



ANALOGIA ENTRE VALORES CALCULADOS E DADOS DE ENSAIO DE UM TRANSFORMADOR

Julia Gonçalves Santos, Wyrllys Antunes Soares, João Victor Mota Gomides, Matheus Aquino da Silveira

UNICEUG – Centro Universitário de Goiânia

Resumo — Submete-se as máquinas elétricas a ensaios para avaliar sua eficiência e a conformidade de seus parâmetros práticos com os normatizados. Elaborou-se este trabalho com o intuito de comparar os resultados obtidos, dos ensaios de curto-circuito e a vazio, com os valores calculados conforme metodologias teóricas. Por meio de uma visita técnica a um laboratório, acompanhou-se os ensaios em questão. Logo após, executou-se cálculos baseados em metodologias teóricas, em que foram extraídos os dados. Foi comparado, então, os resultados dos ensaios com os calculados e obteve-se uma boa concordância quanto ao rendimento nos dois casos.

Palavras-chaves — Ensaio a vazio, ensaios em curto-circuito, impedância, primário, secundário, transformadores.

STUDY ON POWER TRANSFORMERS TESTING METHODOLOGIES

Abstract - Electric machines are submitted to tests to evaluate their efficiency and the conformity of their practical parameters with the standardized ones. This work was developed with the purpose of comparing the results obtained from short-circuit and no-load tests with the values calculated according to theoretical methodologies. Through a technical visit to a laboratory, the tests in question were followed. Soon after, calculations based on theoretical methodologies were performed, in which the data was extracted. The test results were then compared with the calculated results, and a good agreement was obtained regarding the performance in both cases.

Keywords - No-load tests, short-circuit tests, impedance, primary, secondary, transformers.

I. INTRODUÇÃO

Os ensaios elétricos em transformadores se caracterizam como processos essenciais para garantir o funcionamento da máquina de forma eficaz, atestando que esse realize transformações de tensões, obedecendo às normas da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). [1], [2], [3]

Os transformadores são equipamentos fundamentais para o bom funcionamento de todo o sistema de energia elétrica. Sua falha repentina pode trazer grandes prejuízos financeiros, não apenas para as concessionárias de energia, mas também para todos consumidores. Neste contexto, a engenharia de manutenção assume um papel de extrema importância, pois a verificação das condições operacionais dos transformadores através da realização de ensaios periódicos é fundamental para que falhas sejam previstas e evitadas. Entretanto, o transformador ainda está sujeito a situações de sobrecargas ou curtos circuitos que podem ocasionar falhas sem nenhum aviso prévio [4].

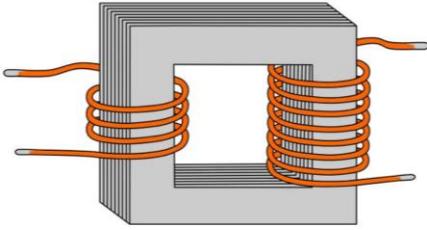
Foi elaborado um estudo voltado para os ensaios de transformadores com o intuito de realizar um comparativo entre as metodologias aplicadas pelas empresas para realização dos testes e a metodologia desenvolvida que foi apresentada ao decorrer da pesquisa. [5]

Partindo deste princípio, encaminhou-se uma visita técnica para acompanhamento dos ensaios de curto-circuito e ensaio a vazio. Foi possível acompanhar todo o processo de construção, análise e testes realizados no transformador. Ao final dessa, foi disponibilizado um relatório com todos os dados pertinentes do equipamento, o que permitiu efetuar os cálculos para dar início ao processo comparativo. [6]

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

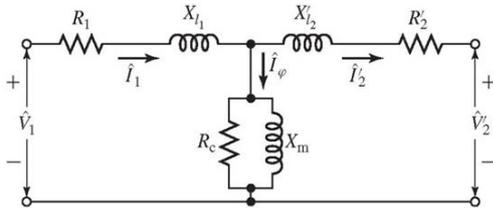
O transformador é uma máquina elétrica basicamente constituída de um enrolamento primário, um enrolamento secundário e um caminho otimizado para o fluxo magnético, chamado de núcleo, conforme Figura 1 [7]. O princípio de funcionamento de um transformador baseia-se nos fundamentos do eletromagnetismo, estudados principalmente por Faraday [7]. Estes estudos mostram que um campo magnético variável produz um fluxo magnético variável, que é responsável pelo surgimento de uma corrente elétrica induzida. Estes são fenômenos de mútua indução entre dois circuitos eletricamente isolados, mas magneticamente acoplados.

