

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação
Departamento de Sistemas e Controle de Energia - DSCE

Este exemplar corresponde à redação final da tese
defendida por Jose' Carlos Rossi
e aprovada pela Comissão
Julgadora em 20 / 12 / 96.
FCPires
CO-Orientador

SATURAÇÃO ASSIMÉTRICA EM TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

JOSÉ CARLOS ROSSI

ORIENTADOR : Prof. Dr. Luís Carlos Origa de Oliveira

CO-ORIENTADORA : Profa. Dra. Francisca Aparecida de Camargo Pires

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas como requisito parcial para a obtenção do título de **Doutor em Engenharia Elétrica**.

Campinas, Dezembro de 1996

9705420

F/UNICAMP
 R735s
 V. _____ E. _____
 TEMPO BC/ 30278
 PROC. 281197
 C D
 PREÇO R\$ 11,00
 DATA 21/05/97
 N° CPD _____

CM-00099470-5

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
 BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

R735s Rossi, José Carlos
 Saturação assimétrica em transformadores trifásicos /
 José Carlos Rossi.--Campinas, SP: [s.n.], 1996.

Orientadores: Luís Carlos Origa de Oliveira, Francisca
 Aparecida de Camargo Pires.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas,
 Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Transformadores elétricos. 2. Núcleos magnéticos.
 3. Materiais ferromagnéticos. I. Oliveira, Luís Carlos
 Origa de. II. Pires, Francisca Aparecida de Camargo.
 III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
 Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

À minha esposa Vera Cristina, aos meus filhos Carlos Henrique e André Luís pelo carinho e compreensão durante esta etapa da minha vida.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Estadual de Campinas

À Universidade Estadual Paulista - Unesp

Ao Prof. Dr. Luís Carlos Origa de Oliveira, meu amigo, pela orientação técnica, colaboração e compreensão durante a realização deste trabalho, o qual externo a mais profunda gratidão.

À Prof.a. Dra. Francisca Aparecida de Camargo Pires, pela amizade, pela contribuição técnica, atenção e preocupação em todos os momentos da realização deste trabalho, minha eterna gratidão.

Aos meus pais José Rossi e Carmen, aos meus irmãos Luíz Antônio, Silene e Magali, minha gratidão pelo incentivo e estímulo.

Ao Prof. Milton Léo, Prof. da Escola de Engenharia de Lins, meu cunhado, pelo incentivo, apoio e um dos responsáveis por esta etapa da minha vida, muito obrigado.

Aos professores e técnicos do Departamento de Engenharia Elétrica de Ilha Solteira.

À outros que involuntariamente foram esquecidos.

RESUMO

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.

Este trabalho tem como objetivo apresentar estudos sobre o comportamento da corrente de excitação de transformadores trifásicos do tipo banco de monofásicos e do tipo trifásico de núcleo envolvido, quando submetidos a uma dupla excitação c.a. / c.c. simultaneamente.

Inicialmente são apresentados aspectos relacionados ao fenômeno da magnetização assimétrica, analisando o comportamento das correntes de excitação e seus efeitos. Em seguida são desenvolvidos estudos sobre o comportamento em regime permanente e transitório dos transformadores de potência.

A estrutura seguida por este trabalho apresenta modelagens matemáticas para análises do comportamento dos transformadores trifásicos. Nesta modelagem, é utilizada uma função contínua para representar a não linearidade magnética do núcleo dos transformadores. São realizadas simulações em computador digital, possibilitando análises sobre o comportamento das correntes de excitação, seus conteúdos harmônicos, bem como a distribuição seqüencial das componentes harmônicas.

Um extenso estudo experimental foi desenvolvido utilizando-se um sistema digital de aquisição de dados. Os resultados teóricos provenientes da simulação são comparados com os obtidos experimentalmente onde comprova-se a validade dos modelos estabelecidos.

Neste trabalho, todo o desenvolvimento é direcionado, principalmente, no comportamento da corrente de excitação do transformador quando o mesmo opera a vazio.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1	- INTRODUÇÃO	01
CAPÍTULO 2	- FONTES CC E O FENÔMENO DA DUPLA EXCITAÇÃO C.A / C.C	
	- 2.1 - Objetivo	06
	- 2.2 - Fontes de Correntes Contínuas nos Sistemas de Potência.....	06
	2.2.1 - Induções Geomagnéticas.....	06
	2.2.2 - Retorno por Terra nos Sistemas de Transmissão c.c07
	2.2.3 - Conversores e Compensadores Estáticos Controlados por Tiristores	07
	- 2.3 - Magnetização Assimétrica dos Transformadores.....	08
	2.3.1 - Análise do Fenômeno da Magnetização Assimétrica	08
	2.3.2 - Efeitos da Magnetização Assimétrica	12
	2.3.3 - Perdas no Núcleo	14
	2.3.4 - Perdas no Cobre	15
	2.3.5 - Aquecimentos Localizados	16
	2.3.6 - Fluxo de Reativos	17
	2.3.7 - Distorção Harmônica	18
	2.3.8 - Sistema de Proteção	19
	- 2.4 - Efeitos da Variação da Alimentação c.a	20
CAPÍTULO 3	- ESTUDOS EXPERIMENTAIS	
	- 3.1 - Introdução	21

- 3.2 - Procedimentos Experimentais	21
- 3.3 - Banco Trifásico de Transformadores Constituído de Monofásicos..	22
3.3.1 - Características Físicas de cada Unidade Monofásica	22
3.3.2 - Resultados Experimentais e Análises	22
3.3.3 - Análise Comparativa dos Resultados	34
- 3.4 - Transformador Trifásico com Núcleo Envolvido.....	35
3.4.1 - Características Físicas do Transformador	35
3.4.2 - Resultados Experimentais e Análises	36
3.4.3 - Análise Comparativa dos Resultados	55
- 3.5 - Conclusões	56

CAPÍTULO 4

- MODELAGEM MATEMÁTICA

- 4.1 - Objetivo	58
- 4.2 - Introdução	58
- 4.3 - Característica de Magnetização	59
- 4.4 - Modelagem Matemática	60
4.4.1 - Banco Trifásico Constituído de Monofásicos	60
4.4.2 - Trifásico com Núcleo de Três Colunas	64
- 4.5 - Conclusão	70

CAPÍTULO 5	- SIMULAÇÃO DIGITAL	
	- 5.1 - Objetivo	72
	- 5.2 - Introdução	72
	- 5.3 - Procedimentos para a Simulação Digital	72
	- 5.4 - Resultados da Simulação para o Banco Trifásico	76
	- 5.5 - Resultados da Simulação para o Transformador Trifásico	82
	- 5.6 - Comparação entre os Resultados Experimentais e Simulados	86
	5.6.1 - Banco Trifásico de Transformadores	87
	5.6.2 - Transformador Trifásico de Núcleo Envolvido	87
	- 5.7 - Conclusões.....	88
CAPÍTULO 6	- ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DOS TRANSFORMADORES COMO FONTE HARMÔNICA QUANDO DUPLAMENTE EXCITADOS	
	- 6.1 - Objetivo	91
	- 6.2 - Introdução	91
	- 6.3 - Análise dos Resultados	92
	6.3.1 - Caso 1	92
	6.3.2 - Caso 2	95
	6.3.3 - Caso 3	96
	6.3.4 - Caso 4	98

- 6.4 - Conclusão	99
CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES GERAIS E SUGESTÕES.....	111
APÊNDICE A	115
APÊNDICE B	117
APÊNDICE C	121
APÊNDICE D	127
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	128

SIMBOLOGIA

B.Y.Y.i.n.	Banco trifásico - conexão estrela isolada /estrela isolada i - fases A-B-C n - ordem harmônica - $n = 2,3,4,5,6,7$
B.Yt.Yt.i.n	Banco trifásico - conexão estrela aterrada / estrela aterrada
B.D.Yt.i.n.	Banco trifásico - conexão delta / estrela aterrada
B.D.Y.i.n.	Banco trifásico - conexão delta / estrela isolada
Y.Y.i.n	Trifásico núcleo envolvido - conexão estrela isolada / estrela isolada
Yt.Yt.i.n.	Trifásico núcleo envolvido - conexão estrela aterrada / estrela aterrada
D.Yt.i.n.	Trifásico núcleo envolvido - conexão delta / estrela aterrada
D.Y.i.n.	Trifásico núcleo envolvido - conexão delta / estrela isolada
Io	Corrente contínua injetada
In	Corrente nominal do transformador

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O controle da qualidade dos serviços prestados pelas concessionárias de energia elétrica, possui hoje um significado bem mais abrangente do que garantir nível de tensão e continuidade de suprimento, dentro dos limites estabelecidos pela legislação vigente. Atualmente, questões relacionadas com desvios da forma de onda de tensão e corrente tanto em frequência como em amplitude, com relação a um padrão de suprimento ideal, tem despertado cada vez mais o interesse por parte das concessionárias, consumidores e pesquisadores do assunto.

O termo "PQ (power quality)" tem sido usado freqüentemente pelas concessionárias de energia elétrica norte-americanas para retratar fenômenos associados a forma de onda das tensões e correntes. Tais ocorrências já alcançaram proporções alarmantes em algumas regiões dos Estados Unidos.

No estado do Kansas, seis concessionárias constituíram a KEURPS ("Kansas Electric Utilities Research Programs") em conjunto com o IEEE ("Institute of Electrical and Electronics Engineers"), EPRI ("Electric Power Research Institute"), KSU ("Kansas State University") e WSU ("Wichita State University") para estudar, pesquisar e desenvolver equipamentos e processos para reduzir, ao tolerável, os efeitos dos fenômenos mencionados.

Na verdade, problemas de má operação de equipamentos, perdas de energia, sobretensões, etc., associadas a presença de harmônicas não é recente, mas o que tem despertado a atenção dos pesquisadores é o aumento da severidade dos mesmos. Historicamente, problemas relacionados com harmônicas tem sido freqüentemente constatados e algumas vezes solucionados.

Pode-se identificar claramente três fases de abordagem do problema. A primeira fase foi representada pela atuação de um grande pesquisador na engenharia elétrica, Steinmetz, que encontrou uma solução para minimizar os efeitos causados pela terceira harmônica resultante da magnetização das máquinas elétricas e transformadores. Por volta de 1900, Steinmetz sugeriu a utilização de conexões em delta e estrela não aterrada para bloquear o fluxo de correntes de terceira harmônica pelo sistema [01]. O problema foi satisfatoriamente resolvido até meados de 1930, a partir do qual tem início a segunda fase de abordagem dos problemas associados a "PQ".

Esta, foi caracterizada pelas inúmeras ocorrências associadas a interferência nos sistemas de comunicação. A audio interferência causada por harmônicas neste período se manifestava em larga escala devido ao crescimento desordenado das redes elétrica de potência e telefônica, ocupando, muitas vezes, lugares físicos próximos. Tais problemas ocorreram devido ao acoplamento indutivo entre os diferentes circuitos, causando ruídos excessivos nas redes telefônicas. Estas harmônicas eram produzidas principalmente por transformadores, fornos de arco e retificadores para conversão c.a. / c.c.. Nesta fase, os problemas foram parcialmente resolvidos através da utilização de filtros, melhoria da qualidade das chapas magnéticas utilizadas na confecção dos transformadores e definição de limites toleráveis para as correntes magnetizantes.

A terceira fase, iniciada a partir de 1960, foi marcada pelo grande avanço da eletrônica de potência com o advento dos semicondutores de alta potência, o que motivou o crescimento em número e porte das chamadas "Cargas Elétricas Especiais". Estas são assim denominadas por apresentarem características próprias de funcionamento que resultam na geração de harmônicas, componentes contínuas, oscilações rápidas de tensão ("flicker") e desequilíbrios nas redes elétricas.

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. 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 conseqüências 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. Sob estas condições operativas, estas correntes normalmente apresentam elevados valores de pico além de um substancial aumento do conteúdo harmônico.

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 [02]. 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% a 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 tem abordado o assunto dando especial destaque à questão da geração de harmônicas com vistas a sua propagação pelo sistema alimentador.

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 [03], [04], [05]. 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, entretando, estão associadas, apenas, à operação magneticamente assimétrica de unidades monofásicas.

Embora as contribuições tenham sido expressivas e elucidativas sobre tal comportamento, surgem ainda questionamentos quanto a sua aplicabilidade prática, visto que a maioria das instalações elétricas é do tipo trifásica e, portanto, utilizam transformadores trifásicos.

Os transformadores trifásicos derivados de arranjos de unidades monofásicas foram parcialmente abordados em trabalhos anteriores [06]. Devido a sua natureza construtiva, pode-se garantir uma total independência magnética entre as fases a, b, e c. Desta forma, apenas a conexão trifásica dos enrolamentos afeta os resultados da operação magneticamente assimétrica dos bancos de transformadores monofásicos. As correntes de excitação dos arranjos trifásicos são então obtidas, apenas, pela composição das correntes de excitação de cada uma das unidades monofásicas, respeitando-se, naturalmente, o tipo de conexão empregada. Verifica-se, entretanto, que a modelagem anteriormente proposta não contempla situações para fluxo magnético não-senoidal. Tal fato representa uma importante limitação, uma vez que não permite a análise do comportamento de unidades transformadoras do tipo banco na conexão estrela isolada, onde a impossibilidade de circulação das harmônicas múltiplas de três provoca distorção harmônica no fluxo magnético e conseqüentemente nas tensões induzidas fase-neutro.

Por outro lado, nos sistemas elétricos de potência, sobretudo por razões econômicas, os transformadores são normalmente constituídos por unidades trifásicas com núcleos de três colunas. Embora os resultados obtidos para os bancos de monofásicos forneçam uma boa indicação do comportamento dos transformadores trifásicos sob dupla excitação c.a. e c.c., as situações magnéticas específicas encontradas com diferentes arranjos magnéticos devem ser individualmente considerado e modelado. Neste contexto, as publicações são escassas e em geral não focalizam especificamente o fenômeno da dupla excitação.

Considerando o exposto e sem a pretensão de esgotar o assunto, este trabalho tem por objetivo preencher esta lacuna, analisando-se experimentalmente e adaptando-se modelagens específicas para o estudo do comportamento das correntes de excitação dos transformadores trifásicos do tipo banco de monofásicos e do tipo núcleo envolvido, sob condição de dupla excitação.

No capítulo 2, é desenvolvida uma análise qualitativa do fenômeno da magnetização assimétrica do núcleo dos transformadores. Inicialmente são feitas considerações gerais sobre as principais fontes de correntes contínuas encontradas nos sistemas elétricos de potência. Na seqüência, são desenvolvidos estudos visando o desempenho em regime permanente e transitório das correntes de excitação. A magnetização assimétrica provoca deformações nas correntes de excitação e uma substancial alteração no seu conteúdo harmônico. Desta forma, são também analisados os efeitos sobre as perdas no núcleo e no cobre dos enrolamentos, bem como os conseqüentes aquecimentos localizados.

No capítulo 3 são apresentados os resultados experimentais obtidos em laboratório para o banco trifásico de transformadores e para o transformador trifásico do tipo núcleo

envolvido, considerando diferentes conexões dos enrolamentos e uma variação dos níveis de injeção c.c.. Estes resultados são obtidos com o auxílio de um sistema de aquisição de dados, e são apresentados sob a forma de gráficos, onde são, então, analisados.

No capítulo 4 são propostos e desenvolvidos os modelos matemáticos para o banco trifásico e para o transformador trifásico de núcleo envolvido. Todo o equacionamento é direcionado no sentido de se preparar o sistema para a simulação digital.

No capítulo 5 são desenvolvidas as simulações digitais dos modelos propostos, enfatizando o fenômeno da dupla excitação na alteração das correntes de excitação e seus respectivos conteúdos harmônicos. Os resultados são apresentados sob a forma de gráficos e então utilizados para análises e posteriores comparações com aqueles obtidos experimentalmente.

No capítulo 6 são particularmente enfocados aspectos relacionados com as ordens, amplitudes e distribuição seqüencial das componentes harmônicas geradas sob diferentes estados de dupla excitação c.a. e c.c. e considerando diferentes conexões usuais dos enrolamentos. Neste capítulo, são adotadas condições especiais de funcionamento dos transformadores, possibilitando análises que conduzem a elucidar e conclusões a respeito do desempenho dos mesmos.

No capítulo 7 são realizados os comentários e as conclusões finais sobre o desempenho dos transformadores quando submetidos a uma saturação assimétrica.

CAPÍTULO 2

FONTES C.C. E O FENÔMENO DA DUPLA EXCITAÇÃO C.A. / C.C.

2.1 - Objetivo

Neste capítulo apresenta-se uma análise qualitativa das principais fontes e fenômenos físicos que podem de alguma maneira injetar componente contínua de corrente nos sistemas elétricos de potência originalmente projetados para operar em corrente alternada.

Sob essas condições anormais de operação, os transformadores pertencentes a estes sistemas, ficam submetidos a uma dupla excitação c.a. / c.c. o que provoca uma magnetização assimétrica do núcleo. Como consequência, uma série de problemas afetam estes equipamentos auxiliares, os quais também são abordados neste capítulo. As correntes de excitação em regime permanente e transitório também são estudadas.

2.2 - Fontes de Componentes Contínuas nos Sistemas Elétricos de Potência

2.2.1 - Induções Geomagnéticas

As variações do campo magnético terrestre são conhecidas como distúrbios ou tempestades geomagnéticas e estão ligadas às atividades solares. Estas variações produzem na superfície da terra gradientes de potenciais induzidos da ordem de 3 à 6 volts / km [05]. A diferença de potencial resultante entre os pontos aterrados dos sistemas elétricos de potência, faz com que correntes de baixa frequência circulem pelos seus condutores.

Estas correntes, também conhecidas como SIC (solar induced current) ou ainda GIC (geomagnetic induced current), em geral, possuem amplitudes entre 5 A a 100 A e tem um período da ordem de minutos (0,001 Hz à 0,100 Hz), razão pela qual são consideradas como contínuas quando comparadas com as frequências de transmissão em 60 Hz [07], [08],[09].

Como o GIC flui pelo lado da estrela aterrada do transformador, 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.

As publicações que tratam deste assunto relatam que as ocorrências de tempestades geomagnéticas são freqüentes apenas no hemisfério norte, sendo praticamente impossíveis em território brasileiro.

2.2.2 - Retorno por Terra nos Sistemas de Transmissão c.c.

Nos sistemas de transmissão em corrente contínua os aterramentos normalmente são construídos próximos às subestações terminais e o solo é utilizado como um condutor, ora ativo, ora como reserva.

No caso de um sistema de transmissão homopolar, o solo transforma-se em um condutor de retorno ativo, pelo qual circula corrente nominal.

Em um sistema de transmissão bipolar, o mais difundido, cada pólo conduz a metade da potência nominal e o solo se constitui em um condutor reserva. Porém, este sistema pode passar a ter uma configuração homopolar quando há necessidade de se fazer interrupções programadas para manutenção em um dos pólos. Estas paradas normalmente são de longa duração.

As correntes provenientes do retorno por terra são, geralmente, de elevadas amplitudes, podendo se constituir em fontes de corrente contínua para todos os sistemas e dispositivos elétricos aterrados na área de sua influência.

Assim, os transformadores, dispositivos integrantes dos sistemas de potências 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.

2.2.3 - Conversores e Compensadores Estáticos Controlados por Tiristores

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.

Os compensadores estáticos são utilizados com bastante freqüência nos dias atuais por apresentarem vantagens em relação às demais formas de compensação empregadas. Sua versatilidade 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 tiritores. As correntes que se estabelecem pelos reatores são definidas atuando-se sobre os ângulos de disparo dos tiritores, o que implica num ajuste de forma contínua.[01].

Para ângulos de disparo dos tiritores 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 tiritores.

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 nos tiritores. [11].

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 para os sistemas de transmissão em corrente alternada.

2.3 - Magnetização Assimétrica dos Transformadores

2.3.1. Análise do Fenômeno da Magnetização Assimétrica

Da teoria clássica, 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.

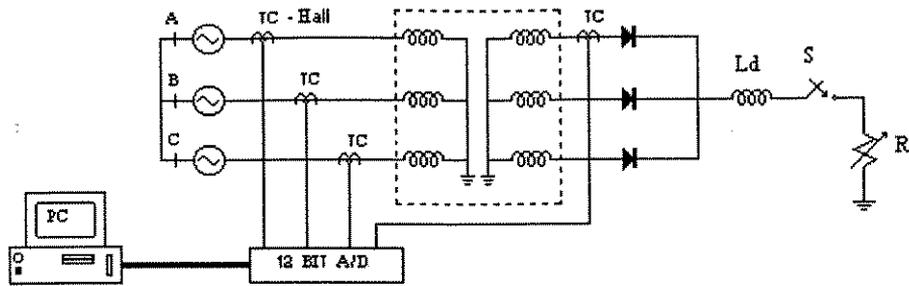
A citada assimetria magnética ocorre, por exemplo, quando os transformadores alimentam cargas cujas correntes de alimentação possuem níveis médios diferentes de zero. Nestas condições operativas destaca-se que, devido a impossibilidade física de se transferir sinais contínuos de corrente do secundário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

A análise qualitativa do fenômeno pode ser feita considerando-se o arranjo experimental ilustrado na figura 2.1 (a), que consiste de um retificador trifásico com ponto médio (unidirecional), alimentando uma carga resistiva. A utilização deste retificador, neste exemplo, é feita somente para evidenciar o fenômeno da magnetização assimétrica, visto que na prática o mesmo não é aplicado em sistemas de alta potência por apresentar altos valores médios. Nestas condições, a corrente média por fase que circula do lado do secundário do transformador é igual a $1/3$ da corrente média da carga. Na análise que se segue, são utilizados transformadores trifásicos do tipo banco de monofásicos e o de núcleo envolvido.

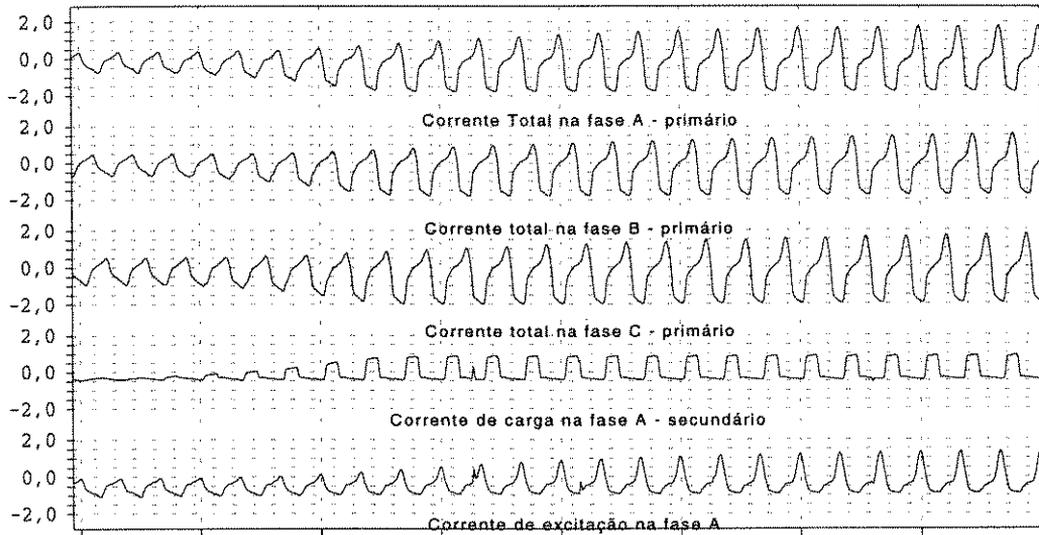
Com a chave S aberta o transformador encontra-se trabalhando a vazio e a única corrente que circula é a de excitação.

Inicialmente considerando o banco trifásico, o fechamento da chave S determina o instante a partir do qual o transformador fica sujeito a aproximadamente a $1/3$ da corrente média de carga em cada fase do seu enrolamento secundário devido a retificação unidirecional adotada. O comportamento transitório das correntes primária, secundária e de excitação é ilustrado na figura 2.1 (b).

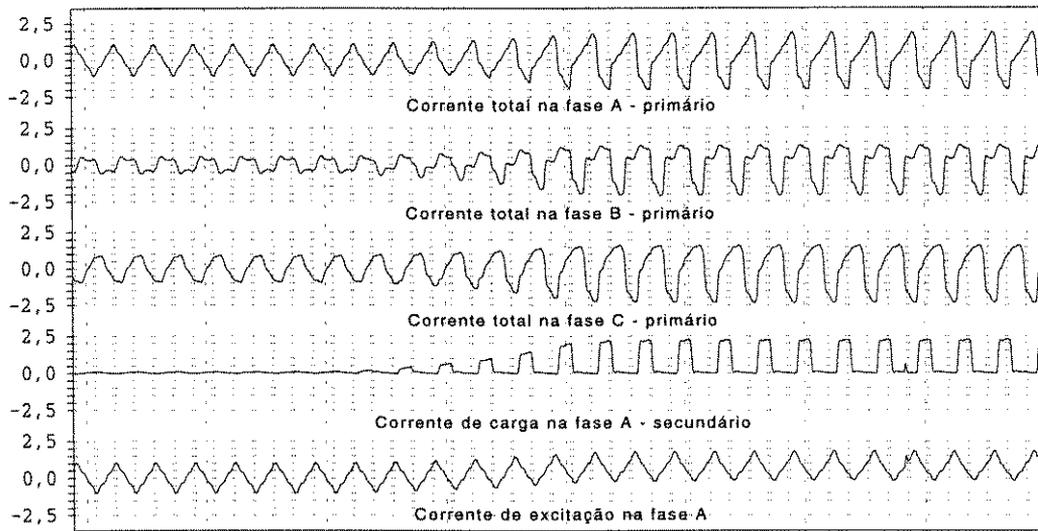
A título de análise, a corrente total primária da fase A, vista no oscilograma superior, pode ser considerada como sendo constituída de duas parcelas. A primeira parcela é a corrente da carga da fase A refletida para o enrolamento primário na relação 1:1. Esta corrente possui então a mesma forma de onda da corrente secundária ilustrada no oscilograma. Pode ser constatado também que esta parcela da corrente primária se estabelece, no enrolamento primário assim que a chave S é fechada e apresentando um valor médio diferente de zero segundo a constante de tempo definida pela carga resistiva e pelo indutor de alisamento L_d .



(a) - Arranjo experimental com retificador trifásico com ponto médio (unidirecional)



(b) Banco trifásico constituído de unidades monofásicas



(c) Transformador trifásico com núcleo de três colunas - núcleo envolvido

Figura 2.1 - Magnetização assimétrica devido a injeção c.c. equilibrada

A segunda parcela, ou seja, a corrente de excitação, é sistematicamente alterada até que no regime permanente um valor médio líquido nulo seja obtido. O comportamento transitório da corrente de excitação da fase A pode ser observado no oscilograma inferior da figura 2.1 (b), o qual foi obtido através da soma da corrente total primária mais a corrente de carga secundária.

Uma vez atingido o regime permanente verifica-se que a corrente de excitação resultante apresenta valor médio diferente de zero e uma acentuada distorção harmônica, caracterizada pelos aumentos expressivos das componentes de ordem ímpar e, sobretudo, o aparecimento de ordens harmônicas pares em níveis igualmente apreciáveis.

Substituindo-se o banco trifásico constituído por unidades monofásicas, por um transformador trifásico com um núcleo de três colunas, foi adotado o mesmo procedimento e os resultados podem ser observados no oscilograma da figura 2.1 (c).

Nesta condição, as componentes contínuas das correntes secundárias produzem fluxos com amplitudes e sentidos iguais, e o transformador não sofre a influência da saturação assimétrica. Logo, como observado no oscilograma da figura 2.1 (c), a corrente de excitação não apresenta alteração no conteúdo harmônico.

Nas duas situações apresentadas acima, pode ser verificado que existe uma substancial diferença de comportamento entre os dois tipos de transformadores trifásicos, sob efeito de excitação simultânea c.a. / c.c. Isto se deve fundamentalmente às diferentes constituições magnéticas dos núcleos, ou seja, nos transformadores trifásicos do tipo banco de monofásicos cada fase tem um comportamento magnético próprio e independente, enquanto que no trifásico tipo envolvido verifica-se uma forte interação magnética entre as fases. Desta forma, conclui-se, a princípio, que para cada um dos dois tipos de transformadores devem ser estabelecidos modelos matemáticos específicos.

O fenômeno da magnetização assimétrica também pode ser observado através de uma injeção desequilibrada de corrente contínua, proveniente de defeitos em dispositivos que utilizam componentes a estado sólido.

O arranjo experimental da figura 2.2 (a), ilustra um retificador trifásico de onda completa. Sabe-se [11], que este tipo de retificação não apresenta valores médios nas correntes de alimentação. Entretanto, com o objetivo de ilustrar o comportamento do transformador alimentador mediante uma injeção c.c. desequilibrada, propositadamente foi provocado um defeito no diodo do barramento positivo da fase B. Isto acarreta um desequilíbrio operacional resultando no aparecimento de componentes médias nas correntes de alimentação o que leva o núcleo do transformador a um estado de saturação assimétrica. Neste caso, como o transformador está ligado em

estrela isolada, a soma das correntes deve ser nula.

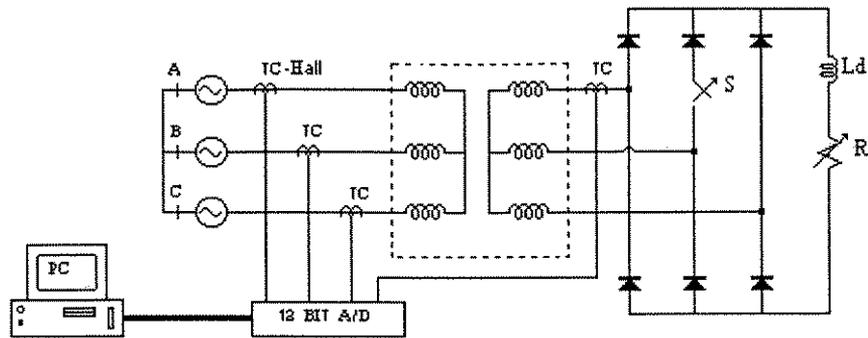
No oscilograma da figura 2.2 (b) estão representadas as correntes das fases A,B e C, a corrente de carga secundária da fase A e a corrente de excitação resultante desta fase, para o transformador trifásico do retificador de onda completa do tipo banco trifásico constituído por unidades monofásicas. Como no caso do retificador com ponto médio, pode ser observado que a partir da abertura da chave S e conseqüente desequilíbrio da ponte, a corrente de excitação resultante apresenta valor médio diferente de zero e uma acentuada distorção harmônica.

Substituindo-se o banco trifásico anterior por um transformador trifásico de três colunas, pode ser observado no oscilograma da figura 2.2 (c), que para uma injeção desequilibrada, o transformador passa a apresentar valores médios nas correntes de excitação resultantes, e como nos casos anteriores, também apresentam acentuada distorção harmônica com aumento significativo das componentes de ordem ímpar e o aparecimento das ordens harmônicas pares.

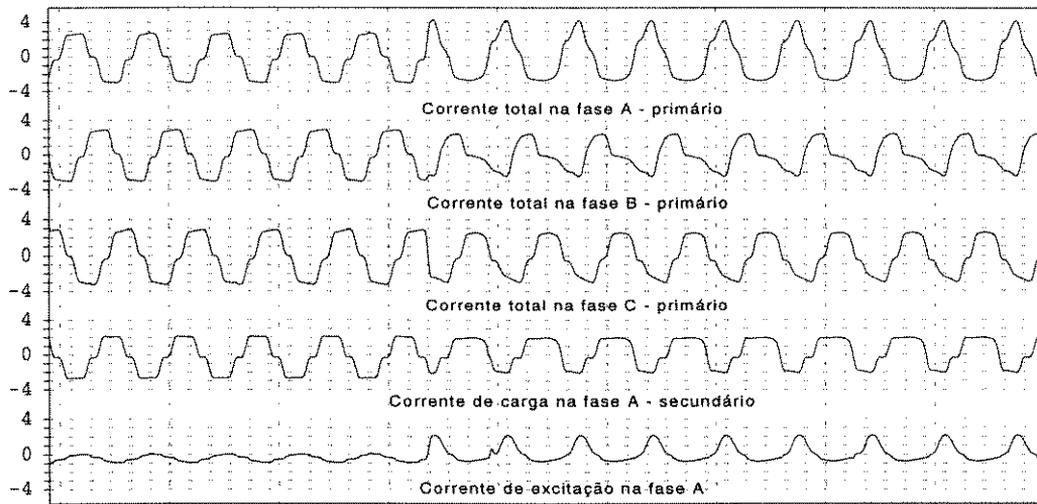
Os transformadores de correntes utilizados nestes ensaios são do tipo "Efeito Hall".

2.3.2. - Efeitos da Magnetização Assimétrica

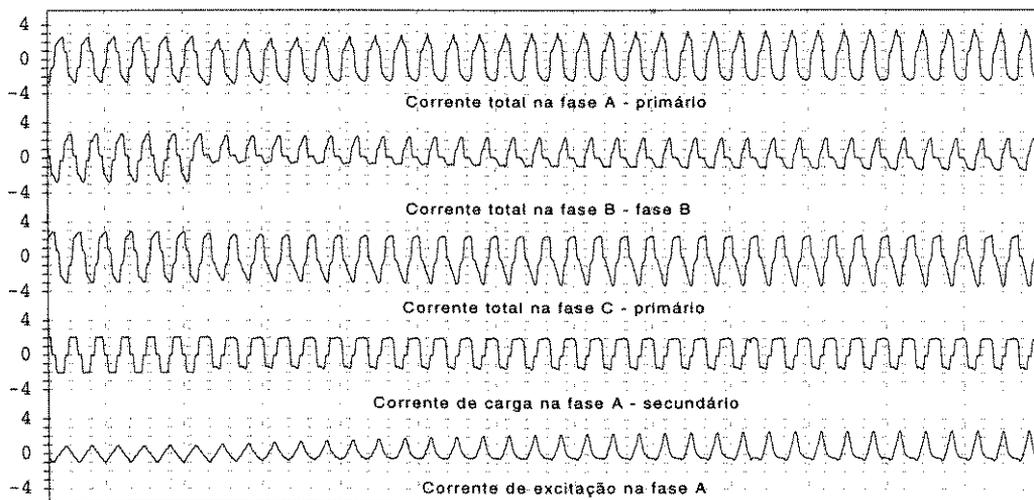
Os aumentos expressivos nos valores eficazes da corrente de excitação, e a substancial alteração do seu conteúdo harmônico, devido a magnetização assimétrica do núcleo produzida pela excitação c.c., podem ter conseqüências danosas para o transformador e para o sistema elétrico como um todo. No transformador, estas conseqüências se manifestam no sentido de alterar suas perdas nominais e promover eventuais comprometimentos de sua vida útil. Nos sistemas elétricos, podem ocorrer distorções harmônicas intoleráveis; aumento no fluxo de reativos; flutuações de tensão ; operação inadequada do sistema de proteção, resultando, em última análise, na degradação da qualidade de fornecimento da energia elétrica.



(a) Arranjo experimental com retificador trifásico de onda completa (bidirecional)



(b) Banco trifásico constituído de unidades monofásicas



(c) Transformador trifásico com núcleo de três colunas - núcleo envolvido

Figura 2.2 - Magnetização assimétrica devido a injeção c.c. desequilibrada

2.3.3. - Perdas no Núcleo

Quando se adota o circuito equivalente tradicionalmente utilizado na representação de transformadores de potência, é possível concluir que as perdas no núcleo diminuem com o aumento da excitação c.c. Este efeito decorre da diminuição da tensão induzida com o aumento da corrente magnetizante devido a queda de tensão na reatância de dispersão. Naturalmente isto se aplica somente se a resistência equivalente de perdas no núcleo for considerada constante. De fato a hipótese da invariância desta resistência de perdas é plenamente aceitável. Em testes realizados na referência [12], a tensão secundária dividida pela parcela da corrente de excitação em fase com a mesma manteve-se aproximadamente constante para qualquer nível de corrente contínua injetada.

Por outro ponto de vista, pode-se concluir que as perdas no núcleo possuem uma tendência global de diminuir na presença de corrente contínua. As perdas por correntes de Foucault não dependem do nível total de fluxo em condições de dupla excitação mas somente das parcelas variáveis no tempo, bem como das respectivas taxas de variação. É conhecido que sob dupla excitação o transformador opera na região saturada e devido às altas correntes magnetizantes o fluxo deixa de ser senoidal e passa a apresentar algum conteúdo harmônico. Entretanto, esta distorção harmônica é pouco significativa e sua influência é praticamente desprezível. Além disso, para os harmônicos de ordens mais altas, a reação causada pelas correntes parasitas faz com que a indução magnética não seja uniforme apresentando-se menor no centro das laminas de aço [13], [14]. Isto implica em um efeito ainda menor das correntes harmônicas induzidas sobre as perdas por correntes parasitas. Nestas condições, conclui-se que estas perdas tendem a permanecer praticamente inalteradas frente a ocorrência de dupla excitação c.a. e c.c..

As perdas por histerese, por sua vez, está relacionada com a energia necessária para orientar os domínios magnéticos. Esta energia é reduzida com o aumento da corrente contínua injetada. Tal fato decorre de que o número de domínios magnéticos que retém suas orientações esta diretamente ligados com o aumento do fluxo c.c. no núcleo e este por sua vez, está relacionado com a corrente contínua injetada. Nestas condições é possível concluir que a área definida pelo laço de histerese em condições normais de operação, é ligeiramente maior que a respectiva área, em condições de dupla excitação, figura 2.3.

Novamente, a pequena influência da distorção harmônica do fluxo no comportamento da perda por histerese pode ser atribuída às baixas amplitudes dos componentes harmônicos [14]. Os níveis encontrados na maioria dos casos práticos são tais que não provocam o aparecimento de ciclos de histerese secundários e, nestas condições, estas perdas são dadas apenas pela área do ciclo principal.

Deve ser reconhecido que, este caso de operação anormal com excitações simultâneas c.a. e c.c., nada tem em comum com a sobreexcitação de transformadores onde as perdas por histerese e Foucault são efetivamente incrementadas.

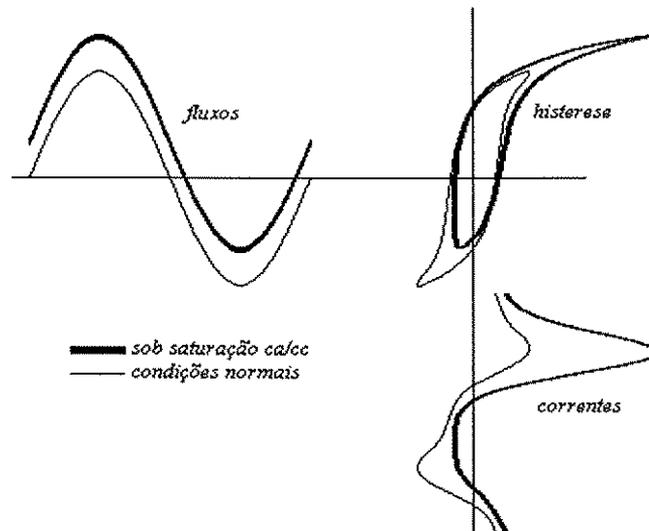


Figura 2.3 - Laço de histerese sob magnetização assimétrica

2.3.4. - Perdas no Cobre

As perdas no cobre em um transformador de potência operando sob condições normais situam-se, em geral, entre 0,5% e 2% de sua potência nominal. Nestas condições, a corrente magnetizante tem um efeito insignificante na sua composição das perdas totais no cobre. Todavia, sob condições de dupla excitação, tal fato pode não ser verdadeiro, sobretudo devido ao expressivo conteúdo harmônico das correntes que circulam pelos enrolamentos.

Na literatura clássica, é comum considerar as perdas no cobre como sendo compostas por duas parcelas. A primeira representa as perdas na resistência c.c. dos enrolamentos e a segunda parcela associada às perdas suplementares. Estas últimas são compostas, principalmente, pelas perdas magnéticas nas partes metálicas e pelas perdas no cobre devidas ao fluxo de dispersão.

A determinação analítica da variação das perdas suplementares com a frequência não é uma tarefa simples e normalmente requer estudos detalhados envolvendo aspectos construtivos bem como as dimensões físicas dos transformadores. No entanto, sob o ponto de vista qualitativo é possível considerar os resultados apresentados na referência [08] como bons indicadores da influência da dupla excitação c.a. e c.c. sobre as perdas no cobre. Naquele trabalho comprovou-se

experimentalmente que para frequências inferiores a décima ordem é razoável admitir as perdas suplementares globais variando com o quadrado da frequência. Assim, uma vez que a distribuição espectral das componentes harmônicas da corrente de excitação, sob magnetização assimétrica, apresentam-se concentrados em frequências de até sétima ordem, a adoção da metodologia de cálculo proposta em [08] pode ser considerada adequada para esta avaliação.

Adotando-se pois a metodologia citada conclui-se que de um modo geral as perdas no cobre atingem proporções significativas apenas para altos níveis de injeção c.c. [06]. Para níveis de injeção c.c. inferiores a 10% da corrente nominal dos transformadores as perdas no cobre calculadas aumentaram no máximo em 7%, e ainda podem ser consideradas conservativas de acordo com a metodologia de cálculo utilizada.

Desta forma, em última análise, conclui-se que as preocupações com respeito ao aumento das perdas no cobre devido a magnetização assimétrica restringem-se praticamente a casos associados a tempestades geomagnéticas.

2.3.5. - Aquecimentos Localizados

O aumento das perdas joule nos transformadores sob dupla excitação foi enfocado até o momento admitindo-se que estas se distribuem uniformemente ao longo dos enrolamentos. Entretanto, quanto à avaliação da perda de vida útil dos transformadores é de fundamental importância o conhecimento dos aspectos relativos a elevação de temperatura em áreas localizadas ao longo dos seus enrolamentos.

Em transformadores de potência, a região do ponto mais quente esta localizada normalmente na extremidade superior dos enrolamentos. Nesta região a temperatura do óleo é mais elevada e as perdas suplementares específicas (W/m^3) são substancialmente maiores. Isto decorre do fato de que as espiras (ou bobinas) situadas nas extremidades dos enrolamentos estão sujeitas a maiores valores de intensidade de campo magnético radial [08], [09]. A figura 2.4 ilustra uma distribuição típica dos campos axiais (H_y) e radiais (H_x) ao longo do enrolamento de um transformador de potência.

As correntes parasitas que circulam pela massa dos condutores situados nas extremidades dos enrolamentos são substancialmente maiores que nas demais partes, e fazem com que as perdas suplementares que se desenvolvem nos condutores situados naquela região sejam conseqüentemente maiores.

Em certas situações, embora as perdas totais nos enrolamentos possam ser pouco afetadas pela distorção de corrente, as perdas locais na região do ponto mais quente poderão ser suficientemente altas para provocar o envelhecimento do isolamento.

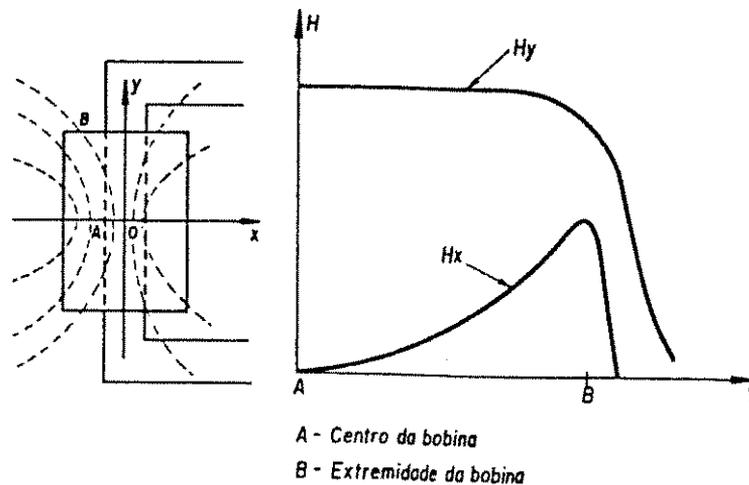


Figura 2.4 - Distribuição dos campos magnéticos nos enrolamentos dos transformadores

Quando ocorre a saturação do núcleo magnético devido a presença de componente contínua de corrente os efeitos sobre os valores máximos da corrente de excitação são muito mais significativos que aqueles observados para os valores máximos do fluxo de dispersão. Assim, o sobreaquecimento localizado se deve fundamentalmente ao aumento da temperatura nos enrolamentos, enquanto que o aumento de temperatura das partes metálicas do transformador tem uma importância secundária [09]. Entretanto, a partir de resultados experimentais apresentados na referência [08], verifica-se que, de um modo geral, o sobreaquecimento localizado resultante da dupla excitação c.a. e c.c., apresenta preocupações com relação a depreciação de vida útil apenas para situações de elevada excitação c.c.. Tais ocorrências, normalmente, estão relacionadas a magnetização assimétrica associada as GIC e, portanto, pouco prováveis no caso brasileiro [03], [09].

2.3.6. - Fluxo de Reativos

A corrente de excitação dos transformadores de potência possui, como se sabe, 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 uma diminuição do fator de potência da instalação, quando o transformador opera sob dupla excitação c.a./ c.c.

2.3.7. - Distorção Harmônica

É fato conhecido que os transformadores de potência, quando operam sob condições normais, não apresentam nenhuma preocupação no que tange à geração de harmônicas. Com os desenvolvimentos tecnológicos na área de fabricação de chapas magnéticas, os transformadores de potência utilizados atualmente absorvem correntes magnetizantes bastante baixas e, desta forma, seu conteúdo harmônico torna-se pouco significativo para o sistema elétrico. Isto é ainda reforçado para o caso dos arranjos trifásicos onde o fluxo harmônico pelo sistema pode ser substancialmente atenuado através do uso de conexões adequadas para os transformadores. Entretanto, quando os transformadores operam sob dupla excitação o conteúdo harmônico da corrente magnetizante fica bastante alterado tanto com relação as ordens harmônicas quanto as amplitudes.

A título de ilustração, apresenta-se na figura 2.5 o conteúdo harmônico injetado no sistema elétrico pelo transformador monofásico de 333 kVA sujeito a operação com diferentes níveis de injeção c.c.. Os resultados ilustrados na figura foram obtidos por simulação digital na referência [04] e são apresentados com base na corrente nominal do transformador (I_{nom}).

Considerando os valores obtidos para as diferentes componentes harmônicas verifica-se que o comportamento dos transformadores sob excitação c.a. / c.c. como fonte geradora de harmônicas é, sem dúvida, um problema que deve ser tratado com atenção. Mesmo para níveis relativamente baixos de excitação c.c., o conteúdo harmônico injetado no sistema pelo transformador fica substancialmente alterado sob condições de dupla excitação.

Verifica-se, portanto, que a implementação dos efeitos provocados pela dupla excitação em estudos de penetração harmônica nos sistemas c.a., é de fundamental importância sobretudo devido a geração de harmônicas pares, pois, como se sabe, [06] os limites recomendados para estas componentes harmônicas são em geral mais rigorosos que para as demais. Observa-se, por exemplo, que para uma injeção de corrente contínua da ordem de 5% da I_{nom} , a componente de segunda harmônica gerada possui uma amplitude de mais de 6% da I_{nom} .

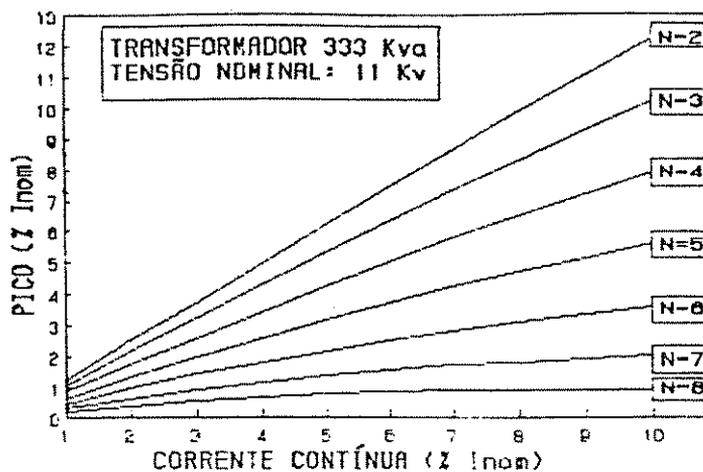


Figura 2.5- Harmônicas geradas pelo transformador sob saturação assimétrica

2.3.8 - Sistema de Proteção

Dentre os problemas envolvidos com a proteção dos sistemas elétricos onde se fazem presentes as componentes contínuas de corrente, destacam-se aqueles relativos à proteção diferencial dos transformadores [15].

Quando o transformador protegido fica submetido a uma injeção de corrente contínua, a alta corrente magnetizante, neste caso, pode provocar um desbalanceamento entre as correntes que circulam pelo secundário dos transformadores de corrente (TC's), com magnitude suficiente para acionar a proteção diferencial.

O desligamento do transformador pela proteção é, contudo, uma operação equivocada, pois dupla excitação c.a. / c.c. pode ser considerada como um defeito externo à zona de proteção. Mesmo assim é possível reconhecer um aspecto positivo de tal ação evitando que ocorram os problemas oriundos da magnetização assimétrica.

Quando a proteção diferencial adotada possui restrição para harmônicos, o tipo de atuação, pelas razões expostas anteriormente, provavelmente não acontece. Embora os altos valores eficazes da corrente magnetizante possam causar um desbalanceamento capaz de sensibilizar o relé diferencial, seu alto conteúdo harmônico pode inibir a atuação da proteção, pela ação da bobina de restrição. Neste caso, persistindo a excitação c.c. no transformador, se ocorrer um defeito dentro da zona protegida, o relé diferencial pode continuar bloqueado pela atuação da bobina de restrição de harmônicos e as conseqüências pode ser desastrosas.

2.4 - Efeitos da Variação da Alimentação c.a.

A literatura clássica mostra que as características de excitação tanto c.a. quanto a c.c., para um determinado material magnético, têm a mesma forma e o mesmo nível de saturação. Isto é verdadeiro somente se o núcleo for excitado independentemente. Se o núcleo for excitado em corrente alternada e corrente contínua simultaneamente, as relações entre a corrente contínua injetada e o correspondente fluxo não serão como anteriormente. Assim, a nova característica c.c. dependerá do nível da saturação já introduzido pela excitação c.a. [16].

