

PROJETO E ANÁLISE DE PARÂMETROS DE OPERAÇÃO DE UM AUTOTRANSFORMADOR

Thyago Chrystiann da Silva Lopes, Victor de Paula Brandão Aguiar

Resumo: O presente artigo tem como objetivo descrever o projeto de um transformador monofásico de baixa potência, bem como realizar a sua montagem. Uma análise dos dados obtidos é efetuada após as medições dos parâmetros de operação do transformador e da realização dos ensaios à vazio e de curto circuito, no intuito de verificar o êxito da execução do projeto. Em seguida é feita a ligação como autotransformador, que ocasiona diferenças na operação do equipamento, bem como mudanças da sua finalidade. Discussões acerca do comparativo de transformadores e autotransformadores são realizadas a fim de apontar possíveis vantagens e desvantagens de ambos os dispositivos em determinadas aplicações.

Palavras-chave: enrolamentos, circuitos magnéticos, ensaio à vazio e em curto-circuito.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com [1], um transformador é um dispositivo que transmite, por meio da ação de um campo magnético, energia elétrica CA modificando (ou não) a sua tensão. Ele consiste em dois ou mais enrolamentos em volta de um núcleo que pode ser de material ferromagnético ou de ar. Os enrolamentos não mantêm contato direto entre si, não há nenhuma conexão física, a transferência de energia elétrica entre os enrolamentos ocorre através de um fluxo magnético comum variante no tempo.

O princípio da transferência da energia elétrica no transformador, descrito na Lei de Faraday, acontece ao aplicar uma fonte de tensão alternada em um dos enrolamentos, ao qual produz uma corrente elétrica que cria um fluxo magnético nesse mesmo enrolamento. Tal fluxo magnético concatena com o outro enrolamento, induzindo uma tensão e, consequentemente, fazendo percorrer uma corrente nesse enrolamento caso o mesmo esteja conectado a uma carga.

O transformador desempenha um papel indispensável nos circuitos de potência, permitindo a fácil transmissão e distribuição de energia elétrica com o mínimo de perdas possível. A transformação de tensão, consequentemente acompanhada da transformação de corrente, na transferência de energia elétrica reduz as perdas ocasionadas pelo efeito Joule [2], de forma que os sistemas atuais de transmissão e distribuição de energia elétrica seriam impossíveis com a ausência de transformadores.

Além dos sistemas de potência, nos dias atuais o transformador é utilizado em praticamente todos os campos da engenharia elétrica. O fato da energia elétrica CA ser transmitida pela ação de um fluxo magnético variável permite que o transformador funcione como um filtro de energia elétrica CC, visto que a corrente contínua não gera um fluxo magnético variável. A isolamento elétrica proporcionada por um transformador colocado entre dois circuitos permite a fácil manutenção, visto que uma alteração em um circuito não afetaria diretamente o outro. E não somente pela isolamento elétrica, um transformador que possui ligação física entre seus enrolamentos, chamado de autotransformador, possui características peculiares que ampliam ainda mais as finalidades dos transformadores em geral.

Diante da larga utilização desse dispositivo nas mais vastas aplicações, o estudo dos princípios de funcionamento, execução do projeto e análise de parâmetros operacionais dos transformadores caracterizam o objetivo deste artigo, que é verificar de forma prática todas as constatações teóricas acerca do tema.

2. PROJETO DO TRANSFORMADOR

Optou-se por projetar um transformador monofásico de 220/110 V, de núcleo envolvente, com um circuito primário e um secundário, de enrolamentos eletricamente isolados, operando a uma frequência (f) de 60 Hz. Para o projeto foi utilizado o núcleo de um transformador que anteriormente fazia parte de um sistema eletrônico, realizando-se o aproveitamento das chapas de aço-silício neste projeto. Apesar disso, as chapas estavam em bom estado de conservação.

Todos os passos, assim como equações, apresentados na presente seção 2, referente ao projeto do transformador, foram retirados de [3]. Partindo das medidas do tronco central do núcleo, ilustrado na Figura 1,

tem-se uma seção geométrica (A_g) de $12,8 \text{ cm}^2$. Em seguida, com a Equação 1:

$$A_m = 0,9 A_g, \quad (1)$$

obtem-se a seção magnética do núcleo. O índice 0,9, chamado de fator de empilhamento, é utilizado pois a área da seção magnética, por onde o fluxo magnético efetivamente circula, é 90% da área da seção geométrica. Isso ocorre pois entre as chapas existe uma camada de material isolante que ocupa 10% da espessura de todo material, porém não toma parte na formação do fluxo [3]. Assim, a seção magnética é $11,52 \text{ cm}^2$.

