

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
COORDENAÇÃO DO MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

REATORES SATURADOS COM EXCITAÇÃO PARALELA

FABIANA DA SILVA LEAL

**RECIFE-PE
2000**

REATORES SATURADOS COM EXCITAÇÃO PARALELA

FABIANA DA SILVA LEAL

REATORES SATURADOS COM EXCITAÇÃO PARALELA

Dissertação apresentada à Coordenação de Mestrado em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, em cumprimento às exigências para a obtenção de Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Manoel Afonso De Carvalho Júnior, Ph.D., UFPE

Orientador

Geraldo Leite Torres, Ph.D., UFPE

Orientador

**RECIFE-PE
2000**

*Aos meus pais,
José de Menezes e Maria
Verônica, com carinho,
DEDICO.*

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Manoel Afonso de Carvalho Jr., pela orientação segura, efetiva e dedicada, indispensável à elaboração desta dissertação. Agradeço, especialmente, a sua amizade e as palavras de incentivo que sempre me fizeram encarar os insucessos como meros desafios a serem superados e jamais o fim de um ideal.

Ao Prof. Geraldo Leite Torres, por suas discussões e pelo trabalho de orientação deste projeto de pesquisa.

Ao Prof. Luís Antônio Magnata da Fonte, pelo apoio constante, pelas sugestões valiosas e pela presteza em compartilhar, a qualquer momento, os seus conhecimentos, que tanto contribuíram para a conclusão deste trabalho.

À minha mãe, Maria Verônica e ao meu pai, José de Menezes, pelo aperfeiçoamento da redação desta dissertação e, sobretudo, pelo amor e compreensão a mim destinados.

Às amigas Cristina Abreu, Jeisa Peixoto, Luciana Soares, Milde Lira e Valdete Carvalho e ao amigo José Carlos de Sá Jr., pelo suporte, pelos momentos de descontração e pelo carinho com que sempre me tratam.

Agradeço, ainda, aos membros do LDSP e a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho propõe-se a apresentar as bases teóricas referentes ao projeto e à operação do reator saturado naturalmente com ligação paralela dos seus enrolamentos. Tal dispositivo tem sua aplicação voltada ao controle do fluxo de potência reativa em sistemas de transmissão, bem como à estabilização de tensão nos seus barramentos, em substituição aos reatores lineares convencionais.

Um algoritmo simplificado para cálculo dos parâmetros físicos do reator, bem como para a dedução do seu circuito elétrico equivalente, foi definido. Diversos projetos de reator foram propostos, prevendo-se, num nível de operação correspondente a 525kV, um consumo de potência reativa de 150MVar. Dentre estes, dois modelos, em particular, foram tomados como alvo de diversos estudos, avaliando-se os seus desempenhos através de simulações digitais e assumindo-se estarem os mesmos conectados a um barramento infinito durante todo o período de processamento. A geração de harmônicos, característica inerente à qualquer dispositivo não-linear, foi também verificada, juntamente com a possibilidade de aperfeiçoamento do projeto de reator, através da inserção de filtros no mesmo, única alternativa não patenteada que se mostrou realmente efetiva na redução do conteúdo harmônico introduzido pela modelagem paralela na corrente de alimentação.

SUMÁRIO

RESUMO	i
SUMÁRIO	ii
LISTA DE TABELAS	iv
LISTAS DE FIGURAS	vii
1 INTRODUÇÃO	01
1.1 OBJETIVOS PRINCIPAIS.....	02
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	03
2 O REATOR SATURADO: CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES	05
2.1 INTRODUÇÃO.....	05
2.2 O REATOR SATURADO COM LIGAÇÃO PARALELA DOS ENROLAMENTOS..	06
3 MODELAGEM DO REATOR SATURADO COM LIGAÇÃO PARALELA DOS ENROLAMENTOS	12
3.1 INTRODUÇÃO.....	12
3.2 ELABORAÇÃO DO PROJETO.....	13
3.2.1 DIMENSIONAMENTO DO REATOR SATURADO.....	15
3.2.1.1 Número de Espiras.....	15
3.2.1.2 Dimensionamento dos Enrolamentos.....	21
3.2.1.3 Estrutura Magnética Adotada.....	32
3.2.2 O MODELO ELÉTRICO EQUIVALENTE DO REATOR SATURADO.....	35
3.2.2.1 Reatância de Dispersão dos Enrolamentos.....	35
3.2.2.2 Resistência dos Enrolamentos.....	39
3.3 O MODELO DIGITAL PARA O REATOR SATURADO.....	44
4 ANÁLISE DE DESEMPENHO DO REATOR SATURADO ATRAVÉS DE SIMULAÇÕES DIGITAIS	47
4.1 INTRODUÇÃO.....	47
4.2 SELEÇÃO DO MODELO ÓTIMO DE REATOR.....	48
4.3 A CONEXÃO EM DELTA DOS ENROLAMENTOS SECUNDÁRIOS DO REATOR.....	57
4.3.1 O REATOR DE SEIS NÚCLEOS.....	59

4.3.2	O REATOR DE NOVE NÚCLEOS.....	69
5	A COMPENSAÇÃO HARMÔNICA.....	74
5.1	INTRODUÇÃO.....	74
5.2	O PROCESSO DE CANCELAMENTO HARMÔNICO.....	75
5.2.1	– LIMITAÇÃO DE HARMÔNICOS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA.....	83
5.3	A MINIMIZAÇÃO DO CONTEÚDO HARMÔNICO.....	84
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	97
6.1	CONCLUSÕES GERAIS.....	97
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	100
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	101
8	ANEXOS.....	104
ANEXO I -	Curva de Perdas Específicas no Núcleo.....	104
ANEXO II -	Curva de Magnetização Adotada para o Ferro.....	105
ANEXO III -	Arquivo de Entrada para Simulação do Reator de Seis Núcleos no ATP.....	106
ANEXO IV -	Arquivo de Entrada para Simulação do Reator de Nove Núcleos no ATP....	114
ANEXO V -	Arquivo de Entrada para Simulação do Reator de Seis Núcleos no ATP com Uso de Filtros Passivos Sintonizados no 12 ^o Harmônico	123
ANEXO VI -	Arquivo de Entrada para Simulação do Reator de Nove Núcleos no ATP com Uso de Filtros Passivos Sintonizados no 18 ^o Harmônico	131

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 –	Dimensões comercialmente disponíveis de fitas de cobre nu a serem utilizadas na confecção dos enrolamentos do modelo paralelo de reator saturado.....	25
TABELA 3.2 –	Espessura das isolações indicadas na figura 3.7 em função da tensão aplicada aos enrolamentos de alta tensão de transformadores refrigerados a óleo.....	28
TABELA 3.3 –	Espessura da isolação entre as espiras dos enrolamentos em função da tensão de trabalho dos mesmos.....	29
TABELA 3.4 –	Característica de magnetização correspondente ao material ferromagnético adotado na modelagem dos núcleos do reator saturado.....	45
TABELA 4.1 –	Opções de projeto do reator saturado de seis núcleos com ligação paralela dos enrolamentos.....	48
TABELA 4.2 –	Opções de projeto do reator saturado de nove núcleos com ligação paralela dos enrolamentos.....	49
TABELA 4.3 –	Variação das perdas no material ferromagnético em função da indução magnética adotada para os núcleos do reator de seis núcleos.....	50
TABELA 4.4 –	Variação das perdas no material ferromagnético em função da indução magnética adotada para os núcleos do reator de nove núcleos.....	50
TABELA 4.5 –	Corrente consumida pelos reatores de seis e nove núcleos para tensões de suprimento variando entre 1,00 e 1,05 pu.....	51
TABELA 4.6 –	Opções de modelagem de um reator contendo seis núcleos em função do tipo de conexão adotada para os seus enrolamentos secundários.....	58
TABELA 4.7 –	Opções de modelagem de um reator contendo nove núcleos em função do tipo de conexão adotada para os seus enrolamentos secundários.....	58
TABELA 4.8 –	Condição de operação de cada núcleo da unidade trifásica 1 do reator de seis núcleos, dentro dos intervalos de tempo selecionados na figura 4.5.....	61
TABELA 4.9 –	Condição de operação de cada núcleo da unidade trifásica 1 do reator de seis núcleos, dentro dos intervalos de tempo selecionados na figura 4.9.....	64
TABELA 5.1 –	Conteúdo harmônico da corrente de alimentação do reator de seis núcleos.....	76
TABELA 5.2 –	Conteúdo harmônico da corrente de alimentação do reator de nove núcleos...	76

TABELA 5.3 –	Valor eficaz das componentes harmônicas características de 11 ^a e de 13 ^a ordens, presentes na corrente da fase A do reator de seis núcleos, quando da sua operação na condição de plena carga.....	79
TABELA 5.4 –	Valor eficaz das componentes harmônicas características de 17 ^a e de 19 ^a ordens, presentes na corrente da fase A do reator de nove núcleos, quando da sua operação na condição de plena carga.....	79
TABELA 5.5 –	Valor eficaz das componentes harmônicas não características não múltiplas de três, de 5 ^a e de 7 ^a ordens, presentes na corrente da fase A do reator de nove núcleos, durante a sua operação na condição de plena carga.....	80
TABELA 5.6 –	Valor eficaz das componentes harmônicas não características não múltiplas de três, de 5 ^a e de 7 ^a ordens, presentes na corrente da fase A do reator de seis núcleos, durante a sua operação na condição de plena carga.....	80
TABELA 5.7 –	Valor eficaz das componentes harmônicas características de 11 ^a e de 13 ^a ordens, presentes na corrente total das fases A, B e C do reator de seis núcleos, durante a sua operação na condição de plena carga.....	82
TABELA 5.8 –	Valor eficaz das componentes harmônicas características de 17 ^a e de 19 ^a ordens, presentes na corrente total das fases A, B e C do reator de nove núcleos, durante a sua operação na condição de plena carga.....	82
TABELA 5.9 –	Limites de distorção harmônica permitidos na onda de tensão, segundo o IEEE-519.....	83
TABELA 5.10 –	Atuação dos filtros sintonizados na frequência do harmônico de 12 ^a ordem, no combate à distorção harmônica da corrente total do reator de seis núcleos, na condição de plena carga.....	87
TABELA 5.11 –	Atuação dos filtros sintonizados na frequência do harmônico de 18 ^a ordem, no combate à distorção harmônica da corrente total do reator de nove núcleos, na condição de plena carga.....	87
TABELA 5.12 –	Alteração da magnitude da componente de 60Hz da corrente do delta em virtude do acréscimo de filtros sintonizados na frequência do 12 ^o harmônico no reator de seis núcleos e de 18 ^o harmônico no reator de nove núcleos, na condição de plena carga.....	88

TABELA 5.13 – Magnitude das correntes harmônicas triplas presentes no delta com e sem a presença de filtros sintonizados na frequência do 12 ^o harmônico no reator de seis núcleos e de 18 ^o harmônico no reator de nove núcleos, na condição de plena carga.....	88
TABELA 5.14 – Componentes harmônicas características observadas na corrente de alimentação e do delta antes e após a introdução de filtros sintonizados na frequência do 12 ^o harmônico, durante a operação do reator de seis núcleos na condição de plena carga.....	89
TABELA 5.15 – Componentes harmônicas características observadas na corrente de alimentação e do delta antes e após a introdução de filtros sintonizados na frequência do 18 ^o harmônico, durante a operação do reator de nove núcleos na condição de plena carga.....	89
TABELA 5.16 – Conteúdo harmônico da corrente de alimentação do reator de seis núcleos compensado por filtros de 12 ^o harmônico (valores percentuais e em Ampères), em pontos de operação distintos, numa base de 500 kV.....	90
TABELA 5.17 – Conteúdo harmônico da corrente de alimentação do reator de nove núcleos compensado por filtros de 18 ^o harmônico (valores percentuais e em Ampères), em pontos de operação distintos, numa base de 500 kV.....	90
TABELA 5.18 – Variação das dimensões físicas e do desempenho do reator saturado de seis núcleos em função do aumento da inclinação da característica V×I adotada...	96
TABELA 5.19 – Variação das dimensões físicas e do desempenho do reator saturado de nove núcleos em função do aumento da inclinação da característica V×I adotada...	96

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 –	Característica de magnetização do reator saturado.....	07
FIGURA 2.2 –	Comportamento de um único núcleo do reator ao aplicar-se uma tensão senoidal aos terminais do enrolamento presente no mesmo.....	09
FIGURA 2.3 –	O reator saturado naturalmente com ligação paralela dos enrolamentos, composto por seis núcleos.....	10
FIGURA 2.4 –	O reator saturado naturalmente com ligação paralela dos enrolamentos, composto por nove núcleos.....	11
FIGURA 3.1 –	Característica $V \times I$ do reator saturado.....	13
FIGURA 3.2 –	Esquema de conexões dos enrolamentos primários que compõem a unidade 1 do reator de nove núcleos.....	16
FIGURA 3.3 –	Composição fasorial da força magnetomotriz imposta ao núcleo VII do reator de nove núcleos.....	18
FIGURA 3.4 –	Composição fasorial da força magnetomotriz imposta ao núcleo VI do reator de seis núcleos.....	19
FIGURA 3.5 –	Diagrama de conexões dos enrolamentos primários da unidade 1 do reator de seis núcleos.....	20
FIGURA 3.6 –	Corrente através dos enrolamentos primários da fase A do reator saturado com ligação paralela dos enrolamentos.....	23
FIGURA 3.7 –	Estruturas magnéticas que compõem os reatores saturados, com os pontos de isolamento devidamente especificados.....	27
FIGURA 3.8 –	Composição do enrolamento.....	30
FIGURA 3.9 –	Especificação da altura máxima dos enrolamentos do reator.....	31
FIGURA 3.10 –	Arquitetura de cada enrolamento do reator, com especificação de todas as grandezas envolvidas no processo de dimensionamento dos mesmos.....	32
FIGURA 3.11 –	Estrutura magnética adotada para cada uma das unidades que compõem o reator saturado naturalmente com ligação paralela dos enrolamentos.....	33
FIGURA 3.12 –	Núcleo do reator saturado envolto por dois enrolamentos.....	36
FIGURA 3.13 –	Núcleo do reator saturado envolto por três enrolamentos.....	37
FIGURA 3.14 –	Núcleo envolto por um enrolamento concêntrico de N espiras.....	40

FIGURA 3.15 – Transformadores monofásicos saturáveis de múltiplos enrolamentos disponíveis no programa ATP.....	44
FIGURA 4.1 – Dimensões físicas (em metros) de cada unidade trifásica pertencente ao reator de seis núcleos.....	52
FIGURA 4.2 – Dimensões físicas (em metros) de cada unidade trifásica pertencente ao reator de nove núcleos.....	54
FIGURA 4.3 – Diagrama de conexões em paralelo do reator de seis núcleos, com todos os nós devidamente especificados para a modelagem no programa ATP.....	56
FIGURA 4.4 – Diagrama de conexões em paralelo do reator de nove núcleos, com todos os nós devidamente especificados para a modelagem no programa ATP.....	57
FIGURA 4.5 – Fluxos magnéticos na unidade 1 do reator saturado naturalmente com ligação paralela dos enrolamentos, composto por seis núcleos (delta aberto)..	60
FIGURA 4.6 – Corrente e fluxos magnéticos na unidade 1 do reator saturado naturalmente com ligação paralela dos enrolamentos, composto por seis núcleos (delta aberto).....	61
FIGURA 4.7 – Corrente na unidade 1 do reator saturado naturalmente com ligação paralela dos enrolamentos, composto por seis núcleos (delta aberto).....	62
FIGURA 4.8 – Corrente na fase A do reator saturado com seis núcleos com delta aberto.....	63
FIGURA 4.9 – Fluxos magnéticos na unidade 1 do reator saturado naturalmente com ligação paralela dos enrolamentos, composto por seis núcleos (delta fechado).....	64
FIGURA 4.10 – Corrente e fluxos magnéticos na unidade 1 do reator saturado naturalmente com ligação paralela dos enrolamentos, composto por seis núcleos (delta fechado).....	65
FIGURA 4.11 – Corrente na fase A do reator saturado com seis núcleos com delta fechado....	67
FIGURA 4.12 – Corrente através da conexão em delta dos enrolamentos secundários do reator saturado com seis núcleos.....	67
FIGURA 4.13 – Corrente na fase A através do enrolamento primário do núcleo I do reator de seis núcleos (entre os terminais TERMK1-CURR1).....	68
FIGURA 4.14 – Corrente na fase A através do enrolamento primário do núcleo I do reator de seis núcleos (entre os terminais TERMK1-CURR1), com uma tensão de alimentação de 1,05 pu.....	69

FIGURA 4.15 – Corrente e fluxo magnético na unidade 1 do reator saturado naturalmente com ligação paralela dos enrolamentos, composto por nove núcleos (delta aberto).....	70
FIGURA 4.16 – Corrente na fase A do reator saturado com nove núcleos com delta aberto.....	71
FIGURA 4.17 – Corrente na fase A do reator saturado com nove núcleos com delta aberto.....	71
FIGURA 4.18 – Corrente e fluxos magnéticos na unidade 1 do reator saturado naturalmente com ligação paralela dos enrolamentos , composto por nove núcleos (delta fechado).....	72
FIGURA 4.19 – Corrente na fase A do reator saturado com nove núcleos com delta fechado...	73
FIGURA 4.20 – Corrente total da fase A do reator saturado de nove núcleos com delta fechado.....	73
FIGURA 5.1 – Composição harmônica da corrente consumida pelo reator de seis núcleos para os pontos de operação indicados na tabela 5.1.....	78
FIGURA 5.2 – Composição harmônica da corrente consumida pelo reator de nove núcleos para os pontos de operação indicados na tabela 5.2.....	78
FIGURA 5.3 – Componentes harmônicas não características presentes na corrente de alimentação do reator de seis núcleos em função do grau de desequilíbrio do sistema.....	81
FIGURA 5.4 – Componentes harmônicas não características presentes na corrente de alimentação do reator de nove núcleos em função do grau de desequilíbrio do sistema.....	81
FIGURA 5.5 – Componentes harmônicas não características presentes na corrente de alimentação do reator de seis núcleos em função do grau de desequilíbrio do sistema.....	81
FIGURA 5.6 – Componentes harmônicas não características presentes na corrente de alimentação do reator de nove núcleos em função do grau de desequilíbrio do sistema.....	81
FIGURA 5.7 – Filtro passivo de sintonia única.....	85
FIGURA 5.8 – Unidade trifásica 1 do reator de seis núcleos, com filtros passivos conectados em derivação em cada terminal do delta, objetivando a compensação harmônica.....	85

FIGURA 5.9 – Processo de compensação das componentes harmônicas de 11 ^a e 13 ^a ordens presentes na corrente total do reator de seis núcleos, antes e após a introdução de filtros sintonizados na frequência do 12 ^o harmônico.....	92
FIGURA 5.10 – Processo de compensação das componentes harmônicas de 23 ^a e 13 ^a ordens presentes na corrente total do reator de seis núcleos, antes e após a introdução de filtros sintonizados na frequência do 12 ^o harmônico.....	93
FIGURA 5.11 – Processo de compensação das componentes harmônicas de 17 ^a e 19 ^a ordens presentes na corrente total do reator de nove núcleos, antes e após a introdução de filtros sintonizados na frequência do 18 ^o harmônico.....	93
FIGURA 5.12 – Processo de compensação das componentes harmônicas de 35 ^a e 37 ^a ordens presentes na corrente total do reator de nove núcleos, antes e após a introdução de filtros sintonizados na frequência do 18 ^o harmônico.....	94
FIGURA 5.13 – Espectro harmônico da corrente de alimentação do reator de seis núcleos, antes e após a introdução de filtros sintonizados na frequência do 12 ^o harmônico, na condição de plena carga (1,05 pu), numa base de 500kV.....	94
FIGURA 5.14 – Espectro harmônico da corrente de alimentação do reator de nove núcleos, antes e após a introdução de filtros sintonizados na frequência do 18 ^o harmônico, na condição de plena carga (1,05 pu), numa base de 500kV.....	95

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Todo sistema elétrico de potência deve ser planejado e operado de forma tal a oferecer aos seus usuários um serviço de elevada continuidade, respeitando, ainda, diversos critérios de qualidade previamente estabelecidos, referentes a valores máximo e mínimo de tensão nos pontos de entrega, excursão máxima da frequência em torno do valor nominal e carregamento máximo dos componentes do sistema, entre outros.

O aumento contínuo do consumo de energia elétrica e a conseqüente necessidade de transportá-la, em grandes blocos, através de longas distâncias, tornaram os problemas de controle de potência reativa e de distúrbios de tensão ainda mais severos, exigindo da engenharia uma busca constante por novas tecnologias, capazes de assegurar aos sistemas de transmissão uma qualidade de operação compatível com o grande porte dos mesmos.

Um dos recursos mais comuns para promover a compensação da potência reativa capacitiva gerada pelas linhas longas consiste no uso de reatores lineares em derivação, evitando-se, a um custo mínimo, sobretensões no sistema. Contudo, a operação contínua de tais dispositivos durante a condição de regime permanente, prevendo-se possíveis rejeições de carga, reduz a capacidade de transmissão das linhas, comprometendo, desta forma, a eficácia do sistema. Tal inconveniente incentivou o desenvolvimento de investigações a respeito da viabilidade de substituição dos reatores lineares convencionais pelos reatores saturados, em virtude das inúmeras qualidades apresentadas por este último:

confiabilidade, velocidade de resposta, baixas perdas, ausência quase que total de manutenção e não contribuição para a potência de curto-circuito. Os reatores saturados reúnem as mesmas características de desempenho dos reatores lineares na condição de energização da linha e rejeição de carga, com a vantagem de possuir uma inerente capacidade de sobrecarga em relação à sua capacidade de absorção, o que torna este tipo de dispositivo bastante adequado para fazer frente a sobretensões temporárias decorrentes de manobra. Em carga máxima do sistema, entretanto, o reator saturado está em mínima absorção de reativos, dispensando, conseqüentemente, o uso de bancos de capacitores, tática freqüentemente adotada para compensar a potência reativa consumida pelos reatores lineares, sob esta condição de operação.

1.1 – OBJETIVOS PRINCIPAIS

Diversos trabalhos já foram desenvolvidos pelo Grupo de Engenharia Elétrica e Sistemas de Potência da Universidade Federal de Pernambuco, tendo em vista a aplicação futura de reatores saturados naturalmente com ligação série dos enrolamentos, diretamente conectados à linha, com o intuito de aumentar a capacidade de transmissão da mesma através do controle de tensão e da compensação de potência reativa. Também com este mesmo intento, na Rússia, Aleksandrov e outros vêm empenhando-se em difundir uma outra opção construtiva de reator, em que a saturação dos núcleos é controlada através de eletrônica de potência. Alguns destes equipamentos, ao contrário da modelagem série, já se encontram em operação comercial, havendo, inclusive, registros de reatores controlados instalados em linhas de 1150kV, com potência variando entre 500 e 1000MVA (Biki & Yarvik, 1991). No Brasil, o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica também iniciou estudos introdutórios a respeito dos reatores com saturação controlada por corrente contínua, baseado na tecnologia Russa (CEPEL, 1997).

Estas duas linhas de pesquisa, mencionadas no parágrafo anterior, motivaram o desenvolvimento do presente trabalho, que consiste numa análise detalhada das potencialidades do reator com saturação natural, sendo considerada, neste caso, um esquema de conexão paralela dos seus enrolamentos. A idéia principal é a verificação tanto da possibilidade de construção deste equipamento, quanto das suas características de

desempenho, obtendo-se, desta forma, os subsídios iniciais para uma comparação com as outras opções de modelagem de reatores saturados, analisados em trabalhos passados.

Assim, os objetivos básicos desta dissertação podem ser resumidos através dos seguintes tópicos:

- Fornecimento de informações a respeito do reator saturado naturalmente com excitação paralela, desde um algoritmo de projeto básico para a determinação das dimensões físicas de tal equipamento, até a obtenção de um modelo digital equivalente para o mesmo, capaz de permitir o registro de sutilezas relativas ao seu desempenho, através de simulações computacionais no programa ATP (Alternative Transients Program);
- Seleção de dois modelos digitais de reator, dentre aqueles que serão aqui desenvolvidos, para análise tanto do comportamento quanto do processo de cancelamento harmônico decorrente do esquema especial de conexões imposto aos seus enrolamentos;
- Pesquisa de uma tecnologia, livre de patentes que, quando somada ao projeto de reator, seja capaz de aperfeiçoá-lo, promovendo a redução dos harmônicos remanescentes, inevitavelmente introduzidos pelo equipamento na corrente de alimentação.