A figura 2.6 ilustra a dependência do conteúdo harmônico com a taxa de variação c.a.. Verifica-se que, para uma variação de 100% da tensão de excitação houve um aumento de 6 % nas amplitudes da segunda ordem harmônica e de 4% para a terceira ordem. Em outras palavras, alternando-se, por exemplo, uma alimentação de 70 volts para 140 volts, observa-se na figura que realmente há um aumento dos níveis das amplitudes das harmônicas consideradas.

Soluções como a sub-saturação ou o sobre-dimensionamento do núcleo magnético, para atenuar o conteúdo harmônico gerado pelo transformador sob excitação simultânea c.a. /c.c., são pouco eficientes, visto que, as amplitudes harmônicas geradas são pouca influenciada pelo nível de excitação c.a.

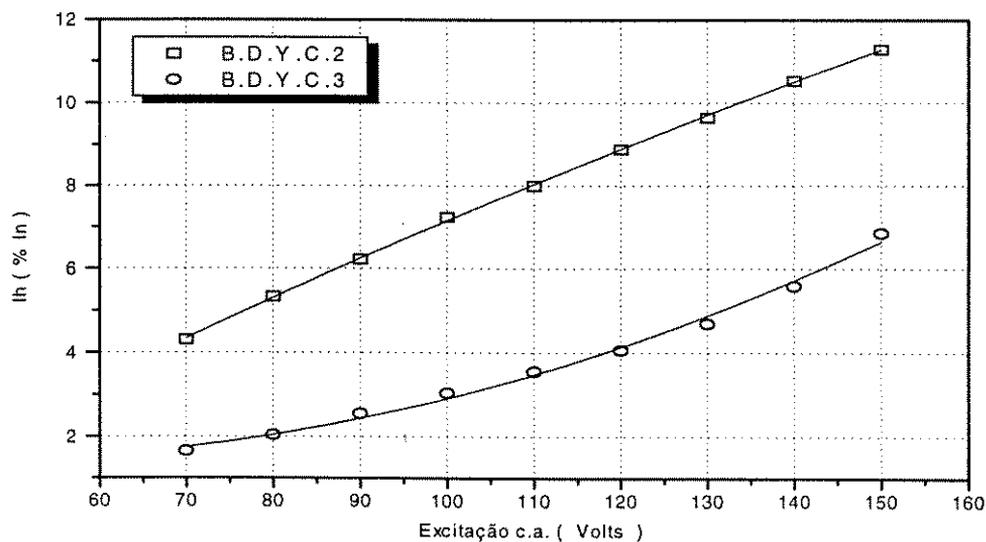


Figura 2.6- Variação da 2ª e 3ª harmônicas da corrente de excitação - injeção c.c. de 10% de I_n - Fase C
($V_{nominal} = 110\text{ V}$)

CAPÍTULO 3

ESTUDOS EXPERIMENTAIS

3.1 - Introdução

Neste capítulo apresenta-se os estudos experimentais sobre o comportamento dos transformadores sob o efeito da condição duplamente excitada. Em especial, foram analisados o banco trifásico de transformadores constituído de unidades monofásica e o transformador trifásico com núcleo tipo envolvido (três colunas), com dois enrolamentos. "Em todos os ensaios, os transformadores encontram-se na condição a vazio, ou seja, não suprindo potência para qualquer carga".

Tanto para o banco trifásico constituídos de unidades monofásicas quanto para o tipo núcleo de três colunas (núcleo envolvido), os mesmos são submetidos a diversas condições de dupla excitação c.a. / c.c., para diferentes conexões dos seus enrolamentos.

À medida em que os níveis de injeção de corrente contínua variam, são realizadas medições das formas de onda das correntes de excitação.

Estes resultados são analisados sob o ponto de vista da variação das amplitudes e do conteúdo harmônico das grandezas citadas e sua dependência com os níveis c.c. injetados.

Os resultados obtidos experimentalmente serão mais tarde comparados com os correspondentes estudos provenientes de simulação digital, para verificação da validade do modelo matemático proposto.

3.2. - Procedimentos Experimentais

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.

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 do tipo Lap Top - 486 - 66 MHz.

3.3 - Banco Trifásico de Transformadores Constituído de Monofásicos

3.3.1 - Características Físicas de cada Unidade Monofásica

A figura 3.1 ilustra o modelo físico de uma das unidades transformadoras utilizadas para a composição do banco trifásico.

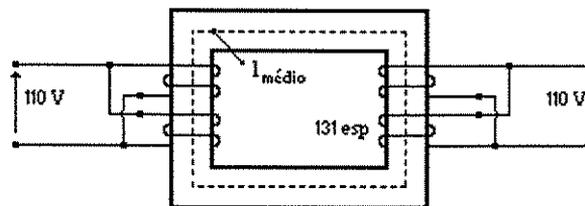


Figura 3.1 - Modelo físico da unidade transformadora

Os transformadores monofásicos utilizados nos ensaios experimentais possui as mesmas características construtivas e com os seguintes parâmetros nominais :

Potência Nominal	: 1 kVA
Tensão Nominal	: 110 V
Corrente Nominal	: 9,1 A
Numero total de espiras	: 262
Área da Seção transversal	: 0,0038 m ²
Comprimento magnético	: 0,519 m
Indutância primária	: 0,0022 H
Resistência primária	: 1,0Ω

3.3.2 - Resultados Experimentais e Análises

A figura 3.2 mostra o arranjo do circuito experimental empregado no ensaio do banco de transformadores na conexão ΔY .

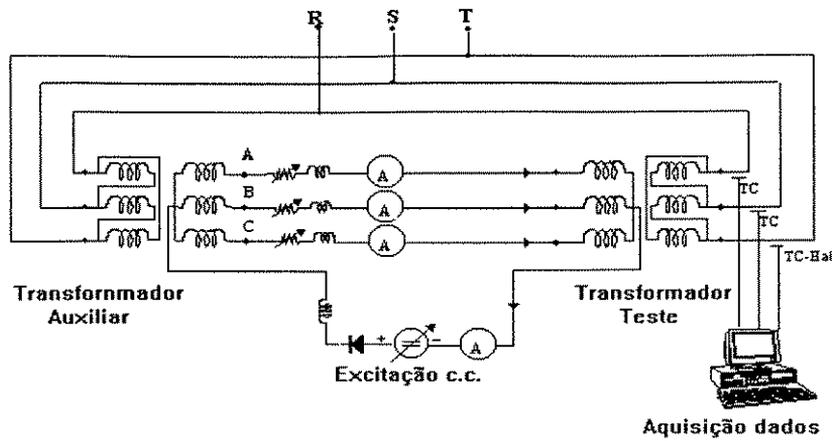


Figura 3.2 - Arranjo experimental para o banco de transformadores trifásico - ligação $\Delta\Upsilon$

Os lados dos enrolamentos primário do transformador teste e do transformador auxiliar foram conectados em paralelo e submetidos a uma mesma excitação c.a nominal, enquanto os lados secundários foram conectados entre si de forma a anular a força eletromotriz c.a.. Para as demais conexões adotou-se o mesmo procedimento

A fonte eletrônica de corrente contínua foi inserida no lado secundário entre os pontos de neutro para as conexões estrela aterrada e na fase C para as conexões não aterradas.

As figuras 3.3, 3.4 e 3.5, ilustram as formas de onda das correntes de excitação e os seus respectivos espectros harmônicos, para o transformador conectado em $\Delta\Upsilon$, $\Upsilon\Upsilon$ e $\Upsilon\Upsilon$ respectivamente, somente com excitação c.a., ou seja trabalhando sob condições normais.

Estas ilustrações são utilizadas como referência para a comparação com as situações onde o transformador é duplamente excitado.

Observando-se os espectros da figura 3.3, verifica-se que para a conexão $\Delta\Upsilon$ as correntes de linha não contém as componentes harmônicas múltiplas de três (“triplens”), como mostra a teoria clássica. A ligação em delta do primário, propicia um caminho interno para as componentes de seqüência zero das correntes de excitação, ou seja, as harmônicas “triplens”, garantindo assim um fluxo magnético praticamente senoidal.

Para a ligação $\Upsilon\Upsilon$, também pode ser observada a ausência das harmônicas múltiplas de três na corrente de excitação. Ao contrário do caso anterior, para esta conexão não há nenhum caminho alternativo para circulação dessas correntes harmônicas. Nestas condições o fluxo magnético apresentam-se bastante distorcido, com predominância da componente de terceira harmônica resultando também em uma forte distorção nas tensões induzidas fase-neutro.

Na ligação $\Upsilon\Upsilon$, tanto o fluxo magnético quanto a tensão induzida fase-neutro são praticamente senoidais, enquanto as correntes de excitação apresentam uma acentuada distorção harmônica devido principalmente às altas

amplitudes da componente de terceira ordem harmônica (30% - 50% da componente fundamental).

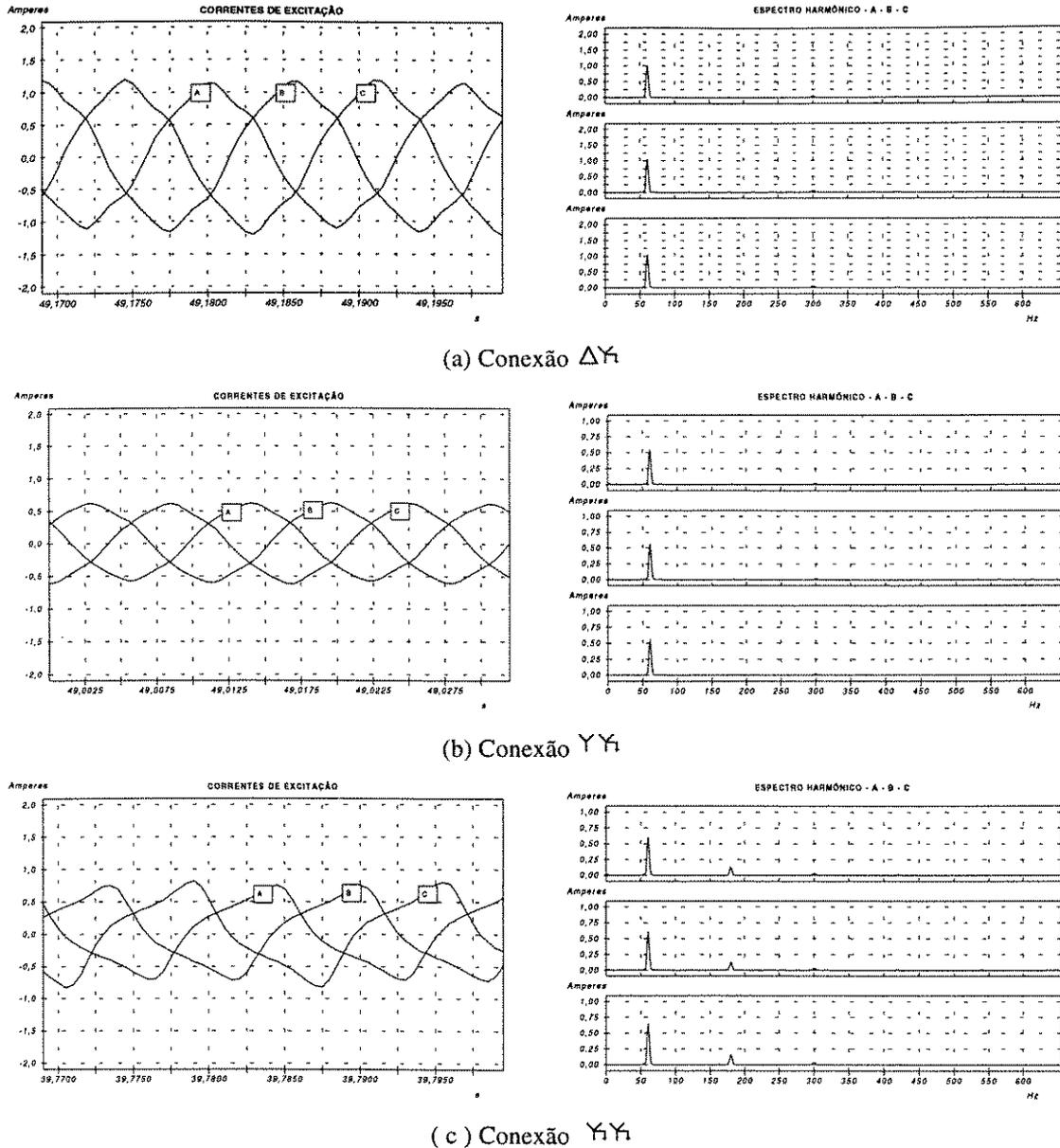


Figura 3.3 -Forma de onda e espectro harmônico das correntes de excitação em condições normais

De um modo geral, como as amplitudes das ordens harmônicas acima da sétima são normalmente muito baixas, as análises e os estudos são limitados à influência da dupla excitação até a frequência de 420 Hz (7^a harmônica).

Neste trabalho experimental, procurou-se representar os casos típicos de injeção c.c. aos quais os transformadores de potência podem ficar submetidos.

No desenvolvimento a seguir, são então analisados dois casos básicos de ocorrência da dupla excitação, para diferentes conexões dos enrolamentos dos transformadores.

Os resultados da variação das amplitudes harmônicas em função dos níveis de injeção c.c. são apresentados para a fase C. Esta opção é decorrente da instalação da fonte eletrônica nesta

fase ,para as conexões sem acesso ao neutro, e por apresentarem as maiores amplitudes devido a distribuição da injeção c.c. adotada. Logo, adotou-se este procedimento em todo o trabalho.

Caso A : Neste ensaio admitiu-se um padrão de injeção de componente contínuas compatível com a operação não idealizada de instalações conversoras ou compensadoras estáticas do tipo reator controlado a tiristores. Nesta situação, por se tratarem de cargas isoladas, a soma das correntes contínuas, provenientes de operações assimétricas destes equipamentos é nula [5].

Considerando o exposto, foi adotado como base para os ensaios a seguinte distribuição de injeção c.c. entre as fases : $I_{a_0} = 30\% I_0$; $I_{b_0} = 70\% I_0$; $I_{c_0} = 100,0\% I_0$., na linhas A , B e C respectivamente, onde I_0 é a corrente contínua injetada e varia de 0 a 15% da corrente nominal do transformador.

Particularmente, nos casos ilustrados a seguir, são apresentados graficamente as formas de onda das correntes de excitação nas linhas e seus respectivos conteúdos harmônicos para uma excitação c.c. de $I_0 = 10\% I_n$, aplicada na fase C.

Conexão ΔY :Nesta condição, as correntes de excitação de linha tornam-se fortemente deformadas apresentando todas as componentes harmônicas, como ilustrado na figura 3.4 (a). Analisando-se o conteúdo harmônico dessas correntes, pode ser observado que há uma predominância das harmônicas pares e uma amplificação das amplitudes das harmônicas ímpares, figura 3.4 (b).

Como o primário está conectado em delta, as componentes de seqüência zero das correntes de excitação, naturalmente, não circulam pela linhas. Entretanto, como a saturação c.c. é desbalanceada, as harmônicas múltiplas de três possuem também componentes nas seqüências positivas e negativas e estão presentes nas linhas de alimentação.

A figura 3.4 (c), ilustra o comportamento das ordens harmônicas em função da variação dos níveis de excitação c.c. em porcentagem da corrente nominal do transformador para a referida conexão.

Há uma dependência praticamente linear entre as amplitudes harmônicas de baixa ordem, tais como a segunda e terceira harmônicas e a excitação c.c., enquanto as amplitudes de ordens superiores praticamente se mantêm constantes apresentando uma leve diminuição a medida em que os níveis de excitação c.c. aumentam.

Conexão YY : Com esta conexão, e sem a presença de componentes contínuas, as correntes harmônicas de excitação de seqüência zero são suprimidas pelo neutro isolado. Logo, as correntes de excitação conterão somente as componentes harmônicas de ordens diferente de

$3m+3$ ($m= 0,1,2,3,\dots$) ou seja, de seqüência positiva e negativa e ainda assim com baixas amplitudes.

A figura 3.5 ilustra o comportamento das correntes de excitação quando o banco trifásico é submetido a uma excitação c.c.. Mais uma vez, observa-se uma forte distorção na forma de onda das correntes de excitação em virtude do aparecimento e predominância das harmônicas de ordens pares bem como a amplificação das harmônicas de ordens ímpares, figuras 3.5 (a) e (b).

A Figura 3.5 (c), mostra a variação das amplitudes harmônicas das correntes de excitação em função da variação dos níveis de injeção c.c.. Percebe-se claramente que a influência sobre as harmônicas de ordens pares é mais acentuada, e que as harmônicas de ordens superiores apresentam um pequeno decaimento.

Caso B: Neste caso, as injeções de correntes contínuas podem ser provenientes de retorno por terra de sistemas de transmissão em corrente contínua ou de induções geomagnéticas. Devido a natureza deste padrão de excitação c.c., este caso somente se aplica a transformadores que possuem pelo menos um dos seus enrolamentos em estrela aterrada.

Nestas condições, a corrente contínua provocada por um dos fenômenos citados acima poderá percorrer um caminho alternativo formado pelo condutor terra e os enrolamentos das fases dos transformadores, levando-os a um determinado estado de saturação c.c.. A distribuição das correntes contínuas pelas diferentes fases depende naturalmente da impedância apresentada pelos caminhos elétricos definidos por cada uma das fases e o retorno por terra.

Devido ao desbalanceamento das fases nas redes elétricas, não é comum ter-se uma distribuição equitativa das correntes contínuas. Com o objetivo de reproduzir estas características no procedimento adotado, procurou-se analisar o comportamento dos transformadores operando sob duas condições distintas, sendo a primeira realizada com uma distribuição qualquer das correntes contínuas entre as fases e a segunda com uma distribuição idêntica de injeção c.c nas três fases.

B.1 - Injeção Desbalanceada - No ensaio para uma distribuição qualquer da injeção c.c., foi adotado os seguintes níveis de correntes contínuas nas diferentes fases do transformador : $I_{a_0} = 30\% I_0$; $I_{b_0} = 20\% I_0$ e $I_{c_0} = 50\% I_0$, nas fases A, B e C respectivamente. Neste caso, adotou-se a corrente contínua pelo condutor neutro, I_0 , variando entre 0 e 15% I_n .

A exemplo dos ensaios anteriores apresenta-se as formas de onda das correntes nas linhas e seus respectivos conteúdos harmônicos para o caso particular $I_0 = 10\% I_n$.

Conexão ΔY : Com o banco trifásico conectado em delta-estrela aterrada, foi

realizado o mesmo procedimento experimental utilizado nos casos anteriores.

Como comentado e analisado para os casos anteriores, não existe componentes de seqüência zero nas correntes de excitação de linha, as quais ficam confinadas na malha do delta. Por outro lado, as correntes de linha contém harmônicas de seqüência positiva e negativa.

Em uma análise dos espectros harmônicos da figura 3.6 (b), verifica-se a predominância das harmônicas de ordens pares, especialmente às de segunda e quarta ordem, com amplitudes bastante significativas.

A figura 3.6 (c) mostra que, existe uma dependência praticamente linear entre as amplitudes harmônicas de baixa ordem devido a excitação c.c..

As correntes harmônicas de excitação de terceira e quarta ordens apresentam amplitudes elevadas, enquanto as de ordens superiores comportam-se de maneira a diminuir as suas amplitudes a medida que os níveis c.c. crescem, dentro da faixa de excitação considerada.

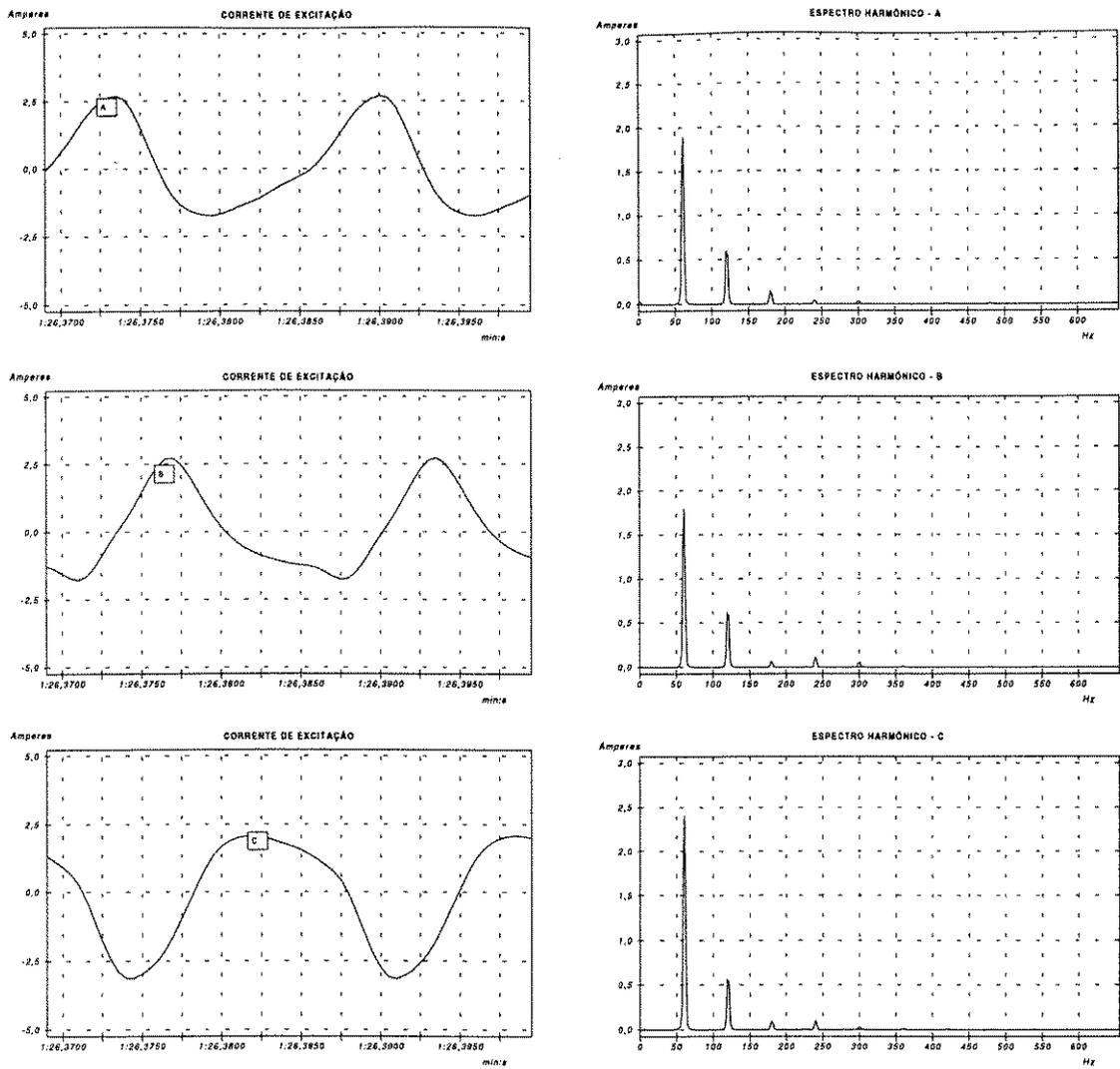
Conexão $\Upsilon\Upsilon$: Neste caso, os procedimentos experimentais foram idênticos aos anteriores e são ilustrados na figura 3.7. Nota-se pelos resultados, que a componente harmônica de segunda ordem possui uma amplitude bastante expressiva quando comparada com a fundamental, enquanto as demais ordens harmônicas apresentam valores quase desprezíveis.

Na figura 3.7 (c) observa-se que, o comportamento das ordens harmônicas em relação a variação dos níveis de injeção c.c., apresenta o mesmo aspecto visto nos casos anteriores, ou seja, uma relação aproximadamente linear para as harmônicas de baixa ordem.

Conexão $\Upsilon\Upsilon$: Para esta configuração, são realizados os mesmos procedimentos experimentais adotados para os casos anteriores e os resultados são mostrados na figura 3.8. Sem a excitação c.c., as correntes de excitação de linha são conhecidas por apresentarem componentes harmônicas de terceira ordem de elevadas amplitudes.

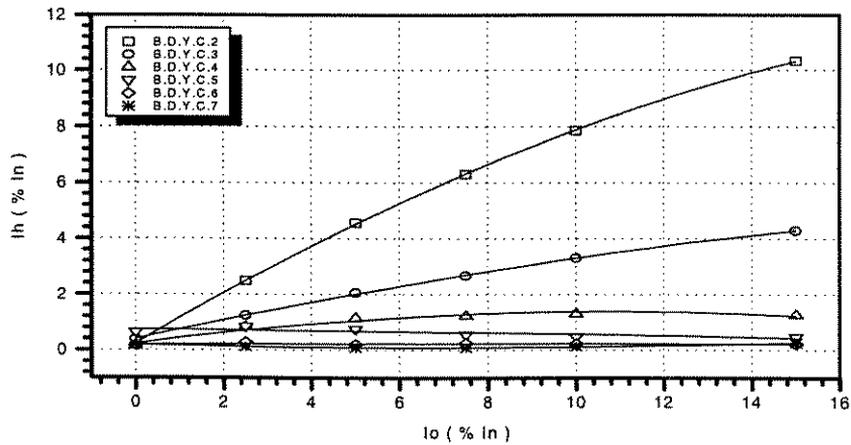
Sob o efeito da dupla excitação, e ainda considerando-se que neste caso todas as componentes seqüenciais circulam pelas linhas, verifica-se uma sensível amplificação das harmônicas de ordem ímpares com destaque para as múltiplas de três. Ressalta-se que os altos valores para as amplitudes da terceira ordem harmônica, verificados para excitação c.c. nula, são devidos unicamente às componentes de seqüência zero.

Como nos casos anteriores nota-se também o crescimento das amplitudes das ordens harmônicas pares na medida em que a excitação c.c. cresce. Destaca-se que, para uma excitação c.c. em torno de $9\% I_n$, a terceira harmônica possui amplitude superior a da segunda harmônica. Para níveis de excitação c.c superiores a $9\% I_n$, a segunda harmônica passa a ser predominante, uma vez que possui uma taxa de crescimento com relação a excitação c.c mais elevada, figura 3.8 (c).



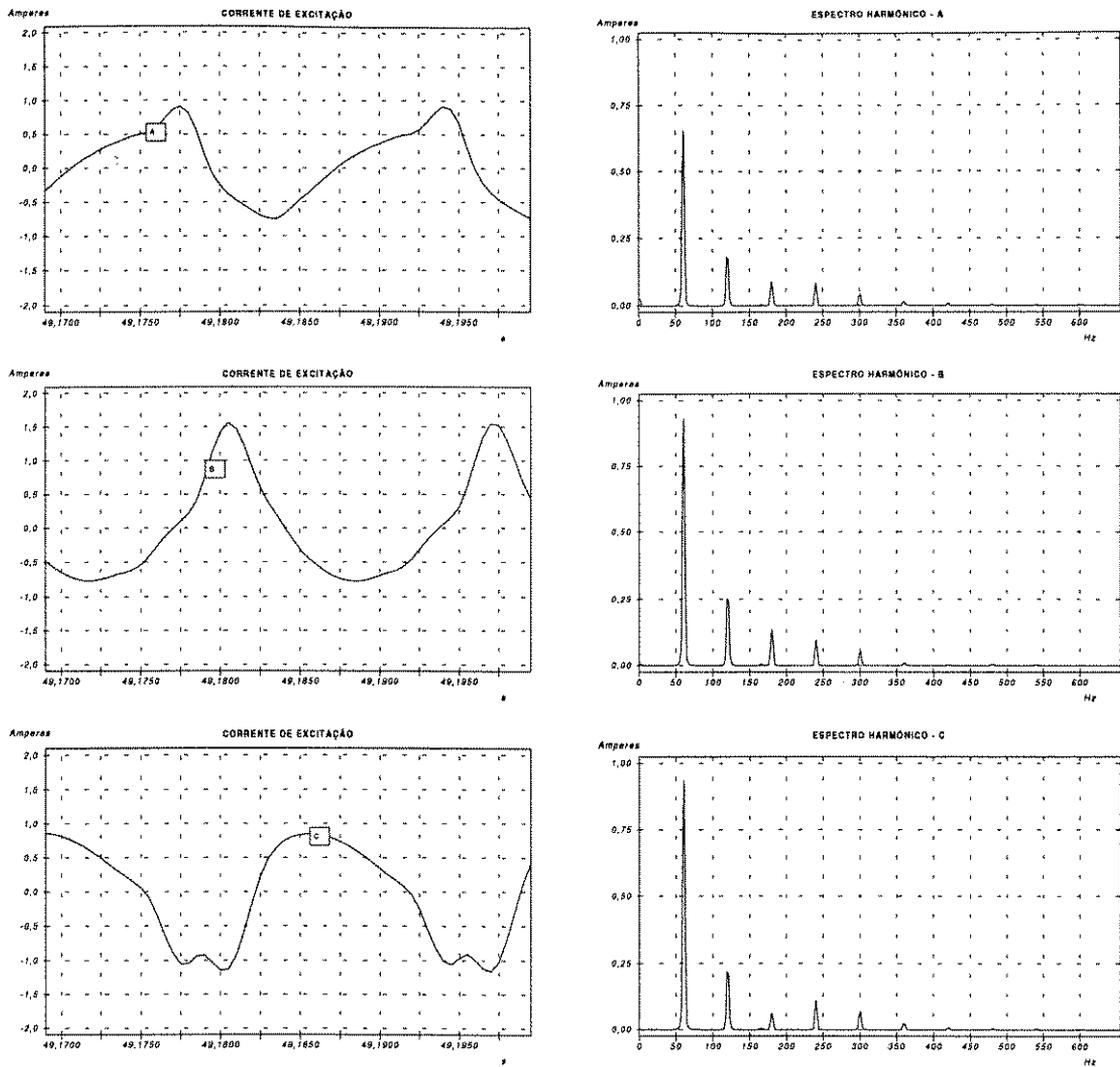
(a) Correntes de excitação - Fases A-B-C

(b) Espectro harmônico - fases A-B-C



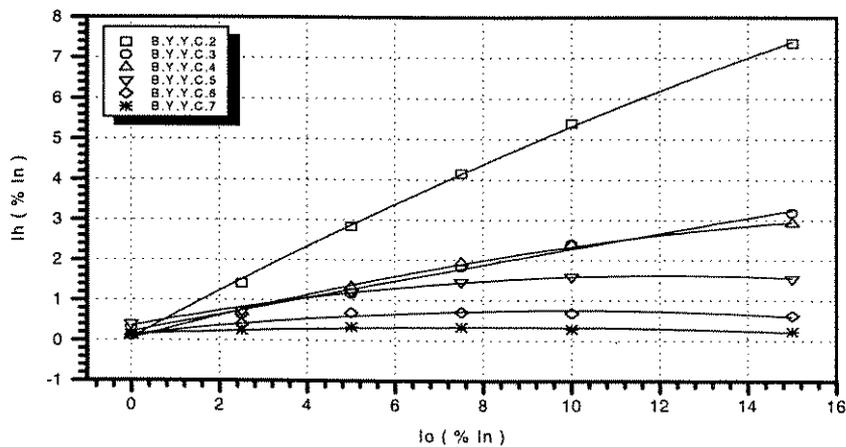
(c) - Amplitudes das harmônicas em função da excitação c.c - Fase C

Figura 3.4 -Forma de onda e espectro harmônico das correntes de excitação - conexão: ΔY .



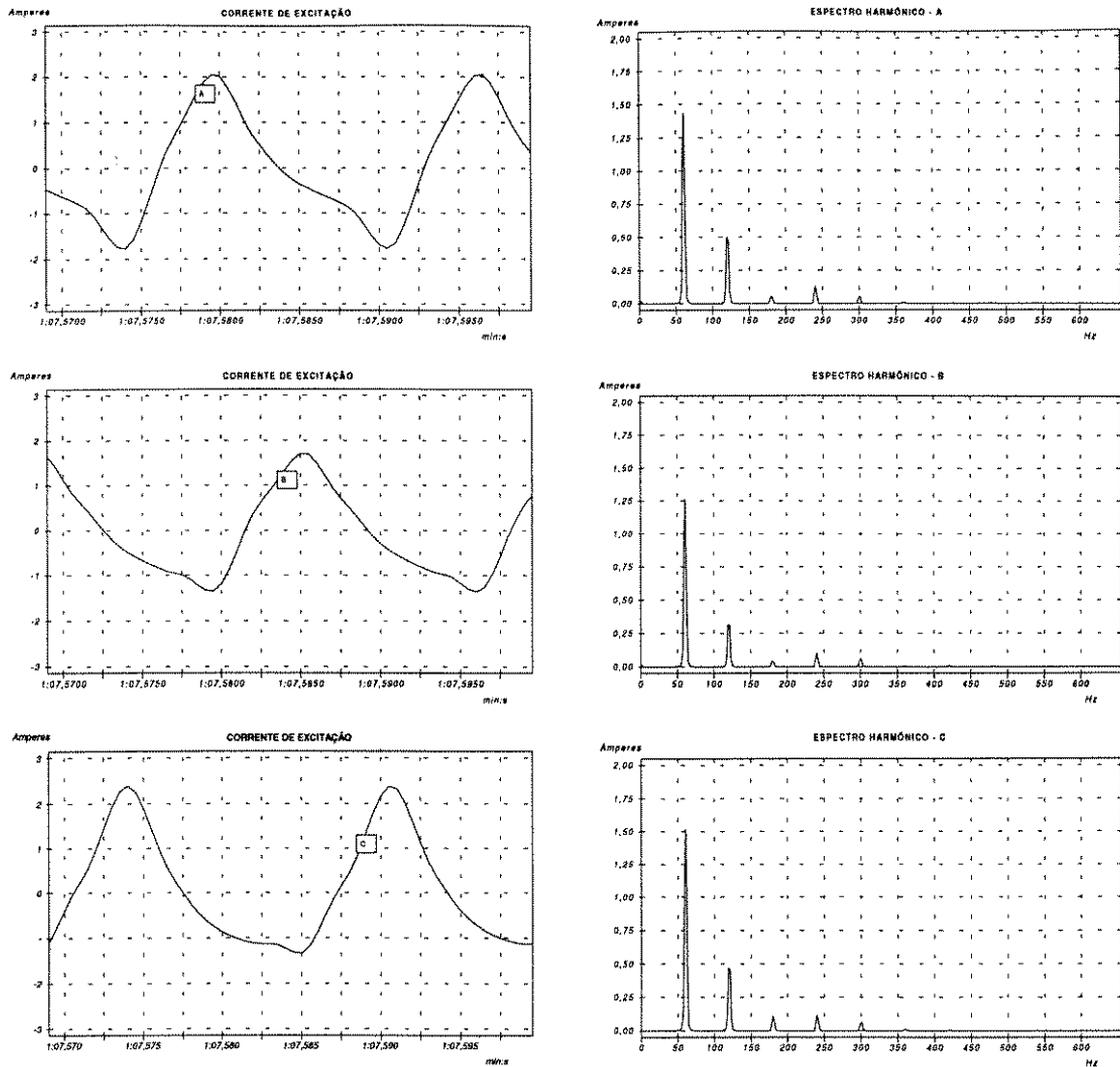
(a) Correntes de excitação - Fases A-B-C

(b) Espectro harmônico - Fases A-B-C



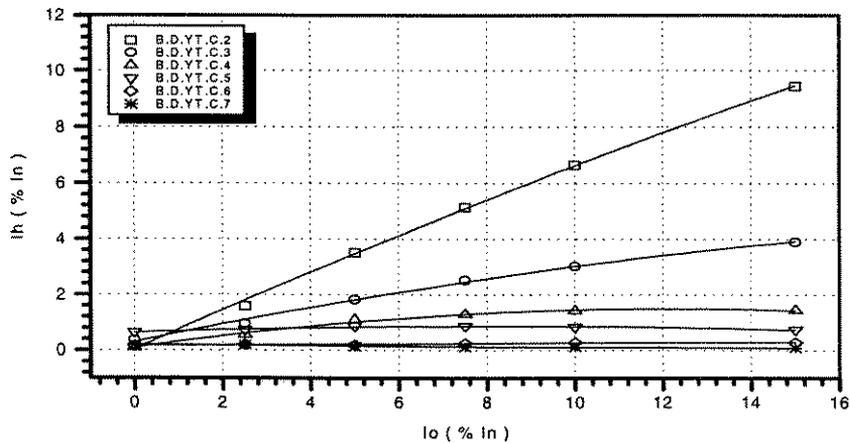
(c) - Amplitudes das harmônicas em função da excitação c.c. - fase C

Figura 3.5 - Forma de onda e espectro harmônico das correntes de excitação - conexão $\Upsilon\Upsilon$



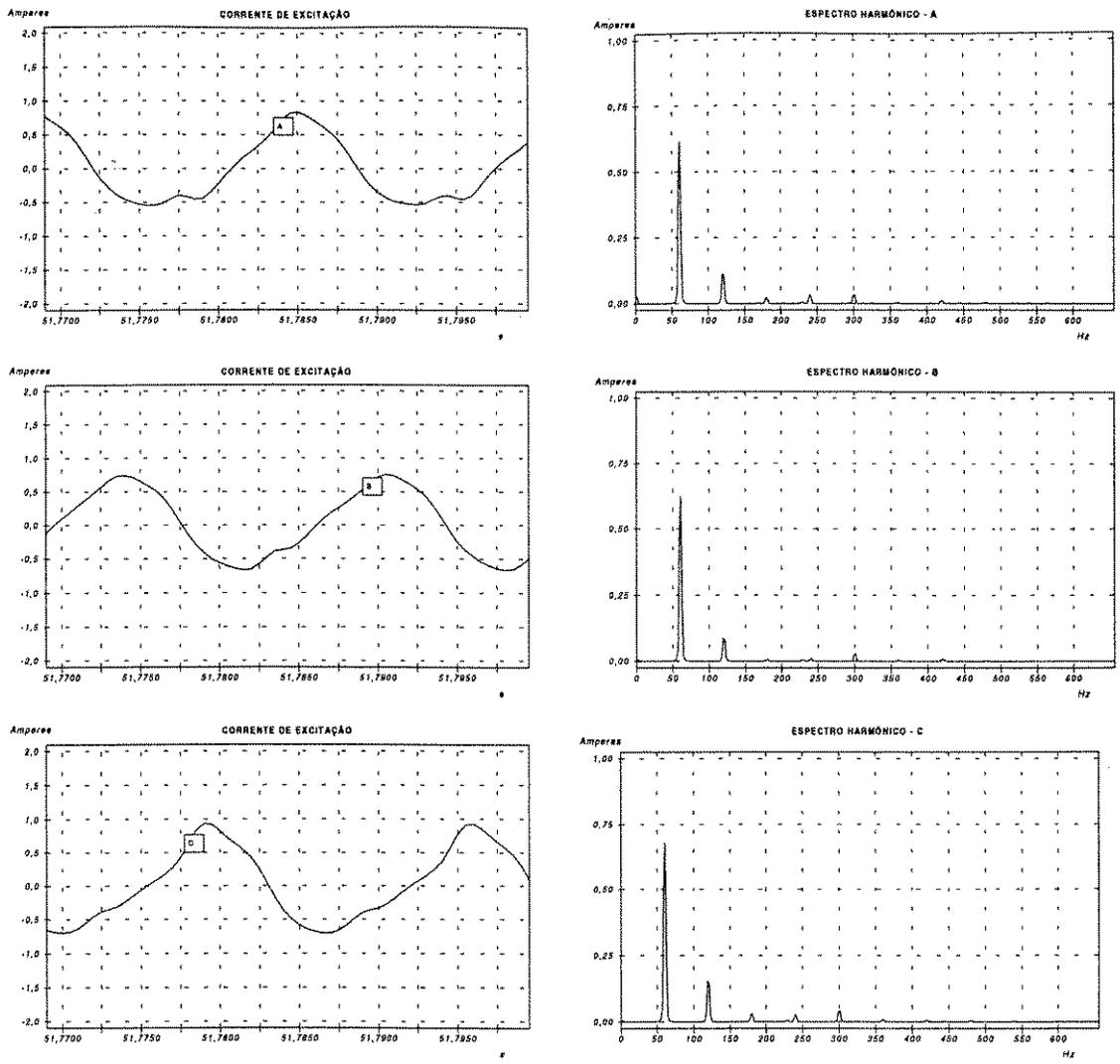
(a) Correntes de excitação Fases A-B-C

(b) Espectro harmônico - Fases A-B-C



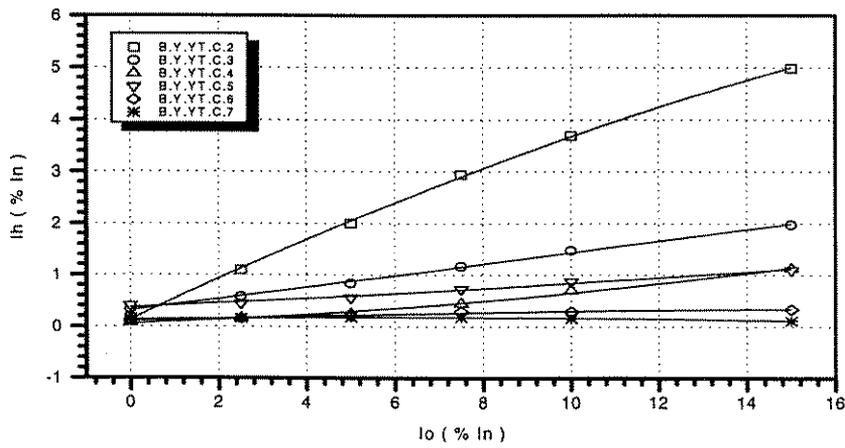
(c) - Amplitudes das harmônicas em função da excitação c.c - Fase C

Figura 3.6 - Forma de onda e espectro harmônico das correntes de excitação - conexão ΔY



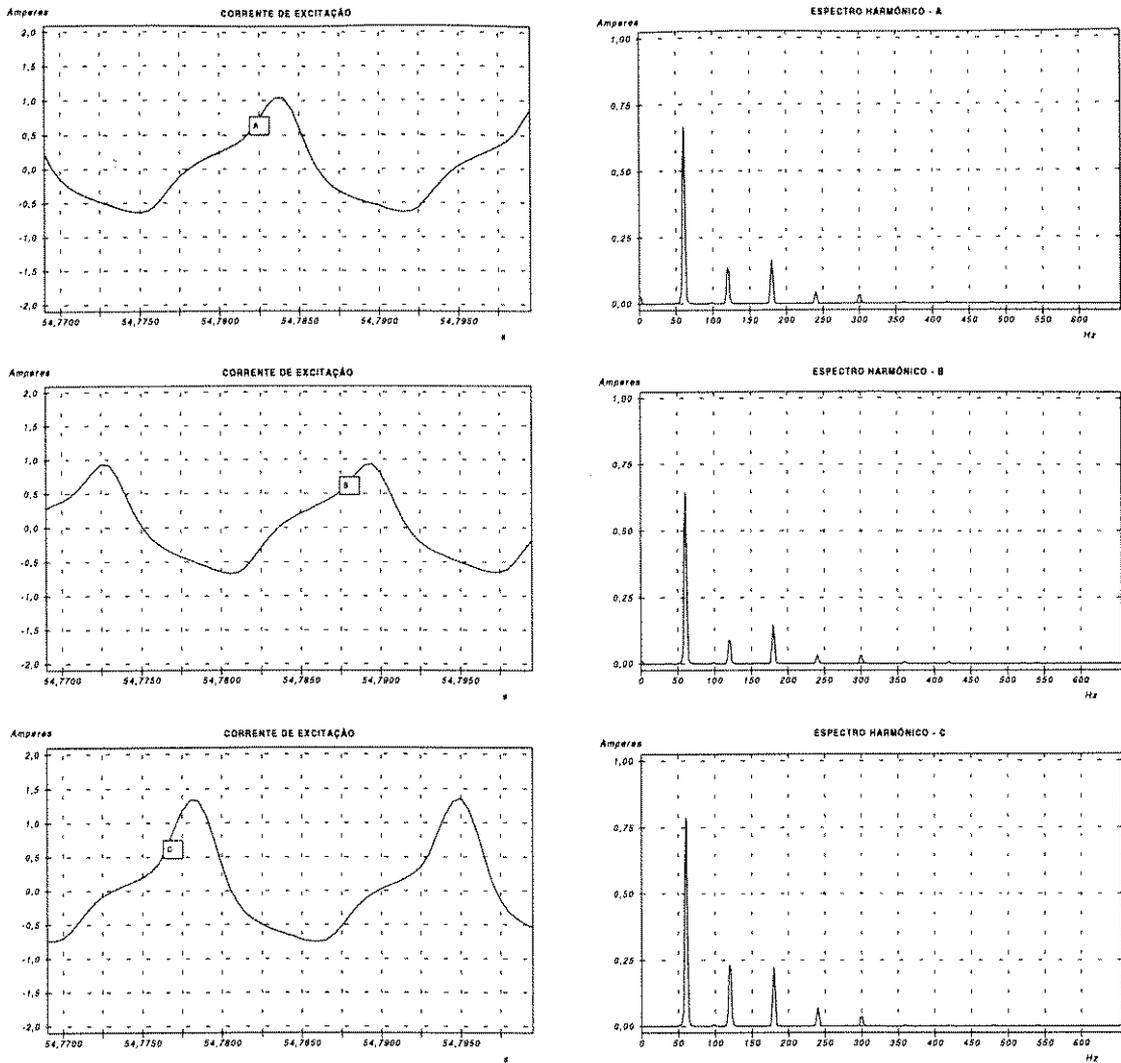
(a) Correntes de Excitação - Fases A-B-C

(b) Conteúdo harmônico - Fases A-B-C



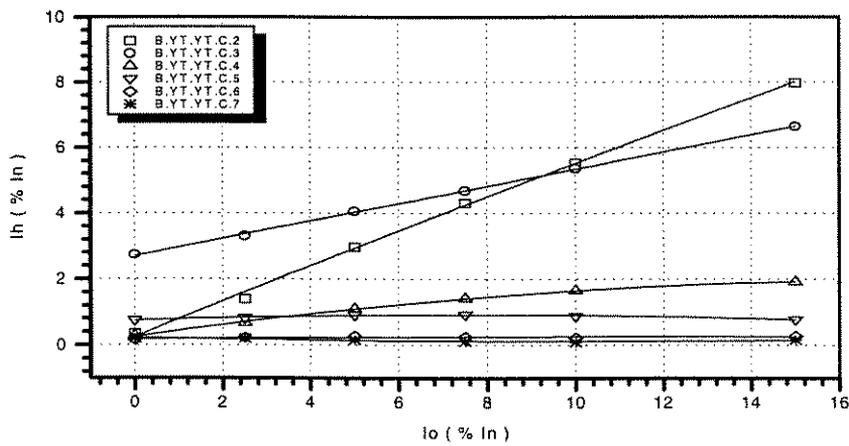
(c) - Amplitudes das harmônicas em função da excitação c.c - Fase. C

Figura 3.7 - Forma de onda e espectro harmônico das correntes de excitação - conexão $\Upsilon\Upsilon$



(a) Corrente de excitação - Fases A-B-C

(b) Conteúdo Harmônico - Fases A-B-C



(c) - Amplitudes das harmônicas em função da excitação c.c - Fase C

Figura 3.8 - Forma de onda e espectro harmônico das correntes de excitação - conexão $\Upsilon\Upsilon$

B.2 - Injeção Idêntica nas Três Fases - Para o caso de uma injeção de corrente contínua idêntica nas três fases, admitiu-se níveis de corrente contínua de 5% In. Ressalta-se que para este padrão particular de excitação c.c., as componentes harmônicas múltiplas de três apresentam apenas uma componente seqüencial, ou seja, seqüência zero.

Conexão $\Upsilon\Upsilon$: Para uma injeção equilibrada de corrente contínua nas três fases, verificou-se que para o banco de transformadores trifásico com esta conexão, o comportamento das correntes de excitação é idêntico nas três fases e que apresentam todas as componentes harmônicas, como pode ser observado na figura 3.9 (a).

Conexões $\Delta\Upsilon$ e $\Upsilon\Upsilon$: Para estas conexões são válidas as mesmas observações feitas no caso anterior, com relação a distribuição equilibrada das correntes de excitação c.c.. Os resultados para estas conexões são mostrados nas figuras 3.9 (b) e 3.9(c), respectivamente.

Pode ser observado que nas correntes de excitação, para ambas as conexões, não há componentes de seqüência zero e que praticamente não existe influência das harmônicas “triplens”. Por outro lado, a componente harmônica de segunda ordem apresenta, a exemplo dos casos anteriores, amplitudes elevadas.

É importante salientar que os bancos de transformadores, para este caso, possui um comportamento fundamentalmente diferente dos transformadores trifásicos com núcleo de três colunas, onde a distribuição eqüitativa das componentes contínuas entre as fases praticamente não provoca a saturação c.c. e conseqüentemente não altera o conteúdo harmônico das correntes de excitação [6].

Para os transformadores do tipo banco de monofásicos, como não há acoplamento magnético entre as unidades, os efeitos das injeções equilibradas passa a ter um caráter parecido com os casos anteriores, ou seja, a corrente de excitação em cada unidade transformadora apresenta-se fortemente deformada apresentando um elevado conteúdo harmônico.

