cabos e conexões. O arranjo completo para o ensaio on-line dependerá, além do transformador sob teste, do circuito de alimentação e cargas alimentadas por este. No caso do equipamento analisado, o terminal de baixa tensão é alimentado por um grupo motor-gerador com tensão de saída do gerador de até 6,9 kV e potência de 6 MVA, que por sua vez é alimentado por um transformador de 2,5 MVA, 13,8 kV – 6,9 kV, o qual está ligado diretamente a rede elétrica.

Durante a operação normal de um transformador, seja este alocado em uma subestação de geração, interligação ou distribuição, a variação de cargas ligadas neste pode ser significativa, dependendo do sistema. Com intuito de simular estas variações, foram testadas três condições que tentaram representar diferentes cargas do sistema.

A condição inicial é de ligação do transformador T-2, sob ensaio, à uma linha de transmissão, com para-raios de linha, conectada à buchas de passagem que dão acesso ao laboratório de alta tensão, como pode ser observado na Figura 3. Estas, por sua vez, estão ligadas à cabos de alta tensão, e estes ligados à uma chave seccionadora que será manobrada para ligação das cargas.

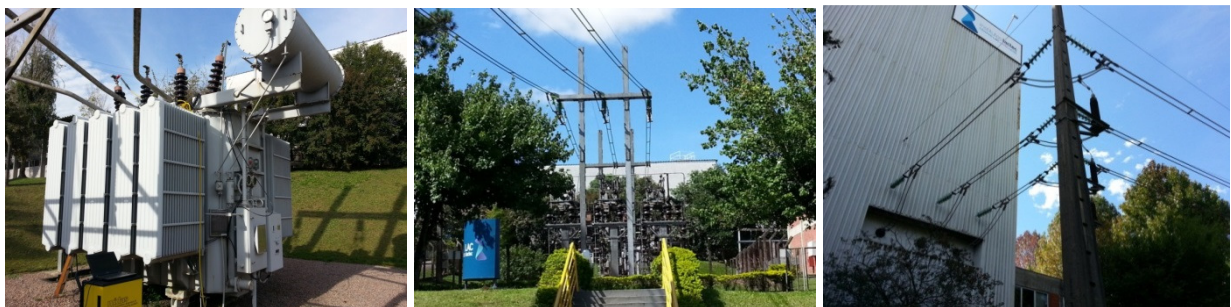


Figura 3. Transformador (a), linhas de transmissão (b), para-raios e buchas de passagem (c) do sistema sob estudo

A primeira condição (Carga 1) de carregamento testada foi a inclusão (além das cargas da linha de transmissão e cabos) de um transformador trifásico de 112,5 kVA, impedância percentual de 3,43%, 13,2 kV – 220/127V, tipo de ligação delta-estrela, operando em vazio.

A segunda condição (Carga 2), foi de uma carga resistiva trifásica de 30 kW ligada na baixa tensão do transformador de 112,5 kVA, o qual foi energizado pela alta tensão. Nessa situação houve limitação de tensão de até no máximo 13,2 kV na energização do transformador T-2 (sob ensaio) devido a classe de tensão do transformador usado como carga.

Finalmente, na terceira condição de carregamento (Carga 3), a baixa tensão do transformador de 112,5 kVA foi curto circuitada com objetivo de circulação da corrente nominal. Este conjunto de equipamentos formará o arranjo de ensaio completo que estará energizado durante a realização dos ensaios de SFRA on-line.

5.0 - RESULTADOS

Nesta seção são apresentados resultados de respostas em frequência realizadas em duas situações distintas: comparação entre sistemas à vazio e sob carga, e comparação entre alterações das respostas dadas pela variação do comutador sob carga.

5.1 Comparação entre sistemas à vazio e sob carga

Com o objetivo de verificar a variação das respostas em frequência diante de situações práticas do sistema elétrico, foram ligadas diferentes cargas aos terminais de alta tensão do transformador, visto que este é alimentado por um grupo motor gerador pela baixa tensão, sendo assim um transformador elevador, de acordo com as condições citadas na Seção 3. A Figura 4 apresenta o resultado comparativo entre o sistema energizado à vazio, e os sistemas com carga.

Pode-se notar que não houveram diferenças entre os três diferentes tipos de carga, visto que a impedância equivalente praticamente não foi alterada, nas condições de Carga 1, Carga 2 e Carga 3. No entanto, comparativamente com o sistema à vazio, ou seja, sem o transformador de 112,5 kVA, que representa uma carga indutiva, houveram diferenças entre 4 e 9 kHz e entre 100 e 900 kHz.

Aplicando-se a análise de correlação entre as curvas de Carga 1, Carga 2 e Carga 3, os coeficientes relativos para baixa, média e alta frequência foram respectivamente: $R_{LF} = 2,24$, $R_{MF} = 3,07$ e $R_{HF} = 5,33$, sendo os três casos considerados como normais para deformação de enrolamentos.