1.2 – ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho acha-se distribuído em 5 capítulos:

Capítulo 2: Apresenta uma introdução teórica e uma breve retrospectiva histórica a respeito dos reatores saturados, além de detalhes relativos à conexão paralela propriamente dita, como, por exemplo, os possíveis esquemas de ligação dos enrolamentos, a partir da distribuição das forças magnetomotrizes, que assegurarão um número ótimo de espiras no equipamento.

Capítulo 3: Fornece um algoritmo de projeto para os reatores cujos esquemas de conexão foram sugeridos no capítulo precedente, incluindo o dimensionamento de todos

os componentes físicos do equipamento, bem como as decorrentes expressões matemáticas que permitirão o cálculo dos parâmetros elétricos que deverão ser capazes de representar, fielmente, os núcleos do reator, tanto sob condições de saturação profunda quanto no estado não saturado.

Capítulo 4: Este capítulo é marcado pela aplicação do algoritmo de projeto sugerido. Diversos modelos de reatores saturados naturalmente com ligação paralela dos enrolamentos são concebidos. Uma análise qualitativa detalhada do desempenho de dois deles é desenvolvida através de simulações digitais no programa ATP.

Capítulo 5: Encerra uma análise do conteúdo harmônico injetado pela modelagem paralela na corrente de alimentação, bem como apresenta uma proposta de combate ao mesmo, através da introdução de filtros de harmônicos no modelo de reator.

Capítulo 6: Resume as conclusões do presente trabalho e apresenta sugestões para pesquisas futuras e aperfeiçoamentos.

CAPÍTULO 2

O REATOR SATURADO: CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

2.1 – INTRODUÇÃO

Durante a Segunda Guerra Mundial, constatou-se a necessidade de obtenção de frequências mais elevadas para a transmissão de sinais de rádio. Coube a E. Friedlander, em liderança pioneira, o desenvolvimento da tecnologia do reator com saturação natural, prevendo-se o seu emprego em circuitos multiplicadores de frequência (Dale et al., 1952), (Friedlander, 1956). Como o material magnético até então utilizado, na construção dos núcleos do reator saturado, era de qualidade inferior, verificava-se uma evidente precariedade no desempenho de tal equipamento, que se agravava ainda mais por suas características exageradas de peso e volume. Ao longo dos anos, cresceu a popularidade do reator saturado e uma série de pesquisas voltadas ao descobrimento de materiais magnéticos com propriedades superiores foram desenvolvidas. Como consequência, núcleos magnéticos de alta qualidade foram obtidos, apresentando um ciclo de histerese quase que retangular, o que tornou possível a construção de equipamentos extremamente eficientes, resistentes às variações de temperatura, com dimensões físicas inferiores a dos anteriormente projetados, além de alta confiabilidade e longa vida (Johnson & Rauch, 1955).

O primeiro compensador estático utilizando reatores saturados foi fabricado pela General Electric Company (G.E.C.) da Inglaterra, a qual deteve todos os direitos

construtivos do mesmo por cerca de 30 anos. Na década de 60, o reator saturado passou a ser aplicado comercialmente, objetivando a compensação de reativos e o controle de flutuação de tensão, primordialmente, na área das indústrias siderúrgicas e, posteriormente, em sistemas de transmissão.

Desde então, a G.E.C. desenvolveu cerca de 49 reatores saturados, os quais foram postos em operação comercial em diversos países do mundo, totalizando uma potência instalada da ordem de grandeza de 1300MVA_r. Entretanto, com o avanço da eletrônica de potência, a G.E.C. decidiu vender a tecnologia dos reatores saturados a uma indústria chinesa, voltando-se para a área de compensadores estáticos controlados a tiristor (Camponês do Brasil, 1996).

Por ser um equipamento com excelente desempenho elétrico, o reator saturado vem sendo objeto de freqüentes pesquisas desenvolvidas pelos membros da Área de Sistemas de Potência da Universidade Federal de Pernambuco. Destacam-se, nesta especialidade, os trabalhos de Carvalho Júnior (1983), Camponês do Brasil (1996), Magnata da Fonte (1997) e Ferreira (1998), os quais encerram uma análise detalhada da viabilidade de aplicação dos reatores saturados, visando a compensação shunt em EAT e UAT, especialmente nas regiões mais remotas e de difícil acesso humano em sistemas de transmissão brasileiros, como, por exemplo, na Região Amazônica.

2.2 - O REATOR SATURADO COM LIGAÇÃO PARALELA DOS ENROLAMENTOS

O reator saturado é um dispositivo multinúcleo cujos enrolamentos encontram-se estrategicamente arranjados de tal forma a cancelar os principais harmônicos resultantes das características não-lineares apresentadas pelo mesmo. Para tanto, considerando-se um ciclo completo de alimentação, os ampère-espiras originados em cada um dos núcleos deverão apresentar uma mesma amplitude e uma defasagem de π/n radianos entre si, onde n corresponde ao número de núcleos que compõem o reator, de tal forma que os únicos harmônicos remanescentes sejam aqueles de ordem $(2kn \pm 1)$, $\forall k \in \mathbb{N}$.

O circuito magnético do reator saturado assemelha-se ao de um transformador

convencional; a diferença básica entre ambos reside no fato de que o reator saturado é projetado para atingir a condição de saturação em sua tensão de trabalho, enquanto o transformador nunca deverá operar em saturação, mantendo a sua corrente de magnetização sempre muito inferior àquela de plena carga. A característica não-linear do material ferromagnético adotado nos núcleos do reator saturado encontra-se indicada na figura 2.1, na qual se observa uma alta permeabilidade na região não saturada e uma baixa permeabilidade na região saturada, bem próxima a do ar. Assim, enquanto a tensão aplicada ao reator não for suficiente para originar, em seus núcleos, um fluxo magnético igual ou superior a ϕ_s , o qual inicia a saturação do ferro, a corrente que circulará através dos seus enrolamentos será desprezível; entretanto, uma vez em saturação, a corrente aumentará rapidamente para

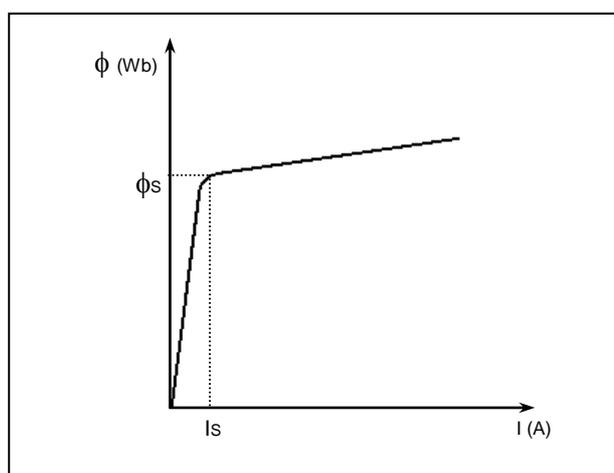


Figura 2.1 – Característica de magnetização do reator saturado

pequenos acréscimos na tensão aplicada. O reator saturado exhibe, portanto, a capacidade de controlar a sua tensão terminal, sendo, por esta razão, um equipamento de extrema eficiência na compensação shunt de linhas de transmissão.

A idéia básica para o estabelecimento de conexões em paralelo de um reator é garantir que os requisitos correspondentes à amplitude e defasagem das forças magnetomotrizes (FMMs) geradas sejam respeitados, como se verifica quando da modelagem de um reator série tradicional. A construção típica do reator saturado com ligação série dos enrolamentos vem sendo aquela adotada pela G.E.C, fabricante com tradição em tal modelagem, na qual todo o equipamento resume-se a uma única estrutura física, denominada

monobloco (Thanawala et al., 1978). Na modelagem paralela, por sua vez, o reator acha-se constituído por unidades físicas individuais (Fisher & Friedlander, 1955); uma possível opção de construção, a qual será analisada no decorrer do presente trabalho, será aquela em que se adotam estruturas individuais encerrando, cada uma delas, três núcleos, cujos enrolamentos pertencentes à mesma fase encontram-se conectados em paralelo. Nesta última opção de modelagem, verifica-se, em qualquer instante no tempo, a existência de um único núcleo saturado por vez em cada unidade trifásica individual, enquanto os dois núcleos restantes estarão fora da condição de saturação. Conseqüentemente, para que tais solicitações de operação sejam satisfeitas, cada núcleo da unidade deverá permanecer saturado por um período de 60° ou $\pi/3$ radianos, em cada semiciclo da tensão de alimentação. A subdivisão do reator em unidades trifásicas simplifica a fabricação, o transporte e a instalação do mesmo.

É bem sabido que o comportamento de um reator saturado naturalmente é regido pelo nível de indução magnética no ferro. Visando uma análise mais concisa da modelagem em paralelo, apenas um dos três núcleos que compõem cada unidade física individual do reator será considerado, estando o mesmo envolto por N espiras e apresentando secção transversal A , conforme ilustra a figura 2.2c. Uma curva de magnetização idealizada, como aquela indicada na figura 2.2a, também será adotada para o material. Como pode ser observado, tal curva possui dois joelhos, os quais marcam os limites de saturação. Para valores de fluxo magnético entre tais limites, isto é, para $-\phi_s < \phi < \phi_s$, o núcleo permanecerá não saturado e, conseqüentemente, a FMM resultante no núcleo será desprezível. Extrapolando-se os joelhos da característica de magnetização, a FMM no núcleo será função linear do fluxo no ferro.

Assim, ao aplicar-se uma tensão senoidal aos terminais do enrolamento, um fluxo alternado também senoidal será originado no núcleo, como descreve a figura 2.2b. Tal fluxo varia segundo o nível de saturação e, portanto, enquanto a amplitude da tensão entre os terminais do enrolamento não for suficiente para originar um fluxo magnético superior àquele que marca o início do processo de saturação, a corrente através das N espiras do enrolamento do núcleo será praticamente nula. Aumentando-se a amplitude da tensão aplicada de tal forma que os limites de saturação sejam ultrapassados, o núcleo ingressará na condição saturada, sendo esta transição do estado não saturado para o saturado

caracterizada pela geração de pulsos de corrente, cujas amplitude e largura aumentarão ou diminuirão proporcionalmente à amplitude da tensão terminal, como ilustra a figura 2.2d.

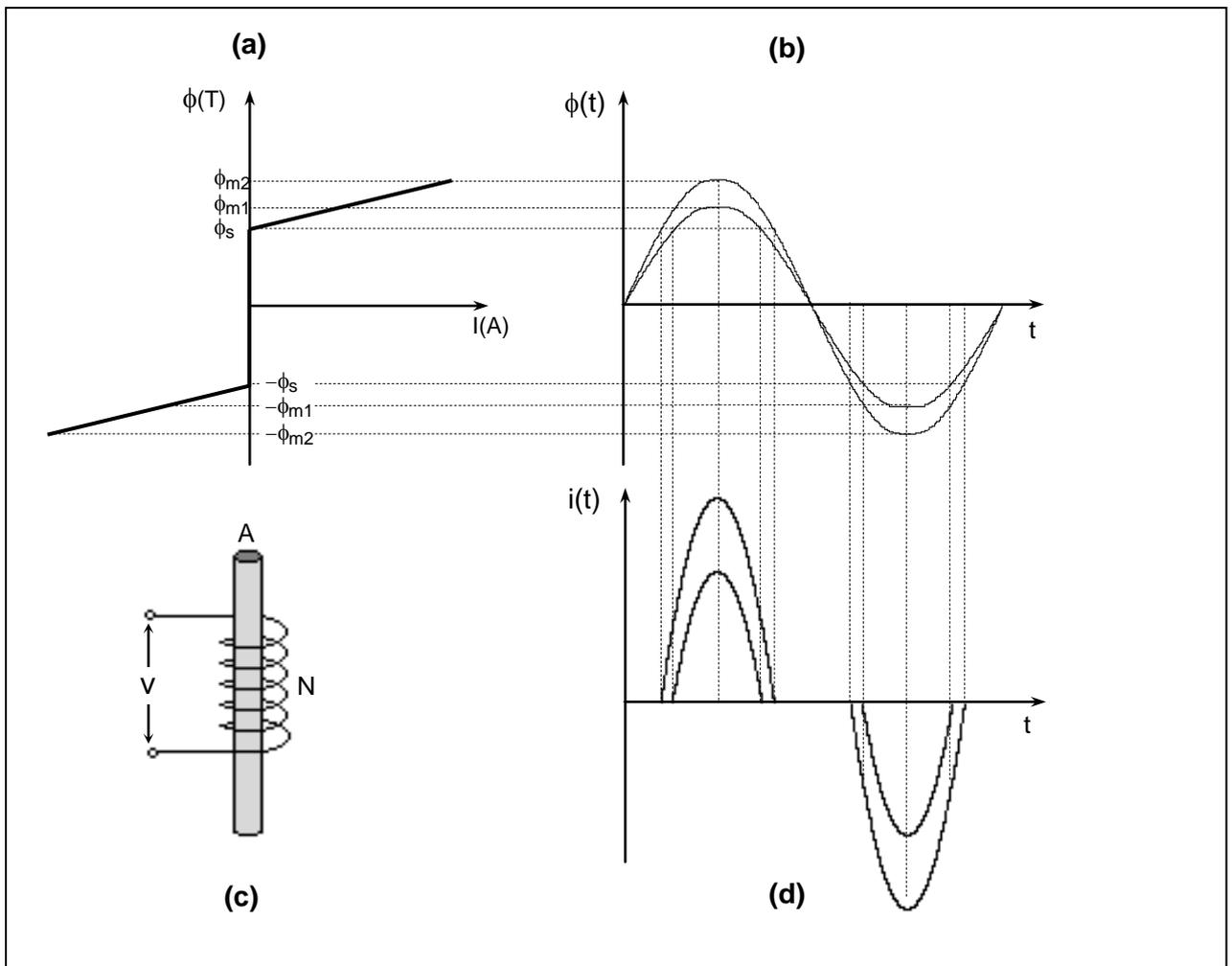


Figura 2.2 – Comportamento de um único núcleo do reator ao aplicar-se uma tensão senoidal aos terminais do enrolamento presente no mesmo:

- (a) Característica de magnetização idealizada adotada para o ferro
- (b) Fluxo magnético originado no núcleo
- (c) Núcleo envolto por N espiras
- (d) Forma de onda da corrente através dos enrolamentos do núcleo

Um detalhe observado ao longo dos estudos envolvendo o reator saturado foi que, independentemente da ligação adotada, as características operacionais deste equipamento apresentam-se significativamente melhores quanto maior o número de núcleos incluídos na composição da estrutura física do mesmo, especialmente no que diz respeito ao combate dos harmônicos gerados devido à não-linearidade inerente ao próprio dispositivo. Enquanto na ligação série não há restrições físicas quanto ao número de núcleos adotados, a ligação

paralela, por sua vez, sempre reunirá um número de núcleos múltiplo de três, uma vez que cada unidade individual que constitui o reator encerra três núcleos. Assim, dois possíveis esquemas de conexões em paralelo para o reator saturado foram desenvolvidos, um com seis e outro com nove núcleos, conforme indicam as figuras 2.3a e 2.4a respectivamente, uma vez que estes são os números tradicionalmente adotados na modelagem série. Os enrolamentos primários do reator correspondem àqueles compostos por N_0 , N_1 e N_2 espiras, enquanto os enrolamentos secundários, de N_3 espiras cada, acham-se conectados em delta, em cada unidade física individual, visando permitir a circulação das correntes harmônicas triplas (Fisher & Friedlander, 1955).

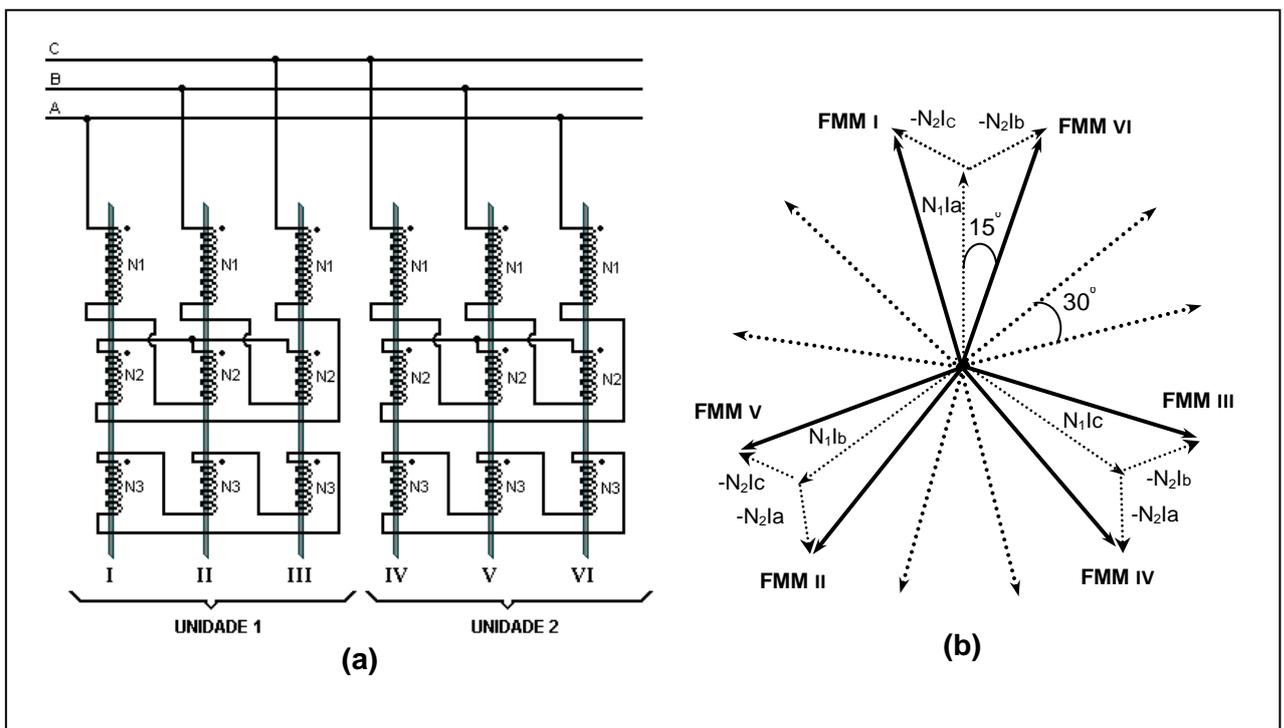


Figura 2.3 – O reator saturado naturalmente com ligação paralela dos enrolamentos, composto por seis núcleos:
 (a) Esquema de conexão
 (b) Distribuição das forças magnetomotrices geradas

Como pode ser observado na figura 2.3a, o reator com seis núcleos constitui-se de duas unidades trifásicas individuais e idênticas conectadas em paralelo; a primeira delas composta pelos núcleos I, II e III, e a segunda, pelos núcleos IV, V e VI. A conexão dos enrolamentos foi executada de forma tal a assegurar que as FMMs produzidas pelo reator apresentassem uma mesma amplitude e a defasagem de 30° ou $\pi/6$ radianos entre si, conforme

ilustra a figura 2.3b. Já a arquitetura do reator de nove núcleos foi derivada da distribuição fasorial representada na figura 2.4b. Nesta modelagem, as FMMs impostas a cada núcleo deverão estar defasadas entre si de 20° ou $\pi/9$ radianos. O modelo para a estrutura de nove núcleos está indicado na figura 2.4a, e encerra três unidades trifásicas, sendo a primeira delas, composta pelos núcleos I, II e III, fisicamente distinta da segunda e terceira unidades, as quais são compostas pelos núcleos IV, V e VI e VII, VIII e IX, respectivamente. Em cada unidade trifásica individual presente no modelo paralelo de reator, os enrolamentos primários acham-se conectados em estrela com neutro flutuante, visando garantir que a soma das correntes através destes totalize zero.

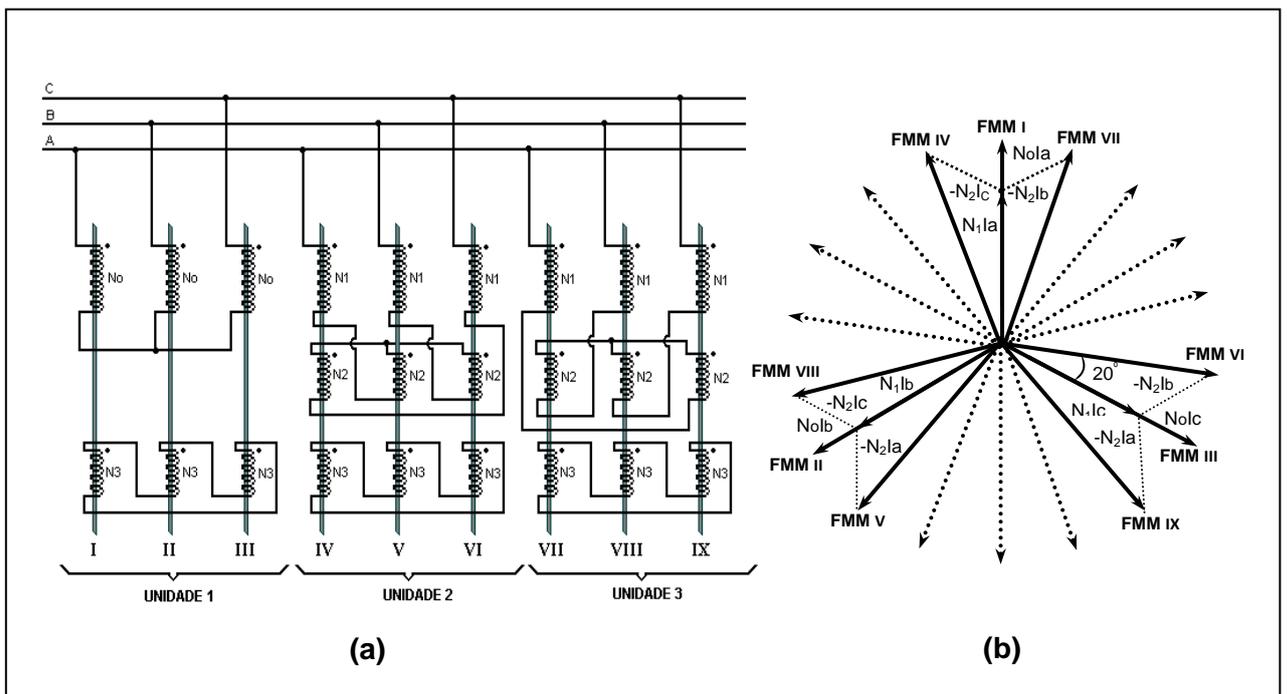


Figura 2.4 – O reator saturado naturalmente com ligação paralela dos enrolamentos, composto por nove núcleos:
 (a) Esquema de conexão
 (b) Distribuição das forças magnetomotrizs geradas

CAPÍTULO 3

MODELAGEM DO REATOR SATURADO NATURALMENTE COM LIGAÇÃO PARALELA DOS ENROLAMENTOS

3.1 – INTRODUÇÃO

Para o desenvolvimento de estudos envolvendo o reator saturado com ligação paralela dos seus enrolamentos, o primeiro requisito a ser satisfeito consiste na elaboração de um projeto básico do mesmo, no qual todas as suas dimensões físicas e parâmetros elétricos serão estabelecidos. Concluída esta primeira fase, parte-se, então, para a execução de um modelo computacional, a partir do qual todas as características de desempenho do reator poderão ser analisadas. A ferramenta fundamental de simulação digital adotada no decorrer do presente trabalho foi o ATP (Alternative Transients Program), um software disponível para cálculo de transitórios eletromagnéticos, extremamente confiável, cuja credibilidade encontra-se difundida mundialmente no setor elétrico. Segundo Camponês do Brasil (1996), cada núcleo do reator saturado pode ser representado computacionalmente pelo elemento “Saturable Transformer Component” do programa ATP, o qual exige, como dados de entrada, a curva de saturação do material ferromagnético adotado, além da resistência ôhmica, reatância de dispersão e número de espiras de cada enrolamento que compõe o núcleo em

questão.

É óbvio que, nesta categoria de estudo envolvendo simulações digitais, o processo de seleção de um modelo ótimo para o reator é totalmente iterativo, sendo cada etapa do mesmo detalhadamente descrita ao decorrer deste capítulo.

