



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**A INFLUÊNCIA DA DUPLA EXCITAÇÃO
CA/CC NA DEMANDA DE POTÊNCIA
REATIVA EM TRANSFORMADORES
TRIFÁSICOS**

1210001207



MARCO ARTHUR STORT FERREIRA

Ilha Solteira - SP

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**A INFLUÊNCIA DA DUPLA EXCITAÇÃO C.A./C.C.
NA DEMANDA DE POTÊNCIA REATIVA EM
TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS**

MARCO ARTHUR STORT FERREIRA

ORIENTADOR : Prof. Dr. JOSÉ CARLOS ROSSI

Dissertação submetida à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Elétrica (ME)**.

ILHA SOLTEIRA - SP
ABRIL-2001

BCpIS - FEIS - UNESP



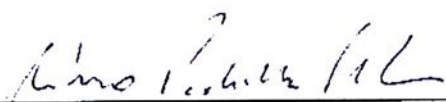
A INFLUÊNCIA DA DUPLA EXCITAÇÃO C.A./C.C. NA DEMANDA DE POTÊNCIA REATIVA EM TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

MARCO ARTHUR STORT FERREIRA

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA
SOLTEIRA – UNESP – COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA
ELÉTRICA (ME).

1210001207

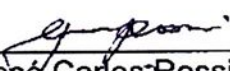


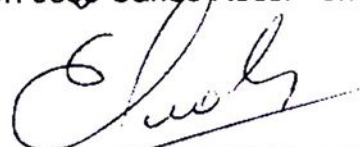

Prof. Dr. Antonio Padilha Feltrin – Coordenador

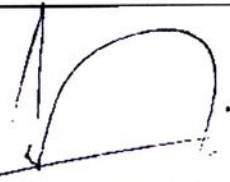
COMISSÃO EXAMINADORA:

Doc. 040/2001 - NPD 085/01

UNESP - "CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA"	
SERVIÇO TÉCN. DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO	
DATA DE CHEGADA	DATA DE TÓRNO
10.8.01	30.8.01
Assinatura	Te. 1207
Aquisição	Classificação
Localização	
Autores	
R\$10,00	


Prof. Dr. José Carlos Rossi - orientador


Prof. Dr. Edwin Avolio


Prof. Dr. Luís Carlos Origa de Oliveira

Ilha Solteira – SP, abril de 2001

BCpIS - FEIS - UNESP

unesp

A minha esposa Rita de Cássia e aos
meus Pais Alfredo e Nilva.



AGRADECIMENTOS

À minha família;

À Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – UNESP, campus de Ilha Solteira;

Ao Professor Dr. José Carlos Rossi pela amizade, pela contribuição técnica, atenção e preocupação em todos os momentos da realização deste trabalho, minha eterna gratidão;

Ao Professor Dr. Luís Carlos Origa de Oliveira pela orientação técnica, colaboração e compreensão durante a realização deste trabalho, meu profundo agradecimento;

A todos os colegas do curso de pós-graduação, principalmente aqueles que sempre estiveram ao meu lado durante o curso;

A todos os funcionários do DEE (Departamento de Engenharia Elétrica) da FEIS (Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira);

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pelo apoio financeiro.

A outros que involuntariamente foram esquecidos.

ÍNDICE

RESUMO	viii
---------------------	-------------

ABSTRACT	ix
-----------------------	-----------

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO GERAL.....	1
------------------------------	----------

CAPÍTULO II

FENÔMENO DA DUPLA EXCITAÇÃO C.A./C.C.....	5
2.1. - Introdução.....	5
2.2. - Fenômeno da dupla excitação.....	5
2.3. - Fontes c.c. nos sistemas elétricos de potência c.a.....	7
2.3.1. - Conversores e Compensadores estáticos controlados por tiristor	7
2.3.2. - Indução geomagnética.....	8
2.3.3. - Retorno por terra nos sistemas de transmissão de corrente contínua	10
2.4. - Conclusões.....	11

CAPÍTULO III

MODELAGEM MATEMÁTICA.....	12
3.1. - Introdução.....	12
3.2. - Cálculo por fase dos parâmetros do circuito equivalente elétrico dos transformadores.....	12
3.2.1. - Corrente de Magnetização.....	14
3.2.2. - Corrente de Perdas.....	17
3.2.3. - Potências envolvidas.....	17
3.3. - Modelagem para o Banco Trifásico.....	19
3.3.1. - Conexão YY	19
3.3.2. - Conexão ΔY	21
3.3.3. - Conexão $Y Y$	24
3.4. - Modelagem do Transformador Trifásico de núcleo envolvido	26
3.4.1. - Conexão Y/Y	33
3.4.2. - Conexão Δ/Δ	35
3.4.3. - Conexão Y/Y	37

CAPÍTULO IV

ESTUDOS EXPERIMENTAIS.....	39
4.1. - Introdução.....	39
4.2. - Características das unidades transformadoras.....	40
4.2.1. - Características das unidades monofásicas	40
4.2.2. - Características das unidades trifásicas de núcleo envolvido	47
4.3. - Procedimentos experimentais para execução da dupla excitação.....	54
4.4. - Banco de transformadores monofásico	56
4.4.1. - Conexão YY	56

4.4.1.1. – Com excitação c.c. nula	56
4.4.1.2. – Com excitação c.c. de 5,0% da corrente nominal.....	56
4.4.1.3. – Com excitação c.c. de 15,0% da corrente nominal.....	57
4.4.1.4. – Potência reativa e fator de potência	58
4.4.2. – Conexão ΔY	59
4.4.2.1. – Com excitação c.c. nula	59
4.4.2.2. – Com excitação c.c. de 5,0% da corrente nominal.....	59
4.4.2.3. – Com excitação c.c. de 15,0% da corrente nominal.....	60
4.4.2.4. – Potência reativa e fator de potência	61
4.4.3. – Conexão $Y Y$	62
4.4.3.1. – Com excitação c.c. nula	62
4.4.3.2. – Com excitação c.c. de 5,0% da corrente nominal.....	63
4.4.3.3. – Com excitação c.c. de 15,0% da corrente nominal.....	63
4.4.3.4. – Potência reativa e fator de potência	64
4.5. – Transformador trifásico.....	65
4.5.1 – Conexão $Y Y$	65
4.5.1.1. – Com excitação c.c. nula	65
4.5.1.2. – Com excitação c.c. de 5,0% da corrente nominal.....	66
4.5.1.3. – Com excitação c.c. de 15,0% da corrente nominal.....	66
4.5.1.4. – Potência reativa e fator de potência	67
4.5.2. – Conexão ΔY	68
4.5.2.1. – Com excitação c.c. nula	68
4.5.2.2. – Com excitação c.c. de 5,0% da corrente nominal.....	69
4.5.2.3. – Com excitação c.c. de 15,0% da corrente nominal.....	70
4.5.2.4. – Potência reativa e fator de potência	70
4.5.3. – Conexão $Y Y$	71
4.5.3.1. – Com excitação c.c. nula	71
4.5.3.2. – Com excitação c.c. de 5,0% da corrente nominal.....	72
4.5.3.3. – Com excitação c.c. de 15,0% da corrente nominal.....	73
4.5.3.4. – Potência reativa e fator de potência	73

CAPÍTULO V

SIMULAÇÃO DIGITAL	75
5.1. – Introdução.....	75
5.2. – Procedimentos para Simulação Digital	75
5.3. – Resultados da simulação	77
5.3.1. – Banco de transformadores monofásicos	77
5.3.1.1. – Conexão $Y Y$	77
5.3.1.2. – Conexão ΔY	79
5.3.1.3. – Conexão $Y Y$	80
5.3.2. – Transformador trifásico.....	82
5.3.2.1. – Conexão $Y Y$	82
5.3.2.2. – Conexão ΔY	84
5.3.2.3. – Conexão $Y Y$	86
5.4. – Conclusões.....	87

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES GERAIS.....	89
-------------------------------	-----------



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92
APÊNDICE A	94



RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo estudar o comportamento da potência reativa absorvida pelos transformadores trifásicos quando os mesmos operam sob a condição de duplamente excitados.

Sob estas condições de excitação, são feitas modelagem matemática e simulações digitais tanto para o transformador trifásico de núcleo envolvido quanto para o do tipo banco trifásico constituído por unidades monofásicas.

Para verificar a validade do modelo matemático proposto, são realizados estudos experimentais em laboratórios. Os resultados simulados e os procedimentos dos ensaios experimentais são apresentados sob a forma de gráficos e tabelas.



ABSTRACT

The present work has as objective to study the behavior of the reactive power that is absorbed by the three phase transformers when the same ones operate under the condition of double excitation.

Under these excitation conditions, they are made mathematical modelings and digital simulations for the three phase transformers core type and for the bank of transformer constituted of three unit's single phase.

To verify the validity of the proposed mathematical model, experimental studies are accomplished in laboratories. The simulate results and the procedures of the experimental rehearsals are presented under the form of graphs and tables.



CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO GERAL

O interesse pelo estudo dos efeitos das componentes contínuas de corrente em dispositivos projetados para operar, essencialmente, com sinais alternados tem aumentado consideravelmente nos últimos anos. Isto se deve fundamentalmente à crescente utilização de equipamentos tiristorizados nos sistemas de potência. Tais dispositivos, embora projetados para não apresentarem valores médios nas suas correntes de alimentação, podem estar sujeitos a estas ocorrências devido a desequilíbrios entre os disparos dos tiristores.

Apesar dos esforços conjuntos desempenhados pelas concessionárias e consumidores, observa-se atualmente que os índices de distorção, oscilação de tensão e desequilíbrios tem aumentado de modo individual ou conjuntamente, ultrapassando muitas vezes os níveis máximos admissíveis ou recomendados [1]. Nestas condições, os prejuízos para os supridores e para os consumidores poderão atingir proporções insuportáveis e, somente com um controle consciente, efetivo e sistematizado, envolvendo as duas partes citadas, pode-se evitar ou reduzir as consequências danosas e operações elétricas indevidas.

Embora se reconheça que a qualidade das chapas magnéticas associadas às metodologias de projetos tenham de fato limitado as correntes magnetizantes a níveis aceitáveis, os transformadores voltam a despertar a atenção das empresas do setor elétrico e dos pesquisadores quanto ao seu comportamento como fonte harmônica. De um modo geral, não é uma prática comum considerar o transformador de potência como fonte



harmônica em estudos de penetração harmônica. Existem entretanto, situações operativas onde os transformadores ficam sujeitos a excitações simultâneas em corrente alternada (c.a.) e corrente contínua (c.c.), o que pode provocar a saturação assimétrica do meio magnético e alterar drasticamente sua corrente magnetizante [2]. Sob estas condições operativas, estas correntes normalmente apresentam elevados valores de pico além de um substancial aumento do conteúdo harmônico provocando, assim, uma demanda de potência reativa maior.

A presença de componentes contínuas de correntes nos sistemas de corrente alternada tem sido observada há pelo menos três décadas. Inicialmente foram identificadas aquelas decorrentes de distúrbios geomagnéticos (GIC - “geomagnetic induced currents” ou SIC - “solar induced currents”), que são consideradas como contínuas porque apresentam frequências entre 0,001Hz a 0,1 Hz. Os potenciais induzidos na superfície da terra durante as tempestades solares variam entre 3 a 6 volts/km e as correntes resultantes podem atingir valores entre 5A e 100A [3]. Trata-se contudo de um problema localizado, pois a intensidade dessas tempestades varia com a latitude norte e por conseguinte estão praticamente limitadas ao hemisfério norte e particularmente nas regiões de alta latitude, como por exemplo no Canadá onde já foram registradas inúmeras ocorrências deste fenômeno.

Do ponto de vista global, o que tem caracterizado de fato o aumento das componentes contínuas nas diferentes regiões industrializadas do mundo é sem dúvida a crescente utilização de equipamentos e sistemas com acionamentos à base de semicondutores. Entre eles destacam-se os conversores estáticos, compensadores estáticos tipo RCT e os sistemas de transmissão em corrente contínua. Para os primeiros, os valores típicos de corrente contínua observados situam-se entre 1% e 4% de suas respectivas correntes nominais.



No caso da transmissão em c.c. o aparecimento de correntes contínuas está ligado às operações monopolares que normalmente ocorrem durante os períodos de manutenção programada de um dos pólos ou durante distúrbios de operação. Nestas condições, a transmissão c.c. opera com retorno por terra e a corrente contínua circulante pode percorrer caminhos alternativos oferecidos pelos sistemas em c.a. através do aterramento dos transformadores.

Estes fatos tem motivado inúmeras investigações sobre o comportamento dos transformadores de potência sob condições de dupla excitação c.a. e c.c.. Vários trabalhos têm abordado o assunto dando especial destaque à questão da geração de harmônicas com vistas a sua propagação pelo sistema alimentador e também com relação ao estudo do comportamento da potência reativa e do fator de potência do transformador.

As considerações físicas, propostas de modelos, discussões de resultados e conclusões sobre o comportamento de transformadores submetidos a dupla excitação c.a. e c.c. foram apresentadas em trabalhos anteriores [04], [05], [06]. Nestes, a metodologia de cálculo proposta foi fundamentada na avaliação do fluxo magnético no núcleo através de um processo de cálculo passo a passo, a partir de uma representação hiperbólica para a característica de magnetização. Esta metodologia apresenta resultados bastante satisfatórios.

Como se sabe, a corrente de excitação dos transformadores de potência possui uma característica fortemente indutiva e apresenta um valor eficaz da ordem de 0,5% à 5% da sua corrente nominal. Quando estes são excitados simultaneamente por fontes c.a. e c.c. sua corrente magnetizante pode atingir valores eficazes muitas vezes maiores que os previstos em condições normais, acentuando ainda mais sua característica indutiva. Desta forma, e ainda considerando o alto conteúdo



harmônico presente nestas condições, é compreensível que haja um aumento na demanda de potência reativa e também uma diminuição do fator de potência da instalação, quando o transformador opera sob dupla excitação c.a./c.c.

No capítulo 2 foi feito uma análise qualitativa do fenômeno da dupla excitação, as principais fontes c.c. nos sistemas elétricos de potência, as causas e os efeitos.

No capítulo 3 é feita a modelagem matemática para o banco trifásico constituído de três unidades monofásicas e a modelagem do transformador trifásico de núcleo envolvido.

No capítulo 4 foram realizados estudos experimentais adotados para o banco de transformadores trifásico e para o transformador trifásico, além dos resultados dos ensaios.

No capítulo 5 foram apresentados os procedimentos adotados para a simulação digital e os resultados obtidos.

No capítulo 6, apresentamos as conclusões obtidas com este trabalho.



CAPÍTULO II

FENÔMENO DA DUPLA EXCITAÇÃO C.A./C.C.

2.1. – Introdução

Neste capítulo será apresentada uma análise das principais fontes e fenômenos de componentes contínuas que de alguma forma injetam corrente contínua nos sistemas de corrente alternada. Daremos, no decorrer do trabalho, maior importância para aquelas fontes que de alguma forma interfiram na operação dos transformadores de potência, que é o objeto de nossa pesquisa.

Estes transformadores, sob estas condições anormais de operação ficam submetidos a uma dupla excitação c.a./c.c., o que provoca uma magnetização assimétrica do núcleo. Como consequência disto, uma série de problemas afetam estes equipamentos causando problemas para o sistema elétrico de potência. O problema observado neste trabalho se relaciona com a demanda de potência reativa nas condições citadas acima.

2.2. – Fenômeno da dupla excitação

Sabe-se que um transformador sem carga, quando excitado por uma fonte de tensão senoidal, absorve do sistema alimentador uma corrente elétrica não



senoidal e simétrica, que possui apenas ordens harmônicas ímpares. Esta característica se deve fundamentalmente à não linearidade entre o fluxo magnético, que se estabelece no núcleo do transformador, e a corrente de excitação necessária para produzi-lo.

Quando ocorre um desbalanceamento magnético, motivado pela existência de um nível médio de fluxo superposto ao fluxo c.a. no núcleo, a característica de magnetização passa a ser tratada de forma assimétrica e a corrente de magnetização apresenta-se sensivelmente alterada, como pode ser observado na figura 2.1.

A citada assimetria magnética ocorre, por exemplo, quando os transformadores alimentam cargas cujas correntes de alimentação possuem níveis médios diferentes de zero. Nestas condições operativas destaca-se que, devido a impossibilidade física de se transferir sinais contínuos de corrente do secundário para o primário, acontecem saturações assimétricas, resultantes da composição do fluxo convencional c.a. com um fluxo residual c.c. [04].

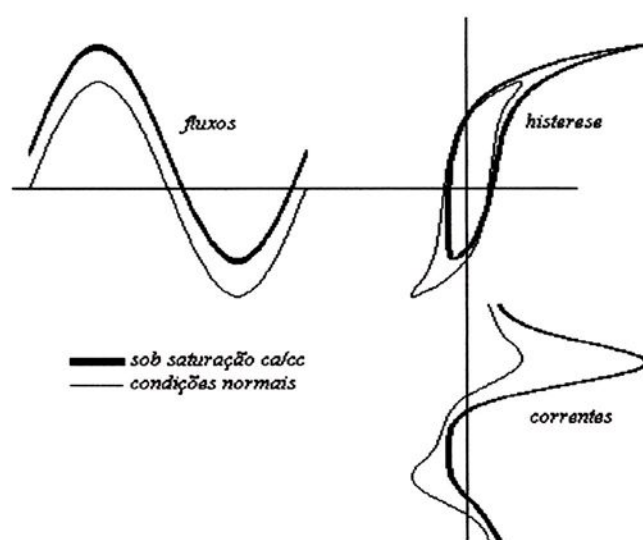


Figura 2.1 – Fenômeno da dupla excitação

2.3. – Fontes c.c. nos sistemas elétricos de potência em c.a.

2.3.1. – Conversores e Compensadores estáticos controlados por tiristor

As características de funcionamento e a grande flexibilidade de operação fizeram com que estes tipos de equipamentos fossem amplamente difundidos na última década. Os conversores trifásicos em ponte totalmente controlados, são usados com muita frequência em várias aplicações industriais que utilizam energia elétrica em corrente contínua, bem como, em sistemas de energia elétrica onde a transmissão em corrente contínua é indicada [07], [08]. Para as transformações c.a./c.c. envolvendo níveis de potência da ordem de 5 a 10 KW, muitas vezes são utilizados os conversores trifásicos semi-controlados por serem economicamente atraente em relação à pontes totalmente controladas [08].

As instalações conversoras e compensadoras que utilizam dispositivos a estado sólido em suas configurações podem, trabalhando em condições não idealizadas e desbalanceadas, serem passíveis de se constituírem em fontes de correntes contínuas nos sistemas de corrente alternada.

A versatilidade do uso de compensadores fica evidenciada quando os mesmos são instalados em sistemas que necessitam de correções automáticas do fator de potência, correções de flicker ou compensação de desequilíbrio de correntes.

Estes dispositivos são constituídos basicamente de um banco de capacitores fixos associados a um banco de reatores controlados por tiristores. As correntes que se estabelecem pelos reatores são definidas atuando-se sobre os ângulos de disparo dos tiristores, o que implica num ajuste de forma contínua.[09].



Para ângulos de disparo dos tiristores diferentes de 90 graus, as correntes absorvidas pelos reatores não são senoidais, e sob certas condições podem apresentar valores médios diferentes de zero. Tais ocorrências se devem à desvios entre os pulsos de gatilhamento dos tiristores.

Os conversores estáticos trifásicos, em sua configuração básica, podem ser totalmente controlado ou semi-controlado.

Os conversores totalmente controlados são compostos de um sistema eletrônico que produz os seis pulsos necessários para inicializar o processo de condução dos tiristores [08].

Em uma análise do conversor totalmente controlado, pode-se observar que sob condições ideais de operação (tensões de alimentação equilibradas, sem conteúdo harmônico e com os componentes do sistema elétrico apresentando as mesmas características) as correntes de alimentação absorvidas possuem valores médios nulos, ou seja, este dispositivo não injeta componente de corrente contínua no sistema alimentador.

Por outro lado, passando das condições ideais para as reais, existem situações especiais de operação nas quais as correntes de alimentação desses equipamentos passam a apresentar valores médios diferentes de zero. Sob estas condições, estes dispositivos se comportam como fontes geradoras de componentes contínuas de corrente nos sistemas de transmissão em corrente alternada.

2.3.2. – Indução geomagnética

As variações no campo magnético da terra são conhecidas como distúrbios geomagnéticos ou tempestades geomagnéticas e estão diretamente ligadas às



atividades solares. Devido a estas variações temos uma produção na superfície terrestre de potenciais induzidos da ordem de 3 a 6 volts / km [10].

Os potenciais induzidos nos pontos de aterramento dos sistemas elétricos de potência, podem provocar uma corrente elétrica c.c. nos seu condutores. Estas correntes, também conhecidas com SIC (Solar Induced Current) ou ainda GIC (Geomagnetic Induced Current) [10], [11], [12], em geral, possuem amplitudes entre 5 e 100 A e tem um período da ordem de minutos (0,001 a 0,1 Hz), razão pela qual são consideradas como contínuas quando comparadas com as frequências de operação do sistema de corrente alternada (50 / 60 Hz).

A partir das inúmeras observações registradas do fenômeno de indução geomagnética é possível concluir que os potenciais induzidos e consequentemente as "SIC" ocorrem com maior frequência com o aumento da latitude norte. Verifica-se também que estas apresentam magnitudes maiores na direção este-oeste do que na direção norte-sul [10], dependendo evidentemente da formação geológica local que define a resistividade do solo. As publicações que tratam deste assunto relatam que as ocorrências de tempestades geomagnéticas são frequentes apenas no hemisfério norte, sendo praticamente impossíveis de ocorrer no nosso país.

Como o GIC / SIC flui através da terra, consequentemente pelo lado aterrado do transformador que é o lado da ligação em estrela, isto pode conduzir o núcleo a ficar submetido a um elevado grau de saturação. Neste caso, as correntes de excitação ficam totalmente distorcidas, apresentando altos valores de pico.



2.3.3. – Retorno por terra nos sistemas de transmissão em corrente contínua

Na a transmissão de energia elétrica em corrente contínua, encontramos dois sistemas básicos comumente utilizados, ou seja, os sistemas monopolares e os sistemas bipolares.

Nos sistemas monopolares, o solo é empregado permanentemente como um condutor pelo qual circula a corrente nominal do sistema. Nos sistemas bipolares, mais difundidos atualmente, cada polo opera com a metade da potência nominal e, para este caso, o solo é considerado um condutor de reserva. Porém, mesmo estes sistemas bipolares podem operar de forma monopolar numa primeira etapa de implantação, quando apenas um dos pólos foi concluído. Quando o sistema está pronto, ainda se utiliza a operação monopolar em períodos relativamente longos nas paradas programadas para manutenção de um do pólos, ou em situações de emergência.

As correntes provenientes de retorno por terra são geralmente muito elevadas e podem constituir-se em fontes de correntes contínuas para todos os sistemas e dispositivos elétricos aterrados na área de sua influência.

Assim, os transformadores, dispositivos integrantes dos sistemas elétricos de potência em corrente alternada, ficam sujeitos a circulação de correntes contínuas quando seus enrolamentos são conectados em estrela aterrada. Isto provoca a saturação no núcleo e as correntes de excitação passam a apresentar uma forma de onda bastante distorcida e com picos elevados.



2.4. – Conclusões

As análises das fontes de corrente contínua apresentadas neste trabalho mostram claramente a importância com que este fenômeno deve ser considerado. Os níveis de corrente contínua obtidos por simulação [09], ou mesmo, relatados em vários outros trabalhos, são muitas vezes bastante significativos, quando comparados com as correntes magnetizantes dos transformadores que compõem os sistemas elétricos de potência. Este fato pode resultar em magnetizações assimétricas, cujas consequências afetam não só os transformadores como também os sistemas de alimentação.

Para os retificadores, que são cargas que apresentam componentes médias diferentes de zero nas suas correntes de alimentação, decorrentes da sua característica própria de operação, embora para algumas delas, os níveis de injeção c.c. sejam apreciáveis, algumas providências sempre podem ser tomadas no sentido de minimizar tais efeitos, uma vez que as causas são conhecidas.

Para os conversores e compensadores estáticos controlados por tiristores, e que somente apresentam componentes c.c. quando operam em condições não ideais, as consequências podem ser mais preocupantes. Nestes casos a origem das componentes contínuas é conhecida mas depende de fatores aleatórios ligados principalmente ao comportamento dos circuitos de disparos dos tiristores. Consequentemente nas instalações desse tipo de equipamento são necessários cuidados especiais com o planejamento e a supervisão de operação.

Em relação às componentes de corrente contínua oriundas da indução geomagnética, apesar de apresentarem os níveis mais elevados, a frequência com que se manifestam é em geral muito menor quando comparada com os itens anteriores, sobretudo no nosso país.



CAPÍTULO III

MODELAGEM MATEMÁTICA

3.1. – Introdução

Neste capítulo é feita a modelagem matemática do banco trifásico de transformadores composto de três unidades monofásicas, e do transformador trifásico de núcleo envolvido, o qual será utilizado para a simulação digital.

O modelo matemático desenvolvido procura atender todas as formas usuais de conexões dos enrolamentos tanto do primário quanto do secundário.

3.2. – Cálculo por fase dos parâmetros do circuito equivalente elétrico dos transformadores

Como se sabe, existem basicamente três tipos de transformadores trifásicos, com constituição distintas, explicadas a seguir:

- Banco trifásico: constituído de três unidades monofásicas com as mesmas características construtivas.
- Transformador trifásico de núcleo envolvido: constituído por um único núcleo magnético de três colunas.



– Transformador trifásico de núcleo envolvente: constituído por um único núcleo magnético de cinco colunas.

Como dito anteriormente, neste trabalho serão estudados os transformadores trifásicos do tipo banco trifásico constituído por três unidades monofásicas e os do tipo trifásico com núcleo envolvido.

Para o banco trifásico, como o mesmo é constituído de três unidades monofásicas, observa-se que há uma total independência magnética entre os fluxos gerados, e somente as ligações dos enrolamentos podem influir nos resultados.

Para o transformador trifásico de núcleo envolvido, ao contrário do banco trifásico, o fluxo gerado por qualquer uma das fases não depende apenas da força magnetomotriz líquida da fase em questão, mas sim da composição das forças magnetomotrizes das outras fases [13], [14].

