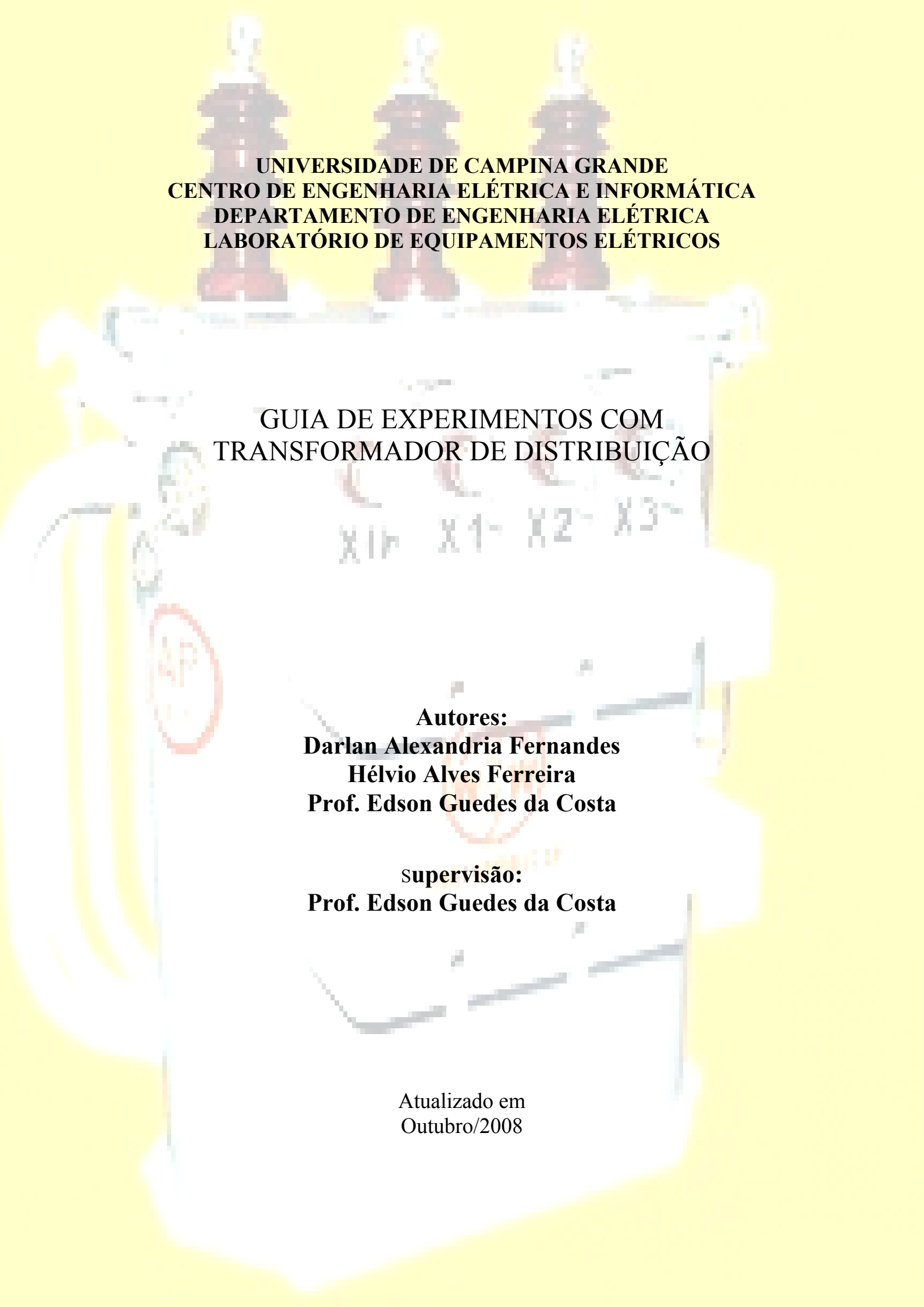




**UNIVERSIDADE DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
LABORATÓRIO DE EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS**

**GUIA DE EXPERIMENTOS COM
TRANSFORMADOR DE DISTRIBUIÇÃO**

Autores:

**Darlan Alexandria Fernandes
Hélvio Alves Ferreira
Prof. Edson Guedes da Costa**

supervisão:

Prof. Edson Guedes da Costa

Atualizado em
Outubro/2008

Índice

1. Introdução.....	3
2. Curva $\lambda_{\max}$ versus $I_{\max}$ do Núcleo do Transformador.....	5
3. Detecção de Polaridade.....	5
3.1. Polaridade Subtrativa.....	6
3.2. Polaridade Aditiva.....	6
3.3. Método da Corrente Alternada.....	7
4. Operação a Vazio.....	9
4.1. Perdas em Transformadores.....	9
4.2. Corrente a Vazio.....	10
4.3. Relação de Transformação.....	12
5. Operação em Curto-Circuito.....	14
5.1. Perdas no Cobre.....	14
5.2. Determinação de Valores de Resistência, Impedância e Reatância.....	15
6. Verificação do Isolamento.....	16
6.1. Solicitações de Isolamento.....	16
6.2. Resistência de Isolamento.....	17
7. Experimentos.....	20
TAREFA 01 – Inspeção em um Transformador de Distribuição.....	20
TAREFA 02 – Polaridades do Transformador.....	23
TAREFA 03 – Determinação da Curva $\lambda_{\max}$ – $I_{\max}$ do transformador	26
TAREFA 04 – Corrente a Vazio e Medição de Perdas.....	31
TAREFA 05 – Relação de Transformação.....	33
TAREFA 06 – Operação em Curto-Circuito.....	36
TAREFA 07 – Medição da Resistência de Isolamento.....	38
Referências Bibliográficas.....	39

Transformadores - Uma Breve Revisão

1. Introdução

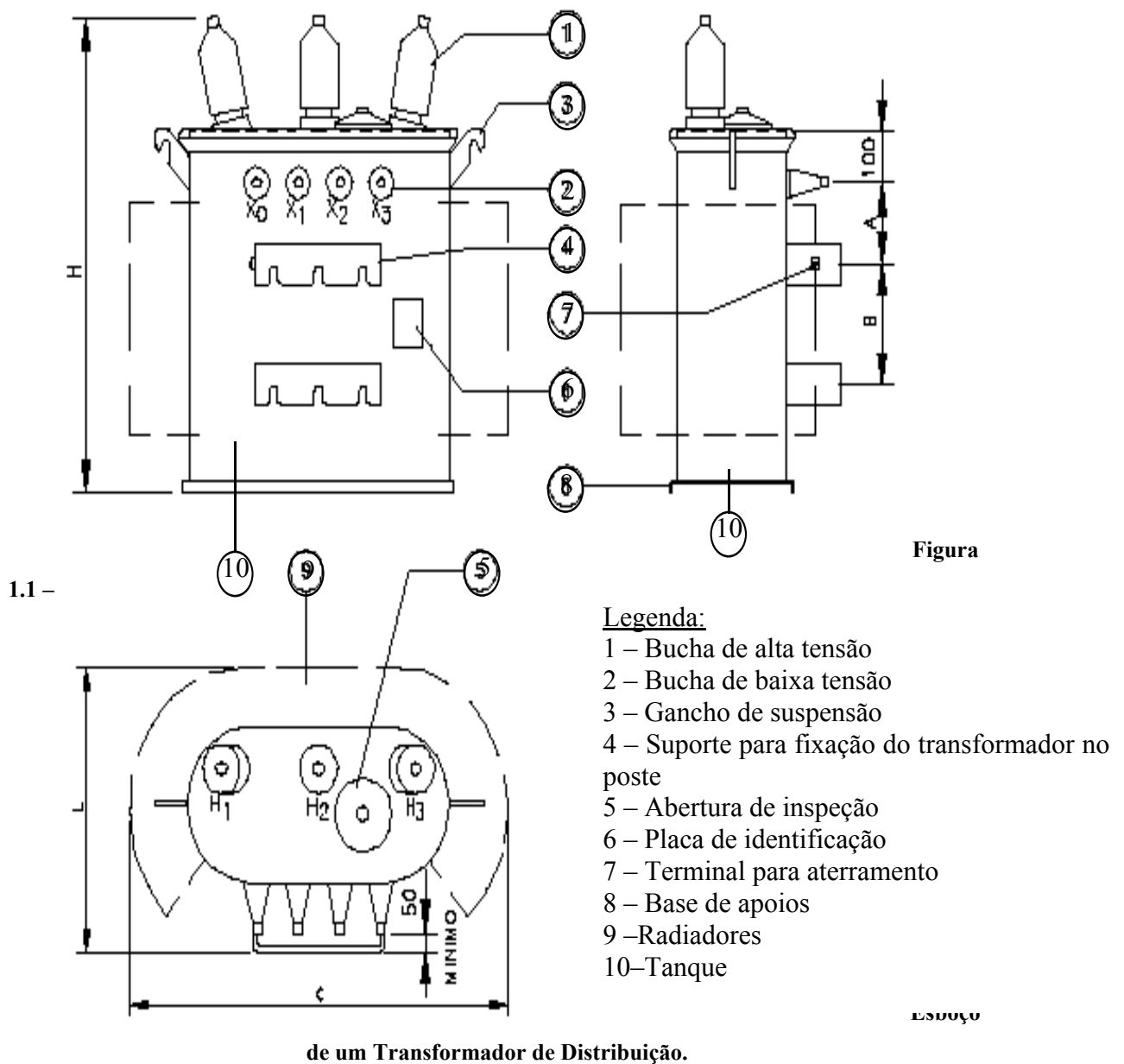
Os transformadores têm sido partes dos sistemas de energia elétrica desde o seu início. Por razões técnicas e econômicas, não é adequado gerar, transmitir e distribuir energia elétrica em grandes quantidades e ao longo de grandes distâncias em apenas um nível de tensão. Portanto, os transformadores transformam uma tensão e uma corrente alternada em uma outra tensão e outra corrente alternada (de mesma frequência), de valores melhores adaptados a transmissão ou a distribuição de energia.