3.2 – ELABORAÇÃO DO PROJETO

O ponto de partida para a obtenção de um projeto de reator saturado baseia-se na especificação das características de operação do mesmo, de tal forma que o modelo digital concebido forneça, ao final da simulação, resultados similares àqueles pré-estabelecidos teoricamente. Assim os seguintes parâmetros deverão ser previamente fixados:

- A tensão que marca o início do processo de saturação do núcleo, V_S , abaixo da qual o consumo por parte do reator, I_S , é desprezível. Tal nível de tensão caracteriza a chamada condição de operação em vazio do reator;
- A tensão V_{PLENA} , na qual um máximo consumo, I_{PLENA} , é verificado, caracterizando a condição de operação em plena carga do reator.

A figura 3.1 descreve, claramente, o comportamento operacional do reator, conforme mencionado no parágrafo anterior, através da sua característica não-linear.

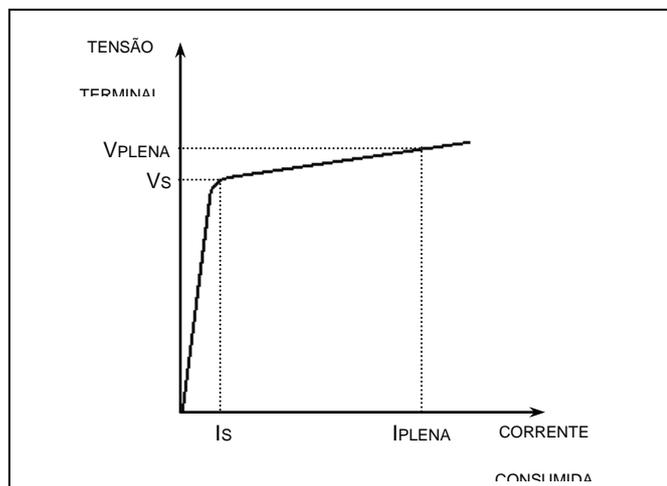


Figura 3.1 – Característica $V_x I$ do reator saturado

A etapa seguinte corresponderá a um processo iterativo utilizando, como referência, os resultados de simulações obtidos através do programa ATP. Para tanto, valores iniciais para o caminho magnético h_n e para a área A da secção transversal de cada núcleo do reator deverão ser estipulados, bem como o valor de indução magnética B_s e a correspondente intensidade de campo magnético H_s em que, supostamente, deverá ser iniciada a saturação dos núcleos do reator. De posse de tais grandezas, todas as demais dimensões físicas do reator poderão ser calculadas e, a partir destas, também serão deduzidos todos os parâmetros elétricos do mesmo. O passo final será a implementação computacional do modelo do reator e a subsequente simulação do mesmo através do ATP.

Enquanto os resultados fornecidos pelo processamento computacional não forem satisfatórios, o processo iterativo não será finalizado. O modelo de reator deverá ser otimizado, através da alteração dos dados de entrada, até que a característica $V \times I$ obtida coincida com aquela almejada (figura 3.1), de tal sorte que as já referidas grandezas I_s e I_{PLENA} , que assinalam as condições de operação em vazio e à plena carga estipuladas para o reator, sejam constatadas através do modelo digital. O valor de I_s deveria ser, se possível, nulo. Como não há regras que definam, exatamente, a ordem de grandeza de tal variável, valores entre 2 e 10% da corrente de plena carga do equipamento são considerados como aceitáveis (Magnata da Fonte, 1997).

O projeto definitivo de reator selecionado será aquele que, além de apresentar o perfil elétrico esperado, incluindo uma mínima geração de harmônicos, possua as menores dimensões físicas possíveis, dentro das limitações do algoritmo de cálculo adotado.

Em seu trabalho de mestrado, Magnata da Fonte (1997) desenvolveu um software para a modelagem de reatores saturados com nove núcleos, com ligação série dos seus enrolamentos. Para os modelos com conexões em paralelo que serão alvos do presente estudo, a filosofia de projeto adotada é similar àquela aplicada à ligação série, obviamente, com as expressões de cálculo de parâmetros reformuladas de acordo com esta nova disposição dos enrolamentos do equipamento.

3.2.1 – DIMENSIONAMENTO DO REATOR SATURADO

Como já mencionado no capítulo precedente, dois modelos de reatores paralelos, os quais encontram-se representados nas figuras 2.2a e 2.3a, com seis e nove núcleos respectivamente, serão analisados no presente trabalho. Ambos deverão apresentar uma característica $V \times I$ com 5% de inclinação na região de saturação, com joelho em 1,00 pu, numa base de 500kV, devendo os mesmos absorver uma potência reativa de 150MVAR em 1,05 pu. Apesar de o processo de cálculo das grandezas envolvidas em cada projeto ser praticamente o mesmo, detalhes sutis na formulação das expressões matemáticas diferenciarão um modelo do outro, conforme será constatado nas seções a seguir.

3.2.1.1 – Número de Espiras

No desenvolvimento de um projeto físico de reator saturado, o que, de fato, interessa, é que as magnitudes das FMMs impostas a cada núcleo do reator sejam idênticas, independentemente do número de enrolamentos presente nos mesmos. Assim, visando maior simplicidade, o processo de dimensionamento poderá partir de um modelo simplificado, contendo um único enrolamento de N_0 espiras, o qual servirá de referência para a determinação dos demais números de espiras envolvidas no equipamento.

a) Enrolamentos Primários

- Reator de Nove Núcleos

Como indica a figura 2.4a, o reator de nove núcleos apresenta-se fisicamente composto, na unidade 1, por enrolamentos primários de N_0 espiras. Dessa forma, a dedução de uma expressão para tal número de espiras será praticamente direta, onde se admite que o reator é alimentado por uma tensão de linha senoidal, $v(t)$, a uma frequência angular ω , conforme a seguinte relação:

$$v(t) = V_m \cos \omega t$$

Analisando-se a ligação em estrela não-aterrada dos enrolamentos primários da unidade 1, ilustrada na figura 3.2, a força contraeletromotriz, $e(t)$, induzida entre os terminais de cada enrolamento de N_o espiras, desprezando-se as resistências ôhmicas dos mesmos, será dada por:

$$e(t) = \frac{V_m}{\sqrt{3}} \cos \omega t$$

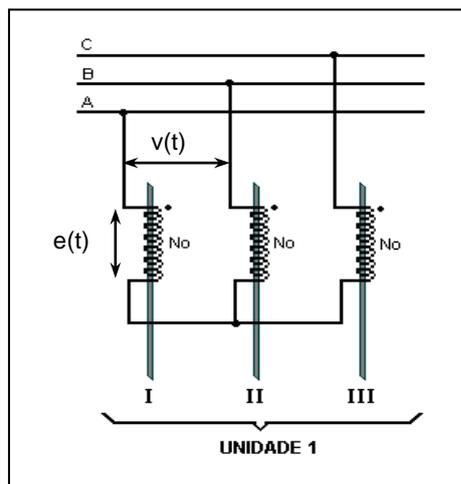


Figura 3.2 – Esquema de conexões dos enrolamentos primários que compõem a unidade 1 do reator de nove núcleos

Sendo $\phi(t)$ o fluxo magnético no núcleo envolto pelas N_o espiras, a Lei de Faraday estabelece que:

$$e(t) = N_o \frac{d\phi(t)}{dt},$$

que, em termos de valores máximos da componente fundamental da onda de tensão aplicada e de fluxo magnético, resulta em:

$$\frac{V_m}{\sqrt{3}} = N_o \omega \Phi_m$$

Como o fluxo magnético é função da indução magnética B_m e da secção transversal A do núcleo, pode-se escrever que:

$$V_m = \sqrt{3}N_o\omega AB_m \quad (3.1)$$

Assim, sendo V_s o valor eficaz da tensão de linha para o qual se inicia o processo de saturação do núcleo do reator e B_s a correspondente densidade de fluxo, a expressão para cálculo de N_o , na modelagem paralela, será dada por:

$$N_o = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \frac{V_s}{\omega AB_s},$$

que, aproximadamente, corresponde a:

$$N_o = \frac{V_s}{1,22\omega AB_s}, \quad (3.2)$$

onde V_s provém das especificações do reator, enquanto a secção A é calculada a partir do diâmetro d do núcleo, segundo a relação abaixo indicada:

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = 0,7854d^2$$

As expressões que estabelecem o número de espiras que compõem os demais enrolamentos primários do modelo serão deduzidas diretamente da distribuição das FMMs representada no diagrama da figura 2.4b e que regem o comportamento do reator. Vale salientar que, o arranjo de FMMs adotado, no presente trabalho, dentre os inúmeros possíveis, foi aquele que garantisse os maiores benefícios econômicos, decorrentes de um número mínimo de espiras. A figura 3.3 ilustra a composição da FMM induzida no núcleo VII do reator saturado de nove núcleos. Geometricamente, tem-se a seguinte relação entre o número de espiras:

$$\frac{N_o}{\text{sen } \frac{2\pi}{3}} = \frac{N_1}{\text{sen } \frac{2\pi}{9}} = \frac{N_2}{\text{sen } \frac{\pi}{9}}$$

De onde conclui-se que:

$$N_1 = N_o \frac{\text{sen } \frac{2\pi}{9}}{\text{sen } \frac{2\pi}{3}} = 0,742 N_o \quad (3.3)$$

$$N_2 = N_o \frac{\text{sen } \frac{\pi}{9}}{\text{sen } \frac{2\pi}{3}} = 0,395 N_o \quad (3.4)$$

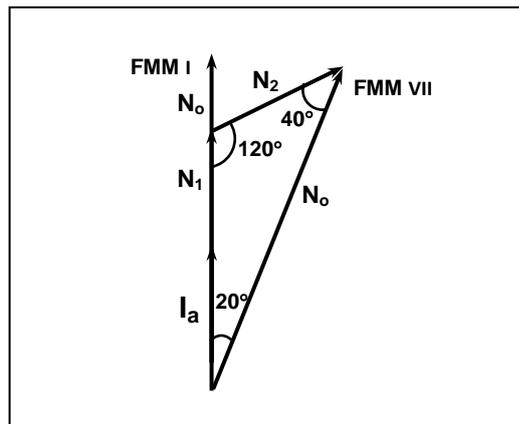


Figura 3.3 – Composição fasorial da força magnetomotriz imposta ao núcleo VII do reator de nove núcleos

- Reator de Seis Núcleos

Adotando-se a mesma metodologia de cálculo, quando da determinação de N_1 e N_2 no modelo de nove núcleos, os números de espiras que compõem os enrolamentos primários do reator de seis núcleos poderão ser obtidos a partir do diagrama representando a distribuição ótima das FMMs, indicado na figura 2.3b. Tomando-se, arbitrariamente, o conjunto de fasores que compõem a FMM do núcleo VI do reator, conforme ilustra a figura 3.4, deduz-se que:

$$\frac{N_o}{\text{sen} \frac{2\pi}{3}} = \frac{N_1}{\text{sen} \frac{\pi}{4}} = \frac{N_2}{\text{sen} \frac{\pi}{12}}$$

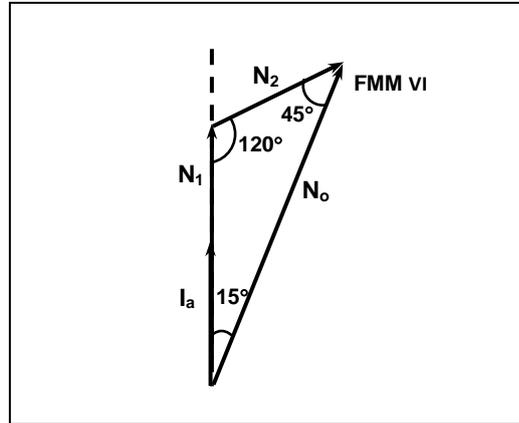


Figura 3.4 – Composição fasorial da força magnetomotriz imposta ao núcleo VI do reator de seis núcleos

Portanto, os números de espiras dos enrolamentos primários do reator de seis núcleos serão dados por:

$$N_1 = N_o \frac{\text{sen} \frac{\pi}{4}}{\text{sen} \frac{2\pi}{3}} = 0,816 N_o \quad (3.5)$$

$$N_2 = N_o \frac{\text{sen} \frac{\pi}{12}}{\text{sen} \frac{2\pi}{3}} = 0,299 N_o \quad (3.6)$$

O processo de cálculo de N_o , para o modelo com seis núcleos, será semelhante àquele de nove núcleos, levando-se em conta que, agora, o primário de todos os núcleos é composto por dois enrolamentos (figura 2.3a). Considerando-se as mesmas hipóteses assumidas na dedução de N_o no caso de nove núcleos, ao aplicar-se, ao reator de seis núcleos, uma tensão de linha senoidal, de valor máximo V_m , forças contraeletromotrizes, de valores máximos E_{m1} e E_{m2} , serão induzidas nos enrolamentos com N_1 e N_2 espiras, respectivamente, conforme ilustra a figura 3.5.

Com base na teoria desenvolvida no item anterior, os valores máximos de tais tensões serão dados pelas equações (3.7) e (3.8), respectivamente.

$$E_{m1} = N_1 \Phi_m \omega \quad (3.7)$$

$$E_{m2} = N_2 \Phi_m \omega \quad (3.8)$$

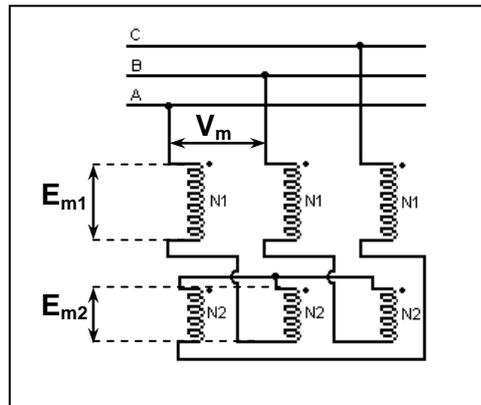


Figura 3.5 – Diagrama de conexões dos enrolamentos primários da unidade 1 do reator de seis núcleos

Substituindo os valores de N_1 e N_2 por aqueles obtidos anteriormente nas equações (3.5) e (3.6), deduz-se que:

$$E_{m1} = 0,816N_o \Phi_m \omega \quad (3.9)$$

$$E_{m2} = 0,299N_o \Phi_m \omega$$

(3.10)

Da composição das tensões E_{m1} e E_{m2} , defasadas entre si de 120° por conta do fluxo magnético que gera cada uma, obtém-se a seguinte relação:

$$\left(\frac{V_m}{\sqrt{3}} \right)^2 = (E_{m1})^2 + (E_{m2})^2 + 2E_{m1}E_{m2} \cos 60^\circ$$

A qual, após a substituição das equações (3.9) e (3.10), resulta em:

$$V_s = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} N_o A \omega B_s,$$

onde V_s é o valor eficaz da tensão de linha aplicada ao reator, para a qual um núcleo, de secção transversal A e envolto por N_o espiras, entra em saturação, a uma indução de trabalho B_s . Conclui-se, dessa forma, que o valor de N_o será dado, aproximadamente, por:

$$N_o = \frac{V_s}{1,22 \omega A B_s}$$

(3.11)

b) Enrolamentos Secundários

O número N_3 de espiras, que compõem os enrolamentos secundários de ambos os modelos de reator, é uma grandeza que não pode ser equacionada, mas sim, estimada. O valor atribuído à mesma será baseado nos estudos desenvolvidos por Carvalho Júnior (1983), nos quais a relação $N_3 \cong \alpha N_o$, onde $\alpha = 1/2$, é indicada como sendo a mais efetiva no combate aos harmônicos em reatores de nove núcleos com ligação série dos enrolamentos. Portanto, também na modelagem paralela com seis e nove núcleos, a aproximação acima mencionada será adotada como ponto de partida no processo de otimização do projeto do reator.

3.2.1.2 – Dimensionamento dos Enrolamentos

Como no programa ATP o reator saturado será representado através do seu circuito elétrico equivalente, faz-se necessário, portanto, o conhecimento da geometria dos seus enrolamentos, a partir da qual a resistência ôhmica e a reatância de dispersão dos mesmos poderão ser determinadas. É importante salientar que não faz parte do escopo deste trabalho o desenvolvimento de um projeto otimizado de reator, mas sim, o suficiente para garantir que os parâmetros elétricos obtidos estejam o mais próximo possível da realidade, levando-se em consideração os condutores disponíveis no mercado e a espessura de isolamento recomendada pela literatura especializada. Os procedimentos para o dimensionamento do

reator saturado serão idênticos àqueles adotados em projetos de transformadores de potência convencionais, devido à grande semelhança existente entre estes dois equipamentos, no que se refere ao arranjo dos seus enrolamentos.

Segundo o Relatório Técnico “Modelagem de Reatores Saturados em EMTP-ATP” (MRS-EMTP-ATP nº 05), decorrente do convênio CHESF/UFPE e elaborado por Antônio Magnata da Fonte, em Maio de 2000, em reatores confeccionados para operar em níveis de tensão superiores a 100kV, as espiras deverão, preferencialmente, envolver o núcleo do interior para o exterior, numa espiral, formando bobinas ou discos. O dimensionamento dos enrolamentos do reator partirá da tensão e da corrente de plena carga (nominais) do mesmo, V_{PLENA} e I_{PLENA} , respectivamente. Serão estas grandezas que estabelecerão a secção dos condutores e o nível de isolamento adequado.

a) Determinação da Secção dos Enrolamentos

Duas categorias de enrolamentos, no reator, deverão ser dimensionadas: os enrolamentos primários ou de excitação, conectados diretamente à alimentação, e os enrolamentos secundários, acoplados magneticamente aos primários e destinados à eliminação dos harmônicos produzidos pela não-linearidade do circuito magnético do equipamento.

A secção S dos condutores dos diversos enrolamentos que compõem o reator poderá ser determinada através da equação:

$$S = \frac{I}{J},$$

onde I corresponde à corrente nominal do enrolamento e J corresponde à densidade de corrente selecionada para a operação do mesmo. A densidade de corrente empregada determinará as perdas no cobre e estará relacionada com o tipo de refrigeração considerada. Segundo Say (1976), as recomendações, quanto à densidade de corrente adotada em transformadores refrigerados a óleo, variam entre 2,0 e 3,8 A/mm². Assim, para todos os enrolamentos que compõem o reator, uma densidade de corrente intermediária de 3,0 A/mm²

será assumida, já que se mostra satisfatória tanto aos projetos de reatores de baixa potência utilizando refrigeração natural, como àqueles de potências mais elevadas, com refrigeração forçada.

A corrente nominal dos enrolamentos primários, I_1 , poderá ser obtida diretamente das especificações do reator, isto é, da potência reativa Q a ser absorvida pelo equipamento quando este é submetido à tensão nominal da linha, V_{PLENA} . Assim, para o reator de nove núcleos, a corrente nominal através de suas N_0 , N_1 e N_2 espiras corresponderá a 1/3 da corrente nominal do reator, I_{PLENA} , uma vez que este será composto por três unidades físicas individuais, conforme indicam as equações abaixo:

$$I_1(09 \text{ núcleos}) = \frac{I_{PLENA}}{3} = \frac{Q}{\sqrt{3} V_{PLENA}}$$

$$\therefore I_1(09 \text{ núcleos}) = \frac{Q}{3\sqrt{3} V_{PLENA}}$$

(3.12)

Similarmente, para os enrolamentos primários do reator de seis núcleos, compostos por N_1 e N_2 espiras, a corrente I_1 corresponderá à metade da corrente nominal do reator, uma vez que duas unidades físicas individuais são observadas no modelo. Portanto,

$$I_1(06 \text{ núcleos}) = \frac{I_{PLENA}}{2} = \frac{Q}{2\sqrt{3} V_{PLENA}}$$

(3.13)

As figuras 3.6a e 3.6b ilustram as correntes nos enrolamentos primários na fase A dos reatores de seis e nove núcleos, respectivamente, para as situações indicadas pelas equações (3.12) e

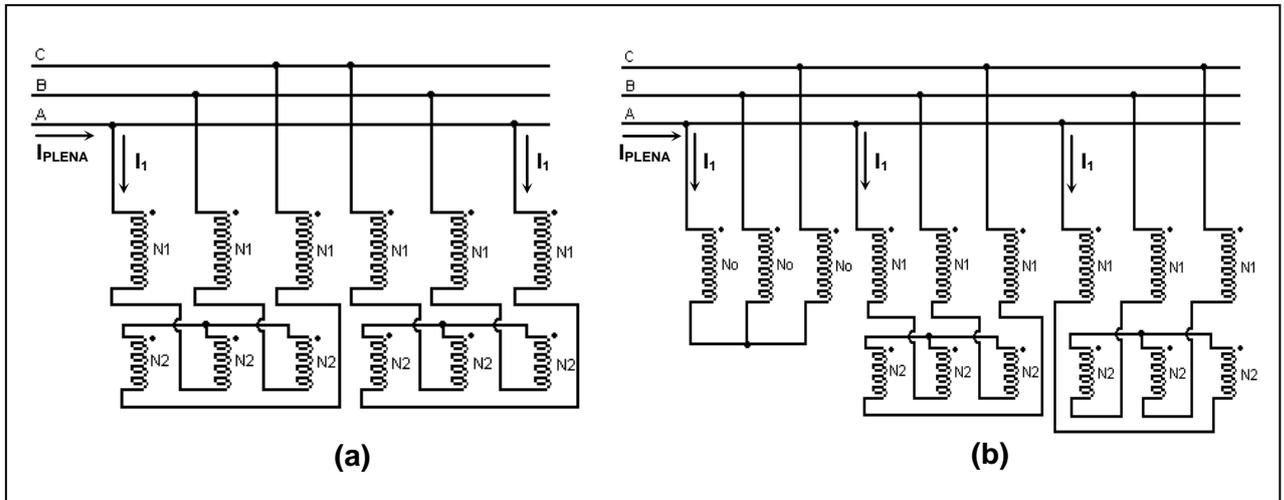


Figura 3.6 – Corrente através dos enrolamentos primários da fase A do reator saturado com ligação paralela dos enrolamentos:

- (a) Modelo com seis núcleos
 (b) Modelo com nove núcleos
 (3.13).