Figura 1: Transformador com enrolamentos primário e secundário



Durante a fase de cálculos, foram utilizados conceitos aplicados em transformadores ideais. Desta forma, a análise da máquina em relação a suas tensões e correntes iniciou-se através do circuito equivalente [5], vide Figura 2, que representou o circuito equivalente monofásico do transformador referido ao lado de alta tensão.

Figura 2: Circuito equivalente monofásico do transformador referido ao lado de alta tensão.



Neste trabalho, o primário referiu-se à alta tensão e o secundário à baixa tensão. Na Figura 2, \hat{V}_1 [V] foi a tensão nos terminais do primário, \hat{I}_1 [A] foi corrente própria de primário, e R_1 [Ω] e X_{l1} [Ω], a resistência e a reatância de dispersão próprias de primário, constituíram-se os parâmetros do enrolamento de alta. O enrolamento de baixa tensão foi substituído pelos parâmetros elétricos equivalentes próprios da baixa tensão que, em seguida, foram refletidos para o enrolamento de alta tensão [5], [6]. Desta forma, \hat{V}'_2 [V] foi a tensão nos terminais do secundário referida ao primário, \hat{I}'_2 [A] foi corrente de carga, R'_2 [Ω] e X'_{l2} [Ω] a resistência e a reatância de dispersão de secundário referidas ao primário. O ramo de excitação foi constituído de parâmetros próprios de primário, sendo a resistências do núcleo R_c [Ω] e reatância de magnetização X_m [Ω], e \hat{I}_ϕ [A] foi a corrente de excitação própria do primário.

Analisando o circuito equivalente da Figura 2, concluiu-se que, em um transformador ideal com os circuitos em aberto não se tem corrente nos enrolamentos. Mas quando se aplica uma tensão no enrolamento de alta e se manteve o enrolamento de baixa em aberto, notou-se que a corrente na baixa continuou sendo zero; já no enrolamento de alta, surgiu uma corrente no ramo de excitação composto pelas resistências do núcleo R_c [Ω] e reatância de magnetização X_m [Ω]. A relação de espiras do transformador foi utilizada para determinar os dados do enrolamento de alta [5].

Sob carga, o circuito equivalente da Figura 2 fica submetido a três correntes, a corrente própria de primário \hat{I}_1 [A], a corrente de excitação \hat{I}_ϕ [A] e a corrente de carga \hat{I}'_2 [A].

III. METODOLOGIA

A metodologia consistiu primeiramente em usar os resultados do ensaio a vazio e de curto-circuito, obtidos numa visita à empresa responsável pelos ensaios, e calcular os parâmetros do circuito equivalente da Figura 2.

Em seguida, com as condições de operação da máquina e com as informações das perdas constantes no relatório fornecido pela empresa, usou-se o equacionamento proposto por [5] – [6] e calculou-se o rendimento da máquina.

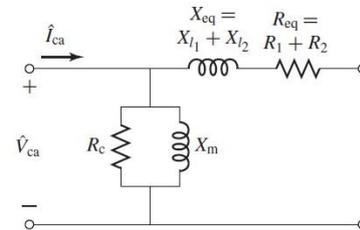
Com a máquina a plena carga e com um fator de potência de operação, ajustou-se o secundário com tensão nominal, e estimou-se a regulação do transformador por meio do circuito equivalente da Figura 2.

Por fim, calculou-se a relação de transformação e a impedância de curto-circuito e comparou-se os resultados medidos nos ensaios com os obtidos pelo equacionamento proposto por [5] – [6].

A. Determinação dos parâmetros

Os instrumentos utilizados no ensaio de circuito aberto forneceram os valores da tensão aplicada V_{ca} [V], da potência P_{ca} [W] e corrente I_{ca} [A] com o enrolamento de alta tensão em aberto, vide Figura 3. Por meio destas três medidas, encontrou-se os valores da impedância de circuito aberto Z_{ca} [Ω] por (01), da resistência de circuito aberto R_{ca} [Ω] por (02) e da reatância de circuito aberto X_{ca} [Ω] por (3). A impedância do ramo de excitação Z_ϕ [Ω], calculada por meio de (01), é a impedância vista da entrada tendo em vista que nenhuma corrente circulava no enrolamento em aberto.