Eles são constituídos essencialmente de duas bobinas em fio de cobre (ou de alumínio), um dito primário, outro dito secundário, bobinados sobre um núcleo de carcaça ferromagnética constituído de uma pilha de núcleo em aço. Um transformador pode ser utilizado indiferentemente dos dois lados. Se a fonte é conectada do lado de baixa tensão e a carga do lado de alta tensão, o transformador é dito elevador de tensão. No caso contrário, ele é dito abaixador de tensão.

Estes equipamentos são classificados de acordo com os níveis de tensão, potência e número de fases que operam. Atualmente os sistemas trifásicos são os mais utilizados. Para transformar correntes trifásicas podem-se utilizar três transformadores monofásicos. Porém, é comum os três transformadores trabalharem juntos como um só aparelho. A idéia é reunir três transformadores monofásicos para formar um único transformador trifásico e obter assim uma economia de material. O objeto de estudo em laboratório é o Transformador de Distribuição, que é um transformador de potência trifásico utilizado para suprir potência a um sistema de distribuição. Normalmente operam com potências entre 3 e 500 kVA. Na Figura 1.1 é mostrado um esboço de transformador de distribuição típico com suas partes principais.

A ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) define através da norma NBR 5380 (maio de 1993) quais são os métodos de ensaio a serem realizados com o objetivo de avaliar a funcionalidade de um transformador de potência. Os ensaios são classificados de duas formas: ensaios de tipo e ensaios de rotina. Os ensaios de rotina se destinam a verificar a qualidade e uniformidade da mão-de-obra e dos materiais

empregados na fabricação do transformador.



Os ensaios de tipo são realizados para comprovar se um determinado modelo ou tipo de transformador é capaz de funcionar satisfatoriamente em condições específicas. Os ensaios de tipo geralmente envolvem os ensaios de rotina, além de outros ensaios mais criteriosos. São considerados ensaios de rotina:

1. Resistência dos Enrolamentos;
2. Relação de Tensões;
3. Verificação da Resistência de Isolamento;

4. Polaridade;
5. Deslocamento Angular;
6. Seqüência de Fases;
7. Perdas em Vazio e Corrente de Excitação;
8. Perdas em Carga e Corrente de Curto-Circuito.

São considerados ensaios de tipo:

1. Tensão Suportável à Frequência Industrial (Tensão Aplicada);
2. Tensão Induzida;
3. Descargas Parciais;
4. Tensão Nominal Suportável de Impulso Atmosférico;
5. Impulso de Manobra;
6. Estanqueidade e Resistência à Pressão Interna e Estanqueidade a Quente;
7. Elevação de Temperatura.

Existem ainda os ensaios especiais como os de radiointerferência. No guia de laboratório de transformador de distribuição, são propostos os ensaios de rotina 2,3,4,7 e 8 citados acima, organizados em seis tarefas. Primeiramente são apresentados os aspectos teóricos dos ensaios divididos em cinco partes: Curva λ -i, Detecção de Polaridade, Operação a Vazio, Operação em Curto-Circuito e Verificação do Isolamento e na seqüência são dados os procedimentos experimentais.

2. Curva $\lambda_{\max}$ versus $I_{\max}$ do Núcleo do Transformador

As curvas de magnetização típicas de materiais ferromagnéticos mostram que o fluxo cresce rapidamente com o aumento da intensidade do campo magnético. Isto indica que a aplicação de um pequeno campo é suficiente para causar crescimento nos domínios magnéticos e seu consequente alinhamento. No entanto, a medida que o campo aplicado cresce, a inclinação da curva de magnetização se reduz, indicando que as paredes dos domínios estão se movendo mais lentamente. O efeito de redução na inclinação da curva tendendo para um valor constante é denominado de saturação. A completa saturação ocorrerá se todos os domínios atômicos estiverem em completo alinhamento com a direção do campo aplicado.

3. Detecção de Polaridade

Enrolamentos em transformadores ou em outras máquinas elétricas são marcados para indicar sua polaridade. Se esses dois enrolamentos são ligados de maneira que o fluxo que enlace estas duas bobinas tenham o mesmo sentido, tensões serão induzidas nesses enrolamentos, e elas estarão em fase. Elas indicam como os enrolamentos estão enrolados no núcleo.

A não observância pode provocar indicações e operações incorretas, e até mesmo a destruição dos transformadores ou equipamentos a ele ligados. Esse sentido instantâneo da corrente define dois diferentes tipos de polaridade nos transformadores: Subtrativa e Aditiva.

3.1. Polaridade Subtrativa

Deve-se fixar um ponto qualquer, por exemplo nos terminais H_1 - H_2 como positivo ou negativo. Se fosse medida no mesmo instante as correntes nos bornes H_1 (do primário I_1) e X_1 (do secundário I_2), utilizando um amperímetro que tivesse o valor de zero no centro da escala em uma frequência baixa, seria notado que I_1 , está “entrando”, enquanto I_2 está “saindo”. Isto considerando que os bornes H_1 e X_1 , tem seus dois enrolamentos enrolados em um mesmo sentido.

Portanto, define-se como transformador de polaridade subtrativa aquele cujos enrolamentos são feitos no mesmo sentido e que apresenta correntes instantâneas, entre primário e secundário, sem sentido inverso (entra/sai), devido as propriedades da indução.

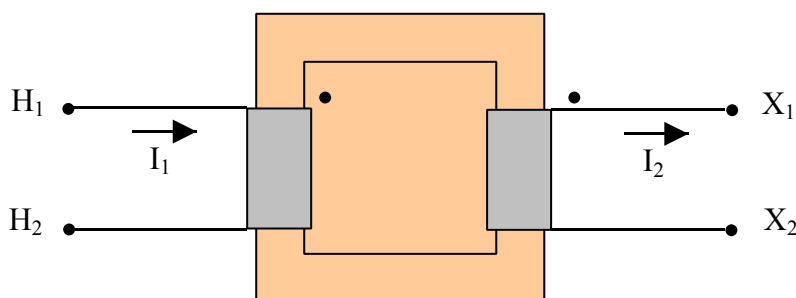


Figura 3.1 Polaridade Subtrativa

3.2. Polaridade Aditiva

Deve-se fixar um ponto qualquer, por exemplo, nos terminais H_1 - H_2 como positivo ou negativo. Se fosse medida no mesmo instante as correntes nos bornes H_1 (do primário I_1) e X_1 (do secundário I_2), utilizando um amperímetro que tivesse o valor de zero no centro da escala em uma frequência baixa, seria notado que I_1 , está “saindo”, enquanto I_2 está “entrando”. Isto considerando que os bornes H_1 e X_1 , tem seus dois enrolamentos enrolados em sentidos opostos.

O transformador de polaridade aditiva com enrolamentos feitos em sentidos inversos, dando como resultados correntes instantâneas, entre primário e secundário, no mesmo sentido (entra/entra).

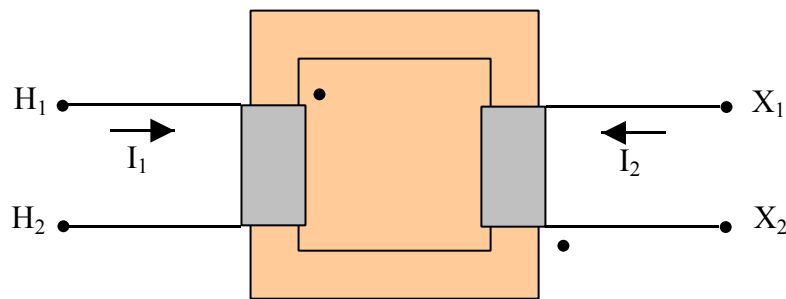


Figura 3.2 Polaridade Aditiva

3.3. Método da Corrente Alternada

A polaridade instantânea relativa é determinada através do método mostrado na Fig. 3.3, usando-se um voltímetro e uma fonte c.a. adequados (quer da tensão nominal, quer de uma tensão menor). Considera-se qualquer um dos circuitos abaixo como uma malha fechada com três fontes de tensão (voltímetros). A soma das quedas de tensão nesta malha é zero (lei de Kirchhoff). Para isto, fixa-se um ponto em um dos terminais e o referencia como positivo ou negativo e a partir daí com as leituras dos voltímetros, determina-se a polaridade do transformador.

