



**Universidade Federal De Campina Grande  
Centro De Engenharia Elétrica e Informática  
Unidade Acadêmica De Engenharia Elétrica**



## **Projeto De Engenharia Elétrica**

José Gonçalves de Lima Júnior  
Matrícula: 20911458

Campina Grande, Maio de 2012



**Universidade Federal De Campina Grande  
Centro De Engenharia Elétrica e Informática  
Unidade Acadêmica De Engenharia Elétrica**



## **Projeto e Construção de um transformador Didático**

Projeto apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Elétrica da universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento parcial às exigências para obtenção do Grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador:

Professor Edson Guedes da Costa, D.Sc.

Campina Grande, Maio de 2012

**Trabalho de Conclusão de Curso**  
**Projeto e Construção de um Transformador Didático**

**Aluno:**

---

**José Gonçalves de Lima Junior**

**Orientador:**

---

Professor Edson Guedes da Costa, D.Sc

Campina Grande, Maio de 2012

## **Agradecimentos**

A Deus que me deu coragem e força para concluir esse trabalho;

A Mãe Rainha por toda iluminação em minha vida;

Aos meus pais pelo exemplo de perseverança e por todo carinho;

As minhas irmãs pelo companheirismo e incentivo;

Aos meus amigos de Maceió e de Campina por toda amizade;

Ao professor Edson Guedes pela orientação;

Aos funcionários da Eletrobrás Alagoas que contribuíram com o trabalho;

A todos que me acompanharam durante a graduação.

## Lista de figuras

Figura 1 - Seção do núcleo em degraus. Fonte: PIKANÇO, 2006 .....	6
Figura 2 - Foto transversal de uma Bobina. Fonte: PIKANÇO, 2006.....	7
Figura 3 – Dimensões Gerais do núcleo .....	8
Figura 4- Dimensões da Bobina .....	9
Figura 5 - Dados de placa do transformador do qual foi retirado o núcleo .....	12
Figura 6 - Dimensões do núcleo escolhido .....	13
Figura 7 - Dimensões da coluna do núcleo escolhido .....	13
Figura 8 - Bobinas danificadas retiradas do transformador .....	16
Figura 9 - Núcleo do transformador escolhido.....	16
Figura 10 - Arranjo montado para enrolar as bobinas .....	17
Figura 11 - Enrolamento das bobinas .....	17
Figura 12 - Bobina Primária.....	17
Figura 13 - Posicionamento das bobinas no núcleo .....	18
Figura 14 - Fechamento da Culatra superior.....	18
Figura 15 - Lado primário pronto .....	18
Figura 16 - Lado Secundário pronto.....	19
Figura 17 - Teste a vazio aplicando individualmente 220 V a cada fase .....	19
Figura 18 - Ligação Triangulo – Triangulo alimentando carga em Triângulo ...	19
Figura 1 - Esboço de um Transformador de Distribuição .....	3
Figura 2 - Polaridade Subtrativa.....	6
Figura 3 - Polaridade Subtrativa.....	6
Figura 4 - Teste de polaridade .....	7
Figura 5 - Polaridade subtrativa .....	7
Figura 6 - Polaridade Aditiva .....	7
Figura 7 - Diagrama vetorial do funcionamento a vazio .....	8
Figura 8 - Campo incidindo sobre massa Metallica.....	9
Figura 9 - Diagrama fasorial para o transformador a vazio .....	10
Figura 10 - (a) Transformador a vazio; (b) transformador em carga .....	12
Figura 11 - Diagrama vetorial funcionamento em carga.....	13
Figura 12 - Circuito equivalente para o transformador em curto-circuito.....	15

Figura 14 - Conexão Y .....	20
Figura 13 - Ligação Delta .....	20
Figura 15 - Conexão ziguezague .....	20
Figura 16 - Triângulo de tensões do lado de alta .....	21
Figura 17 - Esquema de ligação e diagrama fasorial da ligação Estrela - Estrela .....	21
Figura 18 - Esquema de ligação e diagrama fasorial da ligação delta - estrela	22
Figura 19 - Tabela da ABNT para esquemas de ligações e conexões para teste de defasamento angular.....	23
Figura 20 - Vista secundário e primário do transformador .....	24
Figura 21 - Diagrama de conexão dos enrolamentos.....	24
Figura 22 - Esquema elétrico das ligações para identificar a polaridade da fase A.....	25
Figura 23 - Esquema elétrico das ligações para identificar a polaridade da fase B.....	26
Figura 24 - Esquema elétrico das ligações para identificar a polaridade da fase C.....	26
Figura 25 - Ligação para o ensaio de defasamento .....	28
Figura 26 - Ligação estrela - delta.....	29
Figura 27 - Conexão para se medir a tensão e corrente no lado de baixa na fase 1 do transformador. ....	30
Figura 28 - Conexão para se medir a tensão e corrente no lado de baixa na fase 2 do transformador. ....	31
Figura 29 - Conexão para se medir a tensão e corrente no lado de baixa na fase 3 do transformador. ....	32
Figura 30 - Esquema elétrico de ligações para medição de perdas.....	35
Figura 31 - Ligação Triângulo/Estrela +30° .....	37

# SUMÁRIO

<b>1. Introdução:</b> .....	1
<b>2. Dimensionamento de Transformadores</b> .....	2
<b>2.1 Cálculo das correntes primárias e secundarias.</b> .....	2
<b>2.2 Cálculo da seção dos condutores</b> .....	3
<b>2.3 Cálculo da seção magnética do núcleo</b> .....	4
<b>2.4 Cálculo do número de espiras</b> .....	5
<b>2.5 Cálculo das dimensões do núcleo</b> .....	6
<b>2.5.1 Diâmetro das colunas e da culatra</b> .....	6
<b>2.5.2 Dimensões da janela</b> .....	7
<b>2.6 Determinação das Massas</b> .....	8
<b>2.7 Determinação das perdas</b> .....	9
<b>3. Considerações para o projeto</b> .....	11
<b>4. Construção</b> .....	16
<b>5 – Alterações no Guia de Experimentos</b> .....	20
<b>6 – Conclusão</b> .....	22
<b>7 – Bibliografia</b> .....	23

ANEXO – GUIA DE EXPERIMENTOS

## 1. **Introdução:**

Transformadores são elementos fundamentais do sistema de potência. Utilizando a indução eletromagnética, modificam a amplitude da tensão e da corrente entre os seus terminais mantendo a frequência constante. Permitindo dessa forma uma ligação e um fluxo de potência entre sistemas elétricos de características diferentes.

Por serem mecanismos estáticos apresentam um alto desempenho e confiabilidade.

Para construção de um transformador, devemos lidar com varias grandezas relacionadas entre si. Ponderar as quantidades de material que serão utilizados de forma a obter o funcionamento desejado e evitar gastos desnecessários, que tornariam a construção antieconômica.

Os enrolamentos de alta tensão apresentam um grande problema com relação ao isolamento. As bobinas têm de ser separadas entre si por um material com uma maior isolação. Os enrolamentos de baixa tensão por outro lado apresentam o problema de alto aquecimento, por serem atravessados por correntes elevadas, precisam ter uma secção dos condutores maior e permitir um melhor fluxo de calor para seu resfriamento. Uma secção maior dos condutores implica uma dificuldade na hora de enrolar as bobinas. Dependendo desse fato os enrolamentos do secundário são em geral feitos com barras de cobre.

O núcleo deve ser construído com material de alta permeabilidade magnética, o que permite uma indução magnética maior, isso torna possível a utilização de um núcleo menor, porém, quanto maior a permeabilidade de um material maior o seu custo.



## 2. Dimensionamento de Transformadores

Um transformador como qualquer máquina elétrica deve estar preparado para as condições de trabalho na qual irá atuar. Dessa forma são considerados aspectos como ambiente de operação, tipo de carga que será alimentada, nível de tensão e outras características.

As fórmulas para o cálculo de um transformador trifásico de pequena potência são descritos nas seções subsequentes e serviram de guia para o projeto do transformador a que se destina este trabalho.

### 2.1 Cálculo das correntes primárias e secundárias.

Segundo Martignoni, um transformador trifásico é constituído por três transformadores monofásicos idênticos. Sendo assim o cálculo do transformador trifásico será basicamente o cálculo de um dos transformadores monofásicos que o compõem.

A potência do transformador monofásico será de um terço da potência total.

$$W_{mon} = \frac{W_{tri}}{3} . \quad (1)$$

A corrente secundária é obtida pela relação:

$$I_2 = \frac{W_2}{V_2} . \quad (2)$$

A corrente primária é obtida aumentando-se em 10% a potência do secundário, devido às perdas. Sendo assim as equações (3) e (4) fornecem a corrente no primário do transformador:

$$W_1 = 1.1 * W_2 \quad (3)$$

e

$$I_1 = \frac{W_1}{V_1} . \quad (4)$$

## 2.2 Cálculo da seção dos condutores

O cálculo da seção dos condutores é feito com o foco na densidade de corrente que deve ser mantida em um limite que permita a dissipação do calor gerado devido, principalmente, às perdas Joule nos condutores (MARTIGNONI, 1991). Nas tabelas 1 e 2, obtidas das experiências acumuladas ao longo dos anos, pela fabricante de transformadores e normalmente utilizada na prática são, indicadas densidades de correntes para serem usadas em transformadores. As informações da tabela servem apenas com indicação, a escolha da densidade de corrente final deve ser feita com base no teste de aquecimento do transformador.

**Tabela 1 - Densidade de corrente para pequenos transformadores a seco.**

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

**Tabela 2 - Densidade de corrente indicada para transformadores em óleo com refrigeração natural.**

kVA	5	10	25	50	100	500	1000	5000
A/mm <sup>2</sup>	1,8	2,0	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8

De posse das densidades das correntes calculamos a seção dos condutores.

$$S_1 = \frac{I_1}{D_1} \quad (5)$$

e

$$S_2 = \frac{I_2}{D_2} \quad (6)$$

### 2.3 Cálculo da seção magnética do núcleo

Em um circuito magnético envolvido por espiras, existe uma relação entre o número de espiras e a seção do núcleo de ferro (MARTIGNONI, 1991). Caso aumentemos uma devemos diminuir a outra, isso para manter o valor de indução adotado para o núcleo, constante. É com base nessa relação que são escolhidas, a quantidade de ferro que será usado no núcleo do transformador e a quantidade de cobre que será usada nos enrolamentos.

Segundo MARTIN, o rendimento do transformador é máximo, quando as perdas no cobre são iguais as perdas no ferro, porém, por ser uma máquina estática, o rendimento não se altera significativamente quando a relação entre perdas no ferro e perdas no cobre se afasta da unidade. Isto fornece aos projetistas uma margem para alterar a relação entre cobre e ferro do modo seja mais apropriado.

Equação que dimensiona a seção de ferro do núcleo varia entre os autores. A equação pode ser colocada em função da indução máxima do núcleo e da potencia do transformador. (MARTIN, 1957), ou colocada em função das perdas no transformador (MARTIGNONI, 1991).

De acordo com MARTIGNONI o a equação para o dimensionamento da seção do núcleo foi deixado em função das grandezas, perda no ferro e perda no cobre. A NBR 5440 define os limites máximos de perdas toleráveis para transformadores de distribuição.

$$S_{fe} = \left( 72,8 * \sqrt{\frac{l_{cu}}{l_{fe}}} \right) * \sqrt{\frac{W_2 * \frac{w_{cu}}{w_{fe}} * 10^5}{f * \frac{w_{cu}}{w_{fe}} * d_2 * B_m}} \quad (7)$$

Sendo:

$w_{cu}$  a perda especifica no cobre (W/kg), dadas por  $w_{cu} = 2,43 * d^2$  considerando que  $d$  é a densidade de corrente no enrolamento.

