



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Departamento de Engenharia Elétrica



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TRANSFORMADORES DE ALTA TENSÃO PARA UTILIZAÇÃO EM LABORATÓRIO: PROJETOS E CONSTRUÇÃO

Aluno: Ney Marcos Souza

Orientador: Genoilton João de Carvalho Almeida

Campina Grande
Setembro de 2010

Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Departamento de Engenharia Elétrica

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TRANSFORMADORES DE ALTA TENSÃO PARA UTILIZAÇÃO EM LABORATÓRIO: PROJETOS E CONSTRUÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso 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.

ALUNO: _____

Ney Marcos Souza

ORIENTADOR: _____

Genoilton João de Carvalho Almeida

Campina Grande

Setembro de 2010

Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Departamento de Engenharia Elétrica

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TRANSFORMADORES DE ALTA TENSÃO PARA UTILIZAÇÃO
EM LABORATÓRIO: PROJETOS E CONSTRUÇÃO

Campina Grande
Setembro de 2010

Agradecimentos

A Deus que me deu forças nas horas mais difíceis e esperança nos momentos de angústia.

A toda minha família, especialmente meu pai Sinval e mãe Terezinha, por me incentivarem e me ajudarem ao longo da minha vida.

A Elizabeth por toda paciência, ajuda, compreensão e incentivo a mim dedicados.

Ao professor Genoilton Almeida, pela participação valiosa em minha formação acadêmica.

Aos amigos Carlos Alberto, Luiz, Alberto Henrique, por me apoiarem nas horas que mais precisei ao longo da minha formação acadêmica.

Apresentação

Os Transformadores de Alta Tensão para emprego em Laboratório requerem projeto e construção com características especiais. Estes transformadores apresentam características bastante diversas dos transformadores de potência relativas à potência nominal, regime de trabalho e esforços térmicos e elétricos aos quais são submetidos. Falhas nestes transformadores acarretam transtornos para os Laboratórios, principalmente por não ser usual a disponibilidade reservas e não se dispor de oficinas com matriz adequada para sua recuperação.

O presente trabalho tem busca a ampliação dos conhecimentos em projetos e recuperação desse tipo de transformador.

Sumário

LISTA DE FIGURAS.....	7
1. INTRODUÇÃO	8
2. OBJETIVOS	8
3. LABORATÓRIO DE ALTA TENSÃO DA UFCG - LAT	8
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: TRANSFORMADORES DE ALTA TENSÃO	10
4.1. PRINCIPIO DE FUNCIONAMENTO	10
4.2. CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS	16
4.2.1. Formas Construtivas	18
4.2.1.a. Quanto ao número de fases.....	18
4.2.1.b. Quanto ao meio isolante	19
4.2.2. Partes Construtivas	20
4.2.2.a. Tanque	20
4.2.2.b. Núcleo.....	21
4.2.2.c. Líquidos isolantes	25
4.2.2.d. Derivações	27
4.3. CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS.....	27
4.4. CARACTERÍSTICAS DA OPERAÇÃO EM VAZIO	30
4.5. CARACTERÍSTICAS DA ISOLAÇÃO.....	34
5. GERAÇÃO DE ALTA TENSÃO ALTERNADA EM LABORATÓRIO	35
5.1. CIRCUITOS BÁSICOS	35
5.2. CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DOS TRANSFORMADORES DE ENSAIO	38
5.2.1. Transformadores com isolamento em resina fundida.....	38
5.2.2. Transformadores de ensaio construídos em tanque.....	39
5.2.2.a. Construção em tanque metálico.....	39
5.2.2.b. Construção em tanque isolado	40
5.2.3. Transformadores de ensaio simétrico com uma conexão em cascata dupla. 40	
5.2.4. Transformadores de ensaio simétrico com conexão em cascata múltipla	41
5.3. COMPORTAMENTO EM SERVIÇO DOS TRANSFORMADORES DE ENSAIO.....	41
6. GERAÇÃO DE ALTA TENSÃO CONTÍNUA EM LABORATÓRIO.....	44
6.1. CIRCUITOS DE RETIFICAÇÃO	44
6.2. CIRCUITOS MULTIPLICADORES.....	46
6.2.1. Circuito de Villard	46
6.2.2. Circuito de Greinacher ou Cockcroft-Walton	47
6.2.2.a. Cascata de Greinacher	48
7. RECUPERAÇÃO DE TRANSFORMADOR.....	51
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	54
BIBLIOGRAFIA	55

Lista de Figuras

Figura 1 - Salão do Laboratório de Alta Tensão	9
Figura 2 - Transformador Ideal	11
Figura 3 - Relação de Impedâncias.....	13
Figura 4 - Modelo do primário do transformador real	13
Figura 5 - Modelo do Transformador Ideal	14
Figura 6 - Circuito equivalente refletido ao primário.....	15
Figura 7 - Curva de Eficiência.....	16
Figura 8 - Estrutura do núcleo	22
Figura 9 - Ângulo de Superposição das lâminas de aço-silício.....	23
Figura 10 - Dimensionamento da coluna do núcleo	24
Figura 11 - Comparativo de condutividade térmica de três materiais.....	28
Figura 12 - Mecanismo ONAN	30
Figura 13 - Ciclo histerético	31
Figura 14 - Montagem do ensaio a vazio	32
Figura 15 - Circuito equivalente do ensaio a vazio	33
Figura 16 - Transformador monopolar e transformador monopolar simétrico	36
Figura 17 - Transformador em cascata com três estágios	37
Figura 18 - Transformador com isolamento em resina fundida	38
Figura 19 - Transformador construído em tanque metálico	39
Figura 20 - Transformador construído em tanque isolado	40
Figura 21 - Transformador em cascata dupla com núcleo de ferro conjunto.....	41
Figura 22 - Conexão em cascata múltipla	42
Figura 23 - Liberação no suprimento de tensão devido a I_{μ}	43
Figura 24 - Circuito de retificação de uma alternância	44
Figura 25 - Tensão no transformador e no capacitor.....	45
Figura 26 - Circuito de Villard	46
Figura 27 - Curva de tensão.....	47
Figura 28 - Circuito de Greinacher.....	47
Figura 29 - Cascata de Greinacher	49
Figura 30 - Curva da tensão transitória de carregamento da cascata de Greinacher	50
Figura 31 - Isolação danificada	51
Figura 32 - Detalhe da isolamento	51
Figura 33 - Óleo envelhecido.....	52
Figura 34 - Processo de secagem.....	52
Figura 35 - Tratamento com resina epóxi.....	53
Figura 36 - Detalhe de fixação	53

1. Introdução

O Laboratório de Alta Tensão da UFCG (LAT) dispõe de vários transformadores para geração de Alta Tensão AC, estando dois destes carecendo de serem recuperados. Um deverá passar por um processo de recuperação mais simples, pois não há danos nos enrolamentos, enquanto outro deverá passar por um processo recuperativo mais acurado vez que houve danos em seus enrolamentos e isolamentos.

Como citado, transformadores de alta tensão são dispositivos que requerem manutenção com relativa frequência. Tem-se então, como consequências: sistema fora de operação, e elevado custo de manutenção. As existências dos citados transformadores somado ao interesse em ampliar os conhecimentos sobre o tema nos motivaram ao desenvolvimento do trabalho em pauta

2. Objetivos

O objetivo geral deste Trabalho de Conclusão de Curso consiste em estudar os projetos e técnicas construtivas de Transformadores de Alta Tensão para uso em Laboratório

A seguir são apresentadas as principais etapas de confecção deste trabalho:

- Revisão bibliográfica genérica sobre transformadores de Alta Tensão;
- Revisão bibliográfica sobre geração de Alta Tensão em Laboratório e projeto de transformadores para esta finalidade;
- Revisão bibliográfica sobre técnicas construtivas de transformadores e sobre ferramentas e matérias utilizados;
- Participação de forma ativa da recuperação do primeiro transformador citado na introdução, realizada no LAT.

3. Laboratório de Alta Tensão da UFCG - LAT

O Laboratório de Alta Tensão (LAT) começou a ser implantado em 1974, graças a uma associação de recursos nacionais com os de algumas cooperações técnicas internacionais. Hoje, é na sua especialidade, o laboratório melhor equipado do Norte-Nordeste do país, com uma área construída de 1050 m².

O LAT possui equipamentos sofisticados, cujos valores ultrapassam três milhões de dólares e um corpo técnico formado por docentes-pesquisadores, engenheiros e técnicos dos mais qualificados e experientes.



Figura 1 - Salão do Laboratório de Alta Tensão

Nos últimos 25 anos, foi realizado um grande número de ensaios elétricos, de recebimentos e pós-reparos eletromecânicos, além de apoio às pesquisas de desenvolvimento de equipamentos. Várias empresas da região Nordeste, a exemplo da CHESF, PETROBRÁS, CELB, SAELPA, CEAL, JPW, CEMEC, ALCACE, entre outras têm solicitados os serviços do LAT.

Atualmente o LAT é composto pelos seguintes ambientes de laboratório:

- Sala do laboratório de Materiais Elétricos;
- Salão de Alta Tensão;
- Sala do Gerador de Impulso de Corrente;
- Sala do Kit de Alta Tensão;
- Sala do Laboratório de Descargas Parciais;
- Sala do Laboratório de Instalações Elétricas.

Dentre os equipamentos mais importantes do LAT, estão:

- Transformadores de potência ligados em cascata que permitem a geração de até 600 kV em corrente alternada;

- Gerador de impulsos de alta tensão, 700 kV e 36 kJ;
- Gerador de impulsos de alta corrente, 160 kA, 100 kV, onda 8/20 μ s;
- Kit didático para alta tensão, 100 kV;
- Digitalizador de formas de onda;
- Detector de descargas parciais;
- Ponte Shering e capacitores padrão.

4. Revisão Bibliográfica: Transformadores de Alta Tensão

Neste tópico é apresentada uma revisão da literatura sobre os transformadores de potência, além de conter definições de termos utilizados para compor o presente trabalho.

Transformador é um equipamento estático que por meio de indução eletromagnética transfere energia de um circuito, chamado primário, para um ou mais circuitos, denominados respectivamente, secundário e terciário, sendo, no entanto, mantida a mesma frequência, porém com tensões e correntes diferentes.

4.1. Princípio de funcionamento

Na sua concepção mais simples, um transformador é constituído de dois enrolamentos: o enrolamento primário, que recebe a energia do sistema supridor, e o enrolamento secundário, que transfere esta energia para o sistema de distribuição, descontando-se as perdas internas referentes a esta transformação.

A partir da figura 2 será analisado o princípio de funcionamento de um transformador ideal. Neste caso, as considerações para análise são:

- Núcleo com alta permeabilidade;
- Núcleo sem perdas;
- Resistência dos enrolamentos é desprezível.

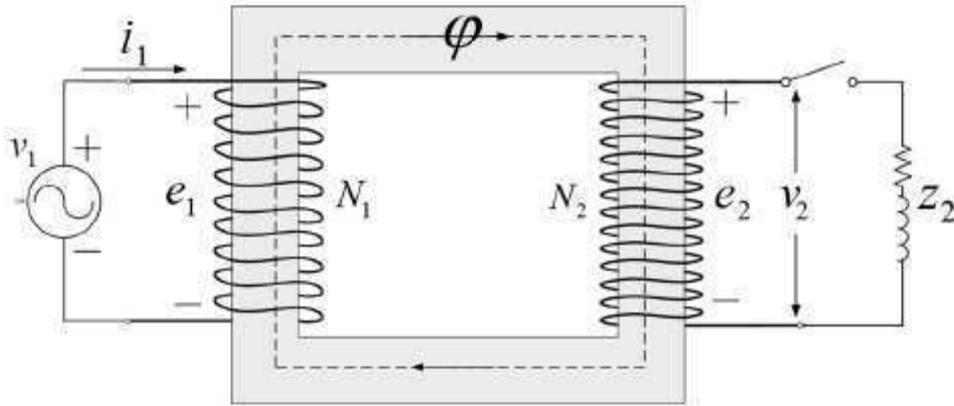


Figura 2 - Transformador Ideal

Onde: v_1 é a tensão aplicada ao enrolamento primário, N_1 o número de espiras do primário, N_2 o número de espiras do secundário, e_1 tensão induzida no primário, e_2 tensão induzida no secundário, i_1 corrente no primário e ϕ o fluxo instantâneo.

Desta forma, induzida no primário é:

$$e_1 = \frac{d\lambda_1}{dt} = N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

A equação do fluxo instantâneo é dada por:

$$\phi = \phi_{m\acute{a}x} \text{sen } \omega t \quad (2)$$

Substituindo a eq.(2) na eq.(1), encontra-se que:

$$e_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} = \omega N_1 \phi_{m\acute{a}x} \cos \omega t \quad (3)$$

A tensão induzida eficaz que aparecerá no enrolamento primário é dada por:

$$E_{1rms} = \frac{\omega N_1 \phi_{m\acute{a}x}}{\sqrt{2}} \cos \omega t = 4,44 f N_1 \phi_{m\acute{a}x} = 4,44 f N_1 B_{m\acute{a}x} A \quad (4)$$

Onde, $B_{m\acute{a}x}$ representa a densidade de fluxo magnético e A seção transversal do núcleo.

Desta forma, a tensão no primário e secundário do transformador ideal são respectivamente,

$$v_1 = e_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (5)$$

E

$$v_2 = e_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad (6)$$

A partir das equações (5) e (6) obtém-se que a relação entre a tensão primária e a secundária é dada pela equação (7) abaixo.