Baseado então nestes princípios acima descritos, é realizado a seguir a modelagem matemática do banco de transformadores trifásico constituído de três unidades monofásicas e do transformador trifásico de núcleo envolvido.

A modelagem matemática é feita para diversos tipos de ligações dos enrolamentos do primário e secundário dos transformadores. Serão sempre considerados transformadores com dois enrolamentos.

A figura 3.1 mostra o circuito elétrico equivalente por fase de um transformador o qual leva em consideração os efeitos da resistência dos enrolamentos e da indutância de dispersão:

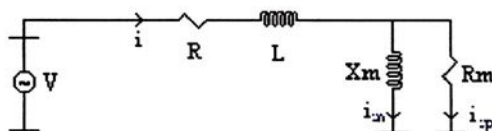


Figura 3.1 – Representação por fase da unidade monofásica

A equação das tensões que descreve o circuito elétrico da figura

3.1 é dada por:

$$V = R * i + L * \frac{di}{dt} + N * \frac{d\phi}{dt} \text{ (Volts)} \quad (3.1)$$

onde: V – tensão aplicada (volts);

R – resistência dos enrolamentos em (Ω);

L – indutância de dispersão (Hemry);

N – nº de espiras do enrolamento;

X_m – reatância de magnetização (Ω);

R_m – resistência de perdas (Ω);

ϕ – fluxo magnético.

A corrente de excitação é constituída de duas parcelas, ou seja:

$$i(t) = i_m(t) + i_{Rp}(t) \text{ (A)} \quad (3.2)$$

onde: $i_m(t)$ – corrente de magnetização (A);

$i_{Rp}(t)$ – corrente de perdas (A).

3.2.1. – Corrente de Magnetização

Um dos pontos de fundamental importância neste trabalho é a forma de se avaliar e representar a saturação do núcleo de material ferromagnético.



Foi utilizada uma formulação analítica através de uma função contínua para a representação da curva de magnetização a exemplo de trabalhos anteriores [4] e [5].

O modelo proposto admite a representação da curva de magnetização através de uma função hiperbólica do tipo:

$$H = \alpha * \sinh(\beta * B) \quad (3.3)$$

onde: H – intensidade de campo (A*esp.);

B – densidade de fluxo magnético (Tesla);

α e β – constantes.

As constantes α e β são obtidas a partir de ensaios experimentais, onde são levantados em laboratório as características ($V \times i$) de cada unidade transformadora.

Os resultados destes ensaios são então utilizados para o ajuste da função hiperbólica.

Devido ao fato do secundário do transformador estar em vazio, as correntes no secundário são nulas, portanto a *f.m.m.* total aplicada ao circuito magnético do transformador depende apenas da corrente de excitação.

Aplicando-se a lei circuital de Ampère ($\oint H d\ell = Ni$) ao núcleo da unidade monofásica, pode ser escrito que:

$$N * i = H * \ell \quad (3.4)$$

onde: N – número de espiras do enrolamento primário;

H – intensidade de campo ($A \cdot esp.$);

ℓ – comprimento médio do núcleo (m).

Para a corrente de magnetização temos:

$$i_m = \sum i_{m_n} + i_{m_0} \quad (3.5)$$

onde: $\sum i_{m_n}$ – componente fundamental mais componentes harmônicas da corrente de magnetização;

i_{m_0} – componente média da corrente de magnetização.

Substituindo 3.5 em 3.4, temos:

$$N * i_m = H * \ell \quad (3.6)$$

Substituindo a equação 3.3 na equação 3.6, tem-se:

$$N * i_m = \alpha * \ell * \sinh(\beta * B)$$

Isolando-se a corrente i_m , tem-se:

$$i_m = \frac{\alpha * \ell}{N} * \sinh(\beta * B) \quad (3.7)$$

Relacionando a corrente de magnetização com o fluxo do núcleo, e ainda, como $B = \frac{\phi}{S}$, podemos escrever:

$$i_m = \frac{\alpha * \ell}{N} * \sinh\left(\frac{\beta}{S} * \phi\right) \quad (3.8)$$

Chamando $\frac{\alpha * \ell}{N} = k_1$ e $\frac{\beta}{S} = k_2$ e substituindo na equação 3.8,

resulta:

$$i_m = k_1 * \sinh(k_2 * \phi) \quad (3.9)$$

3.2.2. – Corrente de Perdas

Através da tensão induzida podemos estimar a corrente de perdas, que é dada por:

$$i_{Rp} = \frac{N \frac{d\phi}{dt}}{R_p} \quad (3.10)$$

onde: R_p – resistência de perdas por fase do circuito magnético.

Substituindo-se as equações 3.9 e 3.10 na equação 3.2 a corrente de excitação será dada por

$$i = k_1 \cdot \sinh(k_2 * \phi) + \frac{N \frac{d\phi}{dt}}{R_p} \text{ (A)} \quad (3.11)$$

3.2.3. – Potências envolvidas

Por definição, a potência aparente é dada por:



$$S = V.I \text{ (VA)} \quad (3.12)$$

Substituindo-se 3.11 em 3.12, resulta:

$$S = V \left[k_1 \cdot \sinh(k_2 \cdot \phi) + \frac{N \frac{d\phi}{dt}}{R_p} \right] \text{ (VA)} \quad (3.13)$$

Para a potência ativa temos:

$$P = V.I \cdot \cos \varphi \text{ (Watts)}$$

$$P = V \left[k_1 \cdot \sinh(k_2 \cdot \phi) + \frac{N \frac{d\phi}{dt}}{R_p} \right] \cdot \cos \varphi \text{ (Watts)} \quad (3.14)$$

Para a potência reativa resulta:

$$Q = V.I \cdot \sin \varphi \text{ (VAr)}$$

$$Q = V \left[k_1 \cdot \sinh(k_2 \cdot \phi) + \frac{N \frac{d\phi}{dt}}{R_p} \right] \cdot \sin \varphi \text{ (VAr)} \quad (3.15)$$

O fator de potência é dado por:

$$fp = \cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (3.16)$$



3.3. – Modelagem para o Banco Trifásico

3.3.1. – Conexão $\Upsilon\Upsilon$

De acordo com as considerações feitas anteriormente, e admitindo-se que os enrolamentos tanto do primário quanto do secundário estão conectados em estrela isolada e que o enrolamento secundário está em vazio, o procedimento abaixo permite obter as equações para esta ligação.

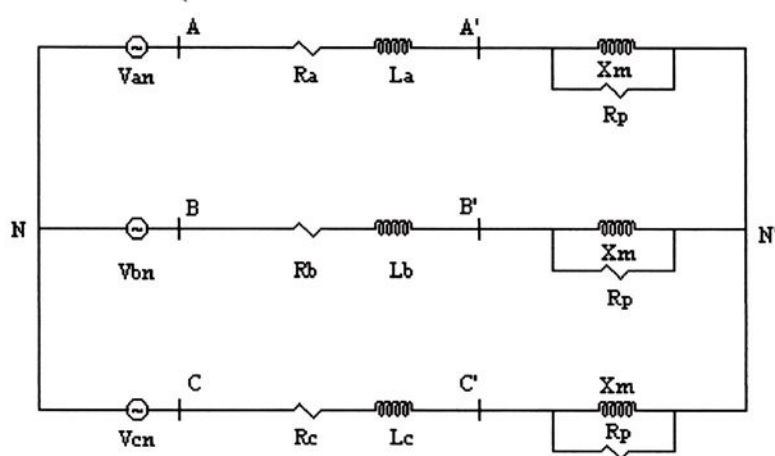


Figura 3.2. – Banco trifásico com conexão estrela isolada / estrela isolada

Admitindo-se que o sistema é simétrico e equilibrado, e aplicando-se a lei de *Kirchoff* à figura 3.2., temos que:

– Tensões de fase:

$$\begin{aligned}
 V_{an} &= R_a * i_a + L_a * \frac{di_a}{dt} + N \frac{d\phi_a}{dt} + V_{n'n} \\
 V_{bn} &= R_b * i_b + L_b * \frac{di_b}{dt} + N \frac{d\phi_b}{dt} + V_{n'n} \\
 V_{cn} &= R_c * i_c + L_c * \frac{di_c}{dt} + N \frac{d\phi_c}{dt} + V_{n'n}
 \end{aligned} \quad (3.17)$$

e

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (3.18)$$

– Correntes de linha:

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (3.19)$$

Portanto as correntes de linha podem ser escritas como:

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = i_0 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} + k_1 \begin{bmatrix} \sinh(k_2 \phi_a) \\ \sinh(k_2 \phi_b) \\ \sinh(k_2 \phi_c) \end{bmatrix} + \frac{N}{R_p} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Fazendo-se a substituição da equação 3.20 na equação 3.17 e

admitindo-se que as resistências e indutâncias de dispersão por fase são iguais, tem-se:

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_0 + k_1 \sinh(k_2 \phi_a) \\ i_0 + k_1 \sinh(k_2 \phi_b) \\ i_0 + k_1 \sinh(k_2 \phi_c) \end{bmatrix} + \frac{LN}{R_p} \frac{d^2}{dt^2} \begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \end{bmatrix} +$$

$$+ \begin{bmatrix} \frac{NR}{R_p} + \cosh(k_2 \phi_a) + N & 0 & 0 \\ 0 & \frac{NR}{R_p} + \cosh(k_2 \phi_b) + N & 0 \\ 0 & 0 & \frac{NR}{R_p} + \cosh(k_2 \phi_c) + N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{n'n} \\ V_{n'n} \\ V_{n'n} \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Calculando-se a tensão de neutro, tem-se:

$$V_{nn'} = \frac{R_a i_a + R_b i_b + R_c i_c + L_a \dot{i}_a + L_b \dot{i}_b + L_c \dot{i}_c + N \dot{\phi}_a + N \dot{\phi}_b + N \dot{\phi}_c}{3} \quad (3.22)$$

Considerando-se: $R_a = R_b = R_c = R$ e $L_a = L_b = L_c = L$

Como temos o neutro isolado, e admitindo os enrolamentos iguais (balanceado), a soma das correntes instantâneas de excitação deve ser nula.

Com o neutro isolado, não há um caminho para a circulação da corrente de terceira harmônica e suas múltiplas, o que acarreta em uma distorção no fluxo senoidal. Desta forma, as tensões induzidas por fase também serão não senoidais.

Assim, mesmo a tensão de alimentação sendo senoidal, a tensão induzida será não senoidal.

3.3.2. – Conexão ΔY

Aplicando-se ao banco de transformadores trifásicos as considerações feitas no início deste trabalho, e admitindo-se que os enrolamentos do primário são conectados em triângulo e os enrolamentos do secundário são conectados em estrela aterrada e, ainda, que o mesmo encontra-se a vazio, foi feito o equacionamento deste dispositivo conforme descrito a seguir.

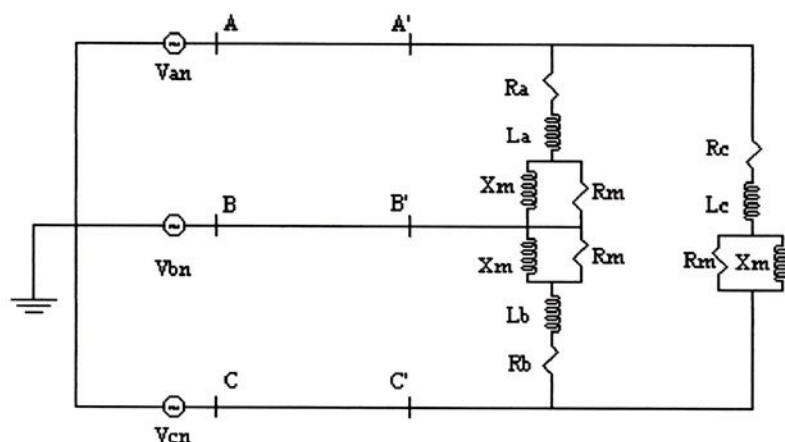


Figura 3.3. – Banco trifásico com conexão delta / estrela aterrada

Do circuito da figura 3.3 pode-se escrever para as correntes na fase:

$$\begin{aligned} i_{af} &= i_{0a} + i_{ma} + i_{rp} \\ i_{af} &= i_{0b} + i_{mb} + i_{rp} \\ i_{af} &= i_{0c} + i_{mc} + i_{rp} \end{aligned} \quad (3.23)$$

onde i_{kf} – corrente total na fase;

i_{0k} – corrente contínua de excitação;

i_{mk} – corrente de magnetização;

i_{rp} – corrente de perdas;

k – a, b, c.

Para as tensões, temos:

$$\begin{aligned} V_{an} - V_{bn} &= V_{AB} = R_a * i_{af} + L_a \frac{di_{af}}{dt} + N \frac{d\phi_a}{dt} \\ V_{bn} - V_{cn} &= V_{BC} = R_b * i_{bf} + L_b \frac{di_{bf}}{dt} + N \frac{d\phi_b}{dt} \\ V_{cn} - V_{an} &= V_{CA} = R_c * i_{cf} + L_c \frac{di_{cf}}{dt} + N \frac{d\phi_c}{dt} \end{aligned} \quad (3.24)$$

onde: V_{an}, V_{bn}, V_{cn} – são as tensões de fase;

V_{AB}, V_{BC}, V_{CA} – são as tensões de linha.

Para as resistências e indutâncias de dispersão, pode-se admitir

que:

$$\begin{aligned} R_a &= R_b = R_c = R, \\ L_a &= L_b = L_c = L \text{ e} \\ i_{0a} &= i_{0b} = i_{0c} = i_0 \end{aligned}$$

Substituindo-se as equações 3.9 e 3.10 na equação 3.25, pode-se

se escrever:

$$\begin{bmatrix} i_{af} \\ i_{bf} \\ i_{cf} \end{bmatrix} = i_0 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} + K_1 \begin{bmatrix} \sinh(K_2 * \phi_a) \\ \sinh(K_2 * \phi_b) \\ \sinh(K_2 * \phi_c) \end{bmatrix} + \frac{N}{R_p} * \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Substituindo a equação 3.27 na equação 3.26, podemos escrever

então para as tensões:

$$\begin{bmatrix} V_{an} - V_{bn} \\ V_{bn} - V_{cn} \\ V_{cn} - V_{an} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_0 + K_1 * \sinh(K_2 * \phi_a) \\ i_0 + K_1 * \sinh(K_2 * \phi_b) \\ i_0 + K_1 * \sinh(K_2 * \phi_c) \end{bmatrix} + \frac{LN}{R_p} * \frac{d^2}{dt^2} \begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \frac{NR}{R_p} + \cosh(K_2 \phi_a) + N & 0 & 0 \\ 0 & \frac{NR}{R_p} + \cosh(K_2 \phi_b) + N & 0 \\ 0 & 0 & \frac{NR}{R_p} + \cosh(K_2 \phi_c) + N \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Quando os enrolamentos do banco de transformadores trifásicos

estão conectados em triângulo/estrela, as correntes de excitação na frequência de terceira

harmônica circulam nos enrolamentos conectados em triângulo, mas não estão presentes nas linhas que alimentam o banco trifásico. Isto garante um fluxo senoidal e, como consequência uma tensão induzida senoidal.

3.3.3. – Conexão $\Upsilon\Upsilon$

Fazendo as mesmas considerações com relação a representação da característica de magnetização do núcleo, utilizada nos itens anteriores, foi feito o desenvolvimento do modelo matemático para analisar o comportamento do banco de transformadores trifásicos com os enrolamentos do primário e secundário conectados em estrela aterrada.

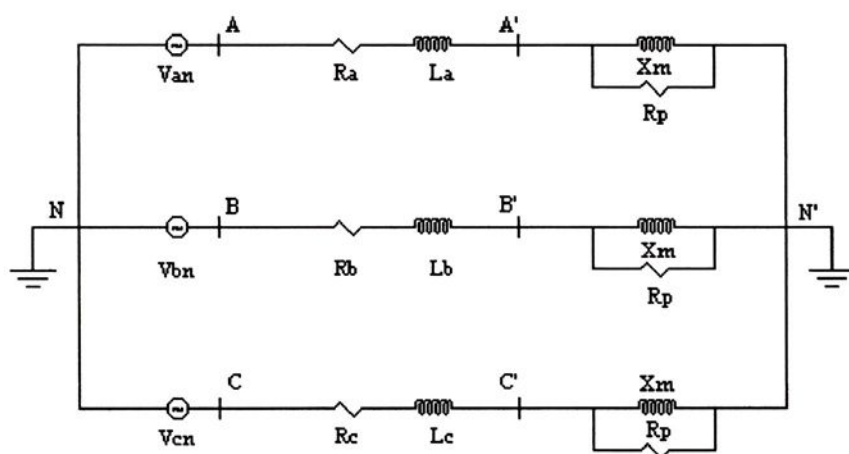


Figura 3.4. – Banco trifásico com conexão estrela aterrada / estrela aterrada

Admitindo-se o sistema simétrico e equilibrado, pode-se escrever:

$$\begin{aligned}
 V_{an} &= R_a * i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + N \frac{d\phi_a}{dt} \\
 V_{bn} &= R_b * i_b + L_b \frac{di_b}{dt} + N \frac{d\phi_b}{dt} \\
 V_{cn} &= R_c * i_c + L_c \frac{di_c}{dt} + N \frac{d\phi_c}{dt}
 \end{aligned} \quad (3.29)$$

Ainda para as tensões pode-se afirmar que;

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (3.30)$$

Para as correntes de linha temos:

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = i_0 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} + K_1 \begin{bmatrix} \sinh(K_2 * \phi_a) \\ \sinh(K_2 * \phi_b) \\ \sinh(K_2 * \phi_c) \end{bmatrix} + \left(\frac{N}{R_p} * \frac{d}{dt} \right) \begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

Logo, substituindo as equações 3.30 e 3.31 na equação 3.29

resulta:

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_0 + k_1 * \sinh(K_2 * \phi_a) \\ i_0 + k_1 * \sinh(K_2 * \phi_b) \\ i_0 + k_1 * \sinh(K_2 * \phi_c) \end{bmatrix} + \left(\frac{LN}{R_p} * \frac{d^2}{dt^2} \right) \begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \end{bmatrix} *$$

$$* \begin{bmatrix} \frac{NR}{R_p} + \cosh(K_2 \phi_a) + N & 0 & 0 \\ 0 & \frac{NR}{R_p} + \cosh(K_2 \phi_b) + N & 0 \\ 0 & 0 & \frac{NR}{R_p} + \cosh(K_2 \phi_c) + N \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

3.4. – Modelagem do Transformador Trifásico de núcleo envolvido

Os transformadores trifásicos de núcleo envolvido tem caminhos magnéticos que interligam suas fases, resultando em um complexo comportamento magnético. O fluxo em qualquer uma das fases não depende apenas da força magnetomotriz líquida de uma fase, mas da composição das forças magnetomotrizes líquidas de todas as fases [13], [14]. Como em geral os níveis de saturação de cada região magnética do núcleo são diferentes, é comum considerar o núcleo dividido em seções nas quais é assumida uma densidade de fluxo aproximadamente uniforme [15].

Para o desenvolvimento da modelagem matemática do transformador trifásico de núcleo envolvido, para que torne possível estudar o comportamento do mesmo sob condições de dupla excitação c.a./c.c., adotou-se a metodologia proposta nas referências [13] e [14]. Para isto o fluxo magnético foi dividido em três categorias:

- Fluxo magnético que enlaça as bobinas de uma mesma fase e as bobinas das outras duas fases, e tem um caminho magnético que é confinado principalmente ao núcleo.
- Fluxo de dispersão que enlaça somente uma bobina de cada fase, e tem caminho magnético principal no espaço de ar entre as bobinas. Este fluxo pode enlaçar bobinas de outras fases.
- Fluxo de dispersão que enlaça as bobinas do primário e secundário de uma mesma fase, mas que não se enlaça com as bobinas das outras fases. O



caminho magnético neste caso é constituído pelas colunas principais do núcleo e o espaço de ar em torno das bobinas de uma mesma fase.

Considerando-se os fluxos magnéticos citados acima é possível estabelecer os fluxos resultantes ilustrados na figura 3.5., a partir dos quais serão desenvolvidos os equacionamentos seguintes.

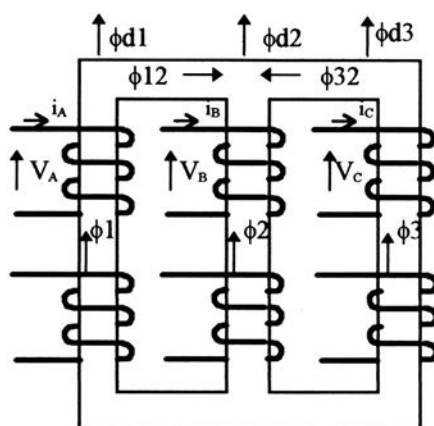


Figura 3.5. – Caminhos e direções dos fluxos magnéticos no núcleo tipo envolvido

No equacionamento que se segue, as equações das tensões para os circuitos elétricos dos enrolamentos primários são dadas por:

$$\begin{aligned} v_A &= r_A i_A + L_A \frac{di_A}{dt} + N_A \frac{d\phi_1}{dt} \\ v_B &= r_B i_B + L_B \frac{di_B}{dt} + N_B \frac{d\phi_2}{dt} \\ v_C &= r_C i_C + L_C \frac{di_C}{dt} + N_C \frac{d\phi_3}{dt} \end{aligned} \quad (3.33)$$

onde v_j – tensão instantânea na fase j ;

i_j – correntes instantânea na fase j ;

L_j – indutâncias de dispersão dos enrolamentos;

r_j – resistências elétricas dos enrolamentos;

R_{pi} – resistência associada as perdas no núcleo da fase j ;

N_j – número de espiras do primário da fase j ;

$j = A, B, C$;

$i = 1, 2, 3$;

A corrente total associada ao fluxo na coluna i , pode ser representada como;

$$i_i = i_{Mi} + i_{rpi} \quad (3.34)$$

onde: i_{Mi} – parcela da corrente associada a magnetização na coluna i ;

i_{rpi} – parcela da corrente associada as perdas no núcleo na coluna i ;

e, a parcela da corrente associada as perdas no núcleo, i_{rpi} , pode ser calculada como :

$$i_{rpi} = \frac{N \dot{\phi}_i}{R_{pi}}$$

Considerando-se o arranjo ilustrado na figura 3.5. e aplicando-se as leis dos circuitos magnéticos ($\sum \phi_i = 0$) nas junções entre as colunas dos três enrolamentos e a culatra, resulta :

$$\phi_1 = \phi_{d1} + \phi_{12}$$

$$\phi_2 = \phi_{d2} - \phi_{12} - \phi_{32} \quad (3.35)$$

$$\phi_3 = \phi_{d3} + \phi_{32}$$

onde ϕ_i – fluxo magnético na coluna i

ϕ_{ik} – fluxo magnético na culatra ik ;

ϕ_{di} – fluxo magnético associado a dispersão no caminho i .

$k = 1, 2, 3$

Uma vez que estes fluxos ou estão no material magnético ou no ar, e admitindo-se a representação analítica da não linearidade entre os fluxos no material magnético e as correntes adotadas, é possível estabelecer as seguintes relações:

$$i_{M1} = a_1 \sinh(b_1 \phi_1)$$

$$i_{M2} = a_2 \sinh(b_2 \phi_2) \quad (3.36)$$

$$i_{M3} = a_3 \sinh(b_3 \phi_3)$$

e

$$i_{M12} = a_{12} \sinh(b_{12} \phi_{12}) \quad (3.37)$$

$$i_{M13} = a_{13} \sinh(b_{13} \phi_{13})$$

onde i_{Mi} – parcela da corrente associada a magnetização na coluna i ;

i_{Mik} – parcela da corrente associada a magnetização na culatra ik ;

As constantes a_i e b_i associadas às colunas i , e as constantes a_{ik} e

b_{ik} associadas as culatras ik , podem ser calculadas como :

$$a_i = \frac{\alpha_i \ell_i}{N_j}; \quad a_{ik} = \frac{\alpha_{ik} \ell_{ik}}{N_j};$$

$$b_i = \frac{\beta_i}{S_i};$$

$$b_{ik} = \frac{\beta_{ik}}{S_{ik}};$$

onde S_i – área da seção transversal da coluna i ;

S_{ik} – área da seção transversal da culatra ik ;

α_i, β_i – constantes de ajuste associadas ao circuito magnético na coluna i ;

α_{ik}, β_{ik} – constantes de ajuste associadas ao circuito magnético na culatra ik ;

ℓ_i – comprimento magnético da coluna i ;

ℓ_{ik} – comprimento magnético da culatra ik .