$w_{fe}$  a perda especifica no ferro, para a densidade de trabalho, fornecida pelo fabricante.

Os termos  $W_{fe}$  e  $W_{cu}$  são as perdas médias no ferro e no cobre respectivamente, para um transformador daquela potência, que podem ser encontradas na NBR 5440.

O termo entre parênteses na equação (7) varia pouco entre transformadores do mesmo tipo, podendo ser agrupado em uma constante.

**Tabela 3 - Valores da constante C**

Tipos de núcleos trifásicos	Valor da constante C
Envolvido com bobinas redondas	38
Envolvido com bobinas retangulares	45
Envolvente	55

#### 2.4 Cálculo do número de espiras

A equação (8) determina o número de espiras do primário do transformador (MARTIGNON, 1991), assumindo a tensão  $V_1$  sendo senoidal.

$$N_1 = \frac{V_1}{S_{fe}} * \left( \frac{10^8}{4,44 * B_m * f} \right). \quad (8)$$

Sendo:

$V_1$  a tensão no primário (V);

$B_m$  a indução máxima do núcleo (Gauss);

$f$  A frequência (Hz).

O termo entre parênteses é chamado, espira por volt, e corresponde ao número de espiras necessárias para se ter uma diferença de potencial de um volt. A informação é importante para questões de isolamento, que em transformadores de alta tensão pode atingir valores críticos.

A indução magnética está ligada ao tipo de lâmina usada no núcleo. Cada material permite um grau máximo de indução, a partir do qual atinge a região de saturação. O nível de indução também influencia nas perdas térmicas do material, conseqüentemente no aquecimento do núcleo.

## 2.5 Cálculo das dimensões do núcleo

### 2.5.1 Diâmetro das colunas e da culatra

As lâminas de aço para núcleos possuem uma camada de um fino filme de vidro aplicado durante o resfriamento e uma camada de verniz de fosfato (carlite) (ABB, 2004). Essas duas camadas garantem a isolamento entre as lâminas impedindo o fluxo de corrente entre elas, porém aumentam a espessura da lâmina de aço e como não são constituídas de material ferromagnético não apresentam um caminho de baixa relutância para o fluxo magnético.

O fator de empilhamento,  $f_{emp}$ , é a razão entre a espessura do aço na lâmina,  $S_{fe}$ , e a espessura de toda camada, aço mais isolamento,  $S_{nb}$ . É fornecido pelo fabricante das laminas e para lâminas de aço silício pode chegar a 0,95 (PICANÇO, 2006).

$$S_{nb} = \frac{S_{fe}}{f_{emp}}. \quad (9)$$

Para sabermos o diâmetro das colunas, precisamos da área ocupada pelo ferro dentro da coluna. O núcleo é construído em degraus para melhorar o aproveitamento da área da coluna. O ideal seria que os degraus fossem de uma lâmina. Porém isso atrasaria o tempo de construção e aumentaria os custos.

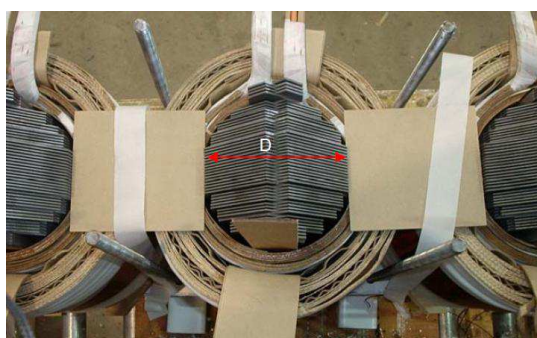


Figura 1 - Seção do núcleo em degraus. Fonte: PICANÇO, 2006

A forma construtiva do núcleo define o fator de utilização circunscrito,  $f_{uo}$ . Que utilizamos para encontrar a área total da coluna.

$$S_o = \frac{S_{nb}}{f_{uo}}. \quad (10)$$

O diâmetro da coluna é encontrado com a equação (11).

$$D = 1,13 * \sqrt{S_o}. \quad (11)$$

Para se diminuir as perdas no ferro a área da culatra é aumentada em 15%.

$$S_{culatras} = 1,15 * S_n. \quad (12)$$

### 2.5.2 Dimensões da janela

A altura da janela é definida pelo número de espiras e de camadas que haverá no enrolamento. Caso a janela do núcleo seja baixa as camadas estarão distantes da coluna, aumentando o fluxo de dispersão. Porém se os enrolamentos forem construídos com poucas camadas o núcleo ficaria muito alto (MARTIGNON, 1991).

O número de camadas da bobina está relacionado com altura pela equação.

$$N_{cam} = \frac{N_1 * D_{fio}}{H_{janela}}. \quad (13)$$

A largura da culatra é encontrada de acordo com o diâmetro externo das bobinas e com a distância entre as bobinas das diferentes fases que é determinada pelo nível de tensão.

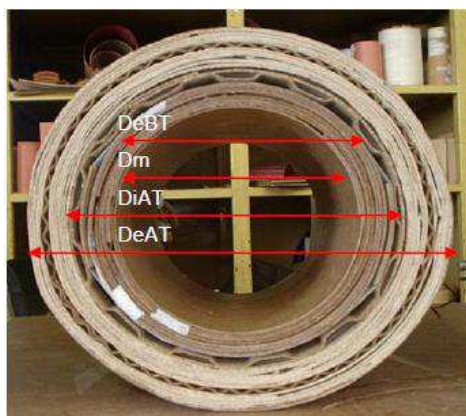


Figura 2 - Foto transversal de uma Bobina. Fonte: PIKANÇO, 2006.

Em que

$D_m$ : Diâmetro do molde;

$D_{eBT}$ : Diâmetro externo da bobina de baixa tensão;

$D_{iAT}$ : Diâmetro interno da bobina de alta tensão;

$D_{eAT}$ : Diâmetro externo da bobina de alta tensão.

### 2.5.3 Determinação das Massas

Sendo o núcleo construído conforme o a figura (3), a massa é dada pelas equações (14) e (15).

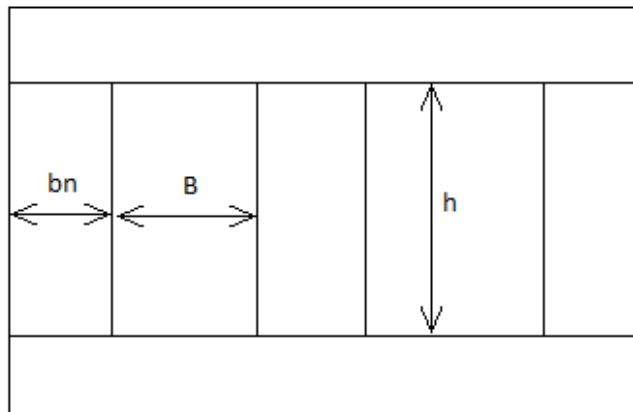


Figura 3 – Dimensões Gerais do núcleo

$$M_{culatra} = \rho_{ferro} \cdot S_{culatras} \cdot (4 \cdot B + 6 \cdot bn). \quad (14)$$

$$M_{colunas} = \rho_{ferro} \cdot S_n \cdot 3 \cdot h \quad (15)$$

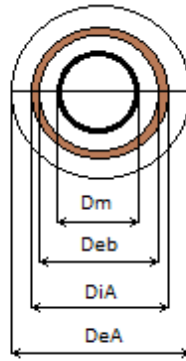
Em que:

$M_{culatra}$  é a massa de ferro das culatras em kg;

$M_{colunas}$  é a massa do ferro das colunas em kg;

$\rho_{ferro}$  é a densidade do ferro em  $kg/cm^3$ .

A massa do cobre é obtida com a seção do cobre através das equações (16) e (17), que relacionam o diâmetro médio da bobina de cobre com a sua densidade número de espiras seção reta do condutor.



**Figura 4- Dimensões da Bobina**

$$M_{cuBT} = \rho_{cu} \cdot 6 \cdot \pi \cdot N_1 \cdot S_1 \cdot \left( \frac{D_{eb} + D_m}{4} \right) \quad (16)$$

$$M_{cuAT} = \rho_{cu} \cdot 6 \cdot \pi \cdot N_2 \cdot S_2 \cdot \left( \frac{D_{eA} + D_{iA}}{4} \right) \quad (17)$$

Em que:

$M_{cuBT}$  é massa de cobre do enrolamento de baixa tensão em kg;

$M_{cuAT}$  é massa de cobre do enrolamento de alta tensão em kg;

$\rho_{cu}$  é a densidade do cobre 0,00892 kg/cm<sup>3</sup>.

#### 2.5.4 Determinação das perdas

As perdas no ferro dependem da indução a qual as lâminas estão submetidas, da frequência, da espessura e da qualidade do material das lâminas. As perdas totais no ferro são encontradas multiplicando-se as perdas específicas no ferro, que são as perdas por quilo do material, fornecidas pelo fabricante, pela massa de ferro.

Como as colunas e a culatra estão submetidas a níveis de indução diferentes, as suas perdas específicas serão diferentes.

As perdas nas lâminas de aço-silício de grão orientado para transformadores são especificadas pelo fabricante e seguem a norma NBR 9119. Considerando uma lâmina do tipo E0004-7 com 0,27mm de espessura e com indução máxima de 1,7 T a 60 Hz, as perdas específicas valem 1,68 W/kg (PICANÇO, 2006).



Para outros valores de indução podemos encontrar as perdas específicas pela expressão (18).

$$w_f = 1,68. \left(\frac{B_m}{17000}\right)^2 \quad (18)$$

Em que:

$w_f$  é a perda específica em W/kg;

$B_m$  é a indução máxima em Gauss.

Para as perdas no ferro temos então:

$$W_{\text{colunas}} = M_{\text{colunas}} \cdot w_f, \quad (19)$$

e

$$W_{\text{culatras}} = M_{\text{culatras}} \cdot w_f. \quad (20)$$

Considerando:

$W_{\text{colunas}}$  são as perdas nas colunas em W;

$W_{\text{culatras}}$  são as perdas nas culatras em W;

$w_f$  são as perdas específicas das lâminas em W/kg.

Logo, as perdas totais no núcleo, em watts, são definidas pela expressão (21):

$$W_{Tnucleo} = W_{\text{colunas}} + W_{\text{culatras}} \quad (21)$$

As perdas no cobre dependem da resistência do enrolamento, e da densidade de corrente a qual o enrolamento é submetido. As perdas nos enrolamentos são encontradas pelas expressões (22) e (23);

$$W_{AT} = 2,66. \delta_{AT}^2. M_{\text{cuAT}} \quad (22)$$

$$W_{BT} = 2,66. \delta_{BT}^2. M_{\text{cuBT}} \quad (23)$$

Sendo:

$W_{AT}$  a perda em W no enrolamento de alta tensão;

$W_{BT}$  a perda em W no enrolamento de baixa tensão;

$\delta_{AT}$  a densidade de corrente em A/mm<sup>2</sup> no enrolamento de alta tensão;

$\delta_{BT}$  a densidade de corrente em A/mm<sup>2</sup> no enrolamento de baixa tensão.

As perdas totais no cobre é então a soma das perdas nos dois enrolamentos.

$$W_{Tcu} = W_{AT} + W_{BT} \quad (24)$$

As perdas por efeito joule nos enrolamentos variam com o quadrado da densidade de corrente. Para reduzir essas perdas devemos escolher condutores com uma maior seção, mas isso aumenta o custo de produção.

Os enrolamentos também apresentam perdas por correntes parasitas, induzidas pelo fluxo de dispersão, porém estas perdas são bem menores que as perdas por efeito Joule (PICANÇO, 2006).