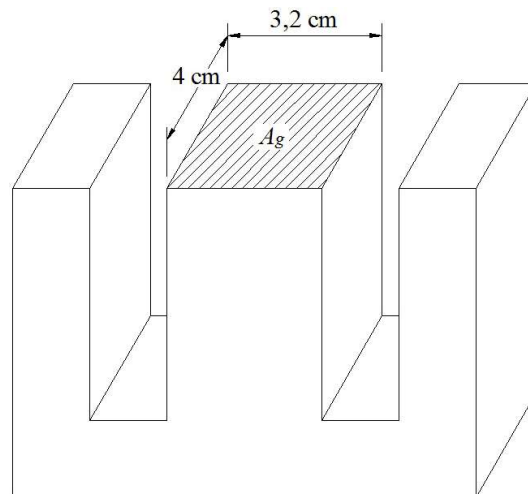


Figura 1. Tronco central do núcleo. (Adaptada de MARTIGNONI, 1991)

Em posse da seção magnética, calcula-se a potência nominal do transformador. Para um transformador com apenas um circuito primário e um secundário a potência nominal é dada pela Equação 2:

$$S = f \left(\frac{A_m}{7,5} \right)^2, \quad (2)$$

sendo A_m em centímetro quadrado (cm^2). Através da Equação 2 obtém-se exatamente uma potência nominal igual a $141,56 \text{ VA}$, mas para aspectos comerciais adota-se uma potência nominal de 150 VA .

É necessário determinar a corrente elétrica que vai percorrer cada um dos enrolamentos, isso é feito utilizando os valores das tensões de entrada e saída, e da potência nominal. De acordo com a Equação 3:

$$I = \frac{S}{V}, \quad (3)$$

para uma tensão de entrada (V_1) de 220 V tem-se que a corrente primária (I_1) é $0,68 \text{ A}$, e para uma tensão de saída (V_2) igual a 110 V a corrente secundária (I_2) é $1,36 \text{ A}$.

É preciso calcular a seção dos fios que serão utilizados nos enrolamentos do transformador. A Tabela 1 apresenta recomendações a respeito da densidade de corrente a ser considerada no dimensionamento dos fios.

Tabela 1. Densidade de corrente recomendada em função da potência. (MARTIGNONI, 1991)

Potência (VA)	Densidade de corrente (A/mm^2)
500	3
500 até 1000	2,5
1000 até 3000	2

Seguindo as recomendações da Tabela 1, é escolhida uma densidade de corrente (J) igual a 3 A/mm^2 . E pela Equação 4:

$$A = \frac{I}{J}, \quad (4)$$

para uma corrente primária de 0,68 A tem-se que a seção do fio primário (A_1) é $0,2267 \text{ mm}^2$, e para uma corrente secundária de 1,36 A a seção do fio secundário (A_2) é $0,4533 \text{ mm}^2$.

De acordo com a tabela de fios AWG (*American Wire Gauge*), para o enrolamento primário deve ser utilizado o fio nº 23 ($0,26 \text{ mm}^2$), e para o enrolamento secundário deve ser utilizado o fio nº 20 ($0,52 \text{ mm}^2$). Dessa forma, os valores a serem considerados para as seções dos fios primário e secundário tornam-se, respectivamente, $0,26 \text{ mm}^2$ e $0,52 \text{ mm}^2$.

Um dos grandes empecilhos do projeto foi a falta de informação referente às chapas de aço-silício, visto que não havia à disposição um catálogo com detalhes técnicos das chapas. A ausência de uma informação essencial como a curva de magnetização poderia facilmente induzir ao erro, gerando resultados operacionais não satisfatórios. Diante disto, fez-se uma busca em literaturas e catálogos de fabricantes de aço-silício, em especial em [2] e [4], à procura de informações usuais sobre as chapas. E com base na pesquisa, decidiu-se utilizar um valor de indução no ferro (B) de 1,7 T.