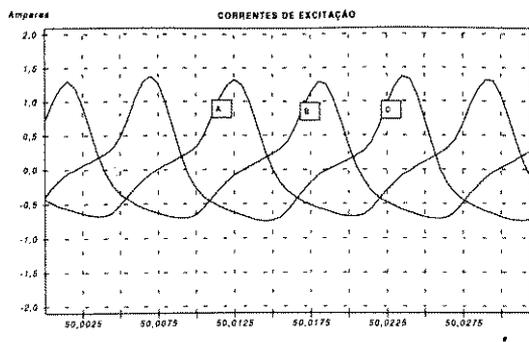
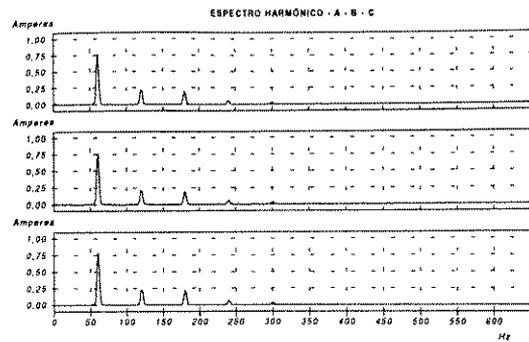
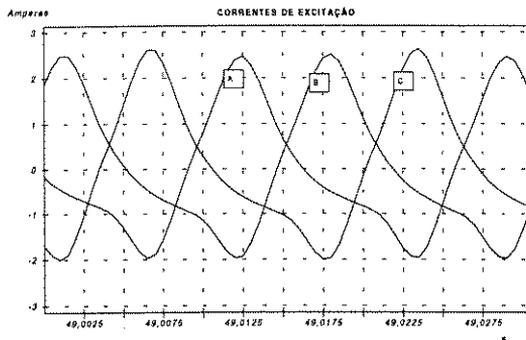
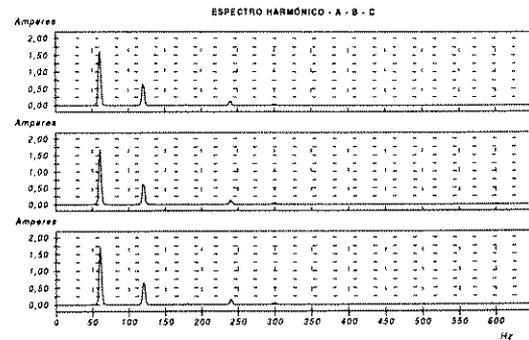
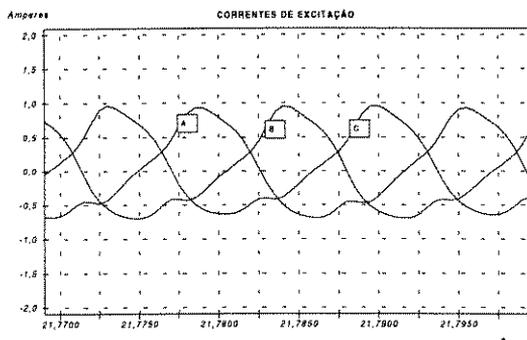
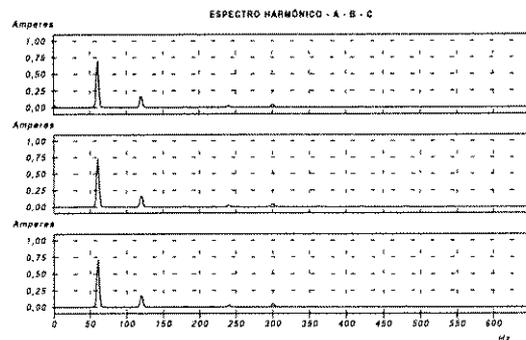
(a) Correntes de excitação - $\Upsilon\Upsilon$ (a) Espectro harmônico - $\Upsilon\Upsilon$ (b) Corrente de excitação - $\Delta\Upsilon$ (b) Espectro harmônico - $\Delta\Upsilon$ (c) Corrente de excitação - $\Upsilon\Upsilon$ (c) Espectro harmônico - $\Upsilon\Upsilon$

Figura 3.9 - Forma de onda e espectro harmônico das correntes de excitação para injeção cc equilibrada

3.3.3 - Análise Comparativa dos Resultados

Para se ter uma idéia da variação das amplitudes das segunda e terceira harmônicas, sob efeito da dupla excitação c.a. / c.c., para as diferentes conexões estudadas, as mesmas são apresentadas nos gráficos da figura 3.10.

O gráfico da figura 3.10 (a) mostra uma dependência quase que linear das

componentes harmônicas de segunda ordem quando o banco trifásico de transformadores é submetido a uma variação dos níveis de injeção de corrente contínua, independentemente do tipo de conexão empregada.

A análise comparativa dos resultados mostra uma maior sensibilidade, quando da variação dos níveis de injeção c.c., nas conexões em delta no primário para cada um dos padrões de excitação adotados. Tal fato se deve exclusivamente às relações entre as respectivas grandezas de linha / fase.

O gráfico da figura 3.10 (b) mostra que também existe uma dependência quase linear da componente harmônica de terceira ordem em função da variação da injeção c.c. Neste caso, a maior sensibilidade quanto a dupla excitação é verificada para a conexão dos enrolamentos primários em estrela. Tal fato se deve fundamentalmente a presença das componentes harmônicas de seqüência zero.

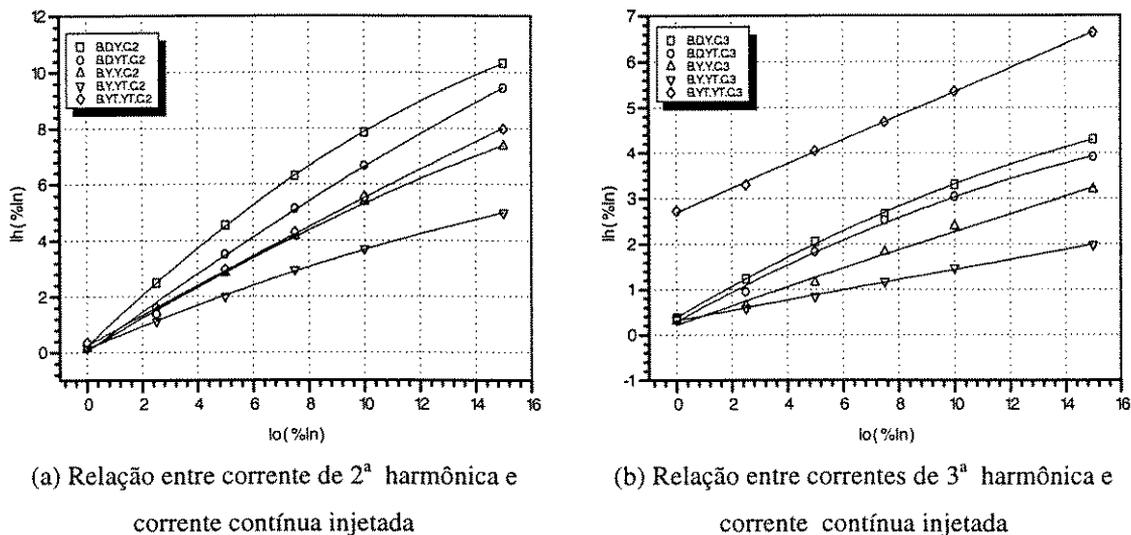


Figura 3.10 - Comportamento da segunda e terceira ordens harmônicas em função da variação da injeção c.c.

Observa-se que para quase todos os casos, a segunda harmônica apresenta amplitudes menores do que a terceira harmônica.

3.4 - Transformador Trifásico com Núcleo Envolvido

3.4.1 - Características Físicas do Transformador

A figura 3.11 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.

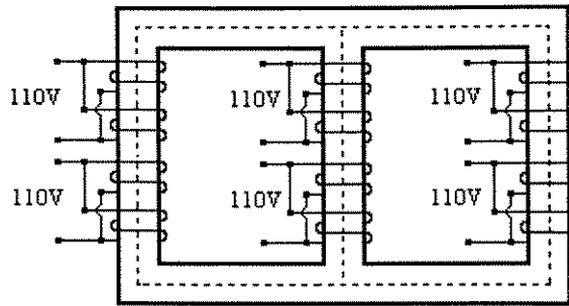


Figura 3.11 - Modelo físico do transformador trifásico com núcleo envolvido

Os transformadores trifásicos com núcleo envolvido utilizados no ensaios experimentais apresentam as mesmas características construtivas e com os seguintes parâmetros nominais:

Potência Nominal	: 1,0 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 Ohmica dos enrolamentos	: 1,0 Ohm

3.4.2 - Resultados Experimentais e Análises

A figura 3.12 mostra o circuito experimental utilizado, para a conexão dos enrolamentos em delta / estrela isolada. Para as demais conexões analisadas, adotou-se o mesmo procedimento.

O lado dos enrolamentos primário dos dois transformadores foram conectados em

paralelo e submetidos a uma mesma excitação c.a. nominal, enquanto os lados secundários foram conectados entre si de forma a anular a força eletromotriz c.a.. Para as demais conexões adotou-se o mesmo procedimento.

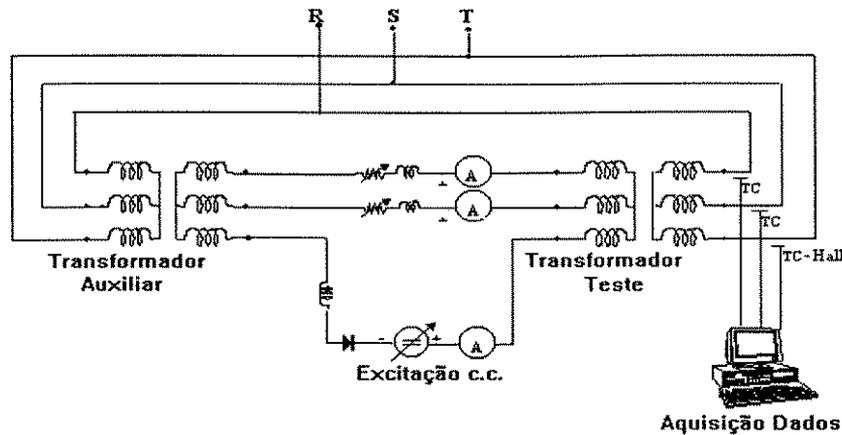


Figura 3.12 Arranjo experimental para o transformador trifásico com núcleo tipo envolvido - ligação YY

A fonte c.c. foi inserida no lado secundário entre as fases C para as conexões não aterradas e entre os pontos de neutro para as conexões estrela aterrada.

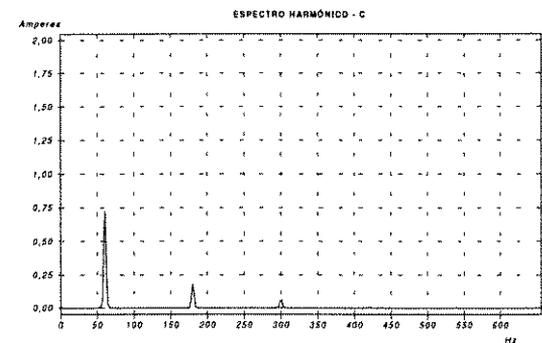
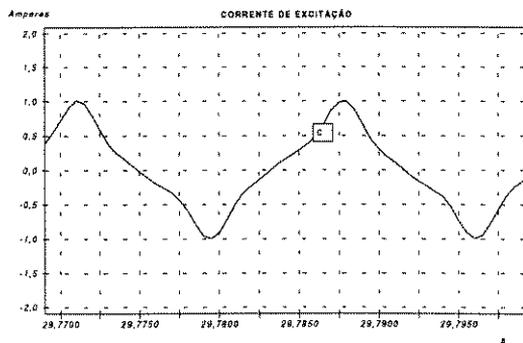
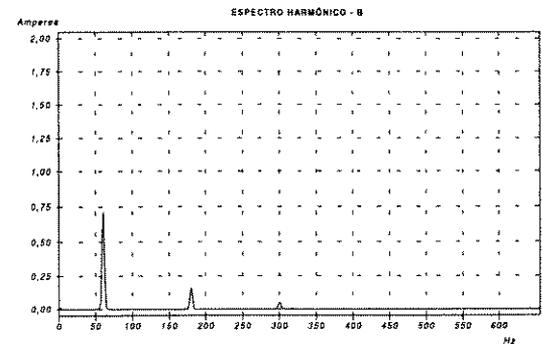
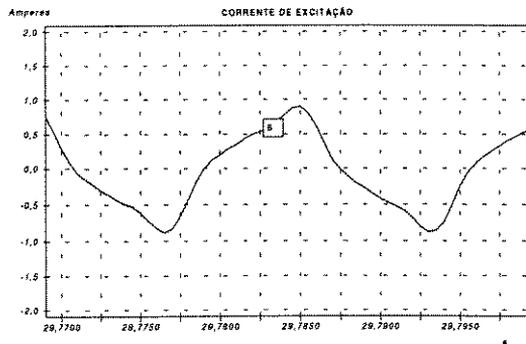
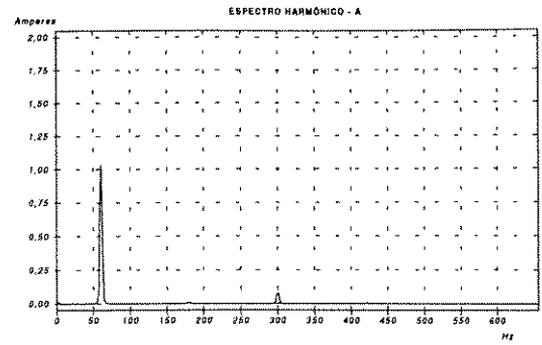
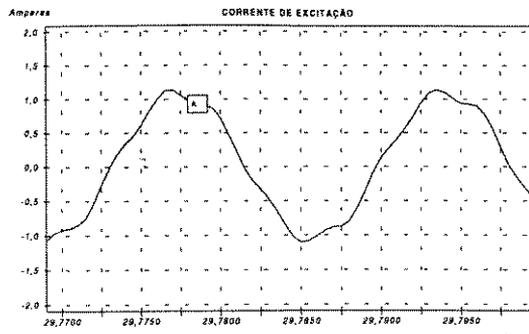
As figuras 3.13, 3.14 e 3.15, ilustram as formas de onda das correntes de excitação e os seus respectivos espectros harmônicos, para o transformador conectado em ΔY , $Y Y$ e $Y Y$ respectivamente, somente com excitação c.a., ou seja, sob condições normais de operação.

Estas ilustrações são utilizadas como referência para a comparação com as situações onde o transformador é duplamente excitado.

Na conexão ΔY , como os enrolamentos do primário estão fechados em delta, este propicia um caminho interno para as componentes de seqüência zero das correntes de excitação, ou seja, as harmônicas “triplens”, garantindo assim um fluxo magnético praticamente senoidal.

Por outro lado, devido ao desbalanceamento do núcleo magnético e da fonte c.a. de alimentação, estão presentes as componentes de terceira ordem harmônica de seqüência positiva e negativa. Isto fica evidenciado observando-se os espectros harmônicos da figura 3.13 (b).

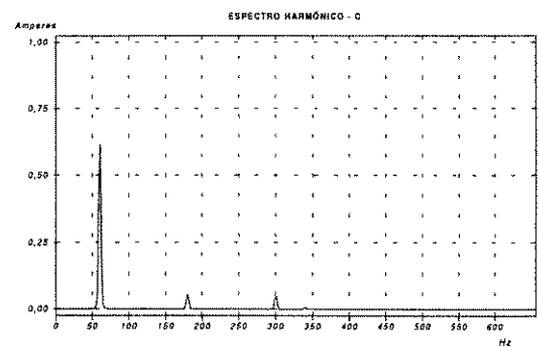
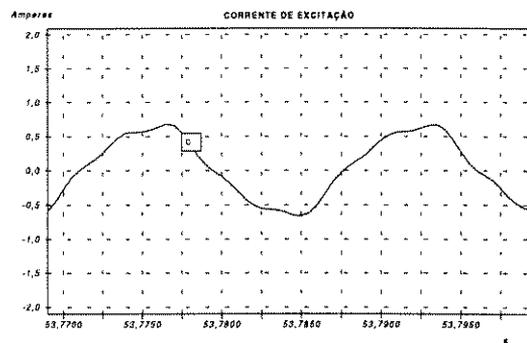
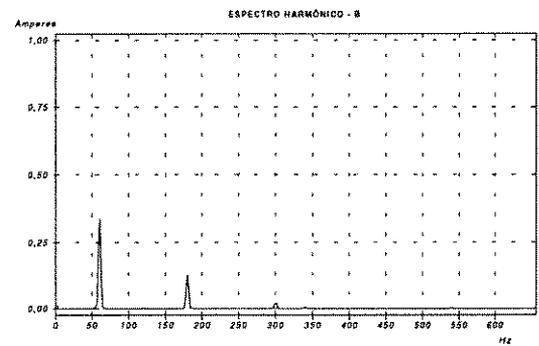
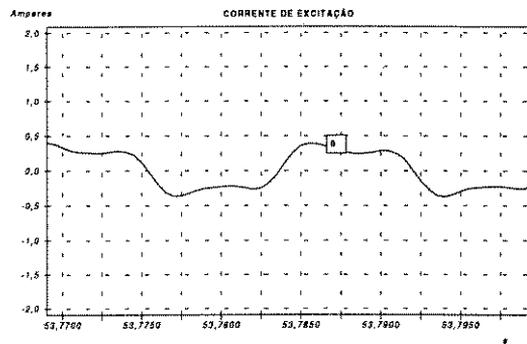
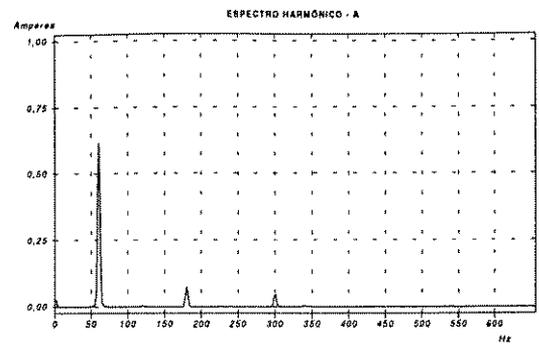
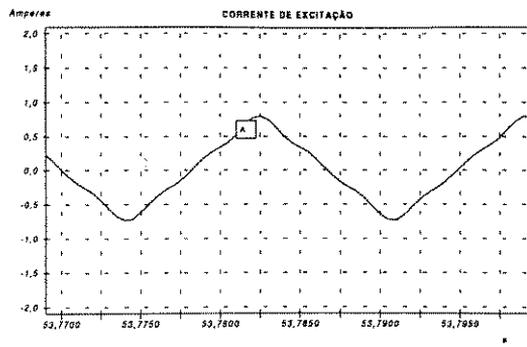
Para a ligação $Y Y$, ao contrário do caso anterior, não há nenhum caminho alternativo para circulação das componentes harmônicas de seqüência zero das correntes de excitação. Com o desbalanceamento da fonte de suprimento e do núcleo magnético, estão presentes nas correntes de excitação de linha as harmônicas de terceira ordem, como mostra a figura 3.14.



(a) Correntes de Excitação - Fases A-B-C

(b) Conteúdo Harmônico - A-B-C

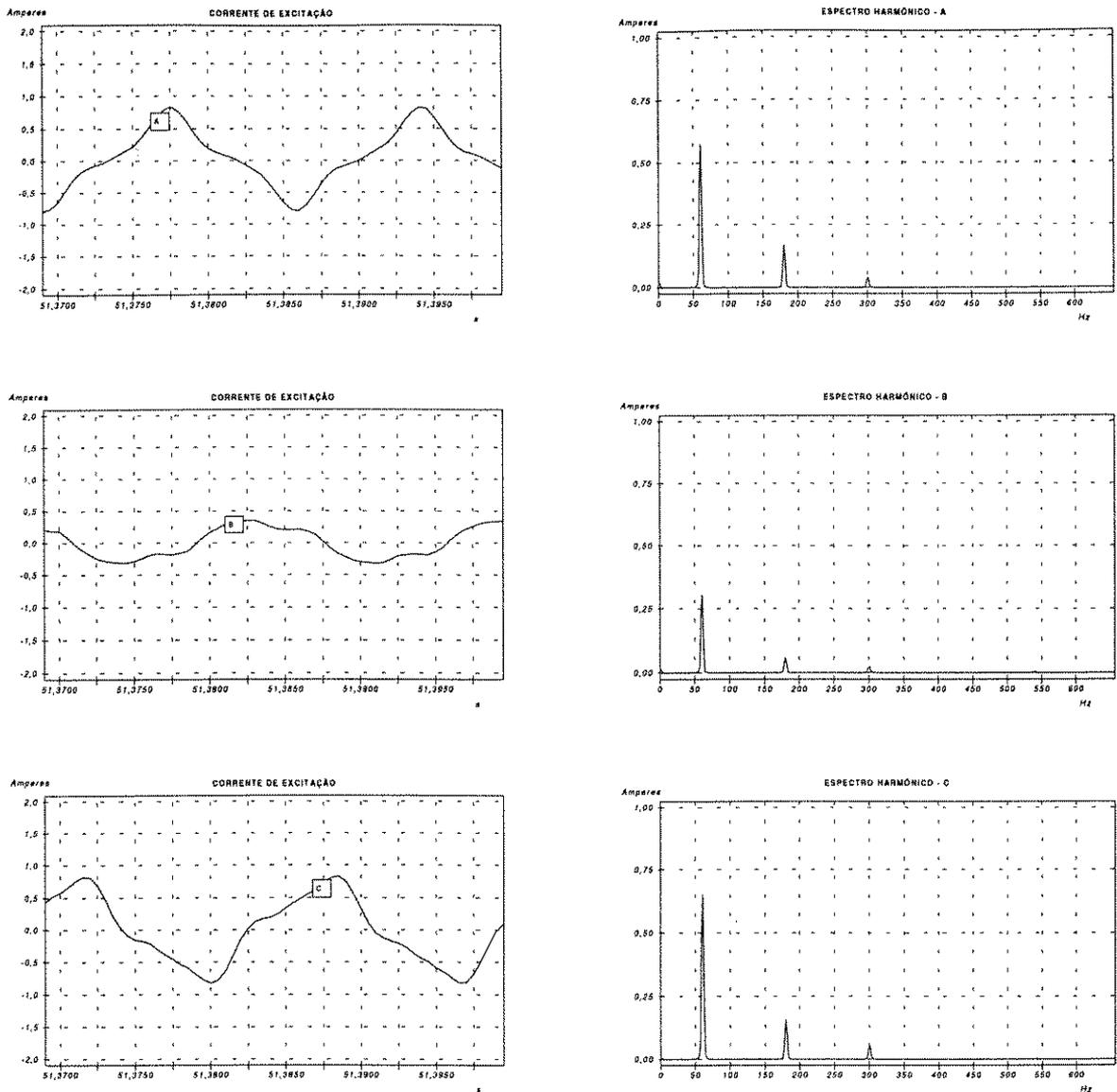
Figura 3.13 -Forma de onda e espectro harmônico das correntes de excitação em condições normais - $\Delta\gamma$



(a) Correntes de Excitação

(b) Conteúdo Harmônico

Figura 3.14 -Forma de onda e espectro harmônico das correntes de excitação em condições normais - ΥΥ



(a) Correntes de Excitação - Fases A-B-C

(b) Espectro Harmônico Fases A-B-C

Figura 3.15 -Formas de onda e conteúdo harmônico das correntes de excitação em condições normais - $\Upsilon\Upsilon$

Nestas condições, o fluxo magnético apresenta-se bastante distorcido, com a predominância da componente de terceira harmônica e resultando também em uma forte distorção nas tensões induzidas fase-neutro.

Na conexão $\Upsilon\Upsilon$, tanto o fluxo magnético quanto a tensão induzida fase-neutro são praticamente senoidais, enquanto as correntes de excitação são conhecidas por apresentarem uma acentuada distorção harmônica devido principalmente às altas amplitudes da componente de terceira ordem harmônica que podem alcançar valores da ordem de 30% a 50 % da componente fundamental.

Na figura 3.15 encontram-se as formas de onda das correntes de excitação nas três

fases do transformador trifásico obtidas experimentalmente para a conexão $\Upsilon\Upsilon$.

De um modo geral, como as amplitudes das ordens harmônicas acima da sétima são normalmente muito baixas, este trabalho é limitado ao estudo da influência da dupla excitação até a frequência de 420 Hz (7^a harmônica).

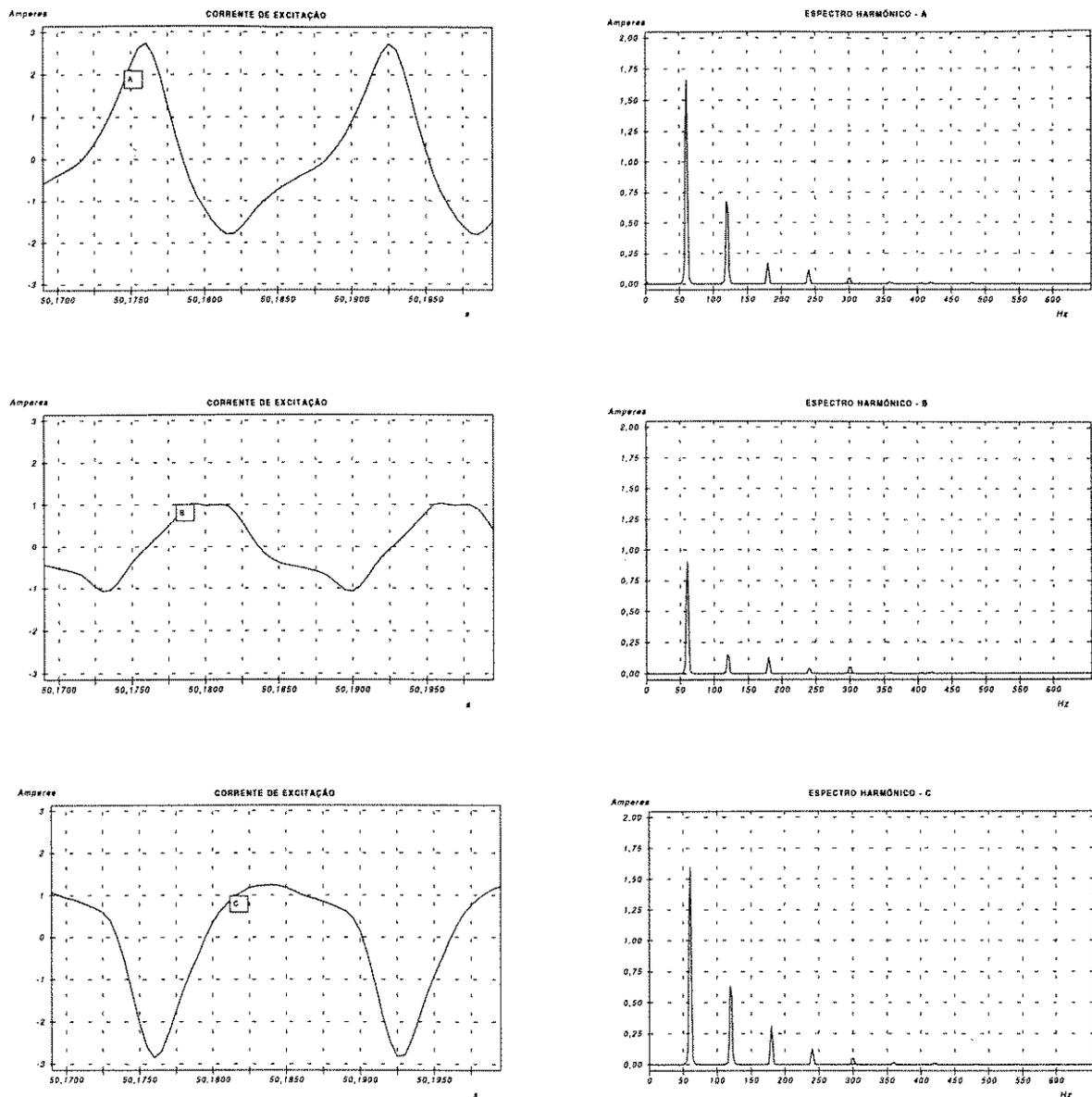
No desenvolvimento a seguir são então analisados os dois casos básicos de ocorrência de dupla excitação, semelhantes àqueles analisados para o banco trifásico, para diferentes conexões dos enrolamentos do transformador trifásico de núcleo envolvido.

Caso A : Neste ensaio admitiu-se um padrão de injeção de componente contínua compatível com a operação não idealizada de instalações conversoras ou compensadoras estáticas do tipo reator controlado a tiristores. Considerando pois o exposto, por se tratarem de cargas isoladas, a soma das correntes contínuas provenientes de operações assimétricas destes equipamentos é nula [5]. Foi adotado como base para os ensaios experimentais a seguir, os seguintes níveis de injeção c.c.: $I_{a_0} = 30\% I_0$; $I_{b_0} = 70\% I_0$; $I_{c_0} = -100,0\% I_0$., na linhas A , B e C respectivamente, com I_0 variando de 0 a 15% da corrente nominal do transformador.

Particularmente, nos casos ilustrados a seguir, são apresentados graficamente as formas de onda das correntes de excitação nas linhas e seus respectivos conteúdos harmônicos para um excitação c.c. de $I_0 = 10\% I_n$.

Conexão $\Delta\Upsilon$:Com esta conexão, as correntes de excitação de linha tornam-se fortemente deformadas apresentando todas as componentes harmônicas, figura 3.16 (a). Analisando-se o conteúdo harmônico destas correntes , pode ser observado que há uma predominância das componentes harmônicas de ordens pares e uma amplificação das amplitudes das componentes harmônicas de ordens ímpares.

Como o primário está conectado em delta, as componentes de seqüência zero das correntes de excitação naturalmente não circulam pela linhas. Entretanto, como a saturação c.c é desbalanceada, as harmônicas múltiplas de três possuem também componentes nas seqüências positiva e negativa e desta forma se fazem presentes nas linhas de alimentação.



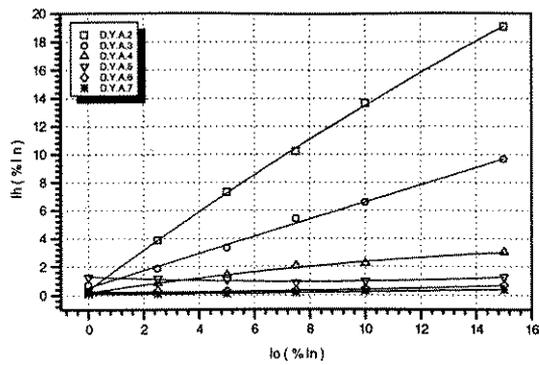
(a) Correntes de excitação - Fases A-B-C

(b) Conteúdo Harmônico - Fases A-B-C

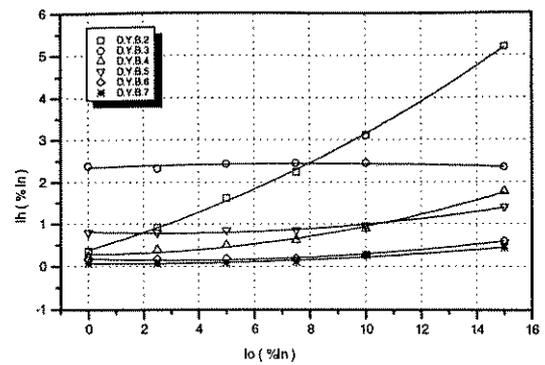
Figura 3.16 -Forma de onda e espectro harmônico das correntes de excitação - conexão: ΔY .

A figura 3.17, ilustra o comportamento das ordens harmônicas em função da variação dos níveis de excitação c.c. em porcentagem da corrente nominal do transformador para a referida conexão.

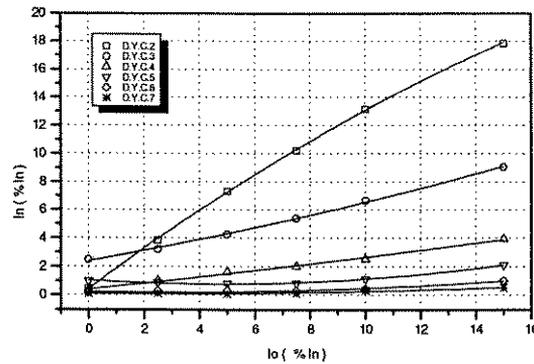
Pode ser observado que existe uma dependência quase linear entre as amplitudes harmônicas de baixa ordem, tais como a segunda e terceira harmônicas, em função da variação c.c., enquanto as amplitudes de ordem superior praticamente se mantêm constante apresentando uma leve diminuição a medida em que os níveis c.c. aumentam.



(a) Fase A



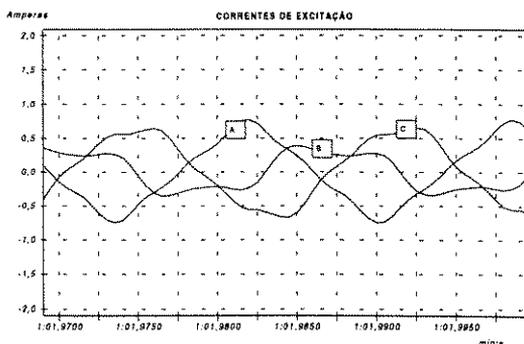
(b) Fase B



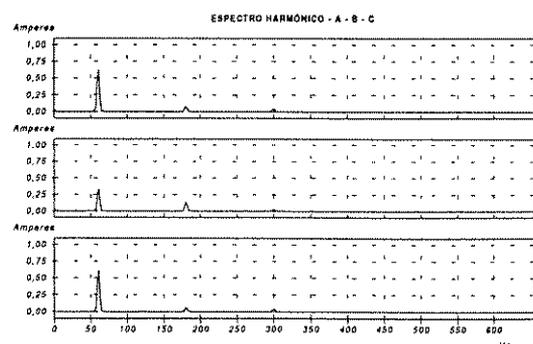
(c) Fase C

Figura 3.17 - Comportamento das amplitudes harmônicas em função da variação da excitação c.c. - conexão - ΔY .

Conexão YY : Com esta conexão, e sem a presença de componentes contínuas, as correntes harmônicas de excitação de seqüência zero são suprimidas pelo neutro isolado. Logo, a corrente de excitação conterá somente as componentes harmônicas de seqüência positiva e negativa e ainda assim com baixas amplitudes, conforme mostra a figura 3.18.



(a) Corrente de excitação Fases A-B-C



(b) Espectro harmônico Fases A-B-C

Figura 3.18 - Forma de onda e conteúdo harmônico das correntes de excitação - conexão YY .

Quando o transformador trifásico é submetido a uma excitação c.c., pode ser

observado, mais uma vez, a forte distorção na forma de onda das correntes de excitação c.a. em virtude do aparecimento e predominância das harmônicas de ordens pares bem como a amplificação das harmônicas de ordens ímpares, como ilustra a figura 3.19. A presença de harmônicas “triplens” nas correntes de excitação é justificada pelas razões já expostas.

A Figura 3.20, ilustra a variação das amplitudes harmônicas das correntes de excitação c.a em função da variação dos níveis de injeção c.c..

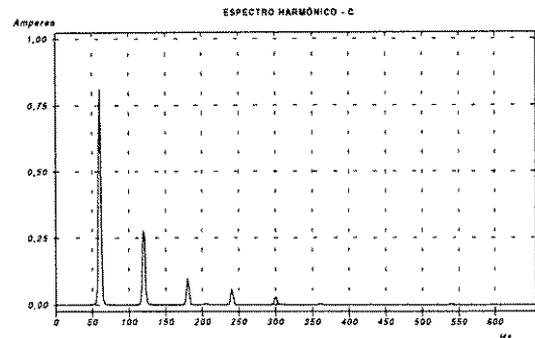
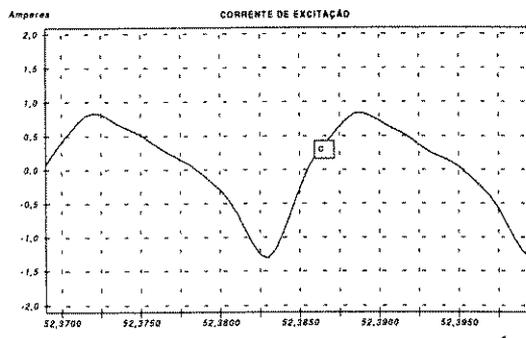
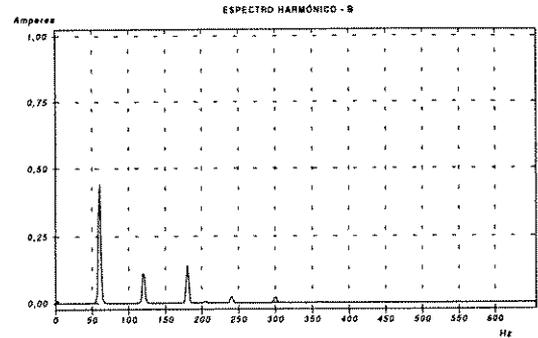
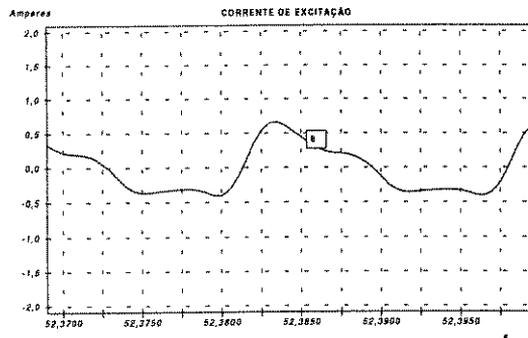
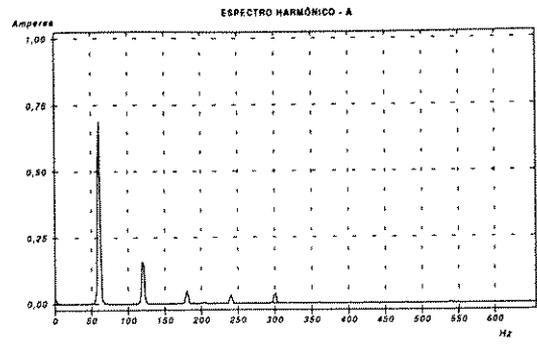
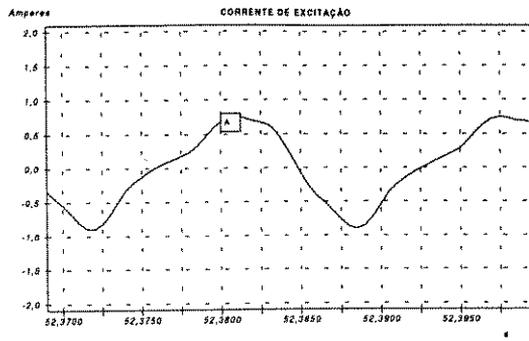
Percebe-se que, a medida em que o nível c.c. é aumentado, a influência sobre as harmônicas de ordens pares é mais acentuada, enquanto as harmônicas de ordens superiores apresentam um pequeno decaimento.

Caso B: Injeção de correntes contínuas provenientes de retorno por terra de sistemas de transmissão em corrente contínua ou induções geomagnéticas. Devido a natureza deste padrão de excitação c.c., este caso somente se aplica a transformadores que possuem pelo menos um dos seus enrolamentos em estrela aterrada.

Devido ao desbalanceamento das fases nas redes elétricas não é comum ter-se uma distribuição equitativa das correntes contínuas. Com o objetivo de reproduzir estas características, no procedimento adotado procurou-se analisar o comportamento dos transformadores operando sob duas condições distintas, sendo a primeira realizada com uma distribuição desbalanceada das correntes contínuas entre as fases e a segunda com uma distribuição idêntica nas três fases.

B.1 - Injeção Desbalanceada - No ensaio para uma distribuição desbalanceada da injeção c.c, adotou-se os seguintes níveis de correntes contínuas : $I_{a_0} = 30\% I_0$; $I_{b_0} = 20\% I_0$ e $I_{c_0} = 50\% I_0$, nas fases A, B e C respectivamente. Neste caso adotou-se corrente pelo condutor neutro, I_0 variando entre 0 e 15% I_n .

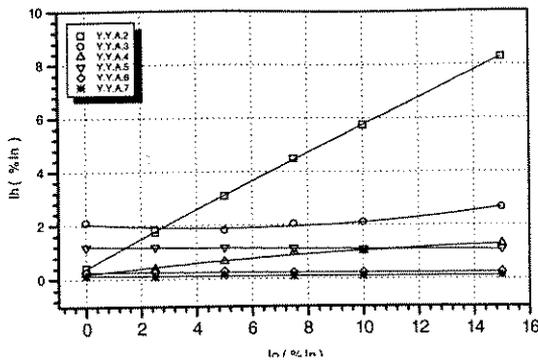
A exemplo dos ensaios anteriores, apresenta-se as formas de onda das correntes nas linhas e seus respectivos conteúdos harmônicos para o caso particular quando $I_0 = 10\% I_n$.



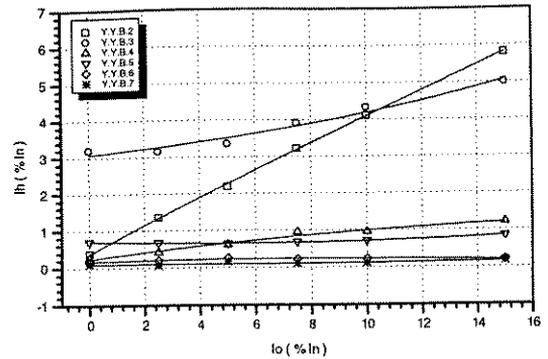
(a) Correntes de excitação - Fases A - B - C

(b) Conteúdo Harmônico - Fases A - B - C

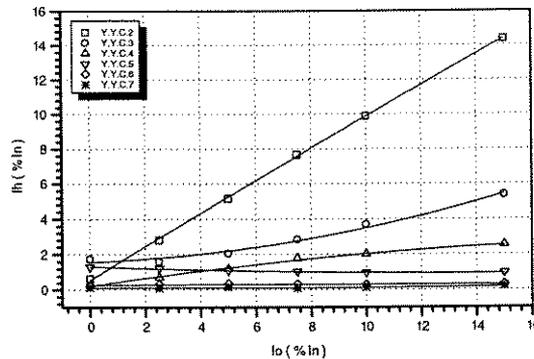
Figura 3.19 - Forma de onda e espectro harmônico das correntes de excitação - conexão $\Upsilon\Upsilon$.



(a) Fase A



(b) Fase B



(c) Fase C

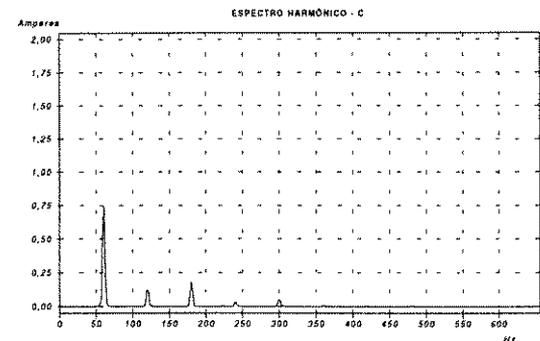
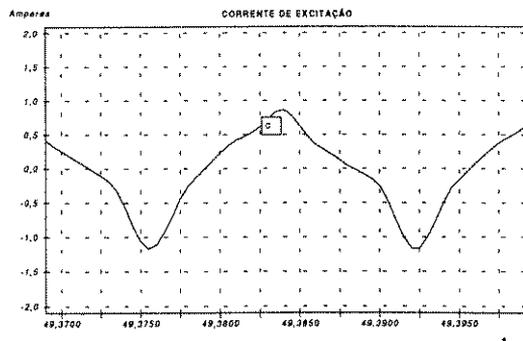
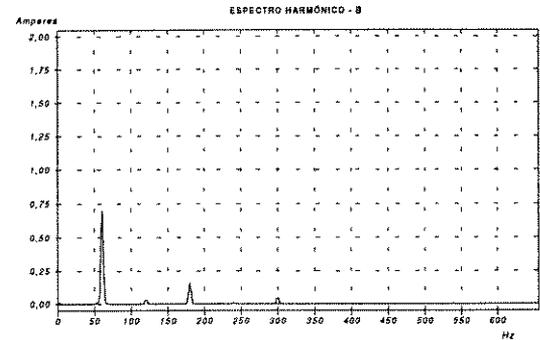
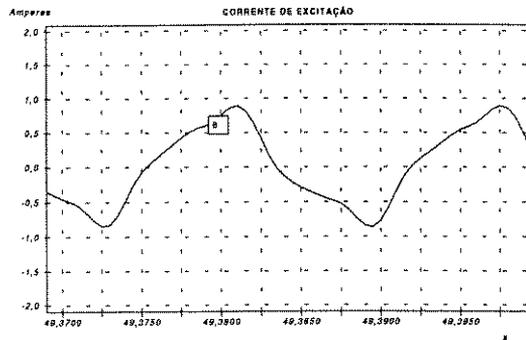
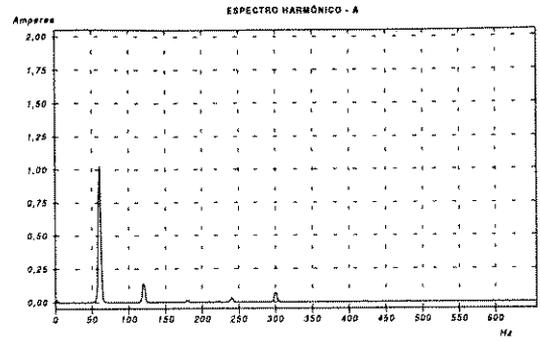
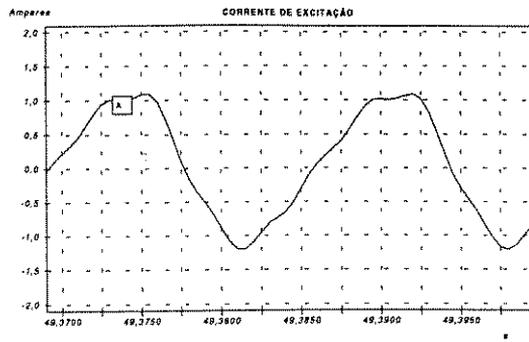
Figura 3.20 - Amplitudes harmônicas em função da variação da injeção c.c - conexão - YY.

Conexão ΔY : Com o transformador trifásico de núcleo envolvido conectado em delta-estrela aterrada, foi realizado o mesmo procedimento experimental dos casos anteriores.

Neste caso, como comentado anteriormente, não existe componentes de seqüência zero nas correntes de excitação de linha, as quais ficam confinadas à malha do delta, mas estão presentes nestas correntes as harmônicas de seqüência positiva e negativa.

Em uma análise dos espectros harmônicos da figura 3.21, verifica-se o aumento das amplitudes das harmônicas de ordens ímpares e o aparecimento das harmônicas de ordens pares, especialmente as de segunda e quarta ordem, com amplitudes bastante significativas.

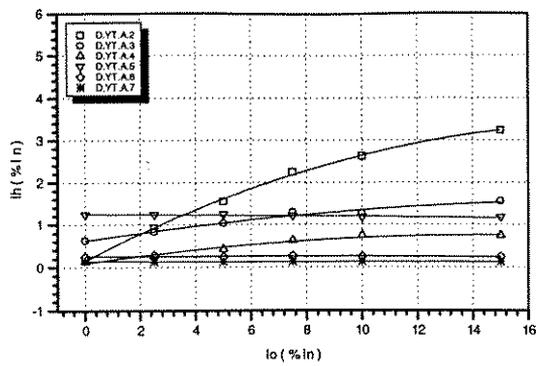
Pode ser observado nos gráficos da figura 3.22 que existe uma dependência quase linear entre as amplitudes harmônicas de baixa ordem e a corrente contínua injetada. As correntes harmônicas de excitação de terceira e quarta ordens apresentam amplitudes elevadas, enquanto as de ordens superiores comportam-se de maneira a diminuir e ou manter constante as suas amplitudes a medida que os níveis c.c. crescem, dentro da faixa de excitação considerada.



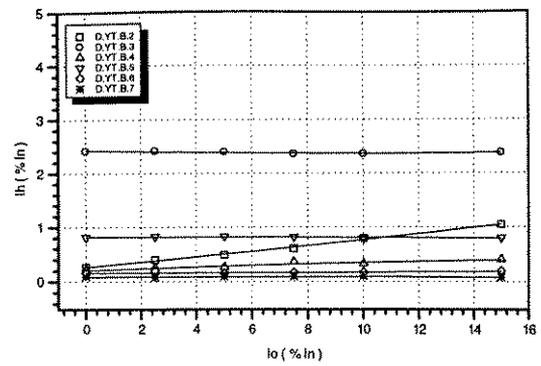
(a) Correntes de excitação - fases A - B - C

(b) Conteúdo Harmônico - fases A - B - C

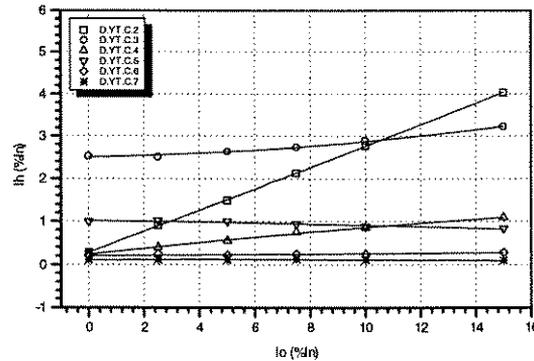
Figura 3.21 - Formas de onda e conteúdo harmônico das correntes de excitação de linha - conexão ΔY :



(a) Fase A



(b) Fase B

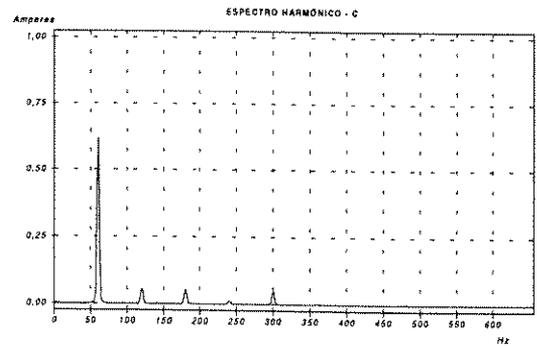
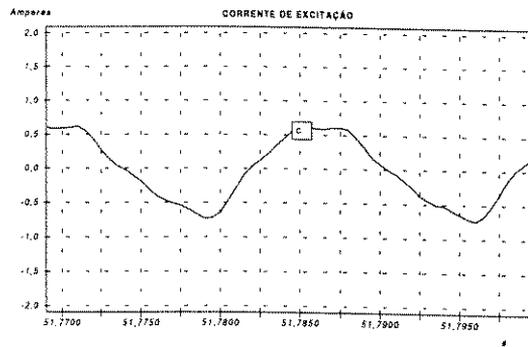
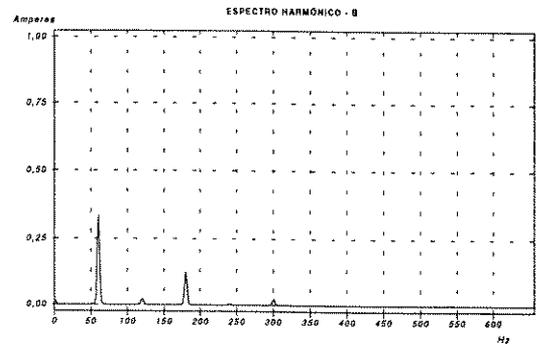
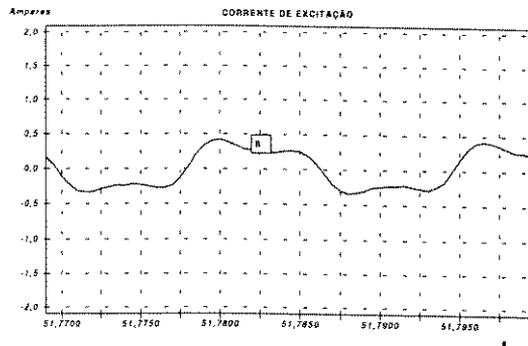
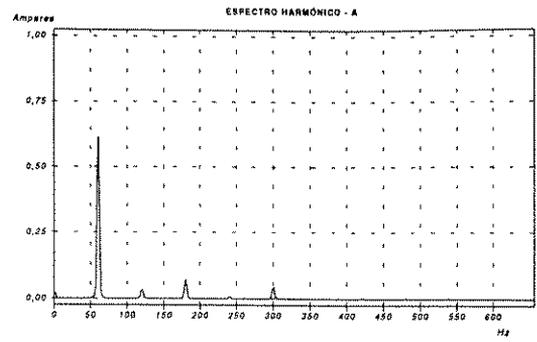
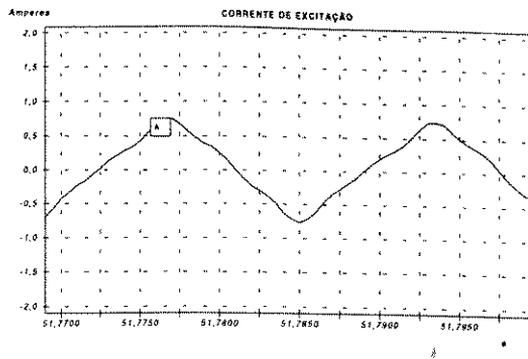


(c) Fase C

Figura 3.22- Amplitudes harmônicas em função da variação da injeção c.c- conexão - ΔY

Conexão $Y Y$: Para esta conexão dos enrolamentos do transformador, os resultados experimentais são ilustrados na figura 3.23. Pode ser observado nos espectros harmônicos das correntes de excitação de linha, que estão presentes as componentes harmônicas de ordens pares e ímpares, sendo as segunda e terceira ordens as que apresentam amplitudes bastante expressivas quando comparadas com a fundamental, enquanto as demais ordens harmônicas apresentam valores quase desprezíveis.