Figura 3: Ensaio a vazio



$$Z_{ca} = Z_\phi = \frac{V_{ca}}{I_{ca}} \quad (01)$$

$$R_{ca} = R_c = \frac{V_{ca}^2}{P_{ca}} \quad (02)$$

$$X_{ca} = X_m = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{|Z_\phi|}\right)^2 - \left(\frac{1}{R_{ca}}\right)^2}} \quad (03)$$

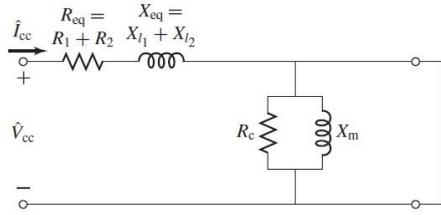
Em que:

Z_{ca} – Impedância de circuito aberto [Ω];

V_{ca} – Tensão de circuito aberto [V]; (09)
 I_{ca} – Corrente de circuito aberto [V];
 R_{ca} – Resistência de circuito aberto [Ω];
 P_{ca} – Potência de circuito aberto [W];
 X_{ca} – Reatância de circuito aberto [Ω];

Os instrumentos utilizados no ensaio de curto-circuito mediram os valores eficazes da tensão aplicada V_{cc} [V], da corrente I_{cc} [A] e da potência P_{cc} [W] com o enrolamento de baixa em curto-circuito, vide Figura 4. Por meio destas três medidas, obteve-se o valor da impedância equivalente Z_{eq} [Ω] por (04), resistência equivalente R_{eq} [Ω] por (05) e a reatância equivalente X_{eq} [Ω] vem de (06) [5]

Figura 4: Ensaio de curto-circuito



$$|Z_{eq}| = |Z_{cc}| = \frac{V_{cc}}{I_{cc}} \quad (04)$$

$$R_{eq} = R_{cc} = \frac{P_{cc}}{I_{cc}^2} \quad (05)$$

$$X_{eq} = X_{cc} = \sqrt{|Z_{cc}|^2 - R_{cc}^2} \quad (06)$$

Em que:

Z_{eq} – Impedância equivalente [Ω];
 Z_{cc} – Impedância de curto-circuito [Ω];
 V_{cc} – Tensão de curto-circuito [V];
 I_{cc} – Corrente de curto-circuito [A];
 R_{eq} – Resistência equivalente [Ω];
 R_{cc} – Resistência curto-circuito [Ω];
 P_{cc} – Potência de curto-circuito [W];
 X_{eq} – Reatância equivalente [Ω];
 X_{cc} – Reatância de curto-circuito [Ω];

B. Cálculo do rendimento

Por meio de (07), encontrou-se a potência de saída P_{out} [W] da máquina [1] e por (08), a potência de entrada P_{in} [W].

$$P_{out} = S_N \cdot fp \quad (07)$$

$$P_{in} = P_{out} + P_{perdas} \quad (08)$$

$$P_{perdas} = P_{ca} + P_{cc}$$

Em que:

P_{out} – Potência de saída [W];
 S_N – Potência aparente nominal [VA];
 fp – Fator de potência;
 P_{in} – Potência de entrada [W];
 P_{perdas} – Perdas de potência [W].

Já a eficiência (ou o rendimento) η da máquina foi definida por (10) [1]

$$\eta = \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right) \cdot 100\% \quad (10)$$

Em que:

η – Rendimento;
 P_{out} – Potência de saída [W];
 P_{in} – Potência de entrada [W].

C. Cálculo da regulação

A tensão de secundário referida ao primário $\hat{V}'_2 = \hat{V}_L$ [V] equivale-se à tensão do primário nominal \hat{V}_{1N} [V], como se observa em (11).

$$\hat{V}_L = \hat{V}_{1N} \quad (11)$$

Em que:

\hat{V}_L – É o fasor de tensão no secundário referida ao primário [V];
 \hat{V}_{1N} – É o fasor de tensão do primário nominal [V].

Considerando que o primário estivesse apto a manter a tensão nominal por fase nos terminais do secundário, pode-se calcular o ângulo de fator de potência θ [rad] por (12)

$$\text{sen } \theta = \sqrt{(1 - \cos^2 \theta)} \quad (12)$$

A corrente de primário nominal é calculada a partir (13).

$$I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3} \cdot V_L} \quad (13)$$

Em que:

I_{1N} – Intensidade da corrente nominal do primário [A];
 V_L – É o módulo de \hat{V}_L [V].

