

# Sistema Automatizado para Ensaio de Resistência e Elevação de Temperatura de Transformadores de Distribuição

1<sup>st</sup> Mateus Paiva Stochero  
*Instituto de Redes Inteligentes*  
*Universidade Federal de Santa Maria*  
Santa Maria, Brasil  
mateusstochero@hotmail.com

2<sup>nd</sup> Cristian Pappis  
*Instituto de Redes Inteligentes*  
*Universidade Federal de Santa Maria*  
Santa Maria, Brasil  
cristianpappis@gmail.com

3<sup>rd</sup> Guilherme Brasil Cavalheiro  
*Instituto de Redes Inteligentes*  
*Universidade Federal de Santa Maria*  
Santa Maria, Brasil  
brasil.17guilherme@gmail.com

4<sup>th</sup> Marcelo Weber Contri  
*Instituto de Redes Inteligentes*  
*Universidade Federal de Santa Maria*  
Santa Maria, Brasil  
weberkatze@gmail.com

5<sup>th</sup> Richard Gonçalves Cornelius  
*Instituto de Redes Inteligentes*  
*Universidade Federal de Santa Maria*  
Santa Maria, Brasil  
richardgc98@gmail.com

6<sup>th</sup> Vitor Cristiano Bender  
*Instituto de Redes Inteligentes*  
*Universidade Federal de Santa Maria*  
Santa Maria, Brasil  
vitor.bender@ufsm.br

7<sup>th</sup> Tiago Bandeira Marchesan  
*Instituto de Redes Inteligentes*  
*Universidade Federal de Santa Maria*  
Santa Maria, Brasil  
tiago@ufsm.br

8<sup>th</sup> Daniel Pinheiro Bernardon  
*Instituto de Redes Inteligentes*  
*Universidade Federal de Santa Maria*  
Santa Maria, Brasil  
dpbernardon@ufsm.br

9<sup>th</sup> Rafael Concatto Beltrame  
*Instituto de Redes Inteligentes*  
*Universidade Federal de Santa Maria*  
Santa Maria, Brasil  
beltrame@gepoc.ufsm.br

**Abstract**—O transformador é um dispositivo que opera em temperaturas superiores a do ambiente devido a energia dissipada pelas perdas nos enrolamentos e no núcleo. O ensaio de aquecimento visa determinar se o transformador não ficará sujeito à temperaturas que o prejudiquem durante seu funcionamento. Este artigo tem por objetivo apresentar um circuito de automação capaz de automatizar de ensaios de elevação de temperatura e medição de resistência a quente em transformadores de distribuição, previstos na NBR 5356, de forma a reduzir a interferência do operador sobre o ensaio.

**Index Terms**—Ensaio, Resistência, Temperatura, Transformador.

## I. INTRODUÇÃO

Dada a ampla utilização de transformadores no sistema elétrico é essencial que este componente apresente um elevado nível de confiabilidade, que garanta seu bom funcionamento tanto em operações nominais, como em surtos de tensão e corrente. No campo dos transformadores, quando nos referimos a confiabilidade, aborda-se, principalmente, o reconhecimento das limitações dos transformadores, ou seja, os níveis de energia que ele pode suportar sem grandes efeitos em seu funcionamento. Visando a descrição destas limitações, os transformadores passam por diversos ensaios antes de entrar em operação e ao longo da sua vida útil, neste âmbito, o ensaio de medição de resistência a quente visa pré-determinar o comportamento do transformador, quando sujeito a uma elevação de temperatura.

Conforme estabelecido na norma NBR-5380/1993 [1], os transformadores de potência (e distribuição) devem ser submetidos a ensaios para verificar a qualidade do equipamento fabricado. Normalmente, esses ensaios, denominados “ensaios de rotina”, são realizados na própria fábrica, devendo ser realizados em todas as unidades de produção, sendo que o comprador tem o direito de designar um representante para assisti-los. Ensaios de “tipo” incluem além dos ensaios de rotina um grupo de ensaios adicional e a eles só é submetido um transformador do lote.