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{N_1}{N_2} \quad (7)$$

A Força Magneto-Motriz no núcleo do transformador ideal é nula, ou seja,

$$N_1 i_1 - N_2 i_2 = 0 \quad (8)$$

Desta forma a relação entre as correntes primária e secundária é dada por:

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (9)$$

Resumidamente, a relação no transformador ideal:

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{i_2}{i_1} = \frac{N_1}{N_2} \quad (10)$$

A potência instantânea do transformador ideal é fornecida pela equação (11),

$$v_1 i_1 = v_2 i_2 \quad (11)$$

A relação de impedâncias entre o circuito primário e o secundário pode ser encontrada a partir da representação fasorial da tensão e da corrente. Isto é,

$$\hat{V}_1 = \frac{N_1}{N_2} \hat{V}_2 \quad (12)$$

E

$$\hat{I}_1 = \frac{N_2}{N_1} \hat{I}_2 \quad (13)$$

Relacionando as equações (12) e (13), encontra-se que

$$\frac{\hat{V}_1}{\hat{I}_1} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \frac{\hat{V}_2}{\hat{I}_2} \quad (14)$$

Assim,

$$Z_1 = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 Z_2 \quad (15)$$

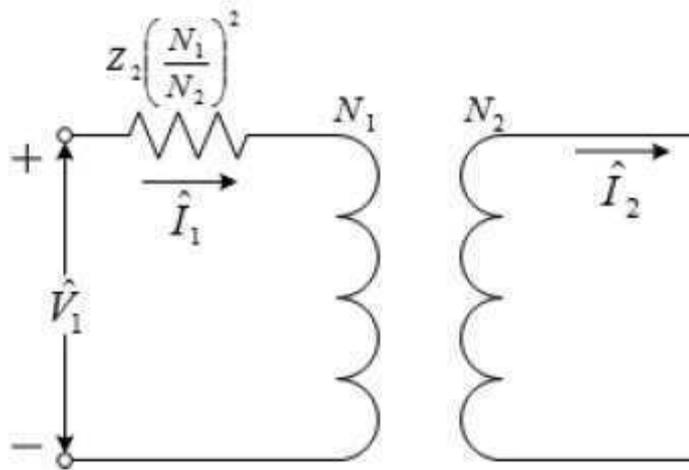


Figura 3 - Relação de Impedâncias

No transformador real é necessário considerar:

- Efeito da resistência dos enrolamentos;
- Efeito dos fluxos dispersos;
- Permeabilidade finita do núcleo (não-linearidade).

O efeito da resistência dos enrolamentos contribui para uma queda tensão no primário do transformador quantificada pela equação abaixo,

$$v_{R1} = R_1 \hat{I}_1 \quad (16)$$

Já o efeito dos fluxos disperso pode ser verificado pela tensão induzida dada pela equação (17),

$$v_{L1} = jX_{L1} \hat{I}_1 = j2\pi f L_1 \hat{I}_1 \quad (17)$$

O primário do transformador real é representado pela figura 4 a seguir.

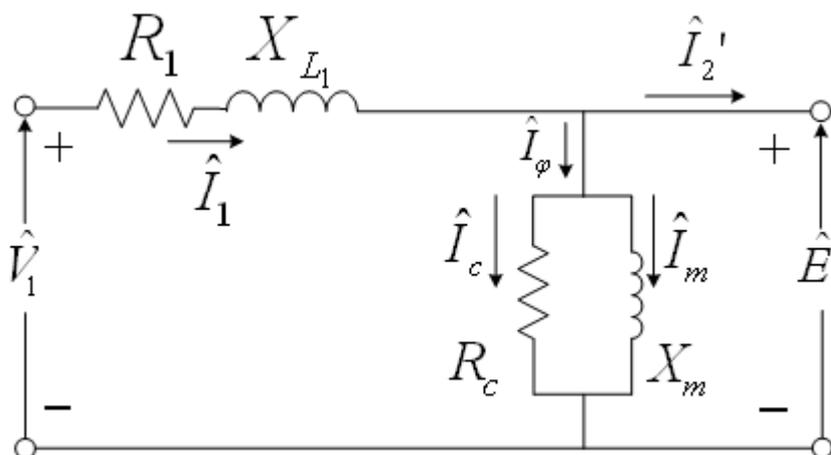


Figura 4 - Modelo do primário do transformador real

A partir da figura 4 conclui-se que a corrente no primário é dada por:

$$\hat{I}_1 = \hat{I}_\phi + \hat{I}_2' \quad (18)$$

Onde \hat{I}_ϕ representa a corrente magnetizante do núcleo e \hat{I}_2' compreende a corrente vista do primário.

$$\hat{I}_2' = \frac{N_2}{N_1} \hat{I}_2 \quad (19)$$

A partir da figura 4 observa-se que a corrente magnetizante é composta por:

$$\hat{I}_\phi = \hat{I}_c + \hat{I}_m \quad (20)$$

A partir das considerações feitas, o modelo do transformador real é apresentado na figura 5.

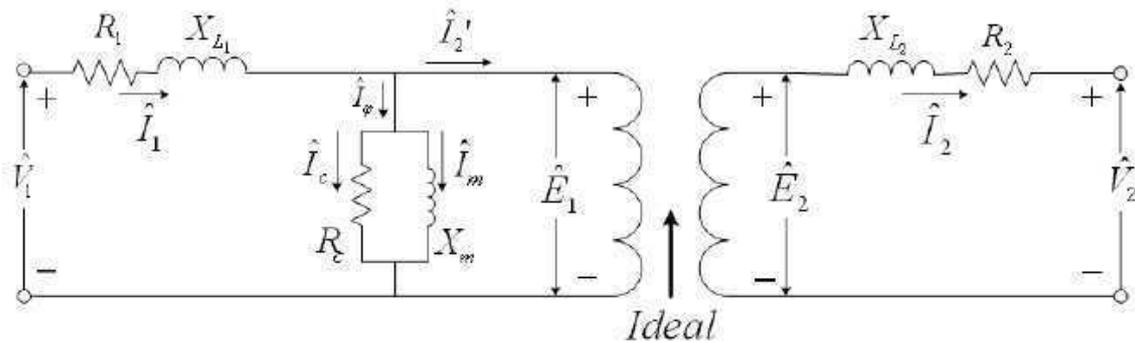


Figura 5 - Modelo do Transformador Real

Consequentemente as tensões no primário e no secundário do transformador real são dadas pelas equações (21) e (22) respectivamente.

$$\hat{V}_1 = E_1 + (R_1 + jX_{L1})\hat{I}_1 \quad (21)$$

E

$$\hat{V}_2 = E_2 + (R_2 + jX_{L2})\hat{I}_2 \quad (22)$$

O circuito equivalente refletido ao primário é dado pelas equações (23), (24) e (25).

$$X'_{L2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 X_{L2} \quad (23)$$

$$R'_2 = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 R_2 \quad (24)$$

$$\hat{V}'_2 = \left(\frac{N_1}{N_2} \right) \hat{V}_2 \quad (25)$$

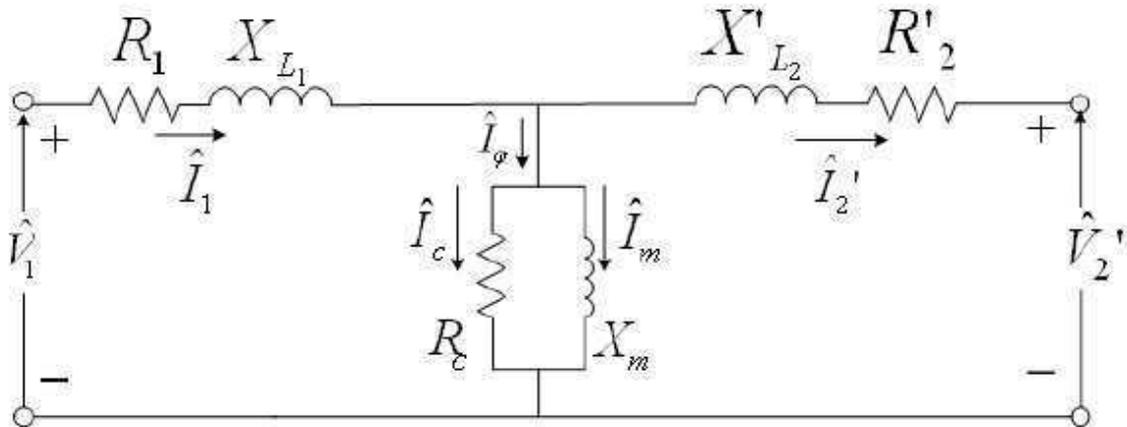


Figura 6 - Circuito equivalente refletido ao primário

As perdas no núcleo do transformador real:

$$P_n = I_\phi E_1 = I_c^2 R_c \quad (26)$$

Regulação representa a variação de tensão no secundário do transformador, desde o seu funcionamento a vazio até a operação em plena carga, considerando a tensão primária constante. A regulação do transformador em porcentagem pode ser calculada por:

$$\%R = \left(\frac{V_2 - V_2'}{V_2} \right) 100\% \quad (27)$$

Eficiência é a relação entre a potência elétrica de saída fornecida pelo secundário do transformador e a potência elétrica de entrada absorvida pelo primário.

$$\eta = \left(\frac{P_{saída}}{P_{entrada}} \right) 100\% \quad (28)$$

Ou ainda,

$$\eta = \left(\frac{P_{saída}}{P_{saída} + P_{perdas}} \right) 100\% \quad (29)$$

Para verificar como a eficiência varia com uma carga qualquer se supõe uma potência de saída conforme,

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \theta \quad (30)$$

Assim, a eficiência do transformador é:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \text{perdas}} = \frac{U_2 I_2 \cos \theta}{U_2 I_2 \cos \theta + W_N + RI_2^2} \quad (31)$$

A condição de máxima eficiência ocorre quando a função de eficiência é diferenciada em relação a corrente de carga conforme

$$\frac{d\eta}{dI_2} = 0 \quad (32)$$

Consequentemente,

$$W_N = RI_2^2 = W_{cu} \quad (33)$$

Veja como exemplo a curva de eficiência para um transformador de 50 kVA, 60 Hz.

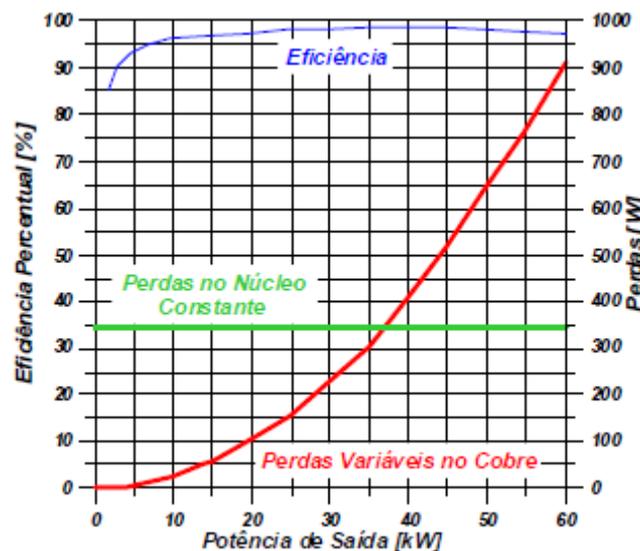


Figura 7 - Curva de Eficiência

4.2. Características Construtivas

Os transformadores são construídos com as mais diversas características, que dependem do tipo de carga que se quer alimentar ou mesmo do ambiente onde se pretende instalar.

A fabricação de um transformador começa com a construção do núcleo. Inicialmente, uma guilhotina, contendo na extremidade um rolo de chapa de ferro silício, processa o corte com dimensões e formato devidamente especificados pelo setor de projeto. À medida que a chapa é cortada, a própria máquina (guilhotina) efetua um

empilhamento inicial, de modo a facilitar a execução de várias unidades de transformação de uma mesma potência e características. Após o corte, se efetua a montagem do núcleo, empilhando as chapas, de acordo com o tipo a ser fabricado.

Numa linha de produção paralela se processa a fabricação dos enrolamentos, tanto primários como secundários.

Com os enrolamentos concluídos, inicia-se a montagem dos mesmos sobre o núcleo de ferro, complementando-se com a execução das conexões e colocação dos comutadores.

Cabe aos montadores muito cuidados para evitar, nessa ocasião a formação de partículas condutoras ou isolantes que venham prejudicar as características dielétricas do óleo mineral isolante.

Após sua montagem, o núcleo do transformador é submetido a uma circulação de ar quente e depois levado à estufa, onde se processará a secagem da parte ativa para se retirar toda a água impregnada na isolação, devido ao próprio meio ambiente.

Os processos de secagem variam de acordo com cada fabricante e o seu nível de qualificação. São mais comumente utilizados os seguintes processos:

- Secagem em estufas com ar quente;
- Secagem em estufas com ar quente na presença de vácuo;
- Secagem em estufas através de vapor de solvente.

O primeiro processo é mais simples, porém, impreciso quanto à determinação do ponto considerado, em que a parte ativa se encontra livre de umidade. Nesse processo, a secagem se faz no interior de uma estufa contendo ventiladores em pontos convenientes que permitem a circulação do ar quente, uniformizando o processo.

No segundo caso, além das condições anteriores, o interior da estufa é submetido a uma pressão negativa, a fim de acelerar a retirada da umidade do núcleo. Através da quantidade de água condensada, da temperatura e da pressão, pode-se precisar o momento em que o núcleo está em condições adequadas para ser levado ao tanque.

No terceiro e último processo, o núcleo é colocado na estufa onde é feita uma pressão negativa. Utiliza-se um evaporador, dentro do qual é colocada certa quantidade de solvente, que é aquecido até atingir uma determinada pressão (positiva), ao se abrir a válvula de comunicação entre a estufa e o evaporador, o solvente, por ser higroscópico, retira a umidade do núcleo, no que é auxiliado pela pressão negativa do interior da estufa.

As estufas são, normalmente, de grandes dimensões, de forma a acomodar vários núcleos ao mesmo tempo, no caso de transformadores de distribuição. O tempo de secagem pode oscilar de cerca de 10 horas a cinco dias, dependendo da grandeza e da quantidade de núcleos.

Concluindo-se o processo de secagem, o núcleo está pronto para ser colocado dentro da carcaça. Porém, antes de iniciar o enchimento do tanque com óleo mineral e com o respectivo núcleo montado no seu interior, devem ser observadas algumas questões básicas, ou seja:

- Que a parte isolante esteja isenta de gases. Para isso o transformador deve ser mantido sob condição de vácuo antes de se proceder ao enchimento.
- Que o óleo esteja a uma temperatura suficientemente elevada para não degradar as suas características químico-físicas e não absorver umidade.

Montadas a buchas e os acessórios, o transformador está concluído e deve seguir para a área do laboratório de ensaio, a fim de ser submetido aos ensaios de rotina.

4.2.1. Formas Construtivas

4.2.1.a. Quanto ao número de fases

Considerando somente os transformadores de distribuição e de força, podem ser construídos, quanto ao número de fases, de acordo com a característica da carga que irá alimentar, os seguintes tipos:

a) Transformadores monobuchas

São aqueles construídos para ser instalados em sistemas de distribuição rural caracterizados por monofilar com retorno por terra – MRT. São transformadores com somente uma bucha no primário e uma bucha no secundário. Apresentam baixo custo e tem potência nominal, geralmente, não superior a 15 kVA em 15 kV. Operam com um terminal primário ligado à fase e o neutro à terra.

b) Transformadores bifásicos

São aqueles construídos para operar em redes de distribuição rural, ou em formação de bancos de transformação, em poste ou em cabines. Quando utilizados sozinhos atendem somente a cargas monofásicas. Quando operados em banco podem alimentar cargas monofásicas e trifásicas.

c) Transformadores trifásicos

São os mais empregados, tanto nos sistemas de distribuição e transmissão de energia elétrica das concessionárias, como no atendimento a cargas industriais.