### 3. Considerações para o projeto

O transformador deveria ser construído com o material disponível na oficina de transformadores da EDAL. Foi realizado o levantamento do material disponível para construção do mesmo, tanto do maquinário a ser utilizado, como as bobinadeiras, quanto do material a ser usado no próprio transformador, como o núcleo e os fios dos enrolamentos. Foram constatados os seguintes pontos:

- **Impossibilidade de uso da bobinadeira de baixa tensão**

A bobinadeira de baixa tensão encontrava-se em péssimo estado de conservação impossibilitando o seu uso. Com isso não foi possível a utilização de barras de cobre na construção dos enrolamentos, o que teria conferido uma maior potência ao transformador, e também uma visualização mais real de como os enrolamentos de baixa tensão dos transformadores de maior potência são construídos.

- **Ausência de material para construção dos moldes dos enrolamentos**

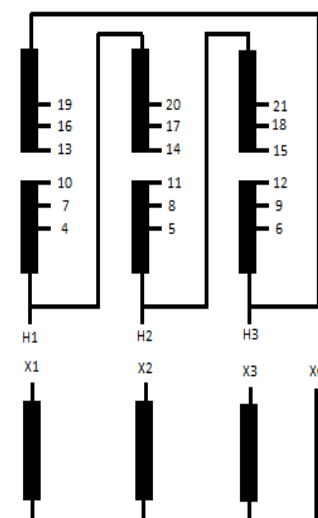
Não havia na oficina o material necessário para confecção dos moldes dos enrolamentos. Dessa forma os moldes não puderam ser construídos com papel

Kraft. Os cilindros dos moldes disponíveis de outros transformadores que por ventura poderiam ser usados, ou estavam muitos danificados, ou eram em número insuficiente ou diâmetro incompatível para construção dos enrolamentos. Após uma busca de materiais que pudessem substituir o papel Kraft como molde interno escolhemos usar como molde da bobina interna um cano de PVC de 100 mm de diâmetro.

- **Escolha do núcleo**

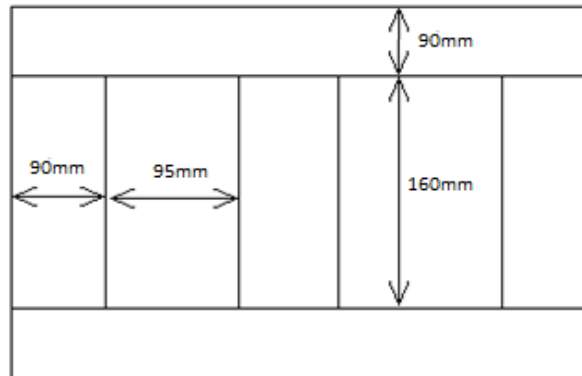
Os núcleos estavam disponíveis em vários tamanhos e potências. Foi escolhido o núcleo do tipo envolvido de um transformador de 30 kVA, da fabricante ITAIPU. Seguem na figura (5) as informações de placa sobre o transformador do qual foi retirado o núcleo.

Fabricante: ITAIPU					
Transformador Trifásico					
N. de série : 036755			Ano de fabricação: 1997		
Potência: 30 kVA			Norma: NBR 5440		
Impedância: 3,33 %			Tipo de óleo isolante: B		
ALTA TENSÃO			TERMINAIS: H1 H2 H3		
v	Pos.	Ligação Comutador			Lig.
13800	1	10-13	11-14	12-15	Δ
13200	2	13-7	14-8	15-9	
12600	3	7-16	8-17	9-18	
12000	4	16-4	17-5	18-6	
BAIXA TENSÃO			TERMINAIS: X0 X1 X2 X3		
V	ligação				
380 /220	Y				
Volume: 55 L			Massa total: 225 kg		

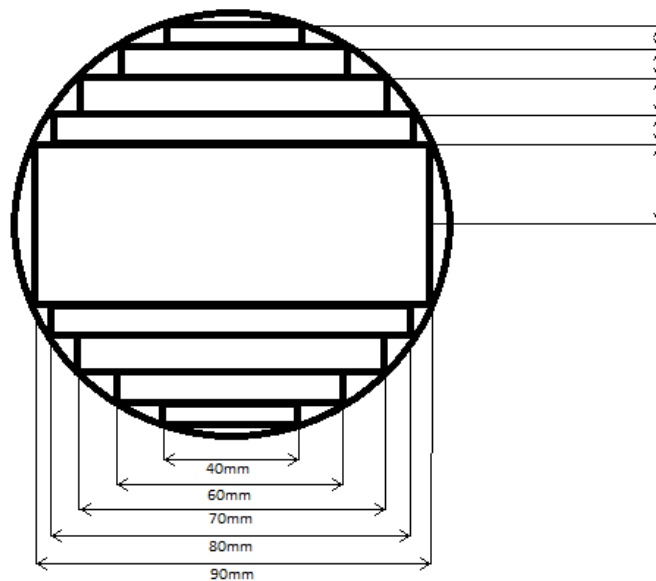


**Figura 5 - Dados de placa do transformador do qual foi retirado o núcleo**

As dimensões do núcleo escolhido são demonstradas nas figuras 4 e 5.



**Figura 6 - Dimensões do núcleo escolhido**



**Figura 7 - Dimensões da coluna do núcleo escolhido**

Com as dimensões do núcleo obtemos a área  $a$  da seção bruta do núcleo,  $S_{nb} = 65 \text{ cm}^2$ , usando a equação (9), com um fator de empilhamento de 0,92 obtemos a seção de ferro  $S_{fe} = 60 \text{ cm}^2$ .

A indução adotada para o núcleo,  $B_m$  para o cálculo das espiras do enrolamento primário foi de 1,55 T.

A massa total do núcleo é de 83,5 kg.

Com as dimensões do núcleo obtemos também as medidas do molde da bobina primária. O diâmetro com 100 mm e a altura com 170 mm.

- **Escolha dos níveis de tensão**

A tensão primária foi escolhida para ser a mesma do Laboratório de Alta Tensão da UFCG, 380 V. Os níveis de tensão adotados para o secundário foram 110 V e 220 V.

Tais níveis de tensão servem para determinação da relação de espiras entre os enrolamentos. A tensão final entre fases do transformador dependerá da forma como os bornes dos enrolamentos são ligados, além do modo como as fases serão conectadas, estrela-triângulo, triângulo-triângulo, etc.

- **Escolha da bitola dos fios do enrolamento**

Os fios utilizados para construção dos enrolamentos do transformador deveriam ser reaproveitados de bobinas danificadas de outros equipamentos. Por serem retirados de enrolamentos de alta tensão, 13,8 kV, os fios apresentam bitola reduzida. Além de em sua maioria estarem danificados devido a sinistros ocorridos nos equipamentos.

O fio adotado para construção do enrolamento foi 16 AWG. Que possui diâmetro de 1,34 mm e seção reta de 1,30 mm<sup>2</sup>, capacidade de corrente máxima de 3,9 A, porém usando uma densidade de corrente de 2 A/mm<sup>2</sup>, indicada para transformadores com a potencia desejada, a capacidade de condução é de apenas 2,6 A. Para aumentar a capacidade de condução as bobinas foram construídas com dois fios em paralelo.

Na tabela 4 são apresentadas as informações sobre os enrolamentos.

**Tabela 4 - Informações construtivas dos enrolamentos**

Enrolamento Primário		Enrolamento Secundário	
Tensão de linha (V)	380	Tensão de linha (V)	
		Tap 1	110
		Tap 2	220
Corrente de fase máxima	3,18	Corrente de fase máxima	5,5
Número de espiras	154,00	Número de Espiras	
		Tap 110 V	45 -50
		Tap 220 V	90 - 100

Valor do comprimento (m)	50,31		Valor do comprimento (m)	
			Tap 1	17
			Tap 2	35
Número de camadas	2,58		Número de camadas	1,68
Bitola do condutor	1,30		Bitola do condutor	1,30
número de condutores	2,00		número de condutores	2,00
Bitola enrolamento	2,60		Bitola enrolamento	2,60
Densidade de corrente (A/mm <sup>2</sup> )	1,92		Densidade de corrente (A/mm <sup>2</sup> )	2,12
Massa de cobre (kg/enrolamento)	1,18		Massa de cobre (kg/enrolamento)	0,82
Perdas por enrolamento	4,70		Perdas por enrolamento	9,76
P. nos enrolamentos (W)	14,09		P. nos enrolamentos	29,28
P. totais no cobre (W)	43,37			

#### 4. Construção



**Figura 8 - Bobinas danificadas retiradas do transformador**



**Figura 9 - Núcleo do transformador escolhido**



**Figura 10 - Arranjo montado para enrolar as bobinas**



**Figura 11 - Enrolamento das bobinas**

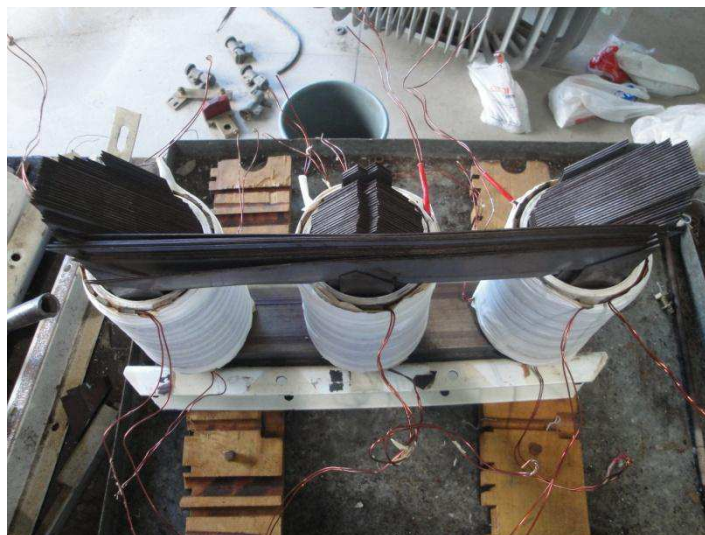


**Figura 12 - Bobina Primária**





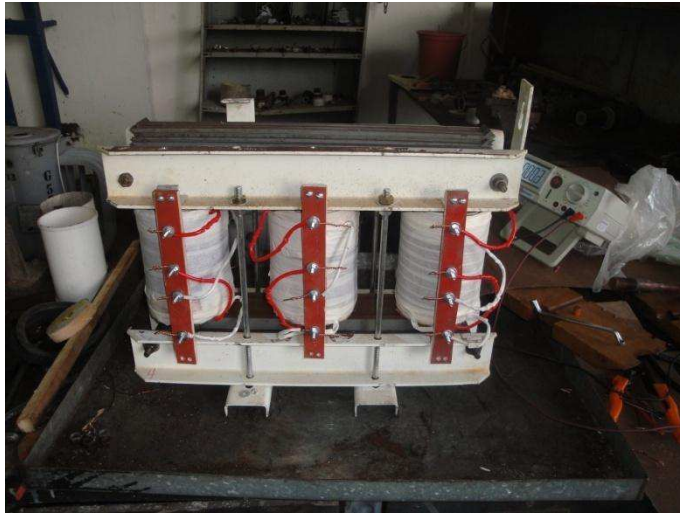
**Figura 13 - Posicionamento das bobinas no núcleo**



**Figura 14 - Fechamento da Culatra superior**



**Figura 15 - Lado primário pronto**



**Figura 16 - Lado Secundário pronto**



**Figura 17 - Teste a vazio aplicando individualmente 220 V a cada fase**



**Figura 18 - Ligação Triângulo – Triângulo alimentando carga em Triângulo**

## 5. Alterações no Guia de Experimentos

Foi realizado um estudo no guia de experimentos com transformadores da disciplina Equipamentos Elétricos. Com o intuito de avaliar as modificações necessárias a serem realizadas no guia para adapta-lo ao transformador didático. Nesse estudo foi avaliado o embasamento teórico para os experimentos, os tipos de experimentos propostos e a formatação geral do guia. As alterações realizadas são apresentadas a seguir:

### 5.1 Formatação

Foi acrescentado um sumário para uma melhor orientação dos alunos quanto ao guia de experimentos. A estrutura de tópicos foi alterada assim como a numeração e a formatação de algumas das figuras e das fórmulas, visando uma maior organização do guia.