Antes mesmo de iniciar o ensaio, é necessário que o transformador a ser ensaiado, esteja desenergizado com pelo menos três horas de antecedência ao começo do ensaio, deste modo a temperatura do óleo estará próxima a temperatura ambiente, sem apresentar efeitos na resistência à temperatura ambiente. Outrossim, não é possível realizar tal ensaio em ambientes com elevadas amplitudes térmicas, fato que pode ocasionar a propagação de erros nas medições. Com a preparação prévia necessária, bem como a dependência das condições climáticas, este ensaio tende a ser criterioso quanto aos dias em que se pode ser realizado, ou seja, apesar do ensaio em si não requisitar muito tempo, as dependências com as condições climáticas e ambientais podem deixar este transformador parado por mais tempo que o requerido, tornando necessário um planejamento prévio para se viabilizar o ensaio com confiabilidade.

Quando se atinge a temperatura quente de estabilização se desenergiza o transformador, com isso, o operador tem

até cinco minutos para realizar a medição da resistência dos enrolamentos, entretanto, quanto mais rápido a medição é realizada, maior é a confiabilidade das medidas. Com o decorrer do tempo após a desenergização do transformador o enrolamento resfria-se e consequentemente varia sua resistência. Para a obtenção de resultados precisos é recomendável o mínimo possível de interferências ambientais durante a aquisição das medidas [2], [3]. Além disso, como o ensaio pode se estender por várias horas dependendo da potência do transformador e é geralmente realizado no período noturno, quando se tem a menor amplitude térmica ambiental, exige a presença do operador durante a noite.

Com base na premissa de que erros ou atrasos durante o procedimento manual pode comprometer a qualidade da medição, e eventualmente a segurança do operador, um sistema laboratorial automatizado que permita a realização da medida de resistência no menor tempo possível e com possibilidade de ser controlado remotamente é altamente desejável.

O objetivo deste artigo é apresentar um solução de automatização do ensaio de resistência e elevação de temperatura para transformadores de distribuição. A solução consiste, em síntese, em um circuito elétrico utilizando contadoras e botoeiras. Por meio de manobras com as contadoras, é possível realizar a medição em poucos segundos diminuindo a interação entre o operador e a máquina, contribuindo com a segurança e aumentando a confiabilidade dos resultados.

## II. MÉTODOS DE ENSAIO

A ABNT NBR-5356 descreve quatro processos para se determinar a elevação de temperatura: [4]

- Método de Carga Efetiva: Este método consiste em colocar o transformador em operação nominal, contudo, torna-se inexecutável para transformadores acima de média potência por não se dispor da potência instalada suficiente no laboratório, além de implicar em grandes desperdícios de energia. [5]
- Método da Oposição: Consiste em ligar uma fonte a um dos enrolamentos para suprir as perdas a vazio e outra fonte a outro enrolamento tal que produza as correntes nominais para suprir as perdas nos enrolamentos.
- Método do Circuito Aberto: Consiste em manter um dos enrolamentos em aberto enquanto em outro se estabelece uma tensão superior a nominal de maneira que as perdas no núcleo sejam equivalentes às perdas totais no transformador em carga nominal. Efeito parecido ocorre quando se utiliza corrente em frequência inferior à frequência nominal provocando aumento do fluxo e indução no núcleo ocasionando maiores perdas no ferro.
- Método do Curto-Circuito: Apesar do método concentrar as perdas totais de forma única nos enrolamentos, trata-se do procedimento mais difundido com resultados considerados aceitáveis. De forma simplificada, este método baseia-se em realizar um curto-circuito em um dos enrolamentos do transformador e no outro enrolamento aplicar

uma tensão que produza, através do Efeito Joule, geração de calor equivalente a produzida em condições normais no funcionamento do dispositivo.

## III. PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS

Atualmente, o Laboratório de Média Tensão do Instituto de Redes Inteligentes (INRI) tem a capacidade de executar ensaios de rotina em transformadores de distribuição, dentre eles o ensaio de elevação de temperatura e medição de resistência a quente.

Este ensaio busca determinar as temperaturas no topo do óleo e nos enrolamentos do transformador sob ensaio. Dentre os métodos indicados pela NBR 5356 e apresentados na seção II, o ensaio é realizado através do método de curto-circuito. Inicialmente deve-se realizar a medição da resistência dos enrolamentos à temperatura ambiente, registrando essas informações. Em seguida alimenta-se o transformador pelo lado de alta tensão (AT) (na derivação de menor tensão), aplica-se a corrente correspondente às perdas totais calculadas, corrigidas à temperatura de referência, e mantém-se o lado de baixa tensão (BT) em curto-circuito. O transformador permanece energizado até atingir a estabilidade térmica, quando então se determina a elevação de temperatura no topo do óleo com relação ao ambiente. Então, aplica-se a corrente, novamente, por mais uma hora, desenergiza-se o transformador e mede-se a resistência a quente dos enrolamentos. Assim, calcula-se a elevação de temperatura dos enrolamentos (temperatura média) com relação ao ambiente.