Define-se que a impedância equivalente Z_{eq} [Ω] é igual à soma da resistência e a reatância equivalentes e veio de (14).

$$Z_{eq} = R_{eq} + j X_{eq} \quad (14)$$

A tensão no primário com o secundário na tensão nominal foi determinada a partir da Lei de Kirchof das tensões, demonstrada por (15).

$$\hat{V}_{NL} = Z_{eq} \hat{I}_{1N} + \hat{V}_L \quad (15)$$

Em que:

\hat{V}_{NL} – Fasor de tensão no primário com o secundário na tensão nominal [V];

Z_{eq} – Impedância equivalente [Ω];

\hat{I}_{1N} – Fasor de corrente nominal no primário [A];

A intensidade da tensão no primário com o secundário na tensão nominal V_{NL} [V] é equivalente ao valor absoluto de \hat{V}_{NL} [V], como em (16).

$$V_{NL} = |\hat{V}_{NL}| \quad (16)$$

Em que:

V_{NL} – Intensidade da tensão no primário com o secundário na tensão nominal V_{NL} [V]

O valor da regulação do transformador veio de (17).

$$reg = \left| \left(\frac{V_{NL} - V_L}{V_L} \right) \right| \cdot 100\% \quad (17)$$

Em que:

reg – Regulação do transformador.

D. Cálculo da relação de transformação

A relação de transformação calculou-se por (18).

$$a = \frac{V_{1N}}{\left(\frac{V_{2N}}{\sqrt{3}} \right)} \quad (18)$$

Em que:

a – Relação de transformação.

V_{1N} – Tensão de primário nominal.

V_{2N} – Tensão de secundário nominal.

E. Cálculo da impedância de curto-circuito

A impedância de curto-circuito Z_{cc} [Ω] foi encontrada por (19) e (20)

$$Z_{cc} = \frac{V_{cc}}{I_{1N}} \quad (19)$$

$$Z_{cc} = \frac{V_{1N}}{I_{1N}}$$

(20)

A impedância de base Z_{B_1} [Ω], referida ao lado de alta tensão, foi definida a partir (21).

$$Z_{B_1} = \frac{V_{1N}^2}{S_N} \quad (21)$$

Em que:

Z_{B_1} – Impedância de base [Ω].

Deve-se, então, achar a impedância de curto-circuito em pu Z_{ccpu} [pu] (22), dividindo a impedância de curto-circuito Z_{cc} [Ω] (20) pela impedância de base Z_{B_1} [Ω] (21):

$$Z_{ccpu} = \frac{Z_{cc}}{Z_{B_1}} \quad (22)$$

Em que:

Z_{ccpu} – Impedância de curto-circuito em pu.

IV. RESULTADOS

Nesta seção, apresentou-se os resultados obtidos nos ensaios e os calculados pela metodologia desenvolvida.

A metodologia foi aplicada a um transformador trifásico a óleo para uso na distribuição com dados na Tabela 1. A Tabela 2 mostra os dados obtidos no ensaio a vazio e a Tabela 3, os do ensaio de curto-circuito, em que a frequência (Hz) é 60Hz, sistema trifásico e grupo de ligação Dyn11.

Tabela 1: Dados do Trafo

Enrolamento	Potência (kVA)	Tensão (kV)	ligação	Comutação
Alta Tensão	75	23,1	Triângulo	CST
Baixa Tensão	75	0,38	Estrela	

Tabela 2: Dados do ensaio a vazio.

Parâmetros	valores
V_{ca} (V):	380
I_{ca} (A)	2,09
I_{ca} (pu):	1,84
P_{ca} (W):	335

Tabela 3: Dados do ensaio de curto-circuito.

Parâmetros	valores
I_{cc} (A):	1,87
V_{cc} (V):	901,79
P_{cc} (W):	1014
Temperatura Ambiente (C°):	29

Das Tabelas 1 e 2, aplicou-se (01), (02) e (03) e obteve-se os parâmetros impedância de excitação (Z_m [Ω]), resistência de circuito aberto (R_{ca} [Ω]) e reatância de magnetização (X_m [Ω]), ambos referidos à baixa tensão, como se observa na Tabela 4.