No entanto, para comparação das curvas de Carga 1, Carga 2 e Carga 3 com o transformador à vazio tem-se: $R_{LF} = 1,74$, $R_{MF} = 0,74$ e $R_{HF} = 2,03$, sendo que para baixa e média frequências as deformações são consideradas leves e para altas frequências as deformações são consideradas normais.

No entanto, para esse caso específico, o que se tem não é uma deformação, mas sim uma alteração externa ao transformador. Demonstrando que a variação da impedância equivalente do sistema pode alterar as respostas em frequência on-line.

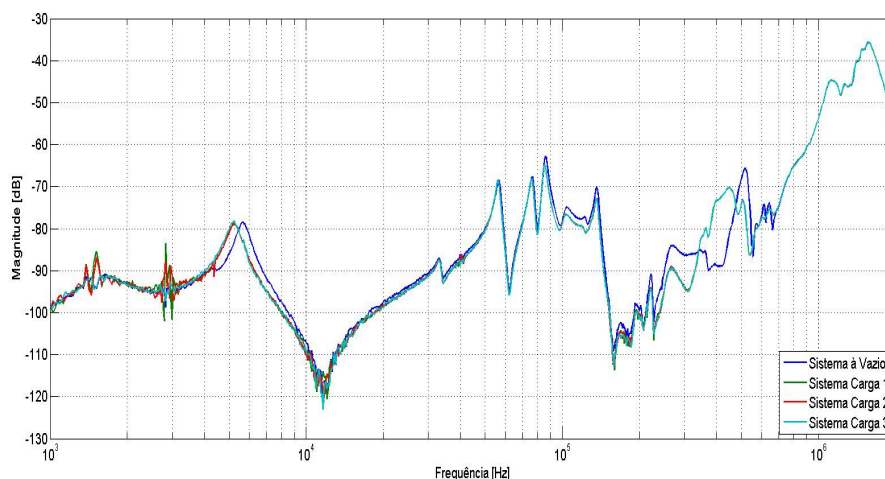


Figura 4. Comparação entre sistema energizado à vazio e sistema energizado com cargas

5.2 Comparação entre resultados com variação de comutador sob carga

Com objetivo da análise de eventuais alterações nos enrolamentos do transformador, variou-se o comutador sob carga (OLTC). Neste caso, pode-se observar, através da Figura 5, diferenças entre as respostas obtidas ao longo de praticamente toda região de comparação, vertical e horizontalmente, com diferenças de amplitude e

deslocamentos das ressonâncias na frequência das curvas de funções transferência da relação de tensão entre saída e entrada. Tais alterações são previsíveis visto que a mudança do OLTC promove alteração da relação de transformação e consequente variação do número de espiras do enrolamento, mas é importante para validação da medida como base de comparativa entre respostas com diferentes alterações RLC do circuito do transformador.

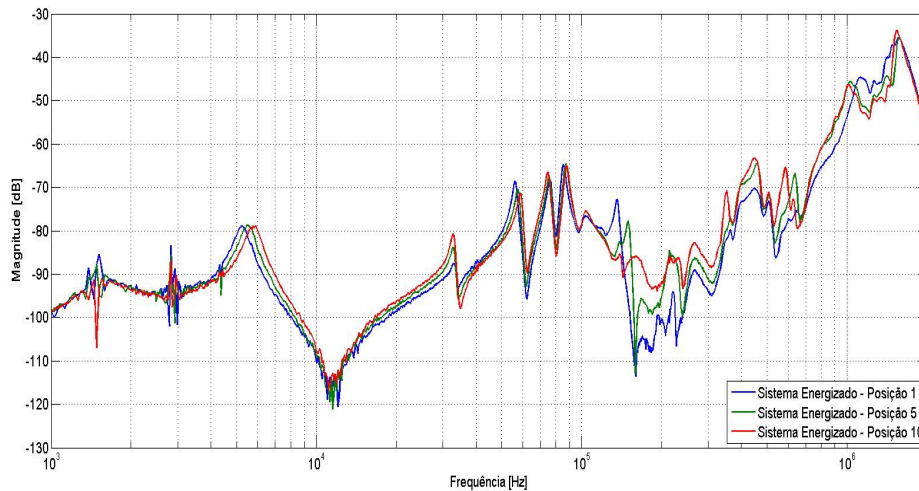


Figura 5. Comparação entre sistemas energizados com diferenças nas posições dos comutadores

Desta maneira, nota-se a necessidade de um critério para interpretação de ensaios com o transformador energizado e conectado ao sistema de potência. Através da criação de um banco de respostas possíveis, geradas pelas variações apresentadas anteriormente, mas que devem ser cuidadosamente diferenciadas de possíveis defeitos e variações nos parâmetros RLC do transformador. Por exemplo, diferenças entre 4 e 9 kHz e entre 100 e 900 kHz, como pode-se analisar na Figura 8, são indícios de variações de carga, enquanto que diferenças ao longo de todo espectro de frequência, observado na Figura 9, são indícios de deformações ou alterações no número de espiras dos enrolamentos, causadas por um curto entre espiras por exemplo.

