

PROPOSTA DE SISTEMA SUPERVISÓRIO DE AQUISIÇÃO DE DADOS PARA REALIZAÇÃO DE ENSAIO DE MEDIÇÃO DE PERDAS A VAZIO E CORRENTE DE EXCITAÇÃO

Marchesan A.P.G., Farias M.L., Brodt E.S., Miranda R.O., Zancan D., Beltrame R.C., Marchesan T.B., Bender V.C.

Universidade Federal de Santa Maria
Instituto de Redes Inteligentes
Santa Maria, Brasil
anapaulagm@mail.ufsm.br
inrint@gepoc.ufsm.br

Abstract— The quality of the electrical system is directly linked to the efficiency and reliability of the equipment that compose it. In this context, the power transformers are central and must have their quality ensured by standards and regulatory bodies. For this purpose, several tests are performed on the equipment. When these tests are automated, there are benefits in terms of reliability and work safety achieved by compliance with in the procedures. This paper presents a proposal for data acquisition and a system of supervision for the measurement of no load loss and magnetizing current test in the Medium Voltage Laboratory. In summary, the article is about the relevance of the theme, referencing the literary sources, the laboratory circuit and equipment, supervisory operation and concluding with results obtained from the supporting software.

Keywords— Automation, Measurement, Data acquisition, Power Transformer, Standards.

I. INTRODUÇÃO

Para assegurar a qualidade do sistema elétrico, é estratégico que os equipamentos utilizados possuam um alto grau de confiabilidade e eficiência. Nesse sentido, os transformadores são os dispositivos em maior número e com um papel fundamental na distribuição, transmissão e geração de energia elétrica, desse modo, seu impacto na rede é altamente relevante [1]. A partir desta premissa, desde 2014, foi estabelecido que transformadores de distribuição de até 300 kVA comercializados no Brasil devem participar do programa de etiquetagem do PROCEL (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica)[2]. O programa requer que os transformadores passem por ensaios de performance, que são definidos no conjunto de normas ABNT NBR 5356 e são realizados por laboratórios acreditados pelo INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia) [3].

Por outro lado, o setor se depara com uma grande carência de laboratórios acreditados que realizem os ensaios de transformadores de distribuição no Brasil. Atualmente, apenas dois laboratórios se enquadram nessa categoria (a saber, Centro de Pesquisas de Energia Elétrica da Eletrobrás e Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo). No entanto, devido à alta demanda fez-se necessária a concessão

de uma designação temporária a mais três laboratórios de ensaios em transformadores, a fim de dar vazão às grandes filas de espera que os fabricantes enfrentam para etiquetar seus produtos. Nesse contexto, busca-se implantar um Laboratório de Ensaios em Média Tensão na Universidade Federal de Santa Maria, cujo propósito é realizar o conjunto de ensaios previstos na norma de forma automatizada. Sistemas automatizados são bem-vindos em diversos campos de aplicação, uma vez que aumentam a eficiência operacional, segurança, oferecendo maior qualidade nos resultados, redução do esforço humano além de gerar economia de recursos [4].

Dessa maneira, o objetivo do presente artigo é propor um sistema de aquisição de dados e de supervisão para a realização do ensaio de medição de perdas a vazio e corrente de excitação em transformadores de distribuição. Apresentando o procedimento do ensaio juntamente ao referencial teórico, o sistema de aquisição de dados, a interface do sistema supervisiório e, por fim, os resultados obtidos via teste do *software*.

II. REFERENCIAL TEÓRICO

Para o desenvolvimento de um sistema supervisiório adequado para o ensaio, todo procedimento proposto é embasado em [5], que se aplica à construção, ensaio e tecnologia dos transformadores de potência do tipo seco e imersos em óleo (incluindo autotransformadores), com tensão de operação igual ou inferior a 36,2 kV, – Catálogo ABNT – objetivando ratificar a segurança e garantir a qualidade na prestação desses serviços.