Definido este parâmetro, determina-se a quantidade de espiras em cada enrolamento pela Equação 5:

$$N = \frac{V}{4,44 \cdot f \cdot B \cdot A_m \cdot 10^{-4}}, \quad (5)$$

sendo A_m em centímetro quadrado (cm^2) e B em Tesla (T). Dessa forma a quantidade de espiras do enrolamento primário (N_1) é aproximadamente 422 espiras. A quantidade de espiras do enrolamento secundário (N_2) também é determinada pela Equação 5, obtendo exatamente 210,84 espiras. Porém é feito um acréscimo de 10% do resultado obtido afim de compensar a queda de tensão, resultando em aproximadamente 232 espiras.

Após definir a seção dos fios e a quantidade de espiras em cada um dos enrolamentos é necessário verificar a possibilidade de execução do projeto, que será declarado possível de execução ao atender a Equação 6, cujo as variáveis serão definidas a seguir:

$$\frac{\text{Seção da janela}}{\text{Seção do cobre}} = \frac{A_j}{A_c} \geq 3. \quad (6)$$

As chapas de aço-silício possuem tamanho padronizado. Todas as suas medidas são em função da largura do tronco central [3]. A Figura 2 ilustra as dimensões padronizadas de uma chapa qualquer, assim como ilustra a seção da janela.

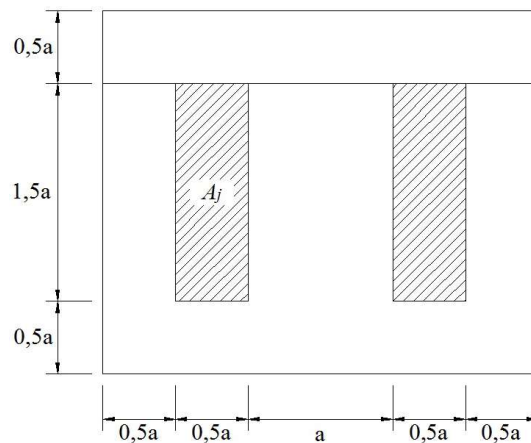


Figura 2. Dimensões padronizadas de uma chapa de aço-silício. (Adaptada de MARTIGNONI, 1991)

Com base nas dimensões da Figura 2, pela Equação 7 a seção da janela possui uma área

$$A_j = 0,75a^2, \quad (7)$$

e para uma largura do tronco central (a) de 32 mm tem-se que a seção da janela é 768 mm^2 .

Agora, determina-se a seção do cobre, que é a área ocupada pelos fios quando eles são enrolados no núcleo. Para um transformador com um circuito primário e um secundário a seção do cobre é dada pela Equação 8:

$$A_c = A_1 N_1 + A_2 N_2. \quad (8)$$

Para as seções dos fios e quantidades de espiras previamente determinadas obtém-se uma seção do cobre igual a $230,36 \text{ mm}^2$. E de volta à Equação 6, tem-se que $A_f / A_c = 3,33 > 3$. Satisfeita esta condição, fica comprovado que a execução do projeto é possível.

Por fim, determina-se a quantidade de fio necessária para executar o projeto. Isso é feito calculando primeiro o comprimento da espira média, que é o comprimento médio das espiras ao serem enroladas no núcleo. É dado pela Equação 9:

$$l_m = 2a + 2b + 0,5a\pi. \quad (9)$$

A variável b na Equação 9 é a espessura do núcleo do transformador, que no caso deste projeto é 4 cm. Dessa forma, obtém-se um comprimento da espira média igual a 19,43 cm. Calcula-se então o peso do cobre pela Equação 10:

$$P_c = \frac{A_c}{100} \cdot l_m \cdot 8,9. \quad (10)$$

O termo A_c é dividido por 100, pois necessita-se que o valor da seção do cobre esteja em centímetro quadrado (cm^2). Já o termo 8,9 representa o peso específico do cobre em grama por centímetro cúbico (g / cm^3). Assim, o peso do cobre é de aproximadamente 400 g. Conclui-se que a aquisição de 300 g de cada um dos fios é mais que suficiente para a execução do projeto.

Outras informações que são necessárias para o projeto de um transformador são a espessura das chapas, assim como a sua quantidade, e também o peso do núcleo ferromagnético. Essas informações dispensaram dimensionamento neste projeto pois o núcleo do transformador não tinha tais requisitos. Entretanto, para fins de informação, o núcleo é composto por 80 chapas com 0,5 mm de espessura, e pesa cerca de 1,72 kg. Na Tabela 2 estão compiladas as principais informações referentes ao transformador.