Para os enrolamentos secundários do reator, compostos por N_3 espiras, a obtenção da respectiva corrente nominal, I_3 , não se dará de maneira tão óbvia quanto a descrita anteriormente. No caso da modelagem série, por exemplo, I_3 dependerá do tipo de compensação harmônica escolhida. Se a opção for a inserção de uma reatância simples entre os enrolamentos secundários conectados em delta, a expressão para cálculo de I_3 , segundo Magnata da Fonte (1997), será dada por:

$$I_3 = \frac{1,98}{n} \frac{N_o}{N_3} I_1,$$

(3.14)

onde n corresponde ao número de núcleos do reator e I_1 é a corrente de plena carga dos enrolamentos primários do mesmo. Entretanto, no caso do reator saturado com ligação paralela dos enrolamentos, alvo do presente estudo, não há, nas referências bibliográficas consultadas, nenhuma estimativa inicial para cálculo do valor de I_3 . Assim, também na modelagem paralela, a equação (3.14) será aplicada, tendo o seu coeficiente alterado para um limite superior, conforme indicado na equação (3.15), visando fornecer, ao projeto, uma

margem de segurança quando do dimensionamento dos enrolamentos secundários do reator.

$$I_3 = \frac{N_o}{N_3} I_1,$$

(3.15)

b) Seleção dos Condutores

Após o cálculo da secção aproximada dos condutores que irão compor os enrolamentos do reator, respeitando-se os limites térmicos recomendados, parte-se para a escolha do condutor, dentre os comercialmente disponíveis, cuja secção melhor se adapte àquela estimada previamente. Fitas de cobre nu serão adotadas na confecção dos enrolamentos do reator saturado, cujas dimensões disponíveis no mercado, segundo o Relatório Técnico MRS-EMTP-ATP nº 05, referido anteriormente, estão listadas na tabela 3.1. Para secções superiores àquela máxima indicada na tabela, isto é, superiores a 58,60 mm², faz-se necessária a utilização de duas ou mais fitas de cobre de dimensões idênticas para a composição do condutor. Neste caso, o número de fitas de cobre, N_C, que constituirá o condutor, será determinado através da relação entre a secção calculada, S, em mm, e a máxima secção disponível comercialmente:

$$N_C = \frac{S}{58,60}$$

LARGURA (mm)	ESPESSURA (mm)	SECÇÃO (mm ²)	LARGURA (mm)	ESPESSURA (mm)	SECÇÃO (mm ²)
1,828	1,291	2,03	5,190	2,052	10,35
2,052	1,291	2,32		2,305	11,69
	1,449	2,63		2,588	13,10
	1,628	3,05		2,906	14,48
2,305	1,150	2,36		3,263	16,42
	1,628	3,86		4,115	20,80
2,588	0,812	1,96	5,827	4,621	25,70
	1,024	2,41		5,190	29,60
	1,291	3,01		5,480	31,40
	1,628	3,86	6,350	0,321	2,01
2,906	2,052	4,99	6,544	0,812	5,19
	1,291	3,41		1,024	6,41
	1,628	4,35		1,291	8,15
2,052	5,61	1,628		10,35	
3,263	0,812	2,52		1,828	11,69
	1,024	3,11		2,052	13,15
	1,291	3,90		2,305	14,80
	1,628	4,98		2,588	16,61
	1,828	5,66		2,906	18,40
	2,052	6,40		3,263	20,95
	2,305	7,21	3,665	23,45	
	2,588	8,09	4,115	26,45	
3,665	1,150	3,90	7,144	5,190	32,65
	1,449	4,94		0,405	2,42
	1,628	5,59		0,511	3,26
	1,828	6,36	7,348	0,644	4,08
	2,052	7,18		3,665	26,35
	2,305	8,09		4,261	32,65
4,115	2,906	10,10	8,251	5,827	40,50
	1,024	3,96		1,024	8,21
	1,291	4,98		1,291	10,39
	1,628	6,34		1,628	13,10
	2,052	8,09		1,828	14,80
	2,305	9,16		2,052	16,61
	2,588	10,35		2,305	18,65
	2,906	11,35		2,588	21,00
	3,263	12,95		2,906	23,40
	4,621	0,812		3,61	3,263
1,291		5,64	3,665	29,60	
1,628		7,18	4,115	33,40	
1,828		8,09	5,190	41,60	
2,052		9,16	9,266	0,643	5,79
2,588		11,69		0,812	7,41
2,906		12,85		1,024	9,22
3,665		16,35		1,291	11,67
4,736	0,321	1,628		14,70	
4,840	1,150	2,052		18,65	
5,190	1,024	5,04	10,464	4,621	41,60
	1,291	6,38		6,544	58,60
	1,449	7,18		2,305	23,70
	1,528	8,08		2,906	29,60
	1,828	9,16		3,263	33,60

Tabela 3.1 - Dimensões comercialmente disponíveis de fitas de cobre nu a serem utilizadas na confecção dos enrolamentos do modelo paralelo de reator saturado

Convenção:  → largura
↓
espessura

A secção mínima de cada fita, S_c , será estimada através do quociente entre a secção calculada, S , e o número de fitas, N_c , que comporão o condutor:

$$S_c = \frac{S}{N_c}$$

Dentre as secções listadas na tabela 3.1, deverá ser selecionada aquela que mais se aproxime a S_c , a partir da qual também serão determinadas as correspondentes largura e espessura da fita.

c) Isolação

O dimensionamento da isolação dos enrolamentos do reator saturado segue os mesmos critérios estabelecidos para um transformador convencional de alta tensão. Os pontos de isolamento a serem considerados no projeto estão indicados na figura 3.7. Cada unidade individual que constitui o reator de seis núcleos, bem como as unidades 2 e 3 do modelo de nove núcleos, foram construídas conforme a figura 3.7a; já a unidade 1 do reator de nove núcleos, que é fisicamente distinta das demais, foi modelada dentro dos padrões da figura 3.7b. Sabendo-se que os números de espiras N_o , N_1 e N_2 correspondem aos enrolamentos primários ou de alta tensão, enquanto N_3 pertence aos enrolamentos secundários ou de baixa tensão, tem-se, de acordo com a figura 3.7, as seguintes regiões do reator que exigem maior atenção quando do processo construtivo do mesmo:

y_a : distância entre os enrolamentos de alta tensão;

y_b : distância entre os enrolamentos de alta e baixa tensão;

y_c : distância entre os enrolamentos de baixa tensão e o núcleo;

y_d : distância entre os enrolamentos e a estrutura externa do núcleo.

O nível de isolamento requerido pelo reator será função da tensão que alimenta os enrolamentos do lado de alta tensão (primários) do equipamento. Na tabela 3.2, encontram-se reunidas diversas espessuras para a isolação em função da alta tensão, obtidas a partir da leitura de curvas com perfil aproximadamente linear, recomendadas no Relatório Técnico MRS-EMTP-ATP nº 05, para transformadores refrigerados a óleo. Sendo V_s a tensão de linha, em kV, aplicada aos terminais dos enrolamentos primários do reator, a partir da qual se inicia o processo de saturação do ferro, as equações para a determinação de cada uma das

distância indicadas na figura 3.7, em mm, podem ser obtidas através da aplicação do método dos mínimos quadrados às grandezas listadas na tabela 3.2, e estão indicadas a seguir.

$$y_a = 7,13465 + 0,7166V_s$$

$$y_b = 9,2840 + 0,5010V_s$$

$$y_c = 13,3380 + 0,0952V_s$$

$$y_d = -2,4665 + 1,4463V_s$$

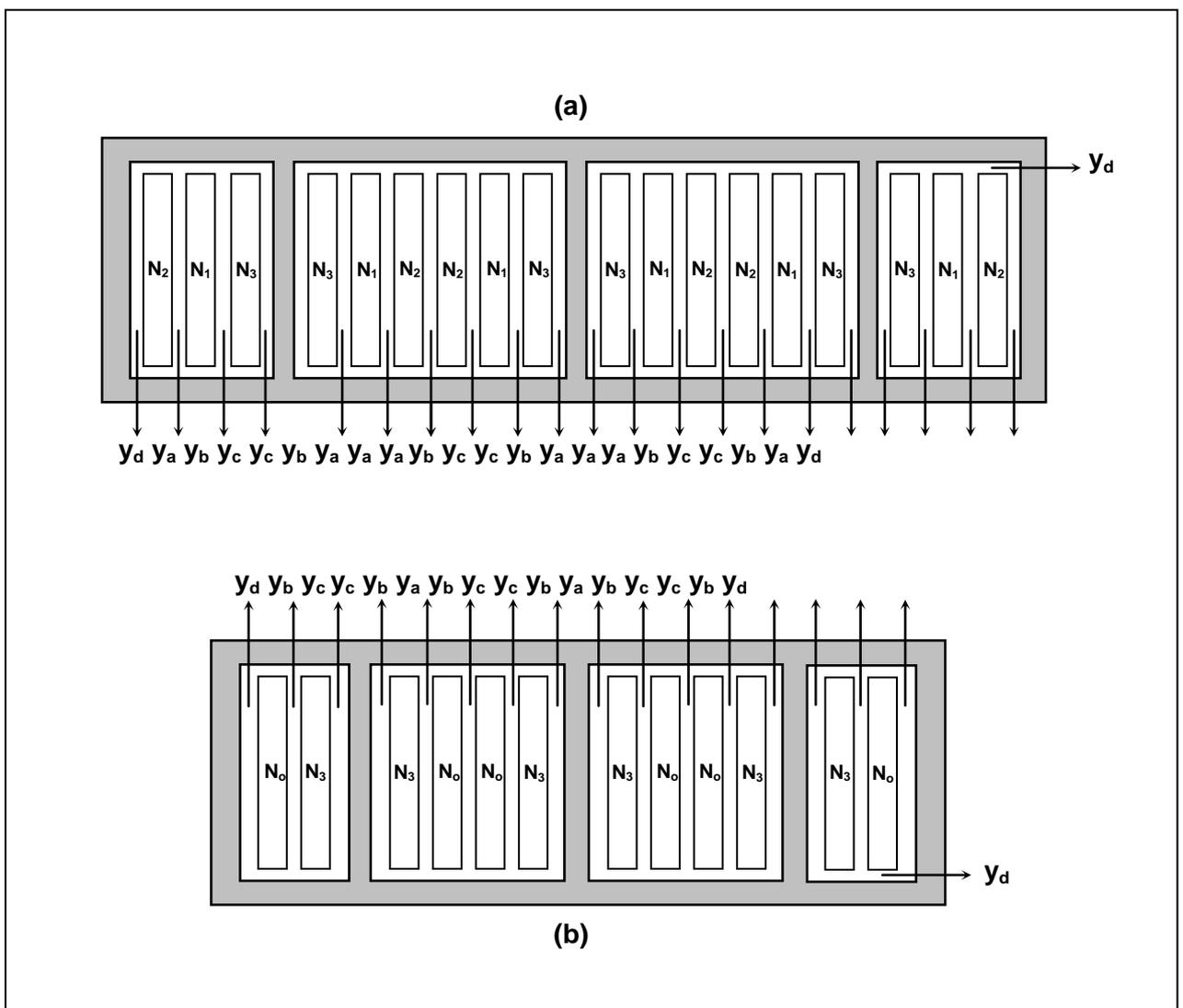


Figura 3.7 – Estruturas magnéticas que compõem os reatores saturados, com os pontos de isolamento devidamente especificados:

- (a) Núcleos envolvidos por três enrolamentos
- (b) Núcleos envolvidos por dois enrolamentos

ALTA TENSÃO (kV)	DISTÂNCIA ENTRE ENROLAMENTOS DE ALTA TENSÃO y_a (mm)	DISTÂNCIA ENTRE ENROLAMENTOS DE ALTA E BAIXA TENSÃO y_b (mm)	DISTÂNCIA ENTRE ENROLAMENTOS DE BAIXA TENSÃO E O NÚCLEO y_c (mm)	DISTÂNCIA ENTRE ENROLAMENTOS E A ESTRUTURA EXTERNA DO NÚCLEO y_d (mm)
10	14,29	14,29	14,29	12,00
20	21,43	19,05	-----	27,00
30	28,57	24,29	-----	42,00
40	35,71	28,57	-----	54,00
50	42,86	34,52	-----	69,00
60	50,00	39,29	19,05	84,00
70	57,14	45,24	-----	-----
80	64,29	50,00	-----	114,00
90	72,38	54,76	-----	-----
100	79,52	60,71	-----	141,00
120	-----	-----	-----	168,00

Tabela 3.2 – Espessura das isolações indicada na figura 3.7 em função da tensão aplicada aos enrolamentos de alta tensão de transformadores refrigerados a óleo

Como o reator saturado irá operar sob níveis elevados de tensão, um grande número de espiras será verificado em tal equipamento; conseqüentemente, a isolação entre as mesmas torna-se significativa quando da execução do enrolamento, devendo, portanto, também ser considerada no desenvolvimento do projeto do reator. A isolação entre espiras poderá ser determinada a partir da curva que relaciona a separação mínima entre espiras, y_e , dada em mm, com a tensão de trabalho do enrolamento, V , em kV. Algumas coordenadas de tal curva encontram-se reunidas na tabela 3.3. De maneira similar ao cálculo de y_a , y_b , y_c e y_d , descrito previamente, o parâmetro y_e , também poderá ser estimado, a partir da equação (3.16), decorrente da aplicação do método dos mínimos quadrados aos pontos listados na tabela 3.3.

$$y_e = 0,4722 + 0,01118V$$

(3.16)

Para os enrolamentos primários do reator, isto é, aqueles compostos por N_o , N_1 e N_2 espiras, a mesma tensão V_s , que marca o início do processo de saturação, será adotada na equação (3.16). Já a tensão V_3 , induzida nos enrolamentos secundários do reator, de N_3 espiras, será dada, em primeira instância, pela equação (3.17), recomendada por Magnata da Fonte (1997).

$$V_3 = 1,10 \left(\frac{N_3}{N_o} \right) V_o$$

(3.17)

ESPESSURA DA ISOLAÇÃO ENTRE AS ESPIRAS DO ENROLAMENTO y_e (mm)	TENSÃO DE TRABALHO DO ENROLAMENTO V (kV)
0,584	10
0,691	20
0,797	30
0,903	40
1,036	50
1,142	60
1,249	70
1,381	80
1,488	90
1,594	100
1,700	110
1,817	120
1,945	130
2,094	140
2,232	150

Tabela 3.3 – Espessura da isolação entre as espiras dos enrolamentos em função da tensão de trabalho dos mesmos (Fonte: Modelagem de Reatores Saturados em EMTP-ATP, convênio CHESF/UFPE, Relatório 05, Maio 2000)

É importante destacar que, no processo construtivo do reator, a separação entre espiras será fortemente determinada pela tecnologia de isolação utilizada. Conseqüentemente, o coeficiente da equação (3.17) poderá vir a ser modificado, objetivando garantir um espaçamento ótimo, com a decorrente redução do volume do equipamento.

d) Execução do Enrolamento

Serão adotados, nos enrolamentos, condutores envolvidos por uma camada sólida de isolação, havendo, portanto, uma separação entre espiras correspondente a y_e , descrita no item anterior e ilustrada na figura 3.8a. Caso se faça necessária a utilização de dois condutores no enrolamento, estes deverão ser mantidos lado a lado, porém, separados por uma isolação adicional de 0,5 mm de espessura (Relatório Técnico MRS-EMTP-ATP nº 05), conforme indicado na figura 3.8b.

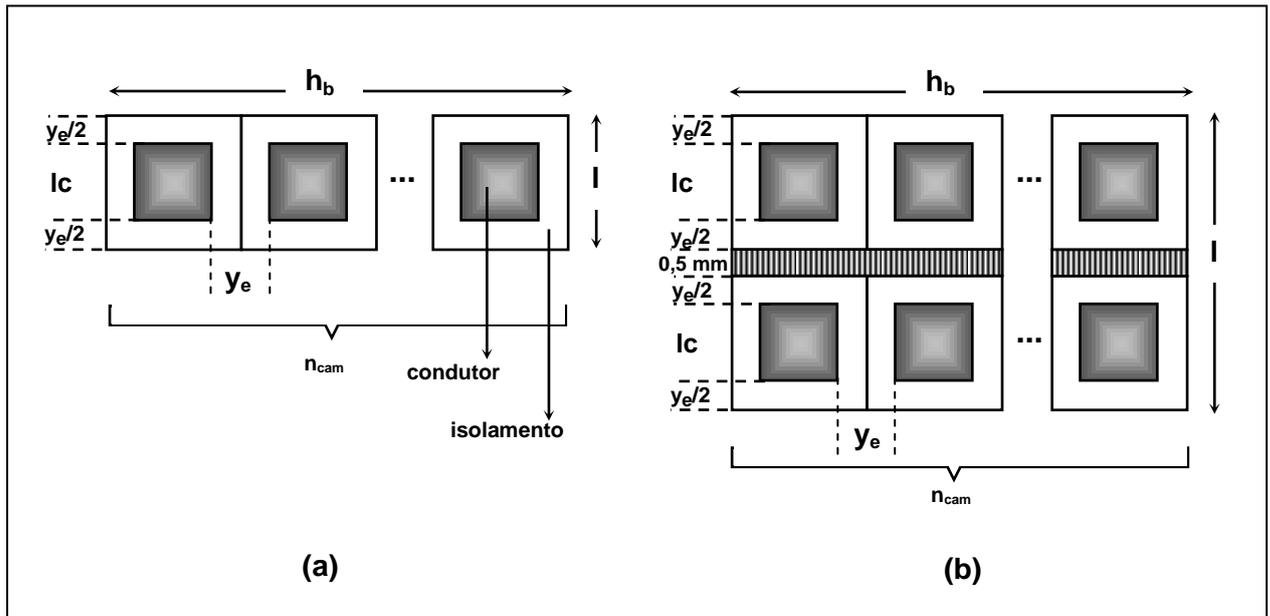


Figura 3.8 – Composição do enrolamento:

(a) Enrolamento composto por um único condutor

Sendo n_{cam} o número de camadas do enrolamento e h_c a espessura do condutor, em mm, a altura da bobina, h_b , em mm, será dada por:

$$h_b = n_{cam} (y_e + h_c + 0,1),$$

onde o fator 0,1 foi adicionado em consideração a possíveis folgas de montagem. Já a largura da bobina, l_b , em mm, corresponderá a:

$$l_b = n_{cond} (l_c + y_e + 0,1) + 0,5(n_{cond} - 1),$$

onde n_{cond} indica o número de condutores utilizados na bobina, l_c é a largura, em mm, do condutor e, mais uma vez, 0,1 corresponde ao fator de folgas de montagem.

Para a determinação do número de camadas, n_{cam} , que compõe o enrolamento, faz-se necessário, inicialmente, especificar que porção da altura do núcleo, h_n , em mm, será reservada para alojar as espiras do enrolamento. Sabendo-se que uma separação y_d , em mm, deverá existir entre o enrolamento e o núcleo, conforme indica a figura 3.9, a altura máxima do enrolamento, l_e , em mm, deverá ser dada por:

$$l_e = h_n - 2y_d$$

Assim, as N espiras que compõem o enrolamento estarão acomodadas em um certo número de camadas, n_{cam} , dado por:

$$n_{cam} = \frac{Nl_b}{l_e},$$

enquanto o número de bobinas, n_{bob} , que compõe o reator, será obtido através da relação:

$$n_{bob} = \frac{N}{n_{cam}}$$

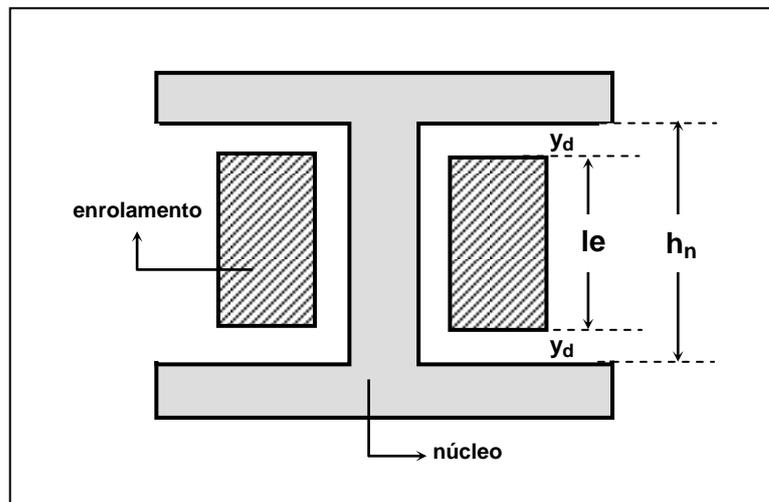


Figura 3.9 – Especificação da altura máxima dos enrolamentos do

Caso resultados fracionários sejam obtidos, quando do cálculo das grandezas n_{cam} e n_{bob} , estes deverão ser aproximados para o inteiro imediatamente superior. O último parâmetro a ser especificado é o número de condutores por camada, N_{cond} , estabelecido pela expressão:

$$N_{cond} = n_{cond} \cdot n_{bob}$$

Um diagrama exibindo toda a arquitetura a ser verificada em cada enrolamento do reator está indicado na figura 3.10.

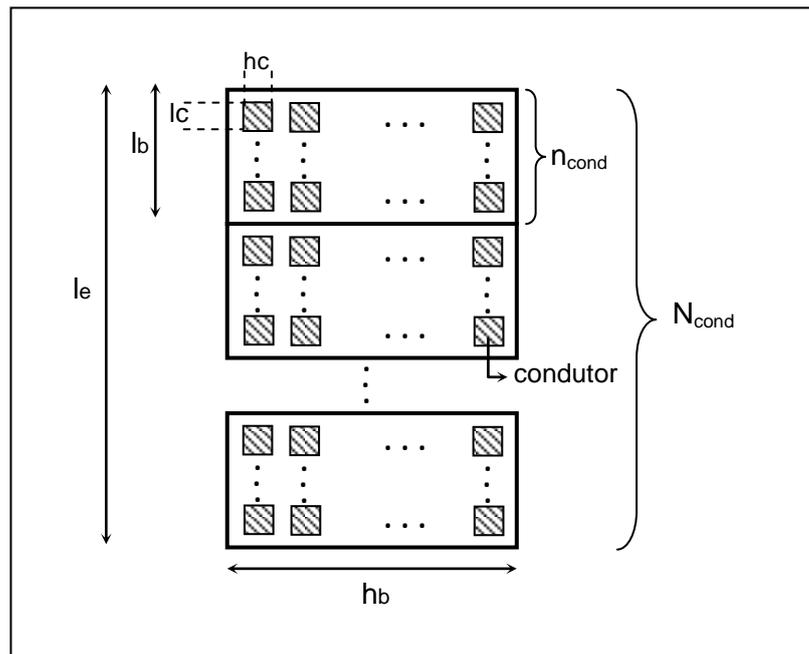


Figura 3.10 – Arquitetura de cada um dos enrolamentos do reator, com especificação de todas as grandezas envolvidas no

3.2.1.3 – Estrutura Magnética Adotada

Os dois modelos de reator com saturação natural e ligação paralela dos enrolamentos, analisados no presente trabalho, reúnem estruturas magnéticas em unidades individuais trifásicas, compostas por três núcleos, conforme indica a figura 3.11. Em cada uma dessas unidades, verifica-se a ocorrência de um único núcleo saturado por vez. Colunas adicionais, constituindo as chamadas trajetórias de retorno, fazem parte da estrutura magnética selecionada para o reator, e que, juntamente com as travessas, oferecerão ao fluxo magnético um caminho de baixa relutância, sob qualquer condição de operação, de tal forma a assegurar a independência entre os três núcleos da unidade. Para tanto, as travessas e trajetórias de retorno deverão ser dimensionadas para conduzir a máxima intensidade de fluxo magnético, sem jamais atingir a saturação, assegurando que o estado dos dois núcleos não saturados da unidade não seja comprometido.

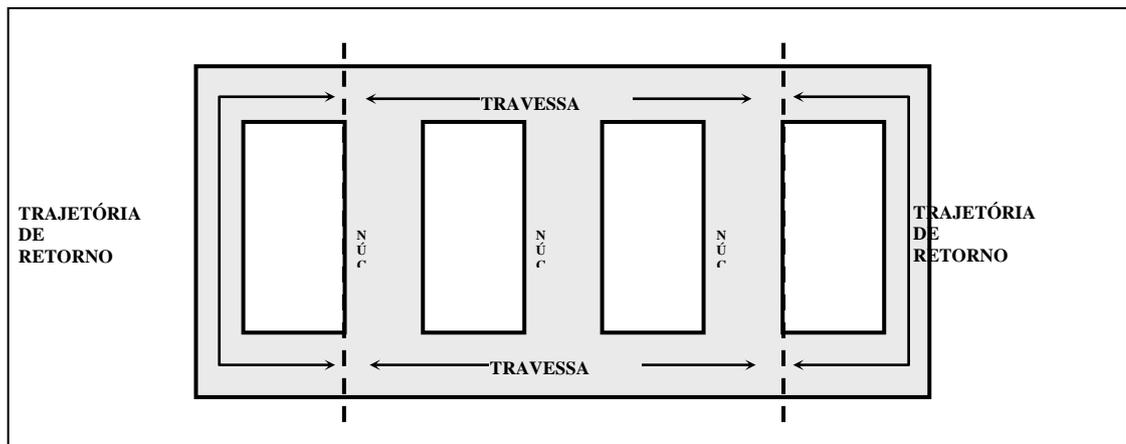


Figura 3.11 – Estrutura magnética adotada para cada uma das unidades que compõem o reator saturado naturalmente com ligação paralela dos enrolamentos

A máxima indução magnética, B_s , imposta a núcleos de secção transversal A dependerá do tipo de material ferromagnético adotado na construção dos mesmos. No atual projeto, optou-se por chapas de grãos orientados RGM1H, de 0,30 mm de espessura e densidade volumétrica de $7,65 \text{ g/cm}^3$, da Kawasaki Steel Corporation. Geralmente, o estado de saturação dos materiais ferromagnéticos de grãos orientados é alcançado para induções magnéticas iguais ou superiores a 1,60T. As pesquisas desenvolvidas ao longo dos anos, na área de reatores saturados naturalmente, revelam, para os núcleos, induções de trabalho superiores a 1,90T. Nos demais componentes do circuito magnético, a densidade $B'=1,50\text{T}$ não deverá ser ultrapassada, o que garantirá a operação não saturada dos materiais de grãos orientados (Say, 1976). Portanto, as secções transversais de cada travessa (A_{travessa}) e de cada trajetória de retorno (A_{retorno}) poderão ser obtidas a partir das seguintes relações:

$$A_{\text{travessa}} = \frac{B_s A}{B'}$$

$$A_{\text{retorno}} = \frac{A_{\text{travessa}}}{2},$$

Como apenas um núcleo satura por vez em cada unidade e sendo as travessas e trajetórias de retorno projetadas para oferecerem um caminho de baixa relutância ao fluxo magnético, praticamente toda a FMM gerada pelo núcleo saturado será absorvida pela relutância do mesmo, de tal forma que o comprimento do circuito magnético se resumirá,

diante da situação exposta, à altura h_n do núcleo. Portanto, para a modelagem proposta para o reator saturado, a Lei de Ampère, que relaciona a força magnetomotriz, FMM, com a intensidade de campo magnético, H, será dada por:

$$FMM = H \cdot h_n$$

(3.18)

O cálculo das perdas no ferro será efetuado a partir da curva correspondente ao material empregado na construção do circuito magnético, fornecida pelo fabricante e apresentada no Anexo I, a qual indica a perda por unidade de massa correspondente à máxima indução de trabalho imposta ao equipamento. Em cada unidade física, as perdas no ferro englobarão, basicamente:

- A perda em cada núcleo, $P_{NÚCLEO}$:

$$P_{NÚCLEO} = p_n \rho_v V_n ;$$

- A perda em cada travessa, $P_{TRAVESSA}$:

$$P_{TRAVESSA} = p \rho_v V_t ;$$

- A perda em cada trajetória de retorno, $P_{RETORNO}$:

$$P_{RETORNO} = p \rho_v V_r ,$$

onde p_n é a perda por unidade de massa correspondente à máxima indução de trabalho imposta ao núcleo; p é a perda por unidade de massa correspondente à máxima densidade de fluxo na travessa e na trajetória de retorno; V_n , V_t e V_r são, respectivamente, os volumes do núcleo, da travessa e da trajetória de retorno, enquanto ρ_v corresponde à densidade volumétrica do material ferromagnético adotado.