4.2.1.b. **Quanto ao meio isolante**

Os transformadores são classificados quanto ao meio isolante em dois grandes grupos: transformadores em líquido isolante e transformadores a seco.

a) Transformadores em líquido isolante

São de emprego generalizado em sistemas de distribuição e força e em plantas industriais comuns.

Existem três tipos de líquidos isolantes que são usados em transformadores: óleo mineral, silicone e o ascarel, cuja utilização em território nacional está proibida.

b) Transformadores a seco

São de emprego bastante específico por tratar-se de um equipamento de custo muito elevado, comparativamente aos transformadores em líquido isolante.

São empregados mais especificamente em instalações onde os perigos de incêndio são iminentes, tais como refinarias de petróleo, indústrias petroquímicas, grandes centros comerciais, em que a norma da concessionária local proíbe o uso de transformadores a óleo mineral, além de outras instalações que requeiram um nível de segurança elevada contra explosões de inflamáveis.

Os transformadores a seco são constituídos, semelhantemente aos transformadores a líquido isolante, de um núcleo de ferro-silício laminado a frio e isolado com material inorgânico, e de enrolamentos primários e secundários.

Os enrolamentos primários, geralmente, são constituídos de fita de alumínio, formando as bobinas, que são colocadas no interior de um molde de ferro e, em seguida, encapsuladas em epóxi em ambiente de vácuo e sob temperatura elevada por um tempo determinado, durante o qual são resfriadas sob temperatura controlada.

Os enrolamentos secundários, em geral, são constituídos de folhas de alumínio, com altura da chapa igual à altura da bobina. A isolamento da chapa é feita com produto inorgânico à base de resina. O conjunto sofre um tratamento térmico específico de sorte a se obter a polimerização da isolamento, que resulta na união das diversas camadas, formando um bloco sólido e mecanicamente robusto. No caso de bobinas primárias, a utilização de fitas de alumínio, resulta na construção de enrolamentos mecanicamente resistentes e isentos de absorção de umidade. Com os enrolamentos secundários em chapa de alumínio obtém-se uma elevada resistência mecânica, necessária às altas solicitações devido às correntes de curto-circuito.

Quando da montagem completa do transformador, é necessário deixar grandes canais de ventilação entre o núcleo de ferro propriamente dito e os enrolamentos secundários, e entre estes e os enrolamentos primários, com dimensões adequadas ao nível de isolamento do transformador e à condução de ar para refrigeração.

4.2.2. Partes Construtivas

Os transformadores são constituídos de diferentes partes, cada uma com características específicas.

4.2.2.a. Tanque

É assim denominada a parte metálica do transformador que abriga o núcleo, contém o óleo isolante, transmite ao meio exterior o calor gerado na parte ativa e onde são fixados os suportes de sustentação.

Os transformadores de pequeno porte, ditos tipo distribuição, com potência nominal inicial de cerca de 15 kVA apresentam um tanque com formato ovalado e que normalmente é responsável pela transferência de calor para o meio exterior. Acima dessa potência, já é necessária a utilização de radiadores com área total de transferência de calor de acordo com a potência do equipamento.

A construção do tanque deve ser suficientemente robusta, para suportar tanto a suspensão como a fixação do transformador.

A opção pela utilização de radiadores em tubo ou em chapa de aço é uma função das características de projeto. Normalmente, para os transformadores com potência superior a 500 kVA os radiadores são construídos em chapa de aço. Para potências menores são encontrados transformadores com radiadores tanto em tubo como em chapa de aço.

A área de dissipação dos radiadores somada à área do tanque propriamente dito deve ser suficiente para dissipar todo o calor gerado pelas perdas internas do transformador

O tanque dos transformadores está sujeito a processos acelerados de corrosão, principalmente quando são instalados no interior de ambientes agressivos e nas proximidades da orla marítima. Dessa forma, são utilizadas chapas de aço com características apropriadas a esses ambientes. Em ambientes normais, a utilização genérica é a de chapa de aço carbono ASTM-1020, devidamente tratada. O processo anticorrosivo mais comumente utilizado é o de decapagem do tanque através de jateamento abrasivo ao metal quase ao branco ou o processo químico. Isto é feito após concluído todo o processo de soldagem. Em seguida, deve ser aplicada internamente uma tinta que serve de base antiferruginosa, com espessura mínima de 30 μ m e que não afete nem seja afetada pelo líquido isolante.

A pintura externa é composta por uma base antiferruginosa com espessura mínima, quando seca, de 40 μ m por cima da qual é aplicada uma tinta de acabamento compatível com a base utilizada, na cor cinza-claro, em geral na notação MUNSSELL 5.0BG7.0/4, com espessura mínima de 40 μ m, o que é conseguido com aplicação, geralmente, de duas demãos de tinta.

4.2.2.b. Núcleo

O núcleo consiste basicamente no laminado de ferro-silício, enrolamentos primários e secundários e acessórios para mudança de tensão (comutador de tapes). Tem as seguintes partes:

a) Núcleo de aço

É constituído de uma grande quantidade de chapas de aço-silício de grãos orientados, montadas em superposição.

As chapas de aço-silício são ligas que contem cerca de 4,5% de silício, cuja função é reduzir as perdas por histerese e aumentar a resistência do ferro, permitindo, desta forma, reduzir as correntes parasitas.

As chapas de aço silício são laminadas a frio, seguidas de um tratamento térmico adequado, que permite que os seus grãos magnéticos sejam orientados no sentido da laminação. São cobertas por uma fina camada de material isolante e fabricadas dentro de limites máximos de perdas eletromagnéticas, que variam entre 1,28 W/kg e uma densidade de fluxo de 1,50 T (Tesla) a 1,83 W/kg correspondente a uma densidade de fluxo de 1,70 T, na frequência industrial. A montagem das lâminas de aço-silício é feita manualmente na maioria das fabricas nacionais. O desempenho do transformador vai depender da qualidade da mão-de-obra empregada nesta tarefa.

As lâminas de aço-silício são empilhadas dando forma à uma coluna vertical, conhecida como “perna” do núcleo, como pode ser observado da figura 8.



Figura 8 - Estrutura do núcleo

As lâminas são montadas de sorte a ter todas as junções desencontradas alternadamente.

O ângulo de superposição das lâminas de aço-silício, que interliga a culatra com a coluna do núcleo, varia de 30° a 60°, sendo 45° o mais utilizado. Veja o detalhe na figura 9.



Figura 9 - Ângulo de Superposição das lâminas de aço-silício

O dimensionamento do núcleo magnético deve ser feito de acordo com o gráfico da figura 10, diâmetro da coluna versus potência para transformadores de até 300 kVA.

$$S_n = \frac{97,8\sqrt{P(kVA)}}{B_n(kGss)} \quad (34)$$

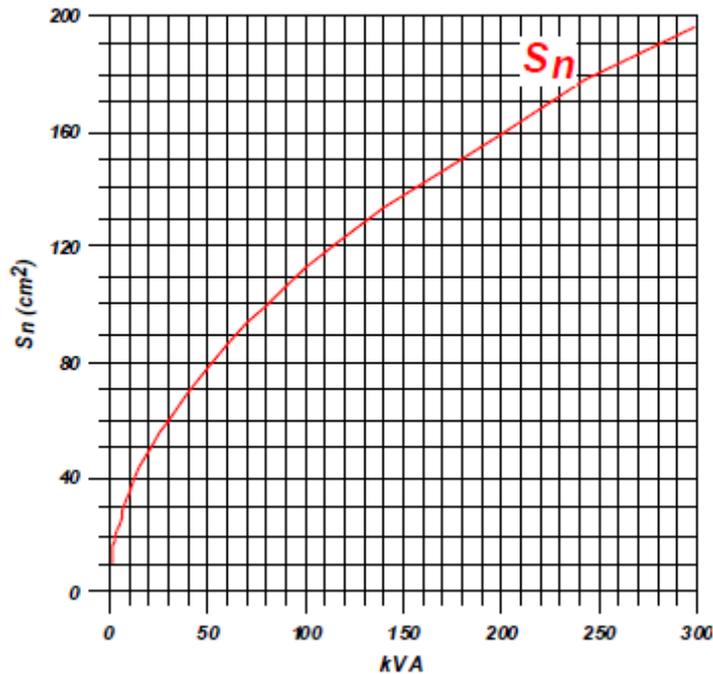


Figura 10 - Dimensionamento da coluna do núcleo

O diâmetro da coluna e quantidade de degraus depende da potência do transformador.

Para reduzir as perdas no núcleo aumenta-se 15% a seção da culatra.

$$S_c = 1,15S_n \quad (35)$$

b) Enrolamentos

Os enrolamentos são a parte elétrica dos transformadores. São formados de bobinas primárias e secundárias e, em alguns casos, de terciárias.

A seção dos condutores das bobinas primárias e secundárias é função da densidade de corrente fixada no projeto do equipamento. Transformadores de potencia elevada requerem uma densidade de corrente inferior à dos transformadores de menor potência. Isto se deve ao fato de que quanto maior for o volume do transformador maiores são as dificuldades de refrigeração, necessitando-se, pois, reduzir as perdas por efeito Joule, o que é conseguido diminuindo-se a densidade de corrente.

Os enrolamentos são construídos em forma de bobinas circulares. A forma circular oferece melhor resistência aos componentes radiais das forças eletromagnéticas.

Os enrolamentos podem ser do tipo:

- Distribuído;
- Espiral;

- Helicoidal;
- Disco.

Os enrolamentos distribuídos são indicados para correntes até 20 A. São constituídos por fios de seção circular e empregados nos enrolamentos de alta tensão (AT).

Os enrolamentos em espiral são utilizados para tensões de até 33 kV e baixas correntes, seus condutores são dispostos de forma axial, em um cilindro de *pressboard*, sem canais de óleo radiais entre eles.

Os enrolamentos helicoidais são usados para baixas tensões e altas correntes. Os condutores em paralelos e separados por canais de óleo são dispostos de forma helicoidal ao longo da direção axial do cilindro de *pressboard*.

Os enrolamentos em disco são utilizados para tensões entre 33 e 132 kV. As bobinas são divididas em seções na direção axial, cada seção possui mais de uma espira. As seções estão ligadas entre si, em serie, pelos condutores das espiras. Os discos possuem boa resistência mecânica para esforços eletromecânicos axiais.

4.2.2.c. Líquidos isolantes

São compostos líquidos, de baixa viscosidade, destinados à refrigeração de transformadores, ao transmitir o calor gerado por efeito Joule às paredes do tanque. São caracterizados por uma elevada rigidez dielétrica, que, ao impregnar-se nos elementos isolantes, aumenta o poder destes materiais.

Geralmente, são utilizados dois tipos de líquido isolante no processo de fabricação dos transformadores, ou seja:

a) Óleo mineral

É o fluido mais comumente utilizado em transformadores, quer nos de distribuição, quer nos de força. Apresenta um baixo ponto de combustão, resultando em perigo constante a sua utilização em transformadores localizados em prédios

residenciais, comerciais e em áreas contendo inflamáveis que possam causar sérios perigos à vida e ao patrimônio.

O óleo mineral deve estar livre de impurezas, tais como umidade, poeiras e outros agentes que afetem sensivelmente o seu poder dielétrico, que não deve ser inferior a 30 kV/mm. Contudo o tempo provoca um processo de envelhecimento do óleo, que resulta na formação de ácidos que são prejudiciais aos materiais isolantes do transformador. Ademais, com a perda das características isolantes, o óleo vai-se tornando imprestável para o uso em equipamentos elétricos.

Um dos principais fatores de degradação do óleo em transformadores é a sobrecarga, que provoca uma elevação de temperatura, às vezes, acima dos limites admissíveis. O contato do óleo com o ar ambiente (oxigênio) também é um fator de degeneração, o que geralmente ocorre durante a abertura do transformador para troca de tapes e outros serviços necessários.

O óleo mineral, quando as suas qualidades dielétricas, pode ser regenerado através da aplicação de produtos químicos especiais denominados de inibidores. Também pode ser recuperados através de sua passagem por um filtro-prensa, largamente utilizado nos trabalhos de manutenção de transformadores. Há dois diferentes tipos de óleo mineral isolante comercializado.

- Óleo tipo A ou naftênico;
- Óleo tipo B ou parafínico.

Óleos minerais, quando submetidos a descargas internas no interior do transformador, podem sofrer decomposições moleculares, cujo resultado é a formação de outros produtos que juntos se denominam *lama*. Por ter densidade superior à do óleo propriamente dito, a lama desce para o fundo do tanque do transformador, podendo depositar-se, em sua trajetória, sobre as bobinas do núcleo, acarretando sérios danos à isolação. Sendo a lama um produto com poder dielétrico baixo, a deposição entre os fios das bobinas pode acarretar a sua absorção pelo material isolante, normalmente o papel, que recobre os fios condutores, facilitando a ocorrência de descargas entre espiras e a conseqüente queima da bobina. Além disso, a lama pode solidificar-se nas paredes do tanque do transformador, dificultando a transferência do calor gerado por efeito das perdas internas para o meio externo. A conseqüência imediata é a deterioração do isolamento do transformador e a queima dos seus enrolamentos.

b) Óleos de silicone

São assim denominados os fluidos líquidos utilizados em transformadores constituídos de polímero sintético, cujo principal elemento é o silício. É um líquido claro e incolor. Apresenta uma excelente estabilidade térmica. Não é tóxico e, quimicamente, é inerte.

O silicone apresenta uma viscosidade sensivelmente superior à dos óleos minerais, o que implica o dimensionamento adequado das partes ativas dos transformadores.

4.2.2.d. Derivações

Normalmente, todos os transformadores de distribuição são dotados de uma ou mais derivações nos enrolamentos primários.

O comutador de derivação tem a função básica de elevar ou reduzir a tensão secundária do transformador conforme o nível da tensão primária. O comutador de derivação não corrige a falta de regulação do sistema. Quando a variação de tensão numa rede é muito grande em diferentes pontos da curva de carga diária, a mudança de derivação deve ser tomada com cautela, para que não se tenha num determinado momento, níveis de tensão intoleráveis no secundário. Portanto, a utilização correta do comutador se faz quando a tensão está permanentemente baixa ou permanentemente elevada.