Tabela 4: Parâmetros Obtidos no Ensaio a Vazio.

Parâmetros	valores
Resistência de Circuito Aberto (R_{ca}):	143,68 Ω
Impedância de Excitação (Z_{φ}):	104,97 Ω
Reatância de Magnetização (X_m):	153,72 Ω

Das Tabelas 1 e 2, aplicou-se (04), (05) e (06) e obteve-se os parâmetros impedância equivalente (Z_{eq} [Ω]), resistência equivalente (R_{eq} [Ω]) e a reatância equivalente (X_{eq} [Ω]), ambos referidos à alta tensão, como se observa na Tabela 5.

Tabela 5: Parâmetros Obtidos no Ensaio de Curto.

Parâmetros	valores
Impedância Equivalente (Z_{eq}):	482,24 Ω
Resistência Equivalente (R_{eq}):	289,97 Ω
Reatância Equivalente (X_{eq}):	385,32 Ω

Considerando um fator de carga de 100% e fator de potência $fp = 0,8$ indutivo, calculou-se a potência de saída (P_{out} [W]), a potência de entrada (P_{in} [W]) e o rendimento (η) por meio de (07), (08) e (10), como se observa na Tabela 6..

Tabela 6: Fator de carga, fp , P_{out} e P_{in} .

Parâmetros	Valores
Fator de Carga (%):	100%
Fator de Potência:	0,8
Potência de Saída (P_{out}):	60 kVA
Potência de Entrada (P_{in}):	61,35 kVA

Comparando-se o rendimento medido nos ensaios com o calculado, observou-se uma boa concordância entre eles como se observa na Tabela 7.

Tabela 7: Rendimento.

Rendimento Ensaio (η):	Rendimento Calculado (η):
98,1%	97,8%

Considerando que o primário é capaz de manter a tensão nominal por fase nos terminais do secundário, calculou-se a tensão no primário por meio de (11) e obteve-se $V_{NL} = 23,9395$ kV por meio de (12) - (16). Obteve-se a regulação de (17) e notou-se uma boa concordância com o valor medido nos ensaios, como se observa na Tabela 8.

Tabela 8 : Regulação.

Valor de Ensaio	Valor Calculado
3,41%	3,75%

A relação de transformação do transformador foi obtida de (18) e apresentou boa concordância com o valor obtido nos ensaios, como se observa na Tabela 9.

Tabela 9: Relação de Transformação.

	Valor de Ensaio	Valor Calculado
Fase "A"	105,28	105,28

A impedância de curto-circuito Z_{cc} [Ω] foi calculada de (19) e (20) e, também, apresentou boa concordância com o valor obtido nos ensaios, como se observa na Tabela 10. Após corrigidos para 75°C, obteve-se o valor 3,91pu das equações (21) e (22).

Tabela 10: Impedância de Curto-Circuito.

Valor de Ensaio	Valor Calculado
3,96 pu	3,91 pu

V. CONCLUSÃO

A metodologia desenvolvida neste artigo demonstrou que os resultados encontrados foram compatíveis com os dos ensaios realizados no laboratório de testes da empresa visitada, em conformidade com as normas técnicas. Os cálculos desenvolvidos de acordo com as fórmulas apresentadas neste artigo, comprovou que a metodologia pode ser considerada para avaliar os aspectos construtivo de transformadores, no que diz respeito aos ensaios de curto-circuito e a vazio.

VI. REFERÊNCIAS

- [1] ABNT NBR 5440/2014, Transformadores para Redes Aéreas de Distribuição
- [2] ABNT NBR 5356-1/2 /5, Transformadores de Potência
- [3] ABNT NBR 5458, Transformadores de Potência Terminologia
- [4] I. SOUSA, R. P. SANTOS, Diagnostico em Transformadores de Potência Através de Ensaio de Campo. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica Telemática, da Universidade do Sul de Santa Catarina, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Eletricista. Palhoça, santa catariana, 2012.
- [5] STEPHEN J. CHAPMAN, Fundamentos de Máquinas Elétricas 5ª Edição – Porto Alegre: AMGH, 2013.
- [6] FITZGERALD E KINGSLEY, Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley 7ª Edição, AMGH Editora Ltda., 2014
- [7] G. C. NASCIMENTO. Máquinas Elétricas: teoria e ensaios. 4. ed. São Paulo: Érica, 2011.