Portanto, para a estrutura magnética indicada na figura 3.11, as perdas totais no ferro, $P_{TOTALIS}$, em W, em cada unidade física individual que compõe o reator, serão dadas por:

$$P_{TOTALIS} = 3P_{NÚCLEO} + 2(P_{TRAVESSA} + P_{RETORNO})$$

3.2.2 – O MODELO ELÉTRICO EQUIVALENTE DO REATOR SATURADO

3.2.2.1 – Reatância de Dispersão dos Enrolamentos

O circuito elétrico equivalente do reator saturado deverá ser capaz de representar os núcleos do mesmo, tanto sob condições de saturação profunda, quanto no estado não saturado. As expressões aqui adotadas, para cálculo da reatância de dispersão dos enrolamentos de tal equipamento, constam no trabalho de Magnata da Fonte (1997), o qual tem suas bases nos estudos de representação do reator saturado através do circuito T equivalente do transformador, desenvolvidos por Carvalho Júnior (1983).

Os dois modelos de reatores saturados, com ligação paralela dos enrolamentos, alvos do presente estudo, contêm núcleos envolvidos por dois enrolamentos, como aqueles numerados por I, II e III na figura 2.4a e por três enrolamentos, como todos os demais indicados nas figura 2.3a e 2.4a. As dimensões físicas obtidas nos itens anteriores, bem como o número de enrolamentos em cada núcleo, determinarão os parâmetros elétricos do reator; portanto, um processo de cálculo diferenciado faz-se necessário para cada unidade física presente no equipamento.

a) Núcleos com Dois Enrolamentos

O arranjo com apenas dois enrolamentos está indicado na figura 3.12, juntamente com todas as dimensões necessárias ao cálculo da reatância de dispersão, obtidas nas seções anteriores. Similarmente aos transformadores convencionais, o enrolamento de baixa tensão, com N_3 espiras, ocupa a posição mais próxima ao núcleo, enquanto o enrolamento de alta tensão, com N_o espiras, ocupará a posição mais externa.

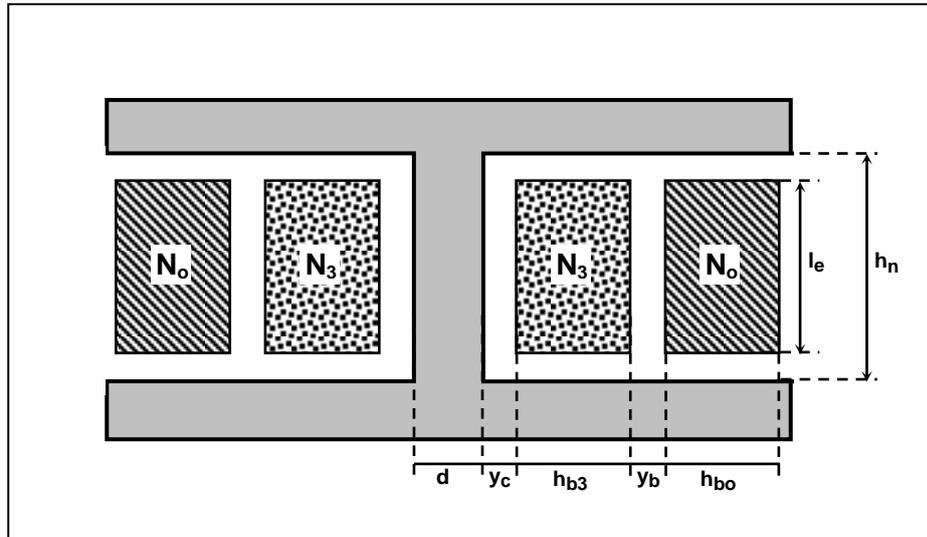


Figura 3.12 – Núcleo do reator saturado envolto por dois enrolamentos

Portanto, a reatância de dispersão, em ohms, de cada enrolamento corresponderá a:

- Enrolamentos com N_o espiras

$$X_o = \frac{2\pi^2 \mu_o f N_o^2}{h_1} \left[(D + 2b + 2b_1 + 2b_2) \frac{b_1}{3} + (D + 2b + 2b_2) \frac{b}{2} - \frac{b^2}{4} - \frac{b_1^2}{2} \right] \quad (3.19)$$

- Enrolamento com N_3 espiras

$$X_3 = \frac{2\pi^2 \mu_o f N_3^2}{h_2} \left[D \left(\frac{b}{2} + \frac{b_2}{3} \right) + b_2 \left(\frac{b_2}{2} + b \right) + \frac{b^2}{4} \right] \quad (3.20)$$

Onde:

$$\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$$

$$f = 60 \text{ Hz}$$

$$h_1 = h_n + 2h_{bo}$$

$$h_2 = h_n + 2h_{b3}$$

$$D = d + 2y_c$$

$$b = y_b$$

$$b_1 = h_{bo}$$

$$b_2 = h_{b3}$$

b) Núcleos com Três Enrolamentos

Neste arranjo, ilustrado na figura 3.13, o enrolamento de baixa tensão, com N_3 espiras, ocupa a posição mais interna, vizinha ao núcleo. Quanto aos enrolamentos de alta tensão, com N_1 e N_2 espiras, optou-se em posicionar o enrolamento com o maior número de espiras, N_1 , entre os outros dois, uma vez que a experiência adquirida nos estudos envolvendo reatores saturados mostrou que tal organização dos enrolamentos resulta em menores valores para as reatâncias de dispersão, bem como em menores dimensões para o equipamento.

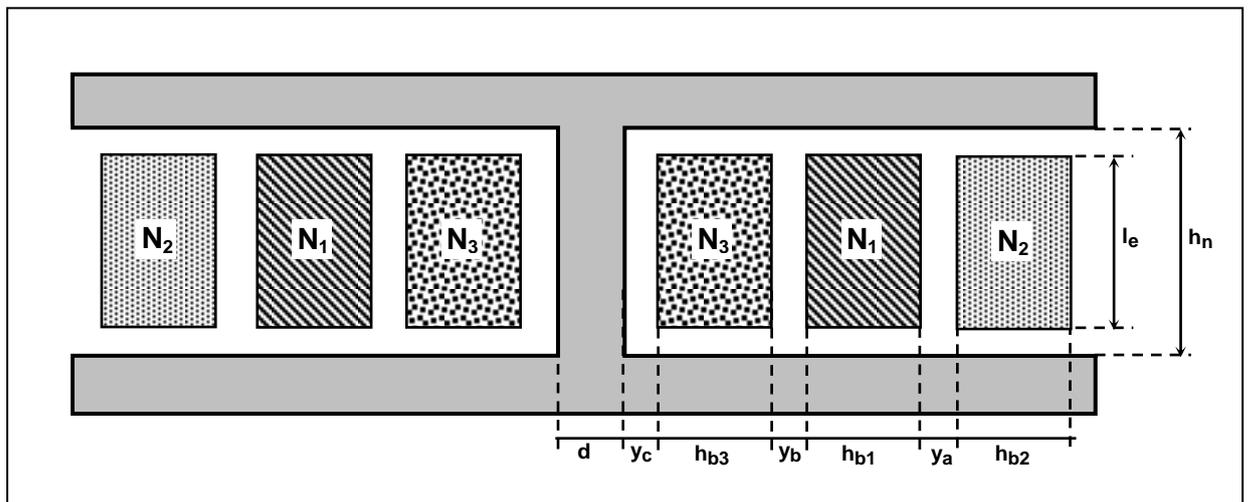


Figura 3.13 – Núcleo do reator saturado envolto por três enrolamentos

Para o arranjo indicado na figura 3.13, a reatância de dispersão associada aos enrolamentos com N_1 e N_3 espiras, tomando-se o primeiro deles como referência, segundo Magnata da Fonte (1997), será dada por:

$$X_{13} = \frac{2\pi^2 \mu_o f N_1^2}{h} \left[(D + 2b_2 + b) \left(b + \frac{b_1 + b_2}{3} \right) + \frac{b}{3} (b_1 - b_2) + \left(\frac{b_1^2 - b_2^2}{6} \right) \right] \quad (3.21)$$

Onde:

$$f = 60 \text{ Hz}$$

$$D = d + 2y_c$$

$$h = h_n + 2h_{b1}$$

$$b = y_b$$

$$b_1 = h_{b1}$$

$$b_2 = h_{b3}$$

A expressão (3.21) é válida também para o cálculo da reatância de dispersão X_{12} , associada aos enrolamentos com N_1 e N_2 espiras, ainda adotando-se, como referência, o enrolamento com N_1 espiras. Neste caso, os parâmetros da equação deverão ser substituídos por:

$$f = 60 \text{ Hz}$$

$$D = d + 2y_c + 2h_{b3} + 2y_b$$

$$h = h_n + 2h_{b1}$$

$$b = y_a$$

$$b_1 = h_{b2}$$

$$b_2 = h_{b1}$$

Similarmente, a reatância de dispersão X_{23} , associada aos enrolamentos com N_2 e N_3 espiras, considerando-se a mesma referência adotada nos casos anteriores, será dada pela equação (3.21), onde:

$$f = 60 \text{ Hz}$$

$$D = d + 2y_c$$

$$h = h_n + 2h_{b1}$$

$$b = h_{b1} + y_a + y_b$$

$$b_1 = h_{b2}$$

$$b_2 = h_{b3}$$

Finalizada a etapa de cálculo das reatâncias de dispersão associadas aos pares de enrolamentos, parte-se para a determinação das reatâncias individuais, X_1 , X_2 e X_3 , correspondentes aos enrolamentos com N_1 , N_2 e N_3 espiras, respectivamente, dadas pelas expressões a seguir.

$$X_1 = \frac{1}{2}(X_{12} + X_{13} - X_{23})$$

(3.22)

$$X_2 = \frac{1}{2}(X_{12} + X_{23} - X_{13})$$

(3.23)

$$X_3 = \frac{1}{2}(X_{13} + X_{23} - X_{12})$$

(3.24)

Como as reatâncias dadas pelas equações (3.23) e (3.24) estão referidas ao enrolamento com N_1 espiras, basta apenas transferi-las para os seus respectivos enrolamentos, através das relações (3.25) e (3.26), representadas a seguir:

$$X'_2 = X_2 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2$$

(3.25)

$$X'_3 = X_3 \left(\frac{N_3}{N_1} \right)^2$$

(3.26)

3.2.2.2 – Resistência dos Enrolamentos

A resistência ôhmica, R_{CA} , de um enrolamento submetido a uma corrente alternada, relaciona-se diretamente com o valor dessa mesma grandeza em corrente contínua, R_{CC} , através da equação (3.27).

$$R_{CA} = k R_{CC}$$

(3.27)

O parâmetro R_{CC} é dado pela relação:

$$R_{CC} = \frac{\rho l}{A},$$

(3.28)

onde, para o caso dos reatores saturados, em que enrolamentos como aquele indicado na figura 3.14 são adotados, $l = N\pi(D + h_b)$ corresponde ao comprimento médio do enrolamento composto por N espiras, para as dimensões registradas na figura referida. O parâmetro A, por sua vez, corresponde à secção do enrolamento, composto por um feixe de n_{cond} condutores de secção S:

$$A = n_{\text{cond}} \cdot S$$

Portanto, a expressão para a resistência do enrolamento à corrente contínua resultará na equação (3.29), onde $\rho = 0,0216 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$ corresponde à resistividade do cobre a 75°C (Say, 1976).

$$R_{\text{CC}} = \rho \frac{N\pi(D + h_b)}{n_{\text{cond}} \cdot S}$$

(3.29)

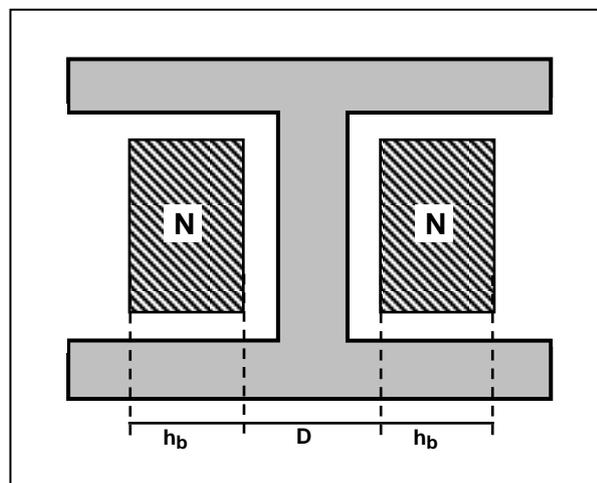


Figura 3.14 – Núcleo envolto por um enrolamento concêntrico de N espiras

O fator k, mencionado na equação (3.27), poderá ser calculado a partir da equação (3.30), sugerida por Magnata da Fonte (1997), adotando-se os mesmos parâmetros analisados no tópico (b) da seção 3.2.1.2 e indicados na figura 3.10.

$$k = 1 + \left(\frac{4\pi^2 \cdot f \cdot N_{\text{cond}} \cdot l_c \cdot h_c}{(l_e + 2h_b) \cdot 10^7 \cdot \rho} \right)^2 \cdot \left(\frac{n_{\text{cam}}^2 - 0,2}{9} \right)$$

(3.30)

O cálculo da resistência ôhmica, de cada enrolamento do reator, através das equações (3.27) a (3.28), será apresentado nos itens a seguir.

a) Enrolamento com N_o Espiras

Os dados a serem fornecidos às equações (3.29) e (3.30), para o cálculo da resistência ôhmica do enrolamento com N_o espiras, estão listados abaixo, tomando-se as dimensões apresentadas na figura 3.12:

$$N = N_o$$

$$D = d + 2y_c + 2h_{b3} + 2y_b$$

$$hb = h_{bo}$$

$$n_{\text{cond}} = n_{\text{condo}}$$

$$S = S_o$$

$$N_{\text{cond}} = N_{\text{condo}}$$

$$l_c = l_{co}$$

$$h_c = h_{co}$$

$$n_{\text{cam}} = n_{\text{camo}}$$

O que resulta em:

$$R_{CAo} = k_o R_{CCo}$$

$$R_{CCo} = \rho \frac{N_o \pi (d + 2y_c + 2h_{b3} + 2y_b + h_{bo})}{n_{\text{condo}} \cdot S_o}$$

$$k_o = 1 + \left(\frac{4\pi^2 \cdot f \cdot N_{\text{condo}} \cdot l_{co} \cdot h_{co}}{(l_e + 2h_{bo}) \cdot 10^7 \cdot \rho} \right)^2 \cdot \left(\frac{n_{\text{camo}}^2 - 0,2}{9} \right)$$

b) Enrolamento com N_1 Espiras

Com base na figura 3.13, as informações a serem fornecidas às expressões para cálculo da resistência ôhmica do enrolamento com N_1 espiras são:

$$N = N_1$$

$$D = d + 2y_c + 2h_{b3} + 2y_b$$

$$hb = h_{b1}$$

$$n_{cond} = n_{cond1}$$

$$S = S_1$$

$$N_{cond} = N_{cond1}$$

$$l_c = l_{c1}$$

$$h_c = h_{c1}$$

$$n_{cam} = n_{cam1}$$

Portanto,

$$R_{CA1} = k_1 R_{CC1}$$

$$R_{CC1} = \rho \frac{N_1 \pi (d + 2y_c + 2h_{b3} + 2y_b + h_{b1})}{n_{cond1} \cdot S_1}$$

$$k_1 = 1 + \left(\frac{4\pi^2 \cdot f \cdot N_{cond1} \cdot l_{c1} \cdot h_{c1}}{(l_e + 2h_{b1}) \cdot 10^7 \cdot \rho} \right)^2 \cdot \left(\frac{n_{cam1}^2 - 0,2}{9} \right)$$

c) Enrolamento com N_2 Espiras

As grandezas correspondentes ao enrolamento com N_2 espiras, necessárias ao cálculo da reatância ôhmica do mesmo, estão indicadas a seguir, sendo as dimensões obtidas a partir da figura 3.13:

$$N = N_2$$

$$D = d + 2y_c + 2h_{b3} + 2y_b + 2h_{b1} + 2y_a$$

$$hb = h_{b2}$$

$$n_{cond} = n_{cond2}$$

$$S = S_2$$

$$N_{\text{cond}} = N_{\text{cond}2}$$

$$l_c = l_{c2}$$

$$h_c = h_{c2}$$

$$n_{\text{cam}} = n_{\text{cam}2}$$

O que corresponderá a:

$$R_{\text{CA}2} = k_2 R_{\text{CC}2}$$

$$R_{\text{CC}2} = \rho \frac{N_2 \pi (d + 2y_c + 2h_{b3} + 2y_b + 2h_{b1} + 2y_a + h_{b2})}{n_{\text{cond}2} \cdot S_2}$$

$$k_2 = 1 + \left(\frac{4\pi^2 \cdot f \cdot N_{\text{cond}2} \cdot l_{c2} \cdot h_{c2}}{(l_c + 2h_{b2}) \cdot 10^7 \cdot \rho} \right)^2 \cdot \left(\frac{n_{\text{cam}2}^2 - 0,2}{9} \right)$$

d) Enrolamento com N_3 Espiras

Ainda com o auxílio da figura 3.12, os parâmetros necessários ao cálculo da resistência ôhmica do enrolamento com N_3 espiras estão indicados a seguir:

$$N = N_3$$

$$D = d + 2y_c$$

$$hb = h_{b3}$$

$$n_{\text{cond}} = n_{\text{cond}3}$$

$$S = S_3$$

$$N_{\text{cond}} = N_{\text{cond}3}$$

$$l_c = l_{c3}$$

$$h_c = h_{c3}$$

$$n_{\text{cam}} = n_{\text{cam}3}$$

Logo,

$$R_{\text{CA}3} = k_3 R_{\text{CC}3}$$

$$R_{CC3} = \rho \frac{N_3 \pi (d + 2y_c + h_{b3})}{n_{cond3} \cdot S_3}$$

$$k_3 = 1 + \left(\frac{4\pi^2 \cdot f \cdot N_{cond3} \cdot l_{c3} \cdot h_{c3}}{(l_e + 2h_{b3}) \cdot 10^7 \cdot \rho} \right)^2 \cdot \left(\frac{n_{cam3}^2 - 0,2}{9} \right)$$

3.3 – O MODELO DIGITAL PARA O REATOR SATURADO

Cada núcleo do reator saturado será representado, computacionalmente, pelo modelo de transformador monofásico de múltiplos enrolamentos disponível no programa ATP e denominado “Saturable Transformer Component”. Para a modelagem dos núcleos I, II e III do reator de nove núcleos da figura 2.4a, serão adotados transformadores monofásicos de dois enrolamentos, como aquele indicado na figura 3.15a; os demais núcleos, tanto do reator de seis quanto de nove núcleos, serão representados por transformadores de três enrolamentos, no padrão daquele representado na figura 3.15b.

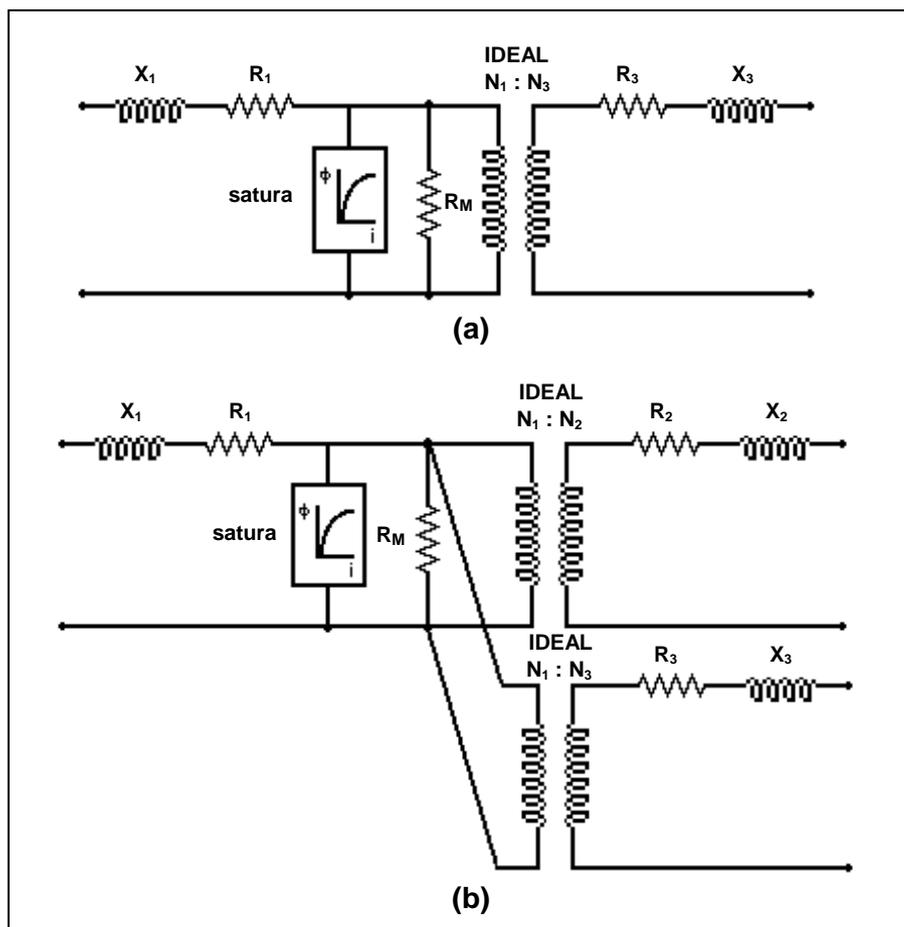


Figura 3.15 – Transformadores monofásicos saturáveis de múltiplos enrolamentos disponíveis no programa ATP:

- (a) Modelo com dois enrolamentos
- (b) Modelo com três enrolamentos

As informações relacionadas ao reator saturado, solicitadas pelo programa ATP, são:

- A resistência ôhmica, a reatância de dispersão e o número de espiras de cada enrolamento presente no núcleo;
- A curva de magnetização do material ferromagnético adotado para os núcleos (fluxo magnético ϕ em função da corrente de excitação i).