### 5.2 Operação em vazio

Ao tópico **OPERAÇÃO EM VAZIO**, foi acrescentado o princípio de funcionamento segundo MARTIGNONI, 1997. O parágrafo que fazia menção as perdas nos transformadores foi substituído por Perdas ao vazio no qual se manteve apenas as explicações sobre as perdas nessa condição de operação.

### 5.3 Operação em carga

Foi acrescentado o tópico **OPERAÇÃO EM CARGA**, os princípios de funcionamento no qual se explicou o funcionamento em carga explicitando a relação entre a corrente fornecida pelo secundário e a corrente absorvida pelo primário (MARTIGNONI,1997).

### 5.4 Tipos de Ligações

Foi acrescentado o tópico 7, **TIPOS DE LIGAÇÕES**, no qual se explicou as características de tensão e corrente e linha e de fases entre as diferentes formas de ligação dos enrolamentos, OLIVEIRA, 1984.

### 5.5 Deslocamento Angular

Foi acrescentado o tópico 8, **DESLOCAMENTO ANGULAR**, explicando a relação entre os deslocamentos de fase e as diferentes ligações. Foi detalhado

neste tópico um método para construção do triângulo de tensões concatenadas dos enrolamentos (MARTIGNONI,2006). Assim como a explicação sobre o ensaio para determinação do defasamento, usando a tabela fornecida pela NBR5480 e a determinação do defasamento através da construção do triângulo de tensões das ligações (OLIVEIRA, 1984).

## **5.6 Descrição do equipamento**

Foi acrescentado o tópico 9 , **DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO**, onde são apresentadas as informações técnicas e os esquemas de ligação dos terminais no transformador usado nos experimentos.

## **5.7 Tarefa 1 – Inspeção em um transformador de distribuição**

No guia experimentos foi retirada a tarefa 1, pois esta apenas tinha relação com o transformador de distribuição.

## **5.8 Tarefa 2 – Determinação do defasamento angular**

No guia de experimentos a tarefa 2 passou a ser a determinação do defasamento angular, na qual são modificadas as conexões entre os terminais do transformador e são realizadas medições para classificar as ligações em grupos segundo a NBR 5480 e assim determinar seu defasamento angular.

## 6. Conclusão

A execução deste trabalho foi de grande valia para o aprofundamento sobre o conhecimento de transformadores. Possibilitou uma união entre os conhecimentos teóricos e a prática na construção. Demonstrou na prática como falta de experiência pode dificultar a execução de um trabalho, e da dificuldade que existe quanto à obtenção de materiais específicos para execução de certo projeto e como essa dificuldade modifica os parâmetros e a execução do próprio projeto.

## 7. Referências

- [1] MARTIGNONI, A. "Transformadores". 8. ed. São Paulo: Globo, 1991.
- [2] OLIVEIRA, José Carlos de, COGO, João Roberto e ABREU, José Policarpo G. de. "Transformadores: Teoria e Ensaio". São Paulo: Edgard Blucher, 1984.
- [3] MARTIN, J.C. "La escuela del técnico electricista: teoría, calculo y construcción de transformadores". Vol. VII. Editorial Labor, S.A. 1957.
- [4] ABB, "Transformer Handbook". Switzerland, 2004.
- [5] PICANÇO, Alessandra F. "Avaliação Econômica de Transformadores de Distribuição com Base no Carregamento e Eficiência Energética". Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Itajubá, Abril, 2006. p. 1-42.
- [6] NBR 5380 Transformador de Potência – Método de Ensaio, ABNT, Rio de Janeiro, Brasil, 1993.
- [7] NBR 5458 Transformador de Potência – Terminologia, ABNT, Rio de Janeiro, Brasil, 1986.
- [8] NBR 5440 Transformadores para redes aéreas de distribuição - Padronização, ABNT, Rio de Janeiro, Brasil, 1999.
- [9] Fernandes, D. A.; Ferreira, H. A.; Costa, Edson Guedes da. " Guia de Experimentos Com Transformador de Distribuição" . Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba. Outubro, 2008.

# **Anexo**

# **Guia de Experimento**

**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**

**Autoria:**

Darlan Alexandria Fernades  
Hélvio Alves Ferreira  
Prof. Edson Guedes da Costa

**Revisão de 2012:**

José Gonçalves de Lima Junior  
Prof. Edson Guedes da Costa



# SUMÁRIO

1. Introdução .....	1
2. Curva $\lambda_{\max}$ versus $I_{\max}$ do Núcleo do Transformador.....	4
3. Detecção de Polaridade .....	4
4. Operação a vazio .....	6
4.1 Princípio de funcionamento .....	6
4.2 Perdas a vazio .....	7
4.3 Corrente a Vazio .....	9
4.4 Relação de Transformação.....	10
5. Operação em carga .....	12
5.1 Princípio de funcionamento .....	12
5.2 Operação em curto .....	13
5.3 Perdas no Cobre .....	13
5.4 Determinação de Valores de Resistência, Impedância e Reatância.....	14
6. Verificação do Isolamento.....	15
6.1 Solicitações de Isolamento.....	15
6.2 Resistência de Isolamento.....	16
7. Tipos de conexões .....	19
8. Deslocamento angular .....	20
9. Descrição do equipamento.....	23
Experimentos .....	24

# Transformadores - Uma Breve Revisão

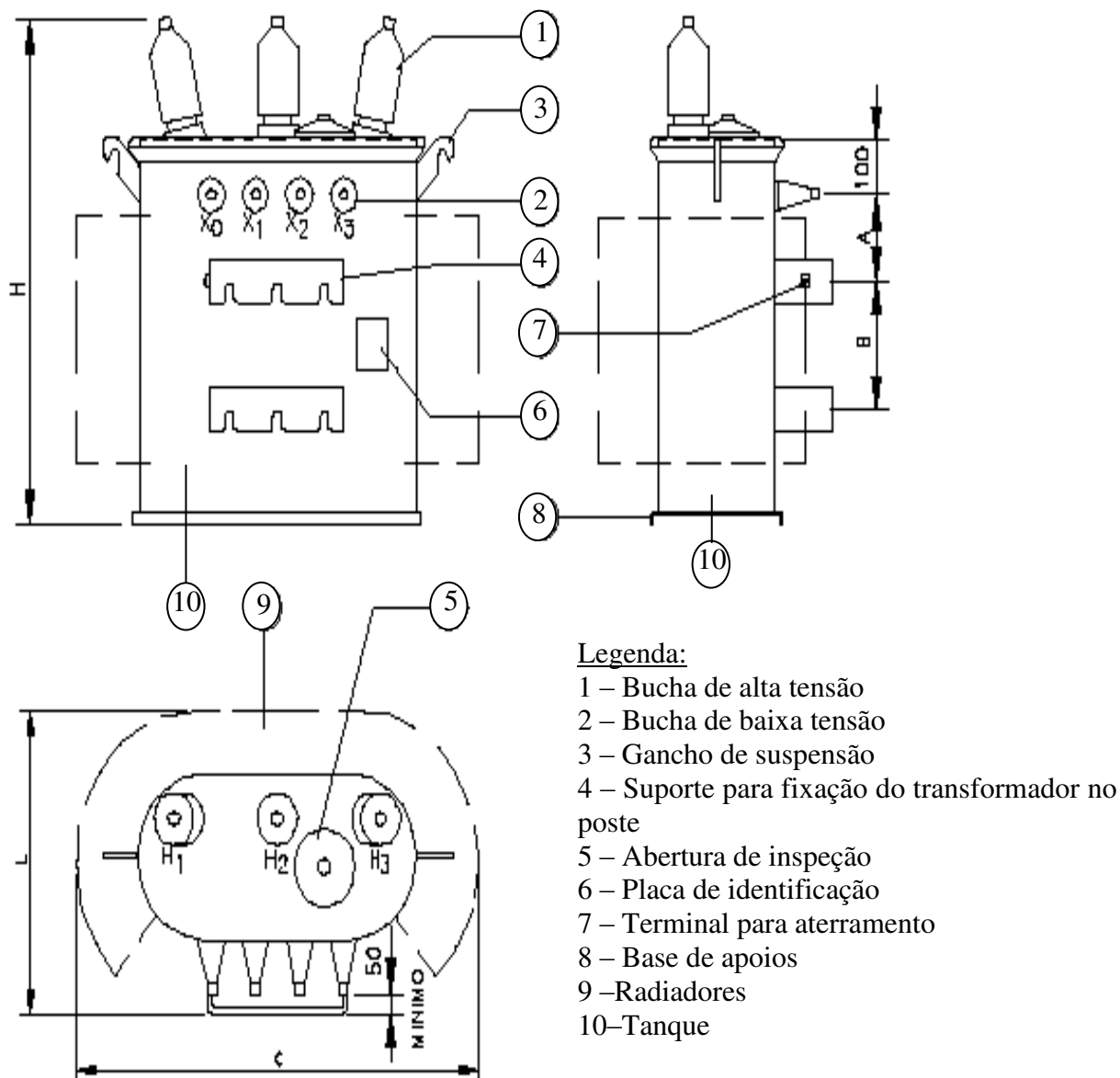
## 1. Introdução

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 com a 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.



**Figura 19 - Esboço de um Transformador de Distribuição**

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. Sequencia 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, são propostos os ensaios de rotina 2,3,4,5,7 e 8 citados acima, organizados em sete tarefas. Primeiramente são apresentados os aspectos teóricos dos ensaios divididos em sete partes: Curva  $\lambda$ -i, Detecção de Polaridade, Operação a Vazio, Operação em Curto-Circuito e Verificação do Isolamento Tipos de Ligações e Deslocamento angular. Na sequencia 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 H1-H2 como positivo ou negativo. Se fosse medida no mesmo instante as correntes nos bornes H1 (do primário  $I_1$ ) e X<sub>1</sub> (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 H1 e X<sub>1</sub>, 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.

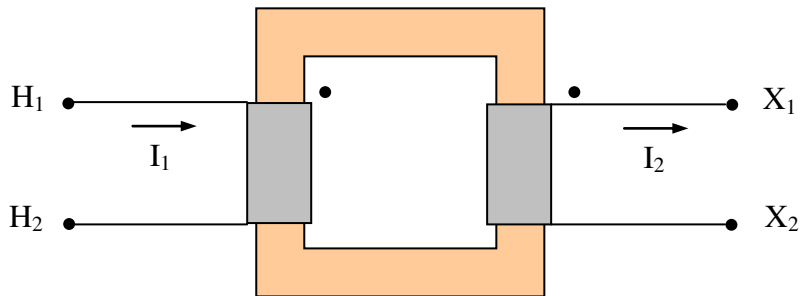


Figura 20 - Polaridade Subtrativa

### 3.2 - Polaridade Aditiva

Deve-se fixar um ponto qualquer, por exemplo, nos terminais H1-H2 como positivo ou negativo. Se fosse medida no mesmo instante as correntes nos bornes H1 (do primário  $I_1$ ) e X1 (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 H1 e X1, têm 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).