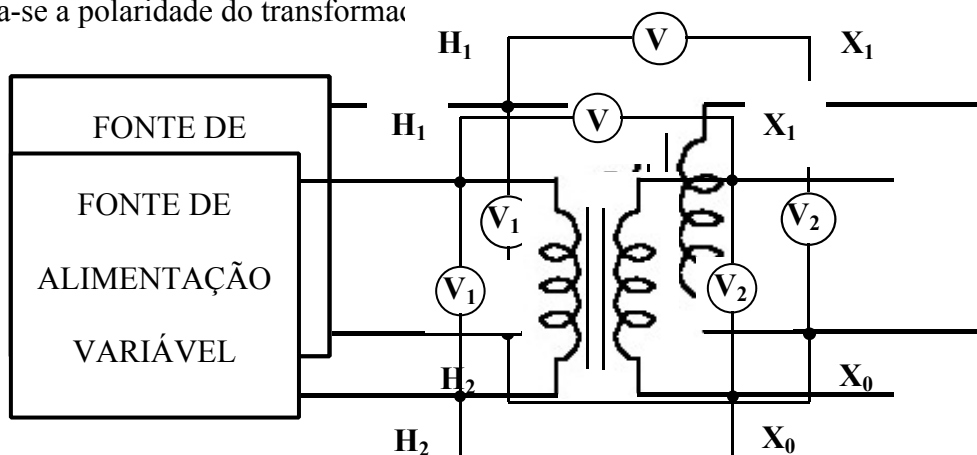


Figura 3.3 - Teste de polaridade.

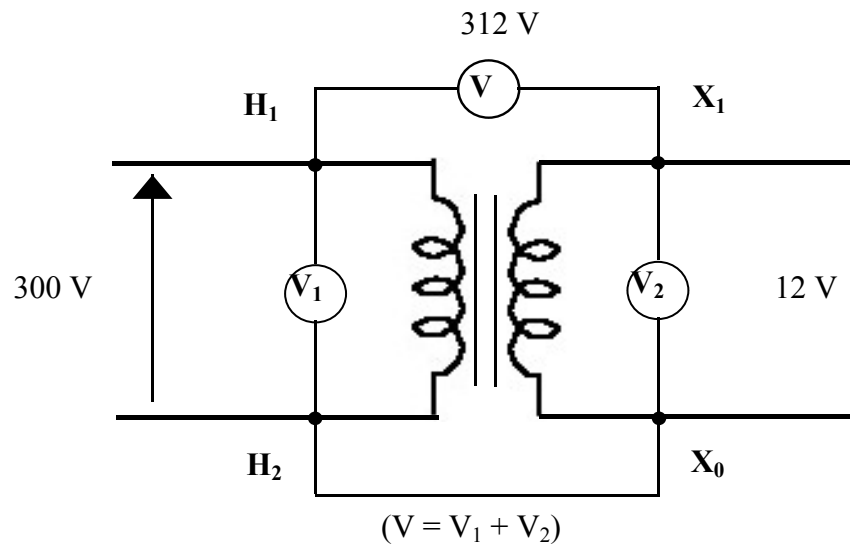


Figura 3.4 - Polaridade Aditiva.

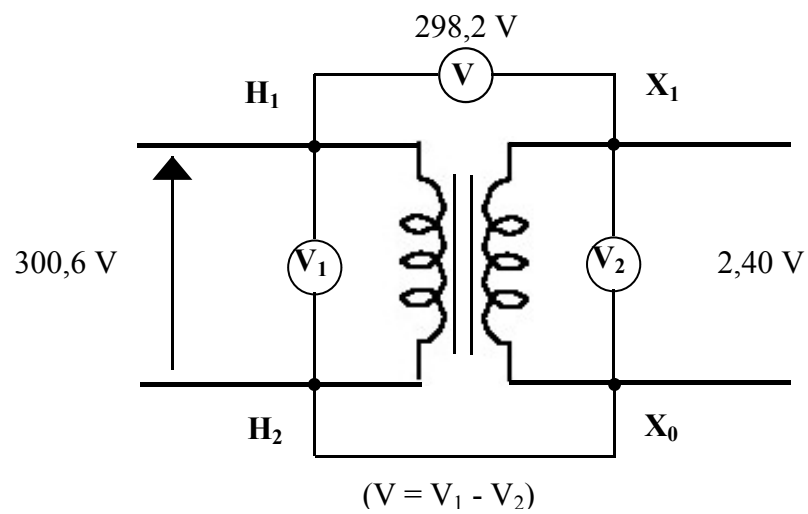
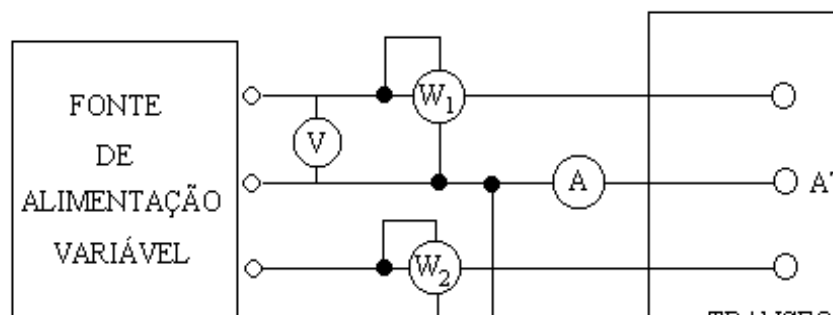


Figura 3.5 -



4. Operação a Vazio

Os objetivos dos ensaios a vazio em transformadores são a determinação de:

- Perdas no núcleo ou perdas por Histerese e Foucault (P_o);
- Corrente a Vazio (I_o);
- Relação de Transformação (KT).

4.1. Perdas em Transformadores

As perdas em transformadores devem-se:

1. Às correntes que se estabelecem pelos enrolamentos primário e secundário de um transformador sob carga, que dissipam em suas correspondentes resistências uma certa potência devido ao efeito Joule;
2. Ao fluxo principal estabelecido no circuito magnético que é acompanhado dos efeitos conhecidos por histerese e correntes parasitas de Foucault. Como os fluxos magnéticos na condição de carga ou a vazio são praticamente iguais, pode-se através do ensaio a vazio, determinar as perdas por histerese (P_H) e por correntes parasitas (P_F).

Em termos práticos, a determinação de P_H é feita a partir de:

$$P_H = K_S B^{1,6} f, \quad (4.1)$$

onde, P_H são as perdas pelo efeito de histerese, em watts por quilograma de núcleo; K_S é o coeficiente de Steimmetz (que depende do tipo de material usado no núcleo); B é o valor máximo de indução no núcleo e f é a frequência em Hz.

Na tabela abaixo são dados valores de K_S para diversos materiais:

Tabela 4.1 – Valores de K_S para diversos materiais

MATERIAL	K_S
Ferro doce	2,50
Aço doce	2,70
Aço doce para máquinas	10,00
Aço fundido	15,00
Fundição	17,00
Aço doce 2% de silício	1,50
Aço doce 3% de silício	1,25
Aço doce 4% de silício	1,00
Laminação doce	3,10
Laminação delgada	3,80

Laminação ordinária	4,20
---------------------	------

Logo, percebe-se a influência da escolha do material nas perdas por histerese. O surgimento das correntes de Foucault é explicado pela Lei de Faraday, de onde se conclui que estando o núcleo sujeito a um fluxo alternado, nele serão induzidas forças eletromotrizes, provocando o surgimento de correntes parasitas. As perdas devido ao efeito das correntes parasitas podem ser calculadas pela expressão:

$$P_F = 2,2 f^2 B^2 d^2 10^{-3}, \quad (4.2)$$

onde: P_F são as perdas por correntes parasitas, em watts por quilograma de núcleo; f é a frequência em Hz; B é o valor máximo de indução no núcleo e d é a espessura da chapa em milímetros. Da expressão (4.2), pode-se observar que a frequência e a indução influem nas perdas P_F ; sendo, pois, recomendável o trabalho com valores reduzidos dessas grandezas. Observa-se, ainda, que as perdas estão relacionadas com o quadrado da espessura do núcleo, surgindo daí, como forma de atenuar a perda, a substituição de um núcleo maciço por lâminas eletricamente isoladas entre si.

Somando as perdas citadas, têm-se as perdas totais no núcleo de um transformador:

$$P_o = P_F + P_H \quad (4.3)$$

Na prática, devido ao número de variáveis envolvidas, o uso analítico da fórmula torna-se um tanto complexo para determinação das perdas em vazio. Em geral, as perdas são medidas diretamente com o auxílio de wattímetros ou podem ser fornecidas por gráficos ($P_o \times B$). Tais gráficos apresentam as perdas P_o (W/kg) em função da indução magnética B (T), mantendo-se constantes a frequência e a espessura do material.

4.2. Corrente a Vazio

Para suprir as perdas e para produção de fluxo magnético, o primário absorve da rede de alimentação uma corrente denominada corrente a vazio (I_o), cuja magnitude pode ser da ordem de até 6% da corrente nominal (I_n) desse enrolamento. Considerando que a corrente a vazio tem por função o estabelecimento do fluxo magnético e o suprimento de perdas a vazio, é comum sua decomposição em: I_p , componente

ativa, responsável pelas perdas no núcleo; e I_q , componente reativa, responsável pela produção do fluxo magnético principal. Na figura abaixo, além da corrente I_o e de suas componentes, é também ilustrada a fase da tensão aplicada ao primário do transformador.