Tabela 2. Principais parâmetros do transformador. (Autoria própria)

Parâmetro	Valor
V_1	220 V
V_2	110 V
f	60 Hz
A_g	$12,8 \text{ cm}^2$
a	3,2 cm
S	150 VA
I_1	0,68 A
I_2	1,36 A
A_1	$0,26 \text{ mm}^2$ (Fio nº 23)
A_2	$0,52 \text{ mm}^2$ (Fio nº 20)
N_1	422 espiras
N_2	232 espiras
P_c	400 g
Quantidade de chapas	80
Espessura das chapas	0,5 mm
Peso do núcleo	1,72 kg

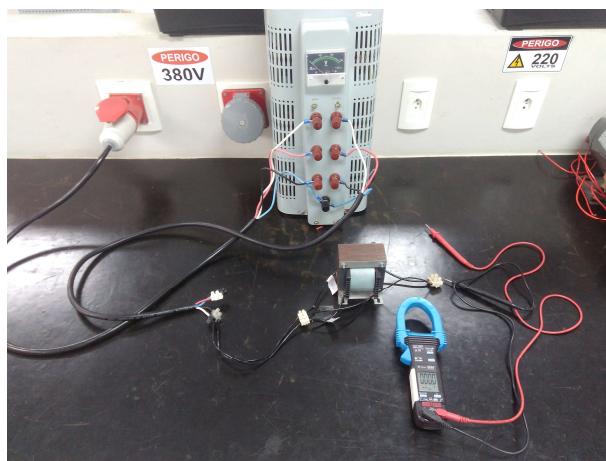
3. RESULTADOS DE OPERAÇÃO

Concluído o projeto do transformador, foi efetuado o enrolamento dos fios e a devida montagem do dispositivo, o resultado está ilustrado na Figura 3.



Figura 3. Transformador montado. (Autoria própria)

Para efetuar todas as medições apresentadas nesse artigo o transformador estava sendo alimentado por um variador de tensão e foi utilizado um alicate wattímetro digital da Minipa modelo ET-4090. A Figura 4 mostra a bancada de testes e o equipamento de medição.



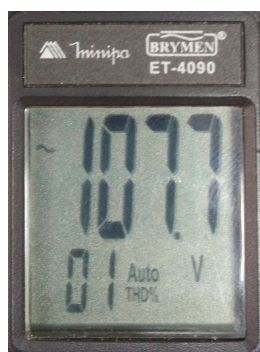
a)



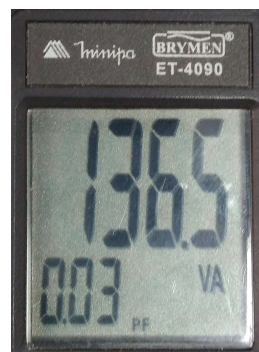
b)

Figura 4. a) Bancada de testes. b) Equipamento de medição. (Autoria própria)

A Figura 5 mostra os valores medidos com o transformador à vazio para uma tensão de entrada de 219,8 V. Em a) obteve-se uma tensão de saída de 107,7 V, e em b) mediu-se uma da potência aparente igual a 136,5 VA, ambos os resultados obtidos estão dentro de um intervalo de erro de 5%.



a)



b)

Figura 5. a) Tensão de saída. b) Potência aparente. (Autoria própria)

3.1. Ensaaios

Os ensaios realizados em um transformador são procedimentos experimentais que têm como objetivo determinar alguns de seus parâmetros, na finalidade de obter informações de operação e possibilitar a montagem do circuito magnético equivalente do transformador [2]. Os ensaios empregados para este objetivo são os de

circuito aberto (ou à vazio) e o de curto-circuito. O ensaio de circuito aberto tem como objetivo determinar os componentes relacionados às perdas no núcleo, enquanto o ensaio de curto-circuito é utilizado para determinar os componentes relacionados às perdas ôhmicas e perdas por dispersão nos enrolamentos [5].