Para os caminhos magnéticos que se fecham pelo ar, considerou-se uma permeabilidade constante. Desta forma, a relação entre o fluxo e a corrente associada a dispersão é representada pelas funções lineares a seguir:

$$i_{d1} = C_{d1}\phi_{d1}$$

$$i_{d2} = C_{d2}\phi_{d2} \quad (3.38)$$

$$i_{d3} = C_{d3}\phi_{d3}$$

onde C_{di} – constante de proporcionalidade associada ao caminho magnético i ;

i_{di} – correntes instantânea associada a dispersão;

Pelo diagrama do circuito da figura 3.6., verifica-se a existência de oito ramos do circuito magnético e de três enrolamentos, perfazendo um total de onze correntes não conhecidas. Como as equações 3.33 e 3.35 permitem somente seis equações, há a necessidade de se obter cinco equações complementares para a resolução do

sistema. Logo, aplicando-se a lei circuital de Ampère ($Ni = \oint H d\ell$), para as cinco malhas do circuito elétrico análogo ao circuito magnético da figura 3.5., apresentado na figura 3.6., podem ser obtidas as seguintes equações complementares:

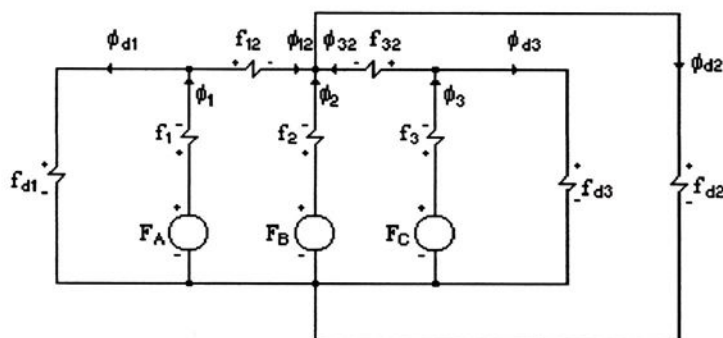


Figura 3.6. – Circuito elétrico equivalente ao circuito magnético da figura 3.5.

$$F_A - f_1 - f_{d1} = 0$$

$$F_B - f_2 - f_{d2} = 0 \quad (3.39)$$

$$F_C - f_3 + f_{d3} = 0$$

$$F_A - f_1 - F_B + f_2 - f_{12} = 0$$

$$F_C - f_3 - F_B + f_2 - f_{32} = 0$$

onde F_j – Força magnetomotriz associada a corrente no enrolamento j ;

f_i – Queda de potencial magnético associado à coluna i ;

f_{ik} – Queda de potencial magnético associado à culatra ik ;

f_{di} – Queda de potencial magnético associado à dispersão do caminho i ;

Referindo-se as quantidades das equações 3.39 ao número de espiras dos enrolamentos do primário ($N_j = N$) e às correntes envolvidas, são obtidas as seguintes equações:

$$\begin{aligned}
 N.i_A &= N.i_1 + N.i_{d1} \\
 N.i_B &= N.i_2 + N.i_{d2} \\
 N.i_C &= N.i_3 + N.i_{d3} \\
 N.i_{12} &= N.i_A - N.i_1 - N.i_B + N.i_2 \\
 N.i_{32} &= N.i_C - N.i_3 - N.i_B + N.i_2
 \end{aligned}
 \tag{3.40}$$

Dividindo-se as expressões acima por N e ordenando-as, obtém-se as cinco equações algébricas complementares, necessárias para a resolução das equações diferenciais do modelo, ou seja,

$$\begin{aligned}
 i_{d1} &= i_A - i_1 \\
 i_{d2} &= i_B - i_2 \\
 i_{d3} &= i_C - i_3 \\
 i_{12} &= i_{d1} - i_{d2} \\
 i_{32} &= i_{d3} - i_{d2}
 \end{aligned}
 \tag{3.41}$$

Considerando-se então as expressões gerais 3.33, as expressões dos circuitos magnéticos 3.34, e 3.35, bem como as relações entre as correntes e os respectivos fluxos magnéticos 3.36, 3.37 e 3.38, é possível estabelecer as expressões matriciais para as diferentes conexões das bobinas.

3.4.1. – Conexão Y/Y

De acordo com as considerações feitas anteriormente, e admitindo-se que os enrolamentos do transformador estão conectados em estrela isolada será feito o equacionamento matemático para a esta ligação.

Substituindo nas equações gerais das tensões 3.33 às equações 3.37 e ainda incorporando as perdas no núcleo, resultam:

$$\begin{aligned}
 v_A &= r_A (i_{M1} + i_{d1} + i_{rp1}) + L_A \left(\frac{d i_{M1}}{dt} + \frac{d i_{d1}}{dt} + \frac{d i_{rp1}}{dt} \right) + N_A \frac{d\phi_1}{dt} \\
 v_B &= r_B (i_{M2} + i_{d2} + i_{rp2}) + L_B \left(\frac{d i_{M2}}{dt} + \frac{d i_{d2}}{dt} + \frac{d i_{rp2}}{dt} \right) + N_B \frac{d\phi_2}{dt} \\
 v_C &= r_C (i_{M3} + i_{d3} + i_{rp3}) + L_C \left(\frac{d i_{M3}}{dt} + \frac{d i_{d3}}{dt} + \frac{d i_{rp3}}{dt} \right) + N_C \frac{d\phi_3}{dt}
 \end{aligned} \quad (3.42)$$

Admitindo-se a representação analítica da não linearidade entre os fluxos no material magnético e as correntes adotadas (equações 3.35, 3.36 e 3.37), e substituindo-as em 3.33, é possível estabelecer as seguintes relações :

$$\begin{aligned}
 v_A &= r_A (a_1 \sinh(b_1 \phi_1) + C_{d1} \phi_{d1} + \frac{N_A}{R_{p1}} \phi_1) + L_A [a_1 b_1 \cosh(b_1 \phi_1) \phi_1 + C_{d1} \phi_{d1} + \frac{N_A}{R_{p1}} \phi_1] + N_A \phi_1 \\
 v_B &= r_B (a_2 \sinh(b_2 \phi_2) + C_{d2} \phi_{d2} + \frac{N_B}{R_{p2}} \phi_2) + L_B [a_2 b_2 \cosh(b_2 \phi_2) \phi_2 + C_{d2} \phi_{d2} + \frac{N_B}{R_{p2}} \phi_2] + N_B \phi_2 \\
 v_C &= r_C (a_3 \sinh(b_3 \phi_3) + C_{d3} \phi_{d3} + \frac{N_C}{R_{p3}} \phi_3) + L_C [a_3 b_3 \cosh(b_3 \phi_3) \phi_3 + C_{d3} \phi_{d3} + \frac{N_C}{R_{p3}} \phi_3] + N_C \phi_3
 \end{aligned} \quad (3.43)$$

Reagrupando os elementos das equações acima resulta,

$$\begin{aligned}
 v_A &= r_A (a_1 \sinh(b_1 \phi_1) + C_{d1} \phi_{d1}) + \dot{\phi}_1 \left(L_A a_1 b_1 \cosh(b_1 \phi_1) + N_A + \frac{N_A}{R_{p1}} \right) \\
 &\quad + \dot{\phi}_{d1} L_A C_{d1} + \ddot{\phi}_1 \frac{L_A N_A}{R_{p1}} + V_n \\
 v_B &= r_B (a_2 \sinh(b_2 \phi_2) + C_{d2} \phi_{d2}) + \dot{\phi}_2 \left(L_B a_2 b_2 \cosh(b_2 \phi_2) + N_B + \frac{N_B}{R_{p2}} \right) \\
 &\quad + \dot{\phi}_{d2} L_B C_{d2} + \ddot{\phi}_2 \frac{L_B N_B}{R_{p2}} + V_n \\
 v_C &= r_C (a_3 \sinh(b_3 \phi_3) + C_{d3} \phi_{d3}) + \dot{\phi}_3 \left(L_C a_3 b_3 \cosh(b_3 \phi_3) + N_C + \frac{N_C}{R_{p3}} \right) \\
 &\quad + \dot{\phi}_{d3} L_C C_{d3} + \ddot{\phi}_3 \frac{L_C N_C}{R_{p3}} + V_n
 \end{aligned} \tag{3.44}$$

Esta é a equação geral usada na simulação digital.

Já para a equação do fluxo, substituindo-se as equações 3.38 e

3.39 em 3.41, são obtidas as seguintes relações para os fluxos nas culatras:

$$\begin{aligned}
 a_{12} \sinh(b_{12} \phi_{12}) &= C_{d1} \phi_{d1} - C_{d2} \phi_{d2} \\
 a_{32} \sinh(b_{32} \phi_{32}) &= C_{d3} \phi_{d3} - C_{d2} \phi_{d2} \\
 \phi_{12} &= \sinh^{-1} \left\{ \left[(C_{d1} \phi_{d1} - C_{d2} \phi_{d2}) \frac{1}{a_{12}} \right] \frac{1}{b_{12}} \right\} \\
 \phi_{32} &= \sinh^{-1} \left\{ \left[(C_{d3} \phi_{d3} - C_{d2} \phi_{d2}) \frac{1}{a_{32}} \right] \frac{1}{b_{32}} \right\}
 \end{aligned} \tag{3.45}$$

As relações entre os fluxos nas colunas, culatras e de dispersão, são obtidas em substituindo-se as equações 3.45 nas equações 3.35.

$$\begin{aligned}\phi_1 &= \phi_{d1} + \sinh^{-1} \left\{ \left[(C_{d1}\phi_{d1} - C_{d2}\phi_{d2}) \frac{1}{a_{12}} \right] \frac{1}{b_{12}} \right\} \\ \phi_3 &= \phi_{d3} + \sinh^{-1} \left\{ \left[(C_{d3}\phi_{d3} - C_{d2}\phi_{d2}) \frac{1}{a_{32}} \right] \frac{1}{b_{32}} \right\} \\ \phi_2 &= \phi_{d2} - \sinh^{-1} \left\{ \left[(C_{d1}\phi_{d1} - C_{d2}\phi_{d2}) \frac{1}{a_{12}} \right] \frac{1}{b_{12}} \right\} - \sinh^{-1} \left\{ \left[(C_{d3}\phi_{d3} - C_{d2}\phi_{d2}) \frac{1}{a_{32}} \right] \frac{1}{b_{32}} \right\}\end{aligned}\quad (3.46)$$

Da equação 3.44, podemos determinar a tensão V_n , que é dada

por:

$$\begin{aligned}V + V_n &= 0 \\ V_n &= \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} V\end{aligned}\quad (3.47)$$

Onde: $V = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$

3.4.2. – Conexão Δ/Δ

Com os enrolamentos do transformador conectados em delta, a equação matemática é dada por 3. 44 porém com as seguintes condições: $T_2 * V_i$

onde: $T_2 = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ e $V_i = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$

Logo, resulta:

$$T_2 * v_i = r_i \left(a_j \sinh(b_j \phi_j) + C_{dj} \phi_{dj} \right) + \dot{\phi}_j \left(L_I a_j b_j \cosh(b_j \phi_j) + N_I + \frac{N_I}{R p_j} \right) + \dot{\phi}_{dj} L_I C_{dj} + \ddot{\phi}_j \frac{L_I N_I}{R p_j} \quad (3.48)$$

Onde, $i = a, b, c$

$j = 1, 2, 3$

$I = A, B, C$

A equação para os fluxos mantêm-se exatamente igual à equação 3.46, ou seja:

$$\begin{aligned} \phi_1 &= \phi_{d1} + \sinh^{-1} \left\{ \left[(C_{d1} \phi_{d1} - C_{d2} \phi_{d2}) \frac{1}{a_{12}} \right] \frac{1}{b_{12}} \right\} \\ \phi_3 &= \phi_{d3} + \sinh^{-1} \left\{ \left[(C_{d3} \phi_{d3} - C_{d2} \phi_{d2}) \frac{1}{a_{32}} \right] \frac{1}{b_{32}} \right\} \\ \phi_2 &= \phi_{d2} - \sinh^{-1} \left\{ \left[(C_{d1} \phi_{d1} - C_{d2} \phi_{d2}) \frac{1}{a_{12}} \right] \frac{1}{b_{12}} \right\} - \sinh^{-1} \left\{ \left[(C_{d3} \phi_{d3} - C_{d2} \phi_{d2}) \frac{1}{a_{32}} \right] \frac{1}{b_{32}} \right\} \end{aligned} \quad (3.46)$$

E a equação da corrente de linha é dada por:

$$I_L = \tilde{T}_2 * \begin{bmatrix} a_1 \sinh(b_1 \phi_1) \\ a_2 \sinh(b_2 \phi_2) \\ a_3 \sinh(b_3 \phi_3) \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

3.4.3. – Conexão Υ_1/Υ_1

Admitindo-se que os enrolamentos do transformador estão conectados em estrela aterrada, podemos dizer que a equação matemática é dada por 3.44 porém sem a somatória da tensão de neutro V_n , ou seja:

$$\begin{aligned}
 v_A &= r_A (a_1 \sinh(b_1 \phi_1) + C_{d1} \phi_{d1}) + \dot{\phi}_1 \left(L_A a_1 b_1 \cosh(b_1 \phi_1) + N_A + \frac{N_A}{R_{p1}} \right) + \dot{\phi}_{d1} L_A C_{d1} + \ddot{\phi}_1 \frac{L_A N_A}{R_{p1}} \\
 v_B &= r_B (a_2 \sinh(b_2 \phi_2) + C_{d2} \phi_{d2}) + \dot{\phi}_2 \left(L_B a_2 b_2 \cosh(b_2 \phi_2) + N_B + \frac{N_B}{R_{p2}} \right) + \dot{\phi}_{d2} L_B C_{d2} + \ddot{\phi}_2 \frac{L_B N_B}{R_{p2}} \\
 v_C &= r_C (a_3 \sinh(b_3 \phi_3) + C_{d3} \phi_{d3}) + \dot{\phi}_3 \left(L_C a_3 b_3 \cosh(b_3 \phi_3) + N_C + \frac{N_C}{R_{p3}} \right) + \dot{\phi}_{d3} L_C C_{d3} + \ddot{\phi}_3 \frac{L_C N_C}{R_{p3}}
 \end{aligned}
 \tag{3.50}$$

A equação para os fluxos mantêm-se exatamente igual à equação 3.46, ou seja:

$$\begin{aligned}
 \phi_1 &= \phi_{d1} + \sinh^{-1} \left\{ \left[(C_{d1} \phi_{d1} - C_{d2} \phi_{d2}) \frac{1}{a_{12}} \right] \frac{1}{b_{12}} \right\} \\
 \phi_3 &= \phi_{d3} + \sinh^{-1} \left\{ \left[(C_{d3} \phi_{d3} - C_{d2} \phi_{d2}) \frac{1}{a_{32}} \right] \frac{1}{b_{32}} \right\} \\
 \phi_2 &= \phi_{d2} - \sinh^{-1} \left\{ \left[(C_{d1} \phi_{d1} - C_{d2} \phi_{d2}) \frac{1}{a_{12}} \right] \frac{1}{b_{12}} \right\} - \sinh^{-1} \left\{ \left[(C_{d3} \phi_{d3} - C_{d2} \phi_{d2}) \frac{1}{a_{32}} \right] \frac{1}{b_{32}} \right\}
 \end{aligned}
 \tag{3.46}$$

E a equação da corrente de neutro é dada por:

$$I_n = [1 \quad 1 \quad 1]^* \begin{bmatrix} a_1 \sinh(b_1 \phi_1) \\ a_2 \sinh(b_2 \phi_2) \\ a_3 \sinh(b_3 \phi_3) \end{bmatrix} \quad (3.51)$$



CAPÍTULO IV

ESTUDOS EXPERIMENTAIS

4.1. – Introdução

Neste capítulo apresentaremos os estudos experimentais para o banco trifásico de transformadores constituído de três unidades monofásicas e transformador trifásico de núcleo envolvente sob o efeito da dupla excitação c.a./c.c. para diversas conexões dos seus enrolamentos primários e secundários. Em todos os ensaios os transformadores estavam na condição a vazio, ou seja, não suprindo potência para qualquer carga.

O banco trifásico de transformadores, para cada tipo de ligação, foi submetido basicamente a três condições de excitação. A primeira somente injetando tensão alternada, sem injeção de corrente contínua. A partir daí, é injetado uma componente de corrente contínua até atingirmos um valor da ordem de 5% da corrente normal de excitação. Para finalizar e evidenciar o fenômeno da dupla excitação, prosseguimos com a injeção de corrente contínua até o valor de 15% da corrente de excitação.



4.2. – Características das unidade transformadoras

4.2.1. - Características das unidades monofásicas

Os valores das grandezas envolvidas na simulação foram obtidos de ensaios experimentais em laboratório em transformadores monofásicos de dois enrolamentos conforme a figura 4.1. Todas as unidades usadas nos ensaios possuem as mesmas características construtivas.

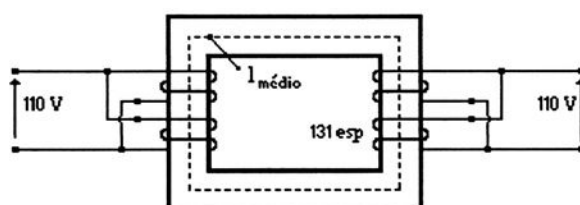


Figura 4.1. – Modelo físico da unidade transformadora

As unidades transformadoras, que constituem o banco trifásico, apresentam as seguintes características.

Potência nominal.....	1.0 KVA
Tensão nominal.....	110 V
Corrente nominal.....	9.1 A
Número de espiras do primário.....	262
Número de espiras do secundário.....	262
Comprimento magnético médio do núcleo.....	0,519 m
Área da seção transversal do núcleo.....	0,0038 m ²
Resistência ôhmica do primário.....	1,0 Ω
Indutância de dispersão do primário.....	0,0022 H

Para a representação analítica da curva característica de magnetização a ser utilizada na simulação digital, foi levantada experimentalmente a curva

normal de magnetização de cada unidade transformadora monofásica. A seguir, apresentamos os gráficos e as tabelas com os valores calculados para cada unidade.

Tabela 4.1. - Dados de ensaio do Transformador monofásico nº 4105
Tensão de ensaio 110/110 V

V (volts)	I rms (mA)	Ipico (mA)	B max (T)	H max (Ae/m)
10	0,082	0,27	0,0377	68,8068
20	0,119	0,36	0,0754	91,7425
30	0,146	0,44	0,1131	112,1297
40	0,175	0,5	0,1508	127,4201
50	0,203	0,57	0,1885	145,2589
60	0,232	0,65	0,2262	165,6461
70	0,266	0,76	0,2639	193,6785
80	0,306	0,88	0,3016	224,2593
90	0,353	1,02	0,3393	259,9370
100	0,417	1,24	0,3770	316,0018
110	0,51	1,6	0,4147	407,7443
120	0,665	2,18	0,4524	555,5515
130	0,868	2,92	0,4901	744,1333
140	1,13	3,84	0,5278	978,5862
150	1,43	4,88	0,5656	1243,6200

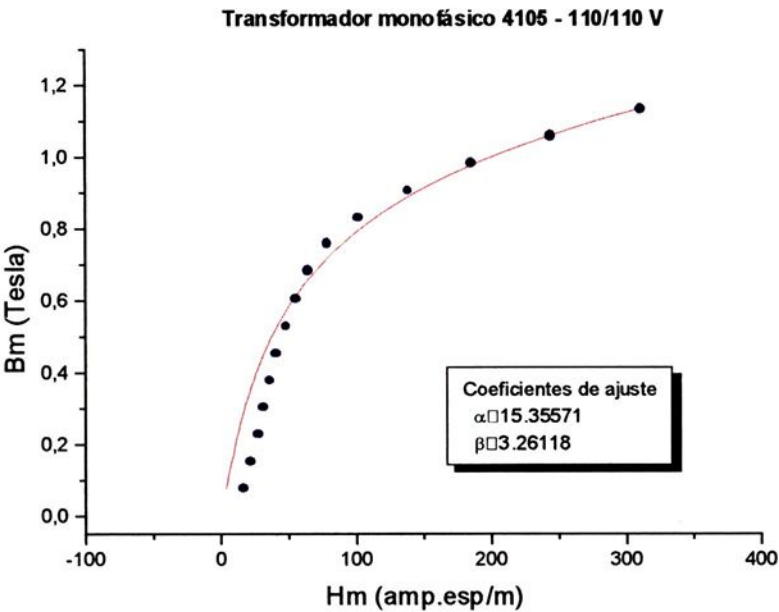


Figura 4.2. - Transformador monofásico nº 4105 – 110/110 V

Tabela 4.2. - Dados de ensaio do Transformador monofásico nº 4105
Tensão de ensaio 220/220 V

V (volts)	I rms (mA)	Ipico (mA)	B max (T)	H max (Ae/m)
20	0,041	0,150	0,0754	38,226
30	0,050	0,170	0,1131	43,323
41	0,059	0,200	0,1546	50,968
50	0,066	0,210	0,1885	53,516
61	0,074	0,230	0,2300	58,613
70	0,080	0,250	0,2639	63,710
80	0,087	0,270	0,3016	68,807
100	0,102	0,310	0,3770	79,000
110	0,110	0,320	0,4147	81,549
120	0,117	0,340	0,4524	86,646
140	0,133	0,400	0,5278	101,936
160	0,152	0,450	0,6033	114,678
180	0,175	0,530	0,6787	135,065
200	0,205	0,650	0,7541	165,646
220	0,250	0,850	0,8295	216,614
240	0,319	1,160	0,9049	295,615
260	0,415	1,570	0,9803	400,099
280	0,532	2,040	1,0557	519,874
300	0,680	2,620	1,1311	667,681
320	0,865	3,330	1,2065	848,618
340	1,102	4,250	1,2819	1083,071

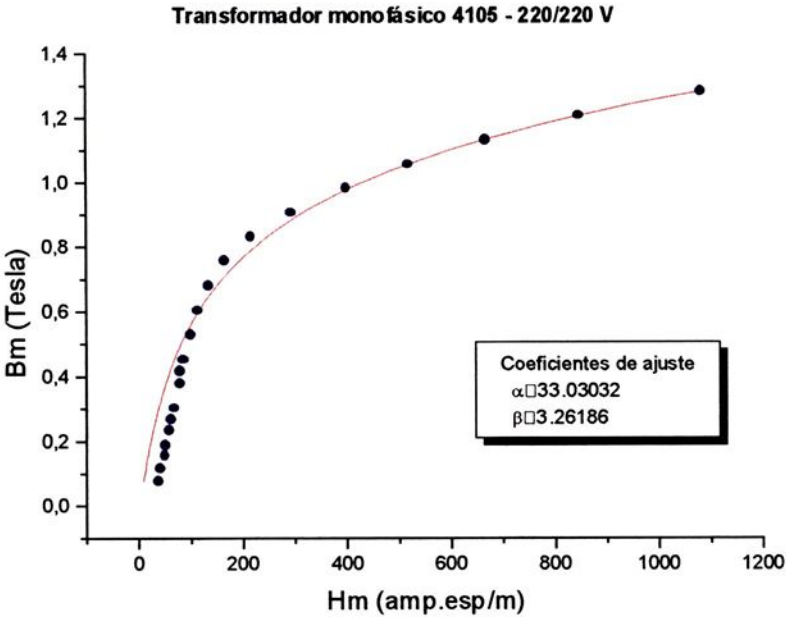


Figura 4.3. - Transformador monofásico nº 4105 – 220/220 V

Tabela 4.3. - Dados de ensaio do Transformador monofásico nº 4099
Tensão de ensaio 110/110 V

V (volts)	I rms (mA)	Ipico (mA)	B max (T)	H max (Ae/m)
10	0,087	0,29	0,0754	18,4759
20	0,122	0,37	0,1508	23,5727
30	0,151	0,43	0,2262	27,3953
40	0,18	0,51	0,3016	32,4921
50	0,208	0,58	0,3770	36,9518
60	0,24	0,67	0,4524	42,6857
70	0,272	0,76	0,5278	48,4196
80	0,308	0,88	0,6033	56,0648
90	0,352	1,02	0,6787	64,9842
100	0,409	1,24	0,7541	79,0004
110	0,49	1,6	0,8295	101,9361
120	0,615	2,16	0,9049	137,6137
130	0,78	2,9	0,9803	184,7591
140	0,985	3,84	1,0557	244,6466
150	1,24	4,82	1,1311	307,0824
160	1,55	6,14	1,2065	391,1796
170	1,9	7,68	1,2819	489,2931

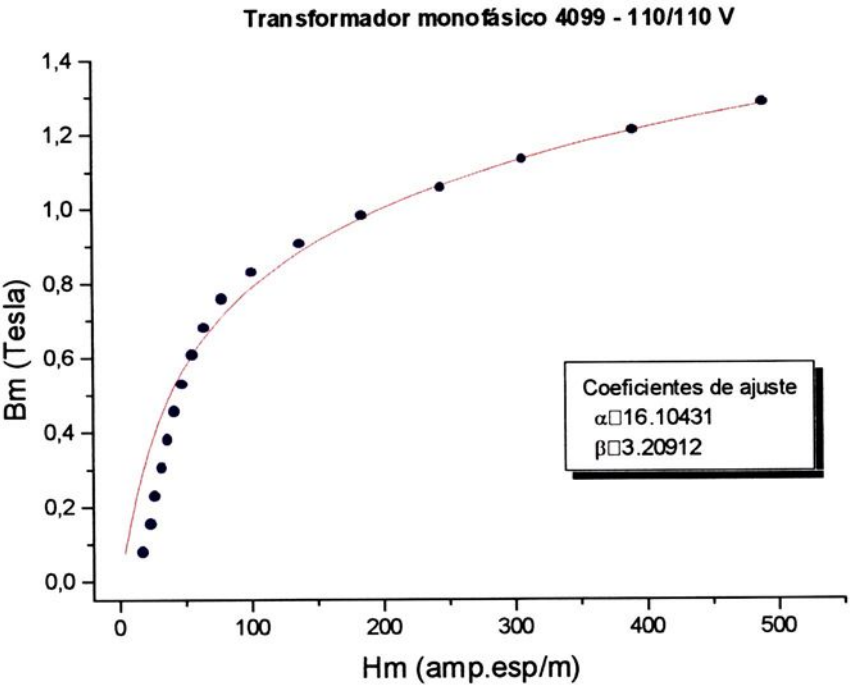


Figura 4.4. - Transformador monofásico nº 4099 – 110/110 V

Tabela 4.4. - Dados de ensaio do Transformador monofásico nº 4099
Tensão de ensaio 220/220 V

V (volts)	I rms (mA)	I _{pico} (mA)	B max (T)	H max (Ae/m)
20	0,042	0,152	0,0754	38,736
30	0,052	0,170	0,1131	43,323
40	0,061	0,190	0,1508	48,420
50	0,069	0,210	0,1885	53,516
60	0,077	0,225	0,2262	57,339
70	0,085	0,240	0,2639	61,162
80	0,092	0,270	0,3016	68,807
90	0,100	0,290	0,3393	73,904
100	0,108	0,310	0,3770	79,000
110	0,116	0,320	0,4147	81,549
120	0,124	0,340	0,4524	86,646
140	0,140	0,390	0,5278	99,388
160	0,159	0,440	0,6033	112,130
180	0,182	0,530	0,6787	135,065
200	0,211	0,630	0,7541	160,549
220	0,253	0,780	0,8295	198,775
240	0,316	1,080	0,9049	275,227
260	0,402	1,450	0,9803	369,518
280	0,510	1,900	1,0557	484,196
300	0,635	2,400	1,1311	611,616
320	0,785	2,980	1,2065	759,424
340	0,970	3,700	1,2819	942,909