4.3. Características Térmicas

A parte ativa é a fonte de perdas que resulta na elevação da temperatura do transformador, o calor gerado deve ser dissipado e não ultrapassar os limites dos materiais empregados. A determinação correta da temperatura pode permitir avanços em projetos e melhor confiabilidade de operação do transformador.

Os processos de transferência de calor, tanto interno como externamente, são realizados das seguintes formas:

- Condução;
- Radiação;

- Convecção.

A transferência de calor do óleo à carcaça do transformador é feita por condução.

Com relação à condutividade térmica:

- Em líquidos ou isolantes elétricos a transmissão de calor ocorre de forma oscilatória, tal como ondas sonoras;
- Em estruturas cristalinas, o movimento oscilatório diminui a condução de calor devido a irregularidade da cadeia molecular;
- Em metais puros a condutividade térmica é aproximadamente proporcional a condutividade elétrica.

Desta forma, a condutividade térmica é proporcional ao calor específico do material.

Nos metais os responsáveis pela condução térmica são os elétrons livres e a condutividade térmica é relacionada com a condutividade elétrica, que diminui com o aumento da temperatura. Veja o gráfico da figura 11.

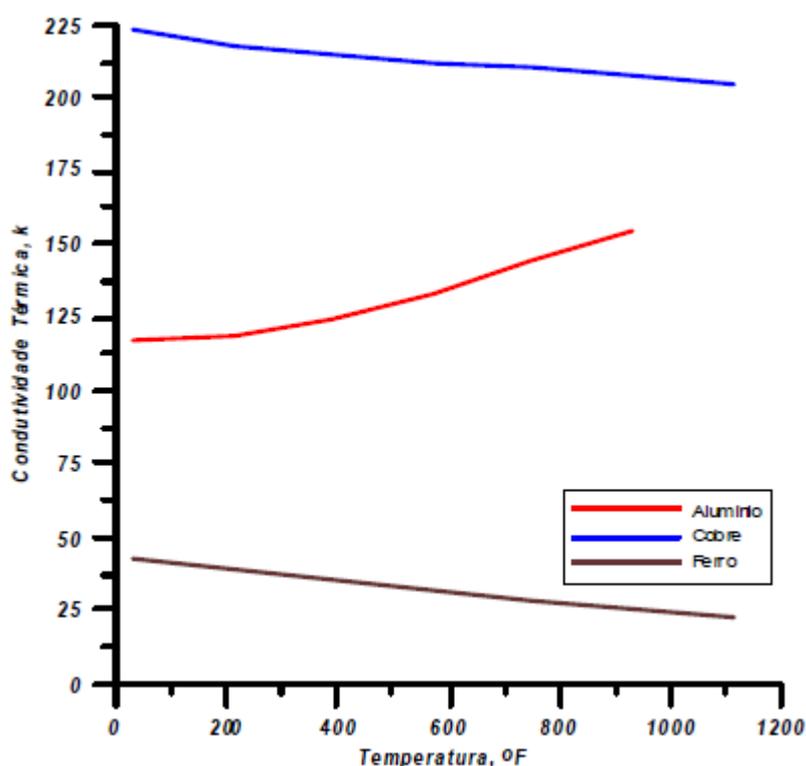


Figura 11 - Comparativo de condutividade térmica de três materiais

A dissipação de calor no tanque do transformador ocorre por radiação e convecção.

A radiação ocorre quando um corpo com temperatura acima da temperatura ambiente emite calor. Portanto, em altas temperaturas a radiação é o fenômeno dominante, enquanto, para temperaturas menores a condução e a convecção são os mecanismos principais de transferência de calor.

O mecanismo de transferência de calor entre dois corpos pela radiação é composto por três componentes distintos:

1. A conversão de energia térmica do corpo aquecido em energia eletromagnética;
2. A passagem da onda eletromagnética pelo meio, e
3. A reconversão da energia eletromagnética em energia térmica pela absorção no corpo frio.

Quando um corpo aquecido emite radiação, parte desta energia é absorvida, parte é refletida e parte é transmitida através do corpo. Em corpos opacos nenhuma energia radiante é transmitida.

Na convecção natural, a massa de ar aquecida em contato com o corpo do transformador movimenta-se para cima, sendo substituída por uma massa de ar mais frio que, ao ser aquecida, circula como a anterior, num processo lento e contínuo. Quando a massa de óleo quente atinge a parte superior do transformador, inicia o caminho de retorno através dos radiadores, cedendo calor ao meio exterior, chegando à sua parte inferior já bastante resfriada.

No caso da convecção forçada é necessária a utilização de motores acoplados a ventiladores que aceleram a movimentação das massas de ar quente que são imediatamente substituídas por massas de ar frio, num processo rápido e contínuo.

Os transformadores são designados quanto ao tipo de resfriamento por um conjunto de letras que representam as iniciais de palavras correspondentes, ou seja, transformador a:

- Óleo natural com resfriamento natural – ONAN (óleo natural, ar natural);
- Óleo natural com ventilação forçada – ONAF (óleo natural, ar forçado);
- Óleo com circulação forçada do líquido isolante e com ventilação forçada – OFAF (óleo forçado, ar forçado);

- Óleo com circulação forçada do líquido isolante e com resfriamento a água – OFWF (óleo forçado, água (*water*) forçada).

No mecanismo ONAN, o óleo circula devido ao processo de convecção natural e depende do processo natural da viscosidade e densidade do óleo quando aquecido. O calor é dissipado nas superfícies do tanque e radiadores como pode ser observado na figura 12.

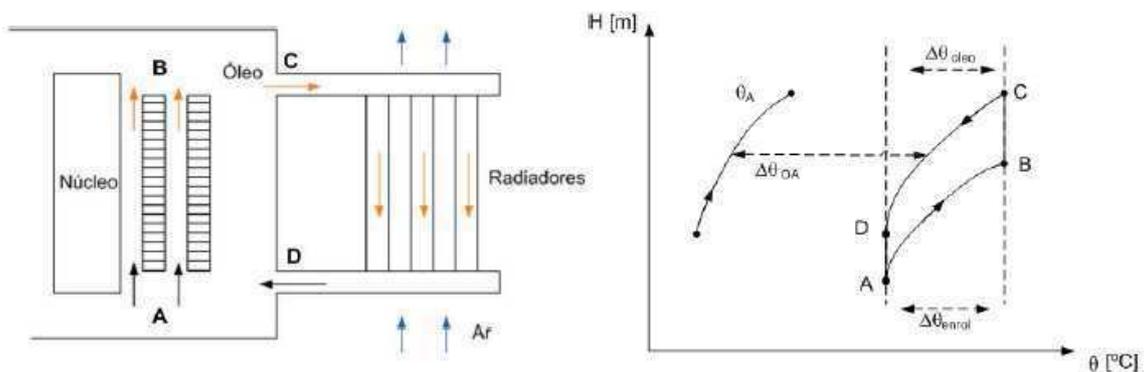


Figura 12 - Mecanismo ONAN

Quanto maior a potência do transformador maior é o seu aquecimento, o que explica o mecanismo ONAF, pois, se trata da instalação de ventilação forçada.

O mecanismo OFAF se aplica para obter melhores coeficientes de transferência de calor que é conseguido aumentando a velocidade do fluxo de óleo.

O da temperatura permitida na parte ativa influencia o tamanho, o custo e as condições de operação do transformador.

4.4. Características da Operação em Vazio

Quando um transformador está energizado e não há nenhum aparelho consumidor ligado ao seu secundário, diz-se que opera em vazio. As características que define a operação em vazio são:

- Corrente em vazio;
- Perdas em vazio;
- Corrente de “*inrush*”;
- Ruído magnético do transformador.

As perdas em vazio do transformador se resumem nas perdas no núcleo e que se caracterizam pelas perdas produzidas pelas correntes parasitas ou de Foucault e pela histerese magnética.

A histerese é um fenômeno que descreve a energia consumida por um material magnético, seu comportamento é não-linear.

O ciclo histerético que provoca as perdas por histerese está representado na figura 13.

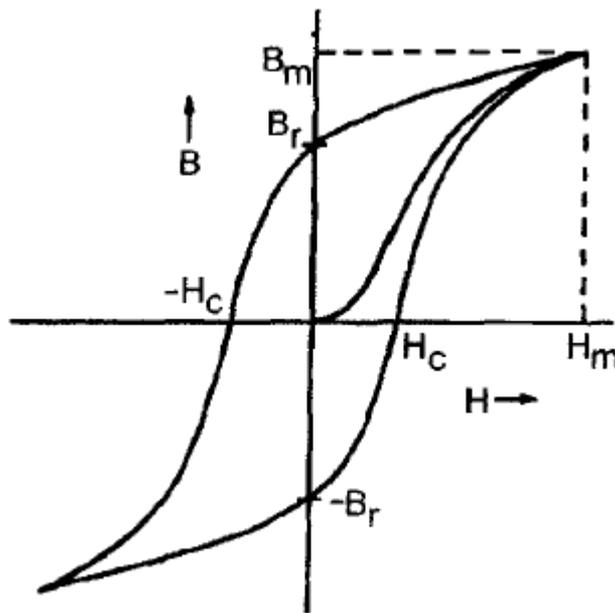


Figura 13 - Ciclo histerético

A área determinada pela curva de histerese indica a energia dissipada no núcleo em forma de calor durante um ciclo de alimentação.

As perdas em vazio representam em torno de 1 a 2% das perdas nominais e depende somente das condições magnéticas, ou seja, é independente do carregamento. Para núcleos de grão orientado a frio, pode-se assumir que 50% das perdas são devido a histerese e 50% por correntes parasitas.

A redução das perdas por histerese está relacionada com a qualidade do material de aço-silício empregado nas chapas que dar forma ao núcleo.

Quanto menor a área do ciclo de histerese, menores são as perdas por histerese e quanto menor a espessura das lâminas e maior sua resistividade, tem-se menores perdas por corrente parasita.

A corrente de excitação de um transformador é rica em harmônicas devido às características não-lineares do núcleo magnético.

A corrente de *Inrush* é um fenômeno transitório que ocorre na energização do transformador. O transitório da corrente de excitação pode atingir magnitude igual ou superior a corrente nominal, como consequência, pode ocorrer afundamento da tensão na rede e atuação da proteção.

O fenômeno pode ser descrito pela equação diferencial:

$$u(t) = \frac{d\phi(i,t)}{di(t)} \frac{di(t)}{dt} + Rit \quad (36)$$

O pico da corrente de *inrush* pode ocasionar estresses eletrodinâmicos comprometendo a isolamento e os enrolamentos.

A operação do transformador é acompanhada por ruídos magnéticos, esses ruídos são originados pelo núcleo e aumentam de forma logarítmica com a potência nominal. A amplitude do ruído depende da indução magnética e da massa conforme a equação (37).

$$L = 10 \log \left[\left(\frac{B_2}{B_1} \right)^8 \left(\frac{M_2}{M_1} \right)^{1,6} \right] \quad (37)$$

O ensaio a vazio em transformadores tem como objetivos:

- A determinação da corrente a vazio;
- A determinação das perdas no núcleo e
- A determinação da relação de transformação.

O circuito para montagem do ensaio a vazio é mostrado nas figuras (14) e (15).

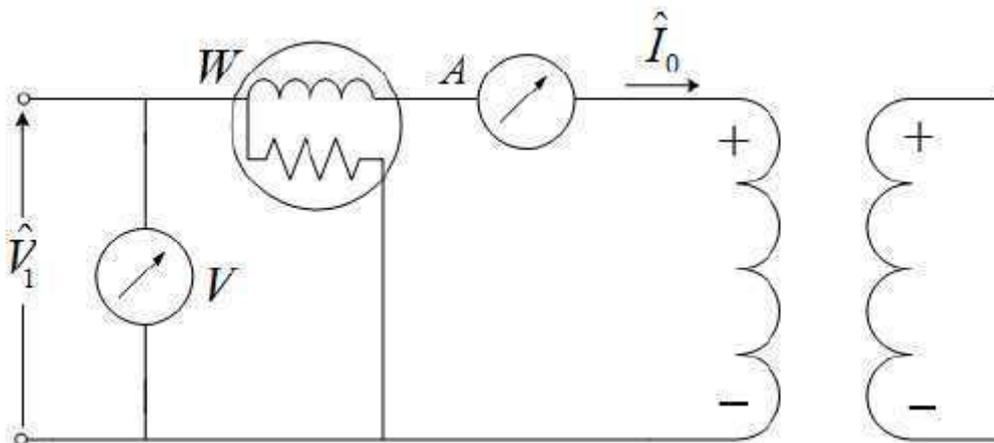


Figura 14 - Montagem do ensaio a vazio

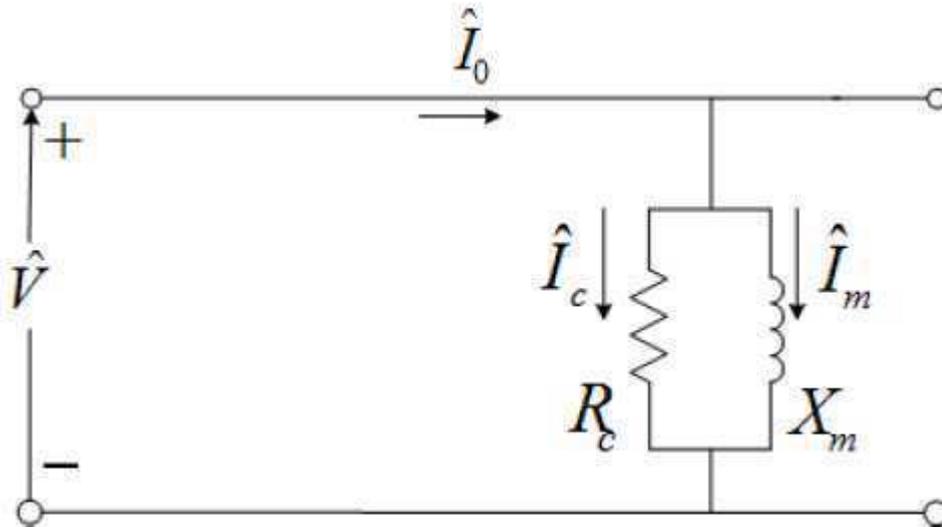


Figura 15 - Circuito equivalente do ensaio a vazio

A determinação da corrente a vazio é obtida através da leitura do amperímetro.

$$P_{ca} = VI_0 \cos \theta = VI_c \Rightarrow I_c = \frac{P_{ca}}{V} \quad (38)$$

$$I_m^2 = I_0^2 - I_c^2 \quad (39)$$

A partir da leitura do wattímetro obtém-se as perdas no núcleo:

$$R_c = \frac{V_{ca}^2}{P_{ca}} \quad (40)$$

A relação de transformação é a proporção que existe entre a tensão ou corrente do primário e a tensão ou corrente do secundário.