O ensaio de medição de perdas em vazio e corrente de excitação é referido pela norma de forma que as medições devam ser realizadas em um dos enrolamentos à frequência nominal e com tensão nominal, caso o ensaio seja realizado na derivação principal. Se o ensaio for realizado em outras derivações, a tensão deve se adequar à derivação apropriada enquanto os demais enrolamentos devem ficar em circuito aberto. As ligações podem ser feitas nos enrolamentos de alta tensão (AT) ou baixa tensão (BT), sendo o mais prático e recomendado realizar a ligação no terminal de baixa tensão,

para facilitar a medição de corrente, pois nesta configuração a corrente pode ser de apenas 6% do valor nominal, o que dificultaria a medição no lado de alta tensão por esse admitir correntes menores que o lado de BT [6].

A tensão do ensaio é ajustada por um voltímetro que realize a medição do valor médio da tensão, mas esteja graduado de modo a fornecer o valor eficaz de uma tensão senoidal com o mesmo valor médio. O valor lido por esse voltímetro é U' . Concomitantemente, um segundo voltímetro medindo o valor eficaz da tensão deve estar conectado em paralelo com o voltímetro de valor médio. A tensão indicada pelo segundo voltímetro é U a qual deve ser registrada. Para que a forma de onda da tensão do ensaio seja satisfatória, U' e U devem ser similares com desvio máximo de 3%, caso a diferença seja maior que esse valor, é dito que essa é uma tensão com forma de onda distorcida e a validade do ensaio deve ser objeto de acordo entre fabricante e comprador.

As perdas em vazio medidas (P_m) e as perdas em vazio corrigidas (P_o) são tomadas iguais a:

$$P_o = P_m \cdot (1 + d) \quad (1)$$

$$d = \frac{U' - U}{U'} \quad (2)$$

Em seguida, deve-se ajustar a frequência e tensão do ensaio para o valor nominal pelo voltímetro de valor médio. Registrar, ao mesmo tempo, os valores de frequência, tensão eficaz, perdas, tensão média e corrente. Após o desligamento do transformador, deve-se fazer uma nova leitura do wattímetro, que deve ser subtraída da anterior, resultando no valor correspondente às perdas no circuito de medição. As perdas em vazio – ou perdas no ferro – consistem, principalmente, em perdas por histerese e perdas por correntes parasitas e são dadas em função do valor, frequência e forma de onda da tensão de alimentação [5].

III. PROPOSTA DE SISTEMA SUPERVISÓRIO DE AQUISIÇÃO DE DADOS

A. Descrição do circuito

O esquemático apresentado na Fig. 1 ilustra como os equipamentos do laboratório são conectados e se comunicam durante o ensaio. A fonte de alimentação trifásica emuladora de rede CA de 150 kV é conectada a um transformador elevador de tensão, nomeado de Trafo 01, que é conectado ao equipamento sob ensaio, passando pelo transformador de corrente (TC) que também é conectado ao transformador de potencial (TP), essas ligações são indicadas pelas setas em preto. As setas vermelhas indicam o sinal de corrente e tensão na saída do TC e do TP, cujos valores são 5 A e 110 V, respectivamente. Entretanto, é necessário, ainda, adaptar essas grandezas para valores adequados de tensão. Como solução, foi elaborado um sistema de aquisição composto de uma placa de instrumentação, que condicionará os valores na saída do TC e do TP, e um dispositivo de aquisição de dados (DAQ), que interpretará os valores condicionados. Na placa de instrumentação, o estágio de sensoriamento de tensão recebe diretamente o sinal oriundo do TP, seguindo o amplificador isolado de precisão com a finalidade de isolar a entrada do restante do circuito, proteger os componentes e, em especial, o DAQ, em caso de surto ou outro problema. A placa ainda conta com um estágio de proteção, sendo composto por diodos *Schottky* e um amplificador *rail-to-rail*. Analogamente, o sensoriamento de corrente recebe diretamente o sinal oriundo do TC e converte corrente em tensão através de resistores *Shunt*, dado que o DAQ está programado para leituras de sinais de tensão para este trabalho. O estágio de isolamento cumpre com as mesmas funções do estágio de isolamento citados no sensoriamento de tensão, isolando a entrada do restante do circuito para proteção dos componentes e o mesmo se aplica ao estágio de proteção da placa de aquisição, no entanto, nesse caso o amplificador amplifica o sinal de entrada, além de proteger o DAQ, os valores condicionados são representados pela seta de cor verde. Obtendo-se os dados de tensão e corrente, é possível calcular as perdas durante o ensaio.