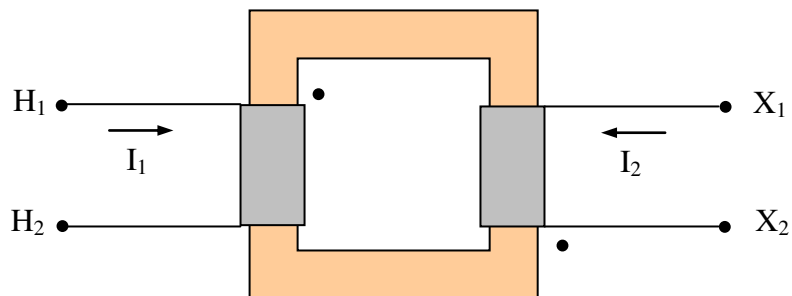


Figura 21 – Polaridade Aditiva

### 3.3 - Método da Corrente Alternada

A polaridade instantânea relativa é determinada através do método mostrado na Figura 4, 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 Kirchoff). 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.

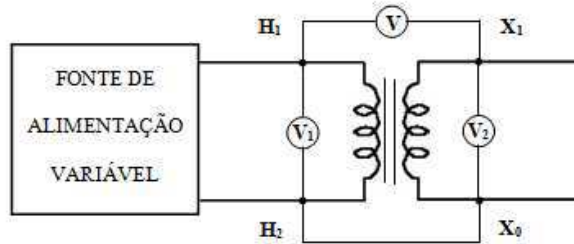


Figura 4 - Teste de polaridade

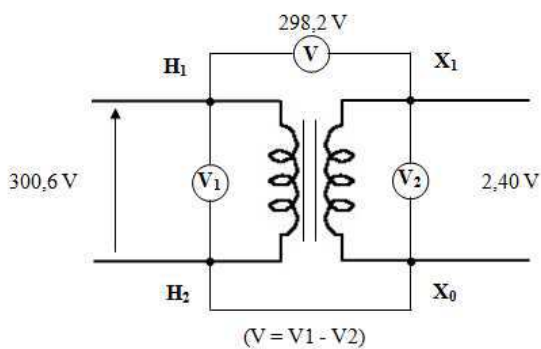


Figura 5 - Polaridade subtrativa

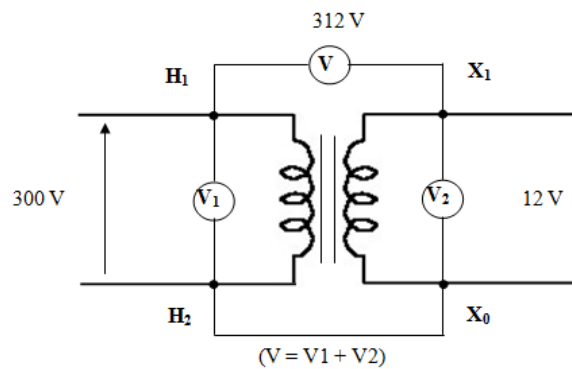
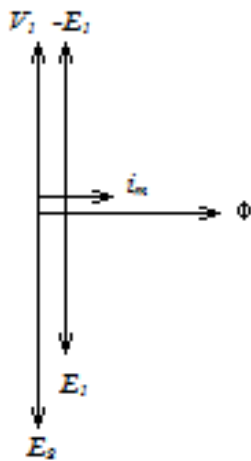


Figura 6 - Polaridade Aditiva

## 4. Operação a vazio

### 4.1 Princípio de funcionamento

Consideremos um transformador ideal. Ao aplicarmos uma tensão alternada nos extremos do enrolamento primário, com o enrolamento secundário aberto, o primário será percorrido por uma corrente chamada corrente a vazio,  $I_0$ . Esta corrente irá produzir um fluxo que irá induzir no enrolamento primário uma f.e.m. de magnitude igual a tensão aplicada e atrasada de 90 graus com relação ao fluxo magnético que a produziu.



$$E_1 = 10^{-8} \cdot 4,44 \cdot f \cdot \Phi_m \cdot N_1 \quad (1)$$

$$E_2 = 10^{-8} \cdot 4,44 \cdot f \cdot \Phi_m \cdot N_2 \quad (2)$$

Sendo:  $E_1, E_2$  são as f.e.m. primária e secundária (V)

$f$  é a frequência da rede (Hz)

$\Phi_m$  é o fluxo nos enrolamentos (Gauss)

$N_1, N_2$  São as espiras do primário e do secundário

**Figura 7 - Diagrama vetorial do funcionamento a vazio**

Na figura 7 é mostrada a corrente a vazio, considerando que toda corrente a vazio é usada para gerar o campo magnético. Como se pode observar, a força eletromotriz  $E_1$ , se opõe a tensão aplicada  $V_1$  agindo como uma força contra eletromotriz (f.c.e.m), o que equilibra o sistema.

#### 4.2 Perdas a vazio

As perdas a vazio em transformadores devem-se 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:

$$P_H = K_S B^{1,6} f, \quad (3)$$

Sendo:  $P_H$  são as perdas pelo efeito de histerese, em watts por quilograma de núcleo;

$K_S$  é o coeficiente de Steimmetz (depende do tipo de material usado no núcleo);

$B$  é o valor máximo de indução no núcleo;

$f$  é a frequência em Hz.



Na tabela 1 são dados valores de  $K_s$  para diversos materiais:

Tabela 1- Valores de  $K_s$  para diversos materiais

MATERIAL	KS
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.

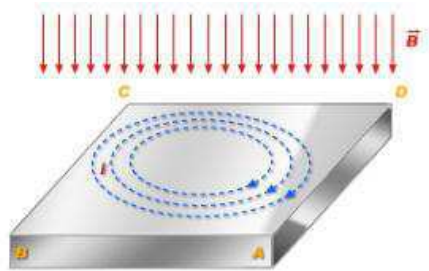


Figura 8 - Campo incidindo sobre massa Metálica

As perdas devido ao efeito das correntes parasitas podem ser calculadas pela expressão:

$$P_F = 2,2 f^2 B^2 d^2 10^{-3}, \quad (4)$$

Sendo:  $P_f$  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;

$d$  é a espessura da chapa em milímetros.

Da expressão (4), 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:

$$P_o = P_F + P_H \quad (5)$$

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.

#### 4.3 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.

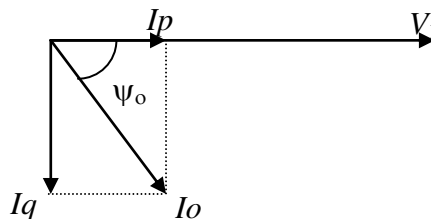


Figura 9 - Diagrama fasorial para o transformador a vazio

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

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

$$P_o = VI_o \cos \psi_o \quad (6)$$

Sendo:  $P_o$  é a potência ativa obtida por leitura de instrumentos durante o ensaio;

$V$  é a tensão aplicada, que deverá ser a nominal do enrolamento.

Com a tensão aplicada,  $V$ , de mesmo valor da nominal os resultados encontrados no ensaio correspondam ao regime nominal de operação.

Do diagrama da Figura 9, tem-se:

$$I_o \cos \psi_o = I_p \quad (7)$$

Assim,

$$I_p = \frac{P_o}{V} \quad (8)$$

2. Segundo o diagrama fasorial da Figura 9,  $I_q$  é dada por  $\sqrt{I_o^2 - I_p^2}$ , sendo  $I_o$  medida durante o ensaio e  $I_p$  calculada pela Expressão 8.

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

$$\cos \psi_o = \frac{P_o}{VI_o} \quad (9)$$

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  $\psi_o$ .

#### 4.4 Relação de Transformação

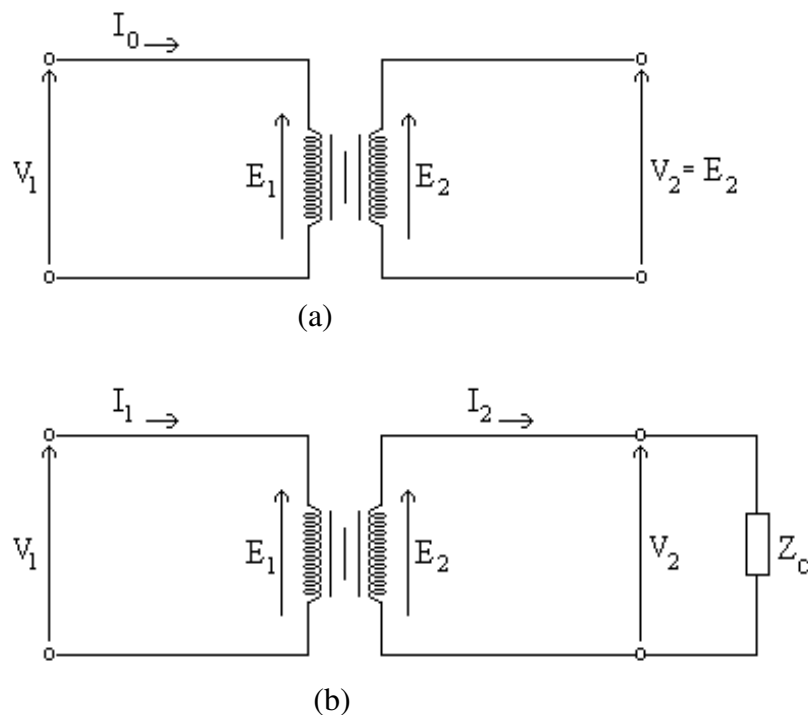
O ensaio a vazio visa também a determinação da relação de transformação, ou seja, a proporção que existe entre a tensão ou corrente do primário e a tensão ou corrente do secundário, respectivamente. Pode-se considerar a relação de transformação de duas formas: a relação teórica e a relação prática.

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

$$K_T = \frac{E_1}{E_2} \quad (10)$$

Em que  $E_1$  e  $E_2$  são os valores eficazes das forças eletromotrizes induzidas nos enrolamentos primário e secundário, respectivamente. Veja a Figura 28a.

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 10 - (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:

$$K = \frac{V_1}{V_2} \quad (11)$$

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 carga

### 5.1 Princípio de funcionamento

Considerando ainda um transformador ideal, analisemos agora seu funcionamento quando há uma impedância indutiva ligada ao secundário do transformador. Dessa forma o enrolamento secundário será percorrido por uma corrente  $I_2$  que esta atrasada da f.e.m.  $E_2$  por um ângulo  $\varphi_2$  de característica da carga.

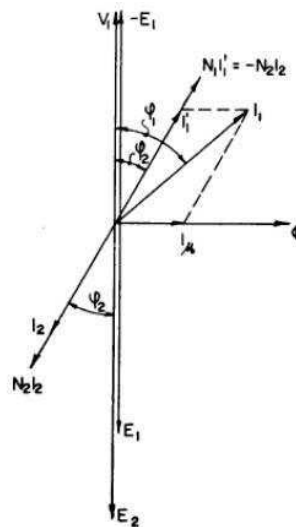


Figura 11 - Diagrama vetorial funcionamento em carga

A corrente  $I_2$  gera no núcleo uma força magnetomotriz de magnitude  $N_2I_2$  em fase com a corrente que a originou,  $I_2$ . Essa força magnetomotriz age no sentido de desmagnetizar o núcleo, alterando o fluxo criado pela força magnetomotriz de magnetização  $N_1I_m$ . Dessa forma alteram-se as forças eletromotrizes induzidas nos dois

enrolamentos. O que gera um desequilíbrio entre a força contra eletromotriz  $E_1$  e a tensão aplicada  $V_1$ . Para compensar esse desequilíbrio, o enrolamento primário tende a absolver uma corrente extra  $I'_1$ , cuja força magnetomotriz se destina a equilibrar a força magnetomotriz  $N_2I_2$ . A corrente total do secundário será então a soma da corrente  $I'_1$  com a corrente de excitação.