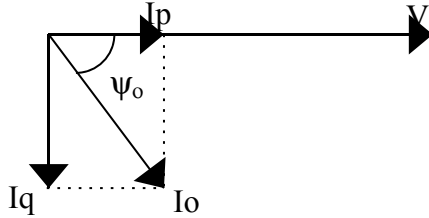


Figura 4.1 – Diagrama fasorial para o transformador a vazio

A determinação das componentes de I_o é feita em três etapas:

1. A equação da potência fornecida a um transformador a vazio é:

$$P_o = VI_o \cos \psi_o \quad (4.4)$$

onde: P_o é a potência ativa obtida por leitura de instrumentos durante o ensaio; V é a tensão aplicada, que deverá ser a nominal do enrolamento, de modo que os resultados encontrados no ensaio correspondam ao regime nominal de operação e do diagrama da Figura 2.1, tem-se:

$$I_o \cos \psi_o = I_p$$

Assim,

$$I_p = \frac{P_o}{V} \quad (4.5)$$

2. Segundo o diagrama fasorial da Figura 2.1, I_q é dada por $\sqrt{I_o^2 - I_p^2}$, sendo I_o medida durante o ensaio e I_p calculada pela Expressão 4.5.

3. Para se obter o fator de potência a vazio, utiliza-se a seguinte expressão:

$$\cos \psi_o = \frac{P_o}{VI_o} \quad (4.6)$$

Com o objetivo de se evitar ao máximo as perdas no núcleo, a corrente a vazio deve ser quase totalmente empregada para a magnetização do núcleo, acarretando, em consequência, $I_q \gg I_p$, portanto alto valor de ψ_0 .

4.3. Relação de Transformação

O ensaio a vazio visa também a determinação da relação de transformação, ou seja, a proporção que existe entre a tensão ou corrente do primário e a tensão ou corrente do secundário, respectivamente. Pode-se considerar a relação de transformação de duas formas: a relação teórica e a relação prática.

Para o transformador a vazio, tem-se o que se convencionou chamar de relação de transformação teórica:

$$K_T = \frac{E_1}{E_2} \quad (4.7)$$

Em que E_1 e E_2 são os valores eficazes das forças eletromotrizes induzidas nos enrolamentos primário e secundário, respectivamente. Veja a Figura 4.2a.

Nestas condições, a queda de tensão no enrolamento primário é desprezível e pode-se considerar: $V_1 = E_1$. Estando o transformador a vazio, com o secundário aberto, então V_2 é igual a E_2 . Logo, a relação de transformação teórica pode ser medida diretamente.

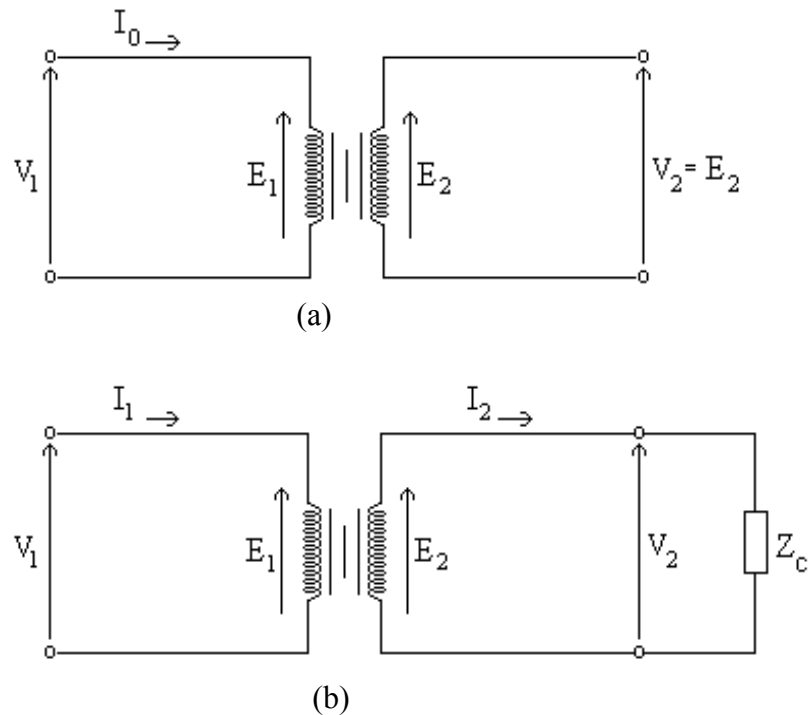


Figura 4.2 – (a) Transformador a vazio; (b) – transformador em carga.

Quando o transformador alimenta uma carga, será fornecida uma corrente I_2 , que fará com que a corrente primária seja alterada de I_0 para I_1 , sendo $I_1 \gg I_0$. Assim, a tensão V_1 já não mais seria igual a E_1 e V_2 , que era exatamente igual a E_2 , varia, pois, agora aparecem quedas de tensão devido às novas correntes. Desse modo, para o transformador em carga, define-se uma nova relação de transformação denominada relação de transformação prática, dada por:

$$K = \frac{V_1}{V_2} \quad (4.8)$$

Para a obtenção da relação de transformação, pode-se também utilizar um equipamento especial para este fim, o medidor de relação de transformação (Transformer Turns Ratio – TTR), que é basicamente um comparador de tensões.

5. Operação em Curto-Circuito

O ensaio de curto-circuito possibilita a determinação das perdas no cobre (P_J), de queda de tensão interna e dos valores de impedância, resistência e reatância.

5.1. Perdas no Cobre

As perdas no cobre são causadas pelo efeito Joule nos enrolamentos do transformador, quando circulam as correntes no primário e secundário. Portanto estas perdas dependem da carga alimentada pelo transformador. Em geral, o ensaio é feito considerando-se as correntes nominais do transformador. As correntes podem ser medidas, ou calculadas através dos dados de placa. Desta forma, as perdas no cobre correspondentes ao funcionamento nominal do transformador são:

$$P_J = r_1 I_1^2 + r_2 I_2^2, \quad (5.1)$$

onde: r_1 e r_2 são as resistências ôhmicas dos enrolamentos. Para o estabelecimento das correntes nominais do transformador, o lado de baixa tensão é curto-circuitado e o lado de alta tensão é alimentado com uma tensão reduzida de aproximadamente 10% do seu valor nominal. Como o secundário está curto-circuitado, o valor de tensão é suficiente para circulação das correntes nominais. Nesta situação, com a tensão dez vezes inferior a nominal, tem-se uma indução dez vezes menor no núcleo e conseqüentemente as perdas por histerese e corrente de Foucault são desprezíveis com relação as perdas no cobre. Observe que toda a potência fornecida ao transformador está sendo consumida internamente e dissipada nos enrolamentos por efeito Joule.

No ensaio de curto-circuito, verifica-se que existem outras perdas além das nos enrolamentos, a saber: nas ferragens, nas cabeças de bobinas e outras. Deste modo, ao se referir ao fato de que a leitura no wattímetro não corresponde precisamente à potência perdida nos enrolamentos, estar-se-iam considerando as outras perdas. Nessas circunstâncias, o valor da potência obtida pela leitura dos instrumentos será:

$$P_{cc} = P_A + P_J, \quad (5.2)$$

em que: P_{cc} é a potência lida no ensaio; P_A são as perdas adicionais e P_J são as perdas nos enrolamentos. Devido à natureza das perdas adicionais, uma expressão para seu cálculo é bastante difícil de obter, o que leva ao uso de dados empíricos. Para a obtenção de P_A é recomendado utilizar a seguinte relação:

$$P_A \cong 15\% \text{ a } 20\% P_{cc} \quad (5.3)$$

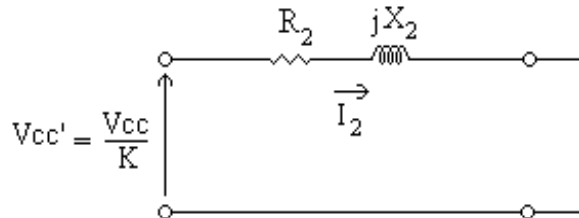
Caso não se queira utilizar a expressão acima, deve-se determinar P_J pela medição das resistências do primário e secundário com uma ponte de alta precisão como a ponte Thompson. O valor de P_J seria obtido pela Expressão 5.1.

5.2. Determinação de Valores de Resistência, Impedância e Reatância

Através do ensaio de curto-circuito, os instrumentos empregados permitem a obtenção de: P_{cc} , a potência fornecida ao transformador em curto; V_{cc} , a tensão de curto-circuito medida no enrolamento de alta tensão; I_{cc} , a corrente nos enrolamentos.

Para o ensaio de curto-circuito é válido o circuito equivalente da figura abaixo:

**Figura 5.1 -
para o
curto-circuito.**



**Circuito equivalente
transformador em**

Na Figura 5.1, R_2 e X_2 são os valores da resistência e reatância equivalentes vistas do primário (lado de alta tensão, onde estão os instrumentos). A partir dos valores medidos pode-se calcular diretamente:

- fator de potência

$$\cos \psi_o = \frac{P_J}{V_{cc} I_{cc}} ; \quad (5.4)$$

- resistência equivalente R_2

$$R_2 = \frac{P_J}{I_{cc}^2} ; \quad (5.5)$$

- reatância equivalente X_2

$$X_2 = \frac{V_{cc} \cdot \sin \psi_0}{I_{cc}} ; \quad (5.6)$$

onde P_J é dado por P_{cc} descontando-se as perdas adicionais.