Através da análise de correlação entre as curvas em diferentes posições do OLTC tem-se, para sistema energizado na posição 1 comparado com o sistema energizado na posição 5: $R_{LF} = 1,66$, $R_{MF} = 0,44$ e $R_{HF} = 1,68$, sendo que para baixa frequência a deformação é considerada leve, para média frequência as deformações são consideradas óbvias e para altas frequências as deformações são consideradas normais.

Portanto, além da definição das faixas de frequências na qual as alterações podem ocorrer devido a uma alteração de cargas, pode-se padronizar também, a topologia do sistema durante a realização dos ensaios, evitando-se assim a variação da impedância equivalente do sistema e consequentemente a variação das respostas em frequência obtidas em ensaios realizados ao longo da vida útil do transformador.

6.0 - CONCLUSÕES

Neste trabalho foi implementada a metodologia para realização de ensaios de resposta em frequência em transformador energizado originalmente apresentada em [4]. Através de um estudo de caso foram realizadas condições de carga e mudanças no enrolamentos do transformador, ou seja, variações internas e externas ao equipamento com intuito de validar as medições on-line. As alterações de cargas do sistema foram realizadas de forma inédita. Assim, foi verificado que as alterações de impedância equivalente do sistema geram mudanças nas respostas da função transferência de transformadores energizados. Portanto, recomenda-se que alterações na respostas obtidas no ensaio on-line sejam incorporadas como histórico do equipamento, gerando assim um banco de dados com várias curvas características, e não apenas a resposta considerando o sistema energizado, inicialmente proposta. Assim, a cada solicitação do sistema (faltas, sobretensões e etc) o ensaio deve ser realizado e comparado com um banco de dados, considerando várias condições de impedância equivalente do sistema, de modo que não sejam geradas conclusões errôneas à cerca do ensaio.

A principal vantagem dos ensaios de SFRA on-line é de realizar ensaios com o transformador energizado, sem a necessidade de parada do equipamento e consequentemente redução de custos operacionais, e aumentando a confiabilidade do sistema. Portanto, de maneira geral, pode-se dizer que os estudos de proposta de metodologia para medição de resposta em frequência em transformador energizado foram satisfatórios. Contudo, a aplicação dos estudos on-line não substituem os ensaios off-line, mas sim os complementam auxiliando a tomada de decisões.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

- [1] E. P. Dick and C. C. Erven, "Transformer Diagnostic Testing by Frequency Response Analysis," IEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-97, no. 6, pp. 2144–2153, 1978.
- [2] IEC 60076-18, "Power Transformers - Part 18: Measurement of Frequency Response." IEC, Switzerland, pp. 5–42, 2012.
- [3] V. Bacil, M. Sans, J. A Teixeira Júnior, e G. H. C. Oliveira, "Análise de Resposta em Frequência utilizando Tap de Buchas Condensivas visando o Diagnóstico com Transformador Energizado," SBSE - Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2014.
- [4] V. Bacil, "Metodologia para Medição de Resposta em Frequência em Transformador Energizado," Dissertação de Mestrado, Departamento de Eletricidade, UFPR - Universidade Federal do Paraná, 2014.
- [5] T. De Rybel, A. Singh, S. Member, J. A. Vandermaar, M. Wang, J. R. Martí, K. D. Srivastava, and L. Fellow, "Apparatus for Online Power Transformer Winding Monitoring Using Bushing Tap Injection," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 24, no. 3, pp. 996–1003, 2009.
- [6] A. Setayeshmehr, H. Borsi, E. Gockenbach, and I. Fofana, "On-line Monitoring of Transformer via Transfer Function," in IEEE Electrical Insulation Conference, 2009, no. June, pp. 278–282.
- [7] V. Behjat, A. Vahedi, A. Setayeshmehr, H. Borsi, and E. Gockenbach, "Diagnosing Shorted Turns on the Windings of Power Transformers Based Upon Online FRA Using Capacitive and Inductive Couplings," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 26, no. 4, pp. 2123–2133, Oct. 2011.
- [8] M. Bagheri, M. S. Naderi, T. Blackburn, and T. Phung, "Practical challenges in online transformer winding deformation diagnostics," in 2nd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS), 2011, pp. 1–6.
- [9] A. Islam, G. K. Mustafa, M. M. Biswas, S. I. Khan, "Implementation of Covariance Factor Calculation Technique to Interpret Sweep Frequency Response Analysis (SFRA) Curve of Power Transformer", pp. 91-99, Fev. 1012.