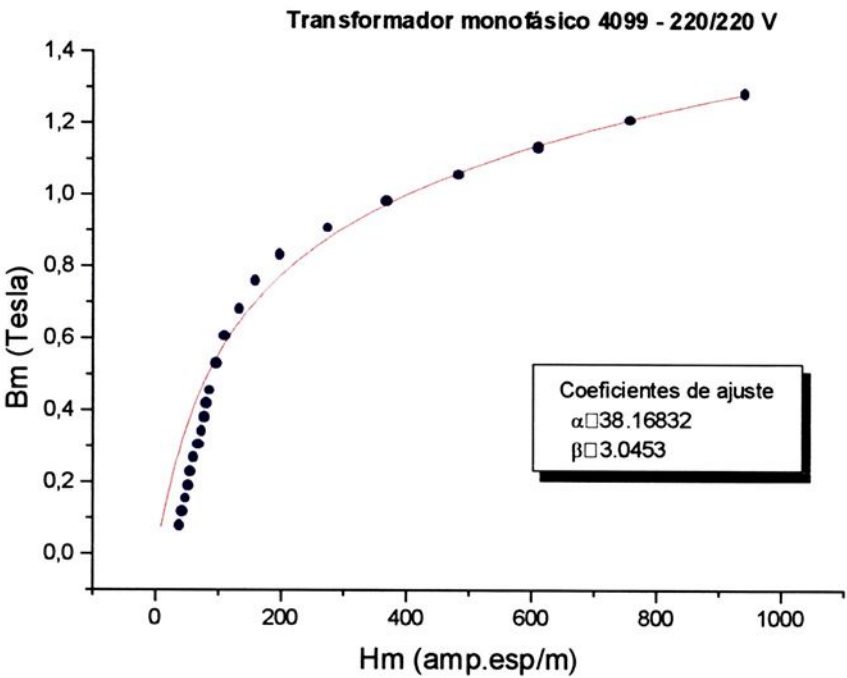


Figura 4.5. - Transformador monofásico nº 4099 – 220/220 V

Tabela 4.5. - Dados de ensaio do Transformador monofásico nº 4102
Tensão de ensaio 110/110 V

V (volts)	I rms (mA)	Ipico (mA)	B max (T)	H max (Ae/m)
10	0,089	0,320	0,0754	20,3872
20	0,125	0,420	0,1508	26,7582
30	0,158	0,500	0,2262	31,8550
40	0,191	0,600	0,3016	38,2260
50	0,222	0,660	0,3770	42,0486
60	0,254	0,740	0,4524	47,1454
70	0,291	0,860	0,5278	54,7906
80	0,331	0,980	0,6033	62,4358
90	0,377	1,100	0,6787	70,0810
100	0,431	1,300	0,7541	82,8231
110	0,508	1,620	0,8295	103,2103
120	0,606	2,020	0,9049	128,6943
130	0,74	2,620	0,9803	166,9203
140	0,91	3,340	1,0557	212,7915
150	1.115	4,180	1,1311	266,3080
160	1.355	5,140	1,2065	327,4696
170	1.640	6,340	1,2819	403,9217

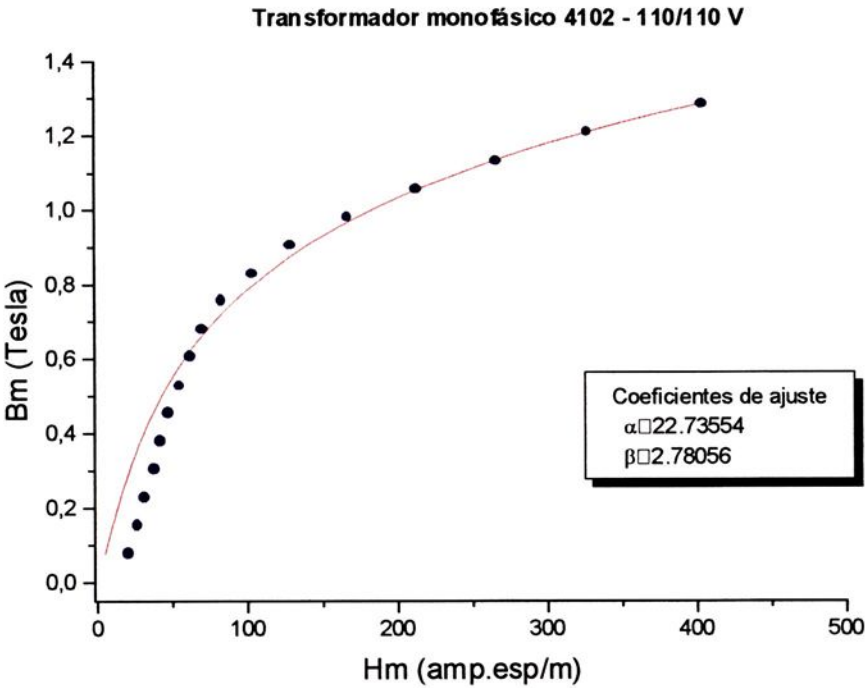


Figura 4.6. - Transformador monofásico nº 4102 – 110/110 V

Tabela 4.6. - Dados de ensaio do Transformador monofásico nº 4102
Tensão de ensaio 220/220 V

V (volts)	I rms (mA)	Ipico (mA)	B max (T)	H max (Ae/m)
20	0,043	0,150	0,0754	38,226
30	0,053	0,178	0,1131	45,362
40	0,062	0,196	0,1508	49,949
50	0,072	0,214	0,1885	54,536
60	0,079	0,230	0,2262	58,613
70	0,088	0,250	0,2639	63,710
80	0,097	0,270	0,3016	68,807
90	0,104	0,290	0,3393	73,904
100	0,113	0,310	0,3770	79,000
110	0,122	0,330	0,4147	84,097
120	0,130	0,350	0,4524	89,194
140	0,149	0,390	0,5278	99,388
160	0,170	0,450	0,6033	114,678
180	0,195	0,530	0,6787	135,065
200	0,223	0,630	0,7541	160,549
220	0,263	0,800	0,8295	203,872
240	0,317	1,020	0,9049	259,937
260	0,390	1,340	0,9803	341,486
280	0,480	1,700	1,0557	433,228
300	0,590	2,160	1,1311	550,455
320	0,728	2,660	1,2065	677,875
340	0,880	3,260	1,2819	830,779

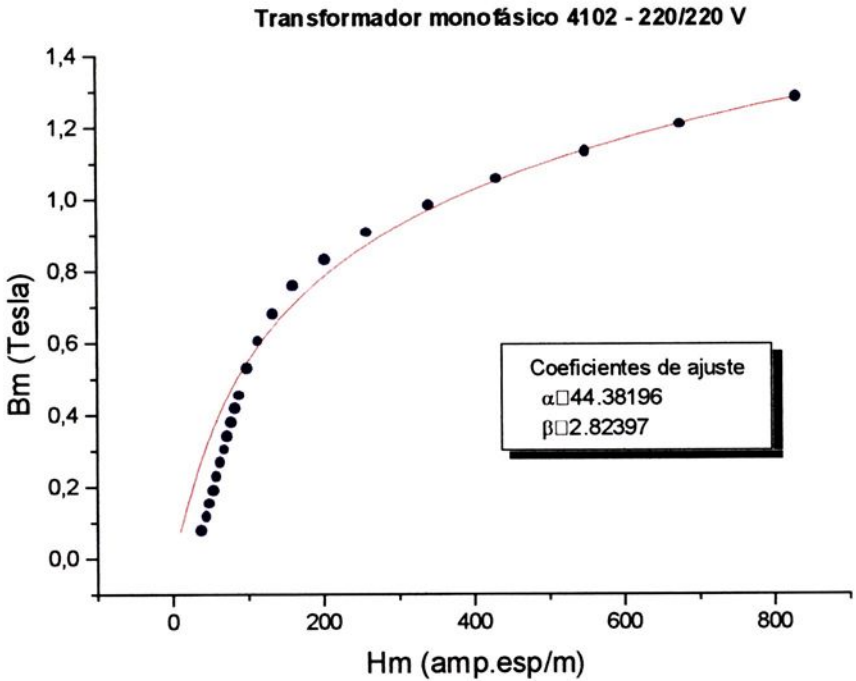


Figura 4.7. - Transformador monofásico nº 4102 – 220/220 V

4.2.2. - Características das unidades trifásicas de núcleo envolvido

A figura 4.8 ilustra a configuração física do transformador trifásico com núcleo envolvido utilizado nos ensaios experimentais. São utilizadas duas bobinas em paralelo por fase, tanto para os enrolamentos do primário quanto para os enrolamentos do secundário.

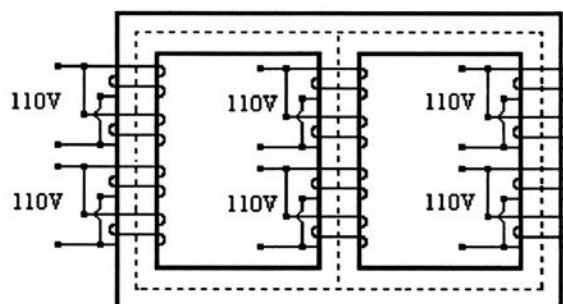


Figura 4.8 – Modelo físico do transformador trifásico com núcleo envolvido

Os transformadores de núcleo envolvido utilizados nos testes apresentam as seguintes características construtivas:

Potência Nominal.....	3,0 KVA
Tensão Nominal.....	110 / 110V
Corrente Nominal.....	5,3 / 5,3 A
Numero de espiras do primário.....	147 Esp.
Numero de espiras do secundário.....	147 Esp.
Comprimento magnético da coluna.....	0,142 m
Comprimento magnético da culatra.....	0,095 m
Área da Seção transversal.....	0,003136 m ²
Indutância de dispersão.....	0,0022 H
Resistência Ôhmica dos enrolamentos.....	1,0 Ohm

Para a representação analítica da curva característica de magnetização a ser utilizada na simulação digital, foi levantada experimentalmente a curva

normal de magnetização dos transformadores trifásicos, tanto os de teste, quanto os auxiliares.

Para que seja possível se fazer o ajuste hiperbólico para a obtenção dos coeficientes de ajuste de cada fase, é necessário calcular a densidade de fluxo magnético $B_{\max} = K_2 * V \text{ (T)}$ e a intensidade de campo magnético $H_{\max} = K_1 * I_{\text{pico}} \text{ (a/m)}$, e usando a expressão $H = \alpha \sinh(\beta B)$ com o auxílio de ferramentas computacionais chegamos aos resultados apresentados nos gráficos abaixo.

Tabela 4.7. - Dados de ensaio do Transformador trifásico nº 13.328
Ligação Y-Y – Tensão de ensaio 191/191 V

Ba max (T)	Bb max (T)	Bc max (T)	Ha max (Ae/m)	Hb max (Ae/m)	Hc max (Ae/m)
0,0752	0,0752	0,0752	0,3688	0,2645	0,3828
0,1504	0,1504	0,1504	0,5359	0,3688	0,5428
0,2256	0,2256	0,2256	0,7098	0,4872	0,7377
0,3008	0,3008	0,3008	0,8769	0,5915	0,9186
0,3760	0,3760	0,3760	1,0439	0,6959	1,1065
0,4512	0,4512	0,4512	1,2179	0,8003	1,2944
0,5264	0,5264	0,5264	1,4406	0,9465	1,5032
0,6016	0,6016	0,6016	1,6285	1,0787	1,7120
0,6768	0,6768	0,6768	1,8721	1,2318	1,9695
0,7520	0,7520	0,7520	2,1435	1,4058	2,2479
0,8271	0,8271	0,8271	2,4497	1,6006	2,5749
0,9023	0,9023	0,9023	2,8116	1,8233	2,9507
0,9775	0,9775	0,9775	3,1595	2,0669	3,3613
1,0527	1,0527	1,0527	3,5771	2,3314	3,8972
1,1279	1,1279	1,1279	4,0782	2,7002	4,6349
1,2031	1,2031	1,2031	4,8506	3,2013	5,7345
1,2783	1,2783	1,2783	6,1520	3,9042	7,5230
1,3535	1,3535	1,3535	8,0032	4,8785	9,9866
1,4287	1,4287	1,4287	11,3437	6,5417	13,7794
1,5039	1,5039	1,5039	14,6841	8,1911	17,6766
1,5791	1,5791	1,5791	19,6948	10,8913	22,8961
1,6543	1,6543	1,6543	24,7055	13,3271	28,3244
1,7295	1,7295	1,7295	30,3426	16,1456	34,1702

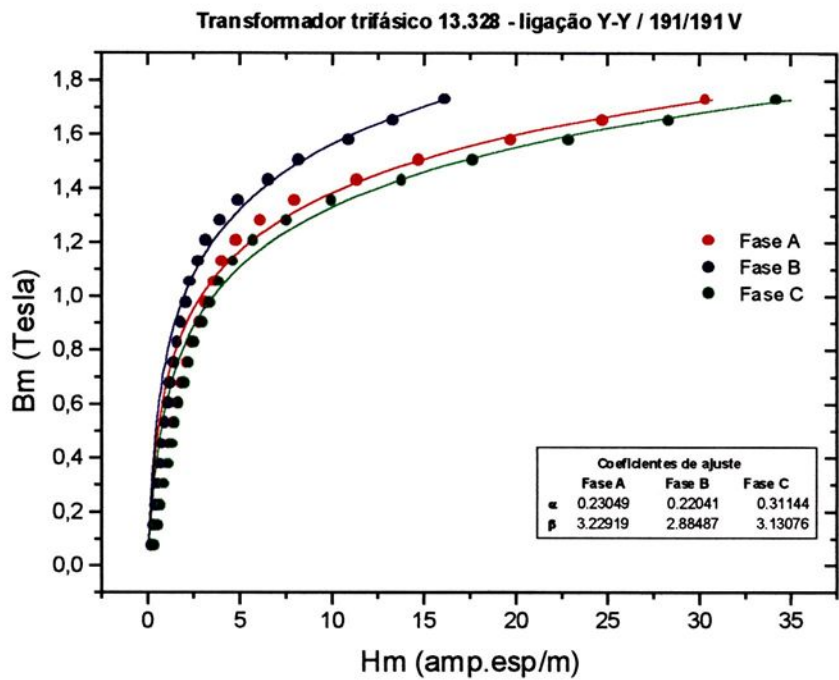


Figura 4.9. - Transformador trifásico nº 13.328 – ligação Y-Y – 191/191 V

Tabela 4.8. - Dados de ensaio do Transformador trifásico nº 13.328
Ligação Δ-Yt – Tensão de ensaio 110/191 V

Ba max (T)	Bb max (T)	Bc max (T)	Ha max (Ae/m)	Hb max (Ae/m)	Hc max (Ae/m)
0,0752	0,0752	0,0752	0,9047	0,6611	0,6611
0,1504	0,1504	0,1504	1,4893	1,0787	1,0787
0,2256	0,2256	0,2256	2,0948	1,5310	1,4963
0,3008	0,3008	0,3008	2,7211	1,9625	1,9277
0,3760	0,3760	0,3760	3,4657	2,5680	2,4706
0,4512	0,4512	0,4512	4,3844	3,2291	3,0899
0,5264	0,5264	0,5264	5,4561	4,1060	3,7789
0,6016	0,6016	0,6016	7,0080	5,3587	4,7323
0,6768	0,6768	0,6768	9,5343	7,3769	6,5557
0,7520	0,7520	0,7520	14,5450	11,2393	10,8565
0,8271	0,8271	0,8271	22,5482	18,1638	19,0685
0,9023	0,9023	0,9023	34,5182	29,2987	30,6209
0,9775	0,9775	0,9775	49,3415	43,0085	45,0267
1,0527	1,0527	1,0527	66,1134	57,8318	61,7291
1,1279	1,1279	1,1279	88,2440	78,2922	82,8853

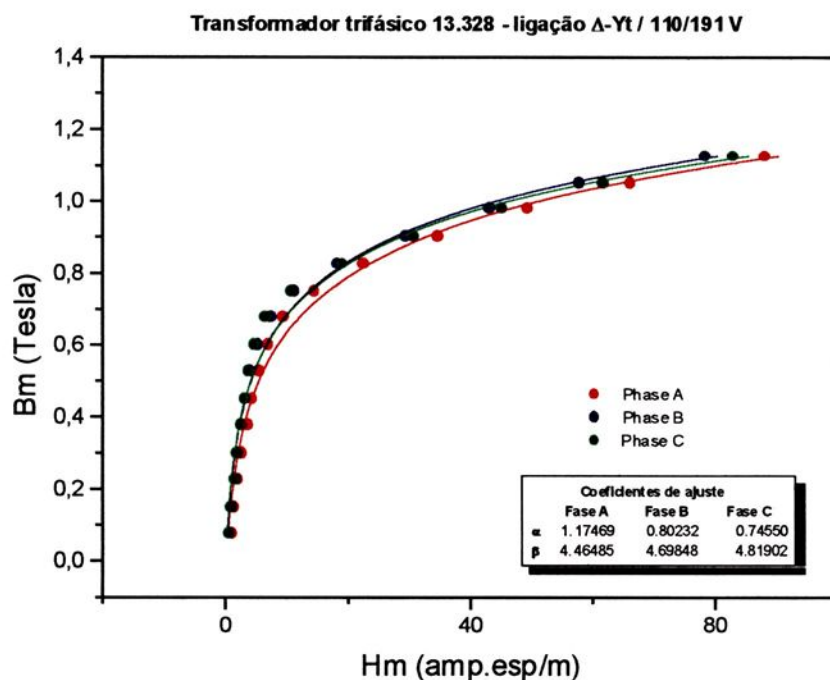


Figura 4.10. - Transformador trifásico nº 13.328 – ligação Δ -Yt – 110/191 V

Tabela 4.9. - Dados de ensaio do Transformador trifásico nº 13.328
Ligação Yt-Yt – Tensão de ensaio 191/191 V

Ba max (T)	Bb max (T)	Bc max (T)	Ha max (Ae/m)	Hb max (Ae/m)	Hc max (Ae/m)
0,0752	0,0752	0,0752	0,4036	0,4524	0,6959
0,1504	0,1504	0,1504	0,5707	0,5567	0,9256
0,2256	0,2256	0,2256	0,7238	0,6611	1,1344
0,3008	0,3008	0,3008	0,8630	0,7725	1,3362
0,3760	0,3760	0,3760	1,0230	0,8490	1,5171
0,4512	0,4512	0,4512	1,2109	0,9882	1,7398
0,5264	0,5264	0,5264	1,4058	1,1204	1,9973
0,6016	0,6016	0,6016	1,6215	1,2388	2,2827
0,6768	0,6768	0,6768	1,8929	1,4058	2,5958
0,7520	0,7520	0,7520	2,1435	1,5450	2,9090
0,8271	0,8271	0,8271	2,4218	1,7329	3,2918
0,9023	0,9023	0,9023	2,7837	1,9277	3,7511
0,9775	0,9775	0,9775	3,2570	2,2339	4,3844
1,0527	1,0527	1,0527	3,6884	2,4845	4,9133
1,1279	1,1279	1,1279	4,4052	2,8394	5,9154
1,2031	1,2031	1,2031	5,1986	3,2709	7,0637
1,2783	1,2783	1,2783	6,4026	3,8415	9,0819
1,3535	1,3535	1,3535	8,4208	4,7323	11,7612
1,4287	1,4287	1,4287	11,6220	6,2982	16,3544
1,5039	1,5039	1,5039	14,9625	8,9079	21,0867
1,5791	1,5791	1,5791	15,9368	13,7794	23,9400
1,6543	1,6543	1,6543	22,7569	16,4936	24,8447
1,7295	1,7295	1,7295	29,5075	19,2077	31,1777

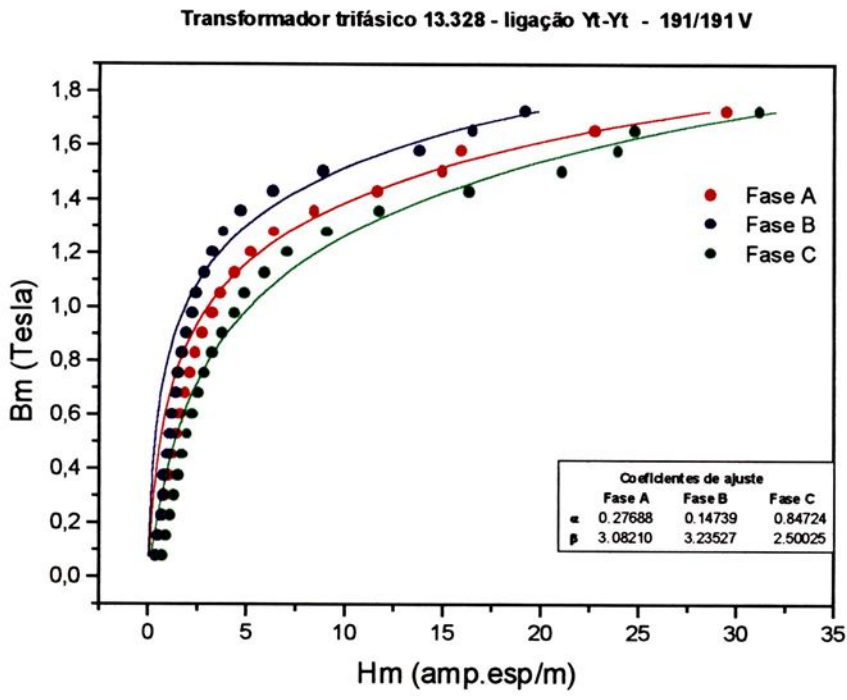


Figura 4.11. - Transformador trifásico nº 13.328 – ligação Yt-Yt – 191/191 V

Tabela 4.10. - Dados de ensaio do Transformador trifásico nº 13.329
Ligação Y-Y – Tensão de ensaio 191/191 V

Ba max (T)	Bb max (T)	Bc max (T)	Ha max (Ae/m)	Hb max (Ae/m)	Hc max (Ae/m)
0,0376	0,0376	0,0376	2,1156	2,2548	1,8373
0,0752	0,0752	0,0752	2,7837	3,1456	2,2827
0,1128	0,1128	0,1128	3,5632	3,9807	2,9507
0,1504	0,1504	0,1504	4,1199	4,7602	3,6188
0,1880	0,1880	0,1880	5,0107	5,5396	4,0642
0,2256	0,2256	0,2256	5,4561	6,5139	4,8437
0,2632	0,2632	0,2632	6,3469	7,7387	5,6231
0,3008	0,3008	0,3008	7,2377	8,1841	6,0685
0,3384	0,3384	0,3384	8,1285	9,5203	6,9593
0,3760	0,3760	0,3760	9,2420	10,7452	7,7387
0,4136	0,4136	0,4136	10,3554	12,1370	8,6295
0,4512	0,4512	0,4512	11,9143	13,6959	10,0771
0,4888	0,4888	0,4888	13,4732	15,4775	10,7452
0,5264	0,5264	0,5264	15,4775	17,4818	12,1370
0,5640	0,5640	0,5640	17,9272	20,1542	13,9186
0,6016	0,6016	0,6016	22,5482	23,1049	15,9229
0,6392	0,6392	0,6392	27,5589	28,6723	18,8180
0,6768	0,6768	0,6768	37,5803	37,5803	23,2719
0,7144	0,7144	0,7144	55,1177	49,2719	29,7858
0,7520	0,7520	0,7520	74,0470	68,4796	37,0235
0,7896	0,7896	0,7896	95,2033	87,4089	48,1584
0,8271	0,8271	0,8271	121,3703	109,6787	59,5717
0,8647	0,8647	0,8647	149,7643	132,5052	76,2740

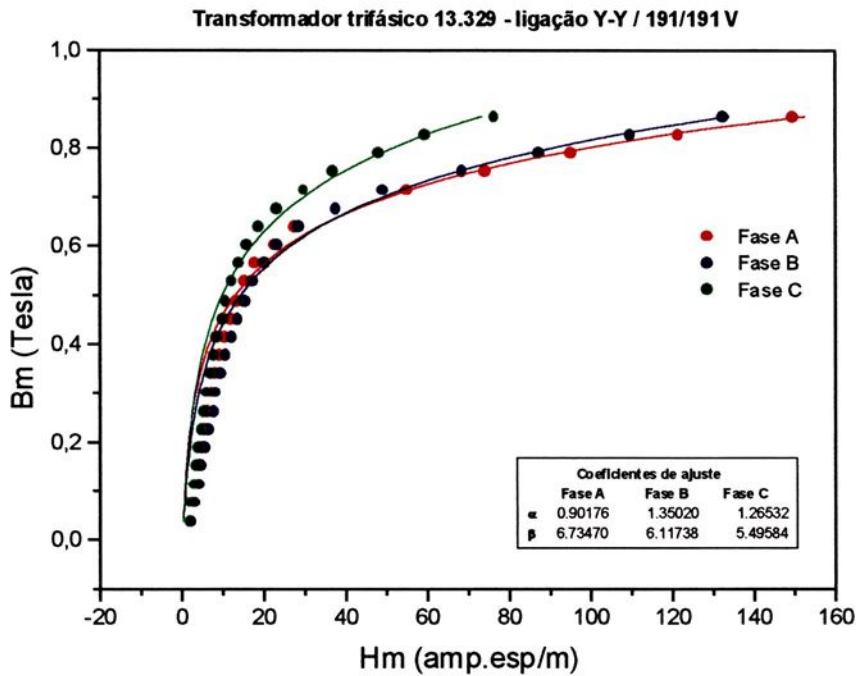


Figura 4.12. - Transformador trifásico nº 13.329 – ligação Y-Y – 191/191 V

Tabela 4.11. - Dados de ensaio do Transformador trifásico nº 13.329
Ligação Δ-Yt – Tensão de ensaio 110/191 V

Ba max (T)	Bb max (T)	Bc max (T)	Ha max (Ae/m)	Hb max (Ae/m)	Hc max (Ae/m)
0,0376	0,0376	0,0376	3,4797	2,9229	2,7559
0,0752	0,0752	0,0752	5,7066	4,6210	4,0921
0,1128	0,1128	0,1128	7,9614	6,4582	5,9293
0,1504	0,1504	0,1504	10,5781	8,6017	7,8501
0,1880	0,1880	0,1880	13,5011	10,6895	9,8822
0,2256	0,2256	0,2256	17,0085	13,7238	12,1370
0,2632	0,2632	0,2632	21,7687	18,0942	15,0878
0,3008	0,3008	0,3008	27,8372	22,4090	18,2055
0,3384	0,3384	0,3384	37,1905	31,1220	24,3297
0,3760	0,3760	0,3760	51,2762	46,1263	37,3019
0,4136	0,4136	0,4136	82,9549	78,5010	65,9742
0,4512	0,4512	0,4512	121,9271	119,1433	104,3896
0,4888	0,4888	0,4888	180,3852	167,3017	158,9506
0,5264	0,5264	0,5264	241,9055	236,0597	217,4087
0,5640	0,5640	0,5640	311,7769	307,6014	297,0232