Todos os parâmetros acima mencionados já foram determinados nas seções passadas, exceto a

B (T)	H (A.m)
2,000E-02	1,00E+00
6,000E-02	2,00E+00
1,000E-01	3,00E+00
1,600E-01	4,00E+00
3,000E-01	6,00E+00
5,000E-01	8,00E+00
7,600E-01	1,00E+01
1,440E+00	2,00E+01
1,600E+00	3,00E+01
1,660E+00	4,20E+01
1,710E+00	6,00E+01
1,740E+00	8,00E+01
1,760E+00	1,00E+02
1,820E+00	2,00E+02
1,860E+00	4,00E+02
1,880E+00	6,00E+02
1,900E+00	8,00E+02
1,910E+00	9,00E+02
1,960E+00	2,00E+03
1,980E+00	4,00E+03
1,983E+00	6,00E+03
1,986E+00	8,00E+03
1,989E+00	1,00E+04
1,990E+00	1,06E+04
2,000E+00	1,70E+04
2,100E+00	8,40E+04
2,200E+00	1,51E+05
3,000E+00	8,21E+05

Tabela 3.4 – Característica de magnetização correspondente ao material ferromagnético adotado na modelagem dos núcleos do reator saturado

característica $\phi \times i$ do ferro. Esta poderá ser derivada diretamente da curva B-H do material selecionado, indicada no Anexo II e na tabela 3.4, correspondente às chapas de grãos orientados de 0,30 mm de espessura, fornecidas pela Kawasaki Steel Corporation.

Partindo-se dos valores listados na tabela 3.4, a curva B-H do material poderá ser convertida na curva ϕ -i, por intermédio de duas operações simples:

- O fluxo magnético ϕ , em Wb, será obtido através da multiplicação da indução magnética B, em T, pela secção transversal A do núcleo, em m², e pelo número de espiras, N, do enrolamento de excitação;

$$\phi = NBA$$

- A corrente de excitação será calculada de acordo com a Lei de Ampère, em função da intensidade de campo magnético H, em A.m, do número de espiras do enrolamento de excitação, N, além do caminho magnético, em m, o qual corresponde à altura do núcleo, h_n , conforme descrito no tópico 3.2.1.3.

$$i = \frac{H \cdot h_n}{N}$$

Para os núcleos I, II e III do reator de nove núcleos (figura 2.4a), a excitação provém dos enrolamentos com N_0 espiras; os demais núcleos, indicados nas figuras 2.3a e 2.4a, são excitados pelo enrolamento com N_1 espiras.

CAPÍTULO 4

ANÁLISE DE DESEMPENHO DO REATOR SATURADO ATRAVÉS DE SIMULAÇÕES DIGITAIS

4.1 – INTRODUÇÃO

A maioria das publicações disponíveis, analisando a modelagem paralela de reator, correspondem àquelas em que o consumo de potência reativa por parte do equipamento é controlado por corrente contínua. O capítulo atual também se propõe a apresentar detalhes relativos ao comportamento do reator com ligação paralela dos enrolamentos, sendo, porém, os seus núcleos, saturados naturalmente e não mais por intermédio de um circuito de controle.

Existe um modelo específico de reator associado a cada valor B_s de indução magnética que inicia o processo de saturação dos núcleos que o compõem. Tomando-se o algoritmo de projeto apresentado no capítulo precedente, será examinada a relação existente entre B_s e as dimensões físicas correspondentes a tal equipamento. Paralelamente, as perdas no material ferromagnético utilizado serão também verificadas. É exatamente a avaliação conjunta dos parâmetros acima mencionados que permitirá a seleção do modelo

mais viável de reator a ser tomado como objeto de pesquisa no decorrer do presente trabalho.

Análises qualitativas do desempenho do reator serão também desenvolvidas, através de simulações no software ATP, assumindo-se que o equipamento permanece conectado a um barramento infinito durante todo o período de processamento digital. Através das saídas gráficas fornecidas pelo programa computacional, poderão ser observados os efeitos da conexão em delta dos enrolamentos secundários do reator sobre a geração de pulsos de corrente em cada unidade trifásica que constitui o modelo, bem como a contribuição de cada um destes pulsos na composição da corrente do reator propriamente dita.

4.2 – SELEÇÃO DO MODELO ÓTIMO DE REATOR

Diversas alternativas de projetos de reatores saturados naturalmente com ligação paralela dos enrolamentos, encerrando seis e nove núcleos, estão indicados, respectivamente, nas tabelas 4.1 e 4.2, a partir de valores variados de indução magnética de trabalho, B_s , adotados para os núcleos dos modelos. Em todos os casos apresentados, buscou-se garantir que os equipamentos consumissem uma potência reativa de 150MVAR, quando operando sob a condição de plena carga, o que corresponde a 1,05 pu, numa base de 500kV.

REATOR DE SEIS NÚCLEOS							
Parâmetros dos núcleos			Número de espiras dos enrolamentos			Valor eficaz da corrente consumida pelo reator	
B_s	Diâmetro (m)	Altura (m)	N_1	N_2	N_3	Operação em vazio (1,0 pu)	Operação em plena carga
(T)							

Tabela 4.1 – Opções de projeto do reator saturado de seis núcleos com ligação paralela dos

REATOR DE NOVE NÚCLEOS								
Parâmetros dos núcleos			Número de espiras dos enrolamentos				Valor eficaz da corrente consumida pelo reator (A)	
Bs (T)	Diâmetro (m)	Altura (m)	N ₀	N ₁	N ₂	N ₃	Operação em vazio (1,0 pu)	Operação em plena carga (1,05 pu)

Tabela 4.2 – Opções de projeto do reator saturado de nove núcleos com ligação paralela dos

Comparando-se os parâmetros listados correspondentes aos reatores de seis e nove núcleos, constata-se que quanto maior o número de núcleos presentes no equipamento, menores serão as dimensões físicas de cada unidade trifásica que compõe o mesmo. Verifica-se ainda que, independentemente do número de núcleos, o volume destes diminui com o aumento da indução magnética que lhes é imposta; para valores fixos de indução magnética, o aumento do diâmetro dos núcleos acarreta redução na altura dos mesmos e, conseqüentemente, do comprimento do caminho magnético, uma vez que estes são equivalentes na concepção de projeto adotada.

O modelo almejado de reator corresponderá àquele com dimensões físicas mínimas; isto poderá ser obtido através de valores de B_s os mais elevados possíveis. Por outro lado, faz-se necessária uma ponderação na escolha de tal grandeza, uma vez que a corrente consumida pelo reator, quando da sua operação em vazio, tende a crescer progressivamente com o aumento de B_s , o que acarretaria a inviabilidade do projeto se a mesma atingisse níveis exagerados. Valores correspondentes a até 10% da corrente de plena carga são aceitáveis e, de acordo com as opções oferecidas pelas tabelas 4.1 e 4.2, induções magnéticas de 1,991T para o reator de seis núcleos e de 1,990T para o de nove núcleos encaixam-se perfeitamente em todos os requisitos mencionados.

Um outro detalhe relevante corresponde à relação entre B_s e as perdas no material ferromagnético utilizado nos núcleos. Verifica-se que as perdas específicas P_n no núcleo, em W/kg, aumentam com B_s ; entretanto, o volume deste diminui sob as mesmas condições, o que acarreta a redução das perdas totais em W. Mais uma vez, portanto,

constata-se que valores elevados de B_s serão os mais favoráveis ao projeto de reator. Tais informação estão indicadas nas tabelas 4.3 e 4.4, para os modelos de seis e nove núcleos,

REATOR DE SEIS NÚCLEOS					
Bs (T)	NÚCLEO			REATOR (UNIDADE1 +UNIDADE 2)	
	Perdas específicas no ferro P_n (W/kg)	Volume (m^3)	Perdas no ferro (kW)	Perdas totais no ferro	
				(kW)	% da potência consumida em plena carga
1.960	2.93	7.20	161.16	2251.74	1.50

Tabela 4.3 – Variação das perdas no material ferromagnético em função da indução magnética adotada para os núcleos do reator de seis núcleos

respectivamente, tanto para cada núcleo individualmente analisado, como também para o reator completo, considerando-se todas as unidades trifásicas que o compõem.

REATOR DE NOVE NÚCLEOS					
Bs (T)	NÚCLEO			REATOR (UNIDADE1 +UNIDADE 2+UNIDADE 3)	
	Perdas específicas no ferro P_n (W/kg)	Volume (m^3)	Perdas no ferro (kW)	Perdas totais no ferro	
				(kW)	% da potência consumida em plena carga

Tabela 4.4 – Variação das perdas no material ferromagnético em função da indução magnética adotada para os núcleos do reator de nove núcleos

As perdas em W/kg listadas nas tabelas 4.3 e 4.4, correspondentes a cada valor de B_s adotado, foram obtidas a partir da curva de perdas associadas às chapas de grãos orientados RGM1H da Kawasaki Steel Corporation, indicada no anexo I. Tal material ferromagnético apresenta densidade volumétrica de $7,65g/cm^3$ e espessura de 0,30mm. Para valores de B_s superiores a 1,90T, as perdas específicas foram determinadas através da

extrapolação de pontos da curva. Vale ainda salientar que, conforme menção anterior, em todas as opções de modelagem de reator analisadas, foram adotadas, sempre, densidades de fluxo iguais a 1,50T nas travessas e trajetórias de retorno, uma vez que estas nunca deverão atingir a saturação.

A relação $N_3 \cong \alpha N_o$, estabelecida no capítulo 3 (item 3.2.1.1b), para cálculo do número de espiras dos enrolamentos secundários do reator, foi também investigada, com o intuito de se demonstrar os efeitos da alteração do coeficiente α sobre as dimensões físicas e desempenho do equipamento. Mantendo-se o parâmetro B_s constante, observou-se não haver qualquer variação significativa sobre a altura e diâmetro dos núcleos, nem sobre a potência consumida pelo reator, para valores fracionários de α . Desta forma, concluiu-se que a relação $N_3 \cong N_o/2$, adotada no presente trabalho, encerra uma estimativa perfeitamente aceitável para o algoritmo de projeto do reator saturado. Por outro lado, as dimensões do referido equipamento crescem de maneira diretamente proporcional aos valores inteiros de α .

Dentre todos aqueles projetos de reator apresentados previamente, um modelo com seis e outro com nove núcleos foram selecionados, cujos parâmetros acham-se realçados, respectivamente, nas tabelas 4.1 e 4.2. Tais equipamentos atendem aos seguintes requisitos:

- Dimensões físicas mínimas;
- Operação em vazio em 1,00 pu (base 500kV), durante a qual o consumo por parte do reator estará em torno de 10% da sua corrente de plena carga;
- Operação na condição de plena carga para um nível de tensão 5% superior àquela de vazio, onde se verificará um consumo de aproximadamente 165A (150MVA_r).

A tabela 4.5 apresenta o consumo de corrente por parte de ambos os reatores, para tensões de suprimento variando dentro da faixa de operação especificada para os mesmos.

REATOR DE SATURAÇÃO NATURAL COM LIGAÇÃO PARALELA DOS ENROLAMENTOS		
VALOR EFICAZ DA TENSÃO DE LINHA APLICADA AOS TERMINAIS DO REATOR (pu) Base: 500kV	VALOR EFICAZ DA CORRENTE DE ALIMENTAÇÃO DO REATOR (A)	
	Nº DE NÚCLEOS = 06	Nº DE NÚCLEOS = 09

Tabela 4.5 – Corrente consumida pelos reatores de seis e nove núcleos para tensões de suprimento variando entre 1,00 e 1,05 pu

Como pode ser observado, a característica V_{xl} satisfaz aos critérios preestabelecidos.

a) O Reator de Seis Núcleos

Tal modelo de reator reúne duas unidades trifásicas idênticas, cada uma delas contendo três núcleos. O esquema de conexões adotado é exatamente aquele da figura 2.3a, com enrolamentos primários conectados em estrela com neutro flutuante e enrolamentos secundários conectados em delta. As dimensões físicas, em metros, correspondentes a cada unidade física estão indicadas na figura 4.1

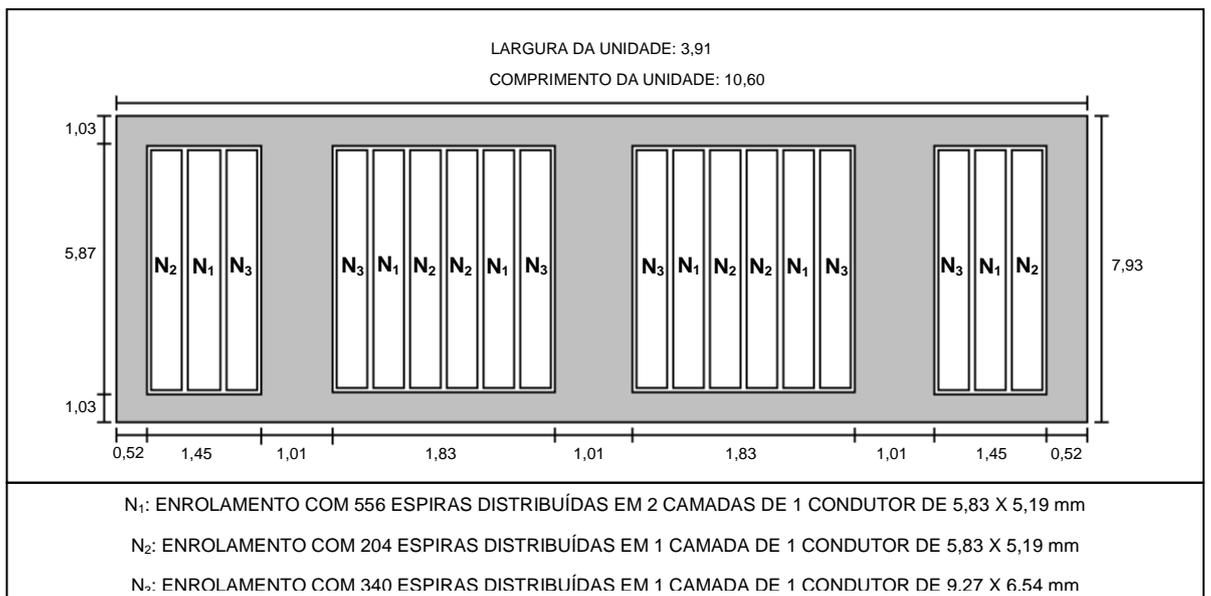


Figura 4.1 – Dimensões físicas (em metros) de cada unidade trifásica pertencente ao reator de seis núcleos

- Especificações do Modelo

Potência reativa consumida pelo reator em plena carga:	150MVA_r
Tensão de plena carga:	525kV
Material ferromagnético adotado:	RGM1H - 0,30mm (Kawasaki Steel Corporation)
Indução magnética nos núcleos:	1,991 T
Indução magnética nas travessas e trajetórias de retorno:	1,500 T
Número de unidades trifásicas que compõem o reator:	02
Número de núcleos por unidade trifásica:	03
Diâmetro dos núcleos:	1,009 m
Altura dos núcleos:	5,870 m
Peso do material ferromagnético em cada unidade trifásica:	295934,13 kg
Peso dos enrolamentos em cada unidade trifásica:	5612,27 kg
Peso total (cobre + ferro) de cada unidade trifásica:	301546,40 kg
Perdas no material ferromagnético de cada unidade trifásica:	543,53 kW

Perdas totais no material ferromagnético do reator (unidade 1 + unidade 2):	1087,05 kW
Perdas totais nos enrolamentos:	268,46 kW
Perdas totais no reator (ferro + cobre):	1355,51 kW
Valor percentual das perdas totais no reator (ferro + cobre) em função da potência reativa consumida em plena carga:	0,9%

- O Circuito Elétrico Equivalente:

Enrolamento N_1 com 556 espiras:

Reatância de dispersão: $-0,4985 \Omega$

Resistência ôhmica: $2,3357 \Omega$

Enrolamento N_2 com 204 espiras:

Reatância de dispersão: $8,2654 \Omega$

Resistência ôhmica: $1,2387 \Omega$

Enrolamento N_3 com 340 espiras:

Reatância de dispersão: $11,3334 \Omega$

Resistência ôhmica: $0,4836 \Omega$

b) O Reator de Nove Núcleos:

Constituído por três unidades trifásicas individuais, com três núcleos cada, sendo a unidade 1 fisicamente distinta das duas demais, o reator de nove núcleos apresenta o esquema de conexões indicado na figura 2.4a, estando os enrolamentos primários conectados em estrela com neutro flutuante, enquanto os enrolamentos secundários acham-se conectados em delta. As dimensões físicas, em metros, correspondentes à unidade 1 estão apresentadas na figura 4.2a. Já as unidades 2 e 3, idênticas entre si, possuirão as dimensões representadas na figura 4.2b.

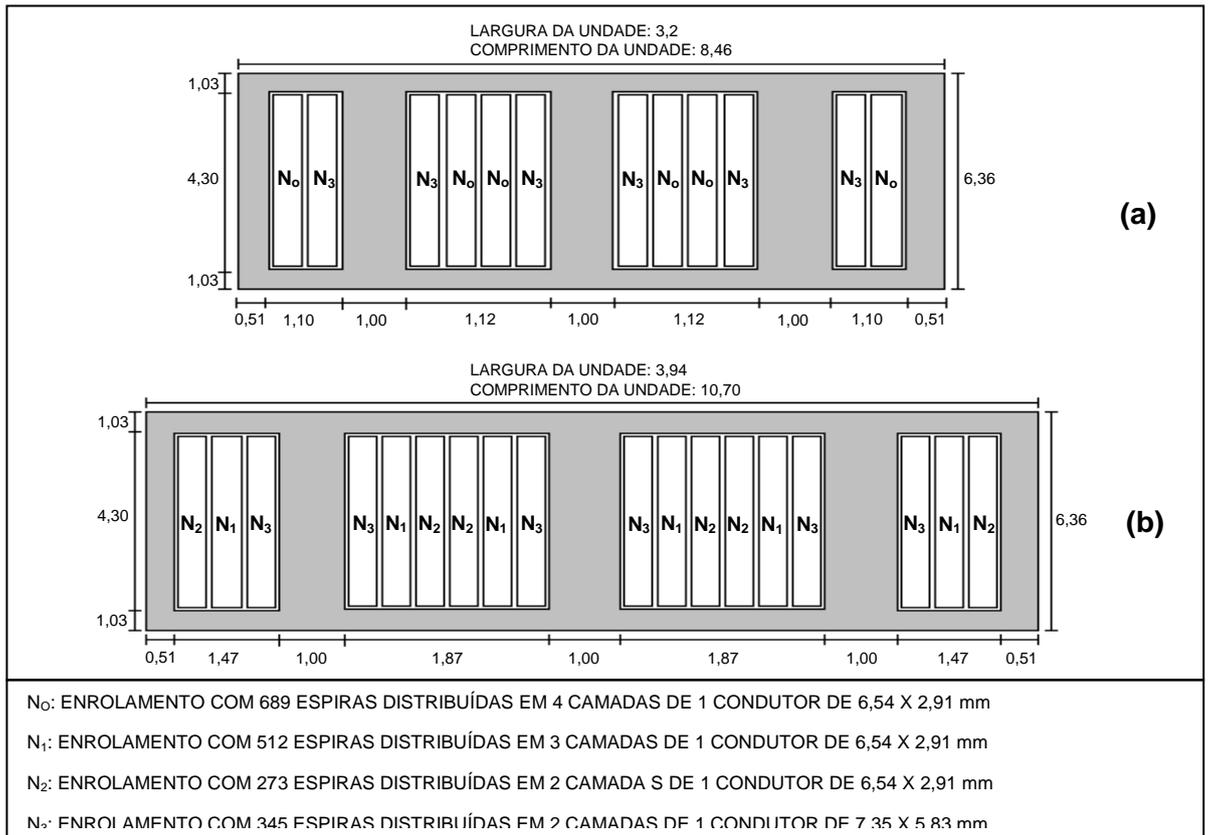


Figura 4.2 – Dimensões físicas (em metros) de cada unidade trifásica pertencente ao reator de nove núcleos:

- Especificações do Modelo

Potência reativa consumida pelo reator em plena carga:	150MVar
Tensão de plena carga:	500kV
Material ferromagnético adotado:	RGM1H - 0,30mm (Kawasaki Steel Corporation)
Indução magnética nos núcleos:	1,99 T
Indução magnética nas travessas e trajetórias de retorno:	1,50 T
Número de unidades trifásicas que compõem o reator:	03
Número de núcleos por unidade trifásica:	03
Diâmetro dos núcleos:	1,003 m
Altura dos núcleos:	4,300 m
Peso do material ferromagnético na unidade trifásica 1:	222311,30 kg
Peso do material ferromagnético na unidade trifásica 2:	247477,50 kg
Peso dos enrolamentos na unidade trifásica 1:	1083,45 kg

Peso dos enrolamentos na unidade trifásica 2:	3815,34 kg
Peso total (cobre + ferro) da unidade trifásica 1:	223394,75 kg
Peso total (cobre + ferro) da unidade trifásica 2:	251292,84 kg
Perdas no material ferromagnético da unidade trifásica 1:	401,24 kW
Perdas no material ferromagnético da unidade trifásica 2:	433,07 kW
Perdas totais no material ferromagnético do reator (unidade 1 + unidade 2 + unidade 3):	1267,37 kW
Perdas totais nos enrolamentos:	267,00 kW
Perdas totais no reator (ferro + cobre):	1534,37 kW
Valor percentual das perdas totais no reator (ferro + cobre) em função da potência reativa consumida em plena carga:	1,02%

- O Circuito Elétrico Equivalente:

Enrolamento N_0 com 689 espiras da unidade trifásica 1:	
Reatância de dispersão:	35,9041 Ω
Resistência ôhmica:	4,3937 Ω
Enrolamento N_3 com 345 espiras da unidade trifásica 1:	
Reatância de dispersão:	7,1540 Ω
Resistência ôhmica:	0,7397 Ω
Enrolamento N_1 com 512 espiras das unidades trifásicas 2 e 3:	
Reatância de dispersão:	-0,6945 Ω
Resistência ôhmica:	3,2446 Ω
Enrolamento N_2 com 273 espiras das unidades trifásicas 2 e3:	
Reatância de dispersão:	20,5453 Ω
Resistência ôhmica:	2,5133 Ω
Enrolamento N_3 com 345 espiras das unidades trifásicas 2 e 3:	
Reatância de dispersão:	16,2710 Ω
Resistência ôhmica:	0,7397 Ω

Como se pode observar, os dois modelos definitivos de reator apresentam grandes dimensões físicas. Obviamente, a pretensão básica do algoritmo de projeto utilizado seria a obtenção de um circuito elétrico equivalente para o reator, a partir de suas dimensões físicas, as quais, dentro das limitações do processo de cálculo, deveriam ser as menores possíveis. Por outro lado, em se tratando de um estudo específico, não incluído no acervo bibliográfico consultado, este modelo de reator saturado naturalmente com excitação paralela, exigiu um superdimensionamento de suas partes integrantes, tendo em conta o fato de seu desempenho ainda não ser totalmente previsível.

Assim, os modelos de reatores aqui projetados poderão ser otimizados, uma vez que a redução do volume de tais equipamentos depende de fatores construtivos diversos, como por exemplo, a seleção de condutores com secções ideais ao projeto, além da tecnologia de isolamento adotada.

c) Geração do Arquivo de Entrada para o Programa ATP

Nas figuras 4.3 e 4.4 estão indicados os esquemas de conexões dos dois reatores selecionados no tópico anterior, com seis e nove núcleos, respectivamente, exatamente como foram modelados no programa ATP. Todos os nós terminais presentes em cada um dos equipamentos receberam nomes específicos, procedimento exigido por tal software. A estrutura do arquivo de entrada para o ATP, visando a simulação de cada um dos modelos digitais, está listada no anexo III, para o caso com seis núcleos e no anexo IV, para o caso com nove núcleos. Em ambas as listagens, o reator é alimentado por uma fonte de tensão de 1,05 pu (condição de plena carga), numa base de 500kV.