## 5.2 Operação em curto

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.

## 5.3 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:

$$P_J = r_1 I_1^2 + r_2 I_2^2 \quad (12)$$

Sendo:  $r_1$  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:

$$P_{cc} = P_A + P_J \quad (13)$$

Sendo:  $P_{cc}$  é a potência lida no ensaio;

$P_A$  são as perdas adicionais;

$P_J$  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:

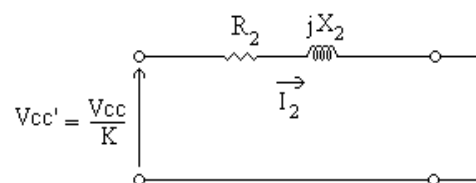
$$P_A \cong 15\% \text{ a } 20\% P_{cc} \quad (14)$$

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 12.

#### 5.4 Determinação de Valores de Resistência, Impedância e Reatância

Mediante o 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 12 - Circuito equivalente para o transformador em curto-circuito**

Na Figura 30,  $R_2$  e  $X_2$  são os valores da resistência e reatância equivalentes vistas do primário (lado de alta tensão, onde estão os instrumentos). Com os valores medidos a partir dos valores medidos pode-se calcular diretamente:

- fator de potência

$$\cos \psi_o = \frac{P_J}{V_{cc} I_{cc}} ; \quad (15)$$

- resistência equivalente  $R_2$

$$R_2 = \frac{P_J}{I_{cc}^2} , \quad (16)$$

- reatância equivalente  $X_2$

$$X_2 = \frac{V_{cc} \cdot \text{sen } \psi_o}{I_{cc}} . \quad (17)$$

Em que  $P_J$  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 (H1, H2, H3) e os terminais de baixa tensão (X1, X2, X3). 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, com a 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

$$R_{i75^{\circ}C} = \frac{V_i}{\frac{S_n}{100} + 100}; \quad (18)$$

b) Transformadores imersos em óleo

$$R_{i75^{\circ}C} = \frac{2,65 V_i}{\sqrt{S_n / f}}, \quad (19)$$

em que:  $R_{i75^{\circ}C}$  é a resistência mínima do isolamento a 75° 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°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. Por exemplo: Qual a menor resistência de isolamento admissível a 25° 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 19:

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

Pela Tabela 2, o fator de correção será 32, logo:

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

Tabela 2 - 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. Tipos de conexões

Em um transformador trifásico os enrolamentos podem estar conectados de 3 formas diferentes. Estrela também chamada Y, Triângulo também chamada Delta, Ziguezague. Dependendo das formas como os enrolamentos são ligados, teremos diferentes relações entre a alta tensão e a baixa tensão. Cada ligação apresenta uma característica diferente e são combinadas de acordo com aplicação que se destina o transformador.

### Ligação Delta

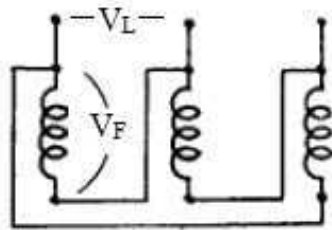


Figura 13 - Ligação Delta

A corrente de fase é  $1/\sqrt{3}$  da corrente de linha.

$$I_f = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot I_L \quad (20)$$

A tensão de fase é igual a tensão de linha.

$$V_f = V_L \quad (21)$$

### Ligação Triângulo ou estrela

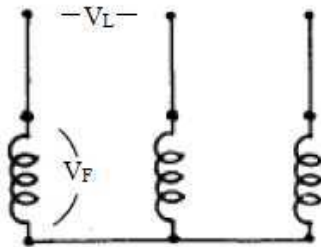


Figura 14 - Conexão Y

A Tensão de fase é  $1/\sqrt{3}$  da tensão de linha.

$$V_f = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot V_L \quad (22)$$

A tensão de fase é igual a tensão de linha.

$$I_f = I_L \quad (23)$$

### Ligação Ziguezague

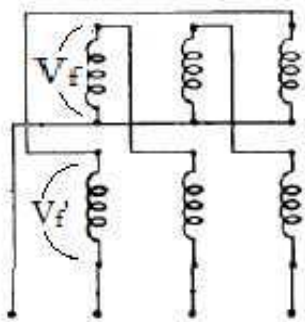


Figura 15 - Conexão ziguezague

A Relação entre as tensões segue a relação 21.

$$V_1 = 0,865 \cdot \frac{N_1}{N_2} \cdot V_2 \quad (21)$$

## 8. Deslocamento angular

O tipo de conexão também define o deslocamento angular entre as fases dos enrolamentos primário e secundário. Ter conhecimento sobre o defasamento angular entre a alta e a baixa é essencial para a operação em paralelo de transformadores.

A determinação do defasamento angular pode ser feita da seguinte forma. Ligan-se entre si os terminais H1 – X1 e medem-se as tensões entre os vários pares de terminais conforme indica a tabela da NBR na figura 19, que também indica as relações entre as medidas e os defasamentos angulares.

Outra maneira de determinar o defasamento angular se da pela construção dos triângulos de tensões. Desde que se conheça as polaridades dos enrolamentos e as ligações internas do transformador.

Convencionou-se construir os triângulos de tensões da seguinte forma. Primeiro é traçado o triângulo de tensões da alta tensão com o vértice da alta tensão H2, referente a fase central, para cima. O vértice H1 em adiantamento e o vértice H3 em atraso.

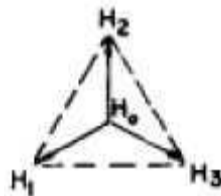


Figura 16 - Triângulo de tensões do lado de alta

As normas brasileiras definem que as f.e.m. dos enrolamentos na mesma coluna devem ter o mesmo sentido, enrolamentos com polaridade subtrativa. Dessa forma deve haver uma concordância de polaridade entre os vetores que representam as tensões da mesma coluna.

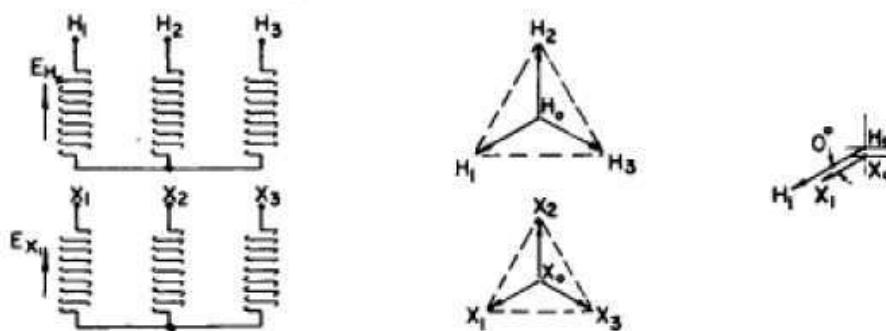
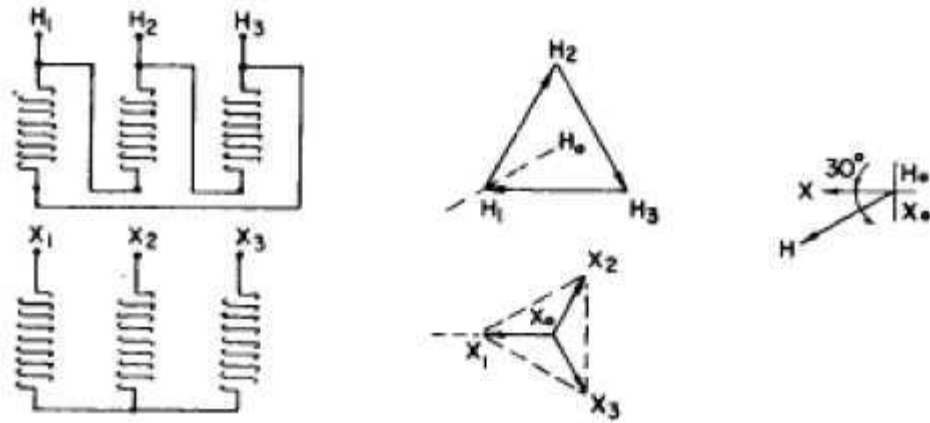


Figura 17 - Esquema de ligação e diagrama fasorial da ligação Estrela - Estrela

Tomemos como exemplo a ligação da figura 17. Essa é uma ligação estrela – estrela, ou Y – Y. Os vetores da fase 1, H1 e X1 estão orientados no mesmo sentido. Sendo assim não há deslocamento angular entre os vetores  $\overline{H1H0}$  e  $\overline{X1X0}$  logo essa ligação não gera um deslocamento angular.



**Figura 18 - Esquema de ligação e diagrama fasorial da ligação delta - estrela**

Agora vejamos a ligação delta – estrela ou triângulo – estrela. Primeiramente são traçados os vetores H1, H2, H3 em seguida são traçados os vetores X1, X2, X3 em concordância com as tensões das colunas. Podemos perceber que há um atraso do vetor  $\overline{X1X0}$  com relação ao vetor  $\overline{H1H0}$ . Sendo assim o triângulo H1H2H3 é deslocado de 30° em relação a estrela. Logo essa ligação gera um deslocamento entre fases de 30°.

Em alguns casos o deslocamento angular dos transformadores é indicado por um número que representa as horas, cada hora equivale a 30 graus.

$$\text{Deslocamento} = \text{numero de horas} * 30$$

Sendo assim um transformador indicado por Yd1 terá uma ligação estrela –triângulo com um defasamento de 30 graus.

	Deslocamento angular	Diagrama de ligações	Medição de verificação
Grupo 1 - Deslocamento angular 0°	<p>Ligação triângulo-triângulo</p>		<p>Ligar - H1 a X1 Medir - H2 X2; H3 X2; H1 H2; H2 X3; H3 X3</p>
	<p>Ligação estrela-estrela</p>		<p>Relações de tensões (1) H2 X3 = H3 X2 (2) H2 X2 &lt; H1 H2 (3) H2 X2 &lt; H2 X3 (4) H2 X2 = H3 X3</p>
	<p>Ligação triângulo-zigzague</p>		<p>Ligar - H1 a X1 Medir - H2 X2; H3 X3 H1 H3; H2 X2; H2 X3</p>
Grupo 2 - Deslocamento angular 30°	<p>Ligação triângulo-estrela</p>		<p>Ligar - H1 a X1 Medir - H3 X2; H3 X3 H1 H3; H2 X2; H2 X3</p>
	<p>Ligação estrela-triângulo</p>		<p>Relações de tensões (1) H2 X2 = H3 X3 (2) H3 X2 &lt; H1 H3 (3) H2 X2 &lt; H2 X3 (4) H2 X2 &lt; H1 H3</p>
	<p>Ligação estrela-zigzague</p>		<p>Relações de tensões (1) H2 X2 = H3 X3 (2) H3 X2 &lt; H1 H3 (3) H2 X2 &lt; H2 X3 (4) H2 X2 &lt; H1 H3</p>
		<p>Transformadores trifásicos com derivação</p>	

Figura 19 - Tabela da NBR 5480 para esquemas de ligações e conexões para teste de defasamento angular