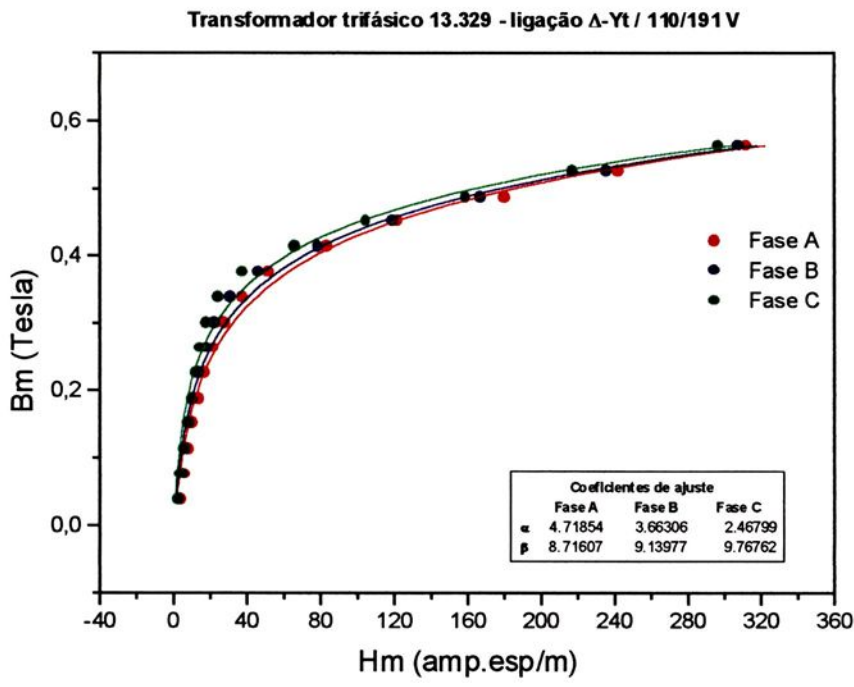


Figura 4.13. - Transformador trifásico nº 13.329 – ligação Δ-Yt – 110/191 V

Tabela 4.12. - Dados de ensaio do Transformador trifásico nº 13.329
Ligação Yt-Yt – Tensão de ensaio 191/191 V

Ba max (T)	Bb max (T)	Bc max (T)	Ha max (Ae/m)	Hb max (Ae/m)	Hc max (Ae/m)
0,0376	0,0376	0,0376	2,2827	2,8951	3,1734
0,0752	0,0752	0,0752	3,0621	3,6745	3,6745
0,1128	0,1128	0,1128	3,7302	4,4540	4,3426
0,1504	0,1504	0,1504	4,4540	5,2334	4,9550
0,1880	0,1880	0,1880	5,2334	6,0128	5,5674
0,2256	0,2256	0,2256	6,0128	7,1263	5,9015
0,2632	0,2632	0,2632	6,7923	7,7944	6,7923
0,3008	0,3008	0,3008	7,6831	8,9079	7,3490
0,3384	0,3384	0,3384	8,7966	10,2441	8,1285
0,3760	0,3760	0,3760	9,7430	11,6916	9,0193
0,4136	0,4136	0,4136	11,2462	13,3619	10,2441
0,4512	0,4512	0,4512	12,6938	14,9208	11,1349
0,4888	0,4888	0,4888	14,4754	17,1477	12,4711
0,5264	0,5264	0,5264	16,7023	19,7644	14,1413
0,5640	0,5640	0,5640	19,3747	22,8265	15,8115
0,6016	0,6016	0,6016	23,9400	26,7237	18,2612
0,6392	0,6392	0,6392	30,0642	33,9614	22,0471
0,6768	0,6768	0,6768	41,1991	43,4261	26,7237
0,7144	0,7144	0,7144	50,6638	61,2419	33,9614
0,7520	0,7520	0,7520	67,9228	77,3875	36,7451
0,7896	0,7896	0,7896	75,7173	96,8736	59,0149
0,8271	0,8271	0,8271	106,3382	110,2354	65,6959
0,8647	0,8647	0,8647	138,0726	134,7322	76,8307

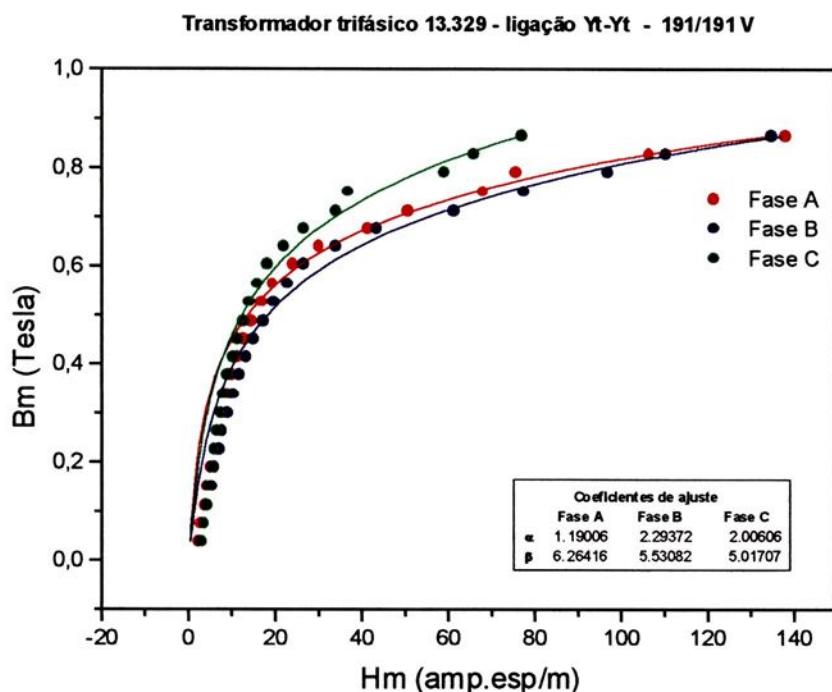


Figura 4.14. - Transformador trifásico nº 13.329 – ligação Yt-Yt – 191/191 V

4.3. – Procedimentos experimentais para execução da dupla excitação

Os ensaios experimentais em laboratório foram direcionados no sentido de se obter, para as diferentes conexões dos enrolamentos do transformador, as formas de onda das correntes de excitação para níveis de injeção de corrente contínua variando desde 0% até 15 % da corrente nominal.

Procurou-se durante os ensaios, provocar um desequilíbrio nos níveis de injeção c.c. em cada uma das fases. Assim, para as ligações isoladas, os níveis de injeção c.c. aplicados são respectivamente $I_{cca} = 70\% I_0$, $I_{ccb} = 30\% I_0$ e $I_{ccc} = -100\% I_0$. Para as configurações em estrela aterrada, foram os níveis de injeção c.c. aplicados são respectivamente $I_{cca} = 30\% I_0$, $I_{ccb} = 20\% I_0$ e $I_{ccc} = 50\% I_0$, e a corrente do condutor neutro $I_{ccn} = -100\% I_0$, sendo que I_0 variou de 0 a 15% de I_n .

As figuras 4.15 e 4.16, mostram os arranjos dos circuitos experimental para as ligações ΔY e $Y Y$ respectivamente, utilizados tanto para o banco de transformadores monofásicos quanto para o transformador trifásico de núcleo envolvido.

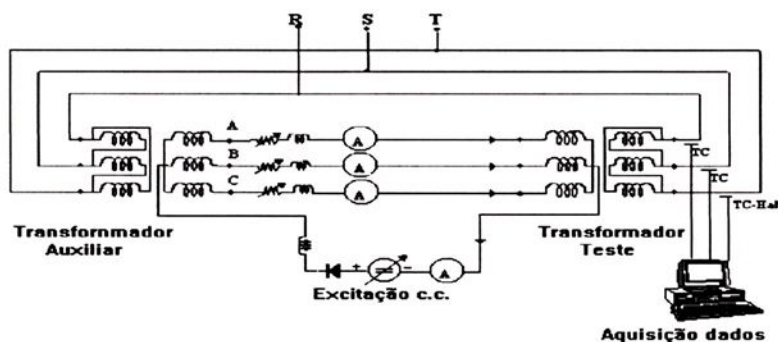


Figura 4.15. – Arranjo experimental para o transformadores trifásico - ligação ΔY

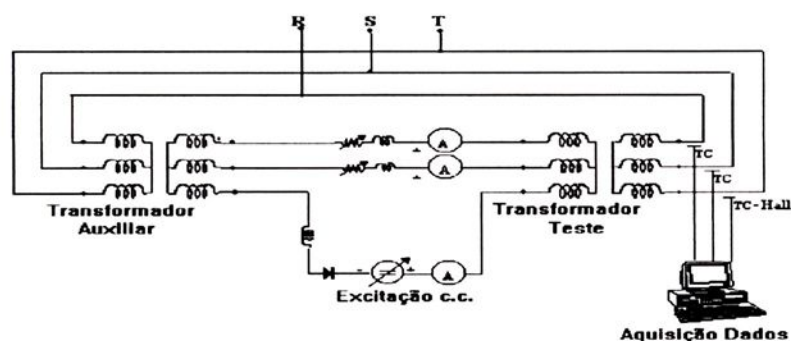


Figura 4.16. – Arranjo experimental para o transformador trifásico com - ligação $Y Y$

O experimento é conduzido com a ajuda de um sistema de aquisição de dados, denominado de DaqBook/100 da marca IOtech, o qual possui uma placa conversora de sinal analógico / digital de 12 Bits, 100 kHz.

O software utilizado para a aquisição, análise e tratamento do sinal é o DASyLab da IOtech., instalado em um micro computador IBM do tipo Pentium 100 MHz.

4.4. – Banco de transformadores monofásico

4.4.1. – Conexão YY

4.4.1.1. – Com excitação c.c. nula

A figura 4.17, mostra a corrente de magnetização nas fases A, B e C para um banco de transformadores trifásicos constituídos de três unidades monofásicas quando o mesmo é alimentado por um sistema trifásico simétrico e equilibrado sem excitação c.c..

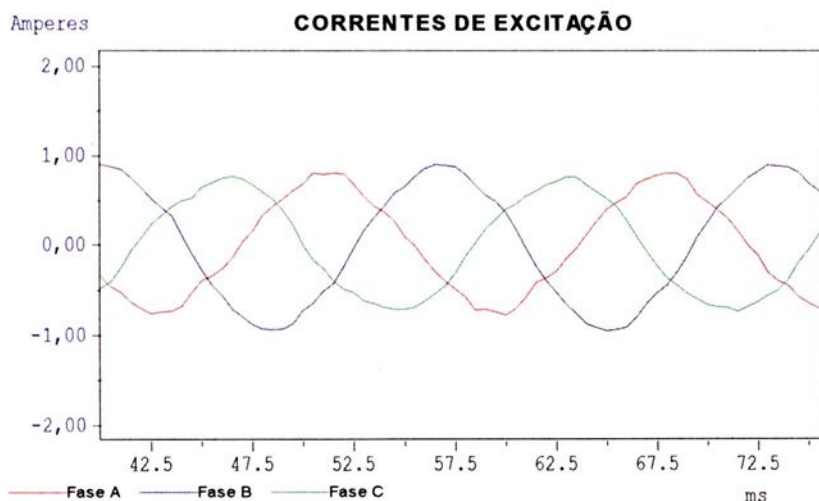


Figura 4.17. – Formas de onda das correntes de excitação normais - ligação YY

4.4.1.2. – Com excitação c.c. de 5,0% da corrente nominal

Estando os enrolamentos do primário e do secundário do transformador isolados, foi injetado um nível de corrente contínua da ordem de 5,0% da

corrente nominal do transformador, de tal maneira que a soma das componentes contínuas injetadas em cada unidade seja nula.

O resultado deste ensaio é apresentado na figura 4.18.

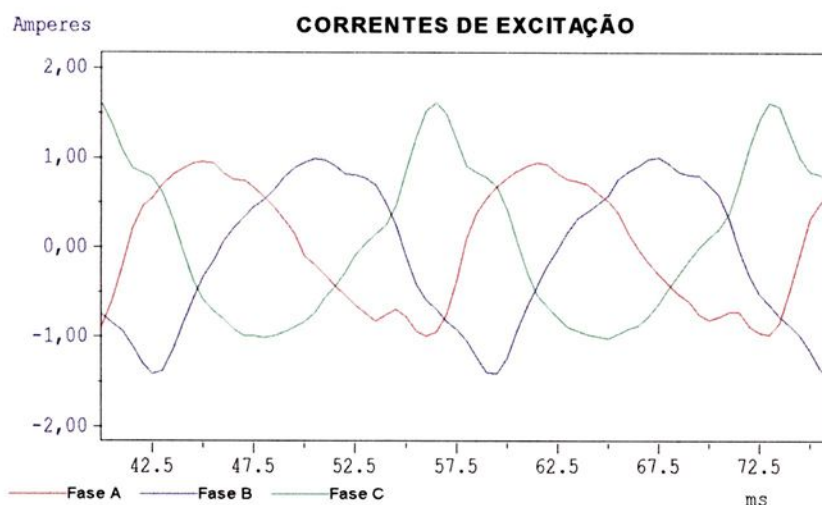


Figura 4.18. – Formas de onda das correntes de excitação com $I_{cc} = 5\% I_0$ - ligação YY

4.4.1.3. – Com excitação c.c. de 15,0% da corrente nominal

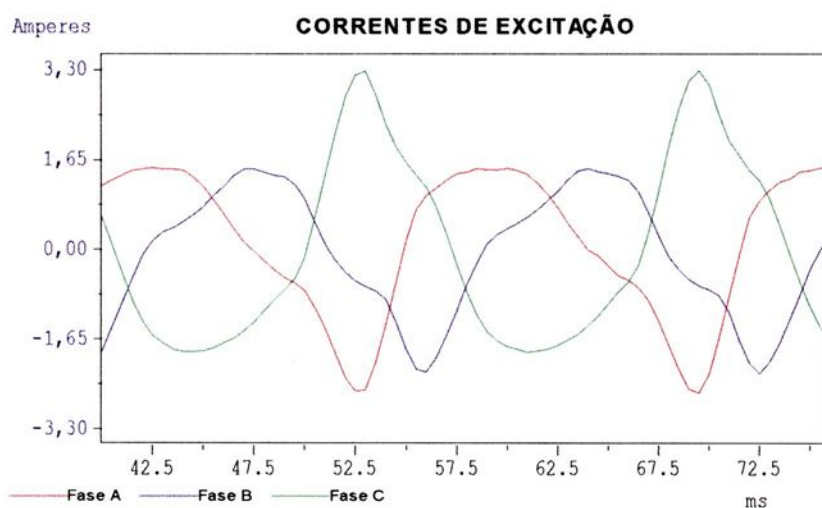
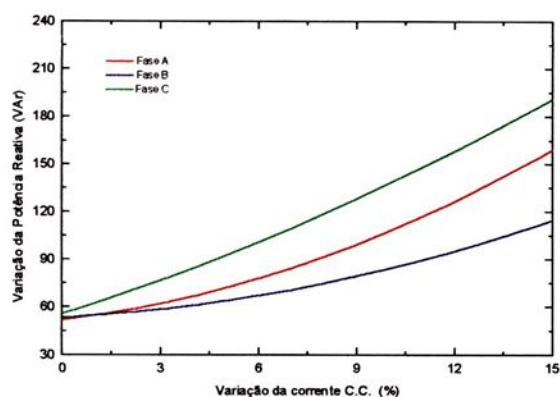


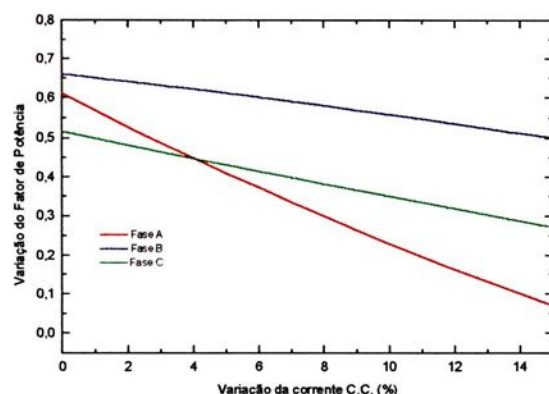
Figura 4.19. – Formas de onda das correntes de excitação com $I_{cc} = 15\% I_0$ - ligação YY

Para melhor evidenciar o fenômeno da dupla excitação, foi feita uma injeção de corrente contínua da ordem de 15,0% da corrente nominal, cujo resultado é mostrados na figura 4.19.

4.4.1.4. - Potência reativa e fator de potência



(a) – Potência Reativa



(b) – Fator de Potência

Figura 4.20. – Gráficos das potência e fator de potência em função da injeção de corrente contínua

Na figura 4.20 (a) e (b) podemos verificar o comportamento da potência reativa e do fator de potência. Pode ser observado que temos um aumento na demanda de potência reativa devido a variação da corrente contínua, e uma conseqüente diminuição no fator de potência nas três fase.

4.4.2. – Conexão ΔY

4.4.2.1. – Com excitação c.c. nula

A figura 4.21, mostra a corrente de magnetização nas fases A, B e C para um banco de transformadores trifásicos constituídos de três unidades monofásicas quando o mesmo é alimentado por um sistema trifásico simétrico e equilibrado sem excitação c.c.

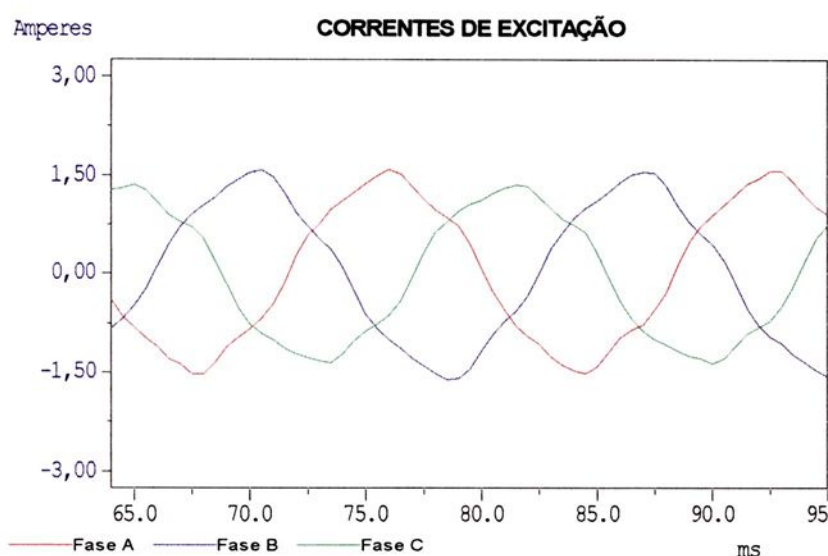


Figura 4.21. – Formas de onda das correntes de excitação normais - ligação ΔY

4.4.2.2. – Com excitação c.c. de 5,0% da corrente nominal

Estando os enrolamentos do secundário do transformador aterrados, este pode estar sujeito a injeções de corrente contínua proveniente de algum tipo de distúrbio, tais como, tempestades geomagnéticas, equipamentos tiristorizados nos Sistemas de Potência e retorno por terra de Sistemas de Transmissão em Corrente Contínua.

Inicialmente foi injetado um nível de corrente contínua da ordem de 5,0% da corrente nominal do transformador.

O resultado deste ensaio é apresentado na figura 4.22.

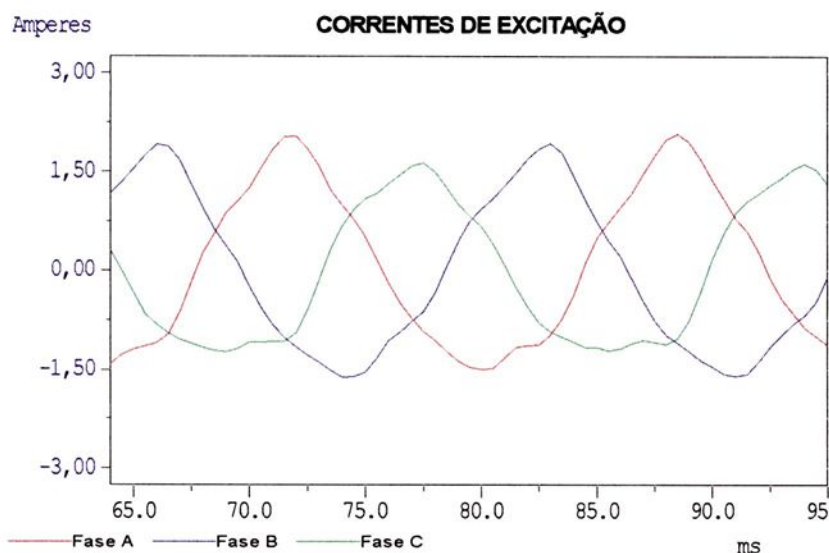


Figura 4.22. – Formas de onda das correntes de excitação com $I_{ce} = 5 \% I_0$ - ligação ΔY

4.4.2.3. – Com excitação c.c. de 15,0% da corrente nominal

Para melhor evidenciar o fenômeno da dupla excitação, foi feita uma injeção de corrente contínua da ordem de 15,0% da corrente nominal, cujo resultado é mostrado na figura 4.23.

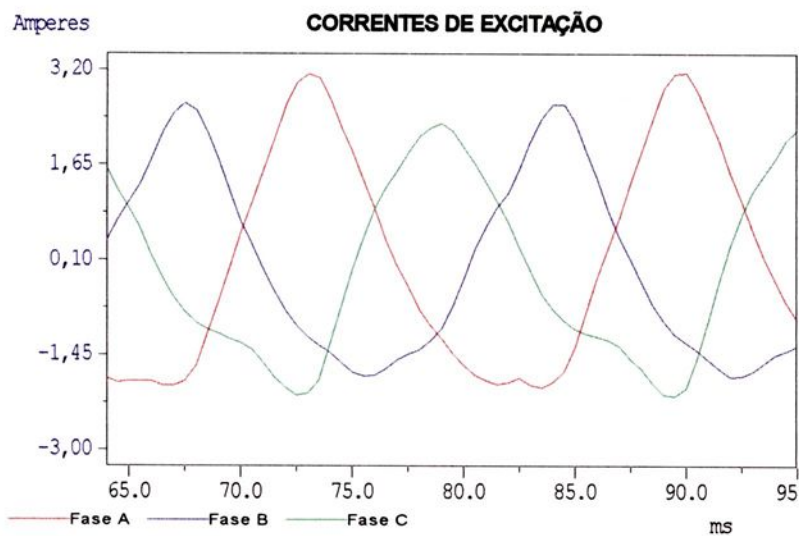


Figura 4.23. – Formas de onda das correntes de excitação com $I_{cc} = 15 \% I_0$ - ligação ΔY_1

4.4.2.4. - Potência reativa e fator de potência

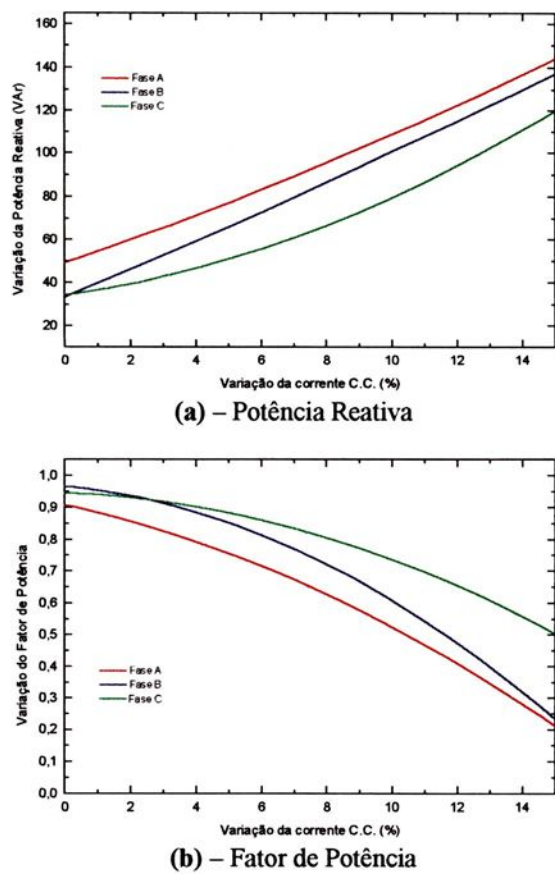


Figura 4.24. – Gráficos das potência e fator de potência em função da injeção de corrente contínua

Na figura 4.24 (a) e (b) podemos verificar o comportamento da potência reativa e do fator de potência. Nesta conexão, é possível observar a diminuição fator de potência, e com isso temos um aumento da demanda de potência reativa.

4.4.3. – Conexão $\Upsilon\Upsilon$

4.4.3.1. – Com excitação c.c. nula

A figura 4.25, mostra a corrente de magnetização nas fases A, B e C para um banco de transformadores trifásicos constituídos de três unidades monofásicas quando o mesmo é alimentado por um sistema trifásico simétrico e equilibrado sem excitação c.c..

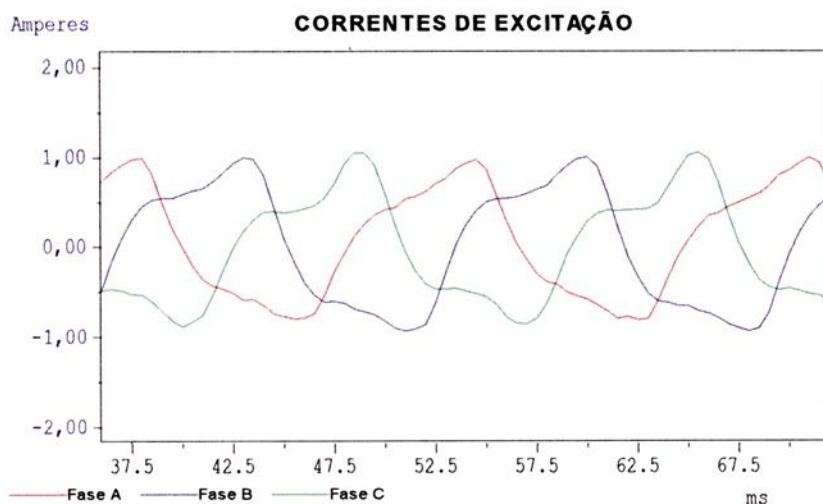


Figura 4.25. – Formas de onda das correntes de excitação normais - ligação $\Upsilon\Upsilon$

4.4.3.2. – Com excitação c.c. de 5,0% da corrente nominal

Estando os enrolamentos do secundário do transformador aterrados, foi injetado um nível de corrente contínua da ordem de 5,0% da corrente nominal do transformador.