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

$$K_T = \frac{E_1}{E_2} \quad (41)$$

Em que E_1 e E_2 são os valores eficazes das forças eletromotrizes induzidas nos enrolamentos primários e secundários, respectivamente.

4.5. Características da Isolação

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.

Considerando campos elétricos uniformes em um material simples entre eletrodos em barra, o esforço elétrico é dado por:

$$E_u = \frac{U}{d} \quad (42)$$

Os níveis de esforços elétricos podem ser estimados através da determinação da distribuição do campo eletrostático.

Os principais fatores que influenciam na isolação dos transformadores são:

- Fatores térmicos, químicos e mecânicos;
- Umidade na isolação, pois, deteriora as propriedades elétricas e mecânicas;
- Aumento da velocidade do óleo diminuindo a Suportabilidade, pois, a quantidade de partículas no óleo que passa pelos eletrodos aumenta;

5. Geração de Alta Tensão Alternada em Laboratório

Os transformadores utilizados nos laboratórios de alta tensão apresentam configurações físicas (formato) diferentes dos transformadores utilizados nos sistemas de transmissão e de distribuição de energia elétrica. Os utilizados nos ensaios necessitam somente de pequenas potências e não devem ser submetidos a sobretensões externas. Estes transformadores, geralmente, têm um dos terminais do enrolamento de alta tensão aterrado. O enrolamento de alta deve ser construído de modo a suportar a tensão total entre o núcleo e o enrolamento de baixa tensão.

5.1. Circuitos Básicos

Existem três circuitos básicos para transformadores de ensaio. A figura 16 mostra o circuito do transformador monopolar e do transformador de ensaio simétrico, que utilizam apenas um estágio de transformação. O comprimento das setas mostradas nas figuras indica a magnitude do esforço de isolamento entre o enrolamento de alta tensão H e o enrolamento de excitação E ou o núcleo de ferro.

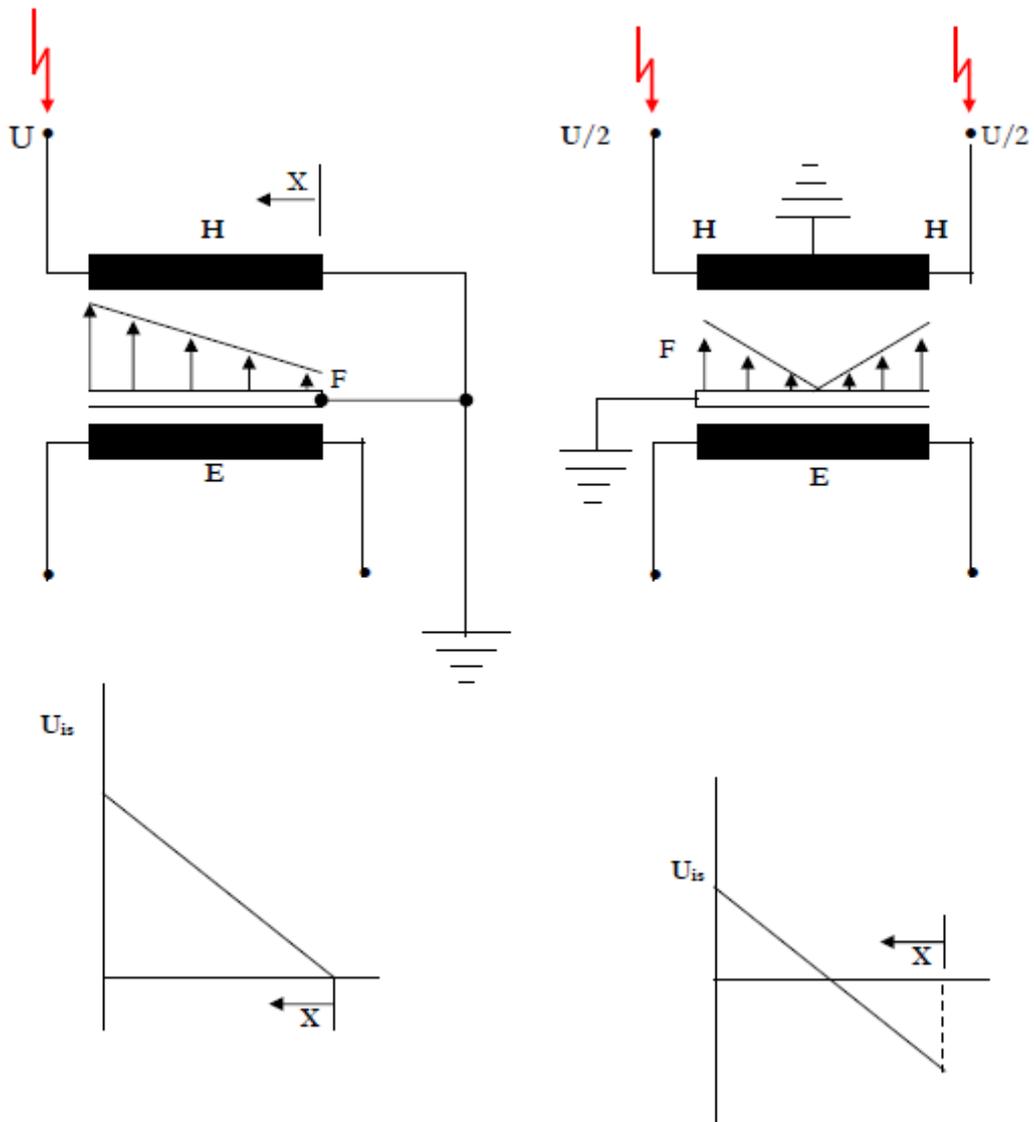


Figura 16 - Transformador monopolar e transformador monopolar simétrico

O terceiro tipo de circuito é utilizado quando se deseja gerar tensões acima de centenas de kV. Neste caso, por razões técnicas e econômicas, são usados vários estágios em cascata. A figura 17 mostra o esquema de um transformador de três estágios.

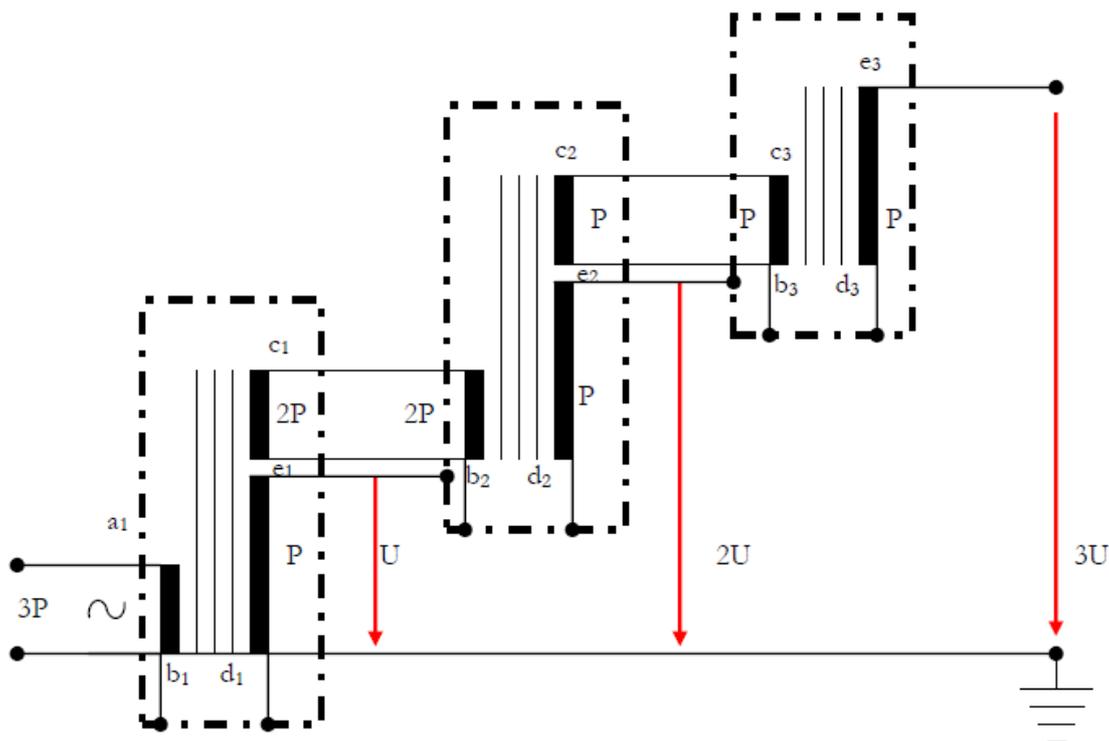


Figura 17 - Transformador em cascata com três estágios

A partir da figura 17, pode-se exemplificar o princípio de funcionamento dos transformadores em cascata da seguinte maneira: o enrolamento de excitação dos estágios superiores é suprido pelo enrolamento de acoplamento do estágio imediatamente inferior. A fonte de baixa tensão é conectada nos terminais a_1 e b_1 do transformador I, com o tanque aterrado. O final do enrolamento secundário d_1 do transformador I, é também aterrado. O enrolamento primeiro a_2b_2 do transformador II é alimentado pelo tap c_1e_1 do enrolamento secundário do transformador I. A derivação é arranjada de tal maneira que a tensão entre c_1e_1 seja igual à tensão de alimentação do enrolamento primário. O final do enrolamento secundário do transformador II é conectado ao seu tanque o qual é isolado a terra, ficando possível a alimentação através da tensão secundaria do transformador I. Deste modo, o terceiro transformador é alimentado.

Com o arranjo em cascata, os enrolamentos de acoplamento e de excitação dos primeiros estágios têm que transmitir mais potência do que os subsequentes. Por isso, eles devem ser construídos para suportar maiores potências nos estágios inferiores.

5.2. Características Construtivas dos transformadores de ensaio

Os transformadores de ensaio para laboratórios podem ser construídos de diferentes maneiras.

5.2.1. Transformadores com isolamento em resina fundida

Os transformadores com isolamento em resina fundida apresentam tensões de até 100 kV e potência de alguns kVA. A figura 18 exemplifica este tipo de transformador.

Os transformadores em resina fundida apresentam como principais vantagens ser de pequenas dimensões e não necessitar de manutenção e como desvantagem apresentar tensões e potências baixas.

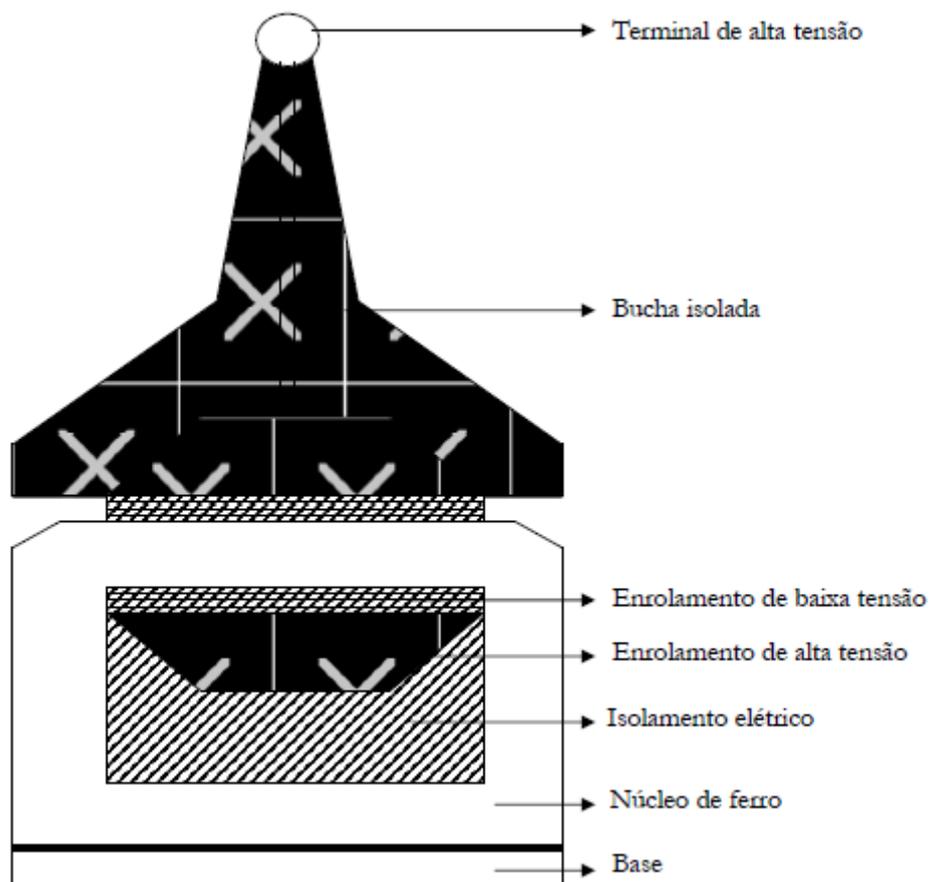


Figura 18 - Transformador com isolamento em resina fundida

5.2.2. Transformadores de ensaio construídos em tanque

- a) Construção em tanque metálico;
- b) Construção em tanque isolado.

5.2.2.a. Construção em tanque metálico

Quando são necessárias potências mais elevadas utiliza-se como isolamento o óleo ou o papel impregnado com óleo. Nestes transformadores, o núcleo e os enrolamentos são colocados dentro de um tanque metálico como mostra a figura 19. Este tipo de transformador apresenta como principal vantagem uma boa refrigeração natural na superfície do tanque e como desvantagem um alto custo da bucha isolante.