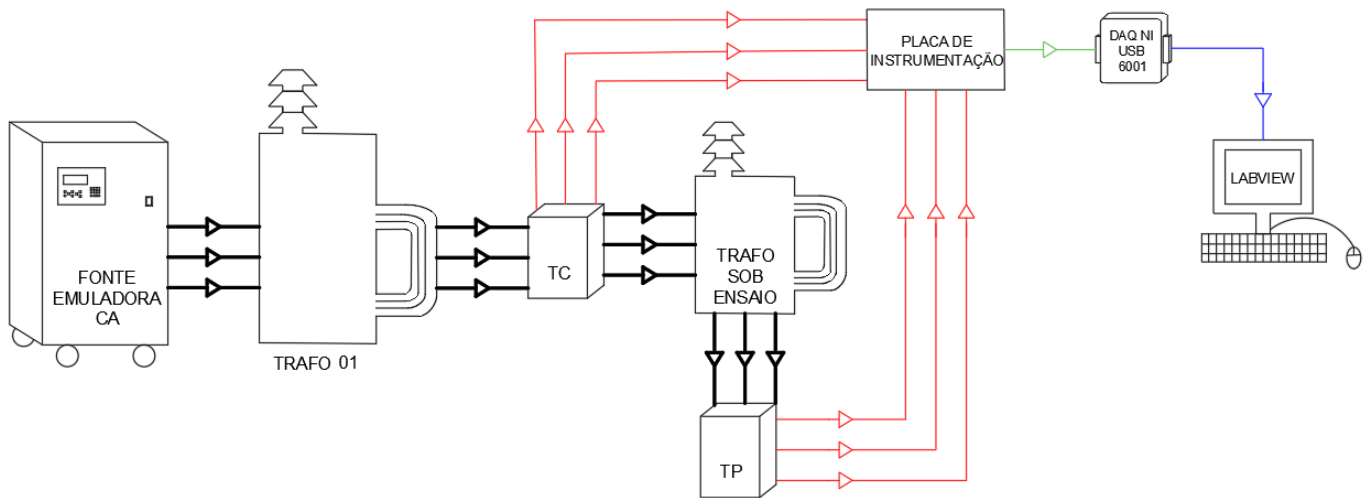


Fig. 1. Esquemático dos equipamentos no laboratório.

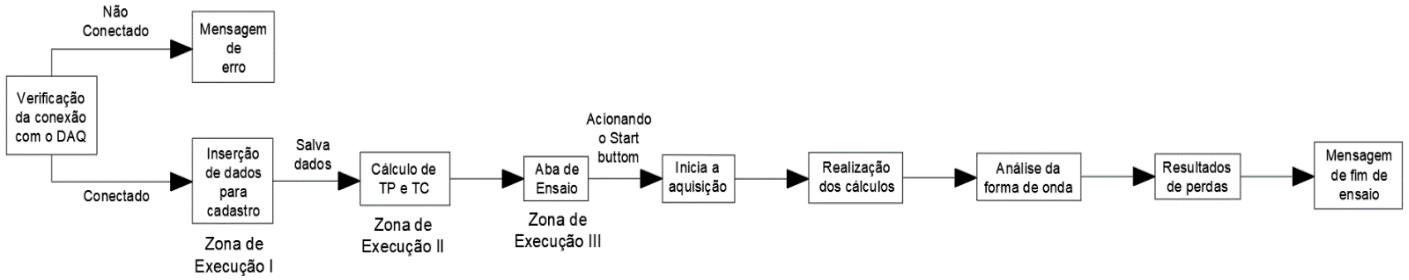


Fig. 2. Fluxograma do *software*

O DAQ utilizado é da marca *National Instruments*[®], modelo NI USB – 6001. A comunicação com o computador é realizada através de conexão USB, representada pela cor azul no esquemático da Fig. 1. O conversor analógico digital (A/D) deste dispositivo possui uma resolução de 14 bits e taxa de amostragem máxima de 20 kS/s, porém essa taxa é dividida pelo número de canais utilizados. No ensaio de perdas em vazio é necessário o uso de dois canais do dispositivo, um para a medição da tensão e outro para a medição da corrente. Além disso a faixa de medição de tensão do DAQ é de -10 V a 10 V de pico.