O resultado deste ensaio é apresentado na figura 4.26.

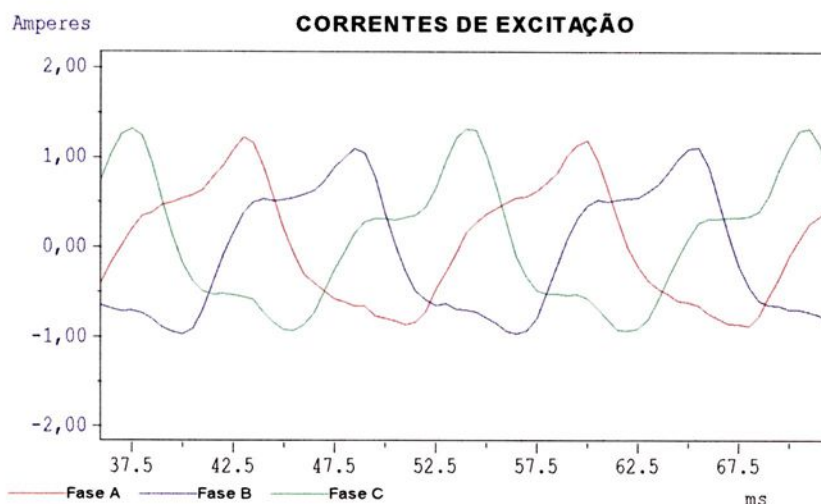


Figura 4.26. – Formas de onda das correntes de excitação com $I_{cc} = 5 \% I_0$ - ligação $\Delta\Delta$

4.4.3.3. – Com excitação c.c. de 15,0% da corrente nominal

Para melhor evidenciar o fenômeno da dupla excitação, foi feita uma injeção de corrente contínua da ordem de 15,0% da corrente nominal, cujo resultado é mostrado nas figuras 4.27.

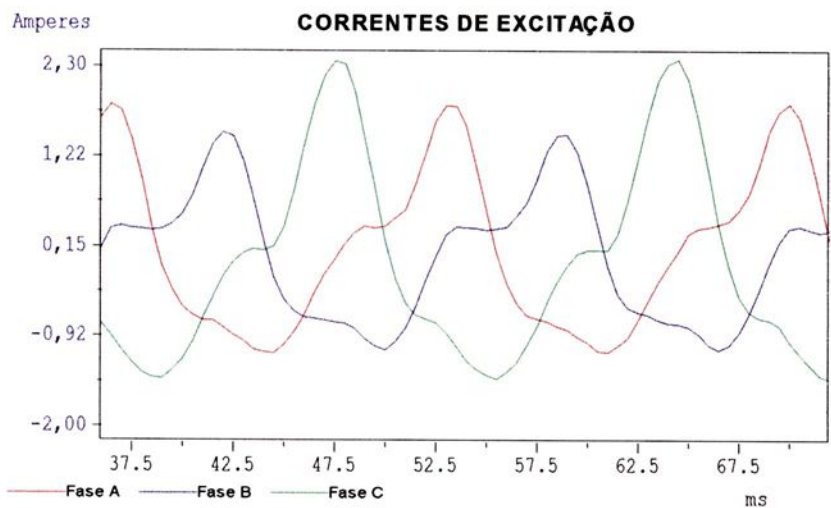


Figura 4.27. – Formas de onda das correntes de excitação com $I_{cc} = 15 \% I_0$ - ligação $\Delta\Delta$

4.4.3.4. - Potência reativa e fator de potência

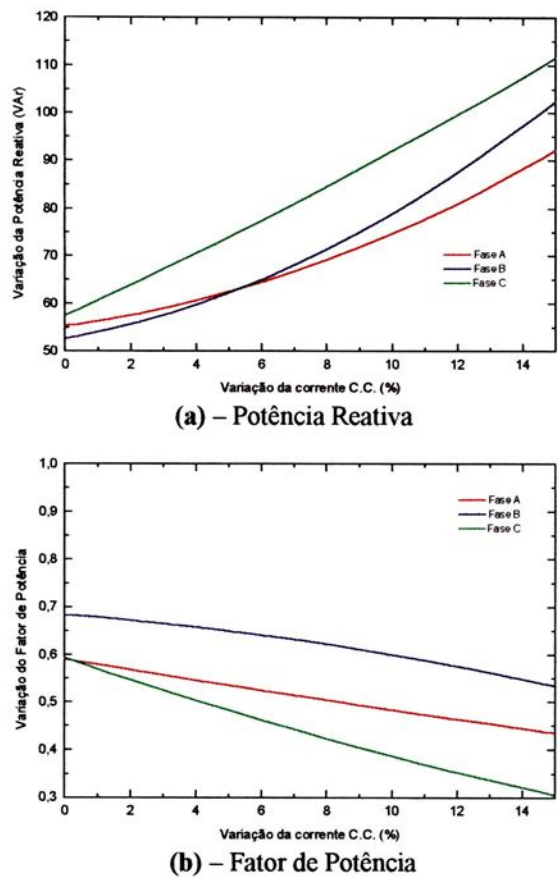


Figura 4.28. – Gráficos das potência e fator de potência em função da injeção de corrente contínua

Na figura 4.28 (a) e (b) podemos verificar o comportamento da potência reativa e do fator de potência. Nesta conexão, podemos observar que a potência reativa sofre um aumento significativo com a variação da corrente contínua e o fator de potência sofre uma diminuição.

4.5. – Transformador trifásico

4.5.1. – Conexão YY

4.5.1.1. – Com excitação c.c. nula

A figura 4.29, mostra a corrente de magnetização nas fases A, B e C para um transformador trifásico quando o mesmo é alimentado por um sistema trifásico simétrico e equilibrado sem excitação c.c.

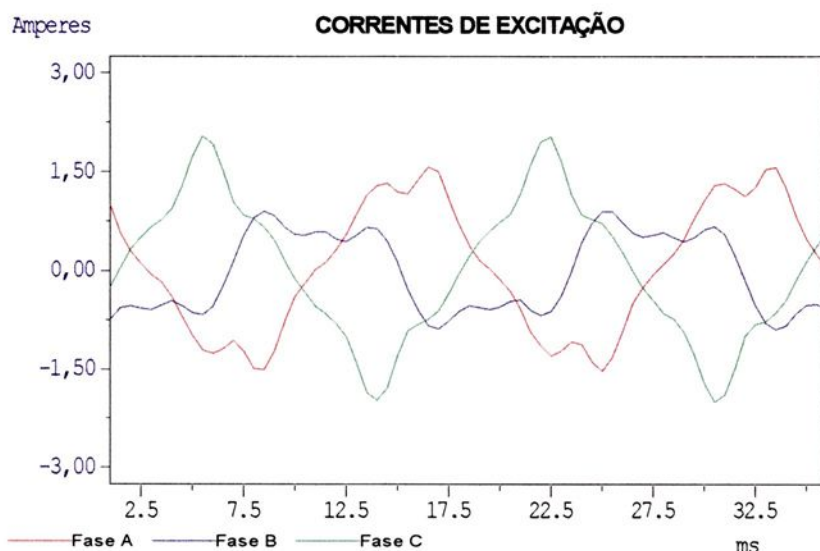


Figura 4.29. – Formas de onda das correntes de excitação normais - ligação YY

4.5.1.2. – Com excitação c.c. de 5,0% da corrente nominal

Estando os enrolamentos do primário e do secundário do transformador isolados, foi injetado um nível de corrente contínua da ordem de 5,0% da corrente nominal do transformador, de tal maneira que a soma das componentes contínuas injetadas em cada unidade seja nula.

O resultado deste ensaio é apresentado na figura 4.30.

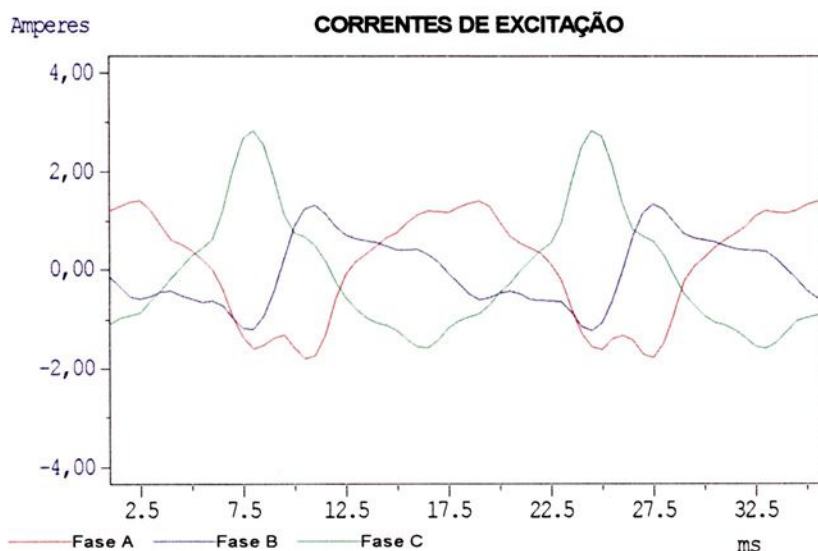


Figura 4.30. – Formas de onda das correntes de excitação com $I_{cc} = 5 \% I_0$ - ligação YY

4.5.1.3. – Com excitação c.c. de 15,0% da corrente nominal

Para melhor evidenciar o fenômeno da dupla excitação, foi feita uma injeção de corrente contínua da ordem de 15,0% da corrente nominal, cujo resultado é mostrado na figura 4.31.

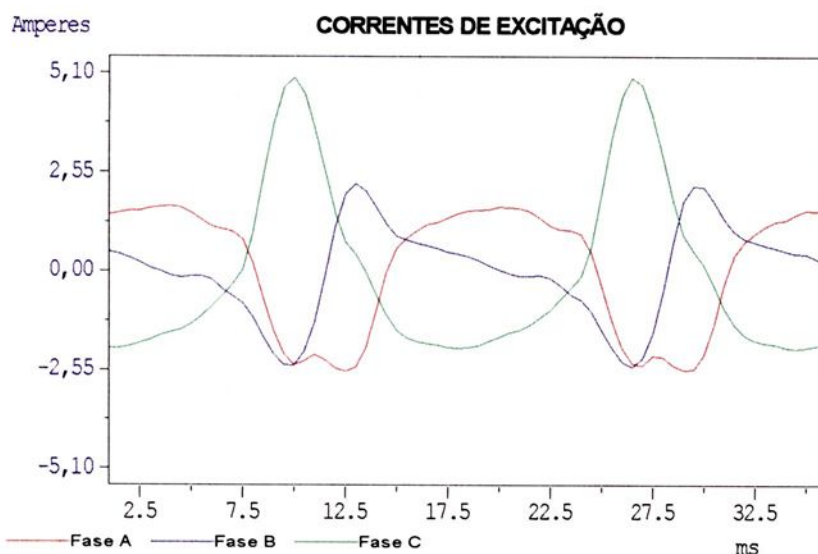
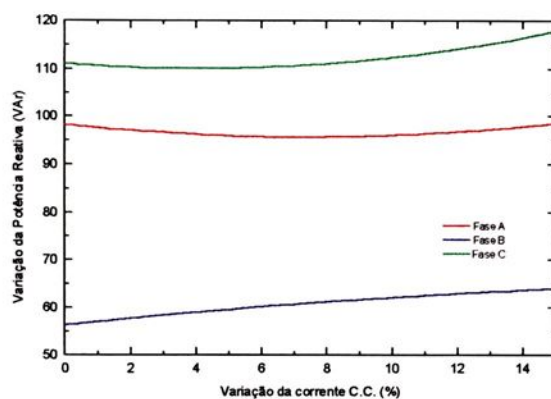
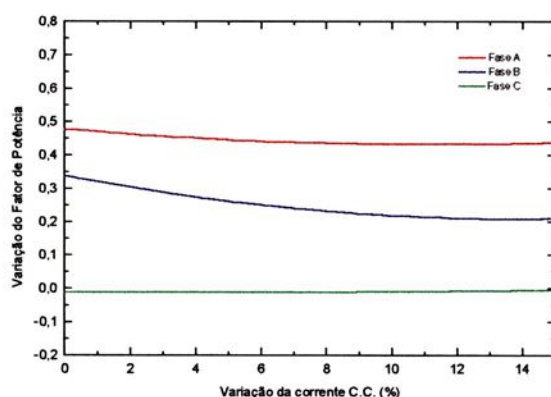


Figura 4.31. – Formas de onda das correntes de excitação com $I_{cc} = 15\% I_0$ - ligação YY

4.5.1.4. - Potência reativa e fator de potência



(a) – Potência Reativa



(b) – Fator de Potência

Figura 4.32. – Gráficos das potência e fator de potência em função da injeção de corrente contínua

Na figura 4.32 (a) e (b) podemos verificar o comportamento da potência reativa e do fator de potência. Nesta conexão, podemos observar que o fator de potência tem uma pequena queda e permanece estável a partir de um certo nível de corrente c.c. circulando no secundário do transformador. A demanda de potência reativa sofre um pequeno aumento.

4.5.2. – Conexão ΔY

4.5.2.1. – Com excitação c.c. nula

A figura 4.33 mostra a corrente de magnetização nas fases A, B e C para um transformador trifásico quando o mesmo é alimentado por um sistema trifásico simétrico e equilibrado sem excitação c.c.

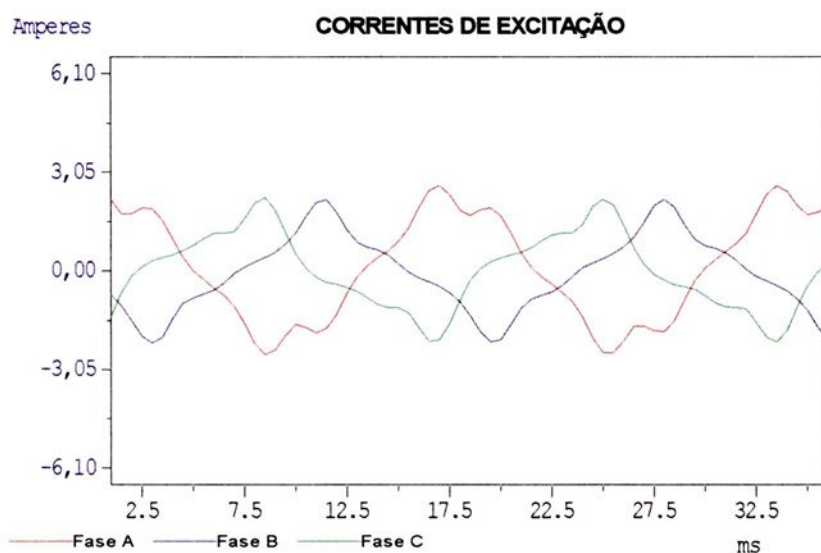


Figura 4.33. – Formas de onda das correntes de excitação normais - ligação ΔY

4.5.2.2. – Com excitação c.c. de 5,0% da corrente nominal

Estando os enrolamentos do secundário do transformador aterrados, este pode estar sujeito a injeções de corrente contínua proveniente de algum tipo de distúrbio, tais como, tempestades geomagnéticas, equipamentos tiristorizados nos Sistemas de Potência e retorno por terra de Sistemas de Transmissão em Corrente Contínua.

Inicialmente foi injetado um nível de corrente contínua da ordem de 5,0% da corrente nominal do transformador.

O resultado deste ensaio é apresentado na figura 4.34.

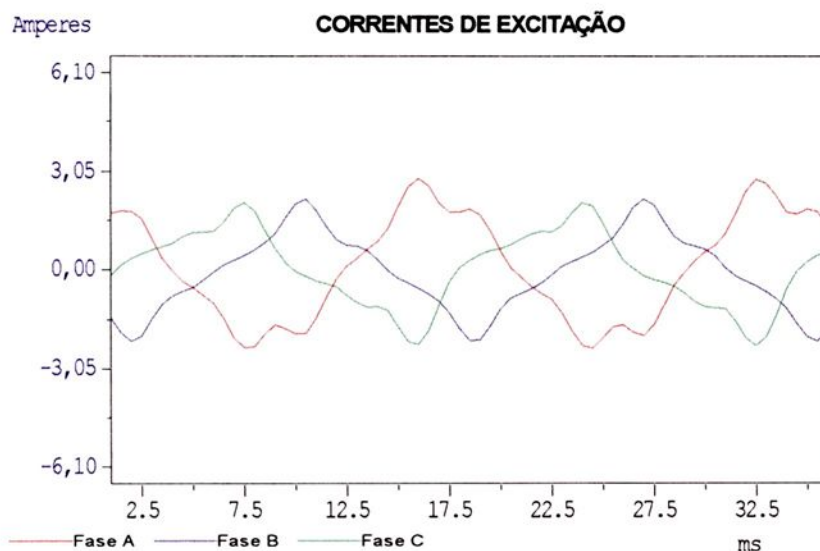


Figura 4.34. – Formas de onda das correntes de excitação com $I_{cc} = 5 \% I_0$ - ligação ΔY

4.5.2.3. – Com excitação c.c. de 15,0% da corrente nominal

Para melhor evidenciar o fenômeno da dupla excitação, foi feita uma injeção de corrente contínua da ordem de 15,0% da corrente nominal, cujo resultado é mostrado na figura 4.35.

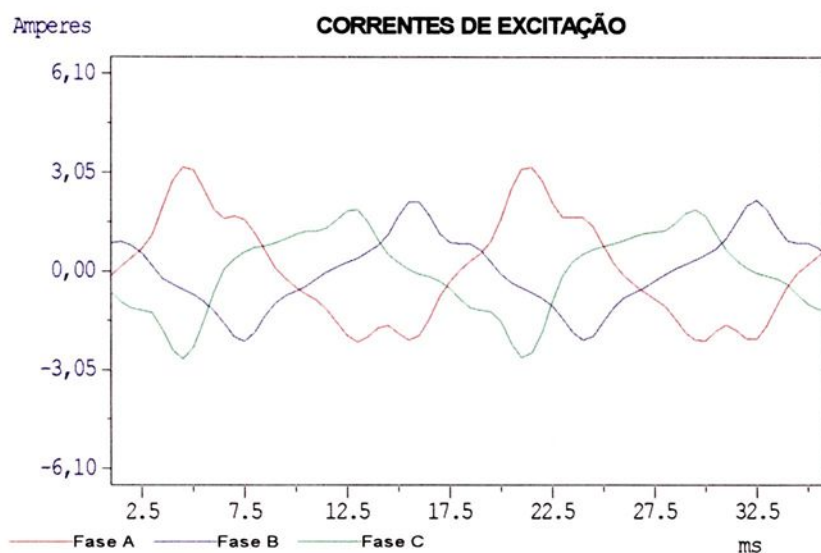
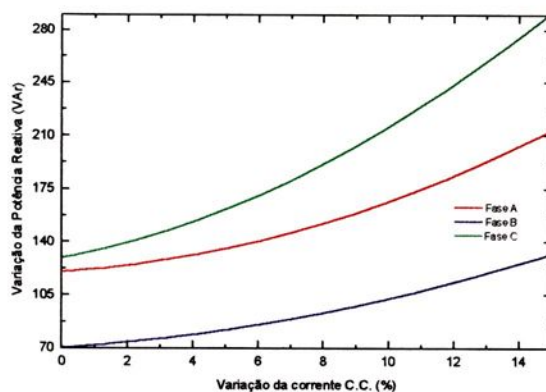


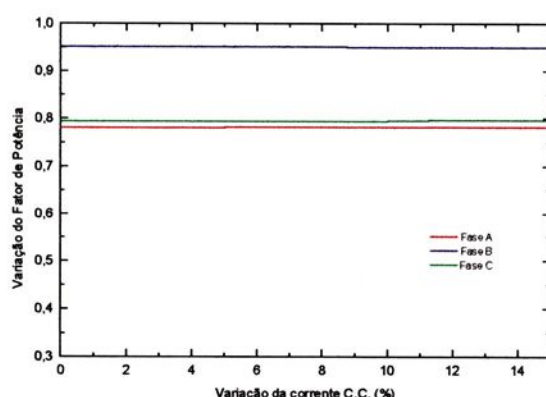
Figura 4.35. – Formas de onda das correntes de excitação com $I_{cc} = 15\% I_0$ - ligação ΔY

4.5.2.4. - Potência reativa e fator de potência

Na figura 4.36 (a) e (b) podemos verificar o comportamento da potência reativa e do fator de potência. Observa-se através dos gráficos que a demanda de potência reativa sofre um considerável aumento, já o fator de potência permanece praticamente estável.



(a) – Potência Reativa



(b) – Fator de Potência

Figura 4.36. – Gráficos das potência e fator de potência em função da injeção de corrente contínua

4.5.3. – Conexão ΥΥ

4.5.3.1. – Com excitação c.c. nula

A figura 4.37, mostra a corrente de magnetização nas fases A, B e C para um transformador trifásico quando o mesmo é alimentado por um sistema trifásico simétrico e equilibrado sem excitação c.c.

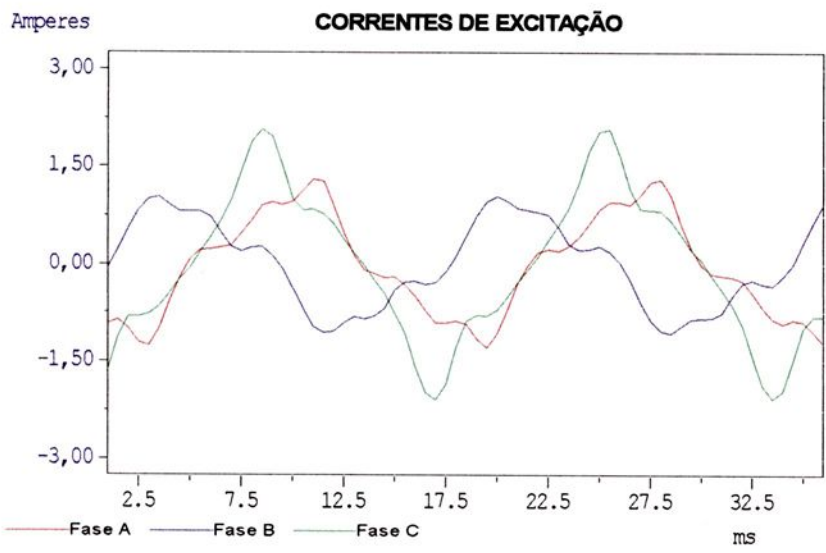


Figura 4.37. – Formas de onda das correntes de excitação normais - ligação $\Upsilon\Upsilon$

4.5.3.2. – Com excitação c.c. de 5,0% da corrente nominal

Estando os enrolamentos do secundário do transformador aterrados, foi injetado um nível de corrente contínua da ordem de 5,0% da corrente nominal do transformador.

O resultado deste ensaio é apresentado na figura 4.38.

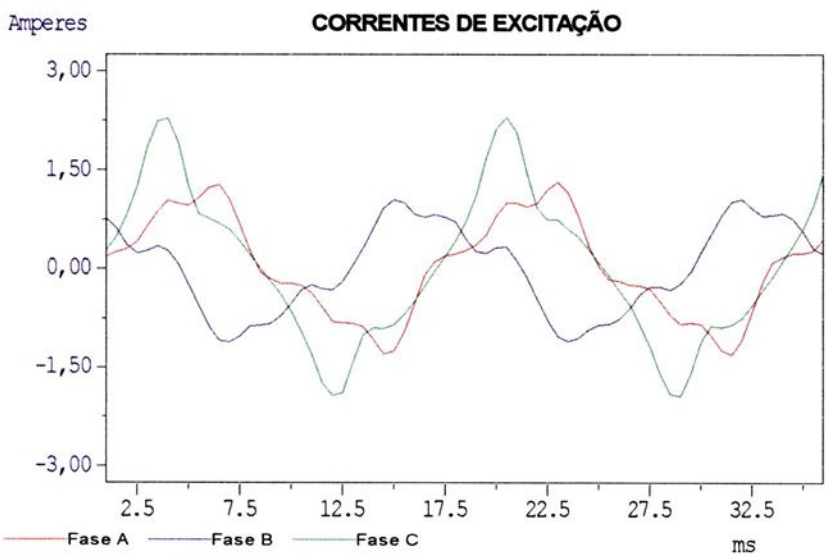


Figura 4.38. – Formas de onda das correntes de excitação com $I_{cc} = 5\% I_0$ - ligação $\Upsilon\Upsilon$

4.5.3.3. – Com excitação c.c. de 15,0% da corrente nominal

Para melhor evidenciar o fenômeno da dupla excitação, foi feita uma injeção de corrente contínua da ordem de 15,0% da corrente nominal, cujo resultado é mostrado na figura 4.39.