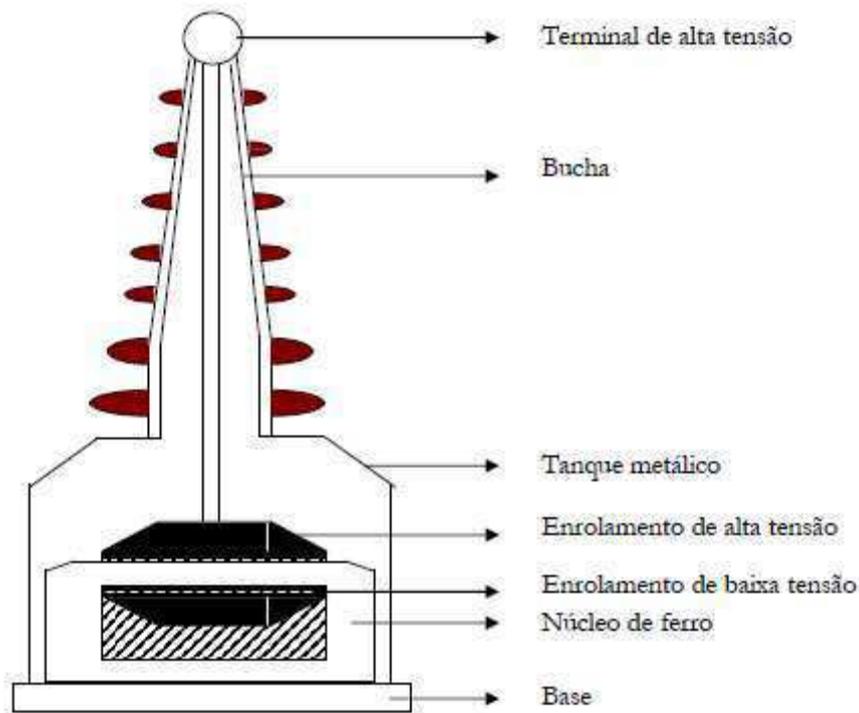


Figura 19 - Transformador construído em tanque metálico

5.2.2.b. Construção em tanque isolado

Neste tipo de construção, os isolamentos e o núcleo são envolvidos por um tubo isolado. Apresentam como vantagem a inexistência da bucha isolante e um grande terminal de alta tensão, e como desvantagem, pouca refrigeração natural, necessitando em alguns casos a instalação de um trocador de calor – refrigeração forçada. A figura 20 mostra este tipo de transformador.

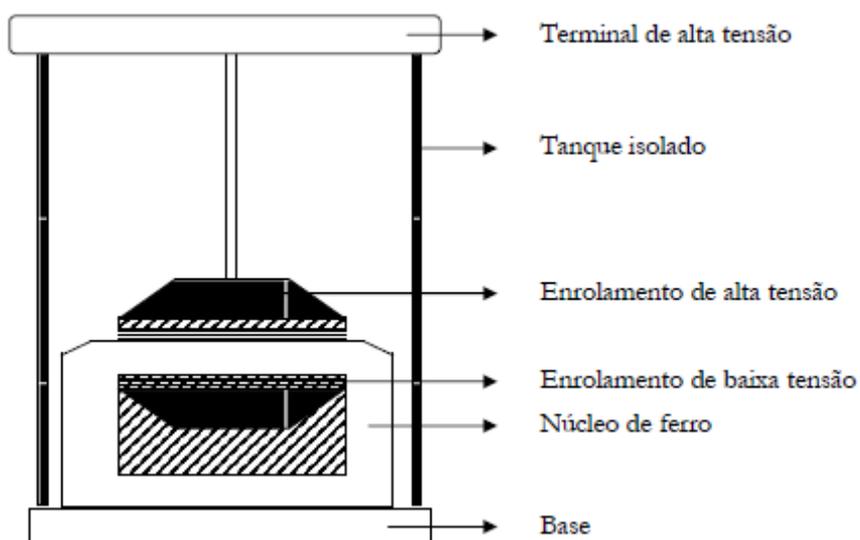


Figura 20 - Transformador construído em tanque isolado

5.2.3. Transformadores de ensaio simétrico com uma conexão em cascata dupla

O arranjo apresenta-se com dois estágios em um só núcleo de ferro conjunto, cada estágio é responsável pela metade da tensão. Esta construção tanto é possível em tanque metálico quanto em tanque isolado, veja a figura 21. Esta configuração apresenta um enrolamento terciário (enrolamento de compensação ou acoplamento) que é responsável pela distribuição uniforme do fluxo elétrico nos dois lados do núcleo.

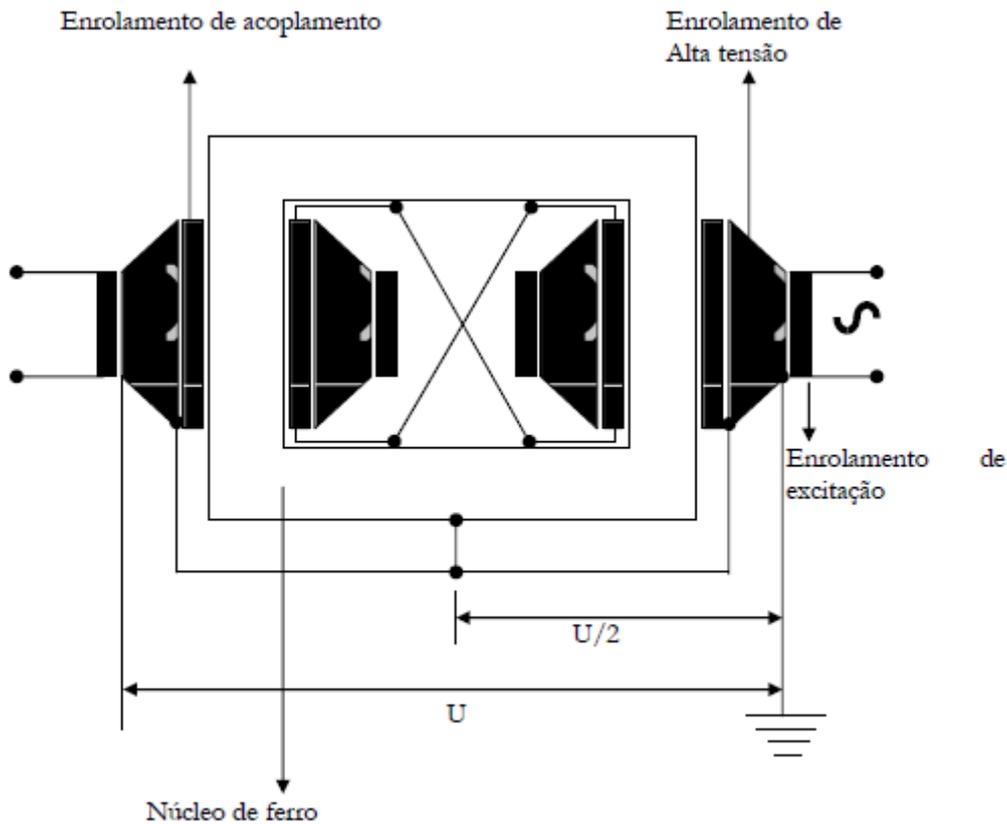


Figura 21 - Transformador em cascata dupla com núcleo de ferro conjunto

5.2.4. Transformadores de ensaio simétrico com conexão em cascata múltipla

Neste tipo de construção o enrolamento de excitação do primeiro estágio (ver figura 21) alimenta o enrolamento primeiro do segundo estágio na sua tensão nominal, mas com o potencial U . o terceiro estágio é alimentado pelo enrolamento de excitação do segundo, na tensão nominal, mas com potencial $2U$ e assim sucessivamente.

5.3. Comportamento em serviço dos transformadores de ensaio

O comportamento em serviço dos transformadores de ensaio deve ser analisado observando os seguintes aspectos:

- Esforço externo do objeto de teste, que normalmente é capacitivo;

- Capacitância específica e alta indutância dispersa nos enrolamentos de alta tensão.

Por esta análise, ocorre um aumento da tensão no secundário U2, ver figura 22.

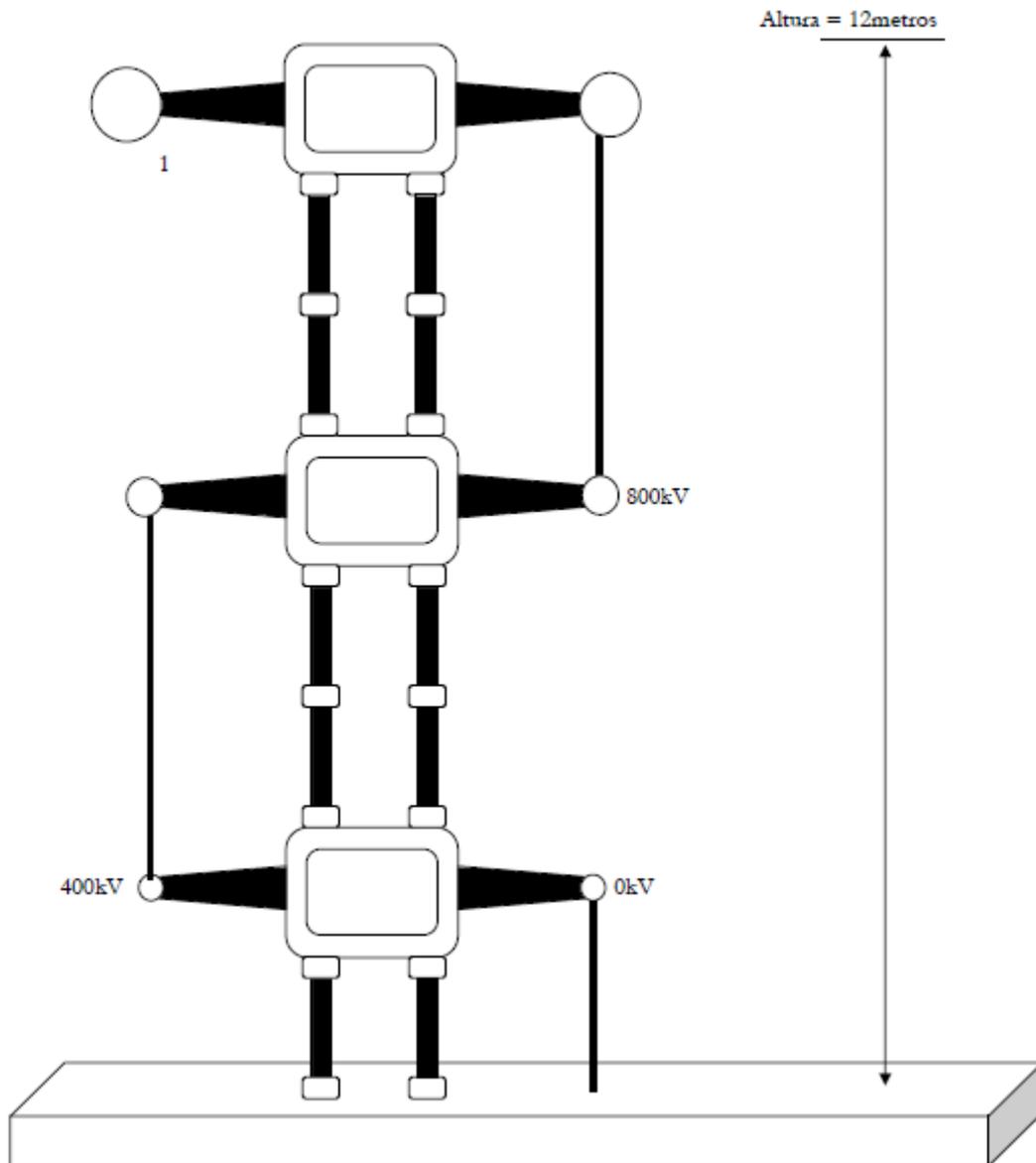


Figura 22 - Conexão em cascata múltipla

A justificativa para o aumento da tensão no secundário é que a corrente primária I_{μ} compõe-se da corrente de magnetização I_c que está atrasada da tensão e da corrente de esforço capacitivo π . A razão da corrente primária ser capacitiva para baixas tensões e a conseqüente liberação no suprimento de tensão pode ser entendido a partir da figura 23.

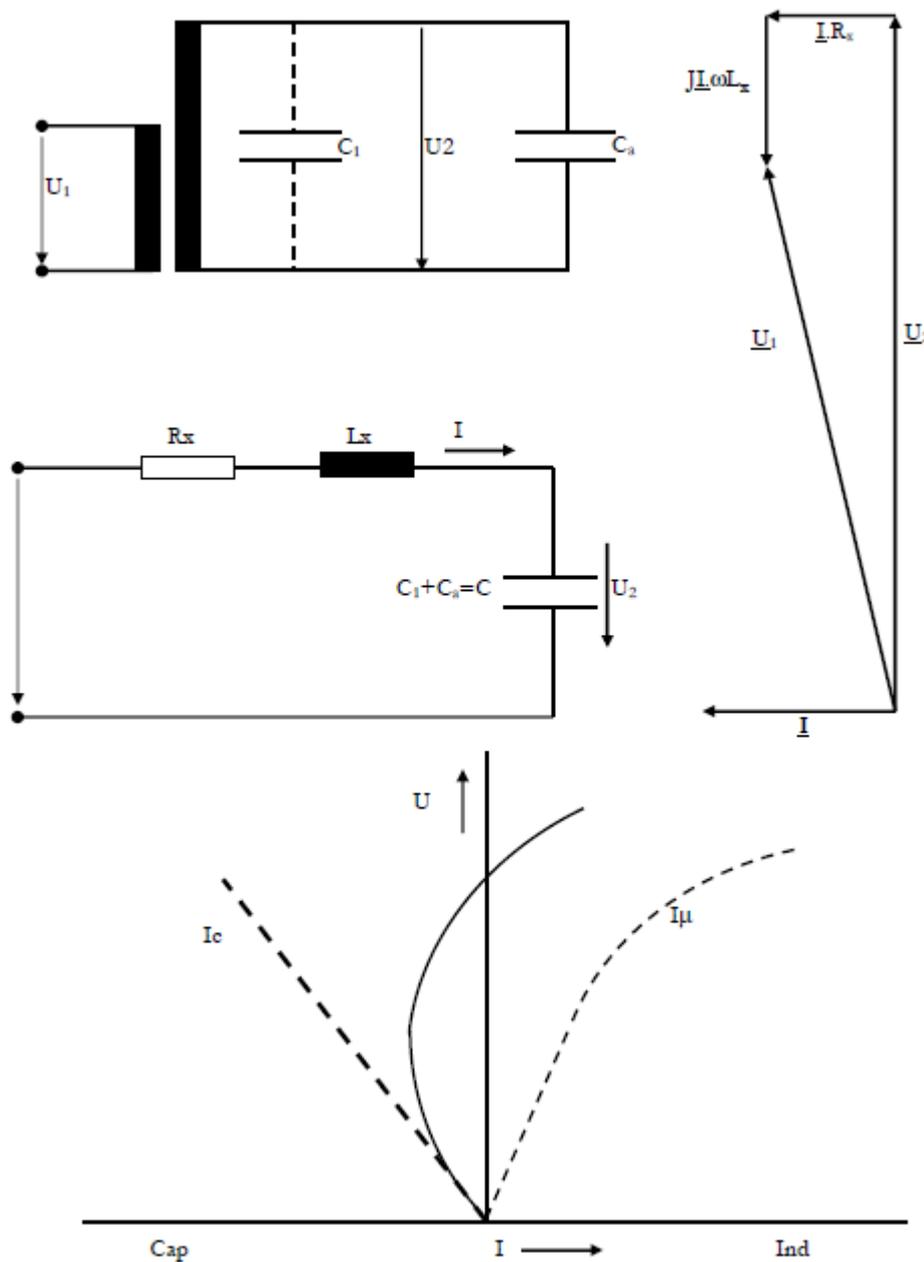


Figura 23 - Liberação no suprimento de tensão devido a I_μ

Portanto, para a determinação do valor da tensão de ensaio, do lado de alta tensão, através da medição da baixa tensão multiplicando por um fator de proporcionalidade, acarretará normalmente em um resultado errado.