## 9. Descrição do equipamento

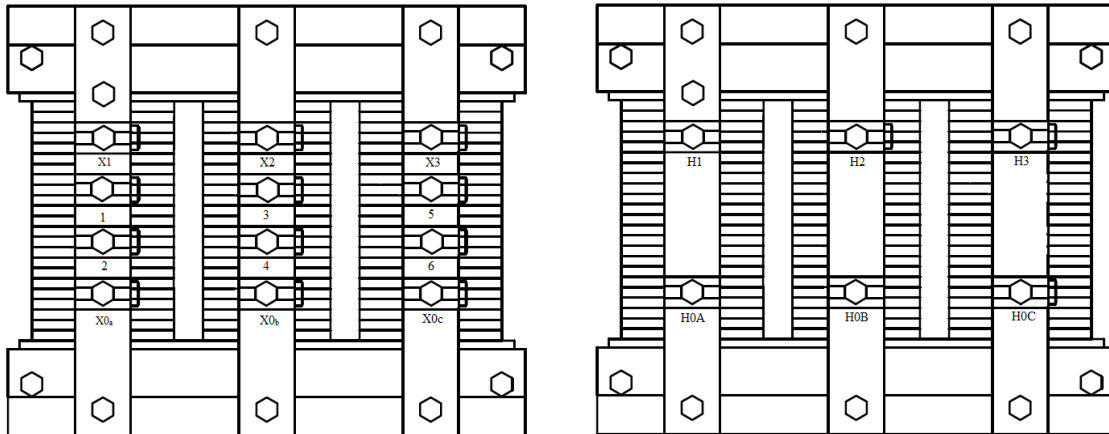


Figura 20 - Vista secundário e primário do transformador

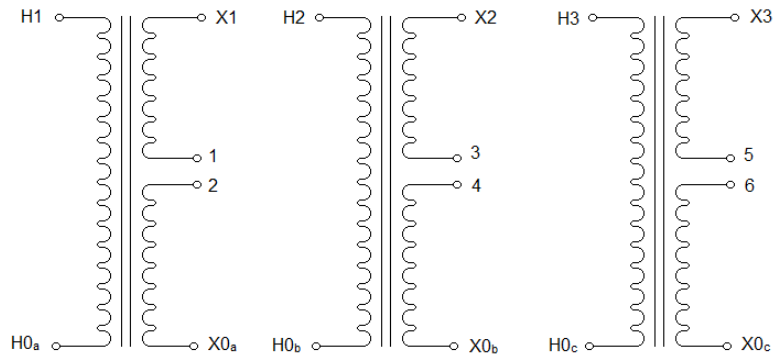


Figura 21 - Diagrama de conexão dos enrolamentos

### Informações técnicas:

Tensão máxima de fase (Primário): 380 V

Número de espiras (primário): 154

Tensão máxima de fase (Secundário): 220 V

Corrente Máxima de fase ( Secundário): 5,5 A

Classe de Tensão: 0,6 kV

Massa: 89,5 kg

### Atenção:

*A corrente de fase não pode ultrapassar 5.5 A sobre risco de danificar os enrolamentos.*

*Caso a tensão máxima de fase no primário seja ultrapassada podemos ter níveis perigosos de tensão no secundário.*



# Experimentos

## TAREFA 01 – 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.

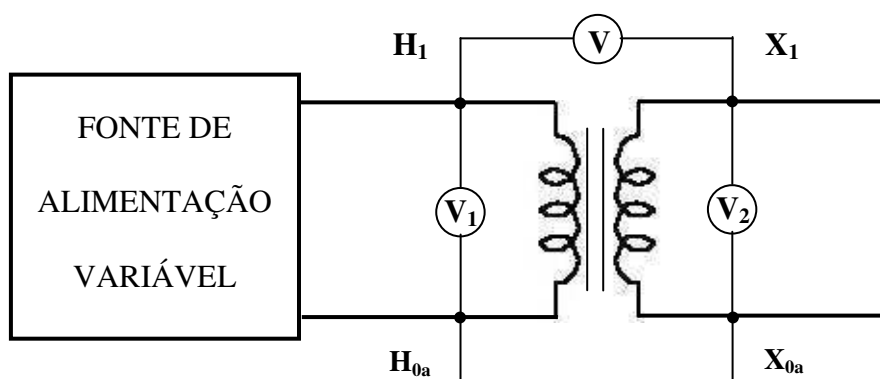


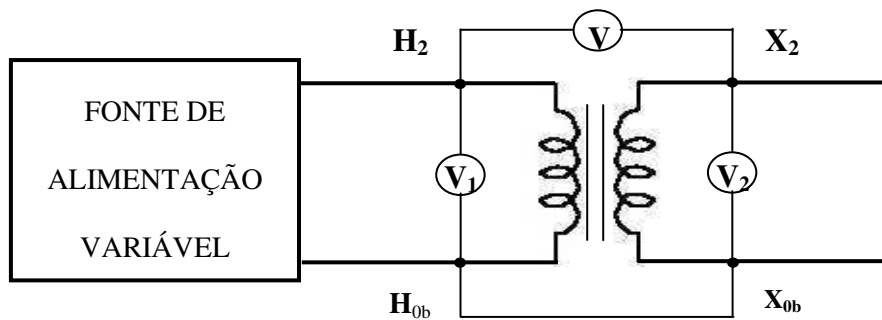
Figura 22 - Esquema elétrico das ligações para identificar a polaridade da fase A.

Preencha a tabela 3 abaixo para o valor de V1 já fixado.

**Tabela 5 - Medições na fase A**

V1 (volts)	V (volts)	V2 (volts)
300		

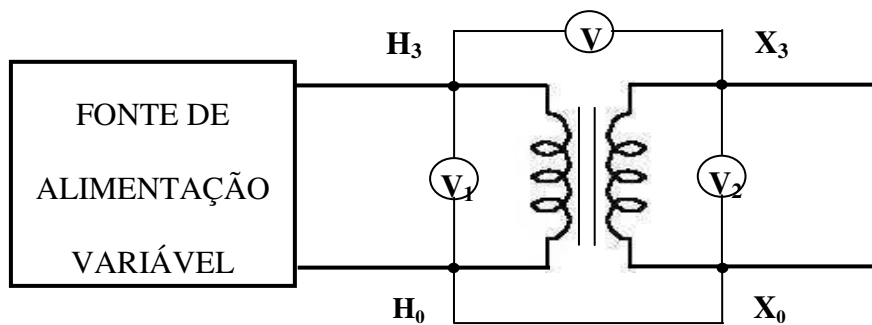
Repita os procedimentos a e b para as fases 2 e 3 do mesmo transformador. As figuras abaixo indicam como devem ser feitas as conexões.



**Figura 23 - Esquema elétrico das ligações para identificar a polaridade da fase B.**

**Tabela 6 - Medições na fase B**

V1 (volts)	V (volts)	V2 (volts)
300		



**Figura 24 - Esquema elétrico das ligações para identificar a polaridade da fase C.**

**Tabela 7 - Medições na fase C**

V1 (volts)	V (volts)	V2 (volts)
300		

#### 4. Avaliação

Para cada fase onde foram feitas as medições (Tabelas 7, 8 e 9), 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 02 – Determinação do defasamento angular

##### 1. Objetivo

Este experimento tem por objetivo familiarizar os alunos com os diferentes tipos de ligações e determinar o grupo de defasamento a qual elas pertencem.

##### 2. Materiais e Equipamentos Utilizados

Transformador de didático;  
Fonte de alimentação;  
2 voltímetros.

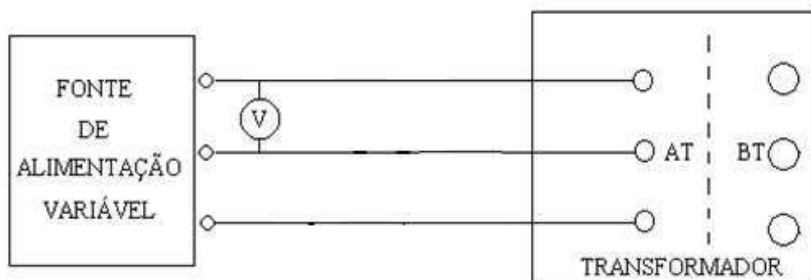
##### 3. Procedimentos

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

Conforme a tabela 19, conecte os terminais do transformador de modo a realizar a conexão delta-delta.

Feche o curto entre os terminais  $H_1$  e  $X_1$ .

Ligar o transformador a uma fonte de tensão variável, sob frequência nominal, alimentando-o pelo lado de alta tensão conforme a figura 25 e aplique uma tensão de 100 V entre as fases.



**Figura 25 - Ligação para o ensaio de defasamento**

Preencha a tabela.

**Tabela 8**

GRANDEZA	Valor lido
$V_{H1H3}$	
$V_{H3X3}$	
$V_{H2X3}$	
$V_{H3X2}$	

Retire a alimentação do transformador e conforme a tabela 19 realize a ligação delta-estrela. Repita os procedimentos anteriores e preencha a tabela.

**Tabela 9**

GRANDEZA	Valor lido
$V_{H1H3}$	
$V_{H3X3}$	
$V_{H2X3}$	
$V_{H3X2}$	

Retire a alimentação do transformador e conforme a tabela 19 realize a ligação estrela-zigzag. Repita os procedimentos anteriores e preencha a tabela.

**Tabela 10**

GRANDEZA	Valor lido
$V_{H1H3}$	
$V_{H3X3}$	
$V_{H2X3}$	
$V_{H3X2}$	

Retire a alimentação do transformador e conforme a figura 26 realize a ligação estrela - delta. Repita os procedimentos anteriores e preencha a tabela.

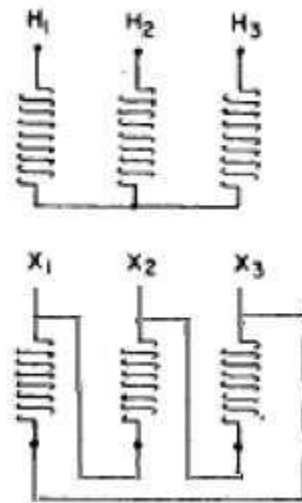


Figura 26 - Ligação estrela - delta

Tabela 11

GRANDEZA	Valor lido
$V_{H1H3}$	
$V_{H3X3}$	
$V_{H2X3}$	
$V_{H3X2}$	

#### 4. Avaliação

Classifique, segundo a tabela 19, quando for possível, os grupos a que pertencem a ligações. Identificando a ligações e o defasamento como foi explicado no tópico 8.

Construa o diagrama de tensões das ligações. Através do diagrama de tensões identifique o defasamento das ligações.

Qual a vantagem de se ter transformadores de apenas dois grupos de defasamento no sistema (padronização).

## 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;  
Fonte de alimentação;  
Voltímetro;  
Amperímetro.

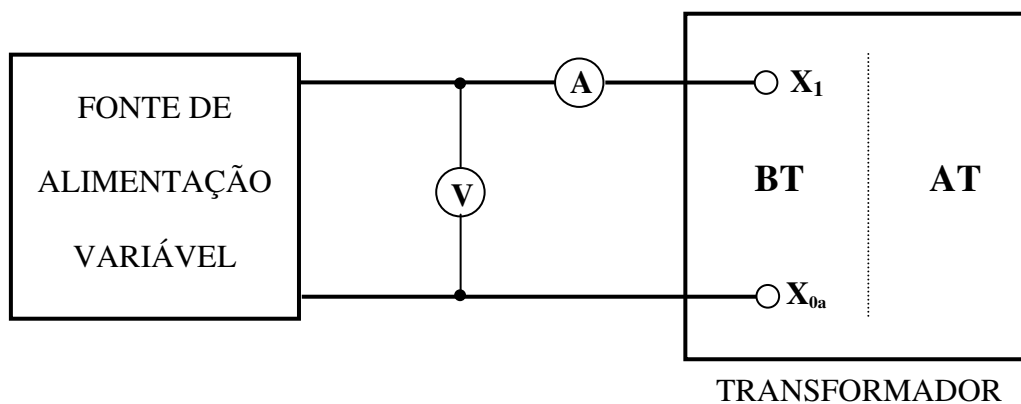
### 3. Procedimentos

**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 voltímetros 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 (X1-X0) do transformador e medir os valores de corrente, anotando-os na tabela 3.1. As conexões devem ser feitas de acordo com a figura 27

Repita o mesmo procedimento para as fases 2 e 3 preenchendo as respectivas tabelas.