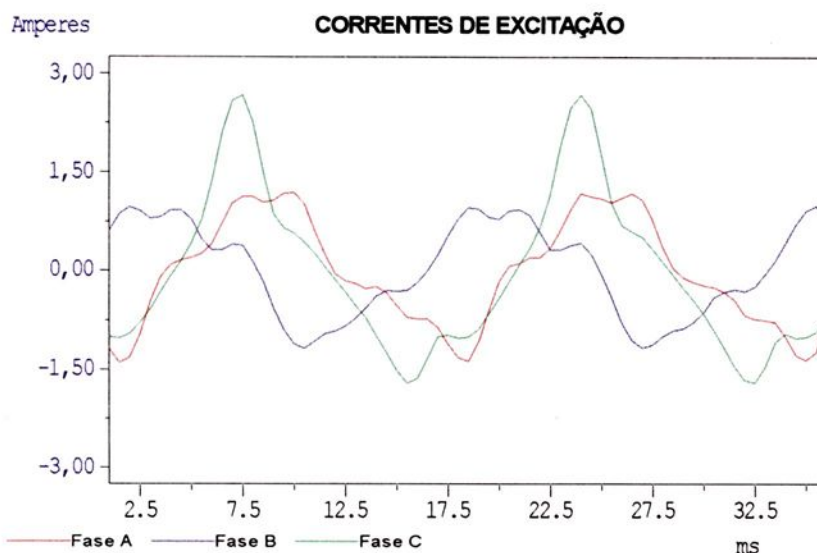
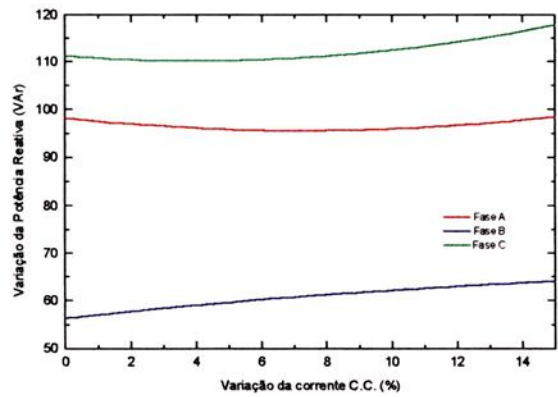


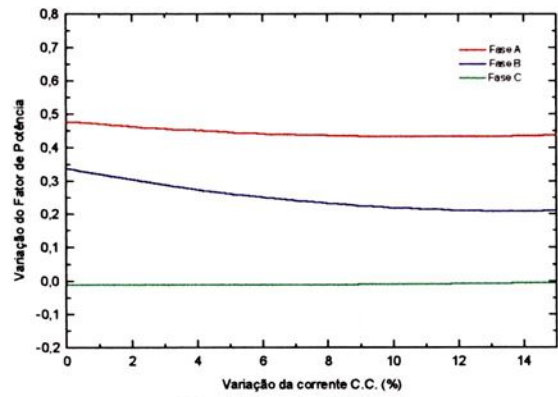
Figura 4.39. – Formas de onda das correntes de excitação com $I_{cc} = 15 \% I_0$ - ligação YN

4.5.3.4. - Potência reativa e fator de potência

Na figura 4.40 (a) e (b) podemos verificar o comportamento da potência reativa e do fator de potência. É possível observar através das figura que a demanda de potência reativa varia pouco com o variação da corrente contínua, e o fator de potência sofre uma pequena diminuição e depois permanece estável.



(a) – Potência Reativa



(b) – Fator de Potência

Figura 4.40. – Gráficos das potência e fator de potência em função da injeção de corrente contínua

CAPÍTULO V

SIMULAÇÃO DIGITAL

5.1 – Introdução

Neste capítulo iremos apresentar os resultados da simulação digital dos modelos matemáticos propostos no capítulo 3, os quais apresentam o comportamento do banco trifásico de transformadores e do transformador trifásico do tipo núcleo envolvido quando são submetidos a uma dupla excitação c.a./c.c.. A simulação digital foi feita com a finalidade de verificar a validade dos modelos propostos para obtenção das potências ativa, reativa e fator de potência.

5.2. – Procedimentos para Simulação Digital

Para a análise do comportamento da potência reativa sob magnetização assimétrica, adotamos neste trabalho, a aplicação de um nível de corrente contínua (c.c.), como uma função degrau, incorporado diretamente à corrente do enrolamento do primário com sinal contrário ao nível c.c. real; injetado no enrolamento do secundário.

Este procedimento foi adotado considerando-se que ao se aplicar um nível de corrente contínua no enrolamento secundário, este é refletido para o enrolamento



primário de acordo com a relação de transformação. Naturalmente, tal fato refere-se apenas aos instantes iniciais do processo transitório de magnetização assimétrica do núcleo. Durante a evolução do processo transitório, a corrente de excitação é alterada sistematicamente de forma a resultar em um valor médio nulo para a corrente total primária em regime permanente [1].

As simulações foram direcionadas no sentido de se obter, para as diferentes conexões dos enrolamentos do transformador, as formas de onda das correntes de excitação para níveis de injeção de corrente contínua variando de 0% (c.c. nula) até 15%, para desta forma podermos calcular a demanda de potência reativa do banco de transformadores e do transformador trifásico tipo núcleo envolvido.

Os parâmetros elétricos e dados construtivos, tanto do banco de transformadores monofásicos quanto dos transformadores trifásicos de núcleo envolvido, estão descritos no capítulo 3 deste trabalho, e foram obtidos a partir de ensaios experimentais em unidades de baixa potência utilizadas em laboratório. A partir dos ensaios em vazio, sem excitação c.c., obteve-se os dados para o cálculo das resistências associadas as perdas no núcleo bem como para o ajuste hiperbólico das características normais de magnetização.

O ajuste da função hiperbólica para a representação da não linearidade magnética foi feito através do método dos mínimos quadrados com o auxílio de ferramentas computacionais, e os resultados também foram apresentados no capítulo 3.

Os resultados que serão apresentados neste capítulo, foram obtidos a partir da simulação digital, no domínio do tempo, utilizando-se o software “MATLAB – SIMULINK – Versão 5.0”, instalado em um micro computador AMD K6II – 350 MHz.



5.3. – Resultados da simulação

5.3.1. – Banco de transformadores monofásicos

Aqui iremos apresentar alguns resultados, como feito no capítulo 4, da corrente de excitação do e das potências ativa, reativa, aparente e do fator de potência do banco de transformadores monofásicos para a condição normal de alimentação c.a. nas diferentes conexões dos enrolamentos.

5.3.1.1 – Conexão YY

A figura 5.1., mostra a corrente de magnetização nas fases A, B e C para um banco de transformadores trifásicos constituídos de três unidades monofásicas quando o mesmo é alimentado por um sistema trifásico simétrico e equilibrado sem excitação c.c..

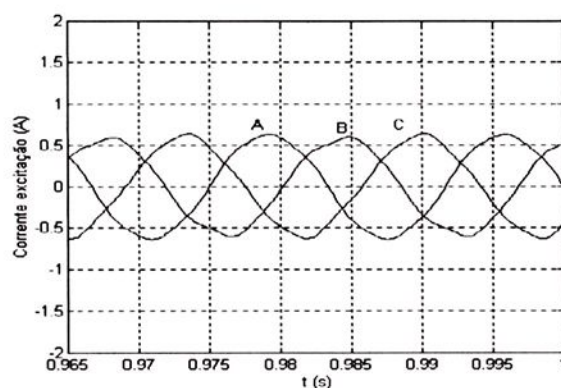


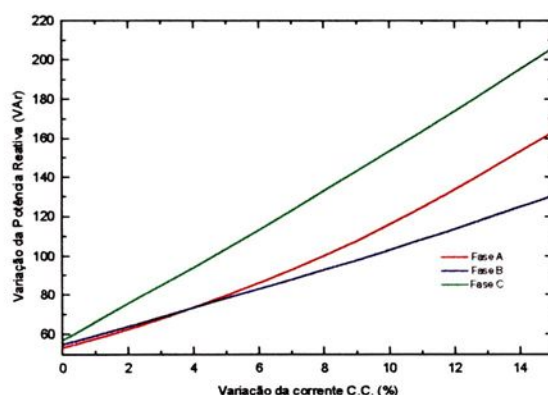
Figura 5.1. – Forma de onda das correntes de excitação em condições normais.

A componente de corrente contínua, foi injetada no banco de transformadores trifásico através de uma fonte de corrente contínua controlada ligada à fase C, sendo que nesta fez-se circular uma corrente contínua com amplitude de 100% I_{cc} .

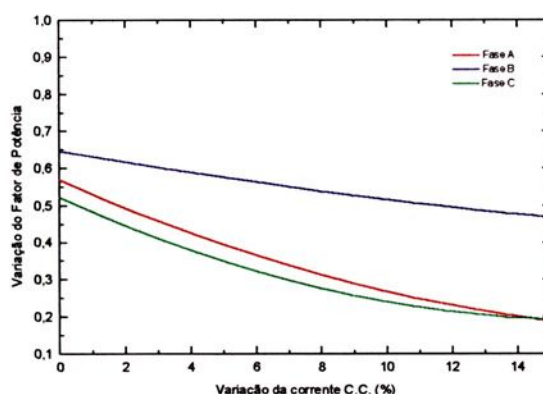
Na fase A, fez-se circular uma corrente de amplitude de 70% de I_{cc} e em sentido contrário ao da fase C. Já na fase B, fez-se circular uma corrente de amplitude 30% de I_{cc} também em sentido contrário ao da fase C.

Para se fazer a análise das variações das potências e do fator de potência, usamos quatro pontos de análise sendo um sem componente de corrente contínua (I_{cc}), e outros três pontos com I_{cc} variando em 5%, 10% e 15% da corrente nominal do transformador.

Na figura 5.2 (a) e (b), temos os gráficos de variação da potência reativa e do fator de potência para correntes de excitação com componentes c.c.



(a) - Potência Reativa



(b) - Fator de Potência

Figura 5.2. – Gráficos da potência e fator de potência em função da injeção de corrente contínua

5.3.1.2 – Conexão ΔY

A figura 5.3., mostra a corrente de magnetização nas fases A, B e C para um banco de transformadores trifásicos constituídos de três unidades monofásicas quando o mesmo é alimentado por um sistema trifásico simétrico e equilibrado sem excitação c.c..

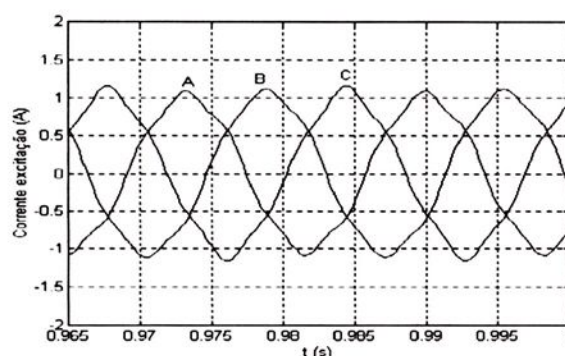
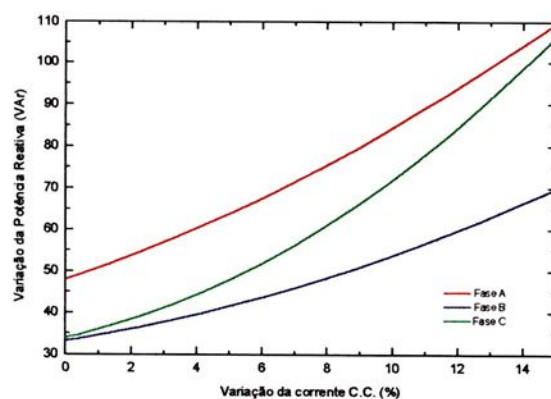


Figura 5.3. – Forma de onda das correntes de excitação em condições normais.

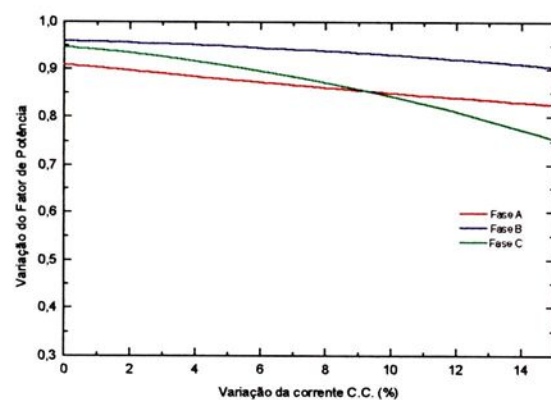
A distribuição da corrente contínua que foi injetada no banco de transformadores trifásico, e assim fez-se circular uma corrente contínua com amplitude de 100% I_{cc} , correspondendo à fase A, uma corrente de amplitude de -30% de I_{cc} , à fase B, uma corrente de amplitude -20% de I_{cc} , e à fase C uma corrente de amplitude de -50% de I_{cc} .

Para se fazer a análise das variações das potências e do fator de potência, usamos quatro pontos de análise sendo um sem componente de corrente contínua, e outros três pontos com I_{cc} variando em 5%, 10% e 15% da corrente nominal do transformador.

Na figura 5.4. temos os gráficos de variação da potência reativa além do fator de potência em função da variação injeção c.c.



(a) – Potência Reativa



(b) - Fator de Potência

Figura 5.4. – Gráficos da potência e fator de potência em função da injeção de corrente contínua

5.3.1.3 – Conexão YY

A figura 5.5., mostra a corrente de magnetização nas fases A, B e C para um banco de transformadores trifásicos constituídos de três unidades monofásicas quando o mesmo é alimentado por um sistema trifásico simétrico e equilibrado sem excitação c.c..

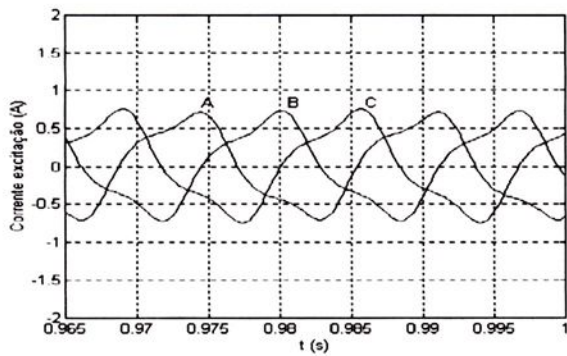
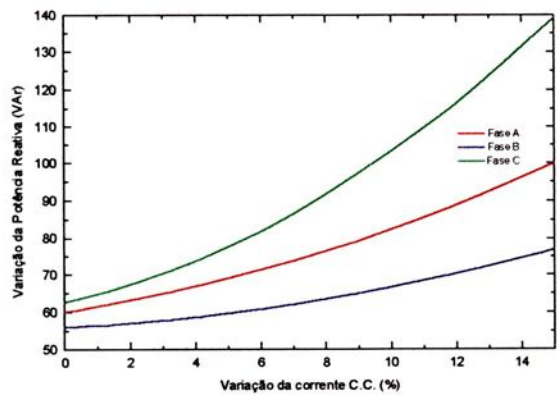
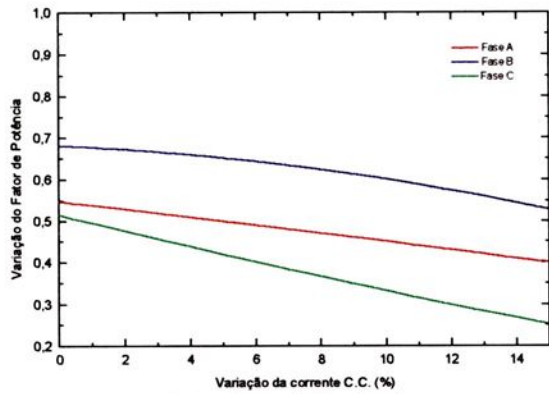


Figura 5.5. – Forma de onda das correntes de excitação em condições normais.

A distribuição da corrente contínua que foi injetada no banco de transformadores trifásico, e assim fez-se circular uma corrente contínua com amplitude de 100% I_{cc} , correspondendo à fase A, uma corrente de amplitude de -30% de I_{cc} , à fase B, uma corrente de amplitude -20% de I_{cc} , e à fase C uma corrente de amplitude de -50% de I_{cc} .



(a) – Potência Reativa



(b) – Fator de Potência

Figura 5.6. – Gráficos da potência e fator de potência em função da injeção de corrente contínua

Para se fazer a análise das variações das potências e do fator de potência, usamos quatro pontos de análise sendo um sem componente de corrente contínua (I_{cc}), e outros três pontos com I_{cc} variando em 5%, 10% e 15% da corrente nominal do transformador.

A figura 5.6. mostra os gráficos da variação da potência reativa e do fator de potência em função da variação c.c.

5.3.2. – Transformador trifásico

Para o transformador trifásico com núcleo envolvido, foi adotado os mesmos procedimentos utilizados no banco de transformadores monofásicos.

5.3.2.1 – Conexão YY

A figura 5.7., mostra a corrente de magnetização nas fases A, B e C para um banco de transformadores trifásicos constituídos de três unidades monofásicas quando o mesmo é alimentado por um sistema trifásico simétrico e equilibrado sem excitação c.c..



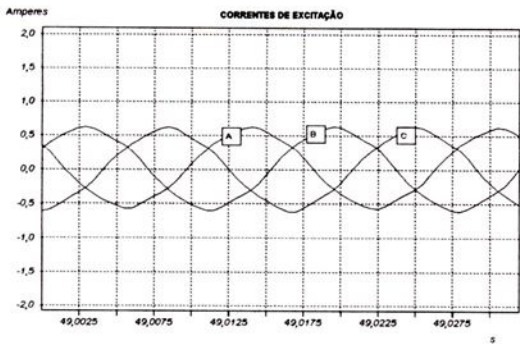
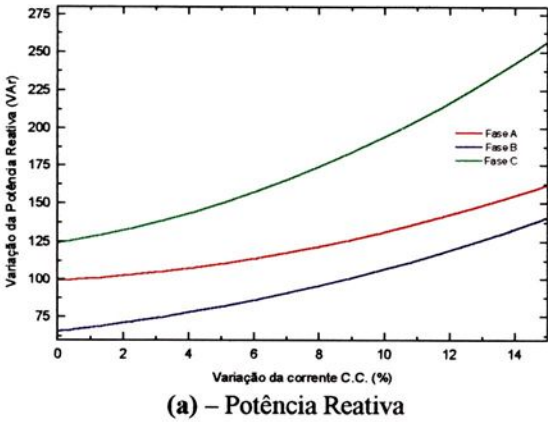
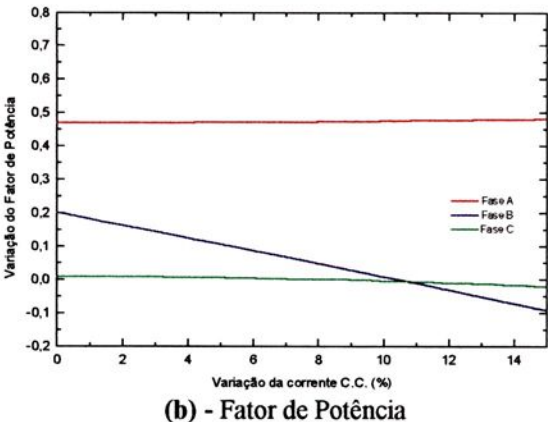


Figura 5.7. – Forma de onda das correntes de excitação em condições normais.

A figura 5.8. mostra os gráficos da variação da potência reativa e do fator de potência em função da variação c.c.



(a) – Potência Reativa



(b) - Fator de Potência

Figura 5.8. – Gráficos da potência e fator de potência em função da injeção de corrente contínua

A componente de corrente contínua, foi injetada no transformador trifásico através de uma fonte de corrente contínua controlada ligada à fase C, sendo que nesta fez-se circular uma corrente contínua com amplitude de 100% I_{cc} . Na fase A, fez-se circular uma corrente de amplitude de 70% de I_{cc} e em sentido contrário ao da fase C. Já na fase B, fez-se circular uma corrente de amplitude 30% de I_{cc} também em sentido contrário ao da fase C.

Para se fazer a análise das variações das potências e do fator de potência, usamos quatro pontos de análise sendo um sem componente de corrente contínua (I_{cc}), e outros três pontos com I_{cc} variando em 5%, 10% e 15% da corrente nominal do transformador.

5.3.2.2 – Conexão ΔY

A figura 5.9., mostra a corrente de magnetização nas fases A, B e C para um banco de transformadores trifásicos constituídos de três unidades monofásicas quando o mesmo é alimentado por um sistema trifásico simétrico e equilibrado sem excitação c.c..

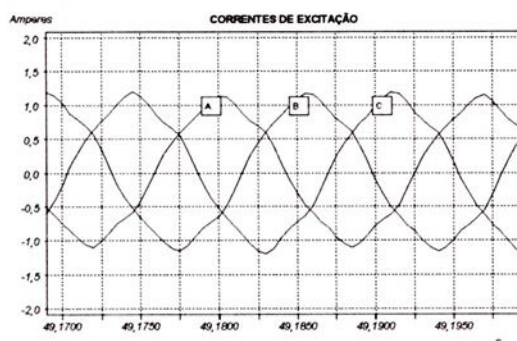


Figura 5.9. – Forma de onda das correntes de excitação em condições normais.

A distribuição da corrente contínua que foi injetada no transformador trifásico, e assim fez-se circular uma corrente contínua com amplitude de 100% I_{cc} , correspondendo à fase A, uma corrente de amplitude de -30% de I_{cc} , à fase B, uma corrente de amplitude -20% de I_{cc} , e à fase C uma corrente de amplitude de -50% de I_{cc} .

Para se fazer a análise das variações das potências e do fator de potência, usamos quatro pontos de análise sendo um sem componente de corrente contínua (I_{cc}), e outros três pontos com I_{cc} variando em 5%, 10% e 15% da corrente nominal do transformador.

A figura 5.10. mostra os gráficos da variação da potência reativa e do fator de potência em função da variação c.c.

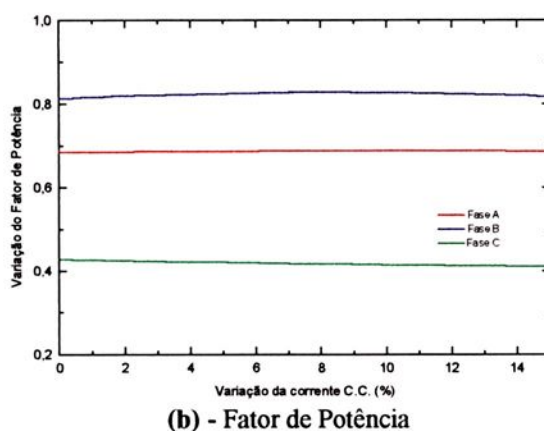
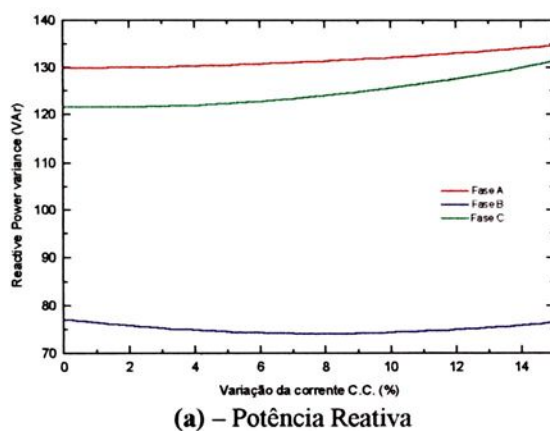


Figura 5.10. – Gráficos da potência e fator de potência em função da injeção de corrente contínua

5.3.2.3 – Conexão $\Upsilon\Upsilon$

A figura 5.11., mostra a corrente de magnetização nas fases A, B e C para um banco de transformadores trifásicos constituídos de três unidades monofásicas quando o mesmo é alimentado por um sistema trifásico simétrico e equilibrado sem excitação c.c..

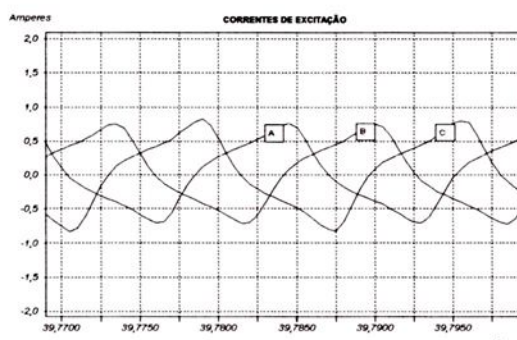
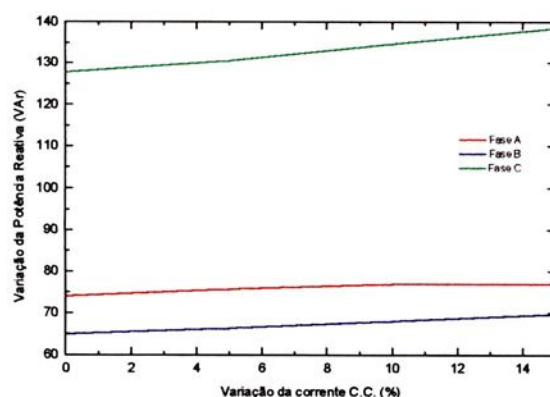


Figura 5.11. – Forma de onda das correntes de excitação em condições normais.

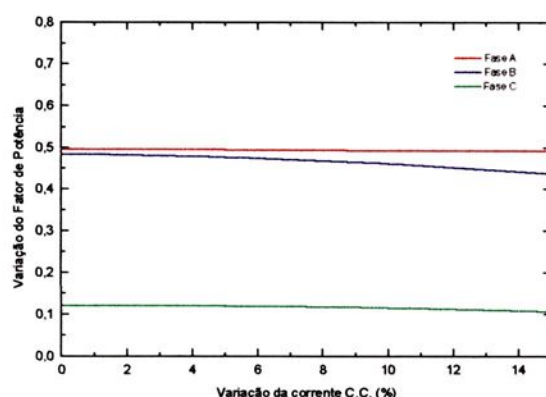
A distribuição da corrente contínua que foi injetada no banco de transformadores trifásico, e assim fez-se circular uma corrente contínua com amplitude de 100% I_{cc} , correspondendo à fase A, uma corrente de amplitude de -30% de I_{cc} , à fase B, uma corrente de amplitude -20% de I_{cc} , e à fase C uma corrente de amplitude de -50% de I_{cc} .

Para se fazer a análise das variações das potências e do fator de potência, usamos quatro pontos de análise sendo um sem componente de corrente contínua (I_{cc}), e outros três pontos com I_{cc} variando em 5%, 10% e 15% da corrente nominal do transformador.

A figura 5.11. mostra os gráficos da variação da potência reativa e do fator de potência em função da variação c.c.



(a) - Potência Reativa



(b) - Fator de Potência

Figura 5.12. – Gráficos da potência e fator de potência em função da injeção de corrente contínua

5.4. - Conclusões

A compatibilidade entre os resultados obtidos experimentalmente e pela simulação digital, tanto para o banco de transformadores monofásicos quanto para o transformador trifásico de núcleo envolvido, pode ser considerada satisfatória, sobretudo porque, para este tipo de análise há de se considerar a influência de vários fatores na obtenção dos dados experimentais que não são previstos no modelo matemático. Dentre estes fatores, podemos destacar o fato de que a corrente contínua injetada nos enrolamentos dos transformadores é suprida por uma fonte eletrônica. Esta fonte introduz um conteúdo harmônico característico do seu próprio sistema de retificação, interferindo nas medições

da corrente de excitação, que iremos usar para o cálculo da potência reativa do transformador.