Os transformadores de ensaio são representados por um circuito transitório em serie com L_K e $(C_i + C_a)$, de modo que a frequência de ressonância pode ser obtida por ondas harmônicas. Por esta razão, a tensão de excitação tem que ser livre de ondas harmônicas.

6. Geração de Alta Tensão Contínua em Laboratório

Normalmente, os laboratórios necessitam de baixas potências a alta tensão contínua, assim, a alta tensão contínua tanto pode ser gerada por circuitos de retificação quanto por geradores eletrostáticos.

6.1. Circuitos de retificação

O circuito mais simples para geração de alta tensão contínua está mostrado na figura 24.

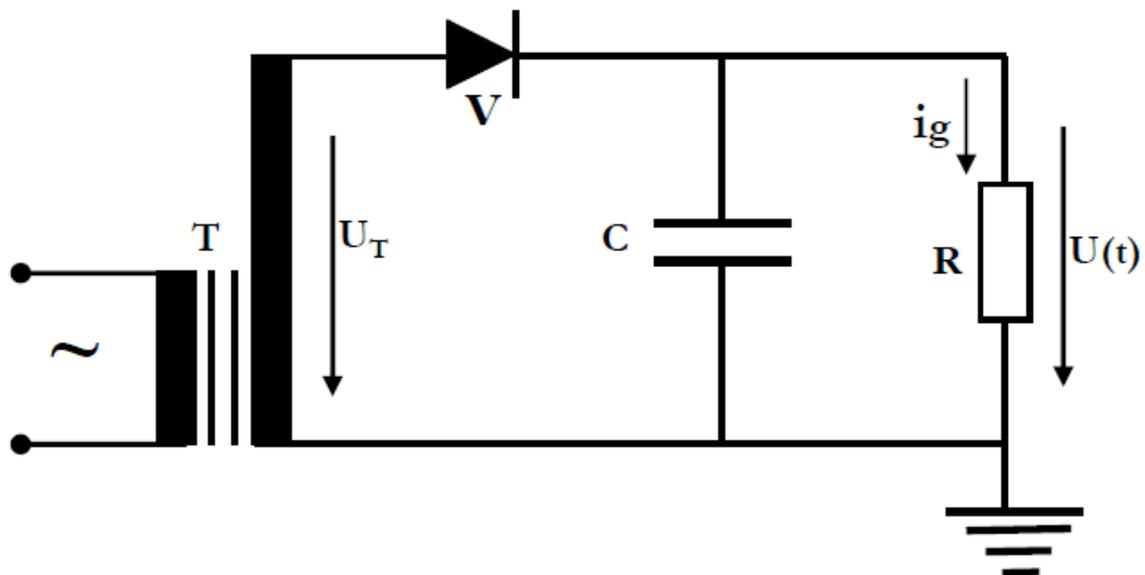


Figura 24 - Circuito de retificação de uma alternância

Uma carga R em paralelo com uma capacitância C é suprida por um transformador T através de um retificador V . Supondo que a tensão secundária U_T do transformador é ideal (resistência nula no sentido direto e corrente nula no sentido inverso). A forma de onda da tensão no capacitor (ou na carga) está mostrada na figura 25.

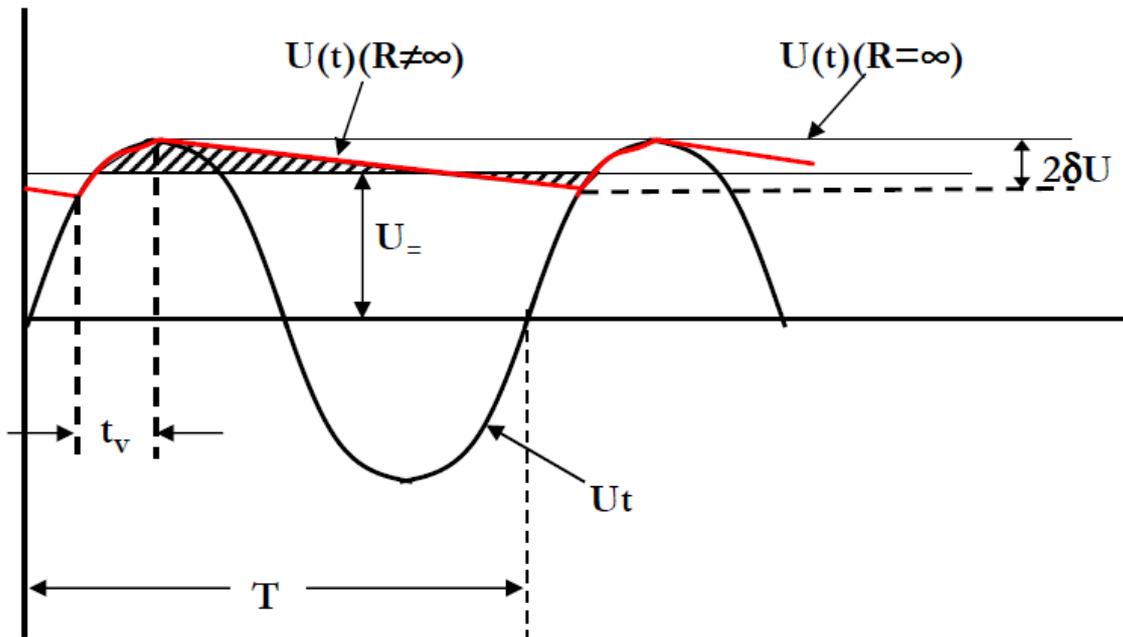


Figura 25 - Tensão no transformador e no capacitor

O funcionamento deste circuito pode ser explicado da seguinte maneira: quando o retificador conduz o capacitor C se carrega até o valor máximo da tensão. Na próxima metade do ciclo o retificador não conduz e o capacitor começa a se descarregar através do resistor R, até que novamente o retificador conduza e ele seja novamente carregado. Convém observar que a curva exponencial segundo a qual o capacitor se descarrega pode ser substituída por uma reta se $t_v \ll T = 1/f$ e $\delta U \ll \bar{U}$. Nestas condições a carga q descarregada pelo capacitor para o objeto de teste é:

$$q = \int_0^T dq = \int_0^T i_g dt = 2\delta U C = T I_g \quad (43)$$

$$\delta U = \bar{I}_g \frac{1}{2fC} \quad (\text{fator de ondulação}) \quad (44)$$

A queda de tensão neste circuito é,

$$\Delta U = \hat{U} - \bar{U} = \delta U \quad (45)$$

6.2. Circuitos multiplicadores

6.2.1. Circuito de Villard

O circuito de Villard é mostrado na figura 26.

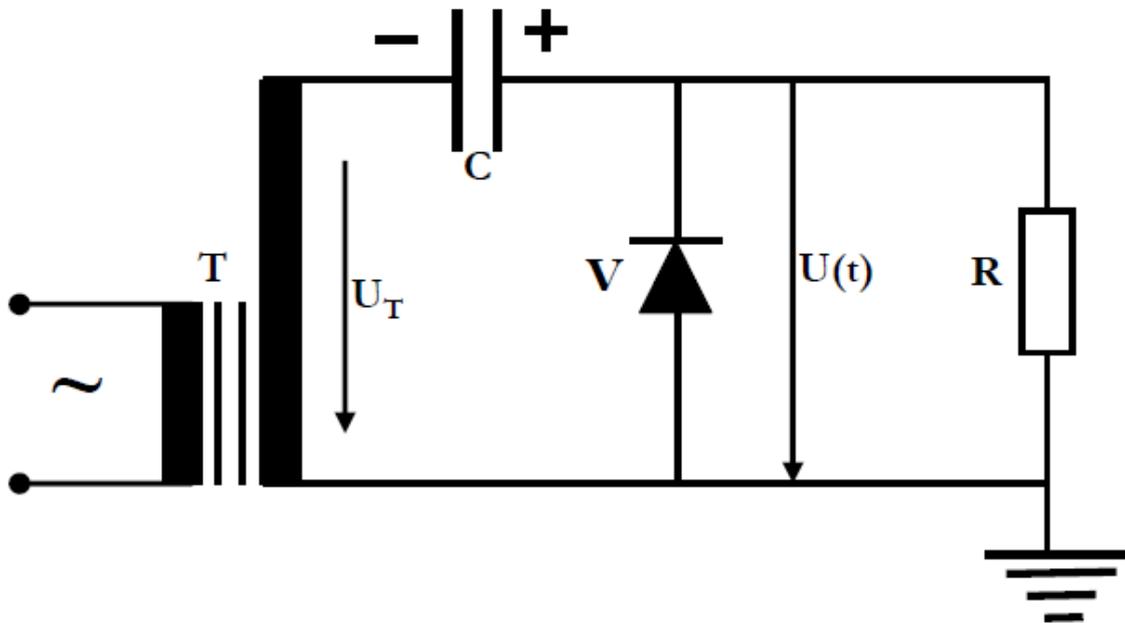


Figura 26 - Circuito de Villard

Em regime permanente o capacitor de bloqueio C é carregado até o valor de pico da tensão $u_t(t)$, então este potencial é acrescido de $u_c(t)$ em relação a $u_T(t)$.

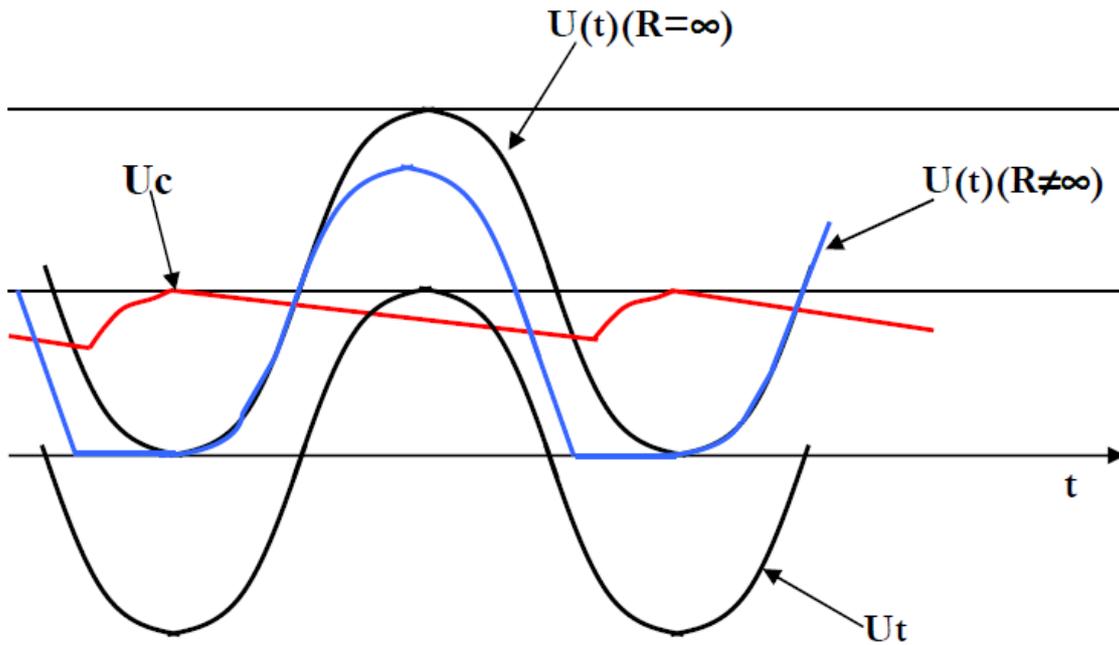


Figura 27 - Curva de tensão

6.2.2. Circuito de Greinacher ou Cockcroft-Walton

O circuito de Greinacher está representado na figura 28. Este circuito é uma extensão do circuito de Villard, onde se acrescenta mais um retificador (V_2), permitindo assim a conexão do capacitor C_2 .

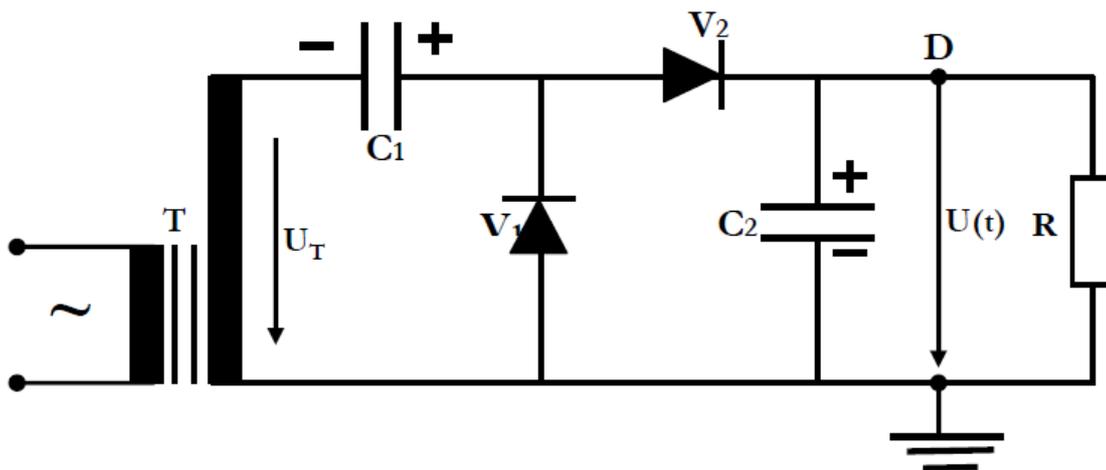


Figura 28 - Circuito de Greinacher

O funcionamento deste circuito pode ser explicado da seguinte maneira: quando o ponto a é negativo o capacitor C1 se carrega na tensão U. Como A cresce para zero o ponto B cresce para 2U. A condução externa ao circuito toma lugar logo que o ponto B é maior que a tensão de saída, isto é, quando B é mais positivo do que D a carga de C1 flui para C2, fazendo a tensão, sem carga, de C2 igual a 2U. Este tipo de arranjo possibilita a ligação em serie de vários circuitos em cascata.