6. Verificação do Isolamento

O transformador é um componente de um sistema elétrico e como tal está sujeito a sobretensões de diversas origens. Logo, é necessário conhecer ou prever seu desempenho quando sujeito a estas solicitações. Existem ensaios específicos para análise do isolamento do transformador, como os ensaios de tensão aplicada e tensão induzida. Em laboratório, a tarefa consiste no procedimento mais simples para determinação do estado do material isolante, que é a medição da resistência de isolamento.

6.1. Solicitações de Isolamento

Os transformadores trabalham segundo uma série de recomendações, observadas por motivo de segurança, melhor funcionamento, etc. Entre as especificações, cita-se o aterramento do tanque, do núcleo e de todas as partes metálicas inativas. Assim, em funcionamento, além da diferença de potencial entre as bobinas de alta e baixa tensão, têm-se também tensões dos enrolamentos para as partes metálicas, que estariam aterradas. Se o isolamento não for adequado para as tensões, aumentarão as correntes de fuga, que se estabelecem pelo isolante, que por sua vez ocasionarão maiores perdas de potência, aquecimento, microdescargas e progressiva deterioração do isolante. Além disso, nota-se que no enrolamento de alta tensão, a diferença de potencial entre uma espira e a seguinte é considerável, exigindo também um bom isolamento, caso contrário poderá surgir uma microdescarga entre espiras, danificando o enrolamento.

Em suma, pode-se dizer que no transformador existem partes, a potenciais diferentes, que ocasionarão o aparecimento de diversos gradientes de potenciais e

necessitam de isolamento adequado. No projeto de um transformador, tais gradientes são levados em consideração e o isolamento elétrico é dimensionado de forma a suportá-los.

Existe sempre a necessidade de se comprovar o estado de isolamento do transformador. Com o passar do tempo e de acordo com as condições de trabalho do transformador, poderá ocorrer que os isolantes usados não apresentam mais as características desejadas ou ainda uma solicitação mais forte enfraqueça o isolamento, portanto são importantes as verificações periódicas.

6.2. Resistência de Isolamento

O instrumento utilizado na verificação do isolamento entre enrolamentos e entre enrolamentos e massa (núcleo, carcaça e etc) é o megômetro. A resistência de isolamento determinada, embora sujeita a grandes variações devido a fatores como: temperatura, umidade e qualidade do óleo, é um valor que dá idéia do estado de isolamento antes de submeter o transformador aos ensaios de tensão aplicada, tensão induzida e impulso.

O megômetro nada mais é que uma fonte de tensão ligada em série com um amperímetro. Como o objetivo é a determinação do isolamento entre enrolamentos e entre enrolamentos e a massa, é conveniente uniformizar o potencial em toda a bobina. Para tanto são curto-circuitados os terminais de alta tensão (H_1 , H_2 , H_3) e os terminais de baixa tensão (X_1 , X_2 , X_3). São feitas as medições de isolamento entre os terminais de alta e baixa tensão e também entre estes terminais e a carcaça aterrada do transformador.

ABNT fixa, através da norma NBR 5380 de maio de 1993, que a tensão aplicada deverá ser de no mínimo 1000 V para transformadores de até 72,5 kV; e de 2000 V, no mínimo, para os transformadores maiores que 72,5 kV. Os valores observados para as resistências medidas deverão ser iguais ou maiores aos dados pelas expressões a seguir, para que os transformadores possam ser empregados.

a) Transformadores secos

$$R_{i75^{\circ}C} = \frac{V_i}{\frac{S_n}{100} + 100} ; \quad (6.1)$$

b) Transformadores imersos em óleo

$$R_{i75^{\circ}C} = \frac{2,65 V_i}{\sqrt{S_n / f}} , \quad (6.2)$$

em que: $R_{i75^{\circ}C}$ é a resistência mínima do isolamento a $75^{\circ}C$, para cada fase; V_i a classe de tensão de isolamento nominal do enrolamento considerado (em kV); S_n a potência nominal do enrolamento considerado em kVA. Se o transformador for trifásico, a potência de cada enrolamento será $\frac{1}{3}$ daquela dada na placa; e f , a frequência nominal em Hz.

Nota-se que os valores mínimos recomendados referem-se a uma temperatura de $75^{\circ}C$, que pode não corresponder a temperatura a qual está se medindo R_i com o megômetro. Normalmente, o valor encontrado refere-se à temperatura ambiente. Considerando que a resistência de isolamento é fortemente afetada pela temperatura, a ABNT recomenda uma correção. Para tanto, multiplica-se o valor de R_i encontrado por um fator de correção dado na Tabela 6.1. Por exemplo: Qual a menor resistência de isolamento admissível a $25^{\circ}C$ para um transformador monofásico da classe de 15 kV, com potência de 15 kVA e frequência de 60 Hz, imerso em óleo mineral?

Aplicando a expressão 6.2:

$$R_{i75^{\circ}C} = \frac{2,65 \times 15}{\sqrt{15 / 60}} = 78 \text{ } M\Omega$$

Pela Tabela 6.1, o fator de correção será 32, logo:

$$R_{i25^{\circ}C} = 32 \times R_{i75^{\circ}C} = 32 \times 78 = 2500 \text{ } M\Omega$$

Tabela 4.1 – Fatores de correção para determinação da resistência de isolamento mínima em temperaturas diferentes de 75°C

Temperatura (°C)	Fator de Correção	Temperatura (°C)	Fator de Correção
0	181	41	10,6
1	169	42	9,9
2	158	43	9,2
3	147	44	8,6
4	137	45	8,0
5	128	46	7,5
6	119	47	7,0
7	111	48	6,5
8	104	49	6,1
9	97	50	5,7
10	91	51	5,3
11	84	52	4,92
12	79	53	4,59
13	74	54	4,29
14	69	55	4,00
15	64	56	3,73
16	60	57	3,48
17	56	58	3,25
18	52	59	3,03
19	48,5	60	2,83
20	45,3	61	2,64
21	42,2	62	2,46
22	36,4	63	2,30
23	36,8	64	2,14
24	34,3	65	2,00
25	32,0	66	1,87
26	29,9	67	1,74
27	27,9	68	1,62
28	26,0	69	1,52
29	24,3	70	1,41
30	22,6	71	1,32
31	21,1	72	1,23
32	19,7	73	1,15
33	18,4	74	1,07
34	17,2	75	1,00
35	16,0	76	0,93
36	14,9	77	0,87
37	13,9	78	0,81
38	13,0	79	0,76
39	12,1	80	0,71
40	11,3		

7. Experimentos

TAREFA 01 – Inspeção em um Transformador de Distribuição

1. Objetivo

Buscar uma familiaridade com um transformador de distribuição e suas principais partes constituintes.

2. Materiais e Equipamentos Utilizados

Transformador de distribuição;
Chaves de boca ou estrela, chaves de fenda;
Lanterna.

3. Procedimentos

Identifique com o auxílio da Figura 1.1 (página 2), todos os itens apresentados na legenda.

Anote os seguintes dados, encontrados na placa de identificação do transformador:

Tabela 1.1 - Dados de placa do transformador

Potência (kVA)	Tensão Superior (kV)				Tensão Inferior (V)		Frequência (Hz)
					Fase	linha	
Polaridade	Ligações				Peso (kg)		
	Alta Tensão		Baixa Tensão		Tanque e Acessórios		
					Núcleo e Enrolamentos		
					Óleo		
					Total		

Faça uma inspeção detalhada no transformador, verificando as condições físicas. Examine e anote o estado da pintura, juntas de vedação e buchas. Verifique se há vazamento de óleo e quais os componentes em falta, tais como porcas, arruelas, parafusos e etc.

Tabela 1.2 – Inspeção Externa do Transformador

COMPONENTE	SITUAÇÃO
Pintura	
Juntas de Vedação	
Buchas de Baixa Tensão	
Buchas de Alta Tensão	
Vazamentos	
Componentes Faltosos	

d) Abra a tampa da abertura para inspeção e com o auxílio de uma lanterna verifique: o nível de óleo, os terminais de alta e baixa tensão, os enrolamentos de alta e baixa tensão e o núcleo de material ferromagnético. Qual o significado do termo "tap" para um transformador.

4. Avaliação

Qual o significado do termo “tap” para um transformador e qual sua função? Como é efetuada sua mudança? No transformador inspecionado, em que posição o "tap" se encontra?

Faça um relatório Técnico, organizando de forma objetiva as características e as condições atuais do transformador inspecionado. Sugira as ações para sua recuperação. Inclua no relatório o fabricante e o número de série do transformador.

TAREFA 02 – Polaridades do Transformador

1. Objetivo

Este experimento tem por objetivo instruir o aluno a identificar as polaridades dos terminais de cada fase do transformador, pelo método CA.

2. Materiais e Equipamentos Utilizados

Transformador de distribuição;
Fonte de alimentação;
3 voltímetros.

3. Procedimentos

ATENÇÃO: Ao trabalhar diretamente com o transformador de distribuição, certifique-se que os circuitos estão devidamente desenergizados.

Conectar a alimentação na fase 1 do lado de alta do transformador de distribuição e em seguida, completar o circuito fechando a malha, de acordo com o esquema abaixo:

Obs.: Caso esteja usando um transformador variável (VARIAC) trifásico para fornecer tensão e corrente ao transformador de distribuição, será necessário somente utilizar duas fases na saída do mesmo.