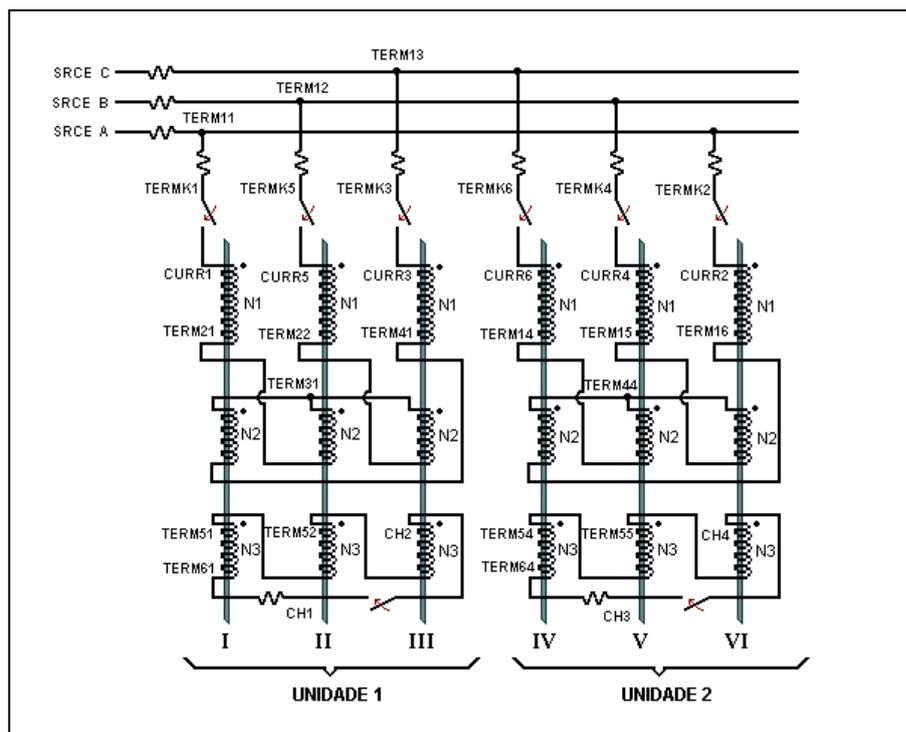


Figura 4.3 – Diagrama de conexões em paralelo do reator de seis núcleos, com todos os nós devidamente especificados para a modelagem no programa ATP

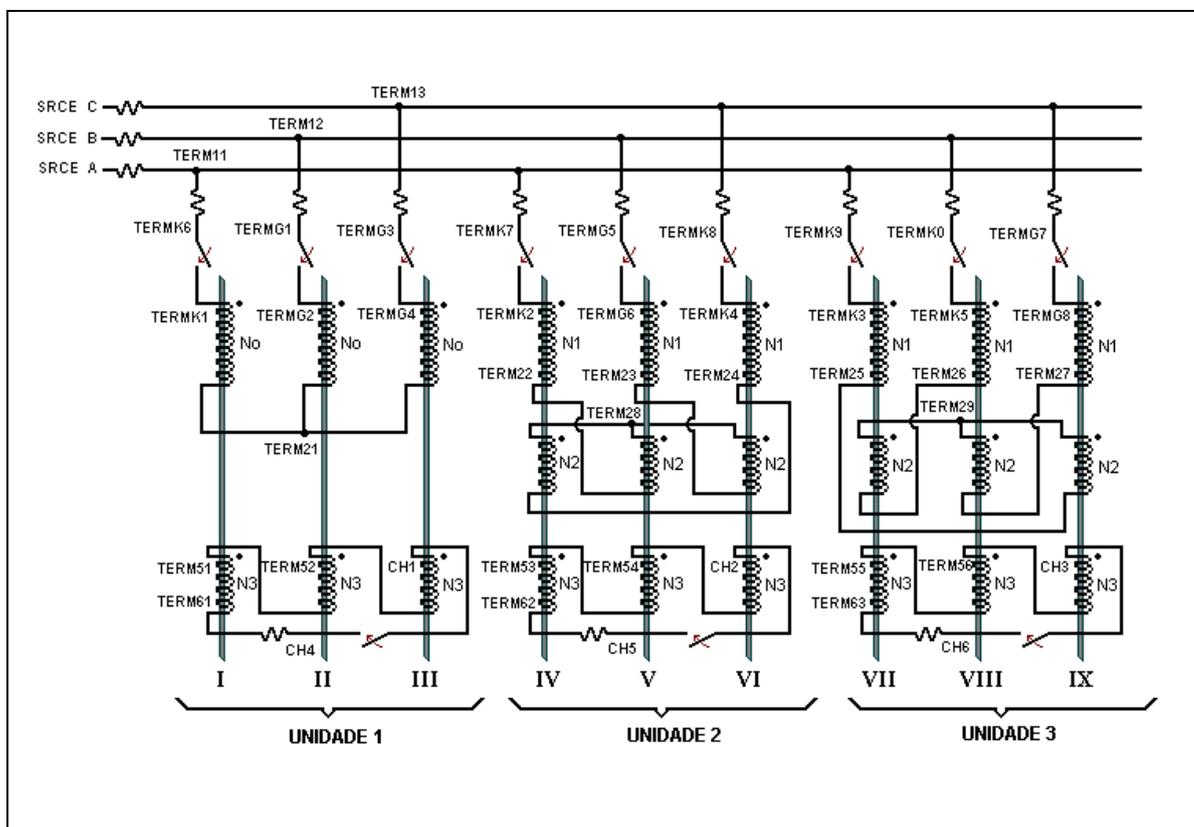


Figura 4.4 – Diagrama de conexões em paralelo do reator de nove núcleos, com todos os nós devidamente especificados para a modelagem no programa ATP

4.3 – A CONEXÃO EM DELTA DOS ENROLAMENTOS SECUNDÁRIOS DO REATOR

Durante o processo de seleção do modelo final de reator, a opção pela inserção de enrolamentos secundários conectados em delta em cada unidade trifásica do equipamento não foi arbitrária. É bem sabido que a finalidade básica destes enrolamentos em malha fechada, nos reatores saturados, é permitir a circulação dos harmônicos de terceira ordem. Entretanto, na modelagem paralela, analisada no presente trabalho, tal conexão também exerce influência sobre o comportamento do reator, levando os seus núcleos mais rapidamente à condição de saturação. Em outras palavras, se um reator é projetado para atender a certas especificações de operação com os enrolamentos secundários curto-circuitados, a abertura destes irá retirar, completamente, os núcleos da condição de saturação. Como consequência, aquele consumo de potência reativa, anteriormente verificado em decorrência da contribuição da conexão em delta, durante a operação do equipamento

sob tensão de plena carga, sofrerá uma redução brusca para um valor praticamente nulo. Um novo projeto de reator, com reajuste de todos os parâmetros físicos e elétricos do mesmo, seria, portanto, necessário. As tabelas 4.6 e 4.7 apresentam duas opções de modelagem para os reatores de seis e nove núcleos: com os enrolamentos secundários curto-circuitados (já detalhadamente abordada no tópico 4.2) e com os mesmos constituindo um circuito aberto. Como pode ser observado, para que os modelos com enrolamentos secundários em circuito aberto operem de acordo com as mesmas especificações daqueles com enrolamentos curto-circuitados, valores extremamente elevados de indução magnética de trabalho, B_s , se fazem necessários.

REATOR DE SEIS NÚCLEOS				
Conexão dos enrolamentos secundários de cada núcleo	B_s (T)	Diâmetro do núcleo	Altura do núcleo	Valor eficaz da corrente consumida pelo reator

Tabela 4.6 – Opções de modelagem de um reator contendo seis núcleos em função do tipo de conexão adotada para os seus enrolamentos secundários

REATOR DE NOVE NÚCLEOS				
Conexão dos enrolamentos secundários de cada núcleo	B_s (T)	Diâmetro do núcleo	Altura do núcleo	Valor eficaz da corrente consumida pelo reator

Tabela 4.7 – Opções de modelagem de um reator contendo nove núcleos em função do tipo de conexão adotada para os seus enrolamentos secundários

Por razões diversas, como, por exemplo, o aumento do nível de ruído em equipamentos operando sob condições de sobre-excitação (Ebert, 2000), valores exagerados de indução magnética não são comuns nos modelos de reatores saturados, apesar de constar, na literatura russa, pesquisas nas quais foram adotadas densidades de fluxo de até 2,2T (Vladislavlev et al., 1991).

Buscando interpretar o efeito da introdução da conexão em malha fechada dos enrolamentos secundários em cada unidade trifásica do reator, uma análise puramente qualitativa do comportamento de tal equipamento foi desenvolvida. As duas situações de operação foram consideradas: enrolamentos secundários em curto-circuito constituindo um delta e em circuito aberto. Ao longo de todo o estudo, foram adotados os dois modelos ótimos de reatores com seis e nove núcleos, selecionados no item 4.2, nos quais, originalmente, os secundários acham-se curto-circuitados e cujas especificações de projeto estão indicadas, respectivamente, nas tabelas 4.6 e 4.7. A questão anteriormente mencionada, a respeito da retirada dos núcleos da condição de saturação quando da

abertura dos enrolamentos secundários, foi contornada através do aumento do nível da tensão de alimentação aplicada aos terminais dos equipamentos, de tal forma que os seus núcleos atingissem novamente a saturação. Desta maneira, todas as conclusões aqui registradas foram decorrentes de situações distintas de operação impostas a um mesmo equipamento, uma vez que não foram efetuadas quaisquer alterações nos parâmetros físicos ou elétricos do mesmo.

4.3.1 – O REATOR DE SEIS NÚCLEOS

O diagrama de conexões apresentado na figura 4.3 foi adotado no desenvolvimento das simulações do modelo de reator contendo seis núcleos, no programa ATP. Na primeira delas, o estudo foi desenvolvido com as chaves situadas entre os terminais CH1 e CH2 e entre CH3 e CH4, na figura 4.3, abertas. Portanto, os enrolamentos secundários do reator corresponderam a um circuito aberto, não exercendo qualquer influência no desempenho do equipamento. Em seguida, o mesmo procedimento foi repetido, mantendo-se, durante todo o tempo de simulação, os enrolamentos secundários curto-circuitados, através do fechamento das chaves.

- Enrolamentos Secundários em Circuito Aberto

Como as duas unidades trifásicas que compõem o reator de seis núcleos são idênticas entre si, não havendo, portanto, quaisquer diferenças entre as características de desempenho de ambas, a unidade 1, composta pelos núcleos I, II e III, foi a primeira a ser examinada. Com os enrolamentos secundários do reator em circuito aberto, foram

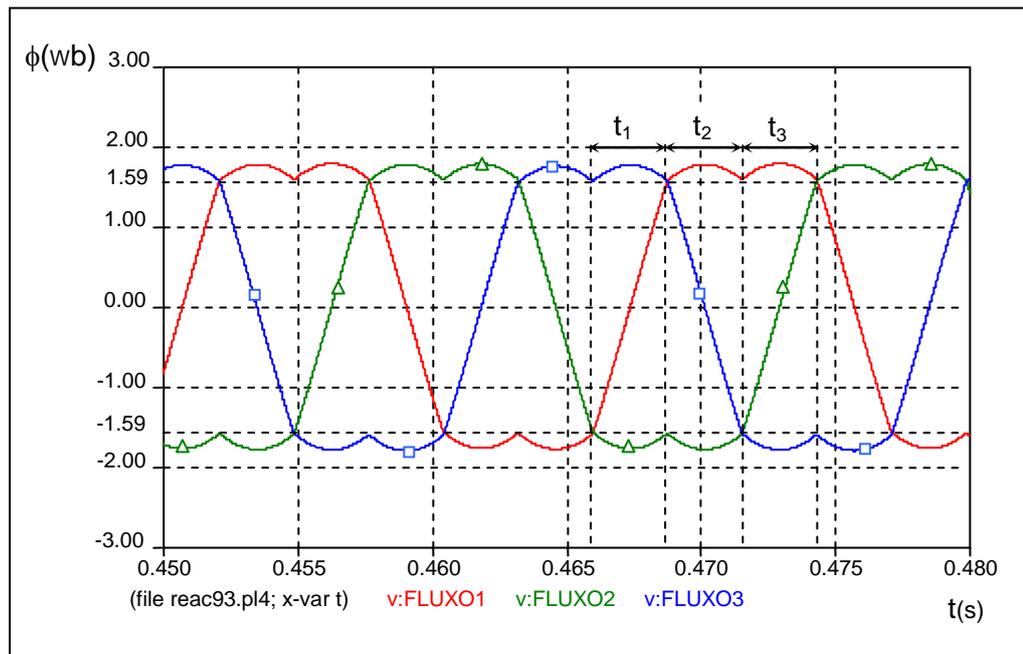


Figura 4.5 – Fluxos magnéticos na unidade 1 do reator saturado naturalmente com ligação paralela dos enrolamentos, composto por seis núcleos (delta aberto):

Fluxo magnético no núcleo I
 Fluxo magnético no núcleo II

inicialmente solicitados, como saídas do programa ATP, os fluxos magnéticos nos três núcleos da unidade em questão, os quais estão representados na figura 4.5. Como pode ser observado pela figura, na modelagem paralela, sem a influência da conexão em delta dos enrolamentos secundários, não são constatadas ondas de fluxo magnético senoidais, o que é um detalhe curioso, em comparação à modelagem série, na qual se verifica, sempre, fluxos magnéticos trapezoidais, com ou sem a presença do delta na estrutura.

Tomando-se os intervalos de tempo especificados como t_1 , t_2 e t_3 , na figura 4.5, observa-se um fenômeno típico da modelagem série: a permanência, em cada unidade física individual do reator, de dois núcleos simultaneamente saturados enquanto o terceiro mantém-se fora da condição de saturação. A tabela 4.8 associa o estado de operação de

cada núcleo da unidade 1 aos três intervalos de tempo acima mencionados. Também encontra-se registrado, na figura 4.5, o valor de fluxo magnético para o qual se inicia o processo de saturação de cada núcleo do modelo, ou seja, 1,59Wb, uma vez que adotou-se, para cada um dos seis núcleos do reator estudado, seções transversais de 0,80 m² e uma indução magnética de trabalho de 1,991T.

INTERVALO DE TEMPO (segundos)	NÚCLEOS OPERANDO NA CONDIÇÃO SATURADA	NÚCLEO FORA DA CONDIÇÃO DE SATURAÇÃO
$0,4659 \leq t_1 < 0,4687$	II e III	I
$0,4687 \leq t_2 < 0,4715$	I e II	III
$0,4715 \leq t_3 < 0,4743$	I e III	II

Tabela 4.8 – Condição de operação de cada núcleo da unidade trifásica 1 do reator de seis núcleos, dentro dos intervalos de tempo selecionados na figura 4.5

Cada semiciclo da onda de corrente em qualquer fase da unidade é composto por três pulsos individuais e de amplitudes diferenciadas. Com a aplicação de uma tensão de alimentação superior àquela que caracterizaria a operação do reator na condição de plena carga com a presença da conexão em delta, ou seja, superior a 1,05 pu, assegurou-se, em cada fase do equipamento, a geração de pulsos de corrente com duração de 60° ou $\pi/3$ radianos, como se esperaria idealmente. A figura 4.6 indica a forma de onda da corrente na fase A da unidade 1 do reator, solicitada entre os terminais TERMK1 e CURR1 do modelo. Também encontram-se representadas, nesta mesma ilustração, ondas ampliadas de fluxo magnético nos núcleos I e II, os quais apresentam enrolamentos primários conectados em série e alimentados diretamente pela fase A.

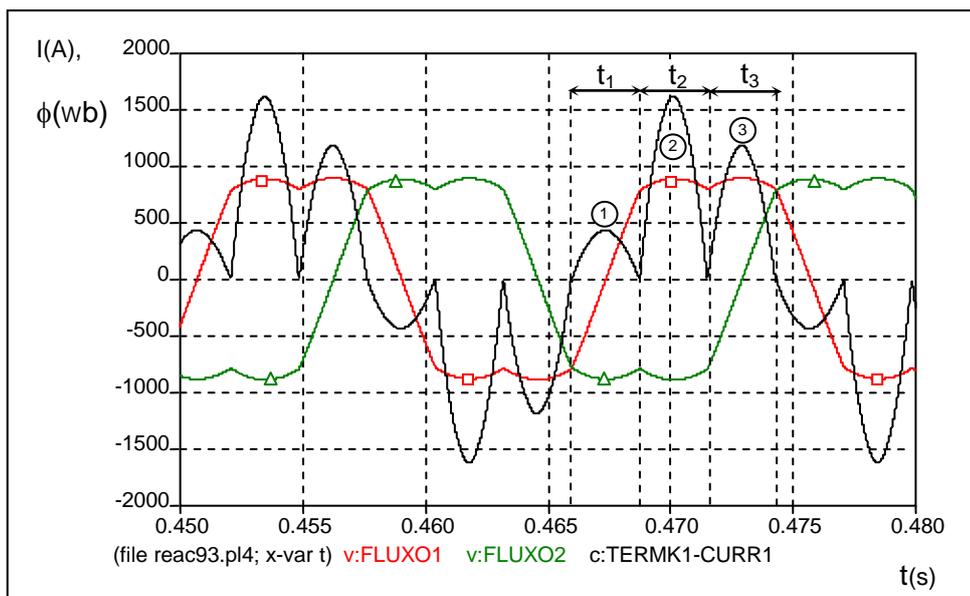


Figura 4.6 – Corrente e fluxos magnéticos na unidade 1 do reator saturado naturalmente com ligação paralela dos enrolamentos , composto por seis núcleos (delta aberto):

□ Corrente na fase A (fator de escala 1:1)

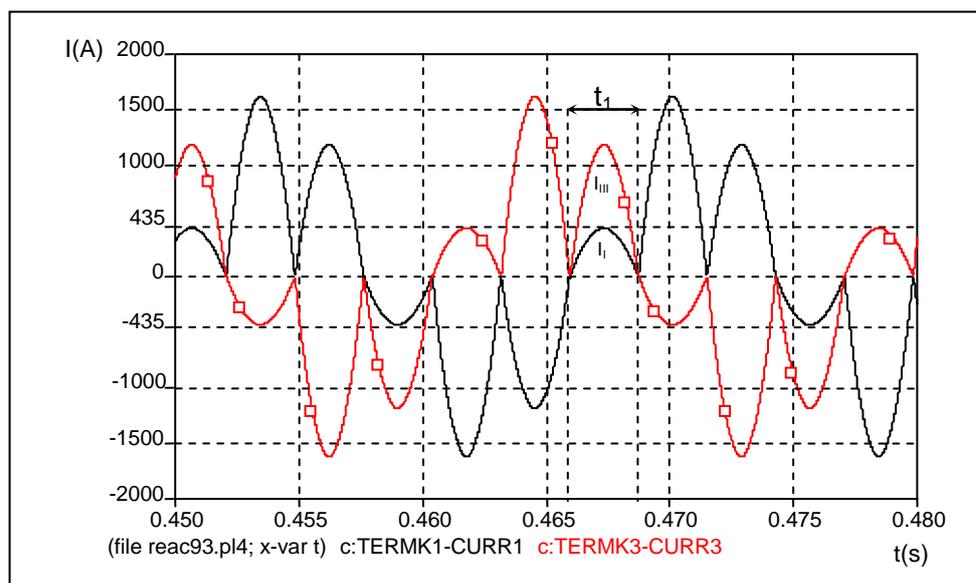


Figura 4.7 – Corrente na unidade 1 do reator saturado naturalmente com ligação paralela dos enrolamentos , composto por seis núcleos (delta aberto):

□ Corrente através do enrolamento primário com N_1 espiras do núcleo I

A superposição das três curvas apresentadas na figura 4.6 possibilita a observação dos detalhes referentes ao desempenho do reator. Os três pulsos de corrente selecionados para análise e numerados por (1), (2) e (3), apresentam larguras iguais a, respectivamente, t_1 , t_2 e t_3 , listados previamente na tabela 4.8. Quando da geração do

pulso (1), isto é, durante o intervalo de tempo t_1 , o núcleo I encontra-se fora da condição de saturação. Como na região não saturada da curva de magnetização a indutância é elevada, conclui-se que o pulso (1) na fase A provém da transferência de corrente da fase C do núcleo saturado III para o núcleo I, através do efeito de transformação entre os enrolamentos primários deste núcleo não saturado. Para se constatar tal fato, estão representadas, na figura 4.7, as formas de onda das correntes através dos enrolamentos primários que encerram N1 espiras, presentes nos núcleos I e III. Nela, o valor de pico da corrente no núcleo I, indicada por II, durante o intervalo de tempo t_1 , corresponde a N_2/N_1 vezes a corrente no núcleo III, IIII, onde, para o modelo de reator selecionado, N1 e N2 são iguais a, respectivamente, a 556 e 204 espiras, segundo registra a tabela 4.1.

Dando-se prosseguimento à análise da onda de corrente indicada na figura 4.6, verifica-se que a geração do pulso (2) será resultado da saturação simultânea dos núcleos I e II. Enquanto durar tal fenômeno (intervalo de tempo t_2), um caminho de mínima impedância será oferecido à corrente e, conseqüentemente, será o pulso (2) aquele de maior amplitude dentre os três considerados. Já no intervalo de tempo t_3 , o núcleo II será o único a se encontrar fora da condição de saturação, o que resultará na geração do pulso (3), cuja amplitude é inferior a do pulso (2), uma vez que, neste caso, a corrente encontrará um caminho de impedância superior àquele verificado ao longo do intervalo de tempo t_2 que o antecede.

Novas simulações, voltadas, agora, à unidade 2 do reator, revelaram que, nesta, a corrente na fase A apresenta-se composta por pulsos de amplitude e largura

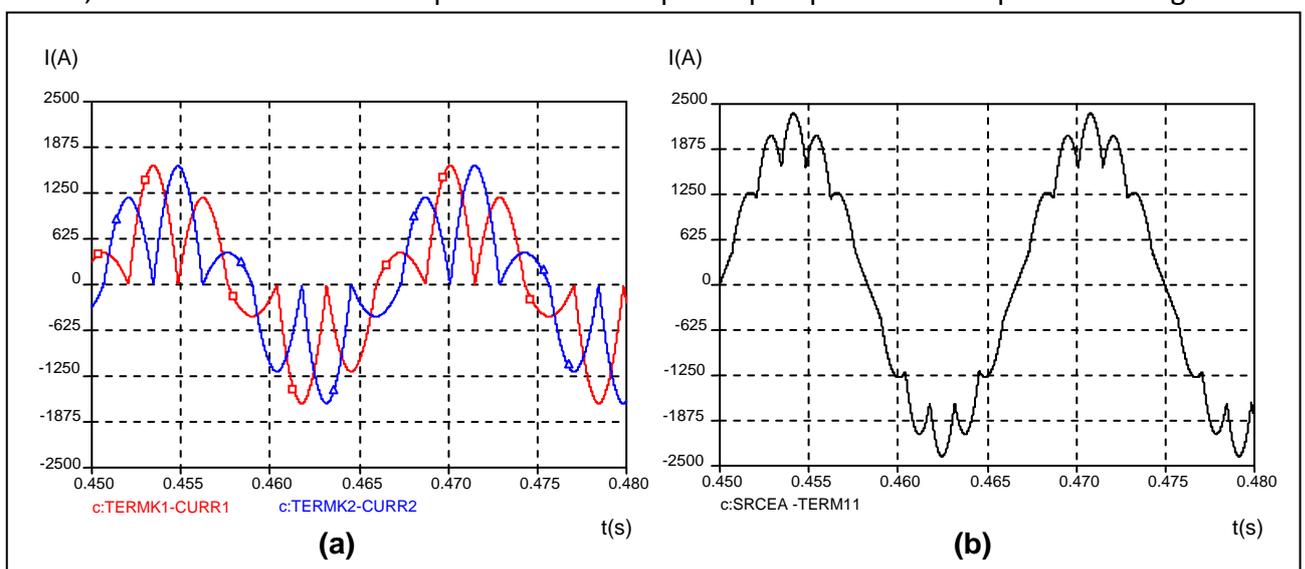


Figura 4.8 – Corrente na fase A do reator saturado com seis núcleos com delta aberto:

- c:TERMK1-CURR1
- △— Unidade trifásica 1, medida entre os terminais TERMK1 e CURR1 (núcleo I)

idênticas àquelas observadas na unidade 1, dispostos, porém, em posições simétricas, conforme indica a figura 4.8a. A adição das duas ondas apresentadas na figura 4.8a resultará na curva correspondente à corrente total do reator, indicada na figura 4.8b.