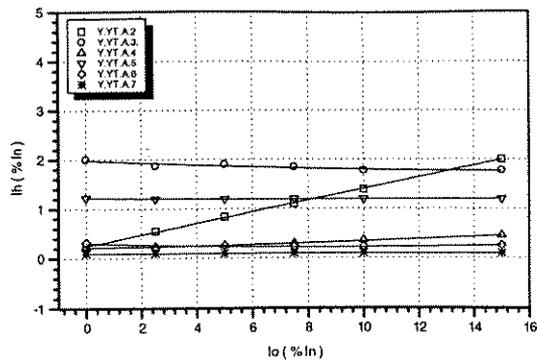
Na figura 3.24 pode ser observado que, o comportamento das ordens harmônicas em relação a variação dos níveis de injeção c.c, apresenta para cada uma das três fases, aspectos característicos bem distintos. As terceira e quinta ordens harmônicas permanecem praticamente constantes, enquanto a segunda ordem harmônica apresenta um crescimento linear, isto tudo dentro da faixa de injeção c.c. praticada. As amplitudes de ordens superiores mostram uma pequena diminuição em suas amplitudes.



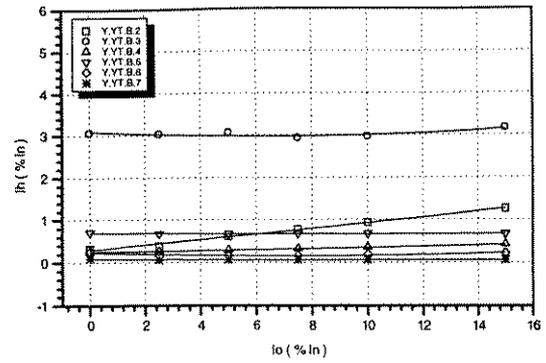
(a) Correntes de excitação - fases A - B - C

(b) Conteúdo Harmônico - fases A - B - C

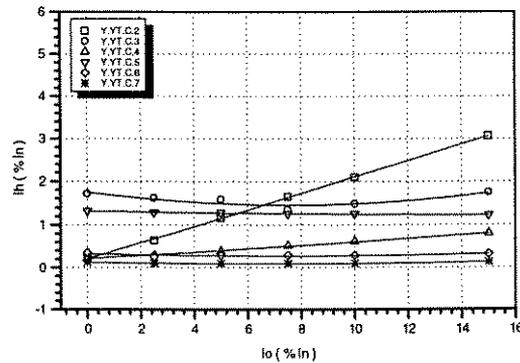
Figura 3.23 - Forma de onda e espectro harmônico das correntes de excitação - conexão - $\Upsilon\Upsilon_1$



(a) Fase A



(b) Fase B



(c) Fase C

Figura 3.24- Amplitudes harmônicas em função da variação da injeção c.c - conexão -Y Y

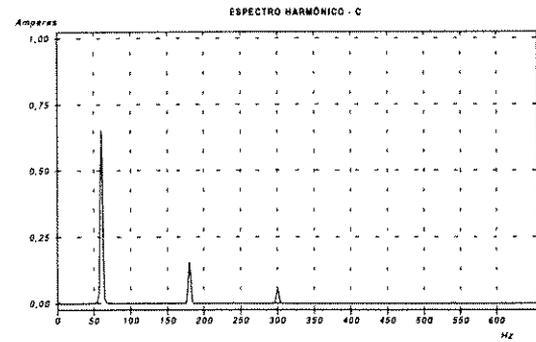
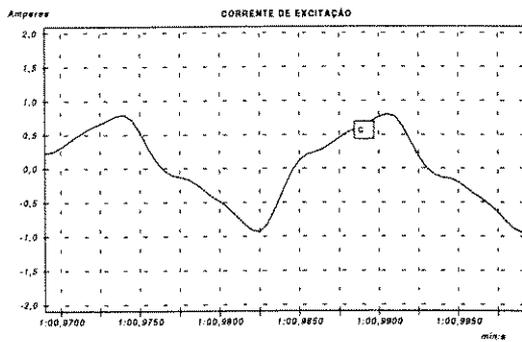
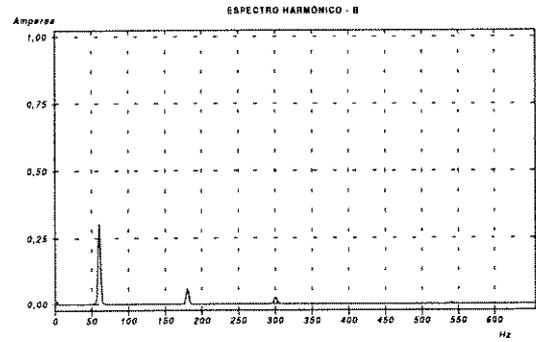
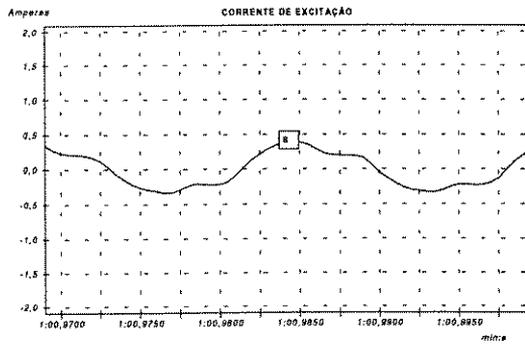
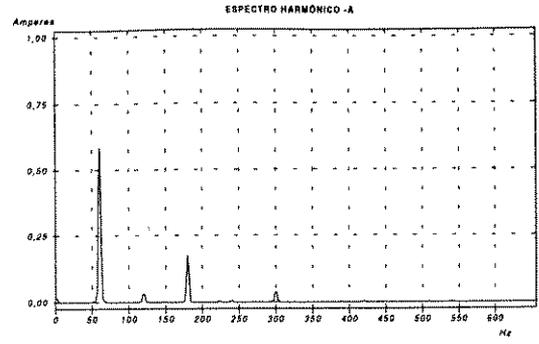
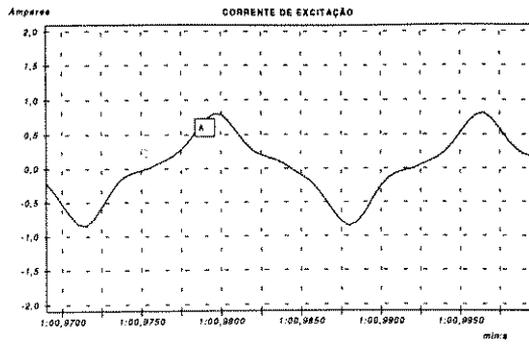
Conexão Y Y: Para esta configuração, são realizados os mesmos procedimentos experimentais adotados para os casos anteriores.

Sem a excitação c.c., pode ser observado na figura 3.15 que as correntes de excitação de linha apresentam componentes harmônicas de terceira ordem com elevadas amplitudes, as quais são devidas unicamente às componentes de seqüência zero.

Sob o efeito da dupla excitação, e ainda considerando-se que neste caso todas as componentes seqüenciais circulam pelas linhas, verifica-se uma sensível amplificação das harmônicas de ordens ímpares com destaque para as múltiplas de três, figura 3.25.

Como nos casos anteriores, nota-se também o crescimento das amplitudes das ordens harmônicas pares na medida em que a excitação c.c. cresce.

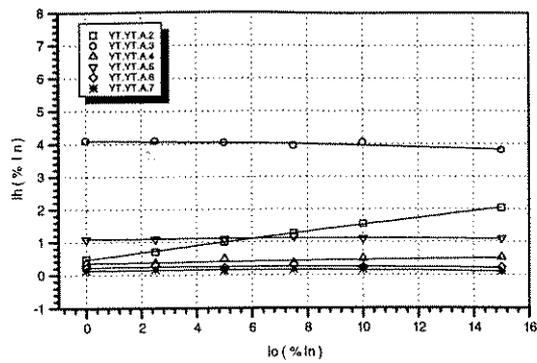
Na figura 3.26, é interessante destacar que a terceira ordem harmônica apresenta, em toda a faixa de excitação c.c. praticada, amplitudes superiores a todas as outras ordens, comportamento este, diferente de todos os outros casos analisados.



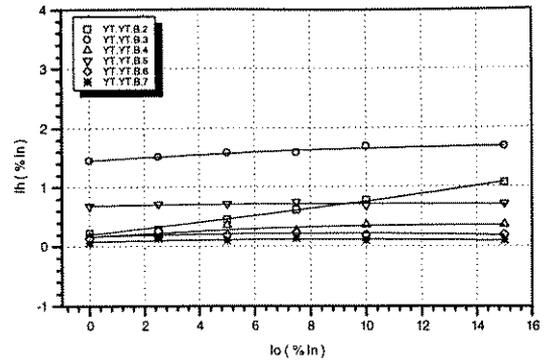
(a) Correntes de excitação - fases A - B - C

(b) Conteúdo Harmônico - fases A - B - C

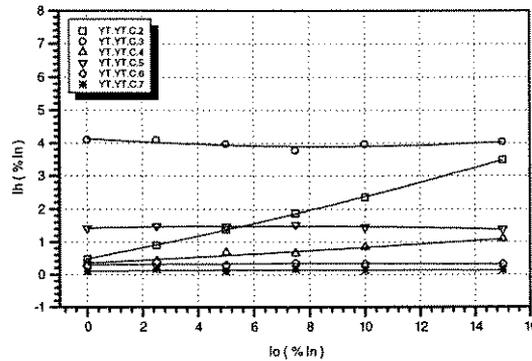
Figura 3.25 - Forma de onda e espectro harmônico das correntes de excitação - conexão - $\Upsilon\Upsilon$



(a) Fase A



(b) Fase B



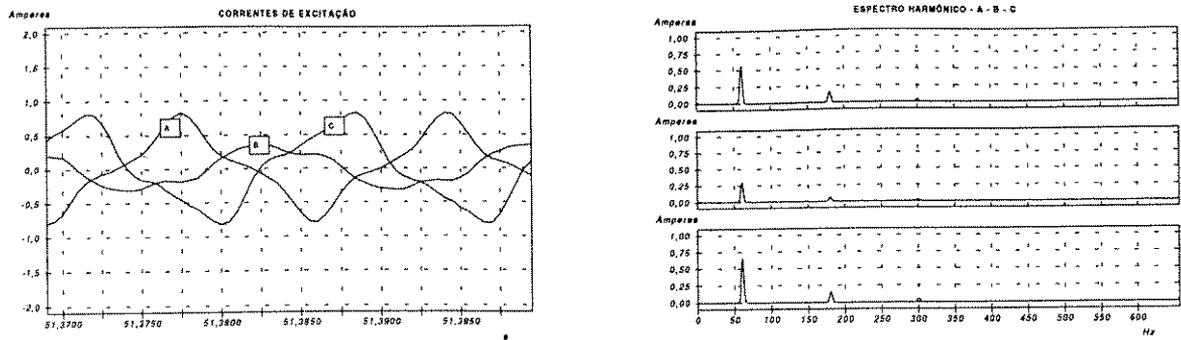
(c) Fase C

Figura 3.26- Amplitudes harmônicas em função da variação da injeção c.c - conexão - Y_1Y_1

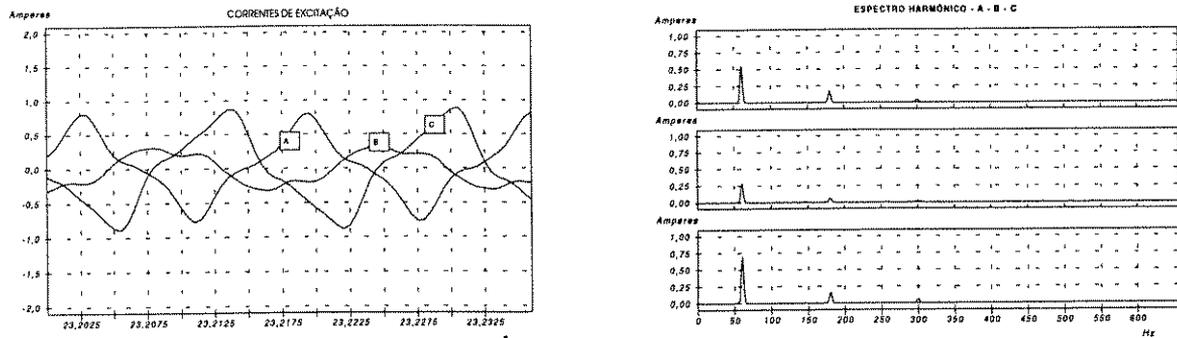
B.2 - Injeção Idêntica nas Três Fases - Neste caso, admitiu-se níveis de corrente contínua de 5% de I_n em cada fase.

Conexão Y_1Y_1 : Para uma injeção de corrente contínua idêntica nas três fases, verificou-se que, para o transformador trifásico tipo núcleo envolvido utilizado nos ensaios experimentais, praticamente não se tem alterações nos valores de pico e no conteúdo harmônico das correntes de excitação, confirmando assim a expectativa de que este tipo de transformador praticamente é imune aos efeitos das injeções de correntes contínuas equilibradas. Isto pode ser explicado, considerando que os fluxos magnéticos produzidos pelas componentes contínuas são idênticos nas três fases e se compensam mutuamente no núcleo magnético uma vez que o caminho alternativo pelo ar apresenta uma alta relutância.

Isto pode ser observado, comparando-se os gráficos da figura 3.27, onde estão representadas as formas de onda das correntes de excitação e seus respectivos espectros harmônicos para a situação somente com excitação c.a, figura 3.27 (a), e duplamente excitado, com $I_o = 5 \%I_n$, figura 3.27 (b), respectivamente.



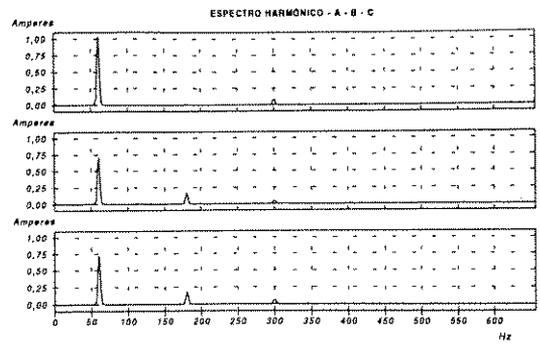
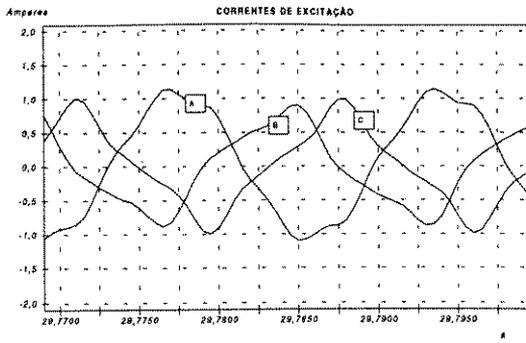
(a) Sem excitação CC

(b) Com excitação c.c. $I_o = 5\%$ de I_n em cada faseFigura 3.27 - Forma de onda e espectro harmônico das correntes de excitação de linha - conexão - $\Upsilon\Upsilon_1$

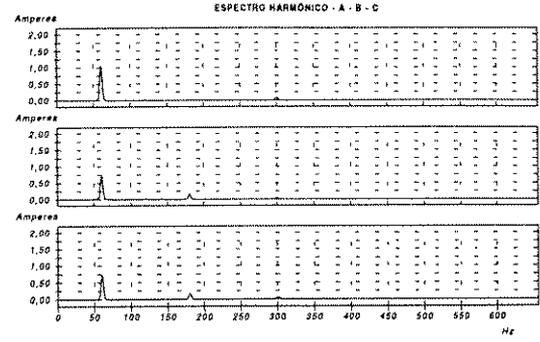
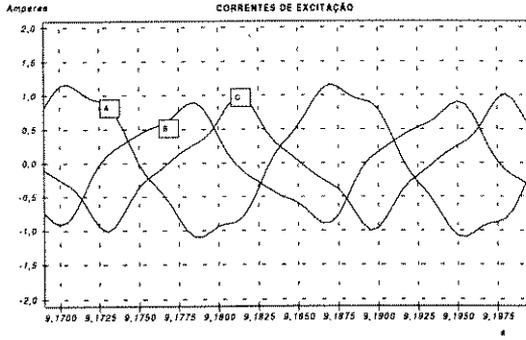
Conexões $\Delta\Upsilon_1$ e $\Upsilon\Upsilon_1$: Para estas conexões, são válidas as mesmas observações feitas no caso anterior com relação a distribuição equilibrada da injeção das correntes de excitação c.c..

As figuras 3.28 e 3.29 mostram as formas de onda das correntes de excitação e seus respectivos espectros harmônicos para as duas conexões acima, quando o transformador é alimentado em condições normais e para quando é duplamente excitado.

Mais uma vez pode ser observado que, para uma distribuição equitativa de injeção c.c. nas três fases, o transformador trifásico de com núcleo envolvido) praticamente não sofre alterações nas suas correntes de excitação, bem como do seu conteúdo harmônico.

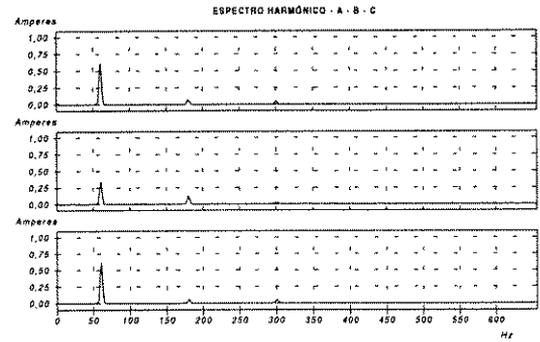
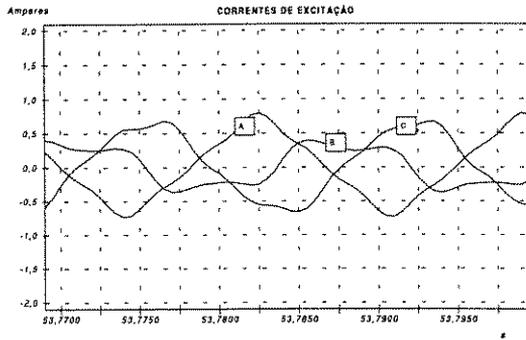


(a) Sem excitação c.c.

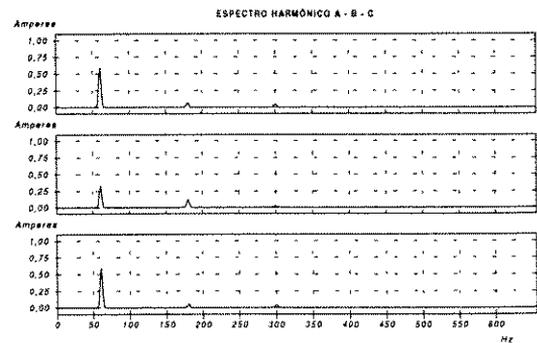
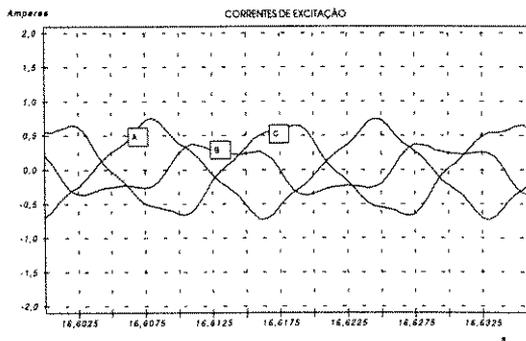


(b) Com excitação c.c. - $I_o = 5\%$ de I_n em cada fase

Figura 3.28 - Forma de onda e conteúdo harmônico das correntes de excitação de linha - conexão $\Delta\Delta$:



(a) Sem excitação c.c.



(b) Com excitação c.c. - $I_o = 5\%$ de I_n em cada fase

Figura 3.29 - Formas de onda e conteúdo harmônico das correntes de excitação de linha - conexão ΔY

3.4.3 - Análise Comparativa dos Resultados

Considerando o transformador trifásico de núcleo envolvido sob magnetização assimétrica, os gráficos da figura 3.30 mostram o comportamento das componentes harmônicas de segunda e terceira ordens em função da variação dos níveis de injeção c.c., desequilibrados nas três fases e, considerando as diferentes conexões dos enrolamentos.

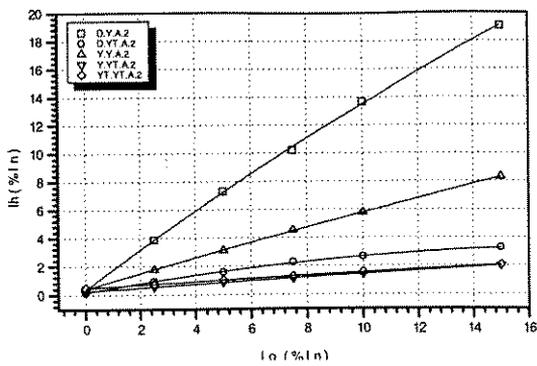
O gráfico da figura 3.30 (a) mostra uma dependência quase linear das componentes harmônicas de segunda e terceira ordens da fase A, quando o transformador trifásico com núcleo envolvido é submetido a uma variação dos níveis de injeção de corrente contínua, independentemente do tipo de conexão empregada.

A análise comparativa dos resultados obtidos mostra, para a segunda ordem harmônica, uma maior sensibilidade com a variação dos níveis de injeção c.c. para as conexões em delta ou estrela isolada do primário, para os padrões de excitação adotados. Já a terceira ordem harmônica apresenta maior sensibilidade quando os enrolamentos do primário são conectados em delta ou em estrela aterrada. Tais fatos são decorrentes exclusivamente das relações entre as respectivas conexões e os tipos de núcleos magnéticos.

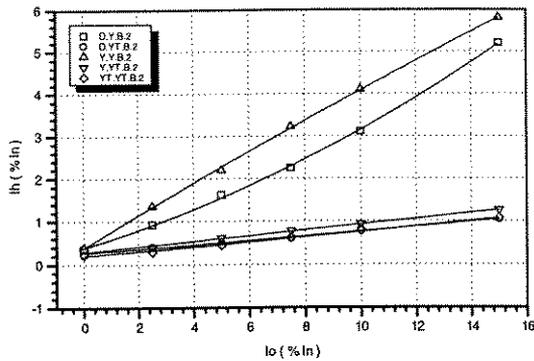
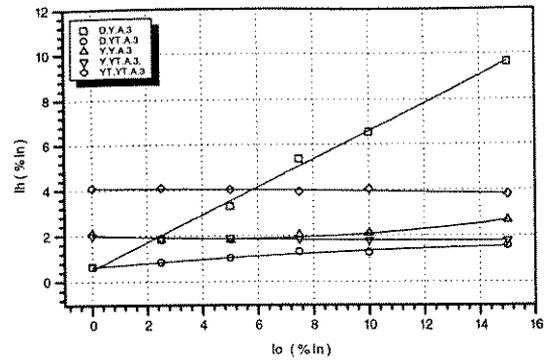
O gráfico da figura 3.30 (b) mostra que também existe uma dependência quase linear das componentes harmônicas de segunda e terceira ordens, na fase B, em função da variação da injeção c.c.. Neste caso, a maior sensibilidade para a segunda ordem harmônica acontece para as ligações do primário em estrela isolada e em delta. A sensibilidade para a terceira ordem harmônica acontece para as ligações do primário em estrela isolada.

O gráfico da figura 3.30 (c) mostra o comportamento da segunda e terceira ordens harmônicas da fase C em presença da variação da injeção de corrente contínua desequilibrada nas três fases. Este comportamento é semelhante ao que ocorre na fase A.

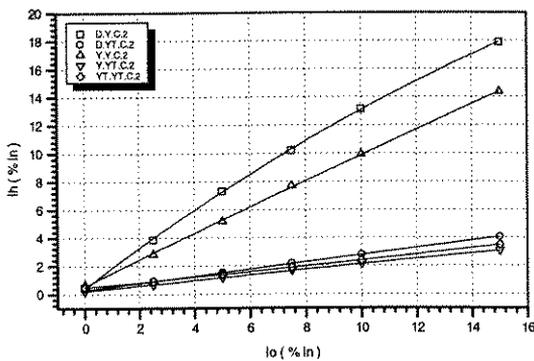
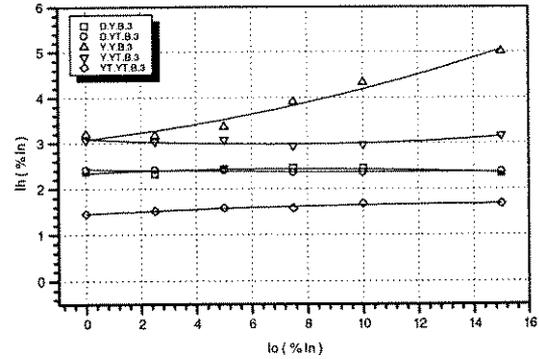
Percebe-se de uma maneira geral que, a segunda ordem harmônica apresenta uma sensibilidade maior, nas três fases, para as ligações do primário em delta e em estrela isolada, enquanto a terceira ordem harmônica apresenta uma maior sensibilidade nas fases A e C com as ligações do primário em delta e estrela isolada, e na fase B para as ligações em estrela isolada.



(a) Fase A



(b) Fase B



(c) Fase C

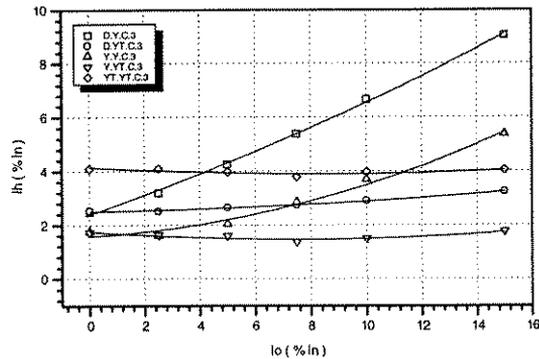


Figura 3.30 - Comportamento da segunda e terceira harmônicas com a variação dos níveis de injeção c.c.

3.5 - Conclusões

Neste capítulo foram apresentados os resultados obtidos experimentalmente, sobre os quais foram feitas uma série de análises relativa ao comportamento de um banco trifásico de transformadores constituídos por unidades monofásicas e de um transformador trifásico do tipo núcleo envolvido, quando submetidos simultaneamente a uma dupla excitação c.a. / c.c., para

diferentes conexões dos seus enrolamentos.

Basicamente foram analisados dois casos típicos de injeção de corrente contínua, os quais, de certa maneira, procuram representar os fenômenos a que podem ficar submetidos os transformadores pertencentes aos sistemas elétricos de potência.

Procurou-se avaliar as formas de onda das correntes de excitação em regime permanente, sob o aspecto do conteúdo harmônico apresentado pelas mesmas, quando duplamente excitado.

De uma maneira geral, diante dos resultados obtidos, é possível concluir genericamente que sob os efeitos de uma magnetização assimétrica e desequilibrada, as correntes de excitação, tanto do banco trifásico quanto do transformador trifásico com núcleo envolvido, ficam fortemente distorcidas e apresentam um elevado conteúdo harmônico. Esta distorção deve-se a amplificação das ordens harmônicas ímpares e sobretudo ao aparecimento das ordens pares, especialmente a segunda e terceira ordens harmônicas.

A forma de conexão dos enrolamentos dos transformadores e o padrão de distribuição dos níveis c.c entre as diferentes fases tem uma importância significativa sobre o comportamento das correntes de excitação sob efeito da dupla excitação c.a. / c.c.. De um modo geral as amplitudes das harmônicas pares, notadamente a segunda, é maior para os casos com primários conectados em delta devido a sua composição trifásica nas linhas. No caso das harmônicas ímpares múltiplas de três, a conexão primária em estrela aterrada mostrou-se a mais suscetível a amplificação dos níveis de terceira harmônica com o aumento da excitação c.c.. Isto decorre da presença predominante das componentes de seqüência zero.

Observando-se os resultados para a injeção equilibrada de corrente contínua, nota-se claramente que o banco trifásico de transformadores possui um comportamento fundamentalmente diferente do transformador trifásico com núcleo de três colunas. Este último, sob uma distribuição equitativa das componentes contínuas entre as fases não provoca a saturação c.c. e conseqüentemente não altera o conteúdo harmônico das correntes de excitação .

CAPÍTULO 4

MODELAGEM MATEMÁTICA

4.1 - Objetivo

A modelagem matemática possibilita, junto com os estudos experimentais, uma ampla investigação do comportamento dos transformadores sob saturação assimétrica, abordando principalmente as correntes de excitação, fluxos magnéticos e tensões induzidas, sob o ponto de vista qualitativo. Neste capítulo são desenvolvidas as modelagens matemáticas para os transformadores trifásicos de dois enrolamentos do tipo banco de monofásicos e trifásico de três colunas tipo núcleo envolvido.

4.2 - Introdução

Ao se considerar uma unidade transformadora trifásica qualquer, há de se admitir que a mesma poderá ser concebida com diferentes arranjos magnéticos. Em razão disto, os transformadores trifásicos são agrupados basicamente em três categorias:

- constituídos por unidades monofásicas (banco de monofásico);
- constituídos por um único núcleo de três colunas (núcleo envolvido ou “core”);
- constituídos por um único núcleo de cinco colunas (núcleo envolvente ou “shell”);

Embora todos possam ser utilizados nos sistemas de potência, ressalta-se que o arranjo magnético de cinco colunas é raramente encontrado. Por outro lado, sobretudo por razões econômicas, os transformadores trifásicos com núcleo de três colunas são mais frequentemente utilizados do que os bancos de monofásicos.

Devido a sua natureza construtiva, os bancos de monofásicos apresentam, para as fases a, b, e c, uma total independência magnética, o mesmo não acontecendo para os demais.

Particularmente, na presença da dupla excitação c.a. / c.c. a forte interação entre os

fluxos magnéticos faz com que os transformadores trifásicos com núcleo de três colunas tenham muitas vezes um comportamento substancialmente diferente dos bancos de monofásicos.

Por outro lado, estudo preliminares indicam uma menor dependência magnética para o transformadores com núcleos de cinco colunas, visto que, neste caso a utilização das colunas externas tende a oferecer um caminho magnético que cria condições operativas, em muitos casos, semelhantes àquelas apresentadas pelos bancos de monofásicos.

Considerando, pois, as observações anteriores, as modelagens e simulações apresentadas neste trabalho são direcionadas ao estudo do comportamento das unidades transformadoras trifásicas derivadas de banco de monofásicos e com núcleo de três colunas.

4.3.- Característica de Magnetização

Para a simulação digital do comportamento dos transformadores trifásicos sob saturação assimétrica, é de fundamental importância uma representação adequada da não-linearidade entre o fluxo magnético e a corrente de excitação.

Neste trabalho, a exemplo de trabalhos anteriores [04] e [05], adotou-se uma aproximação da característica normal de magnetização através da função hiperbólica, genericamente representada na expressão (4.1).

$$H = \alpha \sinh(\beta B) \quad (4.1)$$

onde: H - intensidade de campo magnético [A/m];

B - densidade de fluxo magnético; [T]

α , β - constantes.

As constantes α e β são determinadas ajustando-se a função descrita na equação (4.1), a um conjunto de pontos obtidos experimentalmente no teste a vazio.

Os resultados das investigações sobre o comportamento das perdas no núcleo em transformadores sob magnetização assimétrica indicam uma pequena variação no sentido de diminuí-las à medida que o nível de excitação c.c. cresce. Desta forma, sob o ponto de vista do circuito equivalente, a representação destas perdas através da energia dissipada em uma resistência de valor constante pode ser considerada satisfatória em estudos desta natureza.

O laço de histerese pode então ser obtido considerando-se a corrente de excitação

como sendo dada pela corrente na resistência constante representativa das perdas no núcleo e pela corrente de magnetização obtida a partir da expressão (4.1). A figura 4.1. ilustra a composição das correntes citadas em condições de dupla excitação c.a e c.c..

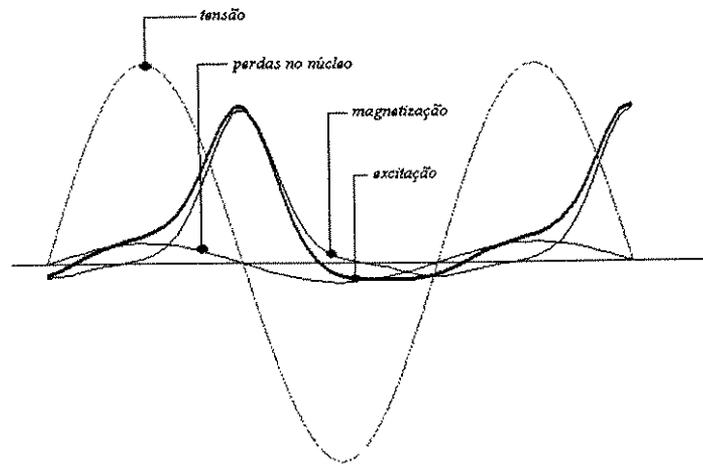


Figura 4.1 - Composição da corrente de excitação

4.4 - Modelagem Matemática

4.4.1 - Banco Trifásico Constituído de Monofásicos

Considerando-se a independência entre os circuitos magnéticos de cada unidade que compõe a citada unidade trifásica, apenas a conexão dos enrolamentos afetará os resultados da operação magneticamente assimétrica dos bancos de monofásicos.

A metodologia de análise do comportamento das correntes magnetizantes sob dupla excitação c.a. e c.c. é desenvolvida considerando-se separadamente cada uma das unidades monofásicas. Em seguida, as correntes de linha são determinadas pela composição dos resultados obtidos para cada uma das unidades monofásicas.

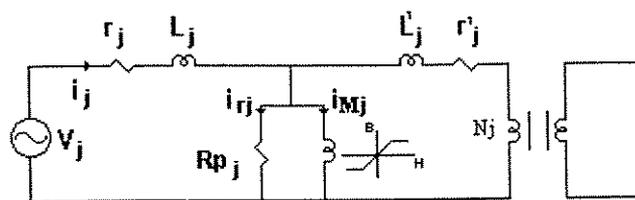


Figura 4.2 - Parâmetros do circuito equivalente por fase da unidade monofásica.

Assim, para a unidade transformadora monofásica genérica j , da figura 4.2 pode ser obtida as seguintes expressões gerais :

$$i_j = i_{Mj} + i_{rj} \quad (4.2)$$

$$v_j = r_j i_j + L_j \frac{di_j}{dt} + N_j \frac{d\phi_j}{dt} \quad (4.3)$$

$$i_{rj} = \frac{N_j}{R_{pj}} \frac{d\phi_j}{dt} \quad (4.4)$$

$$i_{Mj} = a_j \sinh(b_j \phi_j) \quad (4.5)$$

$$a_j = \frac{\alpha_j \ell_j}{N_j} \quad (4.6)$$

$$b_j = \frac{\beta_j}{S_j} \quad (4.7)$$

onde: v_j - Tensão instantânea;
 i_j - corrente de excitação instantânea;
 i_{Mj} - corrente de magnetização;
 i_{rj} - corrente associada a perda no núcleo;
 L_j - Indutância de dispersão;
 r_j - resistência do enrolamento;
 R_{pj} - resistência associada a perda no núcleo;
 N_j - número de espiras do primário;
 ϕ_j - fluxo magnético;
 H_j - intensidade de campo magnético;
 S_j - área da secção transversal do núcleo;
 α_j, β_j - constantes do ajuste hiperbólico;
 ℓ_j - comprimento magnético;

A composição trifásica das expressões anteriores depende naturalmente da forma de conexão entre os enrolamentos das diferentes unidades monofásicas. Admitindo-se pois as expressões (4.2), (4.3), (4.4) (4.5) e considerando-se as conexões usuais para o enrolamento primário de transformadores de dois enrolamentos, apresenta-se a seguir as expressões finais utilizadas neste trabalho para a simulação digital do comportamento de transformador trifásico do tipo banco de monofásicos sob magnetização assimétrica (ver desenvolvimento no apêndice A).

4.4.1.1 - Conexão dos enrolamentos do primário em "Estrela Aterrada"

Para este tipo de conexão, de acordo com o apêndice A, valem as relações:

$$\mathbf{V} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{Sh}(\Phi) + [\mathbf{K}_1 + \mathbf{L} \cdot \mathbf{Ch}(\Phi)] \cdot \dot{\Phi} + \mathbf{K}_2 \cdot \ddot{\Phi} \quad (4.8)$$

$$I_n = \mathbf{T}_1 \cdot \mathbf{Sh}(\Phi) \quad (4.9)$$

I_n - corrente pelo condutor neutro

onde:

$$\dot{\Phi} = \left[\frac{d\phi_j}{dt} \right]_{j=1,2,3} ;$$

$$\ddot{\Phi} = \left[\frac{d^2\phi_j}{dt^2} \right]_{j=1,2,3} ;$$

$$\mathbf{Sh}(\Phi) = \left[a_j \sinh(b_j \phi_j) \right]_{j=1,2,3} ;$$

$$\mathbf{T}_1 = [1 \quad 1 \quad 1] ;$$

$$\mathbf{Ch}(\Phi) = \text{diag.} \left[a_j b_j \cosh(b_j \phi_j) \right]_{j=1,2,3} ;$$

$$\mathbf{K}_1 = \text{diag.} \left[N_j (1 + r_j / R_{pj}) \right]_{j=a,b,c} ;$$

$$\mathbf{K}_2 = \text{diag.} \left[N_j L_j / R_{pj} \right]_{j=a,b,c} ;$$

$$\mathbf{R} = \text{diag.} [r_j]_{j=a,b,c};$$

$$\mathbf{L} = \text{diag.} [L_j]_{j=a,b,c};$$

I_n - corrente pelo condutor neutro;

$\mathbf{K}_1, \mathbf{K}_2, \mathbf{R}, \mathbf{L}, \mathbf{Ch}(\Phi)$ - matrizes;

$\dot{\Phi}, \ddot{\Phi}, \mathbf{Sh}(\Phi), \mathbf{V}$ - vetores;

j - unidade transformadora monofásica.

4.4.1.2 - Conexão dos enrolamentos do primário em "Delta"

Para este caso tem-se :

$$\mathbf{T}_2 \cdot \mathbf{V} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{Sh}(\Phi) + [\mathbf{K}_1 + \mathbf{L} \cdot \mathbf{Ch}(\Phi)] \cdot \dot{\Phi} + \mathbf{K}_2 \cdot \ddot{\Phi} \quad (4.10)$$

$$\mathbf{I}_L = \tilde{\mathbf{T}}_2 \cdot \mathbf{Sh}(\Phi) \quad (4.11)$$

$$\mathbf{T}_2 = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

onde: \mathbf{I}_L - vetor das correntes de excitação nas linhas;

$\tilde{\mathbf{T}}_2$ - matriz \mathbf{T}_2 transposta.

4.4.1.3 - Conexão dos enrolamentos do primário em "Estrela Isolada"

Semelhante aos casos anteriores :

$$\mathbf{V} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{Sh}(\Phi) + [\mathbf{K}_1 + \mathbf{L} \cdot \mathbf{Ch}(\Phi)] \cdot \dot{\Phi} + \mathbf{K}_2 \cdot \ddot{\Phi} + V_n \cdot \tilde{\mathbf{T}}_1 \quad (4.13)$$

$$V_n = \mathbf{T}_3 \cdot [\mathbf{V} - \mathbf{R} \cdot \mathbf{Sh}(\Phi) + \mathbf{K}_1 \cdot \dot{\Phi} + \mathbf{L} \cdot \mathbf{Ch}(\Phi) \cdot \dot{\Phi} + \mathbf{K}_2 \cdot \ddot{\Phi}] \quad (4.14)$$

$$\mathbf{T}_3 = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

onde :Vn - tensão entre o centro estrela do transformador e a referência.

4.4.2 - Transformador Trifásicos com 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 [17],[18]. Como em geral os níveis de saturação de cada região magnética do núcleo são diferentes, é comum considerar o núcleo dividido em secções nas quais é assumida uma densidade de fluxo aproximadamente uniforme [22].

Com o objetivo de estabelecer uma formulação matemática para o estudo do comportamento sob dupla excitação c.a. /c.c. adotou-se a metodologia proposta nas referências [17], [18]. 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 pois os tipos de fluxos magnéticos descritos é possível estabelecer os fluxos resultantes ilustrados na figura 4.3, a partir dos quais serão desenvolvidos os equacionamentos seguintes.

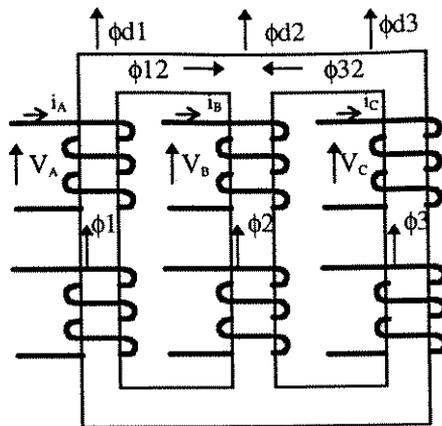


Figura 4.3 - Caminhos e direções dos fluxos magnéticos no núcleo tipo envolvido.

No equacionamento que se segue, todas as quantidades são referidas ao número de espiras dos enrolamentos do primário.

Assim, as equações das tensões para os circuitos elétricos dos enrolamentos primários são dadas por:

$$\begin{aligned}
 v_A &= r_A i_A + L_A \frac{di_A}{dt} + N_A \frac{d\phi_1}{dt} \\
 v_B &= r_B i_B + L_B \frac{di_B}{dt} + N_B \frac{d\phi_2}{dt} \\
 v_C &= r_C i_C + L_C \frac{di_C}{dt} + N_C \frac{d\phi_3}{dt}
 \end{aligned} \tag{4.16}$$

onde: v_j - tensão instantânea na fase j ;

i_j - corrente 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;

$$i_i = i_{Mi} + i_{rpi} \tag{4.17}$$

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

como :

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

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

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

Considerando-se o arranjo ilustrado na figura 4.3 e aplicando-se as leis dos circuitos magnéticos ($\sum \phi_i = 0$) nas junções entre as colunas dos três enrolamentos e a culatra, resulta :

$$\begin{aligned}\phi_1 &= \phi_{d1} + \phi_{12} \\ \phi_2 &= \phi_{d2} - \phi_{12} - \phi_{32} \\ \phi_3 &= \phi_{d3} + \phi_{32}\end{aligned}\tag{4.18}$$

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 :

$$\begin{aligned}i_{M1} &= a_1 \sinh(b_1 \phi_1) \\ i_{M2} &= a_2 \sinh(b_2 \phi_2) \\ i_{M3} &= a_3 \sinh(b_3 \phi_3)\end{aligned}\tag{4.19}$$

$$\begin{aligned}i_{M12} &= a_{12} \sinh(b_{12} \phi_{12}) \\ i_{M13} &= a_{13} \sinh(b_{13} \phi_{13})\end{aligned}\tag{4.20}$$

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 :

$$a_i = \frac{\alpha_i \ell_i}{N_j};$$

$$a_{ik} = \frac{\alpha_{ik} \ell_{ik}}{N_j};$$

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

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

onde,

S_i - área da secção transversal da coluna i ;

S_{ik} - área da secção 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 abaixo:

$$\begin{aligned} i_{d1} &= C_{d1} \phi_{d1} \\ i_{d2} &= C_{d2} \phi_{d2} \\ i_{d3} &= C_{d3} \phi_{d3} \end{aligned} \tag{4.21}$$

onde:

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

i_{di} - corrente instantânea associada a dispersão;

Pelo diagrama do circuito da figura 4.3, 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 (4.16) e (4.18) permitem somente seis equações, há 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 4.3, apresentado na figura 4.4, podem ser obtidas as seguintes equações complementares:

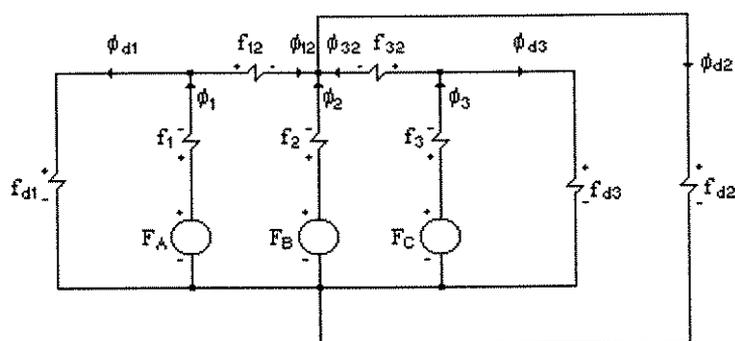


Figura 4.4 - Circuito elétrico equivalente ao circuito magnético da figura 4.3

$$\begin{aligned}
 F_A - f_1 - f_{d1} &= 0 \\
 F_B - f_2 - f_{d2} &= 0 \\
 F_C - f_3 + f_{d3} &= 0 \\
 F_A - f_1 - F_B + f_2 - f_{12} &= 0 \\
 F_C - f_3 - F_B + f_2 - f_{32} &= 0
 \end{aligned}
 \tag{4.22}$$

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 (4.22) ao número de espiras dos enrolamentos do primário ($N_j = N$) e às correntes envolvidas, são obtidas as seguintes equações :

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

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,

$$\begin{aligned}
i_{d1} &= i_A - i_1 \\
i_{d2} &= i_B - i_2 \\
i_{d3} &= i_C - i_3 \\
i_{12} &= i_{d1} - i_{d2} \\
i_{32} &= i_{d3} - i_{d2}
\end{aligned} \tag{4.23}$$

Considerando-se então as expressões gerais (4.16), as expressões dos circuitos magnéticos (4.17), e (4.18), bem como as relações entre as correntes e os respectivos fluxos magnéticos (4.19), (4.20) e (4.21), é possível estabelecer as expressões matriciais para as diferentes conexões das bobinas (ver desenvolvimento detalhado no Apêndice B), as quais são apresentadas a seguir.

4.4.2.1 - Conexão dos enrolamentos do primário em "Estrela Aterrada".

$$V = R.Sh(\Phi) + R.\Phi_d + [K_1 + L.Ch(\Phi)].\dot{\Phi} + K_2.\ddot{\Phi} + K_3.L.\dot{\Phi}_d \tag{4.23}$$

$$\Phi = \Phi_d + T_4.Sh^{-1}(\Delta\Phi_d) \tag{4.24}$$

$$I_n = T_1.Sh(\Phi) \tag{4.25}$$

onde,

$$T_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

4.4.2.2 - Conexão dos enrolamentos do primário em "Delta".

$$\mathbf{T}_2 \cdot \mathbf{V} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{Sh}(\Phi) + \mathbf{R} \cdot \Phi_d + [\mathbf{K}_1 + \mathbf{L} \cdot \mathbf{Ch}(\Phi)] \cdot \dot{\Phi} + \mathbf{K}_2 \cdot \ddot{\Phi} + \mathbf{K}_3 \cdot \mathbf{L} \cdot \dot{\Phi}_d \quad (4.26)$$

$$\Phi = \Phi_d + \mathbf{T}_4 \cdot \mathbf{Sh}^{-1}(\Delta \Phi_d) \quad (4.27)$$

$$\mathbf{I}_L = \tilde{\mathbf{T}}_2 \cdot \mathbf{Sh}(\Phi) \quad (4.28)$$

onde,

$$\mathbf{T}_2 = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

4.4.2.3 - Conexão dos enrolamentos do primário em "Estrela Isolada".

$$\mathbf{V} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{Sh}(\Phi) + \mathbf{R} \cdot \Phi_d + [\mathbf{K}_1 + \mathbf{L} \cdot \mathbf{Ch}(\Phi)] \cdot \dot{\Phi} + \mathbf{K}_2 \cdot \ddot{\Phi} + \mathbf{K}_3 \cdot \mathbf{L} \cdot \dot{\Phi}_d + \mathbf{V}_n \quad (4.29)$$

$$\Phi = \Phi_d + \mathbf{T}_4 \cdot \mathbf{Sh}^{-1}(\Delta \Phi_d) \quad (4.30)$$

$$\mathbf{V}_n = \mathbf{T}_3 \cdot [\mathbf{V} - \mathbf{R} \cdot \mathbf{Sh}(\Phi) + \mathbf{R} \cdot \Phi_d + \mathbf{K}_1 \cdot \dot{\Phi} + \mathbf{L} \cdot \mathbf{Ch}(\Phi) \cdot \dot{\Phi} + \mathbf{K}_2 \cdot \ddot{\Phi} + \mathbf{K}_3 \cdot \mathbf{L} \cdot \dot{\Phi}_d] \quad (4.31)$$

onde,

$$\mathbf{T}_3 = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

4.5 - Conclusão

O modelo matemático apresentado neste capítulo foi baseado no desenvolvimento para estudos e análises do comportamento das correntes transitórias em transformadores, sendo que o mesmo pode ser aplicado a qualquer configuração eletromagnética [18].