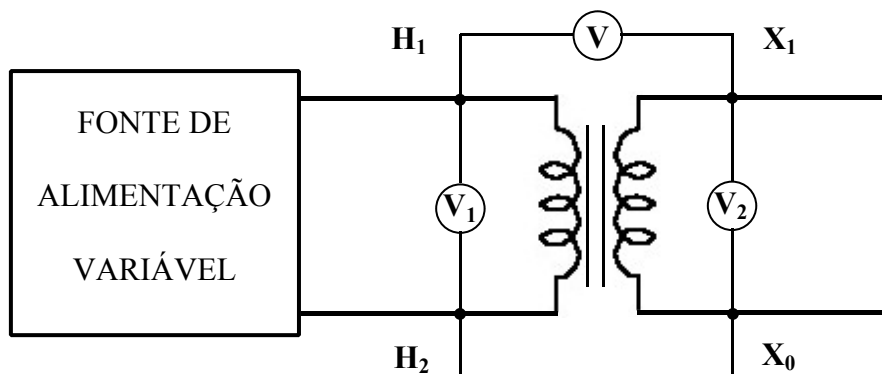


Figura 2.1 – Esquema elétrico das ligações para identificar a polaridade da fase 1.

Preencha a tabela 2.1 abaixo para o valor de V_1 já fixado.

Tabela 2.1 - Medições na fase 1

V_1 (volts)	V (volts)	V_2 (volts)
300		

Repita os procedimentos a e b para as fases 2 e 3 do mesmo transformador. As figuras abaixo indicam como devem ser feitas as conexões.

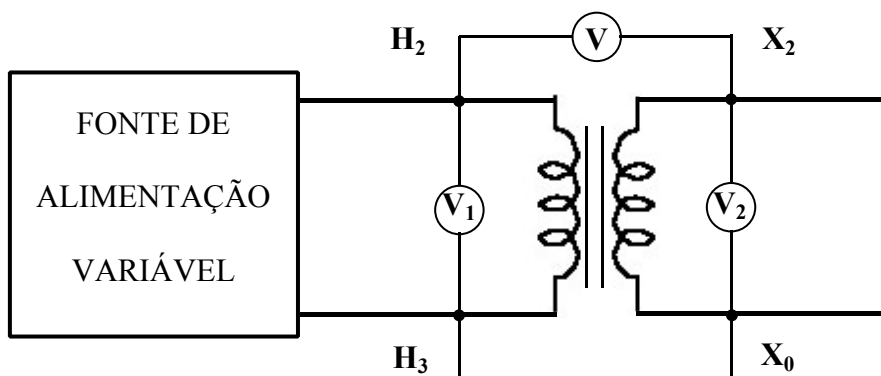


Figura 2.2 – Esquema elétrico das ligações para identificar a polaridade da fase 2.

Tabela 2.2 - Medições na fase 2

V_1 (volts)	V (volts)	V_2 (volts)
300		

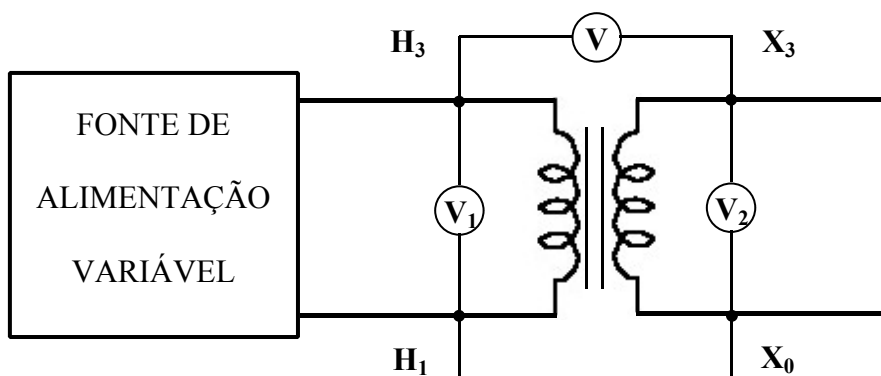


Figura 2.3 – Esquema elétrico das ligações para identificar a polaridade da fase 3.

Tabela 2.3 – Medições na fase 3

V_1 (volts)	V (volts)	V_2 (volts)
300		

4. Avaliação

Para cada fase onde foram feitas as medições (Tabelas 1, 2 e 3), indique a polaridade quanto a sua classificação (aditiva ou subtrativa).

Para cada fase, desenhe um transformador monofásico indicando por “pontos”, próximo ao enrolamento, a sua polarização.

Justifique o método CA utilizado para determinar a polaridade do transformador.

Poderia acontecer de se encontrar uma ou mais fases com polaridades diferentes em relação a outra, no mesmo transformador? Explique

TAREFA 03 – Determinação da Curva $\lambda_{\max} - I_{\max}$ do transformador

1. Objetivo

Este experimento tem por objetivo determinar a curva $\lambda_{\max} - i_{\max}$ para o núcleo do transformador, em cada uma de suas fases.

2. Materiais e Equipamentos Utilizados

Transformador de distribuição;
Fonte de alimentação;
Vôltemetro;
Amperímetro.

3. Procedimentos

ATENÇÃO: Ao trabalhar diretamente com o transformador de distribuição, certifique-se que os circuitos estão devidamente desenergizados.

Obs.: Lembre-se de verificar os limites de tensão e corrente que os vôltemetros e amperímetros podem suportar, não ultrapassando tais limites durante o experimento.

Conectar dois terminais de alimentação do variac (fase-fase – 380V) na fase 1 do lado de baixa tensão (X_1-X_0) do transformador e medir os valores de corrente, anotando-os na tabela 3.1. As conexões devem ser feitas de acordo com a figura 3.1

Repita o mesmo procedimento para as fases 1 e 2 preenchendo as respectivas tabelas.

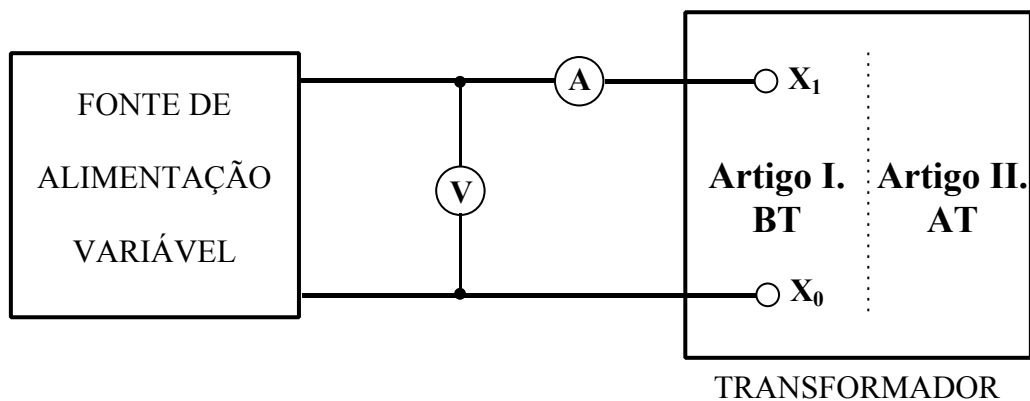


Figura 3.1 – Conexão para se medir a tensão e corrente no lado de baixa na fase 1 do transformador.

Tabela 3.1 – medição de corrente na fase X_1

V (volts)	I (ampères)
0	
25	
50	
100	
125	
150	
175	
200	
220	
250	
275	
290	

Obs.: Cuidado no valor de corrente nas últimas medições para não ultrapassar o limite suportado pelo amperímetro.

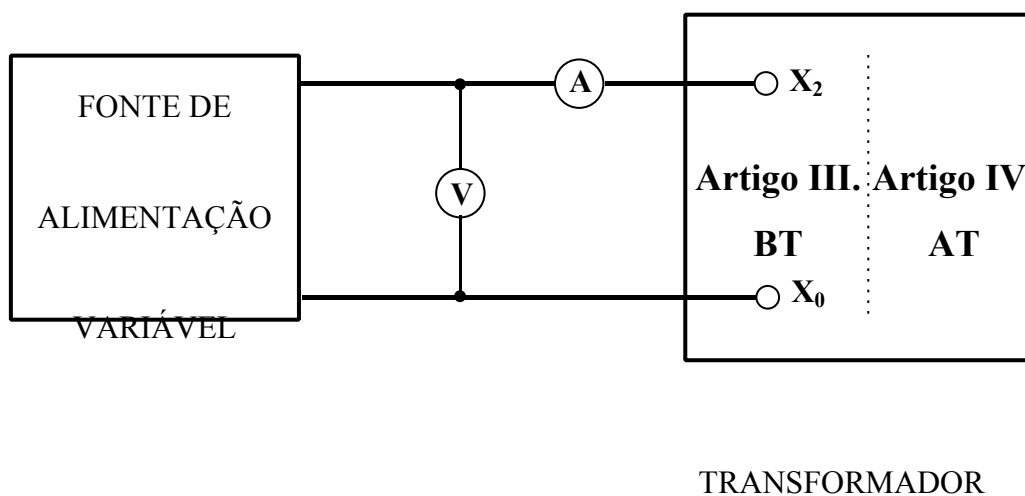


Figura 3.2 – Conexão para se medir a tensão e corrente no lado de baixa na fase 2 do transformador.