Durante todo o processo à distância acompanha-se a potência lida no equipamento Monitek 9451 [6] e ajusta-se gradativamente a tensão da fonte de alimentação para realizar o controle da potência. O ensaio de aquecimento se encerra quando o gradiente de temperatura do óleo for inferior a 1°C nas últimas três horas de ensaio.

Após, o transformador é desenergizado e inicia-se a etapa de medição de resistência do transformador, nesta etapa o operador deve adentrar a área de ensaios e desconectar a alimentação da alta tensão do transformador e conectar as garras do Monitek 9930 nos respectivos terminais de alta ou baixa tensão em um intervalo de tempo inferior a cinco minutos (preferencialmente, inferior a um minuto). Este processo oferece riscos ao operador, uma vez que, a área de ensaios fora recentemente desenergizada e a necessidade de rapidez no processo pode causar erros que colocam a segurança em risco. Portanto, a implementação de um circuito de automação torna o processo de ensaio mais eficiente, rápido e seguro, reduzindo a participação do operador no processo.

### A. Metodologia de Cálculo

Por mais rápido que seja o processo de medição de resistência a quente no transformador, após sua desenergização haverá uma variação no valor da resistência em função do resfriamento dos enrolamentos. Através do processo de correção via extrapolação gráfica, são adquiridas várias medidas de resistência com intervalos de tempo iguais ao tempo decorrido entre a desenergização e a primeira medida. Dentro do tempo

de quatro minutos, busca-se realizar o maior número de medidas possíveis a fim de traçar uma curva característica para a variação da resistência em função do tempo, tal como mostra a Figura (1).

Para obter a resistência exatamente no instante do desligamento, são calculadas as variações de resistência  $\Delta R_1 = (R_1 - R_2)$ ,  $\Delta R_2 = (R_2 - R_3)$ ,  $\Delta R_3 = (R_3 - R_4)$  e  $\Delta R_4 = (R_4 - R_5)$ . Interligando os pontos  $P_1, P_2, P_3, P_4$  e  $P_5$  obtém-se a reta XY, através de  $P_5$  traça-se uma reta paralela a  $P_4R_1$ , determinando no eixo das resistências o valor de  $R_\Theta$  que representa a resistência no instante do desligamento [7].

O procedimento descrito é implementado de forma automática pelo equipamento Monitek 9930 e processado pelo software RHMED [8].

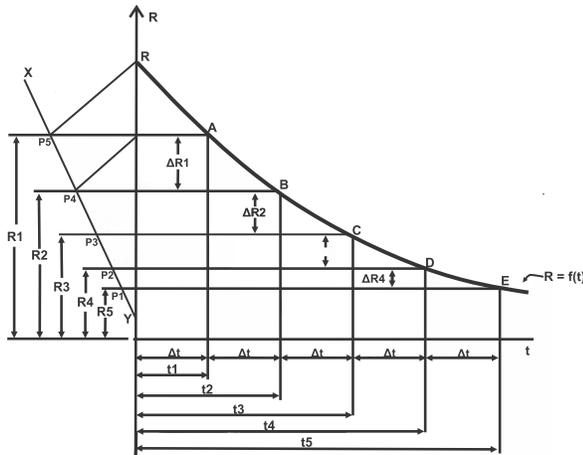


Fig. 1. Extrapolação Gráfica para Obtenção de  $R_\Theta$   
Fonte: [7].

#### IV. CIRCUITO DE AUTOMAÇÃO

A automação é amplamente utilizada para proporcionar eficiência operacional, segurança e redução do esforço humano. Desenvolver um sistema que possua uma interface clara e compreensiva para o operador é um dos maiores desafios da automação [9], [10].