A precisão deste modelo está vinculado à obtenção correta dos parâmetros do circuito equivalente.

Este modelo foi simulado em um micro computador digital e os resultados são apresentados no capítulo seguinte.

CAPÍTULO 5

SIMULAÇÃO DIGITAL

5.1 - Objetivo

O objetivo neste capítulo foi o de desenvolver a simulação digital dos modelos matemáticos propostos no capítulo anterior, os quais representam o comportamento do banco trifásico de transformadores e do transformador trifásico do tipo núcleo envolvido quando simultaneamente submetidos a uma dupla excitação c.a. / c.c. A simulação digital foi feita no sentido da obtenção de resultados, os quais serão confrontados com os obtidos experimentalmente em laboratório, com a finalidade de verificar a validade dos modelos propostos.

5.2 - Introdução

Uma vez obtidos os resultados experimentais anteriormente relatados no capítulo 3 procedeu-se a simulação digital dos modelos teóricos, desenvolvidos no capítulo anterior, tanto para o banco trifásico constituído de unidades monofásicas quanto para os transformadores trifásicos de núcleo envolvido (tipo core), com dois enrolamentos.

A forma de representar e avaliar a saturação do núcleo ferromagnético dos transformadores é de fundamental importância na simulação digital. Logo, optou-se por uma formulação analítica utilizando-se uma função contínua.

Nas simulações, foram admitidas tensões de alimentação c.a. simétricas e livres de distorções harmônicas.

5.3. - Procedimentos para a Simulação Digital

A metodologia utilizada neste trabalho para a análise do comportamento da corrente de excitação sob magnetização assimétrica, consiste na aplicação de um nível 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.

Tal procedimento foi adotado considerando-se que ao se aplicar nível de corrente contínua no enrolamento secundário este é refletido para o enrolamento primário de acordo com a relação de transformação, como mostram os oscilogramas 1 e 2 na figura 5.1 . 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, ilustrada no oscilograma M na figura 5.1, é alterada sistematicamente de forma a resultar em um valor médio nulo para a corrente total primária em regime permanente. Isto pode ser observado no oscilograma 2 da figura 5.1.

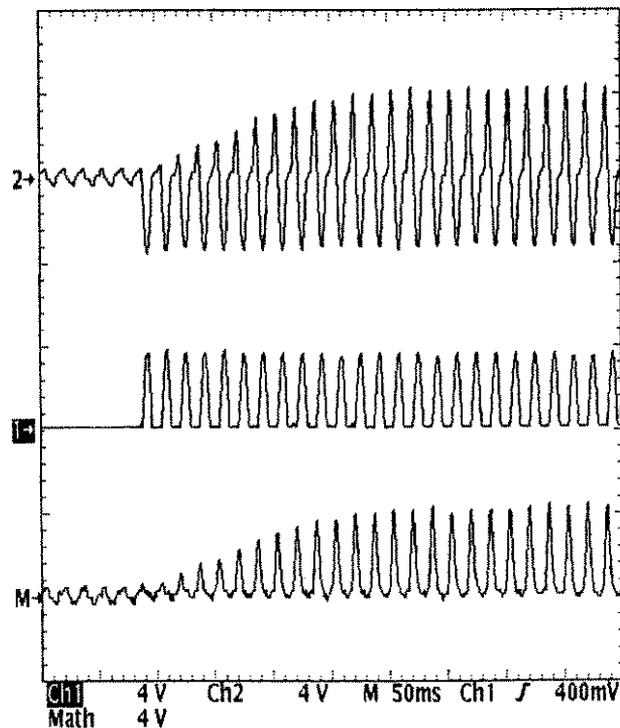


Figura 5.1 - Magnetização assimétrica

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 desde 0% até 15 % da corrente nominal.

Os parâmetros elétricos das três unidades transformadoras e do transformador trifásico de núcleo envolvido, bem como os seus dados construtivos, foram obtidos a partir de ensaios experimentais em unidades de baixa potência utilizadas em laboratório, cujos principais parâmetros foram apresentados no capítulo 3.

A partir dos ensaios a vazio, sem a 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.

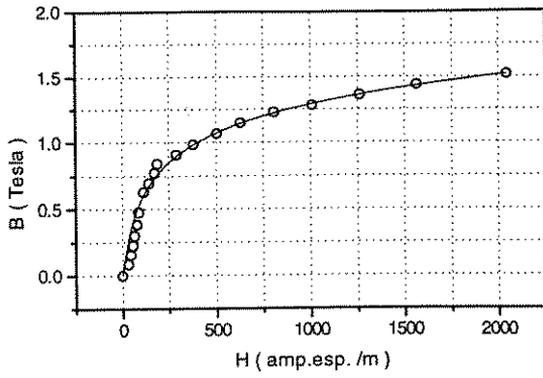
O ajuste da função hiperbólica para a representação da não linearidade magnética foi feito através do método dos mínimos quadrados e os resultados finais obtidos, para as unidades monofásicas do banco trifásico e para o transformador trifásico, são apresentados nas expressões (5.1) e (5.2) respectivamente.

As curvas normais de magnetização, resultantes do ajustes, são ilustradas nas figuras 5.2 e 5.3.

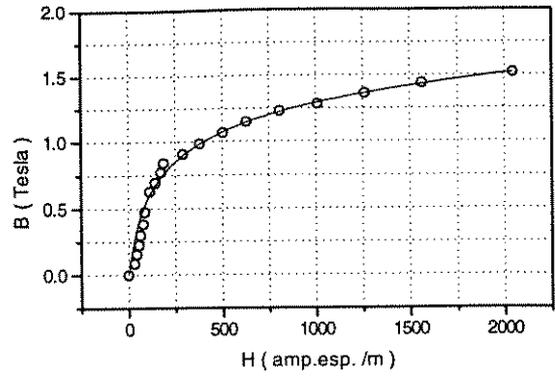
$$\begin{aligned}
 H_1 &= 27,37 \sinh(3,34B) \\
 H_2 &= 34,64 \sinh(3,14B) \\
 H_3 &= 16,43 \sinh(3,72B) \\
 R_p &= 500\Omega
 \end{aligned}
 \tag{5.1}$$

$$\begin{aligned}
 H_a &= 51,3 \sinh(3,8B_a) \\
 H_b &= 42,5 \sinh(3,5B_b) \\
 H_c &= 39,8 \sinh(3,9B_c) \\
 R_{pa} &= R_{pb} = R_{pc} = 500\Omega
 \end{aligned}
 \tag{5.2}$$

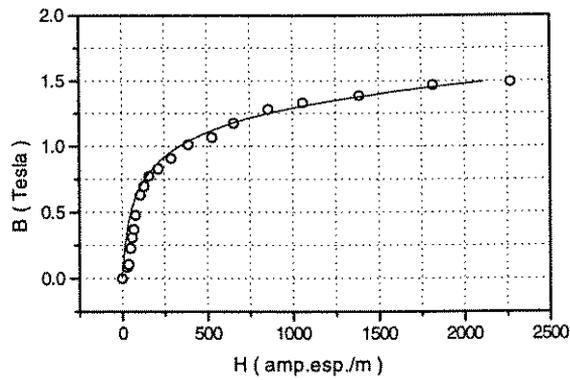
Como pode ser observado nas figuras a seguir, as unidades monofásicas apresentam um pequeno desequilíbrio entre as suas curvas de magnetização, o mesmo ocorrendo para o transformador trifásico de núcleo envolvido.



(a) Unidade transformadora monofásica 1



(b) Unidade transformadora monofásica 2



(c) Unidade transformadora monofásica 3

Figura 5.2 - Característica normal de magnetização de cada unidade monofásica do banco trifásico

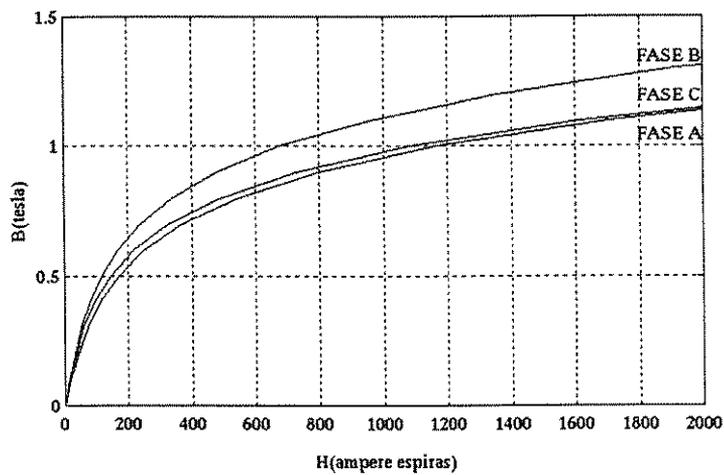


Figura 5.3 - Características normais de magnetização (transformador trifásico).

Os resultados apresentados a seguir, foram obtidos a partir de simulação digital, no domínio do tempo, utilizando-se o software “MATLAB-SIMULINK - Versão 4.0, instalado em um micro computador - 486 - DX 2 - 66 Mhz.

No apêndice C, encontram-se os diagramas de blocos utilizados na simulação digital dos transformadores do tipo banco trifásico constituído de monofásicos e do tipo núcleo envolvido, para diferentes conexões dos enrolamentos.

5.4 - Resultados da Simulação para o Banco Trifásico de Transformadores

Inicialmente são apresentados alguns resultados simulados do comportamento das correntes de excitação do transformador trifásico, composto por unidades monofásicas, para as condições normais de alimentação c.a. e considerando diferentes conexões dos enrolamentos.

Os gráficos da figura 5.4, ilustram as formas de onda das correntes de excitação e os seus respectivos espectros harmônicos, para o banco de transformadores conectado em, $\Upsilon\Upsilon$, $\Delta\Upsilon$ e $\Upsilon\Upsilon$ respectivamente.

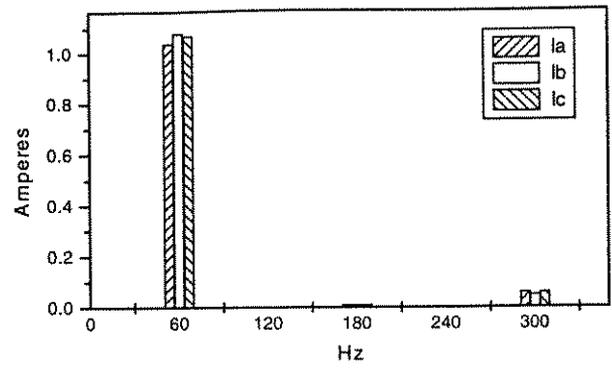
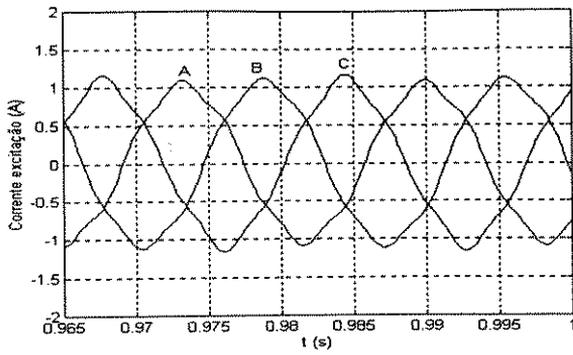
De um modo geral, como as amplitudes das ordens harmônicas acima da sétima são normalmente muito baixas, as simulações limitam-se ao estudo da influência da dupla excitação até a frequência de 420 Hz (7^a harmônica).

Como nos testes realizados na parte experimental (ver capítulo 3), procurou-se nas simulações representar os casos típicos de injeção c.c. no qual os transformadores de potência podem ficar submetidos. No desenvolvimento a seguir, são então analisados três casos básicos de ocorrência de dupla excitação, para diferentes conexões dos enrolamentos do transformador.

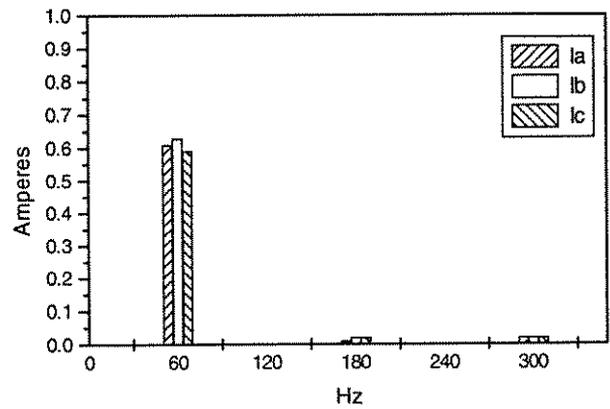
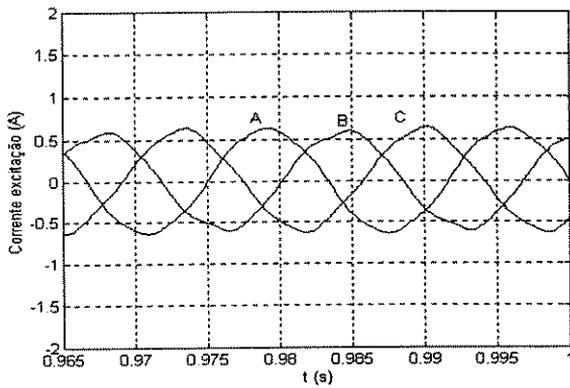
Para o **Caso A**, admitiu-se os seguintes níveis de injeção c.c. : $I_{a_0} = 30\% I_0$; $I_{b_0} = 70\% I_0$, $I_{c_0} = -100,0\% I_0$, nas linhas A , B e C respectivamente, com I_0 variando de 0 a 15% da corrente nominal do transformador.

Particularmente, nos casos ilustrados a seguir, são apresentados graficamente as formas de onda das correntes de excitação nas linhas e seus respectivos conteúdos harmônicos para um excitação c.c de $I_0 = 10\% I_n$.

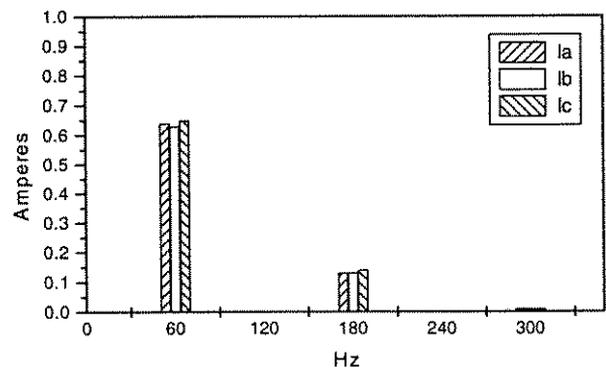
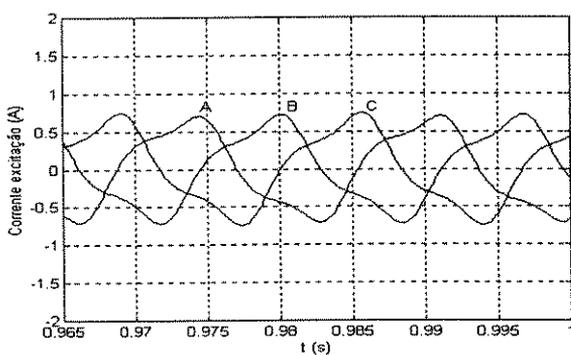
A figura 5.5 ilustra as formas de onda das correntes de excitação, seus respectivos espectros harmônicos, bem como, o comportamento das ordens harmônicas em função da variação da excitação c.c. para a fase C, com os enrolamentos do banco trifásico conectados em estrela isolada / estrela isolada. Pode ser observado mais uma vez que, as componentes harmônicas de baixa ordem apresentam um comportamento linear.



(b) Conexão D/Y

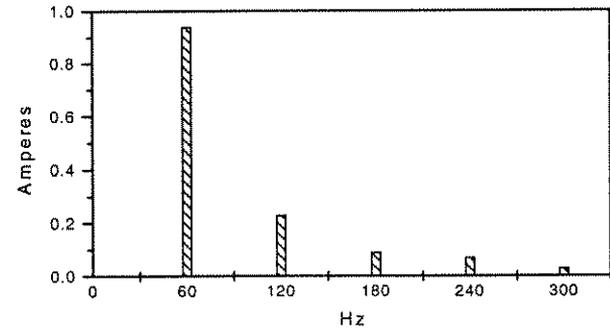
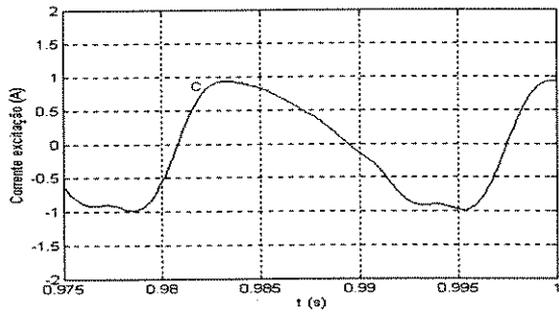
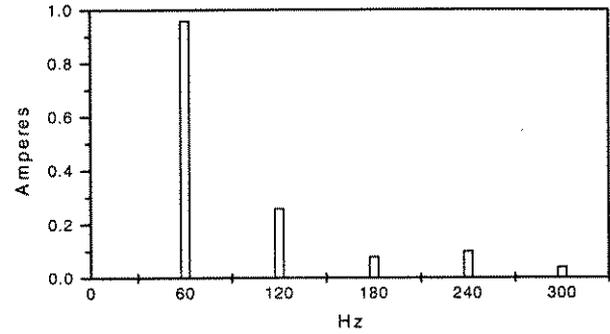
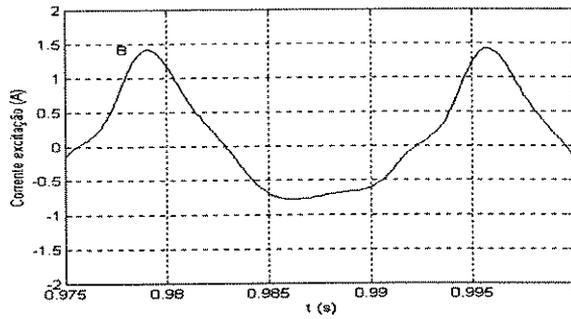
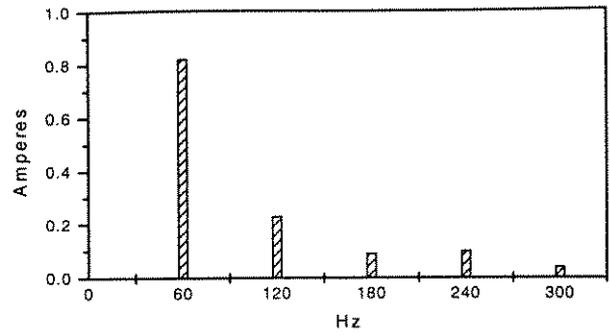
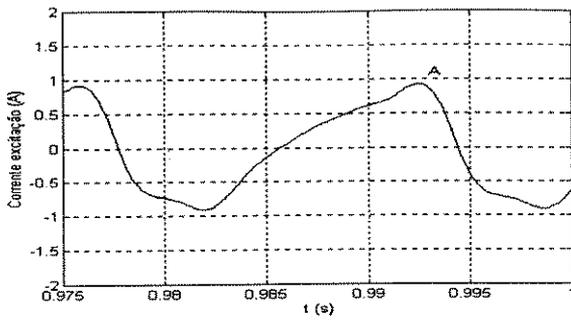


(a) Conexão Y/Y



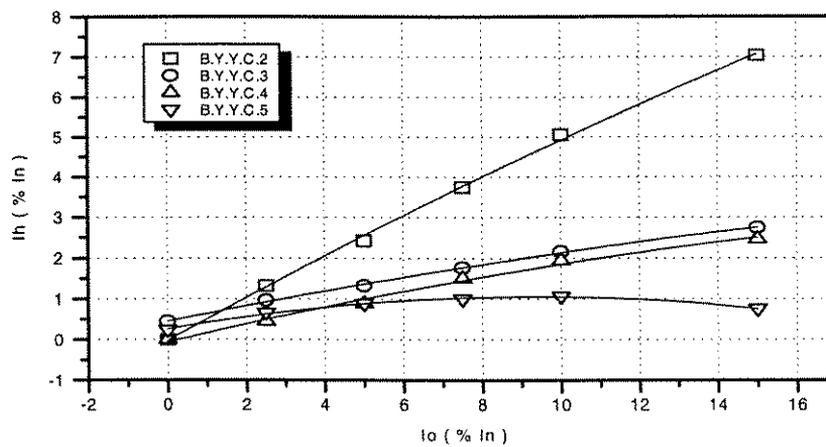
(c) Conexão Yt / Yt

Figura 5.4 -Forma de onda e espectro harmônico das correntes de excitação em condições normais



(a) Correntes de Excitação - Fases A-B-C

(b) Espectro Harmônico - A-B-C



(c) Amplitudes das harmônicas em função da excitação c.c. - Fase C

Figura 5.5- Forma de onda e espectro harmônico das correntes de excitação - conexão Y / Y

Os gráficos da figura 5.6 ilustram as formas de onda das correntes de excitação e seus respectivos espectros harmônicos quando o banco trifásico é submetido a uma excitação c.c. estando o mesmo conectado em delta / estrela isolada. Como já verificado experimentalmente, pode ser observado uma forte distorção nas formas de onda das correntes em virtude do aparecimento das componentes harmônicas de ordens pares e a amplificação das harmônicas de ordens ímpares.

A Figura 5.6 (c) ilustra a variação das amplitudes harmônicas da corrente de excitação na fase C em função da variação dos níveis de injeção de corrente contínua. Esta fase foi escolhida por apresentar, conforme adotado, maior nível de injeção de corrente contínua.

Percebe-se que, a medida em que o nível c.c. é aumentado, a influência das harmônicas de ordens pares são mais acentuadas e apresentam uma variação linear para as ordens inferiores, enquanto as amplitudes de ordens superiores se mantêm constantes e/ou apresentam um pequeno decaimento.

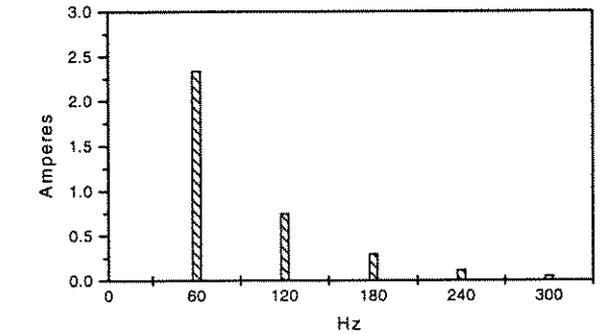
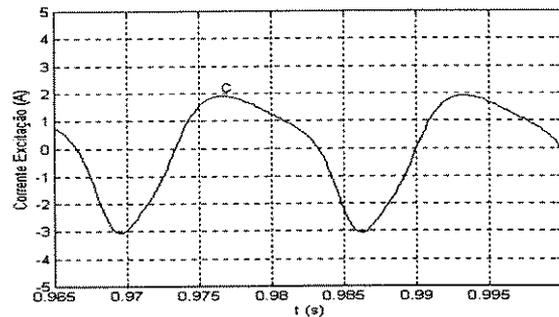
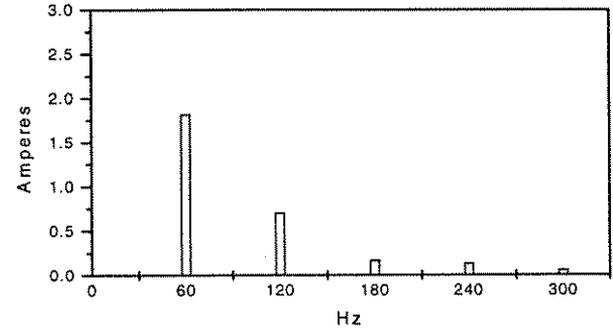
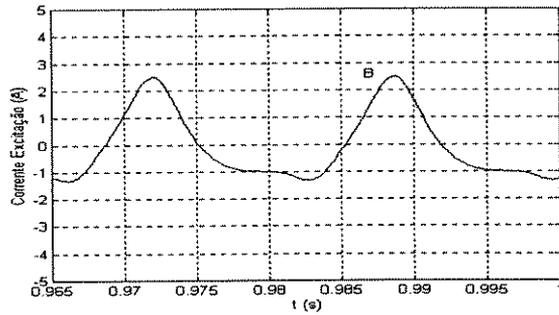
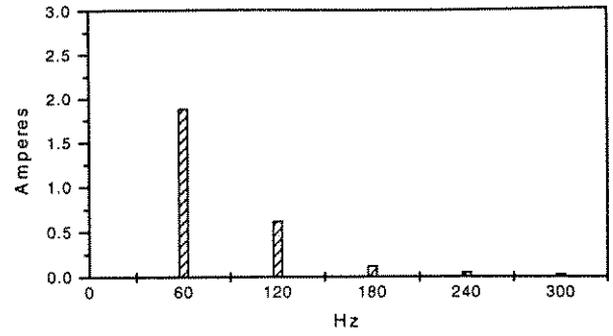
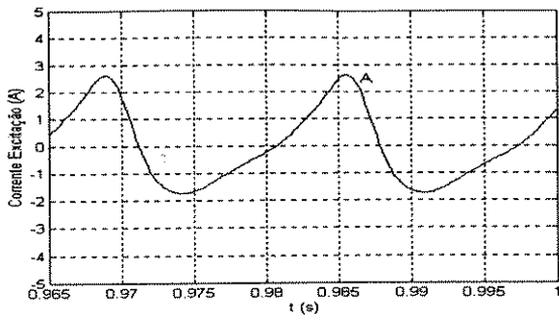
Caso B

B.1 - Injeção Desbalanceada - Na simulação para uma distribuição qualquer da injeção c.c., adotou-se, como nos ensaios experimentais, os seguintes níveis de correntes contínuas nas diferentes fases do transformador : $I_{a_0} = 30\% I_0$; $I_{b_0} = 20\% I_0$ e $I_{c_0} = 50\% I_0$, nas fases A, B e C respectivamente com a corrente pelo condutor neutro, I_0 , variando entre 0 e 15% I_n .

A exemplo dos resultados simulados anteriormente, apresentam-se as formas de onda das correntes nas linhas e seus respectivos conteúdos harmônicos para o caso particular quando $I_0 = 10\% I_n$.

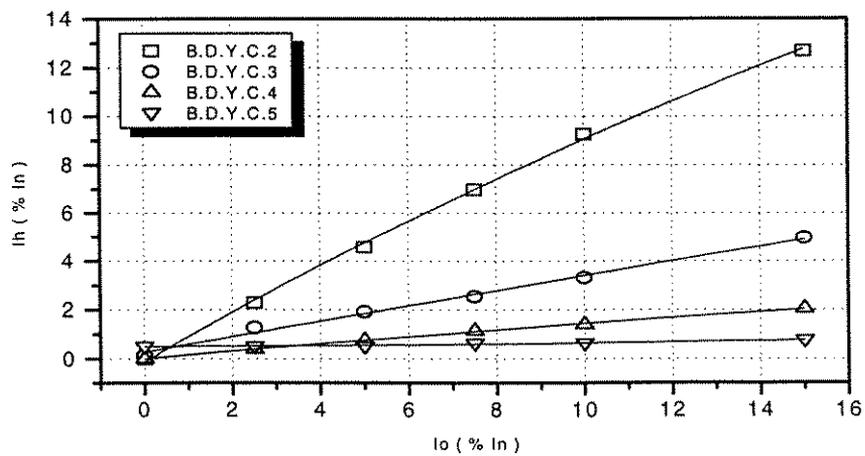
Os gráficos da figura 5.7 (a) e 5.7 (b), mostram as formas de onda das correntes de excitação e seus respectivos espectros harmônicos quando o transformador está conectado em estrela aterrada / estrela aterrada.

No gráfico da figura 5.7 (c) é ilustrado o comportamento das amplitudes harmônicas em função da variação de injeção c.c.. Observa-se que a partir de 10 % de injeção c.c., a segunda ordem harmônica apresenta valores superiores aos da terceira ordem harmônica.



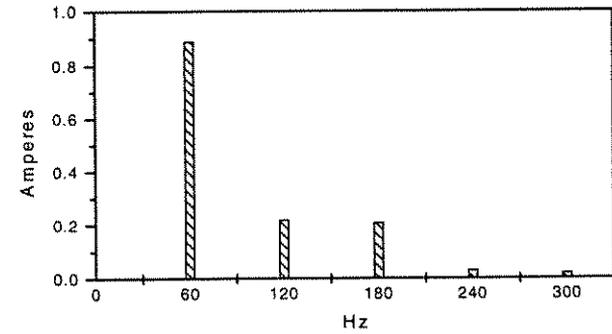
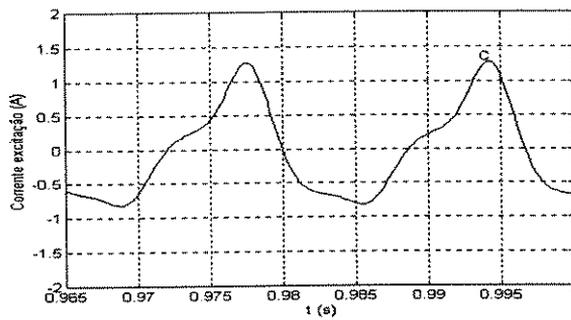
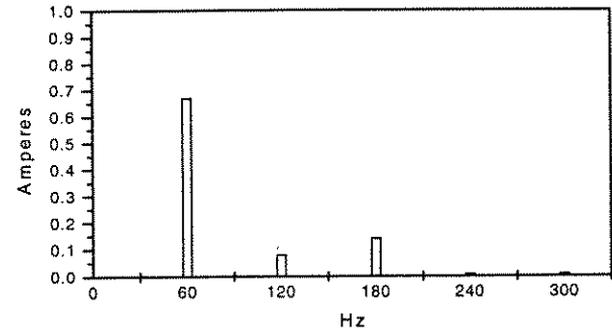
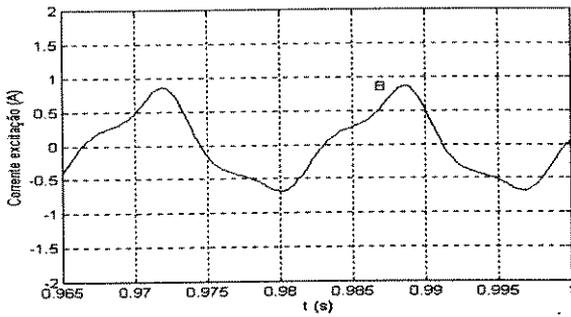
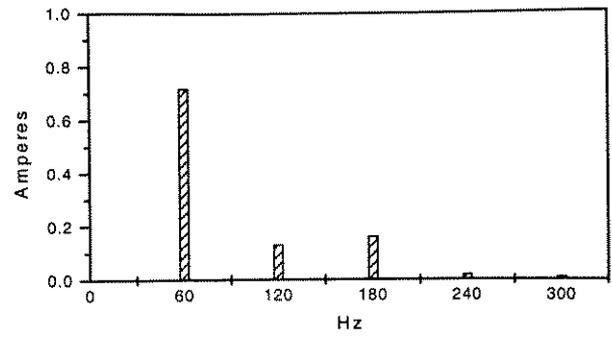
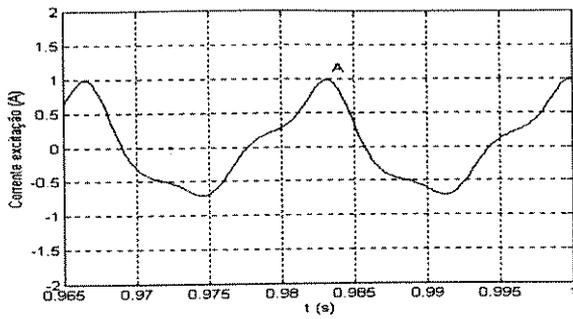
(a) Correntes de Excitação - Fases A-B-C

(b) Espectro Harmônico - Fases A-B-C



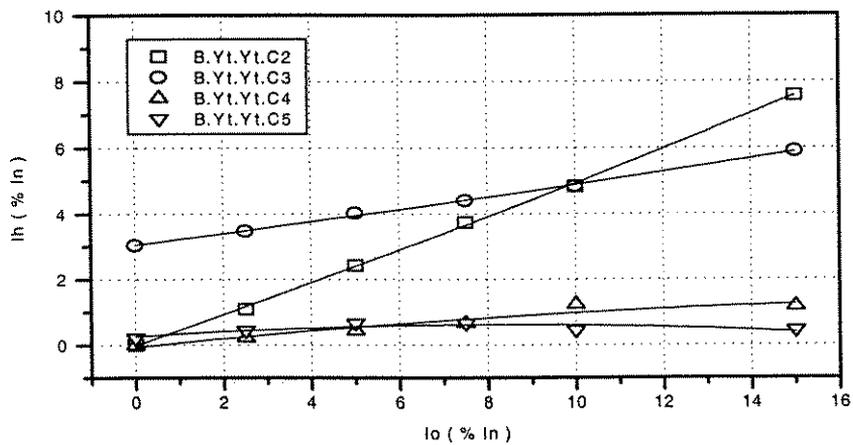
(c) Amplitudes das harmônicas em função da excitação c.c. - Fase C

Figura 5.6 - Forma de onda e espectro harmônico das correntes de excitação - conexão D / Y



(a) Correntes de Excitação - Fases A-B-C

(b) Espectro Harmônico - Fases A-B-C



(c) Amplitudes das harmônicas em função da excitação c.c. - Fase C

Figura 5.7 - Forma de onda e espectro harmônico das correntes de excitação - conexão Yt / Yt

B.2 - Injeção Idêntica nas Três Fases - Para o caso da possibilidade de ocorrência de injeções iguais de corrente contínua nas três fases do banco trifásico de transformadores, foi adotado um padrão de 5% de I_n , e os resultados podem ser observados na figura 5.8.

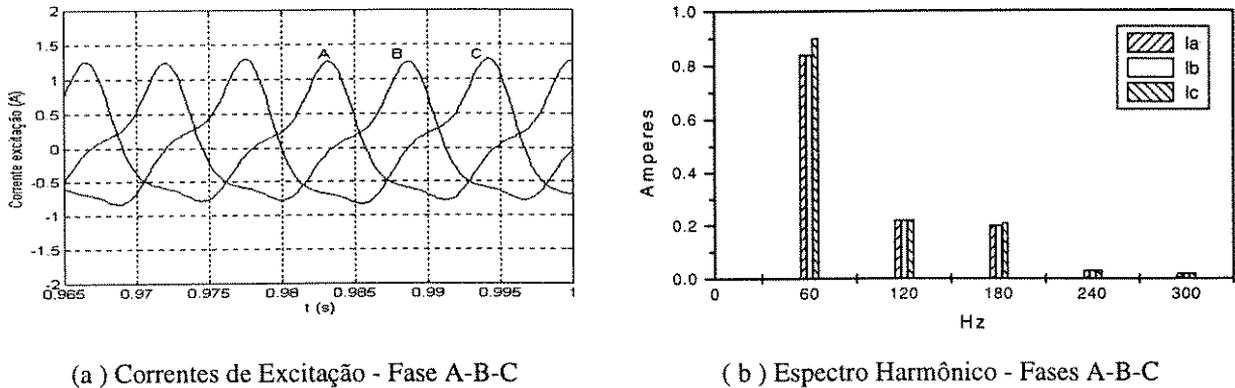


Figura 5.8 - Forma de onda e espectro harmônica das correntes de excitação para injeção cc equilibrada - Yt/Yt

5.5 - Resultados da Simulação Digital para o Transformador Trifásico com Núcleo Envolvido

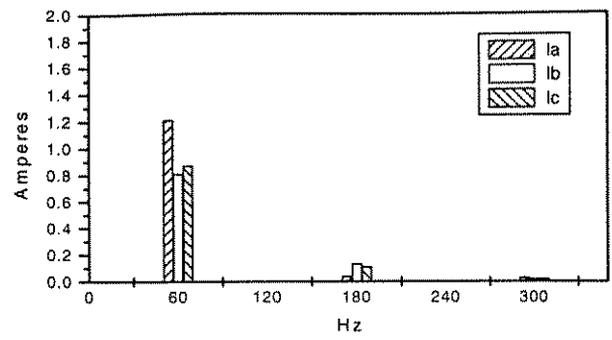
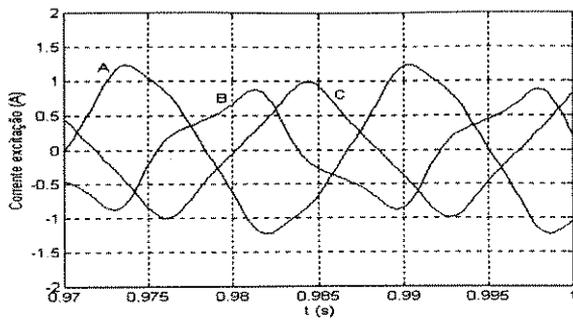
Para o transformador trifásico com núcleo envolvido, foi adotado o mesmo procedimento utilizado para o banco trifásico.

Os gráficos da figura 5.9, ilustram o comportamento das correntes de excitação e os seus respectivos espectros harmônicos, quando o transformador é alimentado somente com tensão alternada c.a. e para diferentes conexões dos seus enrolamentos.

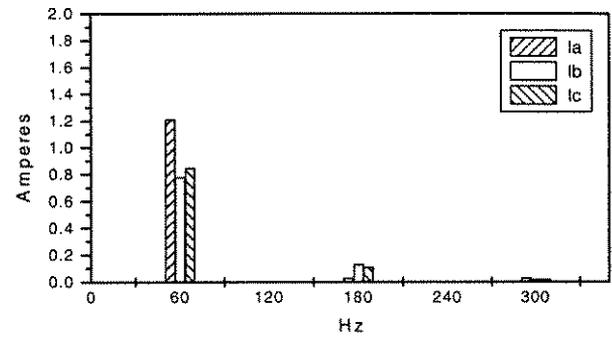
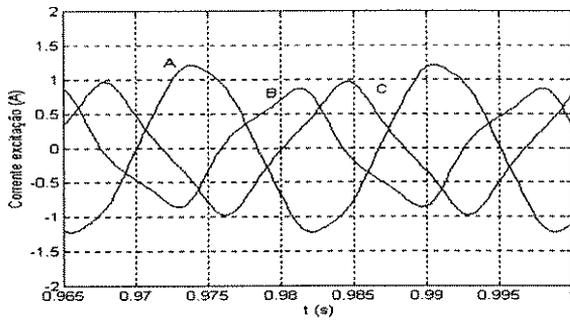
Considerando o **Caso A**, foram realizadas simulações para as conexões estrela isolada / estrela isolada e delta / estrela isolada, apresentadas nas figuras 5.10 e 5.11 respectivamente.

Caso B

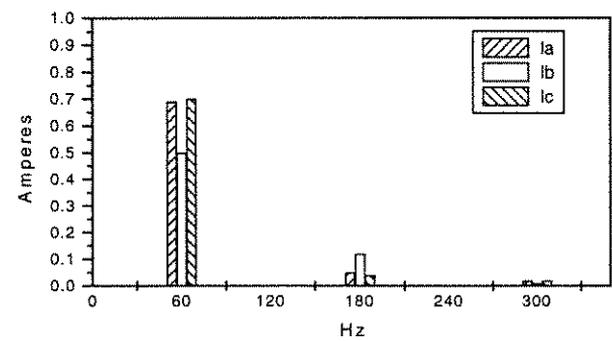
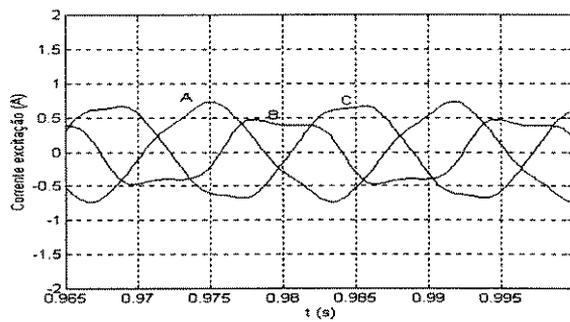
B.1 - Injeção Desbalanceada - Neste caso, foram realizadas simulações para o transformador conectado em delta / estrela aterrada, e os resultados são apresentados nos gráficos da figura 5.12.



(a) Conexão D/Yt

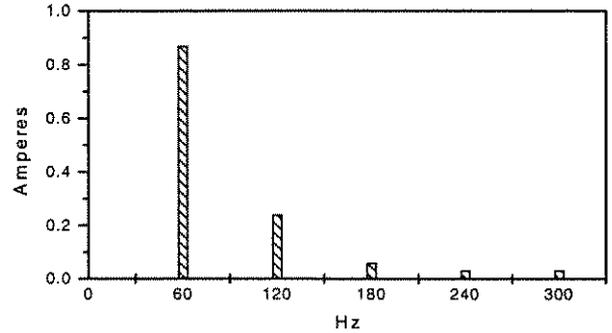
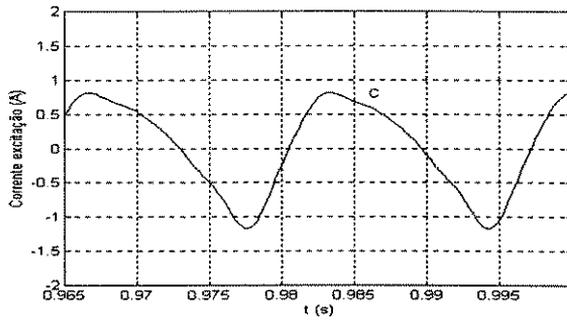
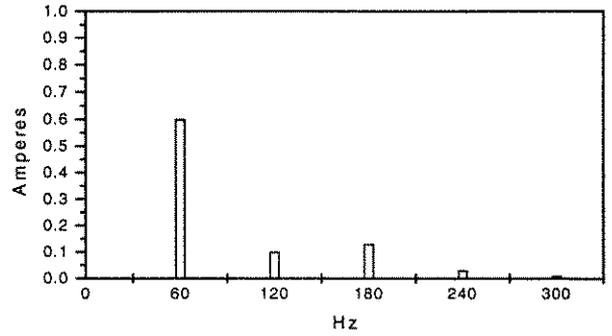
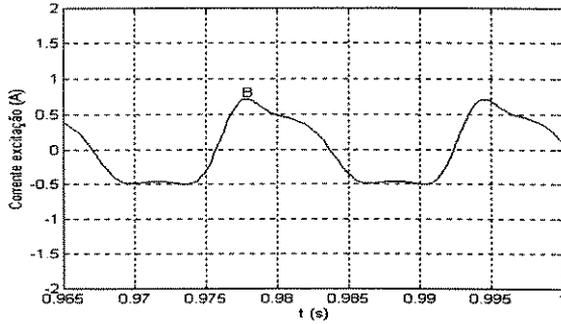
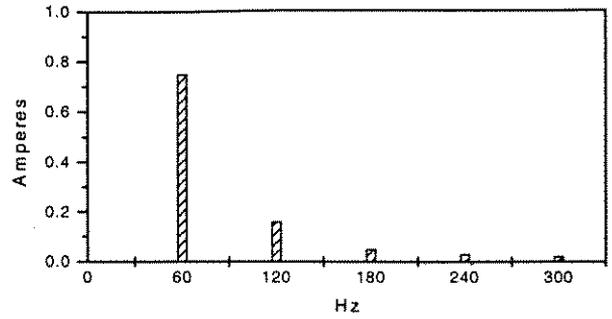
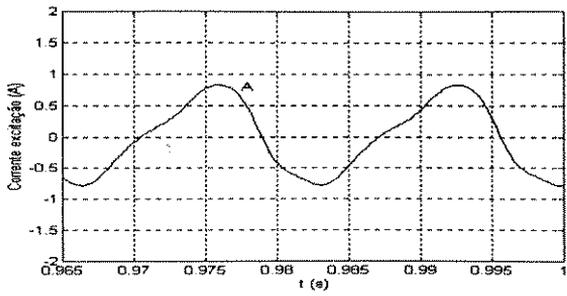


(b) Conexão D/Y



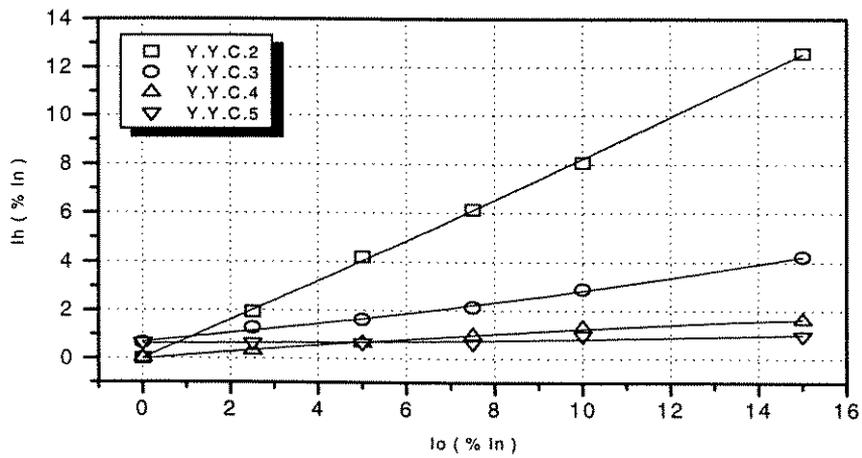
(c) Conexão Y/Y

Figura 5.9 - Forma de onda e espectro harmônico das correntes de excitação em condições normais



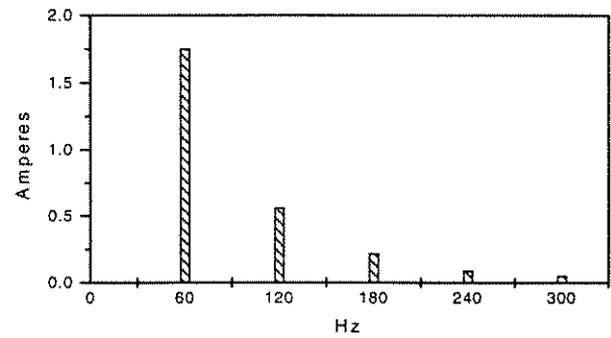
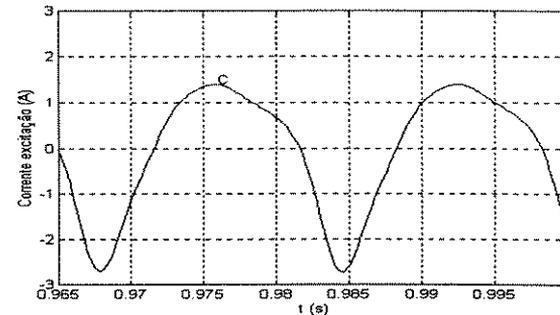
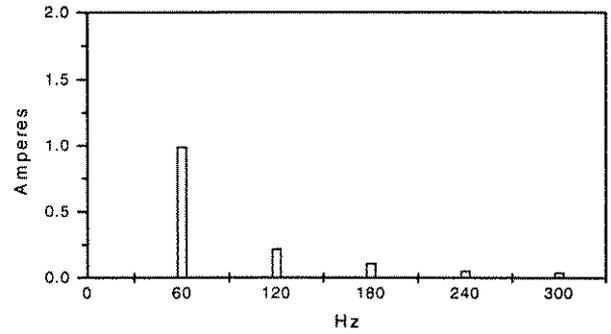
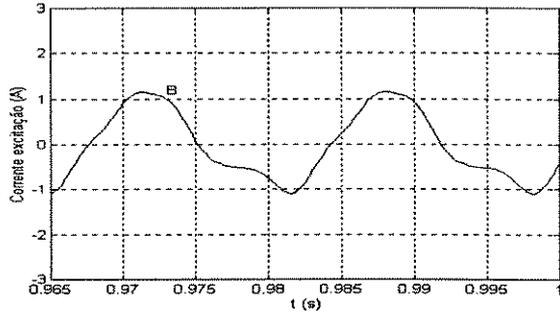
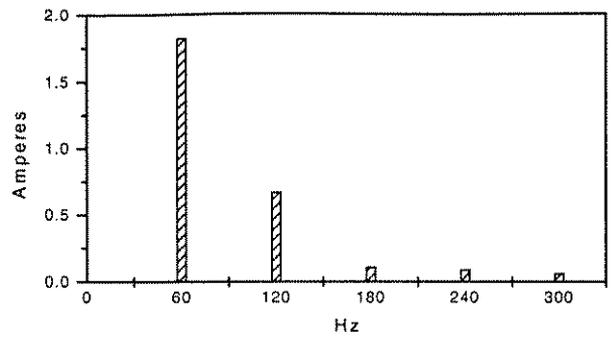
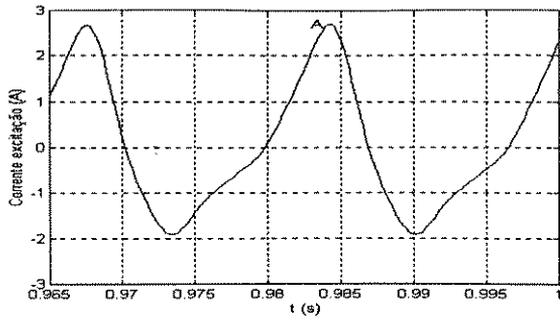
(a) Correntes de excitação - Fases A-B-C

(b) Espectro harmônico - Fases A-B-C



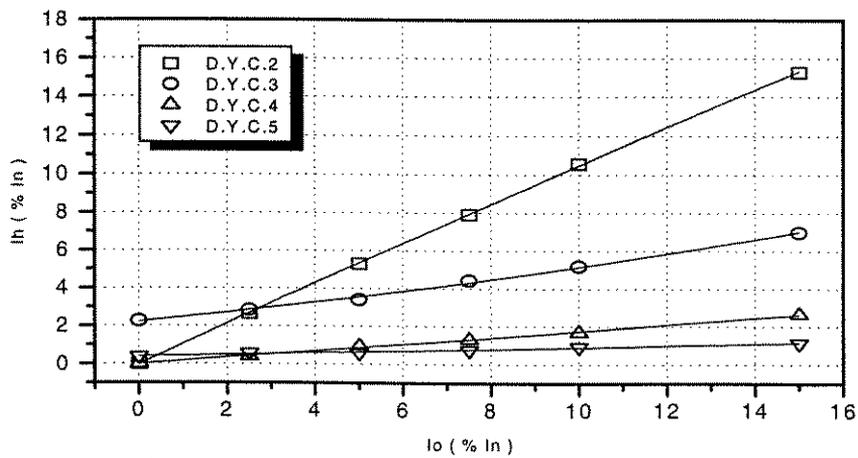
(c) Amplitudes das harmônicas em função da excitação c.c. - Fase C

Figura 5.10 - Forma de onda e espectro harmônico das correntes de excitação - conexão Y / Y



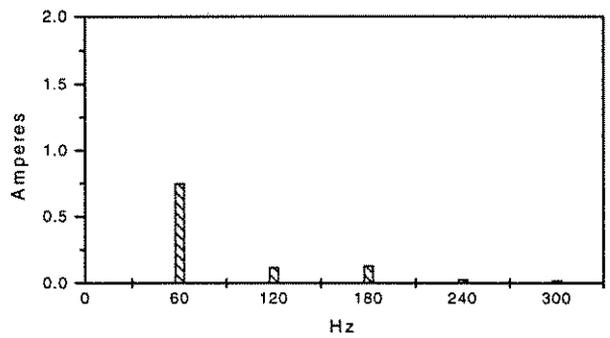
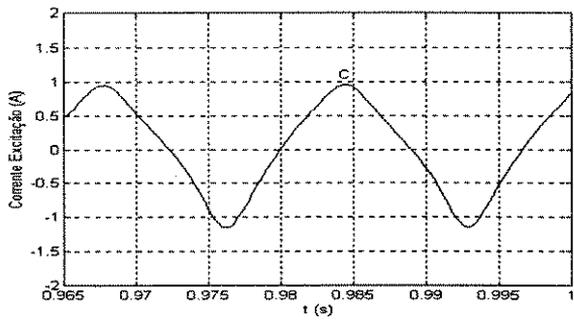
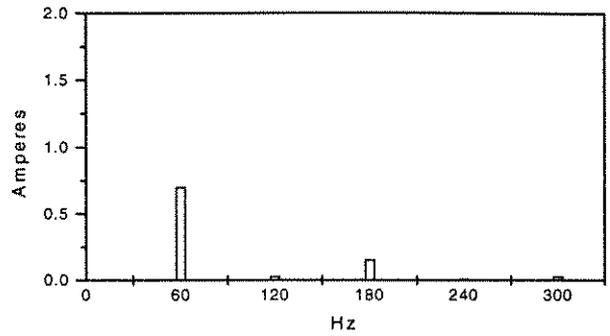
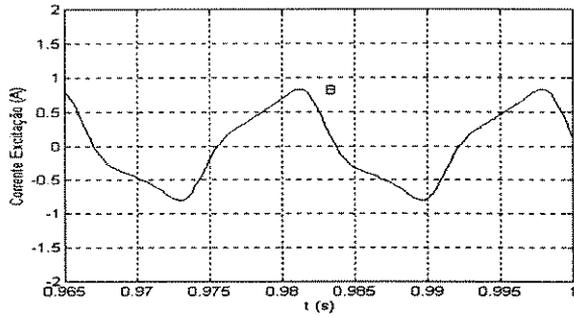
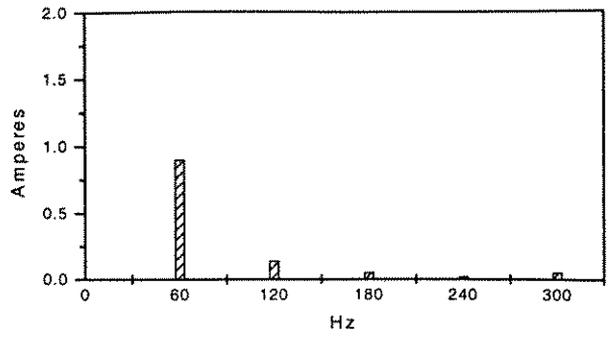
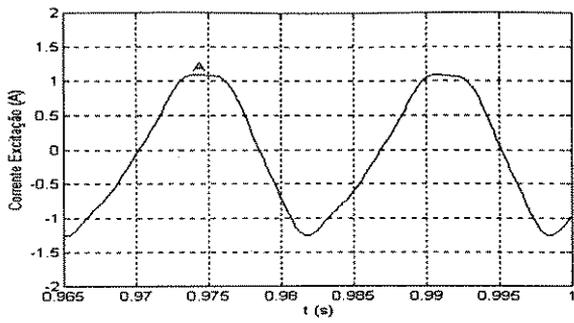
(a) Correntes de excitação - Fases A-B-C

(b) Espectro harmônico - A-B-C



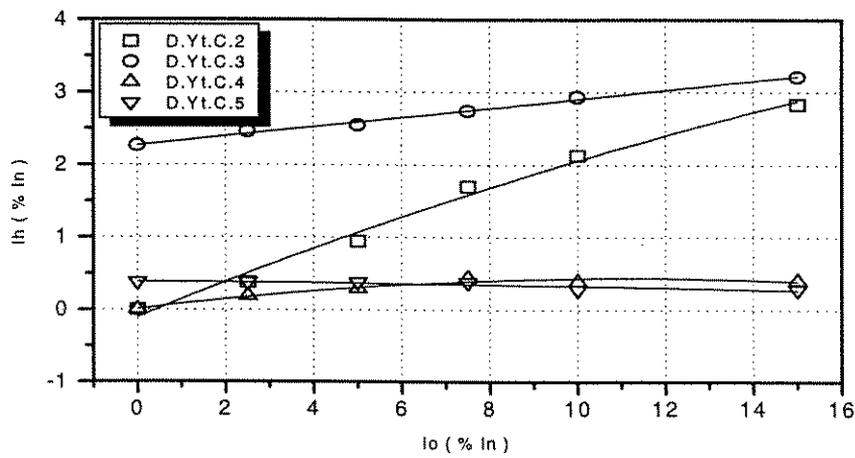
(c) Amplitudes das harmônicas em função da excitação c.c. - Fase C

Figura 5.11 - Forma de onda e espectro harmônico das correntes de excitação - conexão D/Y



(a) Correntes de excitação- Fases A-B-C

(b) Espectro harmônico Fases A-B-C



(c) Amplitudes das harmônicas em função da excitação c.c. - Fase C

Figura 5.12 - Forma de onda e espectro harmônico das correntes de excitação - conexão D / Yt -

5.6 - Comparação entre os Resultados Experimentais e Simulados

A comprovação da validade do modelo matemático proposto, para avaliar o desempenho dos transformadores trifásico do tipo banco de monofásicos e trifásico com núcleo de três colunas quando duplamente excitados, pode ser feita comparando-se os resultados simulados com aqueles obtidos experimentalmente em laboratório.