Tabela 3.2 – medição de corrente na fase X_2

V (volts)	I (ampères)
0	
25	
50	
100	
125	
150	
175	
200	
220	
250	
275	
290	

Obs.: Cuidado no valor de corrente nas últimas medições para não ultrapassar o limite suportado pelo amperímetro.

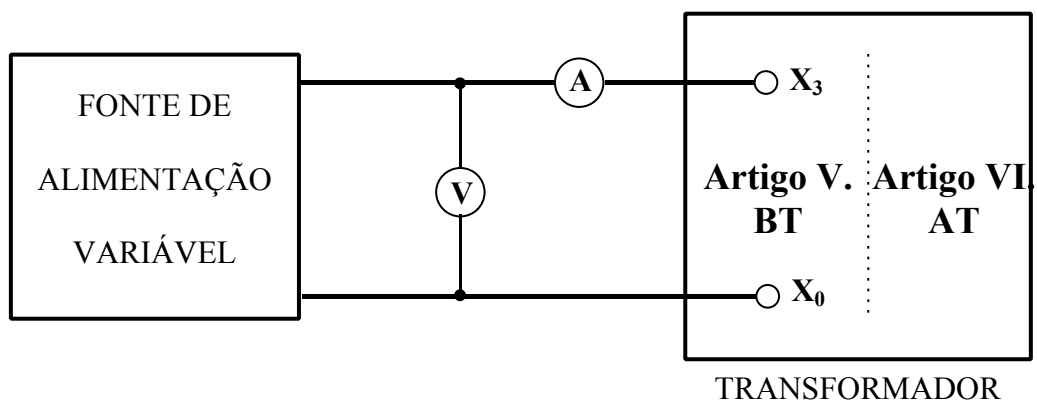


Figura 3.3 – Conexão para se medir a tensão e corrente no lado de baixa na fase 3 do transformador.

Tabela 3.3 – medição de corrente na fase X_3

V (volts)	I (ampères)
0	
25	
50	
100	
125	
150	
175	
200	
220	
250	
275	
290	

Obs.: Cuidado no valor de corrente nas últimas medições para não ultrapassar o limite suportado pelo amperímetro.

4. Avaliação

Calcule os valores de $\lambda_{\max}$ e $I_{\max}$ para cada tensão e trace o gráfico $\lambda_{\max}$ versus $I_{\max}$ para cada fase do transformador de distribuição.

Qual a importância em se medir a curva de magnetização de um transformador?

Tomando por base a teoria dos domínios magnéticos, explique o fenômeno de saturação na curva $\lambda_{\max}$ versus $I_{\max}$.

Por que se usa ferro laminado no núcleo de transformadores?

Lembrete:

A tensão induzida é dada pela seguinte expressão:

$$v_{ind} = N \frac{d\phi}{dt} \quad (3.1)$$

e sabendo que este fluxo varia senoidalmente no tempo:

$$\phi = \phi_m \sin(\omega t) \quad (3.2)$$

substituindo (3.2) em (3.1), tem-se:

$$v_{ind} = N\phi\omega \cos(\omega t)$$

O valor máximo da tensão induzida será:

$$v_{\max} = \omega N\phi = 2\pi f\lambda_{\max}, \text{ daí}$$

$$\lambda_{\max} = \frac{v_{\max}}{2\pi f}$$

TAREFA 04 – Corrente a Vazio e Medição de Perdas**1. Objetivo**

Determinar a corrente a vazio (I_o) e as perdas (P_o) do transformador de distribuição.

2. Materiais e Equipamentos Utilizados

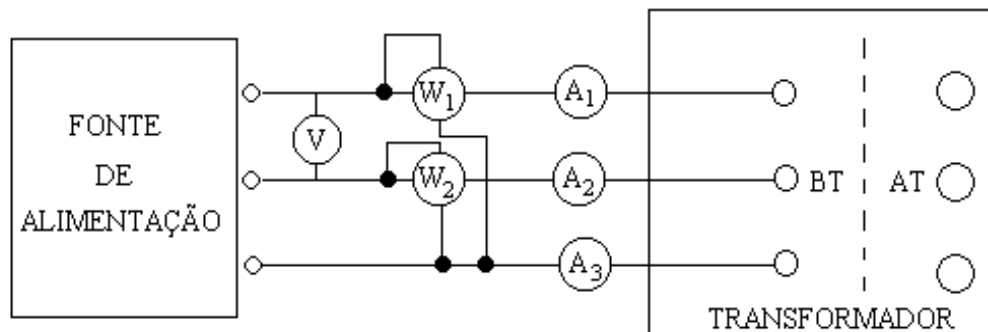
Transformador de distribuição;
 Fonte de alimentação;
 Wattímetros;
 Amperímetros.

3. Procedimentos

ATENÇÃO: Ao trabalhar diretamente com o transformador, certifique-se que os circuitos estão devidamente desenergizados! Uma vez alimentado pelo lado de baixa tensão, os terminais de alta tensão apresentam tensões muito elevadas (ordem de kV), portanto qualquer contato pode ser fatal.

Ligar o transformador a uma fonte de tensão, alimentando-o pelo lado de baixa tensão e deixando o lado de alta tensão em aberto, conforme o esquema abaixo:

Figura 4.1 – Esquema elétrico de ligações para medição de perdas.



Para tensão nominal, anote:

Tabela 4.1 – Valores para o cálculo de perdas e corrente de excitação

Instrumento	A ₁	A ₂	A ₃	V	W ₁	W ₂
Grandeza	I _{o1} (A)	I _{o2} (A)	I _{o3} (A)	V ₁ (V)	P ₁ (W)	P ₂ (W)
Valor Medido						

4. Avaliação

Conforme o circuito magnético do transformador trifásico, as correntes a vazio das três fases poderão apresentar valores iguais para as fases laterais e um valor diferente para a fase central. Portanto, adota-se uma única corrente a vazio, dada pela média aritmética dos três valores. As perdas P_0 são dadas pela soma de P_1 e P_2 :

$$I_0 = \frac{I_{01} + I_{02} + I_{03}}{3} = \quad \text{A}$$

$$P_0 = P_1 + P_2 = \quad \text{W}$$

Calcule, através dos dados de placa, qual o valor da corrente nominal. Utilize a expressão $S = \sqrt{3}V_L I_N$. Em seguida verifique qual a porcentagem da corrente nominal que representa a corrente de excitação I_0 .

$I_0(\text{A})$	$I_N(\text{A})$	$I_0(\%)$

Calcule o fp a vazio e as correntes I_p e I_q , através das equações descritas na parte teórica.

$\cos\psi_0$	$I_p(\text{A})$	$I_q(\text{A})$

Compare os valores obtidos para I_p e I_q . Discuta o motivo da diferença entre estas correntes.

Em termos das perdas, o que ocorre quando se trabalha com um transformador de 50Hz em 60Hz?

Por que o formato da corrente de excitação não é senoidal?

TAREFA 05 – Relação de Transformação

1. Objetivo

Verificar a relação de transformação em um transformador de distribuição.

2. Materiais e Equipamentos Utilizados

Transformador de distribuição;

MRT – Medidor de relação de transformação.

3. Procedimentos

Com o auxílio de uma calculadora e dos dados anotados na Tarefa 1, verifique qual a Relação de Transformação teórica K_T para a posição em que se encontra o "tap" do transformador:

$$K_T = \frac{E_1}{E_2} = \quad , \text{ onde: } E_1 = \text{tensão superior} = \quad \text{V (linha)}$$
$$E_2 = \text{tensão inferior} = \quad \text{V (fase)}$$

Identifique no MRT as seguintes partes:

1 - Cabos de teste: Dois cabos finos com garras, sendo H_1 o cabo preto e H_2 o cabo vermelho e mais dois cabos com grampo de conexão, sendo X_1 o cabo sem marcação e X_2 o cabo com marcação;

2 - Indicador de tensão de excitação: Voltímetro que indica a tensão de excitação do transformador durante o teste;

3 - Indicador de corrente de excitação: Amperímetro que indica a corrente de excitação do transformador durante o teste;

4 - Indicador de equilíbrio: Medidor do circuito de balanceamento, que indica quando as relações do transformador de referência do MRT e do transformador sob teste são iguais;

5 - Knob de excitação: O controle da tensão de excitação do transformador sob teste é feito através deste knob, acessível no painel;

6 - Knobs de determinação da relação de espiras: Compõem-se de três chaves para leitura da dezena, unidade e décimo da unidade, e de um potenciômetro de curso constante, para leitura de centésimos e milésimos de unidade da relação;

7 - Trimpots de calibração: Localizados acima do indicador de equilíbrio, são usados na calibração do equipamento;

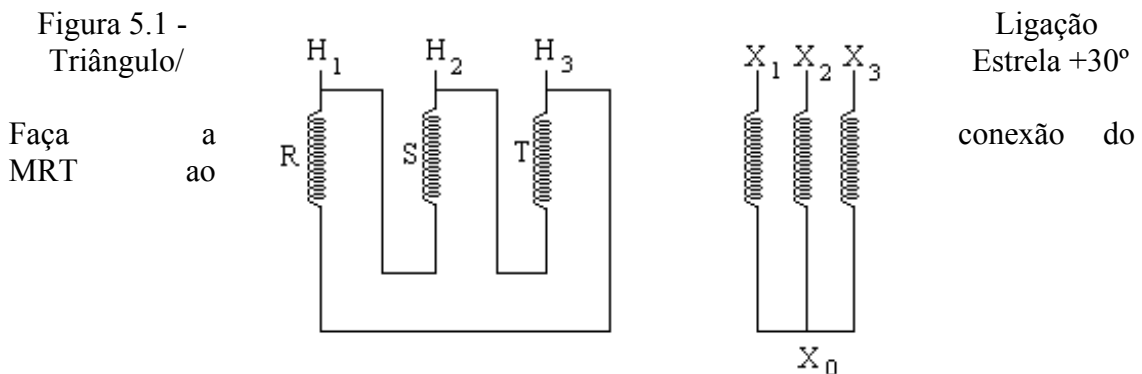
8 - Chave liga-desliga: Para energizar o equipamento;

9 - Proteção: Permite rearmar o relé de proteção de sobre-corrente, bastando pressionar o botão de "Proteção" para que o rearmamento seja feito.