O circuito proposto para o ensaio de elevação de temperatura e medição de resistência a quente é apresentado na Figura (2), onde é possível observar a existência de seis contadoras (k1 a k6). Enquanto as contadoras k2, k3, k4 e k6 fazem parte do circuito de potência, as contadoras k1 e k5 auxiliam na lógica do circuito de comando. Ao acionar alguma das botoeiras da parte de medição, isto é, B2 ou B3, o intertravamento das contadoras impede que a alimentação se mantenha ativa ao desacionar a contadora k1. A dinâmica destes acionamentos pode ser visualizada na Figura (2). Como o ensaio necessita do curto-circuito dos terminais de BT a contadora k3 deve ser projetada para suportar uma corrente de curto-circuito coerente com a potência do transformador ensaiado. O laboratório possui capacidade para trabalhar com transformadores de potência de até 150kVA, isto significa uma corrente de curto-circuito de 230A. Por uma questão de

disponibilidade, dado que estes equipamentos tem um custo elevado, optou-se por uma contadora de Schneider Electric<sup>®</sup> de 225A.

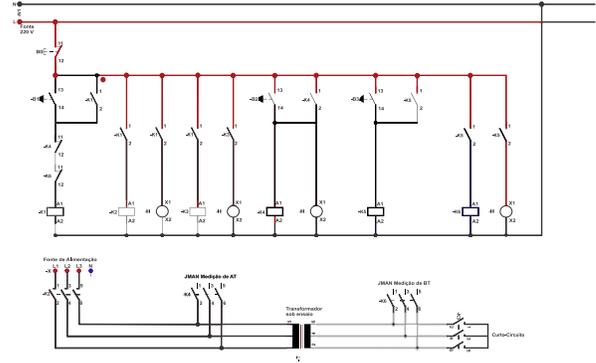


Fig. 2. Circuito de Automação

O circuito proposto possui três etapas de funcionamento:

- Etapa 1 - Elevação de Temperatura: Nesta etapa a partir do acionamento da botoeira B1 inicia-se o processo de elevação de temperatura do transformador sob teste. No painel de comandos duas lâmpadas permanecem acesas indicando que a alimentação foi conectada (contadora k2) e o curto-circuito realizado (contadora k3). Tal etapa é ilustrada na Figura (3).
- Etapa 2 - Medição de Resistência do lado de AT: Com o gradiente de temperatura do óleo sendo inferior a  $1^\circ\text{C}$  nas últimas três horas, parte-se para a medição da resistência do lado de AT. Neste caso, aciona-se a botoeira B2, responsável pela conexão do Monitek 9930 aos terminais de AT do transformador. No painel de comandos, uma lâmpada indica que a medição está ativa, conforme ilustra a Figura (4).
- Etapa 3 - Medição de Resistência do lado de BT: Finalizada a medição do lado de alta tensão, reconecta-se a alimentação do transformador, reiniciando ao processo de aquecimento por mais uma hora. Uma vez que o gradiente de temperatura, novamente, seja inferior a  $1^\circ\text{C}$ , inicia-se a medição dos enrolamentos de BT. Aciona-se a botoeira B3 que habilita a medição através da contadora k6. Da mesma forma, uma lâmpada no painel de comando indica que a medição está ativa, conforme Figura (5).

Os esquemáticos das etapas 1, 2 e 3 são apresentados nas Figuras (3), (4) e (5), respectivamente.

#### A. Fluxograma

Esquematisando visualmente todo o processo de medição de resistência a quente obtém-se um fluxograma análogo ao apresentado na Figura (6). Todavia, no fluxograma apresentado, há a possibilidade de implementar laços menores contemplando imprevistos e correções de possíveis erros que acontecem nos procedimentos práticos.

## V. CONCLUSÃO

A proposta de sistema de automação mostrou-se capaz de aprimorar o processo de ensaio de resistência e elevação de temperatura possibilitando a aquisição de medidas de forma mais rápida e precisa. A utilização do circuito garante que o ensaio não apenas seja realizado dentro tempo regulamentado pela norma, mas também, dentro do tempo recomendado para a obtenção de medidas mais fidedignas. Além disso, o fato de não haver interação entre o operador e o transformador sob teste, reduz drasticamente as chances de erro humano e proporciona melhores condições de segurança.

Devido à limitações operacionais do laboratório, a implementação do sistema foi temporariamente impossibilitada. A implementação deve ocorrer em breve e os resultados serão apresentados na versão final deste artigo.

Embora a proposta demonstra-se satisfatória para o laboratório, ainda assim, existe margem para aprimoramentos futuros, como a implantação de dispositivos adicionais de segurança, e a possibilidade de operar as contadoras remotamente através de software reduzindo a necessidade de presencialidade da equipe laboratorial.