Devido a dupla excitação, como visto, as componentes de 2^a e 3^a ordens harmônicas apresentam amplitudes elevadas, razão pela qual foram escolhidas nas análises a seguir.

5.6.1 - Banco Trifásico Constituído de Transformadores Monofásicos

A figura 5.13, ilustra o comportamento das amplitudes harmônicas em função da variação da taxa de corrente contínua injetada em um banco trifásico de transformadores para diferente ligações dos seus enrolamentos.

Avaliando-se o comportamento das segunda ordem harmônica, o modelo mostra que o desvio existente entre os resultados simulado e experimental é praticamente constante para as ligações em estrela. Já para os enrolamentos conectados em delta, apresenta um desvio mais acentuado para injeções c.c. superiores a 8% de I_n .

Já para as terceiras ordens harmônicas, o modelo apresentou um desvio relativamente pequeno, possuindo o mesmo comportamento semelhante para as conexões analisadas.

Comparando-se os resultados experimentais com os obtidos por simulação digital, pode ser observado que o modelo matemático proposto para o banco trifásico de transformadores constituídos por unidades monofásicas, é adequado para a sua representação quando os mesmos são duplamente excitados.

Para as diferentes conexões analisadas, houve uma variação entre os resultados da ordem de 5% para pequenas injeções c.c. e de 16% para as altas taxas. A variação média ficou em torno de 10%.

5.6.2 - Transformador Trifásico de Núcleo Envolvido

Da mesma forma que para o banco trifásico, para o caso do transformador trifásico com núcleo de três colunas (tipo envolvido), o modelo matemático proposto apresentou um

desempenho satisfatório, possibilitando uma visualização bastante abrangente do fenômeno da dupla excitação, conforme mostra a figura 5.14.

Os desvios ocorridos entre os resultados experimentais e simulados, para as segunda e terceira ordens harmônicas, apresentam praticamente o mesmo comportamento para todas as conexões analisadas.

A comparação entre os resultados obtidos com a simulação digital e os experimentais, mostra que para as baixas injeções de corrente contínua o desvio médio é de aproximadamente 7%, enquanto para as altas injeções é de 18 %.

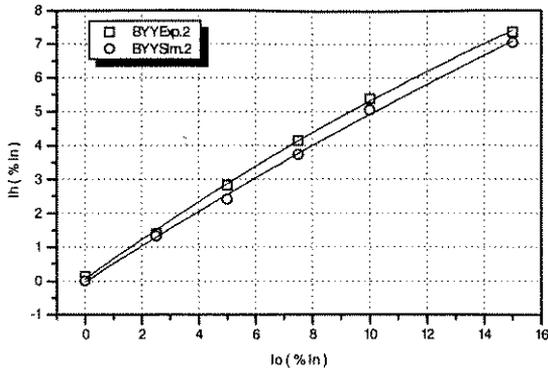
5.7 - Conclusões

A compatibilidade entre os resultados obtidos experimentalmente e pela simulação digital, tanto para o banco trifásico 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 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 introduz um conteúdo harmônico característico do seu próprio sistema de retificação, interferindo nas medições harmônicas decorrentes do fenômeno estudado, sobretudo para aquelas de frequências mais altas.

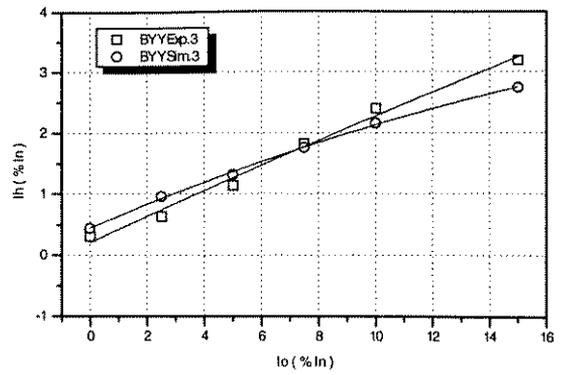
Outro aspecto a ser enfatizado são os pequenos desequilíbrios existentes entre os transformadores utilizados como teste e o auxiliar, o que praticamente impossibilita anular completamente as correntes senoidais induzidas no secundário do transformador teste, resultando assim em uma flutuação no valor das correntes contínuas injetada.

Observou-se também que a fonte de alimentação ca apresentou, durante a realização dos ensaios experimentais, forma de onda não senoidal, o que certamente interferiu nos resultados.

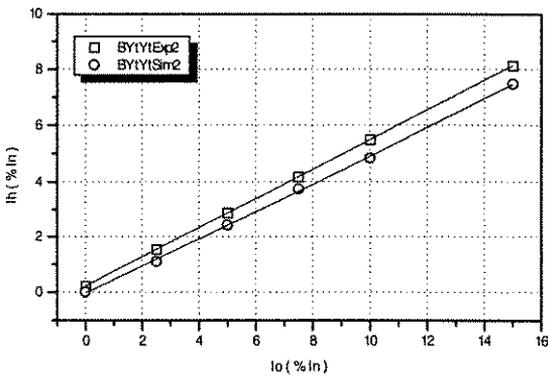
Finalmente, um outro fator que influenciou nos resultados simulados foi a obtenção dos parâmetros do circuito equivalente dos transformadores. Os parâmetros utilizados na simulação digital foram obtidos pelos métodos tradicionais recomendados pelas normas nacionais. Nos dias atuais, metodologias mais precisas são recomendadas por instituições, como o IEEE, onde são utilizados equipamentos considerados de terceira geração, os quais não dispomos.



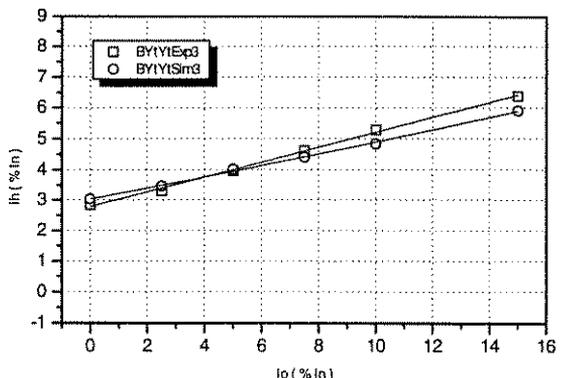
(a) 2ª Harmônica - ligação Y / Y



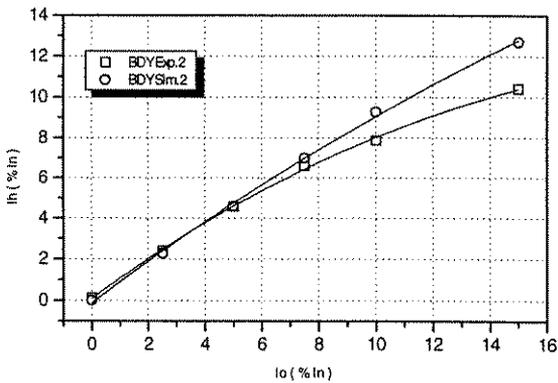
(b) 3ª harmônica - ligação Y / Y



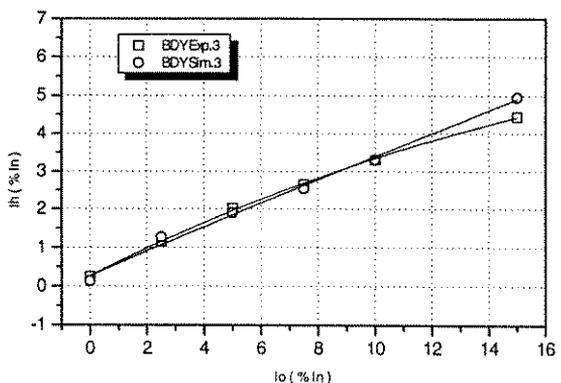
(a) 2ª harmônica - ligação Yt / Yt



(b) 3ª harmônica - ligação Yt / Yt

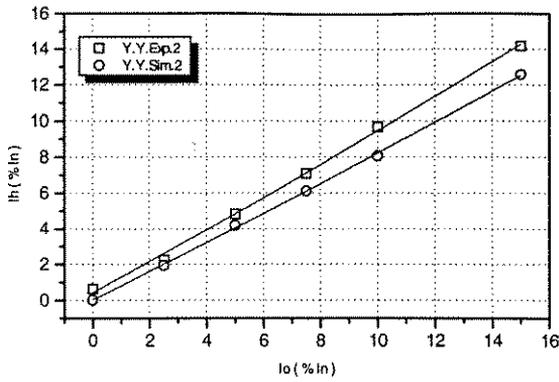


(a) 2ª harmônica - ligação D / Y

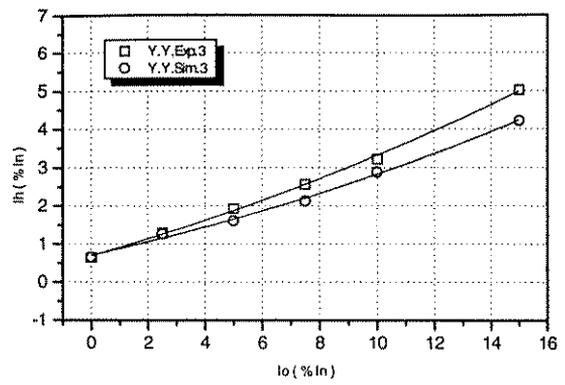


(b) 3ª harmônica - ligação D / Y

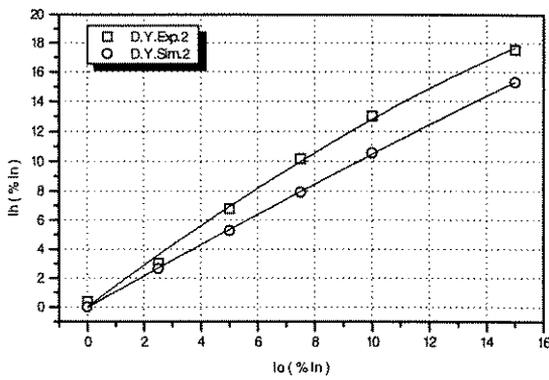
Figura 5.13 - Comparação entre os resultados experimentais e simulados da variação da 2ª e 3ª ordens harmônicas para o banco trifásico de transformadores



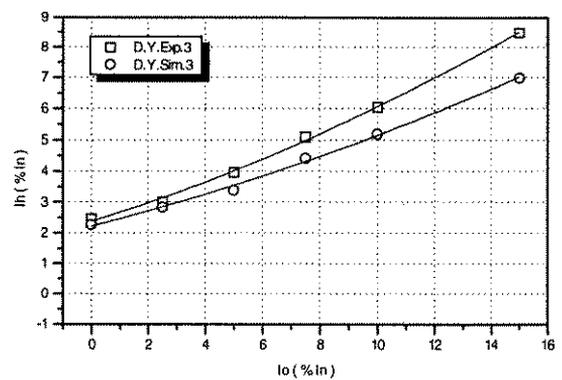
(a) 2ª Harmônica - ligação Y / Y



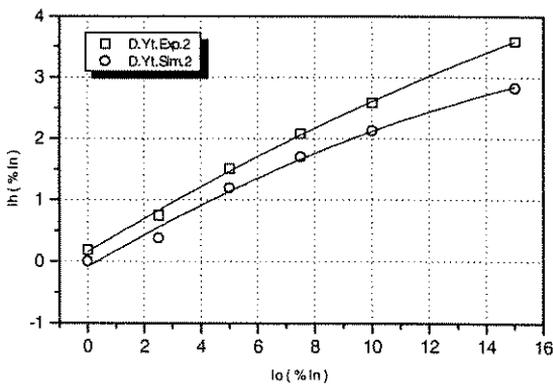
(b) 3ª harmônica - ligação Y / Y



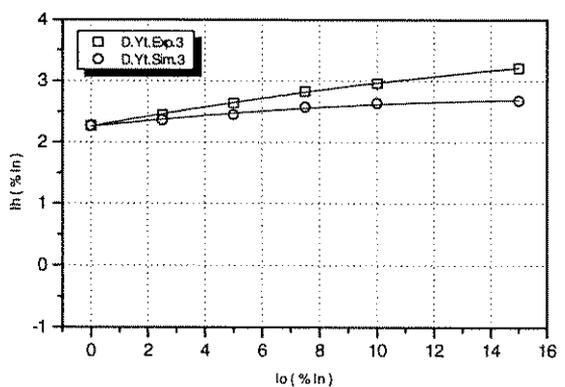
(a) 2ª Harmônica - ligação D / Y



(b) 3ª harmônica - ligação D / Y



(a) 2ª Harmônica - ligação D / Yt



(b) 3ª harmônica - ligação D / Yt

Figura 5.14 - Comparação entre os resultados experimentais e simulados da variação da 2ª e 3ª ordens harmônicas para o transformador trifásico de núcleo envolvido

CAPÍTULO 6

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DOS TRANSFORMADORES COMO FONTE HARMÔNICA QUANDO DUPLAMENTE EXCITADOS

6.1 - Objetivo

O objetivo deste capítulo é analisar o comportamento dos transformadores como uma fonte harmônica introduzida nos sistemas elétricos de potência, sob o ponto de vista da distribuição seqüencial do conteúdo harmônico das correntes de excitação quando os transformadores são submetidos a uma condição duplamente excitada.

As análises deste capítulo referem-se a bancos de transformadores trifásicos, cujas unidades monofásicas possuem características magnéticas semelhantes, e a transformadores trifásicos com núcleo envolvido.

6.2 - Introdução

Os resultados apresentados a seguir, foram obtidos a partir de simulação digital no domínio do tempo utilizando-se o ambiente “MATLAB-SIMULINK - Versão 4.0”.

Com o objetivo de investigar o comportamento das correntes de excitação, foram considerados transformadores trifásicos composto por unidades monofásicas e transformadores trifásicos com núcleo de três colunas para diferentes conexões dos enrolamentos.

Os casos foram simulados admitindo-se alimentação c.a. equilibrada e livre de distorções harmônicas. Os parâmetros elétricos das três unidades monofásicas e das três fases da unidade transformadora trifásica foram considerados idênticos.

Os dados dos transformadores foram obtidos a partir de unidades de baixa potência utilizadas em laboratório, cujos principais parâmetros são apresentados no capítulo 3.

A partir dos ensaios a vazio obteve-se os dados para o cálculo das resistências associadas as perdas no núcleo bem como para o ajuste hiperbólico à característica normal de magnetização.

O ajuste da função hiperbólica para a representação da não linearidade magnética

foi feito através do método dos mínimos quadrados e os resultados finais obtidos para o transformadores monofásicos e trifásicos são dados nas expressões (5.1) e (5.2) respectivamente, e as curvas normais de magnetização adotadas são ilustradas nas figuras 5.2 e 5.3 ,ver capítulo 5.

Para cada tipo considerado, adotou-se quatro padrões de excitação c.c., no sentido de investigar as peculiaridades associadas aos diferentes tipos de saturação assimétrica.

No primeiro padrão de excitação c.c., denominado caso 1, considera-se corrente contínua nula nas três fases e tem como objetivo identificar as principais características das correntes de excitação dos transformadores sob condições normais de operação. Este caso é utilizado como referência para efeito de comparação com os demais casos estudados.

O segundo padrão, caso 2, corresponde a uma condição de injeção c.c. onde o somatório das correntes contínuas circulantes nas três fases é nulo. Tal situação operativa pode ser encontrada em instalações conversoras e compensadoras do tipo estática com RCT operando sob condições não idealizadas [04]. Para este caso, adotou-se então as seguintes proporções de corrente contínua com relação a corrente nominal dos transformadores; $I_{oa} = -10\%I_{nom}$, $I_{ob} = 6,7\%I_{nom}$ e $I_{oc} = 3,3\%I_{nom}$.

As injeções c.c. para o terceiro padrão, caso 3, foram consideradas idênticas nas três fases. Os casos simulados nestas condições têm por objeto analisar o comportamento das correntes de excitação dos diferentes tipos de transformadores quando excitados por correntes contínuas decorrentes de retorno por terra de sistemas de transmissão c.c., assim como aquelas advindas de induções geomagnéticas (GIC) [04]. Para estes casos admitiu-se então os enrolamentos secundários conectados em estrela aterrada. Foram adotadas $I_{oa} = 10\%I_{nom}$, $I_{ob} = 10\%I_{nom}$ e $I_{oc} = 10\%I_{nom}$.

Finalmente o quarto padrão utilizado, caso 4, refere-se a uma situação genérica onde se pretende investigar situações onde a distribuição de corrente contínua entre as fases não é idêntica. Tal fato normalmente decorre da não uniformidade entre as resistências elétricas apresentadas pelas fases do sistema elétrico. Em experimentos realizados em transformadores de potência instalados em regiões sujeitas a GIC é comum constatar-se esta não uniformidade [04]. Adotou-se neste caso: $I_{oa} = 8,9\%I_{nom}$, $I_{ob} = 6,7\%I_{nom}$ e $I_{oc} = 4,4\%I_{nom}$.

6.3 - Análise de Resultados

6.3.1 - CASO 1 : Condições Normais (sem excitação c.c.)

Nos transformadores trifásicos tipo banco, devido a similaridade imposta para as unidades monofásicas, verifica-se claramente o comportamento previsto pela teoria clássica. Devido a independência magnética entre as unidades, a corrente de excitação depende apenas da composição imposta pela conexão dos enrolamentos.

Particularmente, para os casos onde existe a possibilidade de circulação das componentes harmônicas de sequência zero o fluxo no núcleo é praticamente senoidal e o comportamento da corrente de excitação de cada unidade monofásica é idêntico àquele observado para transformadores monofásicos [19].

Para a conexão do primário em estrela aterrada, os resultados para as correntes de excitação, fluxos magnéticos e corrente no condutor neutro são ilustrados nas figuras 6.2(a), 6.3(a), 6.4(a), respectivamente. Na figura 6.2(a) é possível constatar a presença de todo o conteúdo harmônico de ordem ímpar segundo a distribuição sequencial teoricamente prevista e ilustrada na tabela 6.1.

Observa-se que o conteúdo harmônico múltiplo de três (harmônicas “triplens”), como previsto, possuem sequência de fase zero. Desta forma, como consequência, estas componentes harmônicas apresentam-se com amplitudes três vezes maiores no condutor neutro. A figura 6.4 (a) ilustra a forma de onda no condutor neutro e seu conteúdo harmônico.

Na conexão do primário em triângulo, não há circulação de corrente harmônicas múltiplas de três pelas linhas. Conseqüentemente, as correntes de linha apresentam distorção harmônica muito menor do que aquela observada no caso anterior principalmente devido a ausência da terceira harmônica, figura 6.5(a). As correntes harmônicas “triplens” ficam confinadas ao circuito fechado do delta, e garantem um fluxo magnético senoidal no núcleo. Os fluxos magnéticos para este caso são idênticos aos apresentados na figura 6.3(a).

SEQUÊNCIA DE FASE	ORDEM HARMÔNICA
Positiva	1,4,7 ... (3m+1)
Zero	3,6,9 ... (3m+3)
Negativa	2,5,8, ... (3m-1)

$$m = 0,1,2,3 \dots$$

Tabela 6.1 - Distribuição sequencial das componentes harmônicas

Para a conexão do primário em estrela isolada, fisicamente não há possibilidade de

circulação das componentes de sequência zero. Para o caso em análise, isto representa o bloqueio das componentes de terceira harmônica e seus múltiplos, uma vez que sob condições equilibradas de operação estas apresentam apenas componentes de sequência zero. Desta forma, diante da impossibilidade de circulação destas parcelas das correntes magnetizantes, o fluxo magnético deixa de ser senoidal e passa a apresentar um conteúdo harmônico múltiplo de três. Nestas condições as tensões induzidas de fase para neutro também resultarão distorcidas devido a presença das harmônicas múltiplas de três.

A figura 6.6(a) mostra os resultados para as correntes de excitação no caso descrito. As formas de onda são sensivelmente diferentes daquelas apresentadas na figura 6.2(a) para a conexão estrela aterrada devido principalmente a ausência das componentes de harmônicas de ordens múltiplas de três.

Na figura 6.7(a) é possível visualizar a distorção harmônica no fluxo magnético assim como seu conteúdo de terceira harmônica. A tensão resultante entre o ponto de neutro do transformador e a referência do sistema alimentador é ilustrada na figura 6.8(a).

Para os transformadores trifásicos com núcleo de três colunas verifica-se uma não uniformidade entre as correntes de excitação nas fases a, b e c, qualquer que seja a conexão empregada, figuras 6.9(a), 6.10(a), 6.11(a). Neste casos os desequilíbrios observados se devem as diferentes configurações do circuito magnético associado às três fases.

Como se sabe, a metodologia de construção dos núcleos magnéticos dos transformadores de três colunas, embora seja a princípio o resultado da fusão de três núcleos monofásicos, seu aspecto final apresenta menor volume de ferro. Isto decorre da eliminação de algumas secções do núcleo magnético no sentido de planificá-lo. A evolução do arranjo citado é ilustrado na figura 6.1.

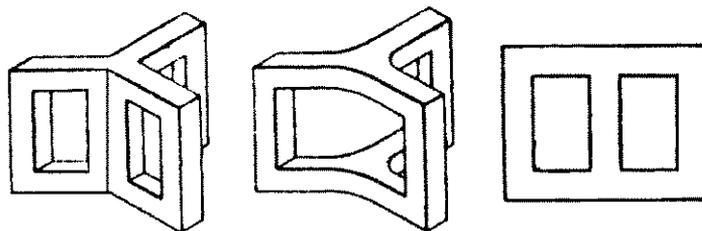


Figura 6.1. Evolução dos núcleos magnéticos para transformadores de três colunas

Este procedimento faz com que apareça um pequeno desequilíbrio entre os circuitos magnéticos bem como nas correntes de excitação das fases a, b e c.

Observa-se que, qualquer que seja a conexão empregada o fluxo magnético no

núcleo apresenta-se praticamente senoidal, figura 6.12(a). Este fato retrata um comportamento fundamentalmente diferente do transformador com núcleo de três colunas quando comparado ao banco de monofásicos ou mesmo ao trifásico com núcleo de cinco colunas [19], [20] [21].

Nas simulações relativas as conexões estrela isolada e triângulo a ausência das componentes de sequência zero nas correntes de excitação é naturalmente esperada. Desta forma, para o caso da conexão estrela isolada, a manutenção do fluxo magnético com um comportamento praticamente senoidal é uma característica muito particular deste tipo de arranjo magnético.

No caso do banco trifásico constituído de monofásicos a supressão das componentes de sequência zero, notadamente dos terceiros harmônicos, das correntes de excitação mediante o uso da conexão estrela isolada, introduz terceiros harmônicos importantes no fluxo magnético e conseqüentemente nas tensões induzidas fase neutro, figura 6.7(a).

No caso em questão o comportamento é semelhante, entretanto os fluxos magnéticos de terceiro harmônico estão praticamente em fase e, desta forma, o fluxo total resultante na culatra se fecha através de um caminho externo ao núcleo magnético o qual possui um alta relutância. Nestas condições, as amplitudes destas parcelas do fluxo magnético são relativamente pequenas e praticamente não provocam distorções significativas nas tensões induzidas fase-neutro. O resíduo de terceiro harmônico presente nas correntes de alimentação é devido ao desequilíbrio magnético existente, figura 6.9(a).

O uso da conexão estrela aterrada praticamente não altera o comportamento das correntes de excitação no transformador com núcleo de três colunas, como pode ser visto na figura 6.10(a). Mesmo com a existência de um condutor de aterramento, não se fazem presentes as componentes de sequência zero nas correntes de excitação. Isto se deve ao comportamento do fluxo magnético no núcleo conforme exposto anteriormente, ou seja, o caminho magnético de alta relutância limita drasticamente o fluxo magnético de sequência zero. Nestes casos a corrente de excitação pelo condutor neutro é praticamente nula.

6.3.2 - CASO 2 : $I_{0a} = -10\%I_n$, $I_{0b} = 6,7\%I_n$ e $I_{0c} = 3,3\%I_n$.

Para todos os tipos de conexões empregadas nos estudos realizados verifica-se de um modo geral que este padrão de saturação c.c. provoca o aparecimento de harmônicas pares, altera as amplitudes das harmônicas ímpares e modifica a distribuição sequencial de todas as harmônicas.

Para os transformadores tipo banco com conexão estrela aterrada, cujos resultados da simulação digital são apresentados na figura 6.2(b), constata-se a presença de todas as componentes harmônicas as quais se distribuem em praticamente todas as sequências de fases.

O fluxo magnético no núcleo de cada unidade monofásica apresenta valores médios proporcionais às respectivas correntes de excitação, figuras 6.3(b) e 6.2(b).

A corrente pelo condutor neutro apresenta-se fortemente distorcida, onde cada parcela das componentes de sequência zero das harmônicas das correntes de excitação comparece com o triplo da amplitude do valor correspondente na linha, figura 6.4(b).

O mesmo pode ser observado para as correntes de excitação na conexão delta, ressaltando-se que, para este caso naturalmente não existem componentes de sequência zero nas correntes de linha. Em todas as simulações realizadas observou-se uma tendência de concentração das harmônicas pares em apenas uma única sequência de fase, ou seja, elas se apresentam equilibradas. No resultado apresentado na figura 6.5(b), verifica-se que a segunda harmônica possui praticamente somente sequência positiva enquanto que a quarta harmônica tem apenas sequência negativa. Outro aspecto que também se destaca é a distribuição equitativa da componentes harmônicas múltiplas de três entre as sequências de fase positiva e negativa.

Na conexão estrela isolada, todas as frequências harmônicas estão presentes nas correntes de excitação e a distribuição sequencial para todas as simulações realizadas mostrou-se totalmente aleatória, naturalmente não apresentando componentes de sequência zero, figura 6.6(b).

O fluxo magnético, como observado anteriormente, é distorcido e apresenta agora componentes harmônicas pares, além de um valor médio provocado pela circulação das correntes contínuas, figura 6.7(b). As tensões induzidas não senoidais provocam neste caso o aparecimento de tensões de neutro V_n com valores de pico elevados e componentes harmônicas em todas as frequências, figura 6.8(b).

No transformador com núcleo de três colunas é possível constatar que a saturação c.c. provoca, em geral, efeitos menos drásticos quando comparados aos seus equivalentes do tipo banco de monofásicos, figuras 6.9(b), 6.10(b), 6.11(b). Para o caso da conexões em estrela aterrada, por exemplo, registram-se segundos harmônicos máximos da ordem de 9,8% e 7,9% das suas respectivas correntes nominais para o caso dos transformadores tipo banco, figura 6.2(b), e núcleo de três colunas, figura 6.9(b), respectivamente.

6.3.3 - CASO 3 : $I_{oa} = 10\%I_n$, $I_{ob} = 10\%I_n$ e $I_{oc} = 10\%I_n$

Para uma injeção de corrente contínua idêntica nas três fases verifica-se que para a

conexão estrela aterrada no banco de monofásicos, o comportamento das correntes de excitação é também idêntico nas três fases e apresenta todas as componentes harmônicas, figura 6.2(c).

A distribuição sequencial segue o previsto pela teoria clássica, visto que se trata de um arranjo trifásico equilibrado, ou seja, as unidades monofásicas possuem as mesmas características construtivas e foram excitadas com tensões equilibradas e correntes contínuas iguais. Neste caso, a corrente pelo condutor neutro, ilustrada na figura 6.4(c), possui apenas harmônicas “triplens”, caracterizada principalmente pela terceira harmônica, cuja amplitude chega a aproximadamente 18% da corrente nominal do transformador.

Nas conexões delta e estrela isolada valem as mesmas observações feitas para o caso estrela aterrada no que diz respeito a distribuição sequencial das harmônicas da corrente de excitação e sua distribuição equilibrada nas três fases, conforme pode-se observar nas figuras 6.5(c) e 6.6(c). Conseqüentemente, para estes casos observa-se a ausência das harmônicas “triplens” nas correntes de linha.

Destaca-se também que embora se verifique um comportamento semelhante entre as amplitudes relativas das componentes harmônicas comuns às conexões estrela isolada e triângulo, as formas de onda das correntes de excitação das mesmas são bastante diferentes (figuras 6.5(c) e 6.6(c)). Tal fato se deve aos deslocamentos angulares diferenciados sofridos pelas componentes harmônicas de sequência positiva (+30°) e negativa (-30°), na composição das correntes de linha para a conexão em delta, como mostra a tabela 6.2.

SEQUÊNCIA	Linha A	Linha B	Linha C
	$I_{ab}-I_{ca}$	$I_{bc}-I_{ab}$	$I_{ca}-I_{bc}$
Positiva	$\sqrt{3}\dot{I}_a e^{j30^\circ}$	$\sqrt{3}\dot{I}_b e^{j30^\circ}$	$\sqrt{3}\dot{I}_c e^{j30^\circ}$
Zero	0	0	0
Negativa	$\sqrt{3}\dot{I}_a e^{-j30^\circ}$	$\sqrt{3}\dot{I}_b e^{-j30^\circ}$	$\sqrt{3}\dot{I}_c e^{-j30^\circ}$

Tabela 6.2 - Composição das correntes de excitação nas linhas

Os transformadores com núcleo de três colunas apresentam, para este padrão de excitação c.c., comportamentos substancialmente diferentes quando comparados aos bancos de monofásicos.

Para qualquer conexão empregada nestes transformadores é possível constatar que a excitação c.c. equilibrada não provoca nenhum efeito sobre as correntes de excitação, como pode ser observado nas figuras 6.9(c), 6.10(c) e 6.11(c). Neste caso, de fato não ocorre a dupla excitação c.a. e c.c..

Os fluxos magnéticos produzidos pelas componentes contínuas são idênticos nas três fases e se compensam mutuamente no núcleo magnético, uma vez que o caminho magnético alternativo pelo ar apresenta uma alta relutância. Desta forma, pode-se concluir que os transformadores com núcleo de três colunas são praticamente imunes aos efeitos da excitação c.c. quando estas são provenientes de induções geomagnéticas ou de retorno por terra na operação monopolar de sistemas de transmissão c.c.. Naturalmente tal afirmativa somente se aplica quando a distribuição da componente c.c. for uniforme entre as três fases.

6.3.4 - CASO 4 : $I_{oa} = 8,9\%I_n$, $I_{ob} = 6,7\%I_n$ e $I_{oc} = 4,4\%I_n$.

Neste caso submeteu-se os transformadores a uma injeção c.c. aleatória no sentido de investigar, principalmente, o comportamento das correntes magnetizantes quando da injeção de corrente contínua pelo neutro seguida de uma distribuição assimétrica da mesma entre as fases.

Resultados experimentais apresentados na referência [03], revelam que as correntes induzidas por distúrbios geomagnéticos normalmente não se distribuem de forma equitativa entre as três fases dos sistemas elétricos. Este tipo de assimetria é bastante comum nos sistemas elétricos reais e originam-se dos desequilíbrios entre as resistências c.c. dos enrolamentos dos próprios transformadores bem como do sistema elétrico como um todo.[03].

Dadas as características assimétricas de operação observa-se a presença de todas as harmônicas nas correntes de linha em todas as conexões analisadas para os transformadores do tipo banco de monofásicos.

Observa-se, de um modo geral, nas diferentes situações investigadas sob esta característica de excitação, que as harmônicas das correntes de linha possuem as maiores amplitudes para a conexão estrela aterrada, quando analisadas relativamente aos seus respectivos valores nominais (figuras 6.2(d), 6.5(d), 6.6(d)).

Os transformadores de três colunas são também afetados pela excitação c.c, uma vez que neste caso realmente ocorre a magnetização assimétrica do núcleo. Devido a distribuição não uniforme da corrente contínua adotada não há a compensação total entre os fluxos

magnéticos c.c. das três fases e como consequência cada fase permanece com um nível residual c.c. que promove a citada assimetria.

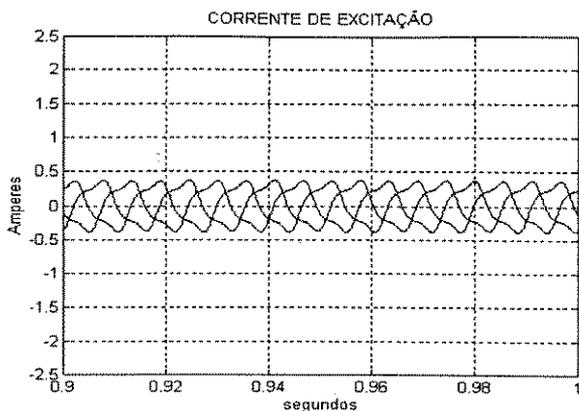
Como esperado, mesmo nesta condição operativa é possível concluir que os transformadores de três colunas são muito menos sensíveis aos efeitos da dupla excitação c.a. e c.c., quando comparados com os transformadores do tipo banco. Isto pode ser observado nas figuras 6.9(d), 6.10(d), 6.11(d)).

6.4 - Conclusão

A análise desenvolvida neste capítulo mostra de uma forma bastante ampla, os efeitos provocados pelo fenômeno da dupla excitação nas correntes de excitação, nos fluxos e nas tensões induzidas dos transformadores trifásicos do tipo banco de monofásicos e trifásicos com núcleo envolvido.

No desenvolvimento das simulações, para as quatro diferentes possibilidades de ocorrência da dupla excitação, foi possível observar que para cada tipo de transformador e conexão utilizada, o comportamento das correntes de excitação bem como fluxos e tensões induzidas apresentam formas bastante particulares. Para cada situação, foram feitas análises sobre o conteúdo harmônico e suas respectivas componentes sequenciais.

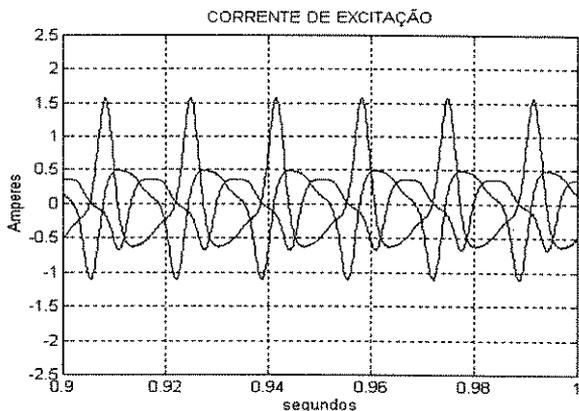
Na avaliação dos resultados, deste estudo evidencia-se a necessidade de precauções no emprego de dispositivos que solucionem problemas dos sistemas elétricos de potência, mas que em contra partida possam, devido a certas condições de operação, causar outros problemas localizados em equipamentos específicos como, por exemplo, nos transformadores.



(a - caso 1)

ESPECTRO fases: a-b-c			
N	Ia (M/F)	Ib (M/F)	Ic (M/F)
1	0.34	-49.2	0.34
2	0.00	0.0	0.00
3	0.00	-70.2	0.00
4	0.00	0.0	0.00
5	0.00	0.0	0.00
6	0.00	0.0	0.00
7	0.00	0.0	0.00
8	0.00	0.0	0.00
9	0.00	0.0	0.00
N	I+ (M/F)	I- (M/F)	Io (M/F)
1	0.34	-49.2	0.00
2	0.00	0.0	0.00
3	0.00	0.0	-70.2
4	0.00	0.0	0.00
5	0.00	0.0	0.00
6	0.00	0.0	0.00

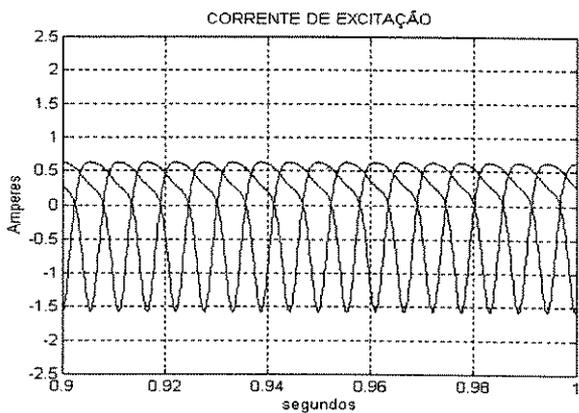
(M- Amplitude (Amperes-pico) / F- Angulos de fase (Graus)



(b - caso 2)

ESPECTRO fases: a-b-c			
N	Ia (M/F)	Ib (M/F)	Ic (M/F)
1	0.02	-70.6	0.61
2	0.45	100.1	0.30
3	0.22	-74.4	0.16
4	0.07	112.6	0.05
5	0.02	-59.5	0.02
6	0.00	0.0	0.00
7	0.00	0.0	0.00
8	0.00	0.0	0.00
9	0.00	0.0	0.00
N	I+ (M/F)	I- (M/F)	Io (M/F)
1	0.62	-65.9	0.12
2	0.23	-110.5	0.00
3	0.03	-43.9	0.03
4	0.00	0.0	0.04
5	0.00	0.0	0.02
6	0.00	0.0	0.00

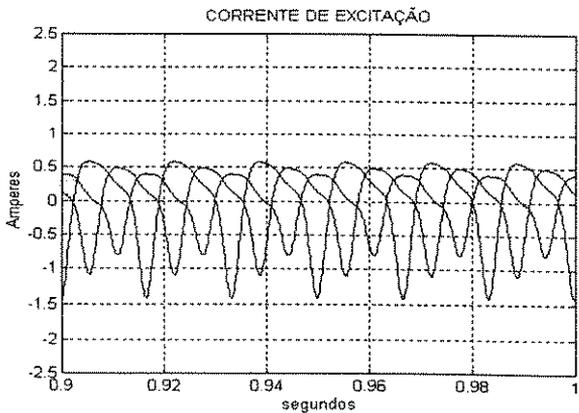
(M- Amplitude (Amperes-pico) / F- Angulos de fase (Graus)



(c - caso 3)

ESPECTRO fases: a-b-c			
N	Ia (M/F)	Ib (M/F)	Ic (M/F)
1	0.02	-70.6	0.02
2	0.45	-73.9	0.45
3	0.22	-74.4	0.22
4	0.07	-67.4	0.07
5	0.02	-59.5	0.02
6	0.00	0.0	0.00
7	0.00	0.0	0.00
8	0.00	0.0	0.00
9	0.00	0.0	0.00
N	I+ (M/F)	I- (M/F)	Io (M/F)
1	0.02	-70.6	0.00
2	0.00	0.0	0.45
3	0.00	0.0	0.00
4	0.07	-67.4	0.00
5	0.00	0.0	0.02
6	0.00	0.0	0.00

(M- Amplitude (Amperes-pico) / F- Angulos de fase (Graus)

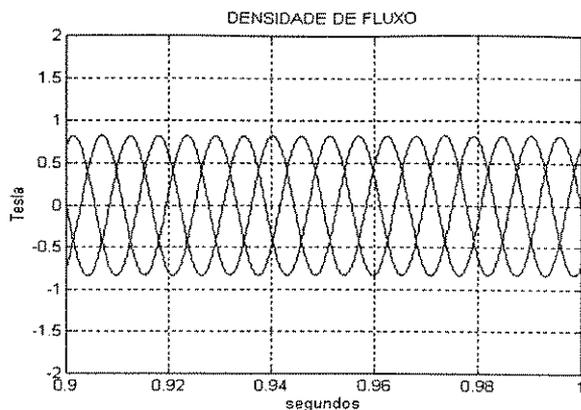


(d - caso 4)

ESPECTRO fases: a-b-c			
N	Ia (M/F)	Ib (M/F)	Ic (M/F)
1	0.75	-69.3	0.61
2	0.40	-80.2	0.30
3	0.20	-74.9	0.16
4	0.07	-68.2	0.05
5	0.02	-60.9	0.02
6	0.00	0.0	0.00
7	0.00	0.0	0.00
8	0.00	0.0	0.00
9	0.00	0.0	0.00
N	I+ (M/F)	I- (M/F)	Io (M/F)
1	0.61	-65.7	0.08
2	0.06	109.1	0.30
3	0.02	-43.1	0.02
4	0.05	-69.4	0.01
5	0.00	0.0	0.02
6	0.00	0.0	0.00

(M- Amplitude (Amperes-pico) / F- Angulos de fase (Graus)

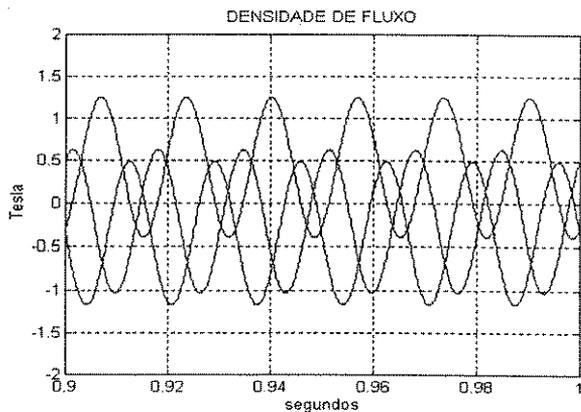
Figura 6.2 - Transformador Trifásico do tipo banco de monofásico - (conexão do primário em Estrela Aterrada)



(a - caso 1)

ESPECTRO fases: a-b-c			
H	fa (M/F)	fb (M/F)	fc (M/F)
1	0.82	-86.1	0.82
2	0.00	0.0	0.00
3	0.00	0.0	0.00
4	0.00	0.0	0.00
5	0.00	0.0	0.00
6	0.00	0.0	0.00
7	0.00	0.0	0.00
8	0.00	0.0	0.00
9	0.00	0.0	0.00
H	I+ (M/F)	I- (M/F)	Io (M/F)
1	0.82	-86.1	0.00
2	0.00	0.0	0.00
3	0.00	0.0	0.00
4	0.00	0.0	0.00
5	0.00	0.0	0.00
6	0.00	0.0	0.00

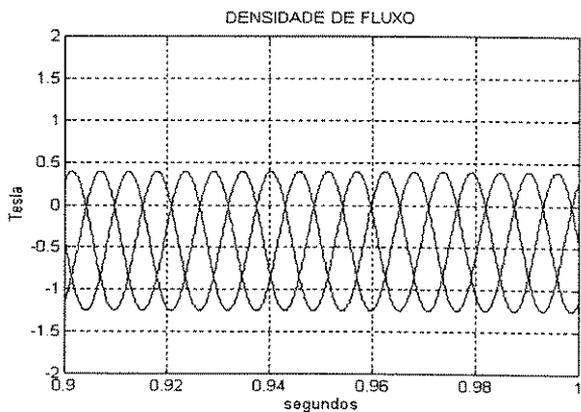
(M- Amplitude (Tesla-pico) / F- Angulos de fase (Graus)



(b - caso 2)

ESPECTRO fases: a-b-c			
H	fa (M/F)	fb (M/F)	fc (M/F)
1	0.82	-86.1	0.82
2	0.00	0.0	0.00
3	0.00	0.0	0.00
4	0.00	0.0	0.00
5	0.00	0.0	0.00
6	0.00	0.0	0.00
7	0.00	0.0	0.00
8	0.00	0.0	0.00
9	0.00	0.0	0.00
H	I+ (M/F)	I- (M/F)	Io (M/F)
1	0.82	-86.1	0.00
2	0.00	0.0	0.00
3	0.00	0.0	0.00
4	0.00	0.0	0.00
5	0.00	0.0	0.00
6	0.00	0.0	0.00

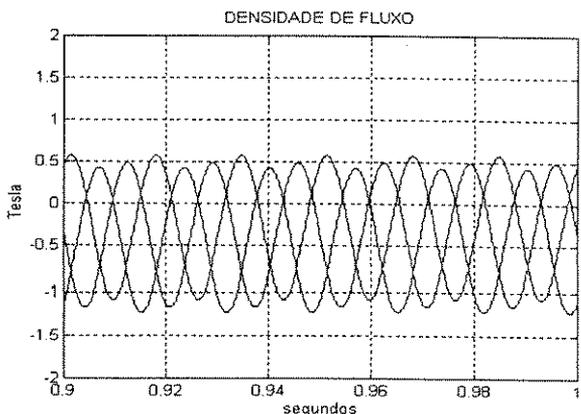
(M- Amplitude (Tesla-pico) / F- Angulos de fase (Graus)