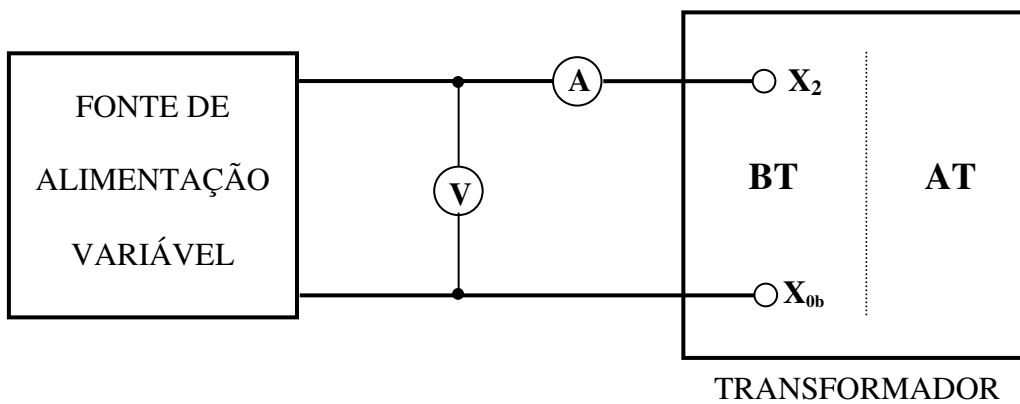


**Figura 27 - Conexão para se medir a tensão e corrente no lado de baixa na fase 1 do transformador.**

**Tabela 12 - Medição de corrente na fase X1**

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 enrolamento.

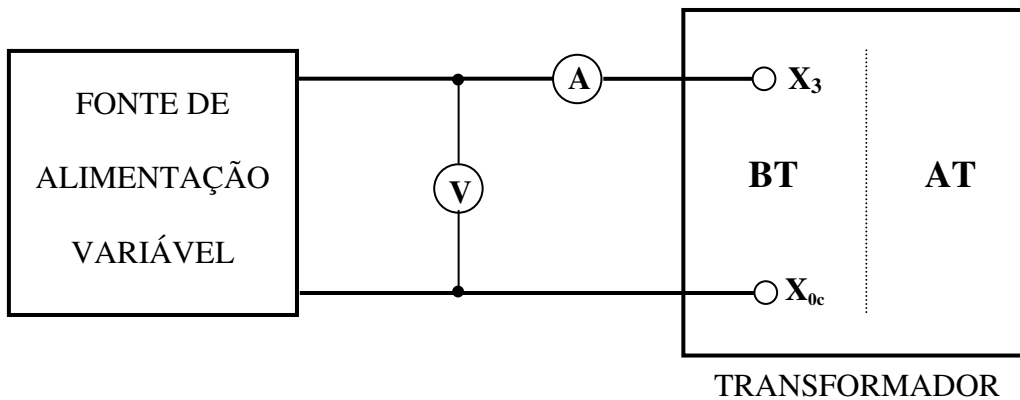


**Figura 28 - Conexão para se medir a tensão e corrente no lado de baixa na fase 2 do transformador.**

**Tabela 13 - medição de corrente na fase X2**

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 29 - Conexão para se medir a tensão e corrente no lado de baixa na fase 3 do transformador.**



**Tabela 14 - medição de corrente na fase X3**

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 de corrente suportado pela 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:

$$\phi = \phi_m \text{ sen}(\omega t), \quad (3.2)$$

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 4 – Corrente a Vazio e Medição de Perdas

### 1. Objetivo

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

### 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.

Conforme a tabela 19 conecte os terminais do transformador de modo a realizar a conexão delta-estrela.

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 da figura 30:

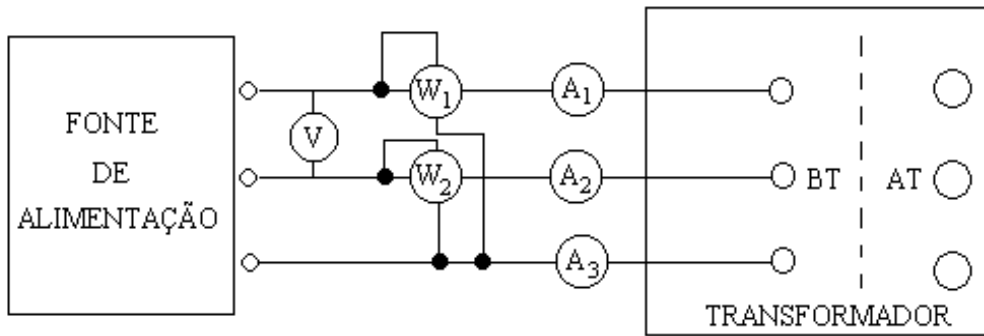


Figura 30 - Esquema elétrico de ligações para medição de perdas.

Para tensão nominal, anote:

Tabela 15 - Valores para o cálculo de perdas e corrente de excitação

Instrumento	A1	A2	A3	V	W1	W2
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  $P_o$  são dadas pela soma de  $P_1$  e  $P_2$ :

$$I_0 = \frac{I_{o1} + I_{o2} + I_{o3}}{3} = \quad A$$

$$P_0 = P_1 + P_2 = \quad W$$

Verifique qual a porcentagem da corrente nominal que representa a corrente de excitação  $I_o$ .

Tabela 16

$I_o(A)$	$I_N(A)$	$I_o(\%)$

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

Tabela 17

$\cos\psi_0$	$I_p$ (A)	$I_q$ (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 5 – Relação de Transformação

##### 1. Objetivo

Verificar a relação de transformação em um transformador.

##### 2. Materiais e Equipamentos Utilizados

Transformador;  
MRT – Medidor de relação de transformação.

##### 3. Procedimentos

Conforme a tabela 19 conecte os terminais do transformador de modo a realizar a conexão delta-estrela.

Com o auxílio de uma calculadora e dos dados anotados na Tarefa 1, verifique qual a Relação de Transformação teórica  $K_T$ .

$$K_T = \frac{E_1}{E_2}$$

$$\begin{aligned} E_1 &= \text{tensão superior} = && \text{V (linha)} \\ E_2 &= \text{tensão inferior} = && \text{V (fase)} \end{aligned}$$

Identifique no MRT as seguintes partes:

1 - Cabos de teste: Dois cabos finos com garras, sendo H1 o cabo preto e H2 o cabo vermelho e mais dois cabos com grampo de conexão, sendo X1 o cabo sem marcação e X2 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;

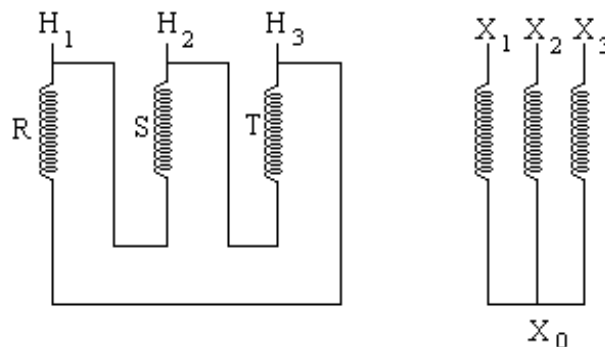
8 - Chave liga-desliga: Para energizar o equipamento;

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 X0.

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



**Figura 31 - Ligação Triângulo/Estrela  $+30^\circ$**

Faça a conexão do MRT ao transformador de acordo com as indicações na Tabela 20 para medição da relação na fase R. Suponha inicialmente que a ligação de do tipo triângulo/estrela +30°. 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 18 - Esquema de Ligações do MRT**

Fase	MRT	Transformador	Valor Teórico	Valor Medido
R	X1	X0		
	X2	X1		
	H1	H3		
	H2	H1		
S	X1	X0		
	X2	X2		
	H1	H1		
	H2	H2		
T	X1	X0		
	X2	X3		
	H1	H2		
	H2	H3		

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 20 e repita todo o procedimento;

Avaliação

Os valores medidos foram coerentes com os valores esperados?

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

## TAREFA 6 – 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;  
Fonte de alimentação;  
Wattímetros;  
Amperímetros.

### 3. Procedimentos

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

Conforme a tabela 19 conecte os terminais do transformador de modo a realizar a conexão delta-estrela

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:

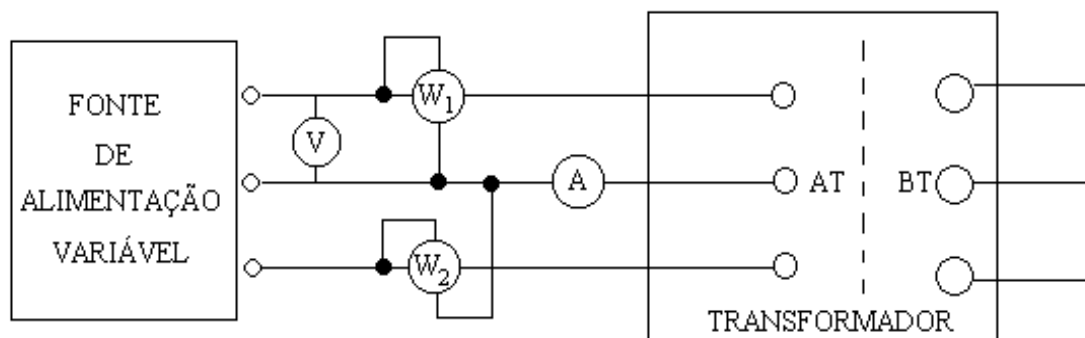


Figura 32 - Esquema de ligações para ensaio de curto-circuito

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 19 - 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 20 - Valores em condições nominais**

Instrumento	V	$W_1$	$W_2$	A
Grandeza	$V_{cc}(V)$	$P_1(W)$	$P_2(W)$	$I_{cc}(A)$
Valor Medido				

#### 4. Avaliação

Calcule os valores de  $P_{cc}$ ,  $P_J$  e  $P_A$  para preenchimento da tabela 23.  $P_{cc}$  é obtido através da soma de  $P_1$  e  $P_2$ . Observe a equação 5.3 para o cálculo de  $P_J$  e  $P_A$ .

**Tabela 21**

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

Através das equações 5.4, 5.5 e 5.6 calcule  $\cos \psi_0$ ,  $R_2$  e  $X_2$ .

**Tabela 22**

$\cos \psi_0$	$R_2(\Omega)$	$X_2(\Omega)$

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 7 – 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;  
Megômetro;  
Cabos;  
Termômetro.

### 3. Procedimentos

Conforme a tabela 19 conecte os terminais do transformador de modo a realizar a conexão delta-estrela

Aterre o terminal X0 do transformador, juntamente com sua carcaça;

Com o auxílio de cabos, curto-circuite os terminais de alta tensão H1, H2 e H3. Faça o mesmo para os terminais de baixa tensão X1, X2 e X3;

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

**Tabela 23 – 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 2 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. São Paulo: Edgard Blucher, 1984.

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

MARTIGNONI, A. "Transformadores". 8<sup>o</sup> ed. São Paulo: Globo, 1991.

FILHO, João Mamede. Manual de Equipamentos Elétricos. Volume 1, 2<sup>a</sup> Edição. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1994.

NANSEN S. A. Medidor de Relação de Espiras de Transformadores MT 10NE – Manual de Instruções. 3<sup>a</sup> 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. 1998.

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.