ATENÇÃO: No painel lateral do equipamento encontra-se o borne de aterramento, que deve ser conectado antes de qualquer outra operação, sem o que não é possível garantir a segurança do operador contra choques elétricos no caso de contato com a estrutura metálica da caixa do instrumento.

Faça o aterramento da carcaça do transformador (terminal de aterramento) juntamente com o terminal de baixa tensão X_0 .

A ligação triângulo/estrela em transformadores pode se apresentar em duas configurações: $+30^\circ$ e -30° , com respeito a posição fasorial das tensões no primário e secundário. Os esquemas destas ligações são mostrados na figura 3.1 e 3.2.



transformador de acordo com as indicações na Tabela 5.1 para medição da relação na fase R. Suponha inicialmente que a ligação de do tipo triângulo/estrela $+30^\circ$. Caso as medições não sejam coerentes com os valores esperados, repita o procedimento para a ligação triângulo/estrela -30° . Para transformadores de diferentes tipos de ligações como estrela/triângulo, triângulo/ triângulo ou estrela/estrela, consulte o manual do MRT e verifique como efetuar as conexões.

Tabela 5.1 - Esquema de Ligações do MRT

Fase	MRT	Transformador	Valor Teórico	Valor Medido
R	X ₁	X ₀		
	X ₂	X ₁		
	H ₁	H ₃		
	H ₂	H ₁		
S	X ₁	X ₀		
	X ₂	X ₂		
	H ₁	H ₁		
	H ₂	H ₂		
T	X ₁	X ₀		
	X ₂	X ₃		
	H ₁	H ₂		
	H ₂	H ₃		

Após verificar se o nível de excitação e todos os ajustes estão na posição zero, ligue o MRT;

Certifique-se que o relé de sobre-corrente está armado, pressionando o botão verde proteção;

Atue no botão de excitação. Observe o indicador de equilíbrio, que deverá se mover para a posição "+". Caso se movimente para a posição "-", inverta a conexão dos cabos H₁ e H₂ do MRT;

Retire toda a excitação e ajuste os comandos em uma relação próxima da esperada;

Alternadamente, aumente lentamente a excitação e ajuste a relação próxima da esperada;

Leia diretamente a relação e anote o resultado. Faça as ligações para as fases S e T de acordo com a Tabela 5.1 e repita todo o procedimento;

4. Avaliação

Os valores medidos foram coerentes com os valores esperados?

Consulte o manual do MRT e discuta o princípio de funcionamento do equipamento.

TAREFA 06 – Operação em Curto-Circuito

1. Objetivo

Determinar as perdas no cobre (P_j) e valores de impedância, resistência e reatância.

2. Materiais e Equipamentos Utilizados

Transformador de distribuição;
Fonte de alimentação;
Wattímetros;
Amperímetros.

3. Procedimentos

ATENÇÃO: Ao trabalhar diretamente com o transformador, certifique-se que os circuitos estão devidamente desenergizados!

Ligar o transformador a uma fonte de tensão variável, sob frequência nominal, alimentando-o pelo lado de alta tensão e curto-circuitando o lado de baixa tensão, conforme o esquema abaixo:

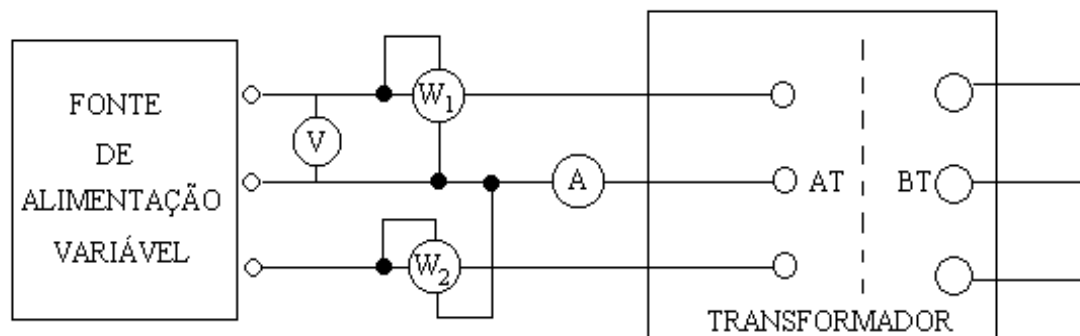


Figura 6.1 - Esquema de ligações para ensaio de curto-circuito

Anotar para diversos valores de V_{cc} a corrente I_{cc} até que seja atingida a corrente nominal. Isto ocorre para um valor V_{cc} de aproximadamente 10% da tensão nominal.

Tabela 6.1 – Diversos valores de I_{cc} em função de V_{cc}

Instrumento	V	A
Grandeza	$V_{cc}(V)$	$I_{cc}(A)$
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		

Para o valor correspondente a corrente nominal anotar:

Tabela 6.2 - Valores em condições nominais

Instrumento	V	W_1	W_2	A
Grandeza	$V_{cc}(V)$	$P_1(W)$	$P_1(W)$	$I_{cc}(A)$
Valor Medido				

4. Avaliação

Calcule os valores de P_{cc} , P_J e P_A para preenchimento da tabela abaixo. P_{cc} é obtido através da soma de P_1 e P_2 . Observe a equação 5.3 para o cálculo de P_J e P_A .

$P_{cc}(W)$	$P_J(W)$	$P_A(W)$

Através das equações 5.4, 5.5 e 5.6 calcule $\cos\psi_o$, R_2 e X_2 .

$\cos\psi_o$	$R_2(\Omega)$	$X_2(\Omega)$

Construa e comente sobre a característica de curto-circuito ($V_{cc} \times I_{cc}$).

Quais as vantagens e desvantagens de um transformador que tenha grande V_{cc} em sistemas elétricos?

Durante o ensaio de curto-circuito, o que ocorre com o valor da indução no núcleo do transformador?

TAREFA 07 – Medição da Resistência de Isolamento

1. Objetivo

Determinar a resistência de isolamento de um transformador e verificar se os valores estão de acordo com a norma ABNT.

2. Materiais e Equipamentos Utilizados

Transformador de distribuição;
Megômetro;
Cabos;
Termômetro.

3. Procedimentos

Aterre o terminal X_0 do transformador, juntamente com sua carcaça;

Com o auxílio de cabos, curto-circuite os terminais de alta tensão H_1 , H_2 e H_3 . Faça o mesmo para os terminais de baixa tensão X_1 , X_2 e X_3 ;

De posse de um megômetro adequado para a tensão nominal do transformador, determinar:

Tabela 7.1 – Resistência de isolamento

Medição entre	Resistência de Isolamento
Terminais de Alta Tensão e Massa	$M\Omega$
Terminais de Baixa Tensão e Massa	$M\Omega$
Terminais de Alta Tensão e Baixa Tensão	$M\Omega$

Temperatura ambiente = °C

4. Avaliação

Relate o resultado do ensaio com o megômetro em relação ao isolamento do transformador.

Calcule as resistências mínimas que deveriam existir, comparando com os valores encontrados. Use a tabela 4.1 da parte teórica para efetuar as devidas correções.

Referências Bibliográficas

OLIVEIRA, José Carlos de, COGO, João Roberto e ABREU, José Policarpo G. de. Transformadores: Teoria e Ensaio. Editora Edgard Blucher LTDA. São Paulo, 1984.

FERREIRA, Hêlvio Alves. Relatório de Estágio. Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande, Paraíba. Março de 2000.

FILHO, João Mamede. Manual de Equipamentos Elétricos. Volume 1. 2ª Edição. Livros Técnicos e Científicos Editora. Rio de Janeiro, 1994.

NANSEN S. A. Medidor de Relação de Espiras de Transformadores MT 10NE – Manual de Instruções. 3ª Edição. Minas Gerais, 1995.

MEGGER. Operating Instructions – Major MEGGER Tester. 3rd Edition. England.

LUCIANO, Benedito Antonio. Apostila sobre Transformadores. Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande, Paraíba.

SOUSA, Andréa Araújo. Relatório de Estágio. Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande, Paraíba. Junho de 1998.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5380: Transformador de Potência – Método de Ensaio. Maio de 1993.