B. Operação do supervisor proposto

No *software* LabView[®] foi desenvolvida a interface gráfica para o supervisor de ensaio, bem como o programa que executa os cálculos citados na seção II. O usuário do programa só tem acesso a interface gráfica, não podendo, então, observar ou alterar qualquer informação estabelecida na interface do programador. Para o funcionamento do programa é necessário que o DAQ esteja devidamente conectado ao computador que possui o programa. A Fig. 2 apresenta o fluxograma do *software* proposto, inicializando sua rotina partindo da aba de cadastro do transformador a ser ensaiado, onde devem ser informados os dados do equipamento: cliente, número de série, data de fabricação, número de fases, potência nominal, material dos enrolamentos, tensão nominal no lado de AT para cada tap, tensão nominal no lado de BT, impedância percentual, peso e volume. Posteriormente, são informados os níveis de TP e TC que devem ser utilizados no ensaio específico. Por fim, tem-se a aba na qual o ensaio é inicializado, através de um *Start Button*, e é supervisionado através de formas de onda das grandezas adquiridas, e os valores calculados conforme [5].

C. Tratamento dos dados

Com os dados de tensão e corrente instantâneas, recebidos através do DAQ o LabView[®] calcula em tempo discreto as grandezas requeridas ao ensaio. Para o cálculo da potência medida (P_m) são coletados 166 pontos em um ciclo de 60 Hz de acordo com (3).

$$P_m = \frac{1}{166} \sum_{k=1}^{166} v(k) \cdot i(k) \quad (3)$$

Onde $v(k)$ e $i(k)$ são os níveis instantâneos de corrente e tensão na amostra [7]. A potência absorvida apenas pelo transformador é calculada a partir da subtração das perdas associadas ao circuito de instrumentação que, neste caso, é

obtida a partir do conhecimento do nível de tensão aplicado no ensaio e da resistência interna do circuito de sensoriamento.

Para a obtenção dos resultados almejados são necessários os valores U e U' . Esses, por sua vez, são calculados pelo *software* conforme (4) e (5).

$$U = \sqrt{\frac{1}{166} \sum_{k=1}^{166} v(k)^2} \quad (4)$$

$$U' = \frac{1}{166} \sum_{k=1}^{166} v(k) \quad (5)$$

Com esses valores de tensão e corrente, o programa realiza os cálculos apresentados em (1) e (2).

IV. RESULTADOS PRELIMINARES

Como já citado, o *software* inicializa sua rotina com o cadastro do transformador a ser ensaiado, como mostra a Fig. 3. Os dados apresentados identificam um transformador monofásico 127/220 V, de classe 15 e potência de 15 kVA.

Posteriormente, o usuário deve acessar a aba onde é feito o ensaio propriamente dito. Para a realização dos testes que