3.1.1. Ensaio de circuito aberto

Esse ensaio é feito alimentando um dos lados do transformador na sua tensão nominal, enquanto o outro lado é mantido sem carga (em aberto) [2]. Vale salientar que o ensaio pode ser realizado em qualquer um dos lados do transformador, no caso deste artigo o ensaio foi realizado no lado primário. Na Figura 6 são mostradas as ligações realizadas para a execução do ensaio.

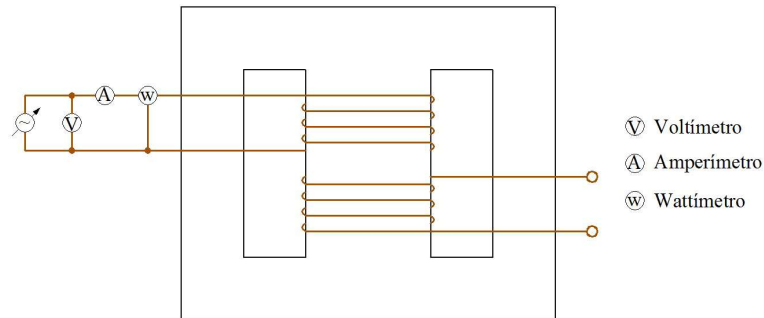


Figura 6. Ensaio de circuito aberto. (Autoria própria)

Aqui, os parâmetros a serem medidos são a potência ativa consumida pelo transformador (P_{ca}), que são as perdas no núcleo, a tensão nominal aplicada no enrolamento (V_{ca}) e a corrente que percorre esse mesmo enrolamento (I_{ca}) [5]. A obtenção desses valores permite determinar a resistência de magnetização (R_m) e a reatância de magnetização (X_m), que são os parâmetros associados às perdas no núcleo do transformador. Para os valores de $P_{ca} = 5,1 \text{ W}$, $V_{ca} = 219,8 \text{ V}$ e $I_{ca} = 0,62 \text{ A}$ obtidos nas medições, calcula-se primeiro o ângulo do fator de potência (θ_{FP}) através da Equação 11 [5]:

$$\theta_{FP} = \arccos\left(\frac{P_{ca}}{V_{ca} \cdot I_{ca}}\right). \quad (11)$$

E pelas Equações 12 e 13 [5]:

$$R_m = \frac{V_{ca}}{I_{ca} \cos \theta_{FP}} \quad (12)$$

$$X_m = \frac{V_{ca}}{I_{ca} \sin \theta_{FP}}, \quad (13)$$

determinam-se a resistência e a reatância de magnetização. Os valores medidos permitem também determinar a impedância do núcleo do transformador (Z_n) pela Equação 14 [5]:

$$Z_n = \frac{V_{ca}}{I_{ca}}. \quad (14)$$

Na Tabela 3 estão compilados os dados obtidos através desse ensaio.

Tabela 3. Dados do ensaio de circuito aberto. (Autoria própria).

Parâmetro	Valor
P_{ca}^*	5,1 W
V_{ca}^*	219,8 V
I_{ca}^*	0,62 A
θ_{FP}	87,8553
R_m	9474, 14 Ω
X_m	354, 74 Ω
Z_n	354,52 Ω

Nota: * indica os valores medidos.

3.1.2 Ensaio de curto-circuito

Esse ensaio é feito alimentando um dos lados do transformador, enquanto o outro lado é mantido em curto. O objetivo é fazer com que no enrolamento com curto-circuito percorra a sua corrente nominal [2], isso é feito aumentando cuidadosamente a tensão fornecida pelo variador de tensão. Esse ensaio também foi realizado no lado primário. Na Figura 7 são mostradas as ligações realizadas para a execução do ensaio.

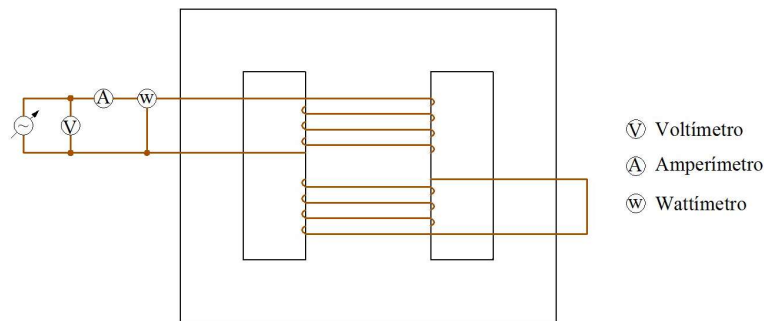


Figura 7. Ensaio de curto circuito. (Autoria própria)