## REFERÊNCIAS

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5380: Transformador de potência. Rio de Janeiro, 1993. 59 p.
- [2] MIRANDA, Rodrigo Oliveira de. CONTRIBUIÇÃO À INSTALAÇÃO DE UM LABORATÓRIO DE ENSAIOS EM TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO NO INSTITUTO DE REDES INTELIGENTES. 2019. 161 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.
- [3] Procedimento de Ensaio - PE.INRIMT.13 R06 Ensaio de Elevação de Temperatura para Transformadores Trifásicos.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5356: Transformador de potência. Rio de Janeiro, 2007. 59 p.
- [5] R. G. JORDÃO, "Ensaio de Transformadores" em Transformadores, vol. I, Editora: Blucher, 2008, pp. 74–95.
- [6] JMAN MONITEK 9451. Wattímetro/termômetro – Manual técnico, 2000.
- [7] J. C. de Oliveira, J. R. Cogo e J. P. G. de Abreu, "Verificação das condições térmicas de operação" em Transformadores: teoria e ensaios, vol. II, Editora: Blucher, 1984, pp. 40–47.
- [8] JMAN MONITEK 9930. Miliohmímetro – Manual técnico, 2000.
- [9] PILLAI, A. S.; ISHA, T. B. A Power-aware Multiprocessor Based Laboratory Automation and Resource Management System. IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research, [s. l.], p. 4, 2014.
- [10] WOODS, D. D.; BILLINGS, C. E. Automation surprises. Handbook of human factors and ergonomics, [s. l.], v. 2, p. 1926–1943, 1997.

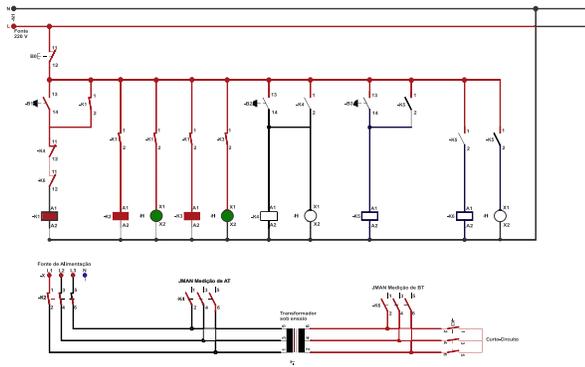


Fig. 3. Etapa 1

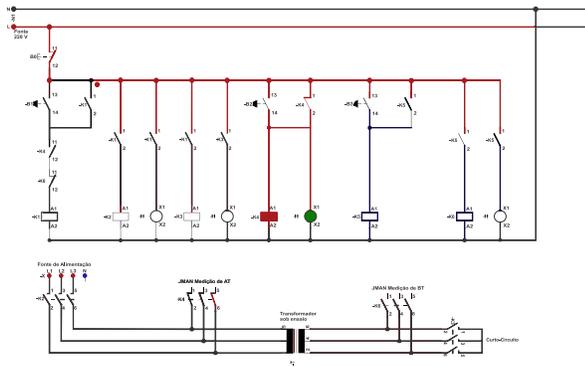


Fig. 4. Etapa 2

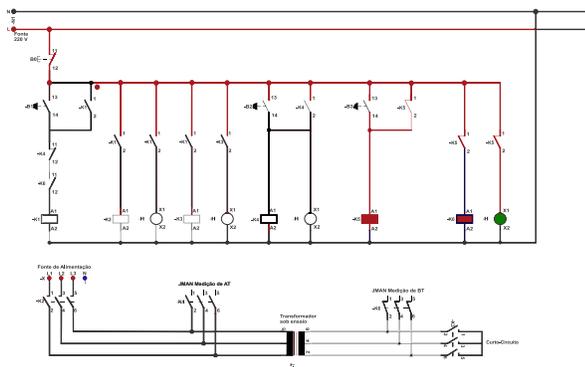


Fig. 5. Etapa 3

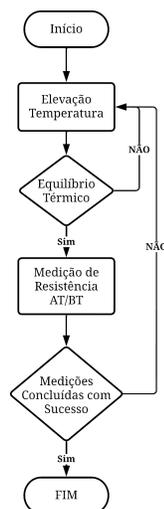


Fig. 6. Fluxograma do Processo