Fig. 3. Cadastro do transformador

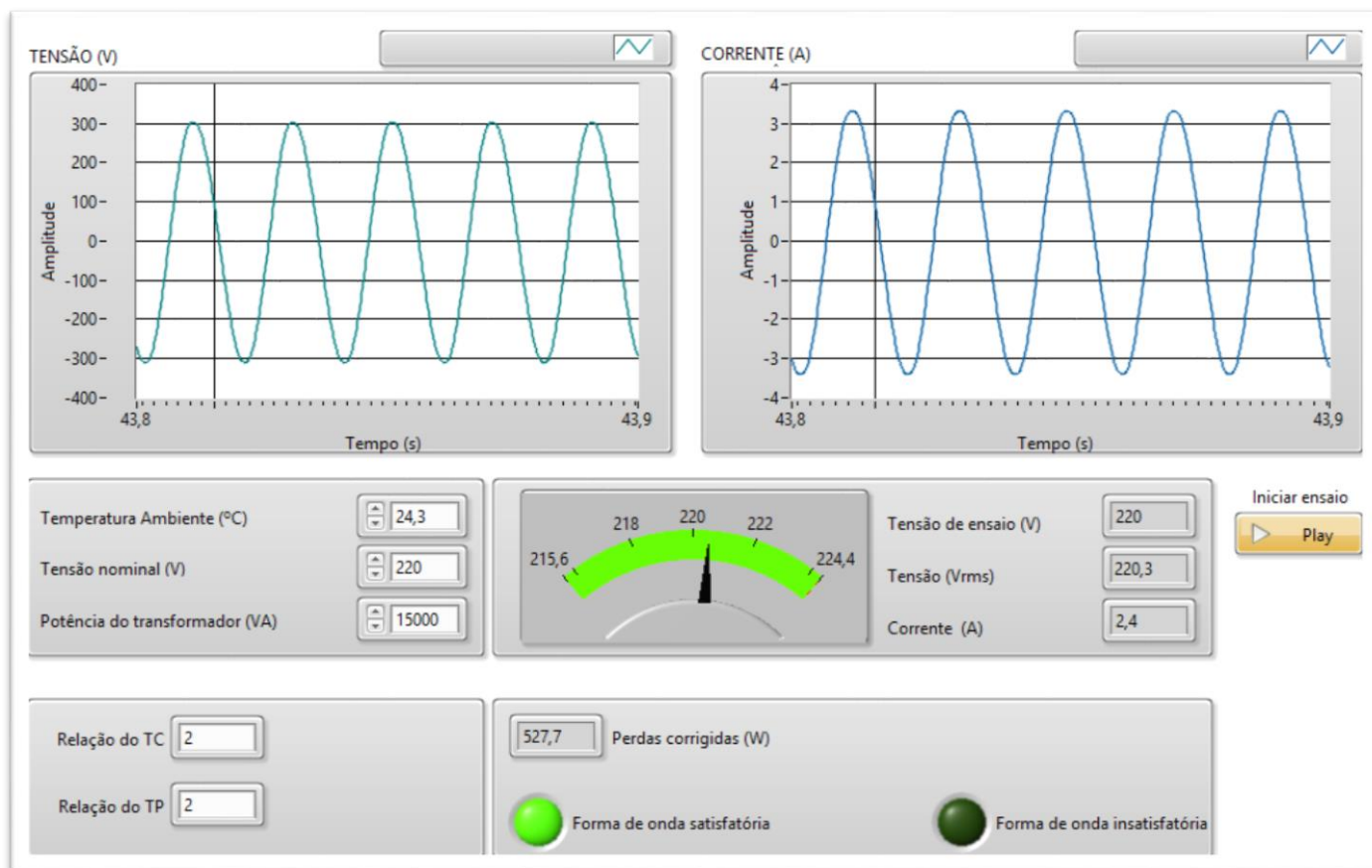


Fig. 4. Interface de monitoramento do ensaio.

objetivam a validação do *software* foi utilizado um gerador de funções que aplica no DAQ os mesmos níveis de tensão vindos da placa de instrumentação. No *software* são estabelecidos os ganhos dos sensores de tensão e corrente da instrumentação e os valores do TC e TP, desse modo, os valores apresentados são correspondentes aos que estão sendo fornecidos ao transformador sob ensaio. Na Fig. 4 observa-se as formas de onda com valores instantâneos da tensão e da corrente.

Na região central da janela do programa, apresentam-se os dados de temperatura ambiente. Os dados de potência e tensão são obtidos através das informações de cadastro. Ao lado consta um ponteiro que auxilia o metrologista no controle da elevação de tensão durante o ensaio, com margem de 2% do valor nominal. Junto ao ponteiro, são apresentados os valores eficazes de tensão e corrente. Abaixo constam os valores referentes à relação de transformação do TP e TC. Ao lado é informado o dado de perdas, apresentado junto ao indicador da forma de onda, conforme supracitado na seção II. Por fim, transcorridos os 60 segundos de ensaio, tem-se a mensagem de fim de ensaio.