Dessa vez, os parâmetros a serem medidos são a potência ativa consumida pelo transformador (P_{cc}), que nesse caso são as perdas nos enrolamentos, a corrente de curto-circuito do primário (I_{1cc}) e a tensão de curto-circuito (V_{cc}) [5]. A obtenção desses valores permite determinar a resistência do cobre (R_c) e a reatância do cobre (X_c), que são parâmetros relacionados às perdas nos enrolamentos do transformador. Para os valores de $P_{cc} = 5,3 \text{ W}$, $I_{1cc} = 0,72 \text{ A}$ e $V_{cc} = 7,4 \text{ V}$ medidos, calcula-se primeiro a impedância de curto-circuito (Z_{cc}) pela Equação 15 [5]:

$$Z_{cc} = \frac{V_{cc}}{I_{1cc}} \quad (15)$$

E através das Equações 16 e 17 [4]:

$$R_c = \frac{P_{cc}}{I_{1cc}^2} \quad (16)$$

$$X_c = \sqrt{Z_{cc}^2 - R_c^2} \quad (17)$$

determinam-se a resistência e a reatância do cobre. Na Tabela 4 estão compilados os dados obtidos no ensaio.

Tabela 4. Dados do ensaio de curto-circuito. (Autoria própria)

Parâmetro	Valor
P_{cc}^*	5,3 W
I_{1cc}^*	0,72 A
V_{cc}^*	7,4 V
Z_{cc}	10,28 Ω
R_c	10,22 Ω
X_c	1,01 Ω

Nota: * indica os valores medidos.

Obtidos os valores das resistências e reatâncias do transformador, o circuito magnético equivalente é mostrado na Figura 8. A obtenção desse circuito permite tratar o transformador de forma analítica, pois descreve com grande aproximação os seus parâmetros operacionais [1].

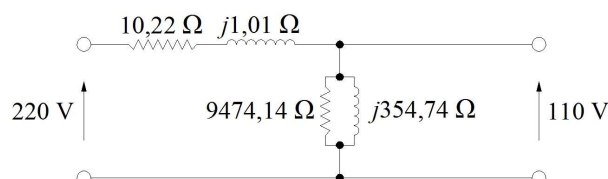


Figura 8. Circuito equivalente do transformador referido ao primário. (Autoria própria)

Com os ensaios, tem-se também as perdas totais do transformador (P_t), que é a soma das perdas no núcleo com as perdas nos enrolamentos, resultando em uma perda total de 10,4 W. A obtenção dessas perdas permite determinar o rendimento do transformador [6]. Considerando o transformador operando em sua carga nominal, totalmente resistiva, ou seja, com fator de potência unitário $FP = 1$ o rendimento é determinado pela Equação 18 [6]:

$$\eta = \frac{S}{S + P_t} \times 100\%, \quad (18)$$

apresentando um rendimento de 93,52%.

4. LIGAÇÃO COMO AUTOTRANSFORMADOR

Da maneira que foi projetado e montado, o transformador possui enrolamentos que estão eletricamente isolados, onde a conexão entre eles ocorre através do fluxo magnético que concatena com cada um dos enrolamentos. Na Figura 9, em a) é representada a forma que os enrolamentos estão dispostos no transformador, enquanto em b) é mostrado o circuito ideal equivalente dessa configuração, com os valores nominais à carga nominal.