6.2.2.a. **Cascata de Greinacher**

A cascata de Greinacher é o arranjo mais importante para gerar altas tensões contínuas. É uma extensão do circuito de Greinacher e com a inversão de polaridade do retificador obtém-se a inversão da polaridade da tensão contínua.

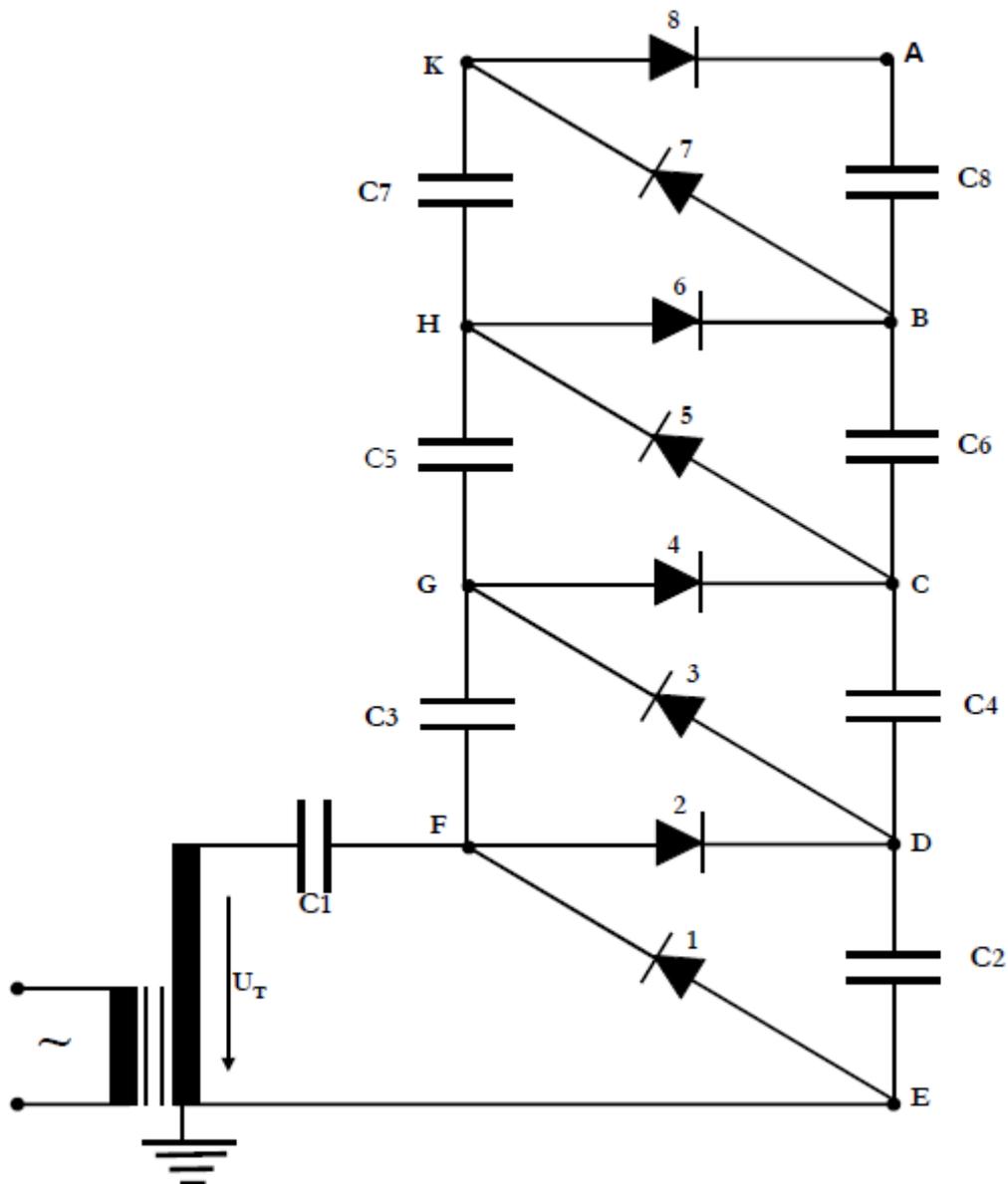


Figura 29 - Cascata de Greinacher

O primeiro estágio da cascata de Greinacher com 4 estágios é ilustrado na figura 29 e pode ser explicado da seguinte maneira: os pontos F, D e E formam um circuito retificador de meia onda e quando o retificar 1 conduz o capacitor C1 carrega para a tensão de $+U_{m\acute{a}x}$. O potencial no ponto F com respeito a terra, entretanto, oscila entre zero e $+2U_{m\acute{a}x}$ e o capacitor C2 está se carregando para $+2U_{m\acute{a}x}$ através do retificar 2.

O ponto D então atinge um potencial fixo de $+2U_{m\acute{a}x}$ e a tensão aplicada em C3 através do retificador 3, entretanto, varia entre $+2U_{m\acute{a}x}$ e zero, mas C3 é carregado com $+2U_{m\acute{a}x}$. O potencial de G, entretanto, oscila entre $+2U_{m\acute{a}x}$ e $4U_{m\acute{a}x}$ e o capacitor C4 é carregado através do retificador 4 com tensão de $+4U_{m\acute{a}x}$. O circuito completo forma um

arranjo cascata e os pontos D, C, B e A são sucessivamente aumentados para os potenciais de $2U_{m\acute{a}x}$, $4U_{m\acute{a}x}$, $6U_{m\acute{a}x}$ e $8U_{m\acute{a}x}$. A utilização desse arranjo com vários estágios possibilita a obtenção de tensões bastante elevadas.

Outra explicação para o princípio de funcionamento do circuito de Greinacher baseado no seu processo transitório é explicado a seguir.

Fazendo-se a ligação do transformador, o retificador V1 fecha inicialmente, permanecendo o retificador V2 aberto por causa da corrente positiva $i_c=Cdu/dt$, como os potenciais em B e D da figura 28 são iguais, forma-se um divisor de tensão, estando metade da tensão aplicada em todas as capacitâncias, com o mesmo valor. No tempo t_1 a direção da corrente V2 se torna negativa $-Cdu/dt$, fechando assim o retificador V2, ainda com o retificador V1 aberto, visto que o potencial com relação a parte do transformador ligado à terra é positivo. Todos os capacitores permanecem com as suas cargas, pois não é possível se descarregar, ficando com a tensão constante até que U_B se torne proporcional em comparação com U_D . No tempo t_2 o retificador V1 abrirá e o capacitor inverterá sua polaridade. O potencial U_B ficará no valor zero até o tempo t_3 , onde se inverterá novamente o sentido da corrente. Os potenciais U_A e U_B crescem em paralelo até o retificador V2 abrir outra vez no tempo $t_4(U_B=U_D)$. Agora o processo se repetirá com a divisão da tensão e a oscilação, nas condições estacionárias.

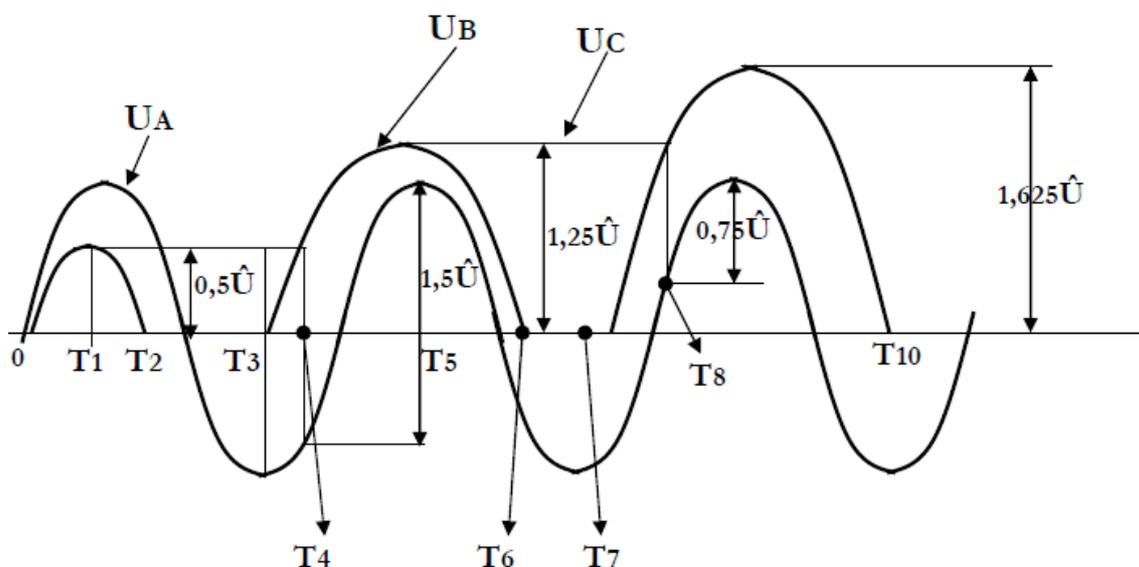


Figura 30 - Curva da tensão transitória de carregamento da cascata de Greinacher

7. Recuperação de transformador

Este tópico abordará de forma sucinta o processo de recuperação de um transformador de ensaio do Laboratório de Alta Tensão da UFCG. O processo de recuperação deste transformador é mais simples visto que não houve danos nos enrolamentos do mesmo, carecendo apenas da troca da isolação e do óleo isolante.

A figura 31 e 32 mostram a isolação danificada do transformador de ensaio..

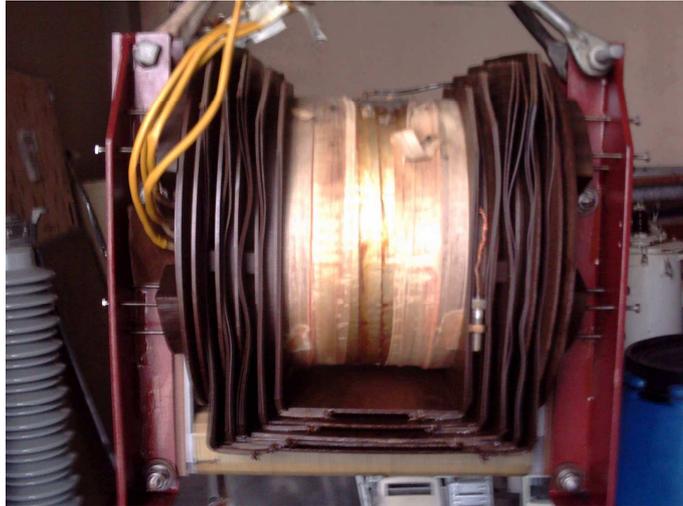


Figura 31 - Isolação danificada



Figura 32 - Detalhe da isolação

O óleo mineral é o meio isolante utilizado no transformador em estudo. Como citado anteriormente, o tempo provoca um processo de envelhecimento do óleo e conseqüentemente este perde suas características isolantes, tornando-se imprestável para o uso em equipamentos elétricos. Quando possível, pode-se recuperar as qualidades dielétricas do óleo através da aplicação de inibidores ou da passagem por um filtro-

prensa. No caso, do transformador do LAT, será efetuada a troca do óleo. A figura 33 ilustra o óleo retirado do transformador após o dano.



Figura 33 – Óleo envelhecido

O transformador foi levado à estufa para retirada de toda a água impregnada, devido ao próprio meio ambiente. A figura 34 ilustra o transformador na estufa, onde se processará a secagem.



Figura 34 - Processo de secagem

O equipamento ficou na estufa por aproximadamente dez dias, decorrido este tempo, foi realizada a troca do papel isolante e em seguida retornou para estufa a espera do óleo novo.

O lado interno da tampa do transformador foi coberto por uma fina camada de resina epóxi, após sua limpeza. Além de ser um bom isolante, a resina também suporta elevadas temperaturas. As figuras 35 e 36 ilustram os cuidados descritos.



Figura 35 - Tratamento com resina epóxi

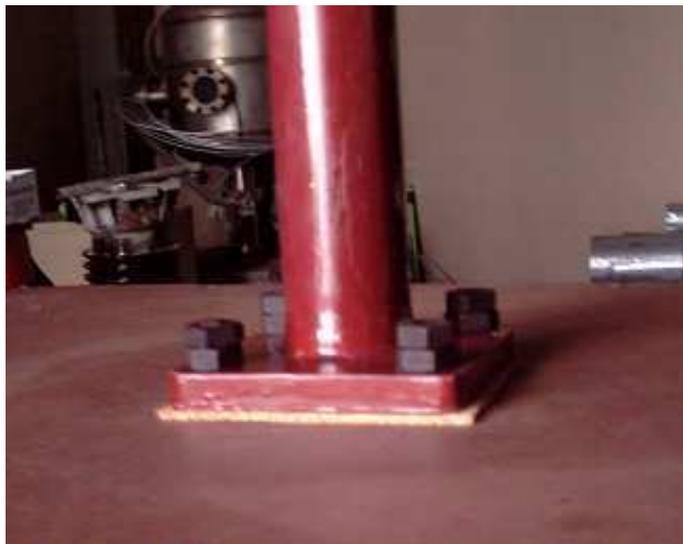


Figura 36 - Detalhe de fixação

8. Considerações Finais

O tema desenvolvido proporcionou a ampliação dos conhecimentos adquiridos em outras disciplinas do curso de Engenharia Elétrica. Buscou-se neste trabalho discutir de forma resumida as técnicas de construção e manutenção de transformadores para utilização em laboratório.

Um domínio das características, construtivas, térmicas e de isolamento pode permitir avanços em projetos e melhor confiabilidade de operação de transformadores.

Bibliografia

BORTONI, E., CARVALHO, P. P., FERREIRA, C., YAMACHITA, R.A., *Conservação de energia: eficiência energética de equipamentos e instalações*. Universidade Federal de Itajubá, 2006.

MARTÍN, J.C., *Teoría, Calculo y Construcción de Transformadores*. Quarta edição. Editorial Labor, S.A.

LABORATÓRIO DE ALTA TENSÃO. Disponível em:
<<http://www.dee.ufcg.edu.br/~gse/labat.html>>. Acesso em 16 de setembro de 2010.

MAMEDE FILHO, J. *Manual de Equipamentos Elétricos*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1993.

FITZGERALD, A.E AND UMANS, STEPHEN D., “*Máquinas Elétricas*”. 6ª edição, Artimed editor, 2006.

Apostila do professor EDSON GUEDES, GERAÇÃO DE ALTA TENSÃO, UFCG.

Catálogo de Transformadores, SCHAFFNER S.A. – Estação Central – Santiago – Chile.