(c - caso 3)

ESPECTRO fases: a-b-c			
H	fa (M/F)	fb (M/F)	fc (M/F)
1	0.82	-86.1	0.82
2	0.00	0.0	0.00
3	0.00	0.0	0.00
4	0.00	0.0	0.00
5	0.00	0.0	0.00
6	0.00	0.0	0.00
7	0.00	0.0	0.00
8	0.00	0.0	0.00
9	0.00	0.0	0.00
H	I+ (M/F)	I- (M/F)	Io (M/F)
1	0.82	-86.1	0.00
2	0.00	0.0	0.00
3	0.00	0.0	0.00
4	0.00	0.0	0.00
5	0.00	0.0	0.00
6	0.00	0.0	0.00

(M- Amplitude (Tesla-pico) / F- Angulos de fase (Graus)

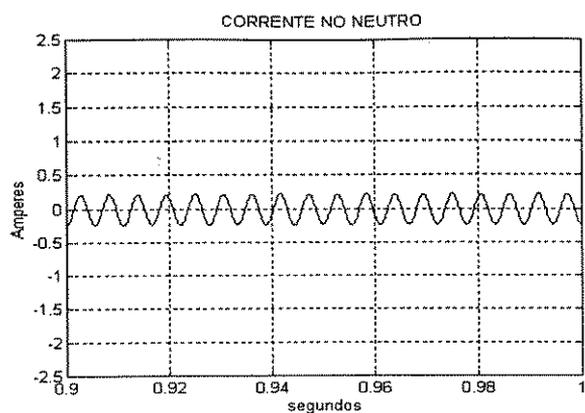


(d - caso 4)

ESPECTRO fases: a-b-c			
H	fa (M/F)	fb (M/F)	fc (M/F)
1	0.82	-86.1	0.82
2	0.00	0.0	0.00
3	0.00	0.0	0.00
4	0.00	0.0	0.00
5	0.00	0.0	0.00
6	0.00	0.0	0.00
7	0.00	0.0	0.00
8	0.00	0.0	0.00
9	0.00	0.0	0.00
H	I+ (M/F)	I- (M/F)	Io (M/F)
1	0.82	-86.1	0.00
2	0.00	0.0	0.00
3	0.00	0.0	0.00
4	0.00	0.0	0.00
5	0.00	0.0	0.00
6	0.00	0.0	0.00

(M- Amplitude (Tesla-pico) / F- Angulos de fase (Graus)

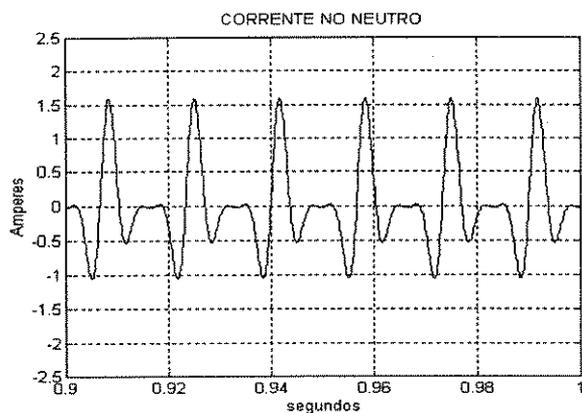
Figura 6.3 - Transformador Trifásico do tipo banco de monofásico - (conexão do primário em Estrela Aterrada)



ESPECTRO		N	Amplitude	Fase
1		1	0.00	0.0
2		2	0.00	0.0
3	████████████████████	3	0.23	-70.2
4		4	0.00	0.0
5		5	0.00	0.0
6		6	0.00	0.0
7		7	0.00	0.0
8		8	0.00	0.0
9		9	0.00	0.0

(Amplitudes em A — θ e angulos de fase em graus)

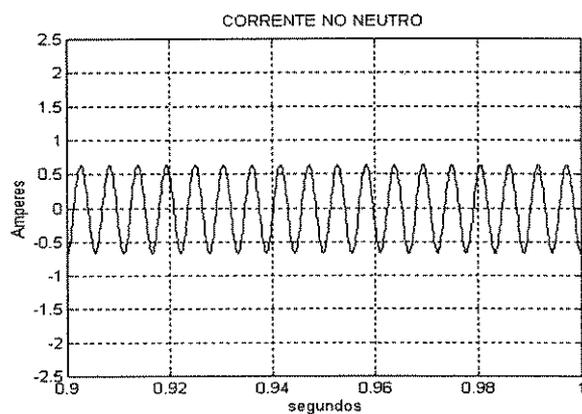
(a - caso 1)



ESPECTRO		N	Amplitude	Fase
1	████████████████	1	0.36	-112.2
2	████████████████████	2	0.68	88.9
3	████████████████████	3	0.48	-75.5
4	████████	4	0.11	122.4
5		5	0.01	-24.3
6		6	0.00	0.0
7		7	0.00	0.0
8		8	0.00	0.0
9		9	0.00	0.0

(Amplitudes em A — θ e angulos de fase em graus)

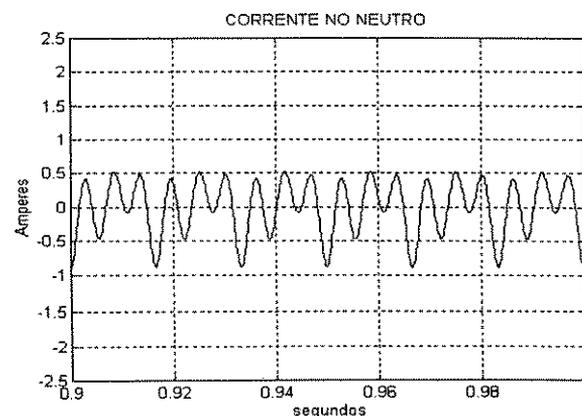
(b - caso 2)



ESPECTRO		N	Amplitude	Fase
1		1	0.00	0.0
2		2	0.00	0.0
3	████████████████████	3	0.65	-74.4
4		4	0.00	0.0
5		5	0.00	0.0
6		6	0.02	-42.2
7		7	0.00	0.0
8		8	0.00	0.0
9		9	0.00	0.0

(Amplitudes em A — θ e angulos de fase em graus)

(c - caso 3)

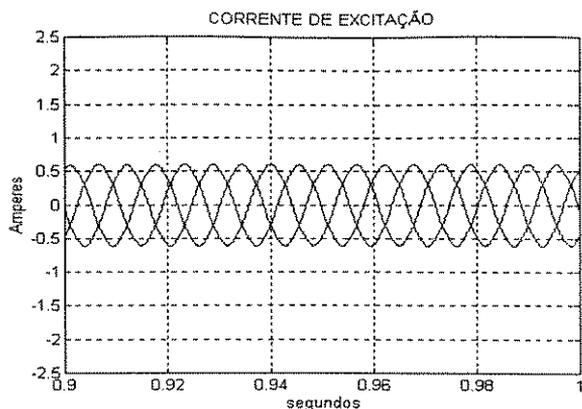


ESPECTRO		N	Amplitude	Fase
1	████████████████	1	0.25	-113.1
2	████████████████	2	0.17	-49.1
3	████████████████████	3	0.47	-75.0
4	████████	4	0.03	-95.2
5		5	0.00	0.0
6		6	0.01	-52.5
7		7	0.00	0.0
8		8	0.00	0.0
9		9	0.00	0.0

(Amplitudes em A — θ e angulos de fase em graus)

(d - caso 4)

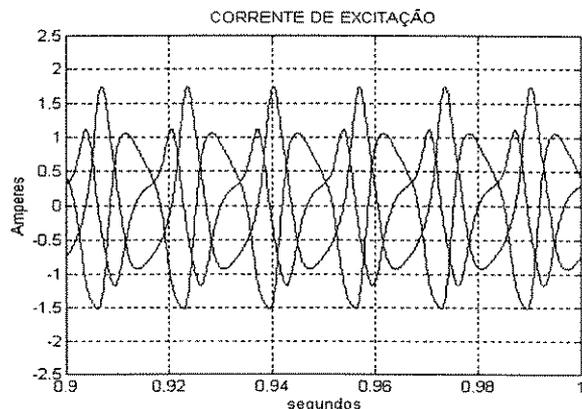
Figura 6.4. - Transformador Trifásico do tipo banco de monofásico - (conexão do primário em Estrela Aterrada)



(a - caso 1)

ESPECTRO fases: a-b-c			
N	Ia (M/F)	Ib (M/F)	Ic (M/F)
1	0.60	-49.2	0.60
2	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00
5	0.01	110.3	0.01
6	0.00	0.00	0.00
7	0.00	0.00	0.00
8	0.00	0.00	0.00
9	0.00	0.00	0.00
N	I+ (M/F)	I- (M/F)	Io (M/F)
1	0.60	-49.2	0.00
2	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	-110.4
6	0.00	0.00	0.00

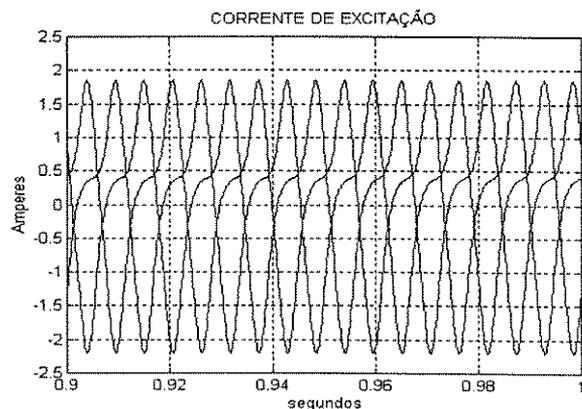
(M- Amplitude (Amperes-pico) / F- Angulos de fase (Graus)



(b - caso 2)

ESPECTRO fases: a-b-c			
N	Ia (M/F)	Ib (M/F)	Ic (M/F)
1	1.16	-56.0	1.21
2	0.39	140.9	0.40
3	0.12	18.3	0.06
4	0.07	-107.5	0.06
5	0.03	166.8	0.03
6	0.00	0.00	0.00
7	0.00	0.00	0.00
8	0.00	0.00	0.00
9	0.00	0.00	0.00
N	I+ (M/F)	I- (M/F)	Io (M/F)
1	1.07	-65.0	0.21
2	0.39	-140.5	0.01
3	0.06	16.1	0.06
4	0.00	0.00	0.07
5	0.01	0.00	0.03
6	0.00	0.00	0.00

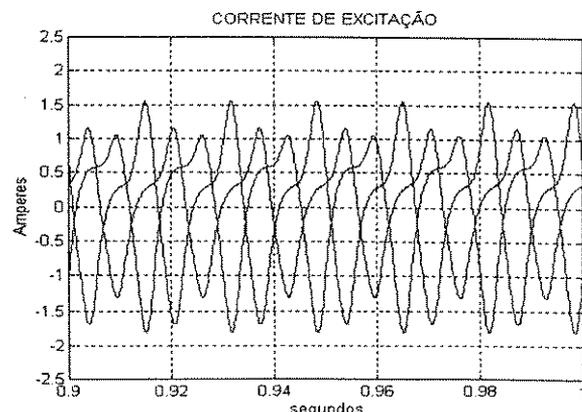
(M- Amplitude (Amperes-pico) / F- Angulos de fase (Graus)



(c - caso 3)

ESPECTRO fases: a-b-c			
N	Ia (M/F)	Ib (M/F)	Ic (M/F)
1	1.43	-70.6	1.43
2	0.77	18.1	0.77
3	0.00	0.00	0.00
4	0.13	22.6	0.13
5	0.04	120.5	0.04
6	0.00	0.00	0.00
7	0.00	0.00	0.00
8	0.00	0.00	0.00
9	0.00	0.00	0.00
N	I+ (M/F)	I- (M/F)	Io (M/F)
1	1.43	-70.6	0.00
2	0.00	0.00	0.77
3	0.00	0.00	0.00
4	0.13	22.6	0.00
5	0.00	0.00	0.04
6	0.00	0.00	0.00

(M- Amplitude (Amperes-pico) / F- Angulos de fase (Graus)

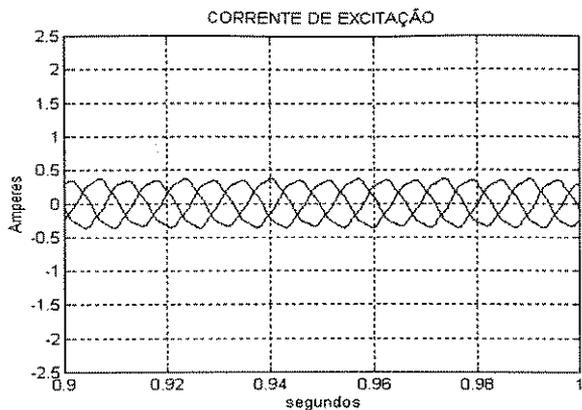


(d - caso 4)

ESPECTRO fases: a-b-c			
N	Ia (M/F)	Ib (M/F)	Ic (M/F)
1	1.11	-58.8	1.15
2	0.53	-1.4	0.60
3	0.00	10.2	0.04
4	0.09	31.6	0.10
5	0.03	109.4	0.03
6	0.00	0.00	0.00
7	0.00	0.00	0.00
8	0.00	0.00	0.00
9	0.00	0.00	0.00
N	I+ (M/F)	I- (M/F)	Io (M/F)
1	1.06	-65.7	0.11
2	0.10	-79.1	0.52
3	0.04	16.9	0.04
4	0.09	20.6	0.02
5	0.00	0.00	0.03
6	0.00	0.00	0.00

(M- Amplitude (Amperes-pico) / F- Angulos de fase (Graus)

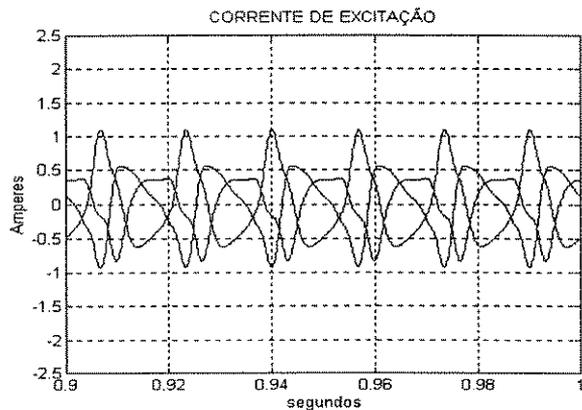
Figura 6.5 - Transformador Trifásico do tipo banco de monofásico - (conexão do primário em Delta)



(a - caso 1)

ESPECTRO fases: a-b-c			
N	Ia (N/F)	Ib (N/F)	Ic (N/F)
1	0.34	-45.2	0.34
2	0.00	0.0	0.00
3	0.00	0.0	0.00
4	0.00	0.0	0.00
5	0.02	49.3	0.02
6	0.00	0.0	0.00
7	0.00	0.0	0.00
8	0.00	0.0	0.00
9	0.00	0.0	0.00
N	I+ (N/F)	I- (N/F)	Io (N/F)
1	0.34	-45.3	0.00
2	0.00	0.0	0.00
3	0.00	0.0	0.00
4	0.00	0.0	0.00
5	0.00	0.0	0.02
6	0.00	0.0	0.00

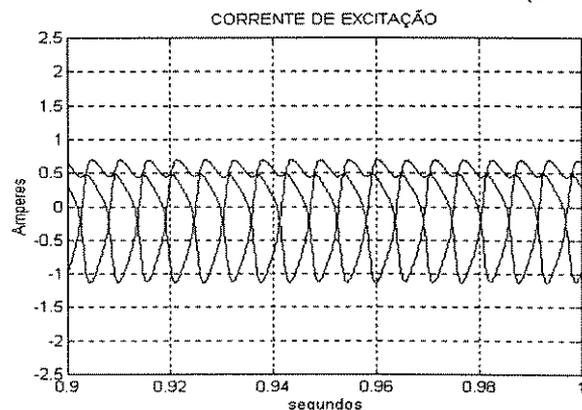
(N- Amplitude (Amperes-pico) / F- Angulos de fase (Graus)



(b - caso 2)

ESPECTRO fases: a-b-c			
N	Ia (N/F)	Ib (N/F)	Ic (N/F)
1	0.74	-59.0	0.56
2	0.21	135.4	0.27
3	0.09	48.7	0.13
4	0.07	-96.1	0.07
5	0.03	113.6	0.02
6	0.00	0.0	0.00
7	0.00	0.0	0.00
8	0.00	0.0	0.00
9	0.00	0.0	0.00
N	I+ (N/F)	I- (N/F)	Io (N/F)
1	0.59	-61.9	0.15
2	0.21	-116.7	0.07
3	0.03	-45.6	0.10
4	0.00	0.0	0.07
5	0.01	0.0	0.03
6	0.00	0.0	0.00

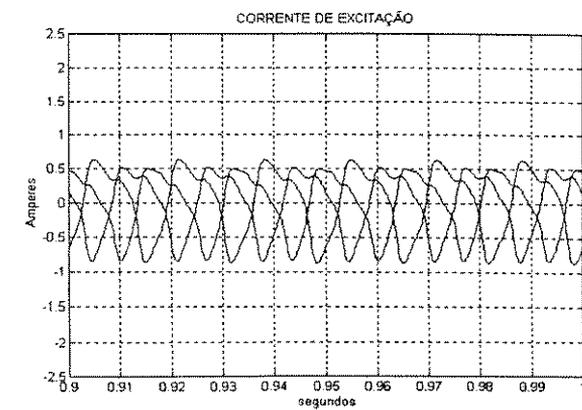
(N- Amplitude (Amperes-pico) / F- Angulos de fase (Graus)



(c - caso 3)

ESPECTRO fases: a-b-c			
N	Ia (N/F)	Ib (N/F)	Ic (N/F)
1	0.70	-67.2	0.79
2	0.33	-69.2	0.33
3	0.00	0.0	0.00
4	0.09	72.9	0.09
5	0.06	96.4	0.06
6	0.00	0.0	0.00
7	0.02	-135.5	0.02
8	0.01	-89.7	0.01
9	0.00	0.0	0.00
N	I+ (N/F)	I- (N/F)	Io (N/F)
1	0.79	-67.1	0.00
2	0.00	0.0	0.33
3	0.00	0.0	0.00
4	0.09	74.1	0.00
5	0.00	0.0	0.06
6	0.00	0.0	0.00

(N- Amplitude (Amperes-pico) / F- Angulos de fase (Graus)

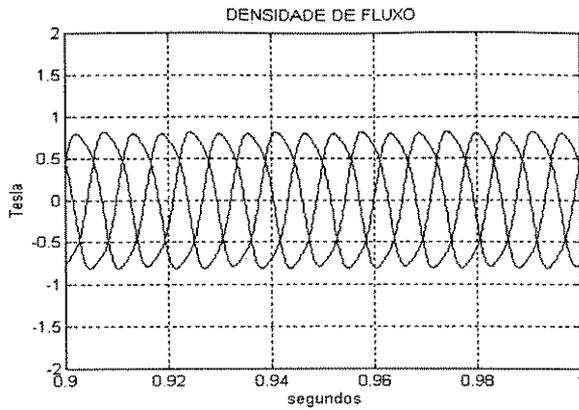


(d - caso 4)

ESPECTRO fases: a-b-c			
N	Ia (N/F)	Ib (N/F)	Ic (N/F)
1	0.65	-60.4	0.59
2	0.23	-62.7	0.20
3	0.07	95.7	0.01
4	0.07	91.9	0.07
5	0.03	109.9	0.03
6	0.02	-97.4	0.00
7	0.00	0.0	0.01
8	0.00	0.0	0.00
9	0.00	0.0	0.00
N	I+ (N/F)	I- (N/F)	Io (N/F)
1	0.60	-61.5	0.05
2	0.02	-0.1	0.22
3	0.04	-117.0	0.03
4	0.05	61.4	0.04
5	0.01	157.9	0.03
6	0.01	0.0	0.01

(N- Amplitude (Amperes-pico) / F- Angulos de fase (Graus)

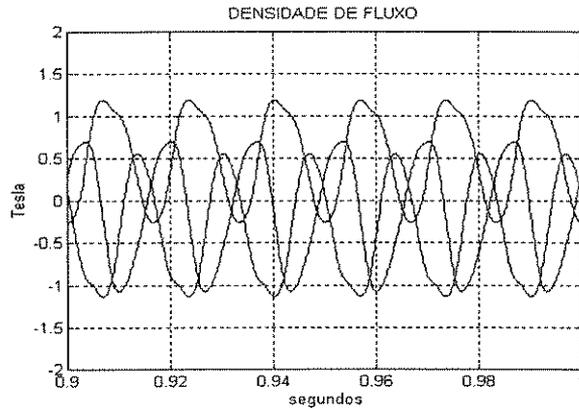
Figura 6.6 - Transformador Trifásico do tipo banco de monofásico - (conexão do primário em Estrela Isolada)



(a - caso 1)

ESPECTRO fases: a-b-c			
N	fa (M/F)	fb (M/F)	fc (M/F)
1	0.82	-85.6	0.82 154.4
2	0.00	0.0	0.0
3	0.00	53.3	0.00 54.0
4	0.00	0.0	0.0
5	0.00	0.0	0.0
6	0.00	0.0	0.0
7	0.00	0.0	0.0
8	0.00	0.0	0.0
9	0.00	0.0	0.0
N	I+ (M/F)	I- (M/F)	Io (M/F)
1	0.82	-85.6	0.00 0.00
2	0.00	0.0	0.0
3	0.00	0.0	54.0
4	0.00	0.0	0.0
5	0.00	0.0	0.0
6	0.00	0.0	0.0

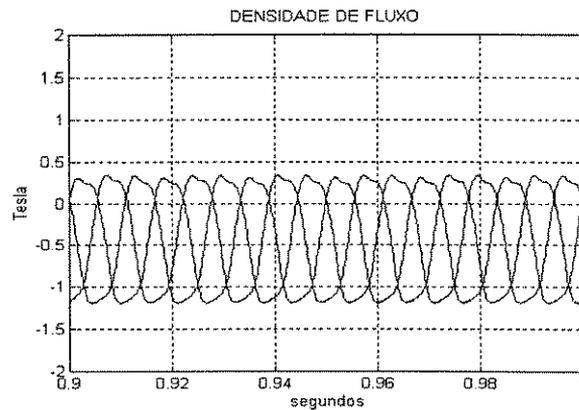
(M- Amplitude (Tesla-pico) / F- Angulos de fase (Graus)



(b - caso 2)

ESPECTRO fases: a-b-c			
N	fa (M/F)	fb (M/F)	fc (M/F)
1	0.74	-82.9	0.85 148.7
2	0.12	-112.8	0.12 -112.0
3	0.05	92.5	0.05 91.4
4	0.01	35.0	0.01 37.3
5	0.00	0.0	0.0
6	0.00	0.0	0.0
7	0.00	0.0	0.0
8	0.00	0.0	0.0
9	0.00	0.0	0.0
N	I+ (M/F)	I- (M/F)	Io (M/F)
1	0.82	-85.3	0.00 0.09
2	0.00	0.0	0.12 112.7
3	0.00	0.0	0.05 -91.9
4	0.00	0.0	0.01 35.5
5	0.00	0.0	0.0
6	0.00	0.0	0.0

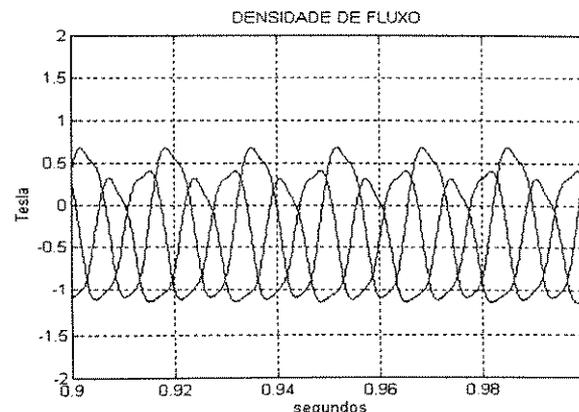
(M- Amplitude (Tesla-pico) / F- Angulos de fase (Graus)



(c - caso 3)

ESPECTRO fases: a-b-c			
N	fa (M/F)	fb (M/F)	fc (M/F)
1	0.83	-85.3	0.82 155.4
2	0.00	0.0	0.0
3	0.11	84.0	0.11 84.1
4	0.00	0.0	0.0
5	0.00	0.0	0.0
6	0.00	0.0	0.0
7	0.00	0.0	0.0
8	0.00	0.0	0.0
9	0.00	0.0	0.0
N	I+ (M/F)	I- (M/F)	Io (M/F)
1	0.82	-85.0	0.00 0.01
2	0.00	0.0	0.0
3	0.00	0.0	84.1
4	0.00	0.0	0.0
5	0.00	0.0	0.0
6	0.00	0.0	0.0

(M- Amplitude (Tesla-pico) / F- Angulos de fase (Graus)

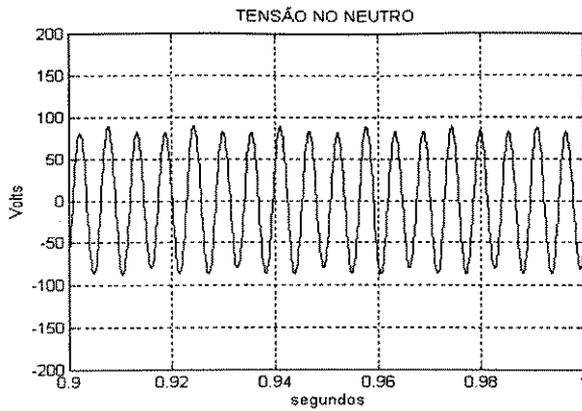


(d - caso 4)

ESPECTRO fases: a-b-c			
N	fa (M/F)	fb (M/F)	fc (M/F)
1	0.75	-79.4	0.81 147.1
2	0.06	123.8	0.06 127.0
3	0.07	76.8	0.07 76.6
4	0.01	-149.3	0.01 -149.7
5	0.00	0.0	0.0
6	0.00	0.0	0.0
7	0.00	0.0	0.0
8	0.00	0.0	0.0
9	0.00	0.0	0.0
N	I+ (M/F)	I- (M/F)	Io (M/F)
1	0.82	-85.3	0.00 0.11
2	0.00	0.0	0.06 -125.0
3	0.00	0.0	0.07 76.7
4	0.00	0.0	0.01 149.4
5	0.00	0.0	0.0
6	0.00	0.0	0.0

(M- Amplitude (Tesla-pico) / F- Angulos de fase (Graus)

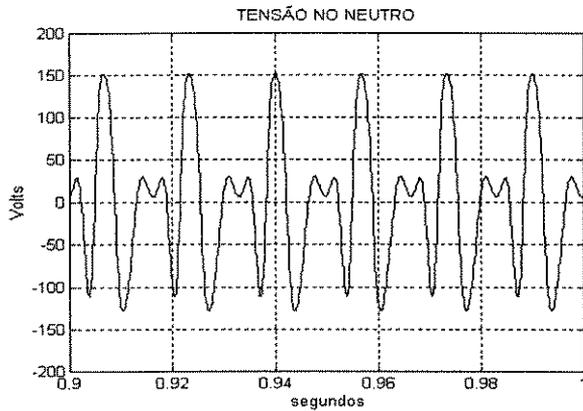
Figura 6.7 - Transformador Trifásico do tipo banco de monofásico - (conexão do primário em Estrela Isolada)



ESPECTRO		N	Amplitude	Fase
1		1	0.00	0.0
2		2	0.00	0.0
3	████████████████████	3	85.11	-36.1
4		4	0.00	0.0
5		5	0.00	0.0
6		6	0.00	0.0
7		7	0.00	0.0
8		8	0.00	0.0
9		9	0.00	0.0

(Amplitudes em V -- θ e angulos de fase em graus)

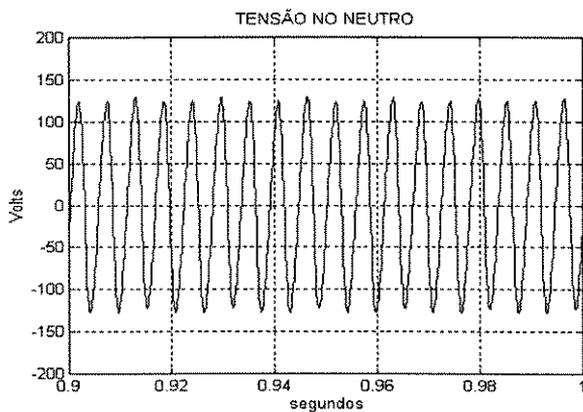
(a - caso 1)



ESPECTRO		N	Amplitude	Fase
1	████████	1	34.21	-13.5
2	████████████████	2	88.60	157.3
3	████████████████	3	55.45	1.9
4	██████	4	15.42	-54.5
5	████	5	11.53	-105.7
6	████	6	8.34	134.0
7		7	0.00	0.0
8		8	0.00	0.0
9		9	0.00	0.0

(Amplitudes em V -- θ e angulos de fase em graus)

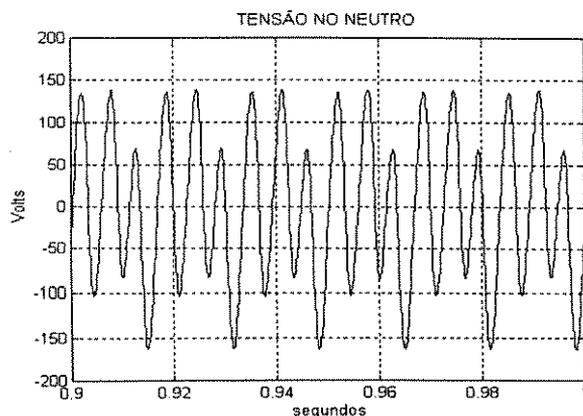
(b - caso 2)



ESPECTRO		N	Amplitude	Fase
1		1	0.00	0.0
2		2	0.00	0.0
3	████████████████████	3	123.08	-6.0
4		4	0.00	0.0
5		5	0.00	0.0
6	██████	6	19.97	168.2
7		7	0.00	0.0
8		8	0.00	0.0
9		9	3.91	-18.9

(Amplitudes em V -- θ e angulos de fase em graus)

(c - caso 3)

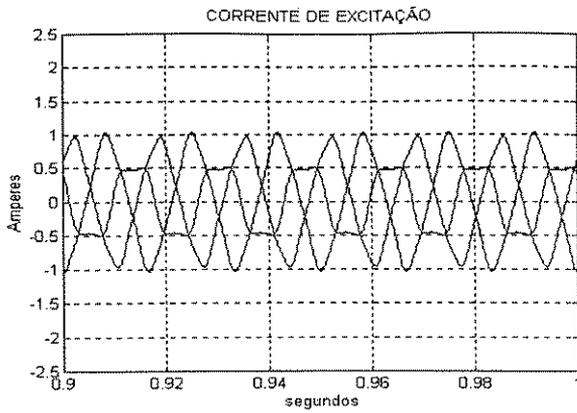


ESPECTRO		N	Amplitude	Fase
1	████████	1	41.20	-39.1
2	████████████	2	45.31	35.7
3	████████████████	3	106.14	-13.4
4	██████	4	17.00	120.7
5	████	5	14.02	-152.1
6	████	6	10.43	148.7
7	██	7	4.56	-58.9
8	██	8	3.98	11.8
9		9	0.00	0.0

(Amplitudes em V -- θ e angulos de fase em graus)

(d - caso 4)

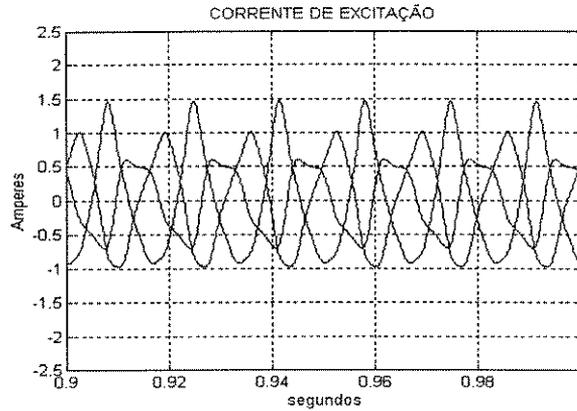
Figura 6.8 - Transformador Trifásico do tipo banco de monofásico - (conexão do primário em Estrela Isolada)



ESPECTRO fases: a-b-c			
N	ia (M/F)	ib (M/F)	ic (M/F)
1	0.94	-92.4	0.57
2	0.00	0.0	0.00
3	0.08	-64.4	0.13
4	0.00	0.0	0.00
5	0.03	-38.5	0.02
6	0.00	0.0	0.00
7	0.00	0.0	0.00
8	0.00	0.0	0.00
9	0.00	0.0	0.00
N	i+ (M/F)	i- (M/F)	io (M/F)
1	0.79	-81.6	0.22
2	0.00	0.0	0.00
3	0.06	119.4	0.06
4	0.00	0.0	0.00
5	0.01	0.0	0.02
6	0.00	0.0	0.00

(M- Amplitude (Amperes-pico) / F- Angulos de fase (Graus)

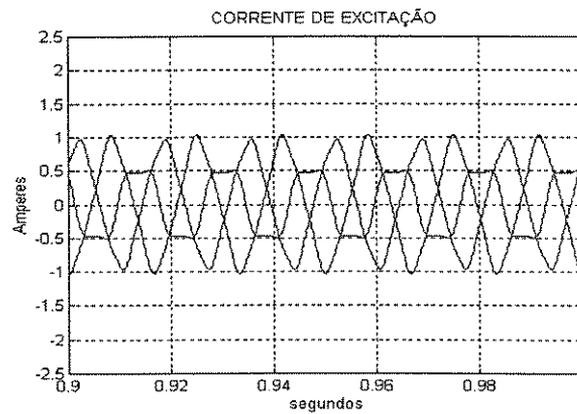
(a - caso 1)



ESPECTRO fases: a-b-c			
N	ia (M/F)	ib (M/F)	ic (M/F)
1	1.06	-90.0	0.64
2	0.24	114.5	0.12
3	0.10	-61.3	0.13
4	0.04	122.4	0.02
5	0.03	-37.0	0.02
6	0.00	0.0	0.00
7	0.00	0.0	0.00
8	0.00	0.0	0.00
9	0.00	0.0	0.00
N	i+ (M/F)	i- (M/F)	io (M/F)
1	0.86	-81.4	0.24
2	0.15	-117.3	0.09
3	0.07	106.2	0.07
4	0.01	-133.3	0.02
5	0.01	0.0	0.03
6	0.00	0.0	0.00

(M- Amplitude (Amperes-pico) / F- Angulos de fase (Graus)

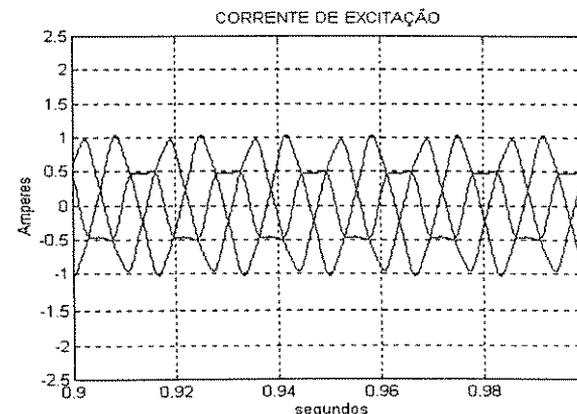
(b - caso 2)



ESPECTRO fases: a-b-c			
N	ia (M/F)	ib (M/F)	ic (M/F)
1	0.94	-92.4	0.57
2	0.00	0.0	0.00
3	0.08	-64.4	0.13
4	0.00	0.0	0.00
5	0.03	-38.5	0.02
6	0.00	0.0	0.00
7	0.00	0.0	0.00
8	0.00	0.0	0.00
9	0.00	0.0	0.00
N	i+ (M/F)	i- (M/F)	io (M/F)
1	0.79	-81.6	0.22
2	0.00	0.0	0.00
3	0.06	119.4	0.06
4	0.00	0.0	0.00
5	0.01	0.0	0.02
6	0.00	0.0	0.00

(M- Amplitude (Amperes-pico) / F- Angulos de fase (Graus)

(c - caso 3)

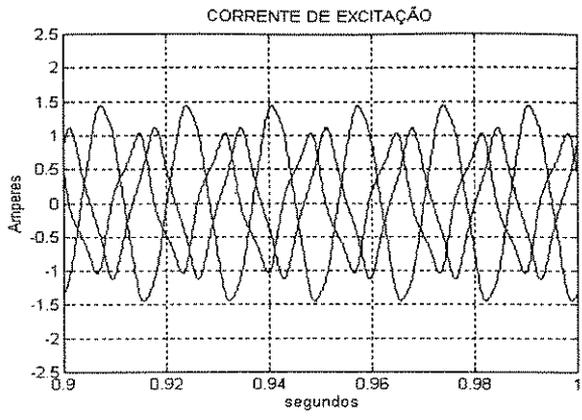


ESPECTRO fases: a-b-c			
N	ia (M/F)	ib (M/F)	ic (M/F)
1	0.93	-89.0	0.58
2	0.04	-101.0	0.04
3	0.08	-64.3	0.13
4	0.00	0.0	0.00
5	0.03	-38.4	0.02
6	0.00	0.0	0.00
7	0.00	0.0	0.00
8	0.00	0.0	0.00
9	0.00	0.0	0.00
N	i+ (M/F)	i- (M/F)	io (M/F)
1	0.80	-77.6	0.22
2	0.04	103.7	0.00
3	0.06	119.4	0.06
4	0.00	0.0	0.00
5	0.01	0.0	0.02
6	0.00	0.0	0.00

(M- Amplitude (Amperes-pico) / F- Angulos de fase (Graus)

(d - caso 4)

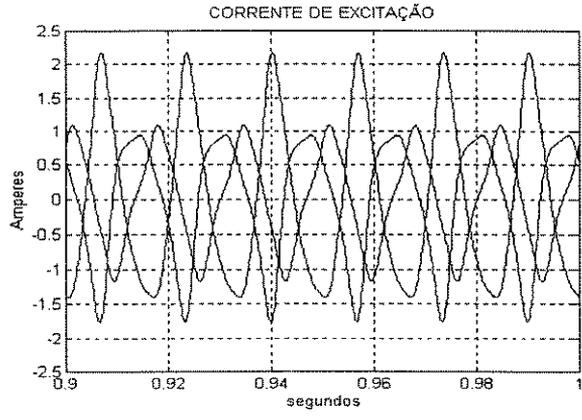
Figura 6.9 - Transformador trifásico tipo núcleo envolvido - (conexão do primário em Estrela Aterrada)



(a - caso 1)

ESPECTRO fases: a-b-c			
N	Ia (N/F)	Ib (N/F)	Ic (N/F)
1	1.42	-78.4	0.90
2	0.00	0.0	0.00
3	0.03	25.3	0.17
4	0.00	0.0	0.00
5	0.03	120.8	0.02
6	0.00	0.0	0.00
7	0.00	0.0	0.00
8	0.00	0.0	0.00
9	0.00	0.0	0.00
N	I+ (N/F)	I- (N/F)	Io (N/F)
1	1.06	-69.2	0.36
2	0.00	0.0	0.00
3	0.09	-60.7	0.09
4	0.00	0.0	0.00
5	0.01	0.0	0.03
6	0.00	0.0	0.00

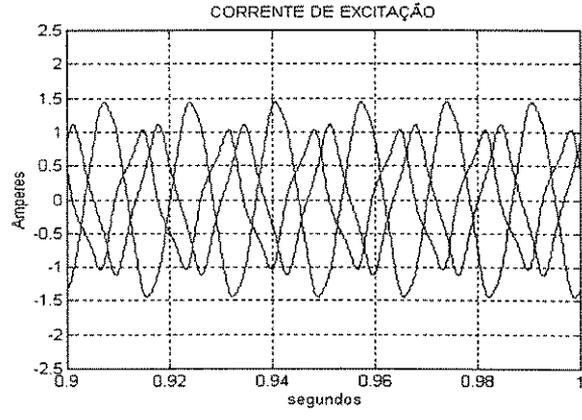
(N- Amplitude (Amperes-pico) / F- Angulos de fase (Graus)



(b - caso 2)

ESPECTRO fases: a-b-c			
N	Ia (N/F)	Ib (N/F)	Ic (N/F)
1	1.64	-67.6	1.17
2	0.40	166.0	0.36
3	0.09	26.2	0.21
4	0.06	-120.0	0.05
5	0.04	120.2	0.03
6	0.00	0.0	0.00
7	0.00	0.0	0.00
8	0.00	0.0	0.00
9	0.00	0.0	0.00
N	I+ (N/F)	I- (N/F)	Io (N/F)
1	1.22	-70.9	0.43
2	0.25	-145.7	0.10
3	0.10	-43.6	0.11
4	0.02	145.2	0.04
5	0.01	0.0	0.03
6	0.00	0.0	0.00

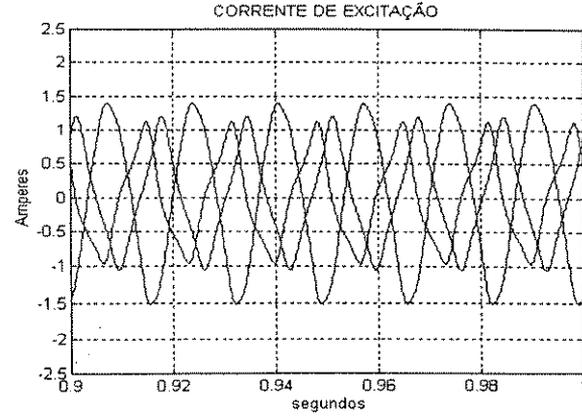
(N- Amplitude (Amperes-pico) / F- Angulos de fase (Graus)



(c - caso 3)

ESPECTRO fases: a-b-c			
N	Ia (N/F)	Ib (N/F)	Ic (N/F)
1	1.42	-78.4	0.90
2	0.00	0.0	0.00
3	0.03	25.4	0.17
4	0.00	0.0	0.00
5	0.03	120.9	0.02
6	0.00	0.0	0.00
7	0.00	0.0	0.00
8	0.00	0.0	0.00
9	0.00	0.0	0.00
N	I+ (N/F)	I- (N/F)	Io (N/F)
1	1.06	-69.2	0.36
2	0.00	0.0	0.00
3	0.09	-60.7	0.09
4	0.00	0.0	0.00
5	0.01	0.0	0.03
6	0.00	0.0	0.00

(N- Amplitude (Amperes-pico) / F- Angulos de fase (Graus)

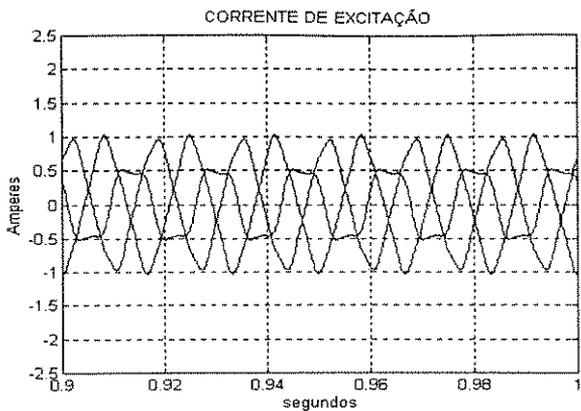


(d - caso 4)

ESPECTRO fases: a-b-c			
N	Ia (N/F)	Ib (N/F)	Ic (N/F)
1	1.43	-78.5	0.91
2	0.07	-73.6	0.07
3	0.03	25.6	0.17
4	0.01	114.8	0.01
5	0.03	120.9	0.02
6	0.00	0.0	0.00
7	0.00	0.0	0.00
8	0.00	0.0	0.00
9	0.00	0.0	0.00
N	I+ (N/F)	I- (N/F)	Io (N/F)
1	1.07	-69.3	0.37
2	0.07	-76.6	0.00
3	0.09	-60.7	0.09
4	0.00	0.0	0.01
5	0.01	0.0	0.03
6	0.00	0.0	0.00

(N- Amplitude (Amperes-pico) / F- Angulos de fase (Graus)

Figura 6.10 - Transformador trifásico tipo núcleo envolvido - (conexão do primário em Delta)

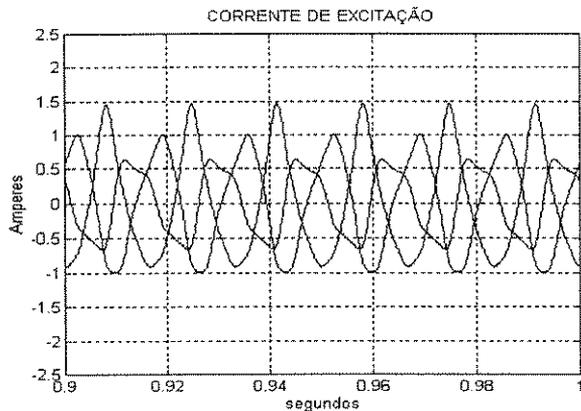


(a - caso 1)

ESPECTRO fases: a-b-c							
	N	ia (M/F)	ib (M/F)	ic (M/F)			
1	1	0.93	-88.6	0.57	162.0	0.91	55.1
1	2	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0
1	3	0.00	-65.2	0.12	113.9	0.05	-67.7
2	4	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0
2	5	0.03	-38.6	0.02	67.4	0.03	174.6
3	6	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0
3	7	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0
3	8	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0
3	9	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0
5	1	0.79	-77.1	0.22	134.6	0.00	0.0
5	2	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0
5	3	0.06	119.5	0.06	-12.6	0.00	0.0
5	4	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0
5	5	0.01	0.0	0.02	-52.1	0.00	0.0
5	6	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0

N	I+ (M/F)	I- (M/F)	Io (M/F)			
1	0.79	-77.1	0.22	134.6	0.00	0.0
2	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0
3	0.06	119.5	0.06	-12.6	0.00	0.0
4	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0
5	0.01	0.0	0.02	-52.1	0.00	0.0
6	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0

(M- Amplitude (Amperes-pico) / F- Angulos de fase (Graus)

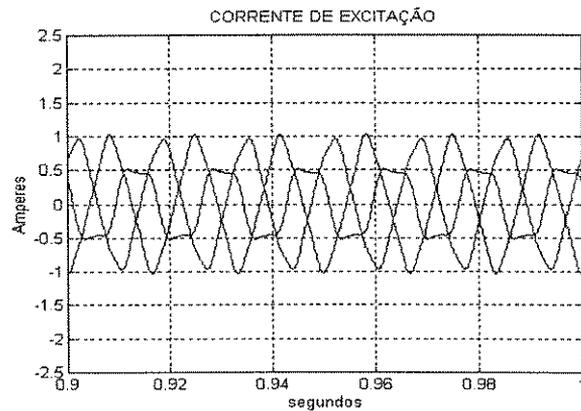


(b - caso 2)

ESPECTRO fases: a-b-c							
	N	ia (M/F)	ib (M/F)	ic (M/F)			
1	1	1.05	-86.6	0.64	157.1	0.95	56.7
1	2	0.24	114.4	0.12	-37.0	0.14	-89.0
1	3	0.10	-62.0	0.13	115.4	0.03	-74.2
2	4	0.04	122.0	0.02	-87.8	0.03	-40.1
2	5	0.03	-37.1	0.02	73.6	0.03	174.6
3	6	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0
3	7	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0
3	8	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0
3	9	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0
5	1	0.87	-77.3	0.24	122.2	0.00	0.0
5	2	0.15	-117.3	0.09	-109.3	0.00	0.0
5	3	0.07	106.1	0.07	-21.7	0.00	0.0
5	4	0.01	-133.7	0.02	-114.7	0.00	0.0
5	5	0.01	0.0	0.03	-49.9	0.00	0.0
5	6	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0

N	I+ (M/F)	I- (M/F)	Io (M/F)			
1	0.87	-77.3	0.24	122.2	0.00	0.0
2	0.15	-117.3	0.09	-109.3	0.00	0.0
3	0.07	106.1	0.07	-21.7	0.00	0.0
4	0.01	-133.7	0.02	-114.7	0.00	0.0
5	0.01	0.0	0.03	-49.9	0.00	0.0
6	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0

(M- Amplitude (Amperes-pico) / F- Angulos de fase (Graus)

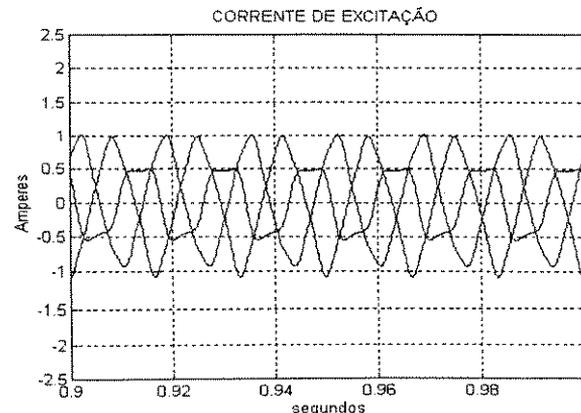


(c - caso 3)

ESPECTRO fases: a-b-c							
	N	ia (M/F)	ib (M/F)	ic (M/F)			
1	1	0.93	-88.6	0.57	162.0	0.91	55.1
1	2	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0
1	3	0.00	-65.2	0.12	113.9	0.05	-67.7
2	4	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0
2	5	0.03	-38.6	0.02	67.4	0.03	174.6
3	6	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0
3	7	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0
3	8	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0
3	9	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0
5	1	0.79	-77.1	0.22	134.6	0.00	0.0
5	2	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0
5	3	0.06	119.5	0.06	-12.6	0.00	0.0
5	4	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0
5	5	0.01	0.0	0.02	-52.1	0.00	0.0
5	6	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0

N	I+ (M/F)	I- (M/F)	Io (M/F)			
1	0.79	-77.1	0.22	134.6	0.00	0.0
2	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0
3	0.06	119.5	0.06	-12.6	0.00	0.0
4	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0
5	0.01	0.0	0.02	-52.1	0.00	0.0
6	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0

(M- Amplitude (Amperes-pico) / F- Angulos de fase (Graus)



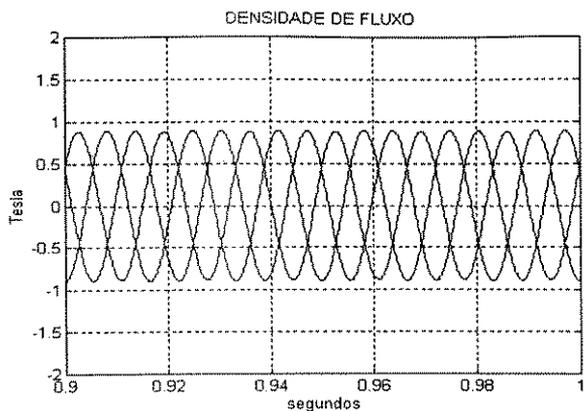
(d - caso 4)