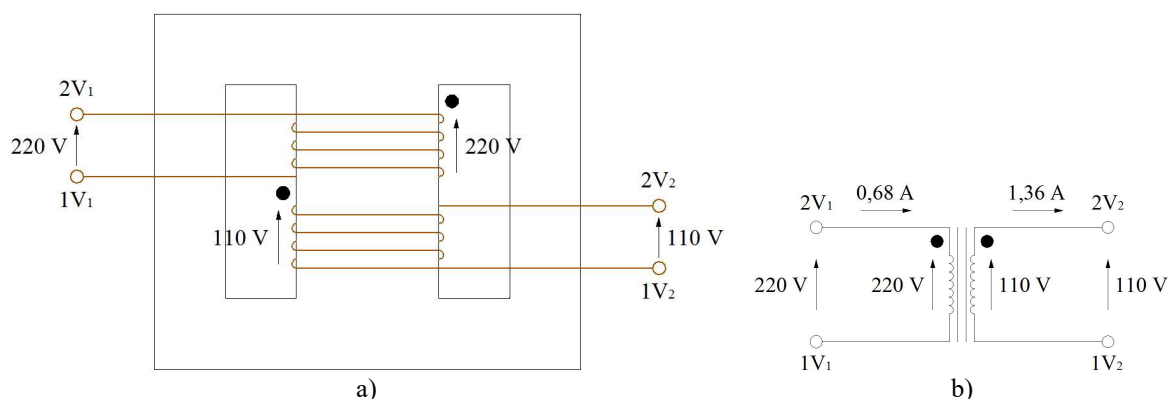


Figura 9. a) Configuração dos enrolamentos. b) Circuito ideal equivalente. (Autoria própria)

Ao conectar os dois enrolamentos em série, é realizada a ligação como autotransformador. Nessa configuração, não havendo mais a isolamento elétrica entre os enrolamentos, a energia elétrica também é transmitida através do contato do lado primário com o secundário [7]. Ainda na Figura 9, a ligação em série é feita conectando os terminais 2V₁ e 1V₂ de forma a somar as tensões induzidas nos enrolamentos. O resultado dessa ligação e o circuito ideal equivalente com valores nominais à carga nominal são ilustrados na Figura 10.

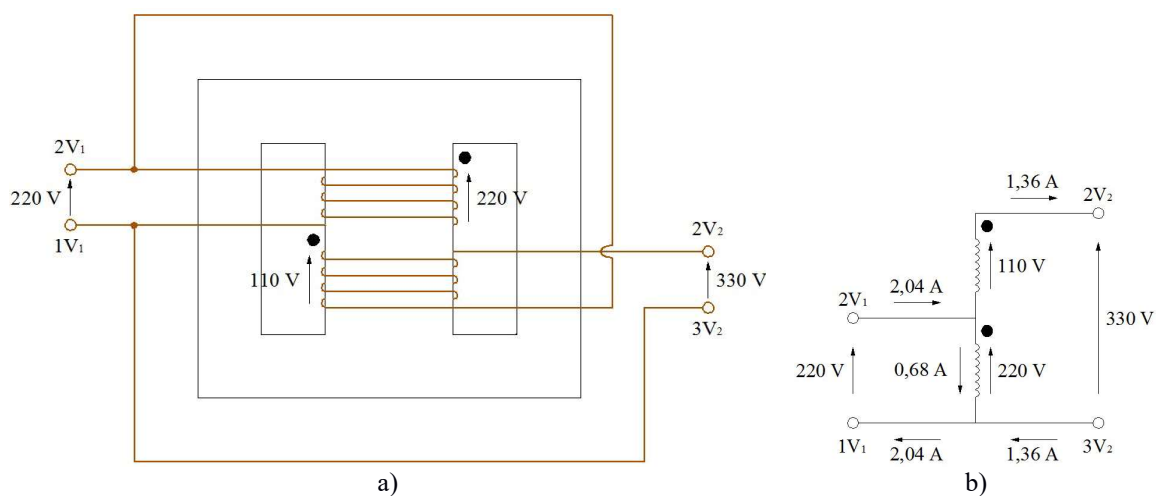


Figura 10. a) Ligação como autotransformador. b) Circuito ideal equivalente. (Autoria própria)

Além da ligação em série, um outro terminal denominado 3V₂ é conectado ao terminal 1V₁. Efetuadas todas as conexões, fica configurado que os terminais 1V₁ e 2V₁ vão receber a tensão de entrada enquanto os terminais 3V₂ e 2V₂ serão encarregados da tensão de saída. Nesse caso, a ligação dos enrolamentos foi feita de forma que

as tensões induzidas em cada um dos enrolamentos se somassem, resultando em uma tensão de saída de 330 V.

Para o autotransformador à vazio com uma tensão de entrada de 219,6 V verificou-se uma tensão de saída igual a 327,8 V, o resultado obtido está dentro de um intervalo de erro de 5%. Na Figura 11 é mostrado o resultado obtido dessa medição.



Figura 11. Medição de tensão realizada para 220/330 V. (Autoria própria)

A ligação como autotransformador apresenta uma característica de grande destaque, que é um ganho na potência de saída. Esse fenômeno acontece em razão da ausência de isolamento entre os enrolamentos do autotransformador [7].