Não podemos esquecer também dos pequenos desequilíbrios existentes entre os transformadores utilizados como teste e auxiliar, o que praticamente impossibilita anular completamente as correntes senoidais induzidas no secundário do transformador teste, resultando assim em uma flutuação no valor das correntes contínuas injetadas.

Por fim, outro fator que influenciou nos resultados simulados foi a obtenção dos parâmetros do circuito equivalente dos transformadores. Os parâmetros utilizados na simulação digital foram obtidos pelos métodos tradicionais recomendados pelas normas nacionais.



CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES GERAIS

A proposta deste trabalho foi a de estudar a influência da dupla excitação c.a./c.c. na demanda de potência reativa em transformadores trifásicos do tipo banco de transformadores monofásicos e transformadores trifásicos de núcleo envolvido.

Para a análise da proposta acima, fizemos inicialmente uma breve explicação do fontes causadoras da injeção de componentes contínuas em sistemas de corrente alternada, que podem provocar o fenômeno da magnetização assimétrica dos transformadores, bem como uma análise dos fundamentos físicos que cercam estes fenômenos.

A partir daí, passamos ao desenvolvimento de uma modelagem matemática com a finalidade de analisar analiticamente o fenômeno da dupla excitação. Outro objetivo desta modelagem matemática foi dar subsídios para o desenvolvimento experimental em laboratório, tanto real quanto computadorizado, para uma posterior comparação dos resultados obtidos e a validação dos modelos simulados em computador.

Os estudos experimentais foram realizados com transformadores de laboratório, sempre de baixa potência, porém que nos possibilitam analisar de uma maneira correta o comportamento dos transformadores de potência.

A simulação digital, como dito anteriormente, teve por objetivo, a validação de modelos propostos dos transformadores de potência, que podem ser simulados independente de sua potência nominal de transformação, possibilitando assim,



um estudo amplo dos equipamentos instalados nos sistemas de potência e, desta forma, determinarmos se estes componentes do sistema estão sob o efeito da dupla excitação e ainda uma provável causa deste fenômeno.

Desta forma, apresentamos a seguir uma síntese das principais conclusões extraídas das investigações e resultados obtidos.

➤ Em se tratando das fontes de corrente contínua (c.c.) que podem provocar o fenômeno da magnetização assimétrica, constatou-se que os níveis que podem ser injetados são variáveis e de difícil previsão de ocorrências, visto que em sua maioria, são provenientes de mal funcionamento de equipamentos constituídos de dispositivos a estado sólido e pertencentes aos sistemas elétricos de potência.

➤ Já com relação aos aspectos físicos ligados a dupla excitação c.a./c.c. nos transformadores de potência, abordamos o comportamento da corrente de excitação e os efeitos provenientes da saturação assimétrica do núcleo magnético. Sob a condição duplamente excitada, pode ser verificado que o transformador passa a ter uma demanda de potência reativa maior do que em condições normais.

➤ Estudou-se o comportamento transitório das correntes magnetizantes tanto para o banco de transformadores monofásicos quanto para o transformador trifásico de núcleo envolvido, sob o efeito da dupla excitação c.a./c.c., enfocando o problema sob o ponto de vista físico.

➤ Foram realizados vários ensaios experimentais tanto para o banco de transformadores monofásicos quanto para o transformador trifásico de núcleo



envolvido, sob magnetização assimétrica, injetando-se correntes c.c. de até 15% da corrente nominal, para as diferentes conexões dos enrolamentos. Dos resultados obtidos, constatou-se que no transformador trifásico com núcleo de três colunas, quando submetido a uma injeção equilibrada de corrente contínua nas três fases, o mesmo mostrou-se imune ao fenômeno da magnetização assimétrica pois, nesta situação, as componentes contínuas das correntes secundárias produzem fluxos com amplitudes e direções iguais, e o transformador não sofre a influência da saturação assimétrica, logo, as correntes de excitação não possuem valor médio e seu conteúdo harmônico fica inalterado não provocando alterações na demanda de potência reativa.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] ROSSI, J. C. – “Saturação assimétrica em Transformadores Trifásicos”. Tese de Doutorado, UNICAMP, Campinas – SP, Dezembro de 1996.
- [02] ROSSI, J. C. – “Dupla Excitação ca/cc em Transformadores Trifásicos Geração de Harmônicas e Perdas de Vida Útil”. Estudos Especiais II., UNICAMP, 1993.
- [03] DOMIJAN, A.; HEYDT, G.T.; MELIOPOULOS, A.P.S. – “Directions of Research on Electric Power Quality”. In: IEEE – PES WINTER MEETING, January, 1992, pp. 1-7.
- [04] OLIVEIRA, J.C.; DE OLIVEIRA, L.C.O.; MISKULIN, M.S. – “Physical Considerations and Molling of the ac/dc Double Excitations in Power Transformers”. In: FOURTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON HARMONICS IN POWER SYSTEMS, Budapest, Hungary, October, 1990.
- [05] DE OLIVEIRA, L.C.O; OLIVEIRA, J.C. – “Análise transitória e em regime permanente de transformadores sob excitações simultâneas ca e cc”. In: X SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (X SNPTEE), Curitiba, Outubro, 1989.
- [06] LU, S.; LIU, Y. – "Fem Analysis of dc Saturation to Assess Transformer Susceptibility to Geomagnetically Induced Currents". IEEE TRANSACTION ON POWER DELIVERY, Vol.8, No. 3, July 1993, pp.1367-1374.
- [07] KIMBARC, E.W. – “ Direct Current Transmission”. Book, Wiley – Intersciense, Vol. 1, New york, 1971.
- [08] DEWAN, S.B. – “Power Semiconductor Circuits”. Book, Wiley – Intersciense, New york, 1982.



- [09] OLIVEIRA, L. C. O. – “Transformadores de Potência Sob Dupla Excitação c.a./c.c.”. Tese de Doutorado, UNICAMP, Campinas – SP, Julho 1990.
- [10] ALBERTON, V.D. – “Solar Induced current in Power Systems: Cause and Effects”. IEEE-PES, Summer Meeting, San Francisco, California, July, 1972.
- [11] PIRJOLA, R. – “On Current Induced in Power Transmission Systems During Geomagnetic Variations”. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol PAS-104, nº 10, October 1985.
- [12] ALBERTON, V.D.; BAELEN, J.A.V. – “Electric and Magnetic Fields at The Earth's Surface Due Auroral Currents”. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol PAS-89, nº 4, April, 1970.
- [13] DISEKO, N.L.; BICKFORD, J.P. – “A Method of Simulating Linear and Nonlinear Ressonant Phenomena Associated with Transformer Feeders”. IEEE Proceedings, Vol. 127, Pt. C, nº 3, May, 1980.
- [14] MACFADYEN, W.K.; SIMPSON, R.R.S.; SLATER, R.D. and WOOD, W.S. – “Method of Predicting Transiente Current Patterns in Transformers”. IEEE Proceedings, Vol. 120, nº 11, November, 1973.
- [15] YACAMINI, R.; BRONZEADO, H. – “Transformer Inrush Calculations Using a Coupled Eletromagnetic Model”. IEEE Proceedings SCI. – MEAS. TECHNOLOGY, Vol. 141, nº 6, November 1994, pp. 491-498.
- [16] ROSSI, J.C.; OLIVEIRA, L.C.O.; FERREIRA, M.A.S. – “The Influence of Double Excitation ac/dc in the Reactive Power Demand of 3-Phase Transformers”, IEEE Circuits and Systems Society, 42nd Midwest Symposium on Circuits and Systems Proceedings, Vol. 2 of 2, August 8-11, 1999, pp 727-730.

APÊNDICE A

Neste apêndice, consta o trabalho apresentado no 42nd Midwest Symposium on Circuits and Systems, entre os dias 8 e 11 de agosto de 1999, na cidade de Las Cruces estado do Novo México nos EUA. Este congresso foi promovido pelo IEEE Circuits and Systems Society.



THE INFLUENCE OF DOUBLE EXCITATION AC/DC IN THE REACTIVE POWER DEMAND OF 3-PHASE TRANSFORMERS

José Carlos Rossi
FEIS - DEE - UNESP
Ilha Solteira - SP

Luis Carlos Origa de Oliveira
FEIS - DEE - UNESP
Ilha Solteira - SP

Marco A.S. Ferreira
FEIS - DEE - UNESP
Ilha Solteira - SP

ABSTRACT

In this work it is discussed the performance of the reactive power demand in three-leg transformer core and three-phase transformer bank, under different conditions of AC/DC double excitation. In order to analyze the influence of double excitation in reactive power theoretically a mathematical model was developed considering the mutual coupling between phases and the magnetic nonlinearity. The validity of the proposed model is verified by means of the experimental and simulated results.

I. INTRODUCTION

The asymmetrical saturation is a characteristic of operation of the power transformers when their windings are simultaneously crossed by alternate and direct currents.

The presence of direct components is normally associated to the functioning of some types of electrical loads or to external nature phenomena.

Among the electrical loads that can lead a transformer to the AC/DC saturation state, it can be pointed out the compensators and the static convertors with unbalance of the thyristors ignition. These operative conditions can generate levels of direct current of order of 3% to 4% of the transformer rated currents [2].

The direct components due to external nature phenomena are mainly resulted from ground-returns in DC transmission systems and from geomagnetic induction. In both cases the DC currents get into the electrical systems through the connection of the transformers grounds and can assume, in some cases, high proportions.

In this work it is presented a mathematical modeling for simulation and experimental analysis to verify the behaviour of the reactive power demand in the three-phase core type transformers and three-phase transformer bank, with out load, when submitted to an AC/DC double excitation.

II. MATHEMATICAL MODELS

The 3-phase transformers unities are usually presented in two basic configurations: transformer bank and core type transformer.

Due to its constructive nature, the transformers bank present to the a, b and c phases a total magnetic independence. The same do not occur to the others.

In the presence of double AC/DC excitation, the strong interaction among the magnetic fluxes makes the core type transformer to have a substantially different behavior from that of the transformers bank.

A. Magnetization Characteristics

In this work, like in the previous ones [01], [02] an approximation using hyperbolic function was adopted to represent the normal magnetization characteristic. This function can be represented by:

$$H = \alpha \sinh(\beta B) \quad (1)$$

where: H - magnetizing force; B - magnetic-flux density;

The constants α and β are determined by adjusting the eq. (1) to experimental data obtained on the no-load test.

B. Transformers bank

Considering that there is an independence between the magnetic circuits of each unity of the transformers bank it can be written to the single-phase unity connected to the j phase:

$$v_j = r_j i_j + L_j p i_j + N_j p \phi_j, \quad i_j = A_j \sinh(B_j \phi_j) \quad (2)$$

where: $A_j = \alpha_j \ell_j / N_j$; $B_j = \beta_j / S_j$; $p = d/dt$;

V_j - instantaneous voltage	N_j - number of turns;
i_j - instantaneous current;	ϕ_j - magnetic flux;
L_j - leaked inductance	H_j - magnetizing force
r_j - resistance of coil;	S_j - area of core
ℓ_j - magnetic length;	α_j, β_j - constants

The 3-phase composition depends on the way how they are connected from the primary winding of the single-phase unities.

Taking (1) and (2), and considering the usual winding connection of the primary, one may have:

$$V = R \cdot Sh(\Phi) + [K_1 + L \cdot Ch(\Phi)] \cdot \dot{\Phi} + K_2 \cdot \ddot{\Phi} \quad (3)$$

where: $\dot{\Phi} = [p\phi_j]_{j=1,2,3}$; $\ddot{\Phi} = [p^2\phi_j]_{j=1,2,3}$;
 $L = \text{diag}[L_j]_{j=a,b,c}$; $R = \text{diag}[r_j]_{j=a,b,c}$;
 $\text{Sh}(\Phi) = [A_j \sinh(B_j \phi_j)]_{j=1,2,3}$;
 $T_1 = [1 \ 1 \ 1]$;
 $\text{Ch}(\Phi) = \text{diag}[A_j B_j \cosh(B_j \phi_j)]_{j=1,2,3}$;
 $K_1 = \text{diag}[N_j(1 + r_j / R_{pj})]_{j=a,b,c}$;
 $K_2 = \text{diag}[N_j L_j / R_{pj}]_{j=a,b,c}$;
 V - instantaneous voltages on single-phases unities.

The vector of V voltages depends of the primary winding connections. In the wye with grounded neutral and delta connections, the vector is given by the phase and line voltages respectively. In the case of wye with isolated neutral the V vector is obtained from the neutral voltage given by;

$$V_n = T_3 [V - R \cdot \text{Sh}(\Phi) + K_1 \cdot \dot{\Phi} + L \cdot \text{Ch}(\Phi) \cdot \dot{\Phi} + K_2 \cdot \ddot{\Phi}] \quad (4)$$

where: $T_3 = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$

C). Core type transformer

The core type transformer has magnetic paths that connect its phases and has a magnetically complex behavior. The flux in any phase does not depend only on the net magnetomotive force of one phase but also on the net magnetomotive force of all phases.

As, generally, the saturation levels of each core magnetic region are different, it is common to consider the core divided in sections in which a density of approximately uniform flux is assumed [3], as it is presented in Fig. 1.

With the purpose of establishing a mathematical formulation for studying its behavior under AC/DC double excitation, the methodology proposed in [02], [03] was adopted.

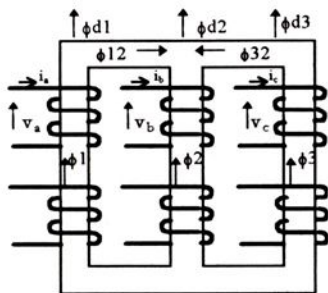


Fig. 1 - Paths and directions of the magnetic fluxes.

The electric circuit equation of the primary coil connected to the phase j is given by:

$$v_j = r_j i_j + L_j p i_j + N_j p \phi_i \quad (5)$$

where: ϕ_i -magnetic flux in limb i

Applying the laws of the magnetic circuits $\sum \phi = 0$ and $Ni = \oint H dl$ to the setting of Fig. 1, one have:

$$\phi_2 = \phi_{d2} - \phi_{12} - \phi_{32}; \quad \phi_1 = \phi_{d1} + \phi_{12}; \quad \phi_3 = \phi_{d3} + \phi_{32} \quad (6)$$

$$i_{d1} = i_a + i_1; \quad i_{d2} = i_b + i_2; \quad i_{d3} = i_c + i_3; \quad (7)$$

$$i_{12} = i_{d1} - i_{d2} \quad i_{32} = i_{d3} - i_{d2}$$

where: ϕ_{ik} - magnetic flux associated with the yoke ik ;

ϕ_{di} - magnetic flux associated with phase-leaked path i ;

i_j, i_{di}, i_1, i_{ik} - referring currents to the primary.

Using the analytic representation presented in (1), it is still possible to establish the following equations:

$$i_i = A_i \sinh(B_i \phi_i), \quad i_{ik} = A_{ik} \sinh(B_{ik} \phi_{ik}) \quad (8)$$

To the magnetic path which gets the air influence a constant permeability was given. Based on this, the relation between the leaked fluxes and the current are given by:

$$i_{di} = A_{di} \phi_{di} \quad (9)$$

A_{di} - constant associated to the phase-leaked path i .

From the expression (5) to (9), it is obtained the generic expression in matrix notation (10) to the different connections of the transformer windings.

$$V = R \text{Sh}(\Phi) + R \Phi_d + [K_1 + L \text{Ch}(\Phi)] \dot{\Phi} + K_2 \ddot{\Phi} + K_3 L \dot{\Phi}_d \quad (10)$$

$$\Phi = \Phi_d + T \text{Sh}^{-1}(\Delta \Phi_d) \quad (11)$$

where: $\Phi_d = [\phi_{di}]_{i=1,2,3}$; $\dot{\Phi}_d = [p\phi_{di}]_{i=1,2,3}$;

$$\text{Sh}^{-1}(\Delta \Phi_d) = \begin{bmatrix} \sinh^{-1}[(A_1 \phi_{d1} - A_2 \phi_{d2})/A_{12}]/B_{12} \\ \sinh^{-1}[(A_3 \phi_{d3} - A_2 \phi_{d2})/A_{32}]/B_{32} \end{bmatrix}$$

$$T_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & -1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad K_3 = \text{diag}[A_{di}]_{i=1,2,3}$$

The results for the different connections are obtained as previously described. Particularly, for the wye connection with isolated neutral case, the V_n voltage is calculated by:

$$V_n = T_3 \left[V - RSh(\Phi_S + R\Phi_d + K_1\dot{\Phi} + LCh(\Phi\dot{\Phi} + K_2\ddot{\Phi} + K_3L\dot{\Phi}_d) \right] \quad (12)$$

The reactive power is calculated based on the expression:

$$Q = \sum_{j=1}^3 V_j I_j \sin \phi_j$$

III. DIGITAL SIMULATION

In order to investigate the behavior of the reactive power in qualitative terms, it was considered transformers bank and core type transformers to different connections of the primary winding, keeping the secondary winding in a wye connection with grounded neutral.

The physical and electrical parameters used in digital simulation were obtained from unit transformers of 1.0 kVA/ 220V/60Hz. The 3-phase transformer core is of 3 kVA/220 V/60 Hz.

The magnetization characteristics as well as the respective hyperbolic adjustments are shown in Fig. 2

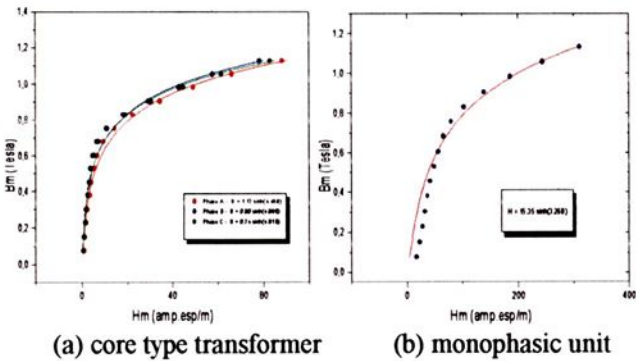


Fig. 2 - Normal characteristics (Tesla x amps/meter)

The results were obtained from digital simulation in the time domain, using the MatLab Simulink 4.2.

IV. EXPERIMENTAL ANALYSES

In order to predict the reactive power, it was utilized two different connections, a Wye-Wye with isolated neutral and a Delta-Wye with grounded neutral. The injected DC level was varied since 0 to 15% of the rated current.

The experimental results were obtained by a data acquisition system interfaced with a personal computer for the data processing , storage and waveform reproduction.

The Figure 3 shows the experimental layout utilized and the distribution of DC excitation.

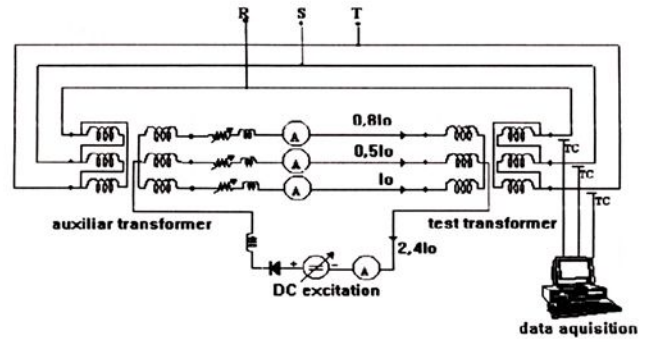


Fig 3. Experimental Circuit

V. EXPERIMENTAL AND SIMULATED RESULTS

The Figure 4 shows the experimental behavior of the excitation current (no load) in one 3-phase transformer bank when it is submitted to a double excitation. It can be verified the waveform distortion in all phases.

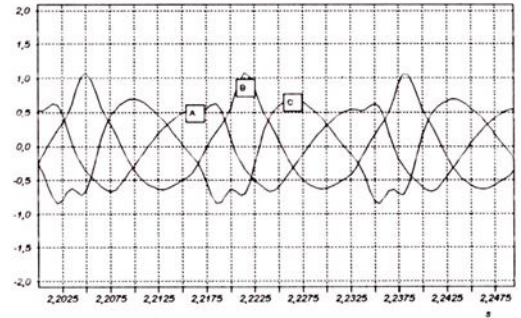


Fig.4 - Exciting current performance for ΔY grounded connection under double excitation

The Figures 5 and 6 show the performance of the reactive power for Delta-Wye grounded and Wye-Wye isolated connections as a function of the difference of DC bias current at the transformer bank.

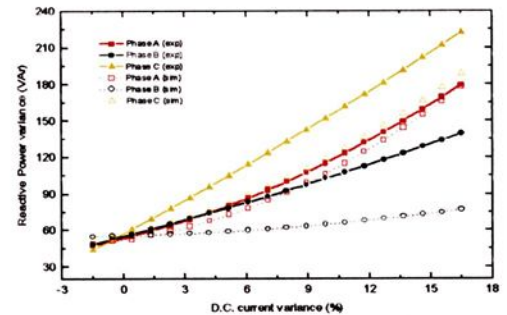


Fig 5 – Reactive power at function of the variation DC level for YY conection 3-phase transformer bank.

It can be verified a increasing in the reative power when different DC exciting level is injected.

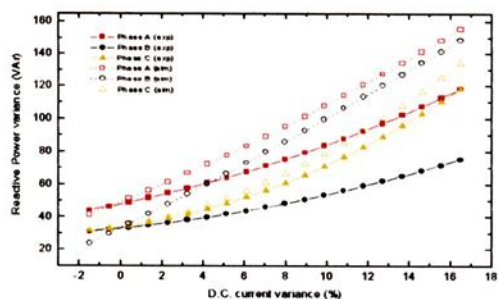


Fig 6 - Reactive power at function of the variation DC level for ΔY connection 3-phase transformer bank

Figures 7 and 8 show the simulated and experimental results of the power factor behavior, when different DC excitation level is injected.

It can be verified a diminution in the power factor when DC excitation level is increased.

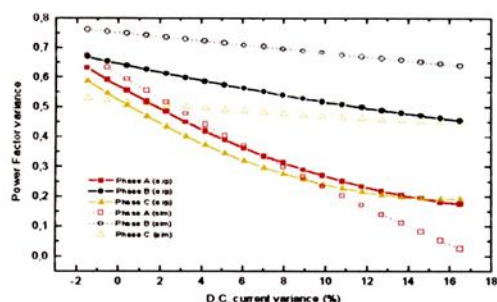


Fig 7 - Power factor for YY - 3-phase transformer bank.

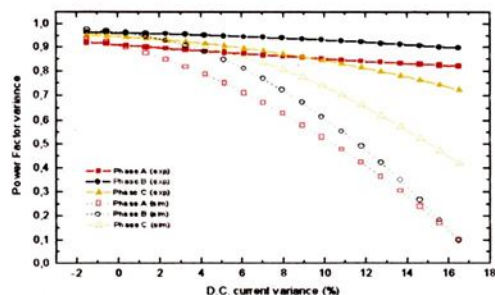


Fig 8 - Power factor for ΔY - 3-phase transformer bank

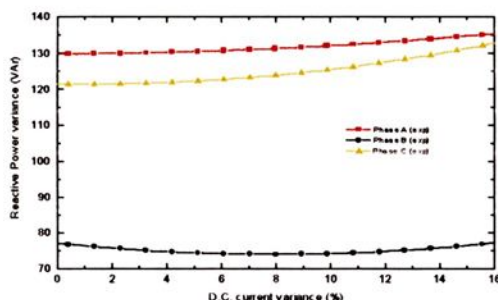


Fig 9 - Reactive power as a function of the variation DC level for ΔY connection 3-phase transformer core.

The figures 9 and 10 show the experimental analyses of the reactive power and power factor performances for Delta-

Wye grounded at function of difference of DC bias current at the transformer core type.

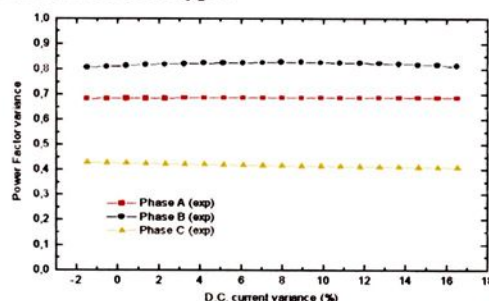


Fig 10 - Power factor for ΔY - 3-phase transformer core

VI. CONCLUSION

In this work it was analyzed the performance of reactive power demand in three-leg transformer core and the phase transformer bank when submitted to a double excitation AC/DC, through digital simulation and experimental analysis.

The mathematical model proposed considers magnetic nonlinearity and essentially the interdependence of the magnetic fluxes.

The representation of the magnetic nonlinearity through a hyperbolic function is good enough for studies of this nature, avoiding the emergence of peculiar points allied to linear representation by parts.

From the analysis of the experimental and simulated results, it was possible to identify a linear increasing on reactive power due to the DC excitation variation.

It was verified a good correlation among experimental and simulated results. The biggest errors watched among the results was 16% for injections above 10% of the rated current.

VII. REFERENCES

- [1] Rossi J.C.; de Oliveira, L.C.O.; Pires F.A. "Asymmetrical Magnetization in the Three-Phase Core Type Transformers", In: 38th Midwest Symposium on Circuits and Systems, IEEE, pp. 1081 -1084, Rio de Janeiro, august/1995.
- [2] Rossi J.C.; de Oliveira, L.C.O.; Pires F.A. "Symmetrical Components Analysis of Harmonic Excitation Currents in Transformers Under Saturation", In: International Conference on Harmonics and Quality of Power, IEEE-ICHQP, pp. 406-411, Las Vegas USA, october/1996.
- [3] Diseko, N.L.; Bickford, J.P. - A Method of Simulating Linear and Nonlinear Resonant Phenomena Associated With Transformer Feeders. IEE Proceedings, Vol. 127, Pt. C, No. 3, May 1980.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

Câmpus de Ilha Solteira
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Av. Brasil Centro, 56
15385-000 Ilha Solteira - SP
www.dee.feis.unesp.br