ESPECTRO fases: a-b-c							
	N	ia (M/F)	ib (M/F)	ic (M/F)			
1	1	0.93	-88.6	0.58	162.0	0.92	55.1
1	2	0.04	-103.2	0.04	135.3	0.04	16.1
1	3	0.08	-65.1	0.13	114.8	0.05	-67.7
2	4	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0
2	5	0.03	-38.5	0.02	67.5	0.03	174.6
3	6	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0
3	7	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0
3	8	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0
3	9	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0
5	1	0.80	-77.1	0.22	134.6	0.00	0.0
5	2	0.04	103.9	0.00	0.0	0.00	0.0
5	3	0.06	119.5	0.06	-12.5	0.00	0.0
5	4	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0
5	5	0.01	0.0	0.02	-52.0	0.00	0.0
5	6	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0

N	I+ (M/F)	I- (M/F)	Io (M/F)			
1	0.80	-77.1	0.22	134.6	0.00	0.0
2	0.04	103.9	0.00	0.0	0.00	0.0
3	0.06	119.5	0.06	-12.5	0.00	0.0
4	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0
5	0.01	0.0	0.02	-52.0	0.00	0.0
6	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0

(M- Amplitude (Amperes-pico) / F- Angulos de fase (Graus)

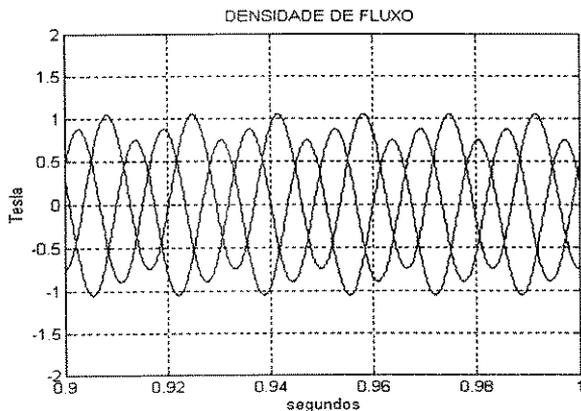
Figura 6.11 - Transformador trifásico tipo núcleo envolvido - (conexão do primário em Estrela Isolada)



(a - caso 1)

ESPECTRO fases: a-b-c				
N	fa (M/F)	fb (M/F)	fc (M/F)	
1	0.96	-82.6	0.89 156.6	0.88 37.3
2	0.00	0.0	0.00	0.0 0.0
3	0.00	0.0	0.00	0.0 0.0
4	0.00	0.0	0.00	0.0 0.0
5	0.00	0.0	0.00	0.0 0.0
6	0.00	0.0	0.00	0.0 0.0
7	0.00	0.0	0.00	0.0 0.0
8	0.00	0.0	0.00	0.0 0.0
9	0.00	0.0	0.00	0.0 0.0
N	I+ (M/F)	I- (M/F)	Io (M/F)	
1	0.89	-82.9	0.01	0.0 0.00 0.0
2	0.00	0.0	0.00	0.0 0.00 0.0
3	0.00	0.0	0.00	0.0 0.00 0.0
4	0.00	0.0	0.00	0.0 0.00 0.0
5	0.00	0.0	0.00	0.0 0.00 0.0
6	0.00	0.0	0.00	0.0 0.00 0.0

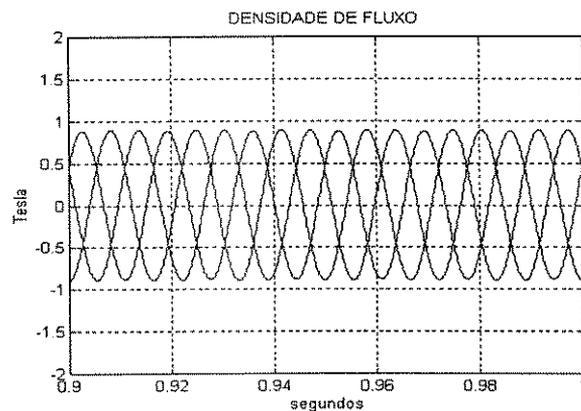
(M- Amplitude (Tesla-pico) / F- Angulos de fase (Graus)



(b - caso 2)

ESPECTRO fases: a-b-c				
N	fa (M/F)	fb (M/F)	fc (M/F)	
1	0.89	-82.3	0.89 156.8	0.88 37.3
2	0.00	0.0	0.00	0.0 0.0
3	0.00	0.0	0.00	0.0 0.0
4	0.00	0.0	0.00	0.0 0.0
5	0.00	0.0	0.00	0.0 0.0
6	0.00	0.0	0.00	0.0 0.0
7	0.00	0.0	0.00	0.0 0.0
8	0.00	0.0	0.00	0.0 0.0
9	0.00	0.0	0.00	0.0 0.0
N	I+ (M/F)	I- (M/F)	Io (M/F)	
1	0.89	-82.7	0.01	0.0 0.00 0.0
2	0.00	0.0	0.00	0.0 0.00 0.0
3	0.00	0.0	0.00	0.0 0.00 0.0
4	0.00	0.0	0.00	0.0 0.00 0.0
5	0.00	0.0	0.00	0.0 0.00 0.0
6	0.00	0.0	0.00	0.0 0.00 0.0

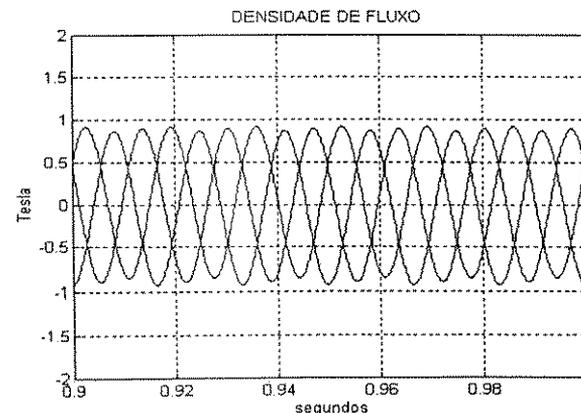
(M- Amplitude (Tesla-pico) / F- Angulos de fase (Graus)



(c - caso 3)

ESPECTRO fases: a-b-c				
N	fa (M/F)	fb (M/F)	fc (M/F)	
1	0.96	-82.6	0.89 156.6	0.88 37.3
2	0.00	0.0	0.00	0.0 0.0
3	0.00	0.0	0.00	0.0 0.0
4	0.00	0.0	0.00	0.0 0.0
5	0.00	0.0	0.00	0.0 0.0
6	0.00	0.0	0.00	0.0 0.0
7	0.00	0.0	0.00	0.0 0.0
8	0.00	0.0	0.00	0.0 0.0
9	0.00	0.0	0.00	0.0 0.0
N	I+ (M/F)	I- (M/F)	Io (M/F)	
1	0.89	-82.9	0.01	0.0 0.00 0.0
2	0.00	0.0	0.00	0.0 0.00 0.0
3	0.00	0.0	0.00	0.0 0.00 0.0
4	0.00	0.0	0.00	0.0 0.00 0.0
5	0.00	0.0	0.00	0.0 0.00 0.0
6	0.00	0.0	0.00	0.0 0.00 0.0

(M- Amplitude (Tesla-pico) / F- Angulos de fase (Graus)



(d - caso 4)

ESPECTRO fases: a-b-c				
N	fa (M/F)	fb (M/F)	fc (M/F)	
1	0.96	-82.5	0.89 156.7	0.88 37.3
2	0.00	0.0	0.00	0.0 0.0
3	0.00	0.0	0.00	0.0 0.0
4	0.00	0.0	0.00	0.0 0.0
5	0.00	0.0	0.00	0.0 0.0
6	0.00	0.0	0.00	0.0 0.0
7	0.00	0.0	0.00	0.0 0.0
8	0.00	0.0	0.00	0.0 0.0
9	0.00	0.0	0.00	0.0 0.0
N	I+ (M/F)	I- (M/F)	Io (M/F)	
1	0.89	-82.9	0.01	0.0 0.00 0.0
2	0.00	0.0	0.00	0.0 0.00 0.0
3	0.00	0.0	0.00	0.0 0.00 0.0
4	0.00	0.0	0.00	0.0 0.00 0.0
5	0.00	0.0	0.00	0.0 0.00 0.0
6	0.00	0.0	0.00	0.0 0.00 0.0

(M- Amplitude (Tesla-pico) / F- Angulos de fase (Graus)

Figura 6.12 - Transformador trifásico tipo núcleo envolvido - (conexão do primário em Estrela Isolada)

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES GERAIS E SUGESTÕES

Este trabalho procurou estudar o comportamento dos transformadores trifásicos do tipo banco de monofásicos e do tipo trifásico com núcleo de três colunas quando os mesmos são submetidos a uma condição duplamente excitada.

No decorrer do desenvolvimento deste trabalho foi feito inicialmente uma descrição das principais fontes de corrente contínua pertencentes aos sistemas em corrente alternada que podem provocar o fenômeno da magnetização assimétrica dos transformadores, bem como uma análise dos fundamentos físicos que cercam este fenômeno. Em seguida foi realizado um extenso estudo experimental em laboratório procurando submeter os transformadores às condições reais de ocorrência da dupla excitação.

Com o objetivo de analisar analiticamente o fenômeno da dupla excitação, foram desenvolvidos modelos matemáticos para os dois tipos de transformadores trifásicos estudados. Estes modelos foram simulados em um computador digital e os resultados comparados com os obtidos experimentalmente.

Foi feito ainda, baseado no modelo proposto, uma análise dos transformadores como fontes harmônicas pertencentes aos sistemas elétricos de potência, bem como dos aspectos ligados a distribuição espectral e sequencial das componentes harmônicas das correntes de excitação.

Para o desenvolvimento citado acima, apresenta-se a seguir uma síntese das principais conclusões que puderam ser extraídas das investigações e resultados obtidos.

1) - Com relação as fontes de correntes contínuas 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 construídos com dispositivos a estado sólido e pertencentes aos sistemas elétricos de potência.

2) - Foram abordados os fundamentos físicos ligados a dupla excitação c.a. / c.c. nos transformadores de potência, 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 ser uma fonte potencial de harmônicas.

3) - Foi avaliado o comportamento transitório das correntes de excitação tanto para o banco trifásico 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. Verificou-se também a ineficiência de soluções como a sub-saturação ou sobre dimensionamento do núcleo para atenuar os efeitos sobre as amplitudes das harmônicas originadas pela dupla excitação.

4) - Foram realizados vários ensaios experimentais para o banco trifásico e para o transformador trifásico de núcleo envolvido sob magnetização assimétrica, variando-se a injeção c.c. desde 0 até 15 % da corrente nominal, para diferentes conexões dos enrolamentos. Dos resultados obtidos, verificou-se a dependência praticamente linear das harmônicas de baixas ordens da corrente de excitação com a variação da injeção c.c., enquanto as harmônicas de ordens superiores praticamente se mantiveram constantes ou apresentaram um leve decaimento, dependendo do transformador e do tipo da conexão empregada. Sob efeito da dupla excitação, as correntes de excitação apresentam altos valores de pico e encontram-se fortemente deformadas. No transformador trifásico com núcleo de três colunas, constatou-se que para uma injeção equilibrada de corrente contínua nas três fases, o mesmo mostrou-se imune ao fenômeno da magnetização assimétrica, visto que, 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.

5) - O modelo matemático proposto para a representação das unidades monofásicas pertencentes ao banco trifásico, permitiu um amplo estudo teórico do fenômeno da magnetização assimétrica, mostrando-se bastante versátil e apresentando resultados satisfatórios quando comparados com os obtidos experimentalmente. Para o transformador trifásico com núcleo de três colunas (núcleo envolvido), o modelo matemático proposto considera a não linearidade magnética e principalmente a interdependência entre os fluxos magnéticos envolvidos. A forte interação entre os fluxos magnéticos inviabiliza a utilização da metodologia desenvolvida para transformadores trifásicos constituídos de unidades monofásicas. Neste sentido, este trabalho contribui de forma a complementar os resultados anteriores obtidos para unidades monofásicas e bancos trifásicos.

6) - Na simulação digital dos modelos matemáticos propostos, a representação da não-linearidade magnética através de uma função hiperbólica mostrou-se bastante adequada para estudos desta natureza, evitando-se assim o aparecimento de pontos singulares associados a representação linear por partes da curva de magnetização. Os resultados obtidos com a simulação digital mostrou que a modelagem matemática utilizada é adequada para os estudos do fenômeno da dupla excitação, possibilitando além das análises do conteúdo harmônico das correntes de excitação, fluxos e tensões induzidas, uma ampla visão dos aspectos ligados a distribuição espectral e seqüencial das componentes harmônicas dessas grandezas. Na configuração estrela aterrada, observou-se que a corrente pelo condutor neutro apresenta-se fortemente distorcida, e que cada parcela das componentes de seqüência zero das harmônicas desta corrente comparece com o triplo da amplitude do valor correspondente a corrente de excitação da linha.

7) - Da análise dos resultados experimentais e simulados, tanto para o transformador do tipo banco de monofásico quanto para o tipo trifásico de núcleo envolvido, ressalta-se novamente que, foi possível identificar uma dependência aproximadamente linear entre as amplitudes dos componentes de baixa ordem harmônica em função dos níveis de corrente contínua injetados. A compatibilidade entre estes resultados, pode ser considerada satisfatória, sobretudo porque, para este tipo de análise há de se considerar a influência de 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 introduz um conteúdo harmônico característico do seu próprio sistema de retificação, interferindo nas medições harmônicas decorrentes do fenômeno estudado, sobretudo para aquelas de frequências mais altas. Outro aspecto a ser enfatizado são os pequenos desequilíbrios existentes entre os transformadores utilizados como teste e como 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. Observou-se também que a fonte de alimentação ca apresentou, durante a realização dos ensaios experimentais, uma distorção harmônica que certamente interferiu nos resultados. Os maiores erros observados entre os resultados experimentais e simulados foram de 18% para as altas injeções c.c. enquanto a média geral ficou em torno de 7 %.

Sem dúvida, a grande contribuição deste trabalho refere-se ao modelo matemático proposto para o transformador trifásico de núcleo envolvido sob efeito de magnetização assimétrica, bem como os exaustivos testes experimentais tanto do transformador trifásico de núcleo envolvido

quanto do banco trifásico provenientes de unidades monofásicas.

No entanto, os resultados aqui apresentados foram obtidos de modelos reduzidos de transformadores, utilizados em laboratório, os quais apresentam algumas diferenças em relação aos transformadores reais utilizados nos sistemas elétricos de potência. Devido a esta observação e a outras análises que poderão surgir deste estudo, são deixadas aqui as seguintes sugestões que permitem dar continuidade a este trabalho :

A) Aplicação da modelagem matemática proposta neste trabalho, para os transformadores trifásicos de potência utilizados nos sistemas de distribuição quando os mesmos são duplamente excitados. Simulação do modelo e comparação com resultados experimentais.

B) Ajuste do modelo matemático para a aplicação na modelagem de transformadores trifásicos de três enrolamentos, quando submetidos a uma magnetização assimétrica. Confrontação dos resultados simulados com os resultados experimentais.

C) Estudo dos aquecimentos localizados provenientes da dupla excitação e suas conseqüências na diminuição da vida útil dos transformadores.

APÊNDICE A

Desenvolvimento das Equações do Modelo Matemático para o Banco Trifásico de Transformadores Constituído de Unidades Monofásicas e de Dois Enrolamentos

Aplicando a equação geral da tensão (4.3) para cada uma das três unidades monofásicas do banco trifásico, e ainda incorporando a equação (4.2), podemos escrever:

$$v_j = r_j (i_{Mj} + i_{rpj}) + L_j \left(\frac{d i_{Mj}}{dt} + \frac{d i_{rpj}}{dt} \right) + N_j \frac{d\phi_j}{dt} \quad (\text{A.1})$$

onde j é a unidade transformadora.

Admitindo-se a representação analítica da não linearidade entre os fluxos no material magnético e as correntes adotadas, equação (4.5), e substituindo em (A.1), é possível estabelecer as seguintes relações :

$$v_j = r_j \left(a_j \sinh(b_j \phi_j) + \frac{N_j}{R_{p_j}} \dot{\phi}_j \right) + L_j \left(a_j b_j \cosh(b_j \phi_j) \dot{\phi}_j + \frac{N_j}{R_{p_j}} \ddot{\phi}_j \right) + N_j \dot{\phi}_j \quad (\text{A.2})$$

Reagrupando a equação (A.2) acima resulta,

$$v_j = r_j \left(a_j \sinh(b_j \phi_j) \right) + \left(L_j a_j b_j \cosh(b_j \phi_j) + N_j + \frac{r_j \cdot N_j}{R_{p_j}} \right) \dot{\phi}_j + \frac{L_j N_j}{R_{p_j}} \ddot{\phi}_j \quad (\text{A.3})$$

Com o objetivo de simplificar a equação (A.3), podemos coloca-la sob a forma compacta conforme a equação (A.4), ou seja,

$$\mathbf{V} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{Sh}(\Phi) + [\mathbf{L} \cdot \mathbf{Ch}(\Phi) + \mathbf{K}_1] \cdot \dot{\Phi} + \mathbf{K}_2 \cdot \ddot{\Phi} \quad (\text{A.4})$$

Expandindo os vetores e as matrizes que compõe a equação (A.4), para as três unidades monofásicas, resultam:

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R} \cdot \mathbf{Sh}(\Phi) = \begin{bmatrix} r_1 & 0 & 0 \\ 0 & r_2 & 0 \\ 0 & 0 & r_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \sinh(b_1 \phi_1) \\ a_2 \sinh(b_2 \phi_2) \\ a_3 \sinh(b_3 \phi_3) \end{bmatrix}$$

$$\dot{\Phi} = \begin{bmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \\ \dot{\phi}_3 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{L} \cdot \mathbf{Ch}(\Phi) = \begin{bmatrix} L_1 & 0 & 0 \\ 0 & L_2 & 0 \\ 0 & 0 & L_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 b_1 \cosh(b_1 \phi_1) & 0 & 0 \\ 0 & a_2 b_2 \cosh(b_2 \phi_2) & 0 \\ 0 & 0 & a_3 b_3 \cosh(b_3 \phi_3) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K}_1 = \begin{bmatrix} N_1(Rp_1 + r_1)/Rp_1 & 0 & 0 \\ 0 & N_2(Rp_2 + r_2)/Rp_2 & 0 \\ 0 & 0 & N_3(Rp_3 + r_3)/Rp_3 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K}_2 \cdot \ddot{\Phi} = \begin{bmatrix} L_1 N_1 / Rp_1 & 0 & 0 \\ 0 & L_2 N_2 / Rp_2 & 0 \\ 0 & 0 & L_3 N_3 / Rp_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\phi}_1 \\ \ddot{\phi}_2 \\ \ddot{\phi}_3 \end{bmatrix}$$

APÊNDICE B

Desenvolvimento das Equações do Modelo Matemático para o Transformador Trifásico com Núcleo Envolvido e de Dois Enrolamentos

Substituindo nas equações gerais das tensões (4.16) às equações (4.17) e ainda incorporando as perdas no núcleo, resultam:

$$\begin{aligned}
 v_A &= r_A (i_{M1} + i_{d1} + i_{rp1}) + L_A \left(\frac{d i_{M1}}{dt} + \frac{d i_{d1}}{dt} + \frac{d i_{rp1}}{dt} \right) + N_A \frac{d\phi_1}{dt} \\
 v_B &= r_B (i_{M2} + i_{d2} + i_{rp2}) + L_B \left(\frac{d i_{M2}}{dt} + \frac{d i_{d2}}{dt} + \frac{d i_{rp2}}{dt} \right) + N_B \frac{d\phi_2}{dt} \\
 v_C &= r_C (i_{M3} + i_{d3} + i_{rp3}) + L_C \left(\frac{d i_{M3}}{dt} + \frac{d i_{d3}}{dt} + \frac{d i_{rp3}}{dt} \right) + N_C \frac{d\phi_3}{dt}
 \end{aligned} \tag{B.1}$$

Admitindo-se a representação analítica da não linearidade entre os fluxos no material magnético e as correntes adotadas (equações (4.19) e (4.20)), e substituindo-as em (B.1), é possível estabelecer as seguintes relações :

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

Reagrupando os elementos das equações acima resulta,

$$\begin{aligned}
v_A &= r_A \left(a_1 \sinh(b_1 \phi_1) + C_{d1} \phi_{d1} \right) + \dot{\phi}_1 \left(L_A a_1 b_1 \cosh(b_1 \phi_1) + N_A + \frac{N_A}{R_{p1}} \right) + \dot{\phi}_{d1} L_A C_{d1} + \ddot{\phi}_1 \frac{L_A N_A}{R_{p1}} \\
v_B &= r_B \left(a_2 \sinh(b_2 \phi_2) + C_{d2} \phi_{d2} \right) + \dot{\phi}_2 \left(L_B a_2 b_2 \cosh(b_2 \phi_2) + N_B + \frac{N_B}{R_{p2}} \right) + \dot{\phi}_{d2} L_B C_{d2} + \ddot{\phi}_2 \frac{L_B N_B}{R_{p2}} \\
v_C &= r_C \left(a_3 \sinh(b_3 \phi_3) + C_{d3} \phi_{d3} \right) + \dot{\phi}_3 \left(L_C a_3 b_3 \cosh(b_3 \phi_3) + N_C + \frac{N_C}{R_{p3}} \right) + \dot{\phi}_{d3} L_C C_{d3} + \ddot{\phi}_3 \frac{L_C N_C}{R_{p3}}
\end{aligned} \tag{B.2}$$

Colocando as equações (B.2) sob a forma compacta, pode-se obter a seguinte equação geral:

$$\mathbf{V} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{Sh}(\Phi) + \mathbf{K}_3 \cdot \mathbf{R} \cdot \Phi_d + [\mathbf{Ch}(\Phi) \cdot \mathbf{L} + \mathbf{K}_1] \cdot \dot{\Phi} + \mathbf{K}_2 \cdot \ddot{\Phi} + \mathbf{K}_3 \cdot \mathbf{L} \cdot \dot{\Phi}_d \tag{B.3}$$

onde, as matrizes e os vetores desta equação são dados por:

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} v_A \\ v_B \\ v_C \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R} \cdot \mathbf{Sh}(\Phi) = \begin{bmatrix} r_A & 0 & 0 \\ 0 & r_B & 0 \\ 0 & 0 & r_C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \sinh(b_1 \phi_1) \\ a_2 \sinh(b_2 \phi_2) \\ a_3 \sinh(b_3 \phi_3) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K}_3 \cdot \mathbf{R} \cdot \Phi_d = \begin{bmatrix} C_{d1} & 0 & 0 \\ 0 & C_{d2} & 0 \\ 0 & 0 & C_{d3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_A & 0 & 0 \\ 0 & r_B & 0 \\ 0 & 0 & r_C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{d1} \\ \phi_{d2} \\ \phi_{d3} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{L} \cdot \mathbf{Ch}(\Phi) = \begin{bmatrix} L_A & 0 & 0 \\ 0 & L_B & 0 \\ 0 & 0 & L_C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 b_1 \cosh(b_1 \phi_1) \\ a_2 b_2 \cosh(b_2 \phi_2) \\ a_3 b_3 \cosh(b_3 \phi_3) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K}_1 = \begin{bmatrix} N_A(Rp_1 + r_A)/Rp_1 & 0 & 0 \\ 0 & N_B(Rp_2 + r_B)/Rp_2 & 0 \\ 0 & 0 & N_C(Rp_3 + r_C)/Rp_3 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K}_3 \cdot \mathbf{L} \cdot \dot{\Phi}_d = \begin{bmatrix} C_{d1} & 0 & 0 \\ 0 & C_{d2} & 0 \\ 0 & 0 & C_{d3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_A & 0 & 0 \\ 0 & L_B & 0 \\ 0 & 0 & L_C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi}_{d1} \\ \dot{\phi}_{d2} \\ \dot{\phi}_{d3} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K}_2 \cdot \ddot{\Phi} = \begin{bmatrix} L_A N_A / Rp_1 & 0 & 0 \\ 0 & L_B N_B / Rp_2 & 0 \\ 0 & 0 & L_C N_C / Rp_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\phi}_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddot{\phi}_2 & 0 \\ 0 & 0 & \ddot{\phi}_3 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K}_3 = \begin{bmatrix} C_{d1} \\ C_{d2} \\ C_{d3} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K}_2 = \begin{bmatrix} L_A N_A / Rp_1 & 0 & 0 \\ 0 & L_B N_B / Rp_2 & 0 \\ 0 & 0 & L_C N_C / Rp_3 \end{bmatrix}$$

Substituindo-se as equações (4.20) e (4.21) em (4.23), são obtidas as seguintes relações para os fluxos nas culatras:

$$a_{12} \sinh(b_{12} \phi_{12}) = C_{d1} \phi_{d1} - C_{d2} \phi_{d2}$$

$$a_{32} \sinh(b_{32} \phi_{32}) = C_{d3} \phi_{d3} - C_{d2} \phi_{d2}$$

$$\phi_{12} = \sinh^{-1} \left\{ \left[(C_{d1} \phi_{d1} - C_{d2} \phi_{d2}) \frac{1}{a_{12}} \right] \frac{1}{b_{12}} \right\}$$

(B.4)

$$\phi_{32} = \sinh^{-1} \left\{ \left[(C_{d3} \phi_{d3} - C_{d2} \phi_{d2}) \frac{1}{a_{32}} \right] \frac{1}{b_{32}} \right\}$$

As relações entre os fluxos nas colunas, culatras e de dispersão, são obtidas em substituindo-se as equações (B.4) nas equações (4.18).

$$\begin{aligned}
\phi_1 &= \phi_{d1} + \sinh^{-1} \left\{ \left[(C_{d1}\phi_{d1} - C_{d2}\phi_{d2}) \frac{1}{a_{12}} \right] \frac{1}{b_{12}} \right\} \\
\phi_2 &= \phi_{d2} - \sinh^{-1} \left\{ \left[(C_{d1}\phi_{d1} - C_{d2}\phi_{d2}) \frac{1}{a_{12}} \right] \frac{1}{b_{12}} \right\} - \sinh^{-1} \left\{ \left[(C_{d3}\phi_{d3} - C_{d2}\phi_{d2}) \frac{1}{a_{32}} \right] \frac{1}{b_{32}} \right\} \\
\phi_3 &= \phi_{d3} + \sinh^{-1} \left\{ \left[(C_{d3}\phi_{d3} - C_{d2}\phi_{d2}) \frac{1}{a_{32}} \right] \frac{1}{b_{32}} \right\}
\end{aligned} \tag{B.5}$$

Colocando-se as equações (B.5) sob a forma compacta, resulta:

$$\Phi = \Phi_d + T_4 \text{Sh}^{-1}(\Delta\Phi_d) \tag{B.6}$$

onde, as matrizes e os vetores são dados por:

$$\Phi = \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{bmatrix}$$

$$\Phi_d = \begin{bmatrix} \phi_{d1} \\ \phi_{d2} \\ \phi_{d3} \end{bmatrix}$$

$$T\text{Sh}^{-1}(\Delta\Phi_d) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & -1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sinh^{-1} \left\{ \left[(C_{d1}\phi_{d1} - C_{d1}\phi_{d1}) / a_{12} \right] / b_{12} \right\} \\ \sinh^{-1} \left\{ \left[(C_{d3}\phi_{d3} - C_{d2}\phi_{d2}) / a_{32} \right] / b_{32} \right\} \end{bmatrix}$$

$$T_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & -1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

As equações (B.3) e (B.6) são utilizadas para a modelagem das diferentes conexões dos enrolamentos do transformador trifásico de núcleo envolvido com dois enrolamentos.

APÊNDICE C

C.1 - DIAGRAMA DE BLOCOS PARA A SIMULAÇÃO DIGITAL DO TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DO TIPO BANCO DE MONOFÁSICOS

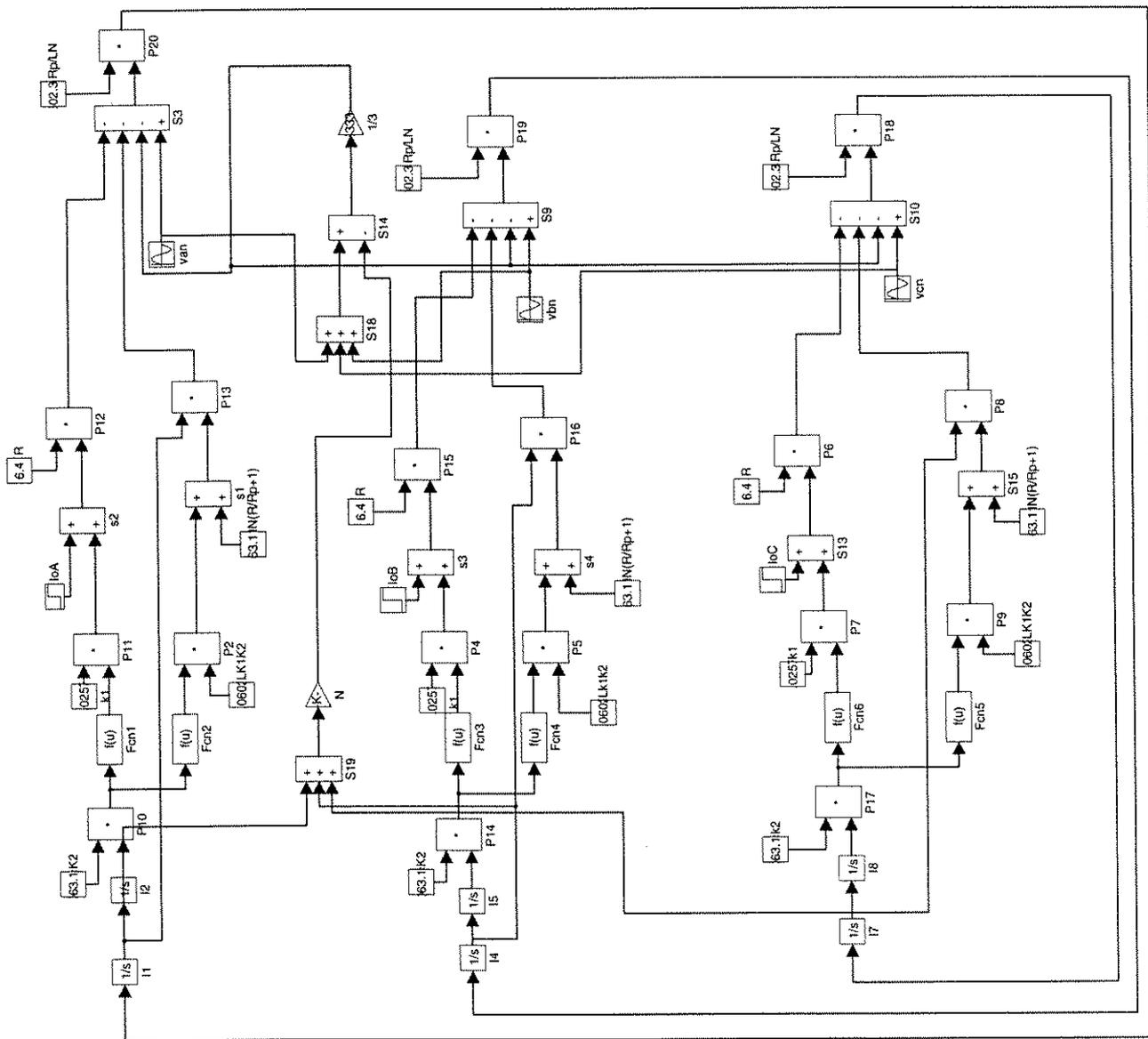


Figura C.1 - Diagrama de blocos para conexão do primário em Estrela Isolada - Transformador trifásico do tipo banco de monofásicos

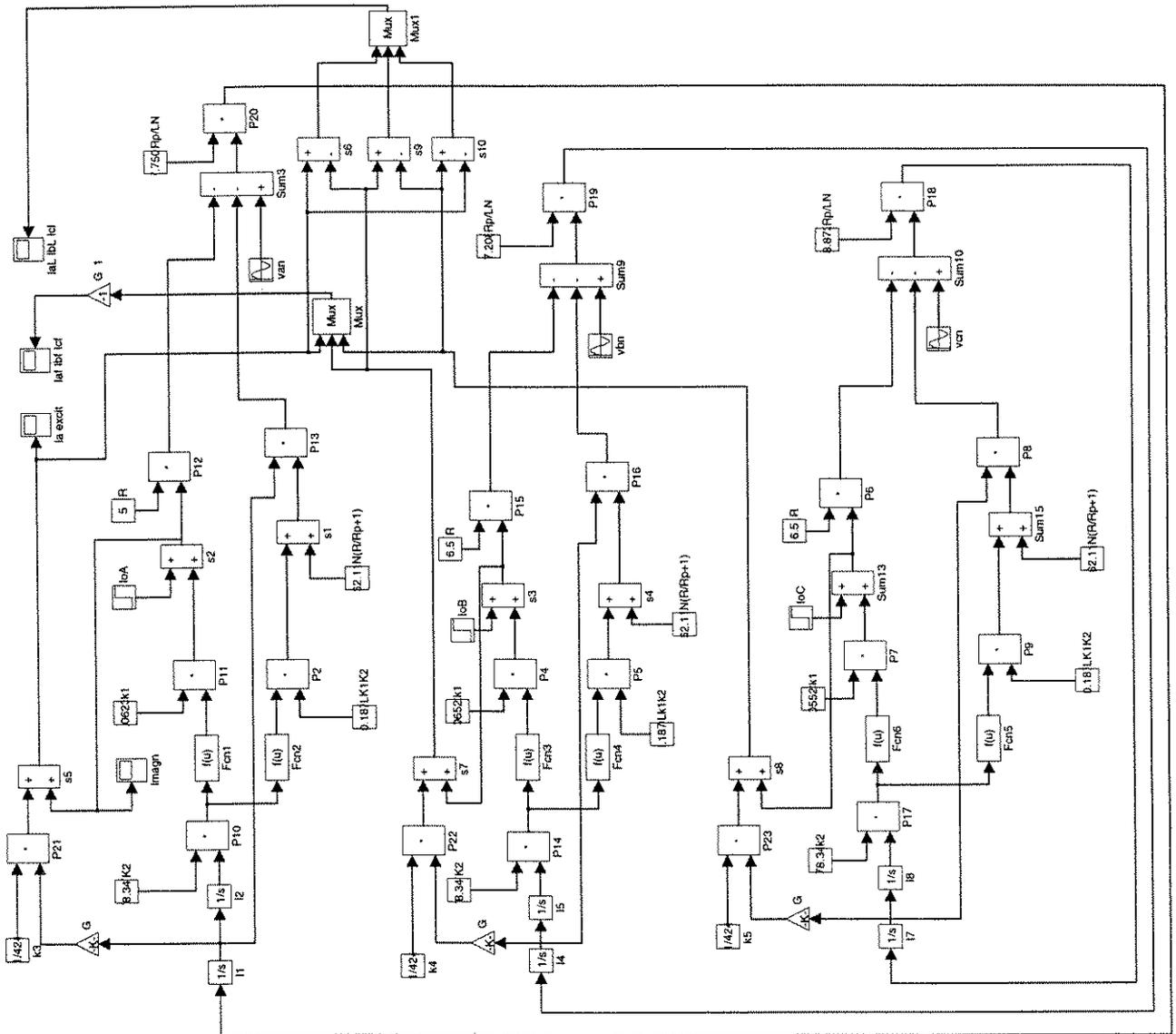


Figura C.2 - Diagrama de blocos para conexão do primário em Delta - Transformador trifásico do tipo banco de monofásicos

**C.2 - DIAGRAMA DE BLOCOS PARA A SIMULAÇÃO DIGITAL DO
TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DO TIPO NÚCLEO ENVOLVIDO**

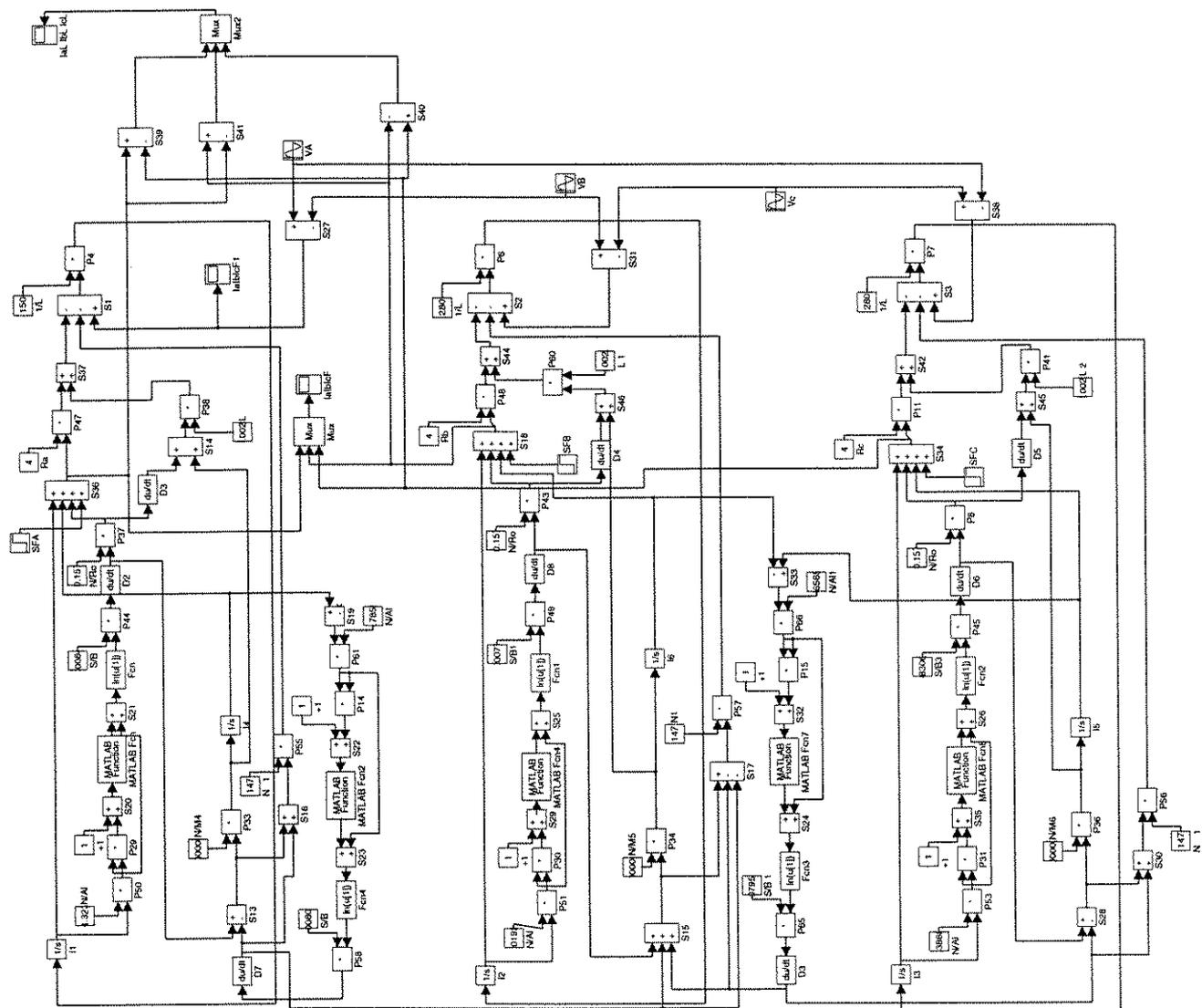


Figura C.3 - Diagrama de blocos para conexão do primário em Delta - Transformador trifásico do tipo Núcleo Envolvido

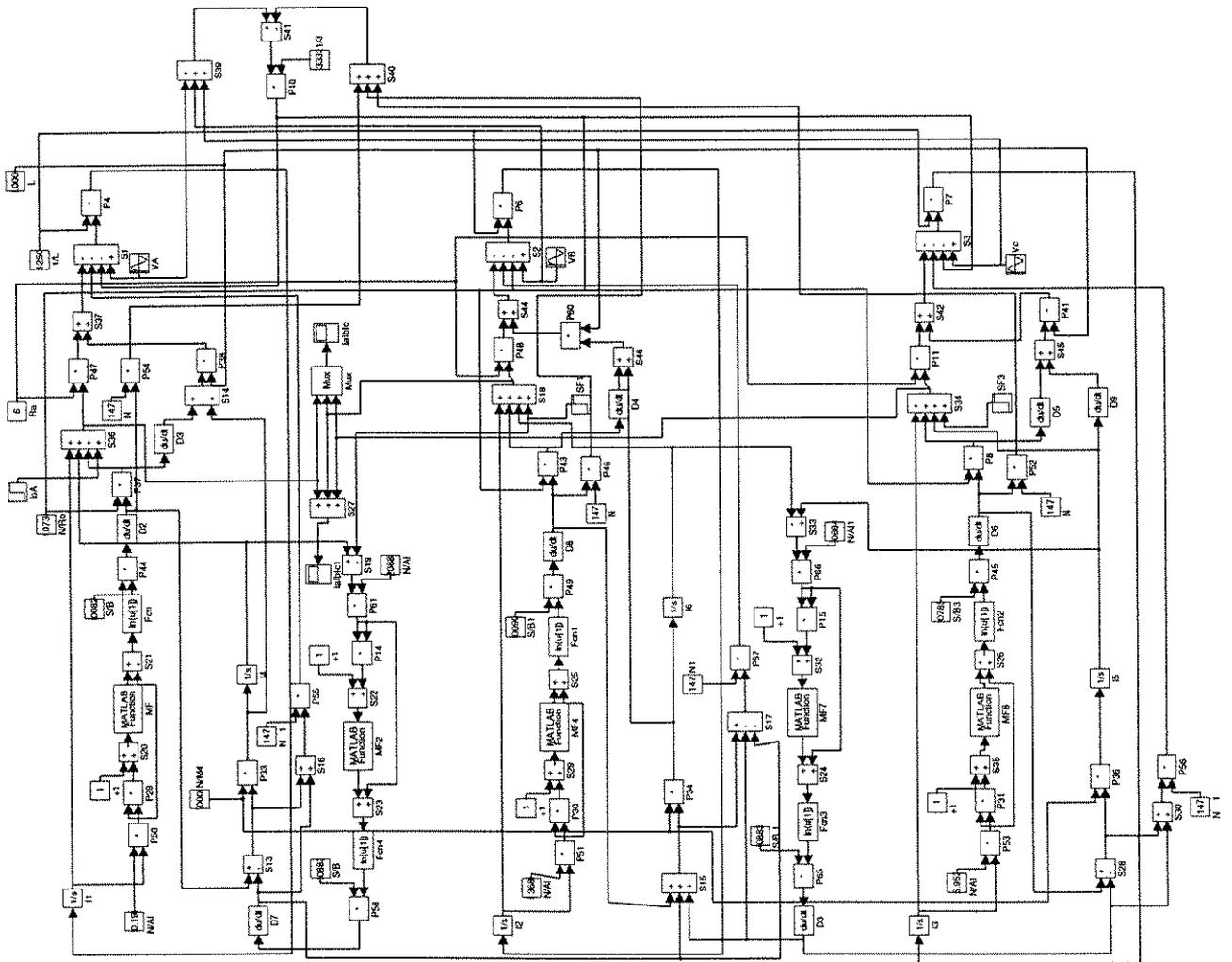


Figura C.4 - Diagrama de blocos para conexão do primário em Estrela Isolada - Transformador trifásico do tipo Núcleo Envolvido

APÊNDICE D

TRABALHOS PUBLICADOS

DE OLIVEIRA, L.C.O.; ROSSI, J.C.; PIRES,F.A.C.-" Symmetrical Component Analysis of Harmonics Excitation Currents in Transformers Under DC Saturation". In: 7th INTERNATIONAL CONFERENCE ON HARMONICS AND QUALITY OF POWER - ICHQP 96, pp. 406-411, Las Vegas,USA, October, 1996.

DE OLIVEIRA, L.C.O.; ROSSI, J.C.; PIRES,F.A.C.-" Análise Experimental em Bancos de Transformadores Trifásicos Sujeitos a Saturação C.C.". In: 9º CONGRESSO E EXPOSIÇÃO INTERNACIONAL DA ENERGIA - CEDE'96, Buenos Aires, Argentina, Agosto, 1996.

DE OLIVEIRA, L.C.O.; ROSSI, J.C.; PIRES,F.A.C.-" Dupla Excitação em Transformadores Trifásicos com Núcleo de Três Colunas". In: XI CONGRESO CHILENO DE INGENIERIA ELECTRICA (ELETRO'95), Punta Arenas, Chile, Novembro, 1995.

DE OLIVEIRA, L.C.O.; ROSSI, J.C.; PIRES,F.A.C.-" Asymmetrical Magnetization in the Three-Phase Core Type Transformers". In: 38Th MIDWEST SYMPOSIUM ON CIRCUITS AND SYSTEMS, Rio de Janeiro, Agosto, 1995,pp.1081-1084.

DE OLIVEIRA, L.C.O.; ROSSI, J.C.; PIRES,F.A.C.-" Análise da Histerese em Transformadores Monofásicos Sob Magnetização Assimétrica Através de Medidas em Tempo Real.". In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (XII SNPTEE), Recife, Outubro, 1993.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01]. DE OLIVEIRA, L.C.O.- "Transformadores de Potência sob Dupla Excitação C.A / C.C.". Tese de Doutorado, UNICAMP, Campinas-SP., Julho de 1990.
- [02]. 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.
- [03]. 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.
- [04]. DE OLIVEIRA,J.C.; DE OLIVEIRA, L.C.O.; MISKULIN, M.S.- "Physical Considerations and Modelling 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.; DE 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]. DE OLIVEIRA, L.C.O.- "Transformadores de Potência Sob Dupla Excitação C.A/C.C.: Testes Experimentais e Efeitos da Magnetização Assimétrica". In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL SOBRE APLICAÇÃO INDUSTRIAL DE ELETRICIDADE E EXPOSIÇÃO (INDUSCON 92), São Paulo, Junho, 1992.
- [07]. DE OLIVEIRA, L.C.O.; MALANGE, F.C.V.- "Magnetização Assimétrica em Transformadores Trifásicos associada a Dupla Excitação CA/CC". In: V ENCONTRO REGIONAL LATINO-AMERICANO DA CIGRE, Ciudad Del Este, Paraguay, Março,1993.

- [08]. HWANG, M.S.; GRADY, W.; SANDERS, H.W. - "Distribution Transformer Winding Losses due to Nonsinusoidal Currents". IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, vol. PWRD-2, No. 1, January, 1987.
- [09]. TAY, H.C.; SWIFT, G.W.- "On the Problem of Transformer Overheating due to Geomagnetically Induced Currents". IEEE TRANSACTIONS ON POWER APPARATUS AND SYSTEMS, Vol. PAS-104, No.1, January, 1985.
- [10]. KOZLOWISK, M.; TUROWSKI, J. - " Stray Losses and Local Overheating Hazard in Transformers".In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LARGE HIGHT TENSION ELECTRIC SYSTEMS, Paris, August, 1972.
- [11]. DEWAN, S.B. - " Power Semi Conductor Circuits ". Vol.1, book, Wiley - Interscience, New York, 1982.
- [12]. BOLDUC, L. ; AUBIN, J. - " Effects of Direct Current in Power Transformers - Part I: A General Theoretical Approach". ELECTRIC POWER SYSTEMS RESEARCH, Vol.1, pp, 291-298, 1978.
- [13]. NAKATA, T.; ISHIHARA, Y.; NAKANO, M.- "Iron Losses of Silicon Steel Core Produced by Distorted Flux". ELECTRICAL ENGINEERING IN JAPAN, Vol. 90, No.1, 1970.
- [14]. HSU, J.S.; WOODSON, H.H.; LIOU, S. - "Experimental Study of Harmonic Flux Effects in Ferromagnetic Materials". IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, vol. MAG-25, No. 3, May, 1989.
- [15]. MASON, C.R.- "El Arte y la Ciencia de la Proteccion por Relevadores". COMPANHIA EDITORIAL CONTINENTAL, S.A., México, 1979.
- [16]. YACAMINI, R.- " Harmonics Produced by direct current in converter Transformers ". IEE PROCEEDINGS , Vol. 125, No.9, September 1978, pp. 873-878.

- [17]. 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.
- [18]. MACFADYEN, W.K.;SIMPSON, R.R.S.; SLATER, R.D. AND WOOD, W.S.- "Method of Predicting Transient current Patterns in Transformers". IEE Proceedings, Vol.120, No. 11, November,1973.
- [19]. BAGHZOUZ, Y.; GONG, X.D.- "Analysis of Three-Phase Transformer No-load Characteristics", IEEE TRANSACTION ON POWER SYSTEMS, Vol.10, No. 1, FEB 1995.
- [20]. LANGSDORF, A.S.- "Teoria de Las Máquinas de Corriente Alterna". MCGRAW-HILL BOOK, 2^a Ed.,1979.
- [21]. STIGANT, S. A.; FRANKLIN, A. C.- "Transformer Book", NEWNES-BUTTERWORTHS, London, Boston, 20th Edition, 1973.
- [22]. YACAMINI, R.; BRONZEADO, H.- "Transformer Inrush Calculations Using a Coupled Eletromagnetic Model". IEE PROCEEDINGS SCI.- MEAS. TECHNOLOGY, Vol. 141, No.6, November 1994, pp. 491-498.
- [23]. YOU,Y.; FUCHS, E.F.; LIN, D.; BARNES, P.R.- "Ractive Power Demand of Transformers with DC Bias". IEEE INDUSTRY APPLICATIONS MAGAZINE, July/August 1996, pp. 45-52.
- [24]. GALLI, W.A.; COX M.D.- "Temperature Rise of Small Oil-Filled Distribution Transformers Supplying Nonsinusoidal Load Currents", IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, Vol.11, No. 1, January 1996.
- [25]. NEVES, W.L.A.; DOMMEL, H.W.- "Saturation Curves of Delta-Connected Transformers from Measurements", IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, Vol.10, No. 3, July 1995.

- [26]. LIN, C.E. at ali .- "Investigation of Magnetizing Inrush Current in Transformers". IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, Vol. 08, No. 1, January 1993.