Como mencionado anteriormente, os enrolamentos isolados de um transformador convencional interagem através do fluxo magnético concatenado com cada um deles, dessa forma, toda energia elétrica é transmitida do lado primário para o secundário apenas pela ação desse fluxo magnético, também chamada de ação transformadora. Em um autotransformador, a conexão física entre os enrolamentos permite que parte da energia seja transmitida pela ação transformadora, e outra parte seja transmitida por condução [7]. Essa diferença entre os dois dispositivos é responsável pela elevada potência de saída de um autotransformador.

A relação da potência de saída de um autotransformador com a potência de saída de um transformador convencional é dada pela Equação 19 [1]:

$$S_{auto} = S \frac{N_1 + N_2}{N_2} . \quad (19)$$

Para o transformador deste projeto, após a ligação como autotransformador é prevista uma potência de saída igual a 422,84 VA . Analisando a Figura 9 b), é possível observar que os enrolamentos de autotransformador continuam funcionando na potência do transformador convencional, visto que a corrente que os percorre é a sua própria corrente nominal. Dos 422,84 VA de potência de saída previstos para o autotransformador, 150 VA continuariam sendo transmitidos pela ação transformadora e 272,84 VA seriam transmitidos condutivamente. Isso mostra o que foi afirmado anteriormente, que no autotransformador a energia é transferida tanto pela ação transformadora quanto através de condução. É notório que uma parte significativamente maior da energia transferida no autotransformador ocorre através da condução, isso claramente explica o motivo do ganho de potência observado nesse equipamento [7].

5. CONCLUSÕES

O fato das medições realizadas estarem dentro de um pequeno intervalo de erro, coerente com os valores previstos, comprova que a execução do projeto foi um sucesso. Comprova também que foi adequada a escolha de uma indução no ferro de 1,7 T, visto que esse valor influencia diretamente na quantidade de espiras, e consequentemente na tensão induzida em cada um dos enrolamentos. Os bons resultados nas medições asseguram credibilidade às informações acerca do transformador obtidas nos ensaios, garantindo um bom controle dos parâmetros de operação.

No que diz respeito à ligação como autotransformador, a princípio esse equipamento possui uma grande vantagem sobre o transformador convencional. De fato, o uso de um autotransformador permite que em determinadas situações um dispositivo menor seja utilizado, visto que a sua potência de saída sempre será maior que a de um transformador convencional de mesmo porte na maioria das aplicações que não necessitam de isolamento entre as diferentes tensões do circuito. Uma determinada potência de saída pode ser facilmente obtida utilizando um núcleo de tamanho reduzido, porém com os enrolamentos ligados como autotransformador, resultando em uma redução de custos relacionados as placas de aço-silício, cobre, e a outros materiais utilizados na montagem do equipamento.

Apesar de todos esses benefícios que impactam diretamente no custeio do projeto, o autotransformador perde

uma característica que muitas vezes é indispensável em determinadas aplicações, a isolamento elétrica. Muitas vezes deseja-se utilizar das possíveis aplicações da isolamento elétrica, e isso é impossível utilizando um autotransformador. Isolar circuitos, filtrar corrente contínua e proporcionar segurança em sistemas elétricos são aplicações possíveis apenas para transformadores convencionais.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CHAPMAN, Stephen J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5.ed. Porto Alegre: AMGH, 2013. 684p.
- [2] BIM, Edson. Máquinas elétricas e acionamento. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012. 547p.
- [3] MARTIGNONI, A. Transformadores. 8.ed. São Paulo: Globo, 1991. 307p
- [4] APERAM SOUTH AMERICA. Aços elétricos de grão orientado e grão não-orientado. Disponível em: <brasil.aperam.com/wp-content/uploads/2015/08/Aços-Elétricos-GO-e-GNO.pdf>. Acesso em: 19 setembro 2018.
- [5] CARVALHO, Geraldo. Máquinas elétricas: teoria e ensaios. 2. ed. São Paulo: Érica, 2008. 264p.
- [6] UMANS, Stephen D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7.ed. Porto Alegre: AMGH, 2014. 708p.
- [7] KOSOW, Irving L. Máquinas elétricas e transformadores. 15.ed. São Paulo: Globo, 2005. 667p.