Os cálculos também foram realizados fora do programa para verificar se os resultados obtidos estavam coerentes com a teoria apresentada, dessa forma validando o procedimento dos cálculos realizados pelo LabView®, bem como a configuração dos blocos utilizados. Os resultados são apresentados na Tabela 1. Percebe-se que com as formas de onda perfeitamente em fase, os valores medidos de perdas apresentam erro percentual

de 0,18 %. Quando as ondas foram defasadas, através do gerador de funções, não foi possível estabelecer uma defasagem exata de 90°, visto que equipamento não possui a precisão necessária para tal. Nesse caso, o valor de perdas estimado foi zero, no entanto, o *software* obteve 28,7 W, um valor que equivale a uma defasagem de aproximadamente 87°.

Ademais as formas de onda aplicadas foram variadas em amplitude e defasagem gradativamente para observar o comportamento das medições conforme essa alteração. Assim, foi verificado que os valores obtidos e calculados foram coerentes com os esperados, verificando, dessa forma, a validade do *software*.

TABELA I. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

Perdas a vazio		
Defasagem (°)	Valores medidos (W)	Valores calculados (W)
0	527,7	528,7
≈ 90	28,7	0

V. CONCLUSÃO

O programa de etiquetagem do PROCEL aplicado à transformadores tem como propósito principal garantir a confiabilidade do sistema elétrico de potência. Dessa forma, tornou-se fundamental a instauração de novos centros que

sejam aptos a realizar ensaios em média tensão de acordo com a ABNT NBR 5356. A proposta do Laboratório de Ensaio em Média Tensão é realizar o conjunto de ensaios prescritos na norma de forma automatizada.

Neste documento foi apresentada uma proposta de realização do ensaio de medição de perdas em vazio e corrente de excitação de forma automatizada, utilizando um dispositivo de aquisição de dados para tensão e corrente vinculado com um sistema supervisor de ensaio desenvolvido no *software* LabView®. O DAQ possui uma taxa de amostragem de 20kS/s, no entanto, essa taxa é dividida pelo número de entradas utilizadas na placa. Nesse caso foi utilizada uma entrada para medição de tensão e outra para medição de corrente, dividindo a taxa de amostragem para 10 kS/s, sendo, ainda, suficiente para representar as formas de onda desejadas – onda senoidal de 60Hz – indicando resultado satisfatório de conversão A/D. Além disso, o trabalho constatou que os resultados obtidos através dos cálculos do programa, tanto para os sinais defasados, como em fase, foram compatíveis com os valores esperados, bem como os dados RMS obtidos por blocos específicos do *software*.

O trabalho desenvolveu o procedimento de ensaio, o sistema de aquisição de dados, a interface do sistema supervisor e, por fim, os resultados obtidos com o teste do *software*. Futuramente, para aumentar a precisão dos cálculos, será incluída uma função de interpolação que terá seu erro reduzido através do método por mínimos quadrados no *software*. Ainda, serão incluídas placas de instrumentação para que os testes

sejam realizados em transformadores reais, além de mais dois DAQs, para realização dos testes em transformadores trifásicos.

REFERÊNCIAS

- [1] D. L. P. Feil, P. R. Silva, D. P. Bernardon, T. B. Marchesan, M. Sperandio, and L. H. Medeiros, “Development of an efficient distribution transformer using amorphous core and vegetable insulating oil,” *Electr. Power Syst. Res.*, pp. 268–279, 2017.
- [2] Eletrobras/PROCEL, “PROCEL Info,” 2012. .
- [3] INMETRO, “INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia,” 2014. [Online]. Available: <http://www.inmetro.gov.br/>. [Accessed: 03-Jul-2018].
- [4] A. S. Pillai and T. B. Isha, “A power-aware multiprocessor based laboratory automation and resource management system,” *2014 IEEE Int. Conf. Comput. Intell. Comput. Res. IEEE ICCIC 2014*, pp. 197–214, 2015.
- [5] Associação Brasileira de Normas Técnicas, “ABNT 5356-1: Transformadores de potência Parte 1: Generalidades.” .
- [6] J. Oliveira, J. Cogo, J. Policarpo, “Transformadores: Teoria e ensaios.” Edgard Blucher LTDA., São Paulo, 1984.
- [7] J. M. E. Vicente, “Uma Contribuição à Automação de Ensaio em Transformadores de Potência em Média Tensão,” Universidade Federal de Itajubá, 2006.