- Enrolamentos Secundários em Curto-Circuito

As simulações desenvolvidas no tópico anterior foram repetidas, estando, no presente caso, os enrolamentos secundários do reator conectados em delta fechado. Dando início a uma análise da unidade 1 do reator, solicitou-se, como saídas do programa ATP, os

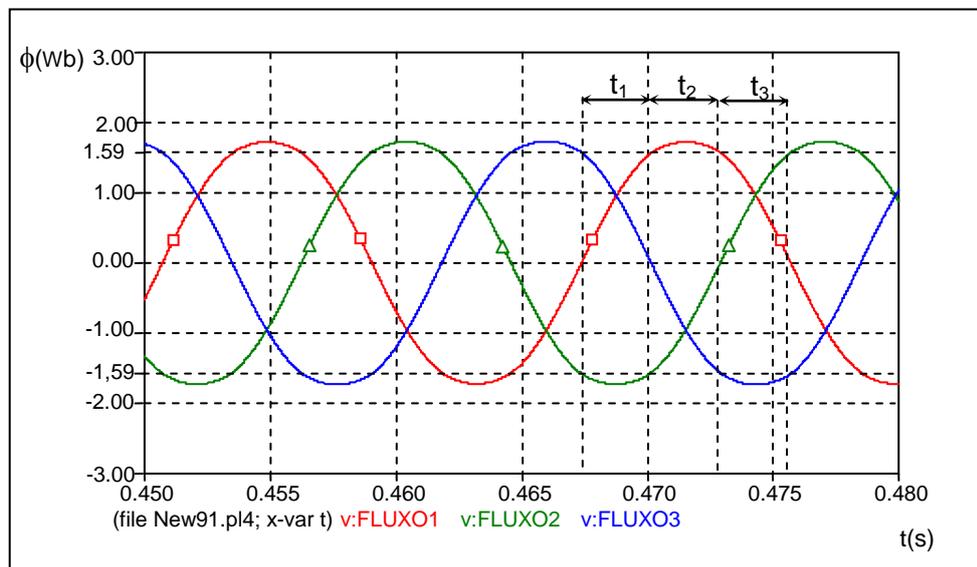


Figura 4.9 – Fluxos magnéticos na unidade 1 do reator saturado naturalmente com ligação paralela dos enrolamentos, composto por seis núcleos (delta fechado):

□ Fluxo magnético no núcleo I
 △ Fluxo magnético no núcleo II
 — Fluxo magnético no núcleo III

fluxos magnéticos presentes nos núcleos I, II e III do equipamento, apresentados na figura 4.9. Somente após a inserção de tal ligação em delta ao equipamento, constatou-se a presença de ondas de fluxo magnético perfeitamente senoidais em cada núcleo do reator. Novamente, se acha registrado, na figura 4.9, o valor de fluxo magnético para o qual se inicia o processo de saturação de cada núcleo do modelo estudado, o qual corresponde a 1,59Wb.

Um exame dos períodos de tempo t_1 , t_2 e t_3 , selecionados na figura 4.9, mostra que, a presença do delta fechado no modelo de reator altera o estado de saturação dos núcleos, fazendo com que, em cada unidade trifásica do equipamento, seja verificada a

ocorrência de dois núcleos não saturados e apenas um saturado por vez, durante um período de 60° elétricos. Desta forma, o balanceamento da tensão aplicada por fase será devido à saturação de um único núcleo e não mais de dois, como contatou-se no caso em que o delta foi mantido em circuito aberto. A tabela 4.9 associa o estado de operação de cada núcleo da unidade 1 do reator aos três intervalos de tempo acima mencionados.

INTERVALO DE TEMPO (segundos)	NÚCLEOS OPERANDO NA CONDIÇÃO SATURADA	NÚCLEO FORA DA CONDIÇÃO DE SATURAÇÃO
$0,4672 \leq t_1 < 0,4700$	II	I e III
$0,4700 \leq t_2 < 0,4728$	I	II e III
$0,4728 \leq t_3 < 0,4756$	III	I e II

Tabela 4.9 – Condição de operação de cada núcleo da unidade trifásica 1 do reator de seis núcleos, dentro dos intervalos de tempo selecionados na figura 4.9

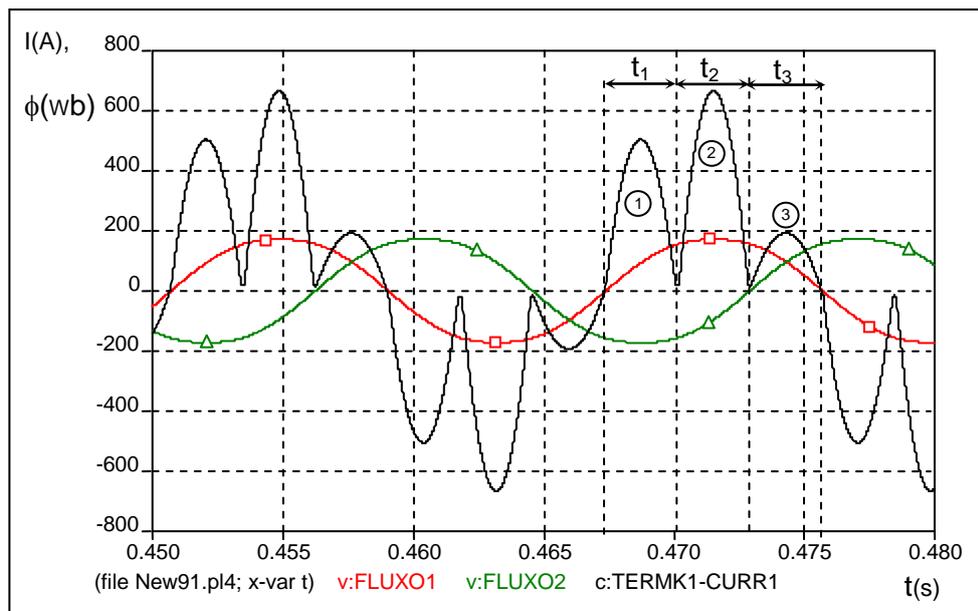


Figura 4.10 – Corrente e fluxos magnéticos na unidade 1 do reator saturado naturalmente com ligação paralela dos enrolamentos, composto por seis núcleos (delta fechado):

□ Corrente na fase A (fator de escala 1:1)

△

Está indicada, na figura 4.10, a forma de onda da corrente na fase A da unidade 1 do reator, solicitada entre os terminais TERMK1 e CURR1 do modelo. Também estão representadas, superpostas a esta, as ondas de fluxo magnético nos núcleos I e II, cujos enrolamentos primários encontram-se conectados em série e alimentados

diretamente pela fase A. Novamente, aplicou-se uma tensão de alimentação superior a 1,05 pu, visando garantir, em cada fase do equipamento, que cada um dos três pulsos gerados em cada semiciclo da onda de corrente apresentassem uma largura de 60° ou $\pi/3$ radianos, como esperado idealmente, tornando mais precisa a observação de tais saídas gráficas.

Os três pulsos de corrente selecionados para análise, cujas larguras estão indicadas por t_1 , t_2 e t_3 na tabela 4.9, encontram-se numerados na figura 4.10, por (1), (2) e (3), respectivamente. O fato de só haver um único núcleo saturado por vez, em cada unidade física do reator, faz com que os pulsos que compõem a corrente primária sejam originados essencialmente do efeito de transformação entre os enrolamentos do equipamento. Conforme pode ser observado, durante o intervalo de tempo t_1 , em que o pulso (1) é gerado, apenas o núcleo II encontra-se saturado. Pela análise do diagrama de conexões apresentado na figura 4.3, verifica-se que, estando o núcleo I fora de saturação, um caminho de elevada impedância, correspondente àquela do enrolamento de N_1 espiras do núcleo I, será oferecido à corrente primária. Portanto, o pulso de corrente gerado em t_1 terá sua amplitude determinada fundamentalmente pela transferência de corrente do delta para os enrolamentos primários do núcleo I, através do efeito de transformação.

Considerando-se, agora, o intervalo de tempo t_2 , caracterizado pela geração do pulso (2), observa-se que um caminho de mínima impedância, correspondente àquela do enrolamento de N_2 espiras do núcleo II, será oferecido à corrente, uma vez que apenas o núcleo I encontra-se em saturação. Durante tal período de tempo, também se dará a transferência de corrente do delta para o enrolamento primário de N_2 espiras do núcleo II, a qual também contribuirá para a formação do pulso (2). Uma vez que $N_2 < N_1$, o pulso (2) apresentará a maior amplitude dentre aqueles numerados na figura 4.10.

Finalmente, em t_3 , o núcleo III será o único a se encontrar dentro da condição saturada. Estando os núcleos I e II fora de saturação, a corrente na fase A, solicitada entre os terminais TERMK1 e CURR1 da unidade 1, encontrará um caminho de máxima impedância e só não será nula devido à transferência, através do efeito de transformação, da corrente da fase C do núcleo saturado III para o núcleo I, como também da corrente do delta para os enrolamentos primários dos núcleos I e II.

As simulações desenvolvidas para a unidade 1 do reator foram repetidas também para a unidade 2 e os resultados obtidos revelaram um processo de composição da corrente total do reator idêntico àquele observado no modelo em que o delta foi mantido em circuito aberto: a corrente de cada fase da unidade 1 apresenta-se composta por pulsos idênticos àqueles gerados na unidade 2, tanto em amplitude quanto em largura, dispostos em posições simétricas, conforme indica a figura 4.11, na qual tomou-se a fase A para análise. Da adição dos pulsos registrados na figura 4.11, resultará a corrente total da fase A do reator, cuja forma de onda será idêntica àquela da figura 4.8b, correspondente ao modelo com o delta aberto. Um detalhe a ser destacado neste caso em que o delta acha-se fechado, é que, em função da seqüência com que os núcleos saturam, tem-se uma inversão das amplitudes dos pulsos da onda de corrente primária, gerando uma aparente rotação da mesma, quando comparada com aquela do caso em que se preservou o delta aberto. Tal fato pode ser constatado através de um simples exame das curvas plotadas nas figuras 4.6 e 4.10.

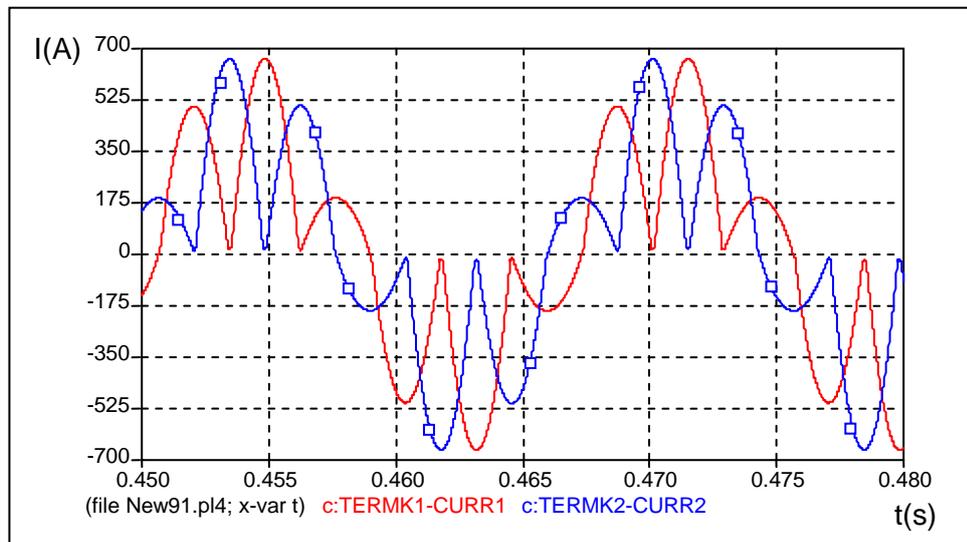


Figura 4.11 – Corrente na fase A do reator saturado com seis núcleos com delta fechado:

Como o circuito do delta possui, em todo o instante, dois núcleos não saturados e um saturado, a corrente que circula através do mesmo corresponde a uma senóide pura de 3^o harmônico e de amplitude constante, sendo a corrente do delta da unidade 1 atrasada de 30° em relação àquela verificada na unidade 2, conforme ilustra a figura 4.12.

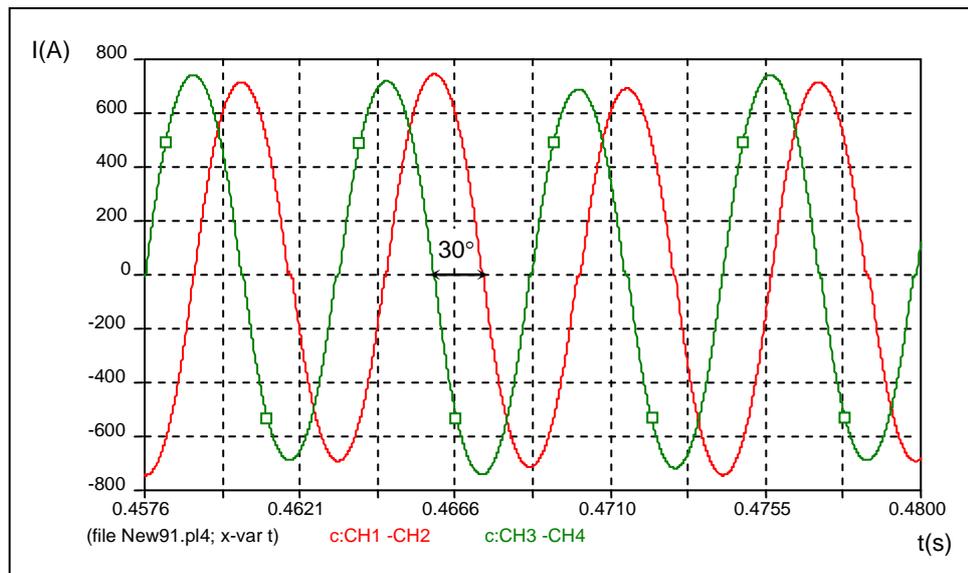


Figura 4.12 –Corrente através da conexão em delta dos enrolamentos secundários do reator saturado com seis núcleos:

□ Unidade trifásica 1 medida entre os terminais CH1 e CH2

A figura 4.13 apresenta a forma de onda da corrente da fase A que alimenta o núcleo I do reator, sob as duas situações de operação analisadas: com o delta em circuito aberto em cada uma das unidades e com o mesmo curto-circuitado. Tomando a condição de circuito aberto como referência, observa-se que, com o fechamento dos terminais do delta, a passagem da corrente pelo seu zero sofrerá um atraso de 30° , o que corresponde a $\pi/2$ da corrente de 3° harmônico do delta (frequência de 180 Hz).

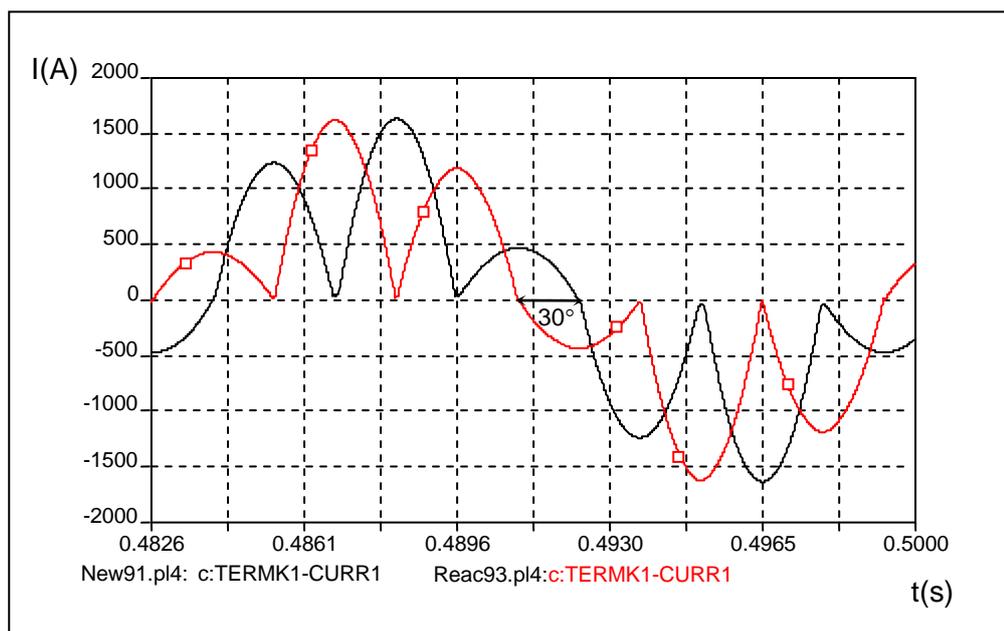


Figura 4.13 - Corrente na fase A através do enrolamento primário do núcleo I do reator de seis núcleos (entre os terminais TERMK1-CURR1):

— Enrolamentos secundários em delta fechados (fator de escala 1:1)

□

Uma fonte de alimentação correspondente a 1,05 pu (525kV) foi, agora, aplicada ao equipamento, o qual, até então, esteve sendo submetido a níveis de tensão extremamente elevados. Desta forma, obteve-se a operação do reator sob a condição de plena carga especificada quando do desenvolvimento do projeto do mesmo. Em seguida, as mesmas saídas gráficas indicadas na figura 4.13 foram solicitadas ao programa ATP sob esta nova situação de operação e estão reunidas na figura 4.14. Nesta última ilustração, o efeito magnetizante da corrente do delta sobre os enrolamentos primários de cada unidade do reator pôde, então, ser visualizado claramente: mantendo-se fixa a tensão de alimentação, a abertura de ambos os circuitos em delta retira os núcleos de cada unidade física do equipamento do estado de saturação, com a conseqüente redução tanto da largura quanto da amplitude dos pulsos de corrente gerados em cada fase.

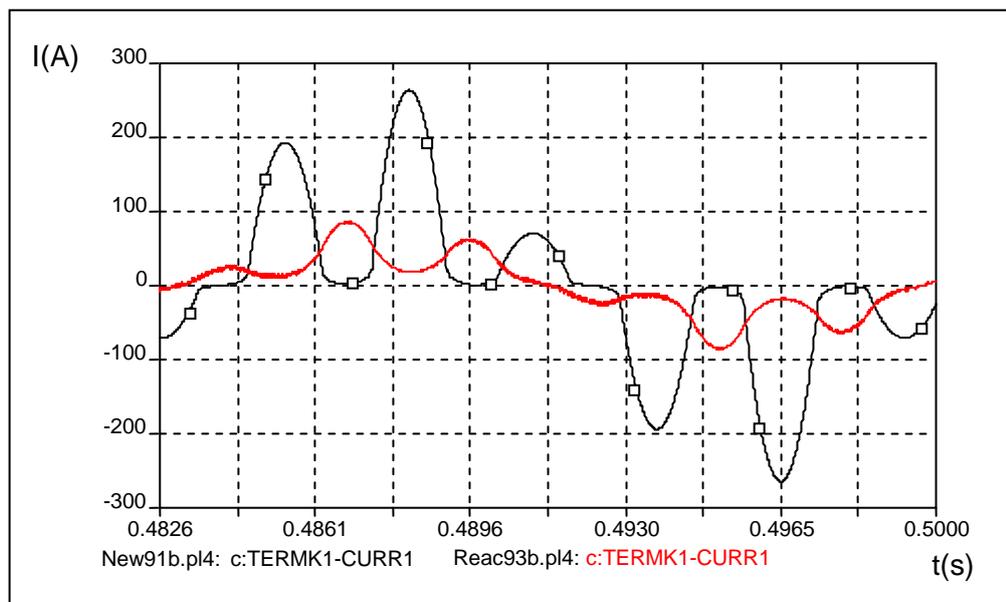


Figura 4.14 - Corrente na fase A através do enrolamento primário do núcleo I do reator de seis núcleos (entre os terminais TERMK1-CURR1), com uma tensão de alimentação de 1,05 pu:
 — Enrolamentos secundários em delta aberto (fator de escala 50:1)

□

4.3.2 – O REATOR DE NOVE NÚCLEOS

Para o desenvolvimento das simulações envolvendo o modelo de nove núcleos, foi considerado o diagrama de conexões indicado na figura 4.4. Na primeira parte de tal estudo, assim como na seção 4.3.1, as chaves situadas entre os terminais CH1 e CH4, CH2 e CH5 e entre CH3 e CH6, na figura 4.4, foram mantidas abertas durante todo o período de processamento. Somente na etapa seguinte, estas chaves permaneceram fechadas, sendo possível, desta forma, uma análise da influência da ligação em delta dos enrolamentos secundários sobre o desempenho do reator.

É importante mencionar que, todos os registros feitos na seção anterior, a respeito das unidades 1 e 2 do modelo de seis núcleos, são válidos, também, para as unidades 2 e 3 do modelo de nove núcleos, uma vez que estas são idênticas entre si, sob o aspecto construtivo. Portanto, apenas a unidade 1 do reator de nove núcleos teve o seu comportamento detalhadamente observado, pelo fato de ser a única fisicamente distinta das demais. No caso presente, também se aplicou, aos terminais do equipamento, um nível de tensão superior a 1,05 pu, visando uma melhor interpretação das saídas gráficas obtidas.

- Enrolamentos Secundários em Circuito Aberto

Os fluxos magnéticos nos três núcleos que compõem unidade 1 do reator foram solicitados ao programa ATP, conservando-se os enrolamentos secundários do equipamento em circuito aberto. As formas de onda obtidas foram idênticas às aquelas observadas quando da análise do modelo de seis núcleos, apresentadas na figura 4.5: não senoidais e indicando a saturação simultânea de dois núcleos da unidade, enquanto o terceiro permanece não saturado, conforme já era de se esperar. Entretanto, devido ao esquema de conexão imposto à unidade 1, indicado na figura 4.4, a geração de pulsos de corrente em qualquer enrolamento de N_o espiras é decorrência exclusiva da saturação do núcleo envolto pelo mesmo. Desta forma, a FMM resultante em cada um dos núcleos desta unidade deve-se à contribuição de apenas uma fase, e não de mais duas, como acontece nas outras unidades pertencentes ao reator. Na figura 4.15, estão representados o fluxo magnético no núcleo I e a corrente na fase A da referida unidade, medida entre os terminais TERMK6 e TERMK1. Tomando-se meio período da onda de fluxo magnético, observa-se que, a cada ingresso do núcleo na condição saturada, um pulso de corrente é gerado. Como

conseqüência, cada semiciclo da onda de corrente apresenta-se composto por apenas dois pulsos individuais, de amplitudes idênticas e largura correspondente a 60° ou $\pi/3$ radianos.

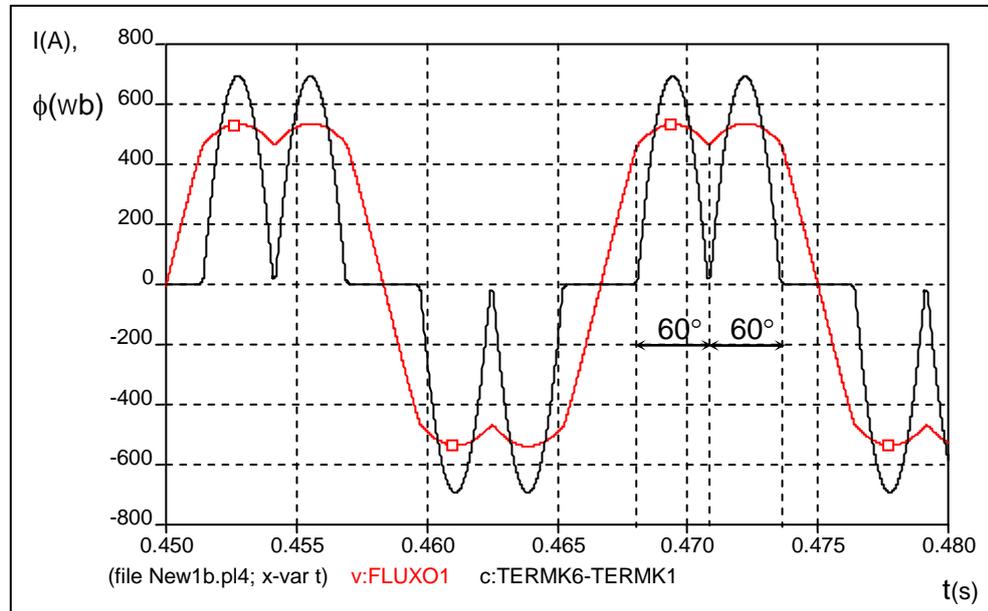


Figura 4.15 – Corrente e fluxo magnético na unidade 1 do reator saturado naturalmente com ligação paralela dos enrolamentos, composto por nove núcleos (delta aberto):

□ Corrente na fase Δ (fator de escala 1·1)

As simulações direcionadas às unidades 2 e 3 do reator de nove núcleos forneceram, para a corrente da fase A, as formas de onda indicadas nas figuras 4.16a e 4.16b, respectivamente. Verifica-se, na unidade 2, pulsos idênticos em amplitude e largura (correspondente a 60°) àqueles gerados na unidade 3, porém, dispostos em posições diametralmente opostas. A superposição dos pulsos de corrente gerados na fase A de cada unidade acha-se apresentada na figura 4.17a, enquanto a corrente total do reator, resultante da soma destes oito pulsos, está indicada na figura 4.17b.

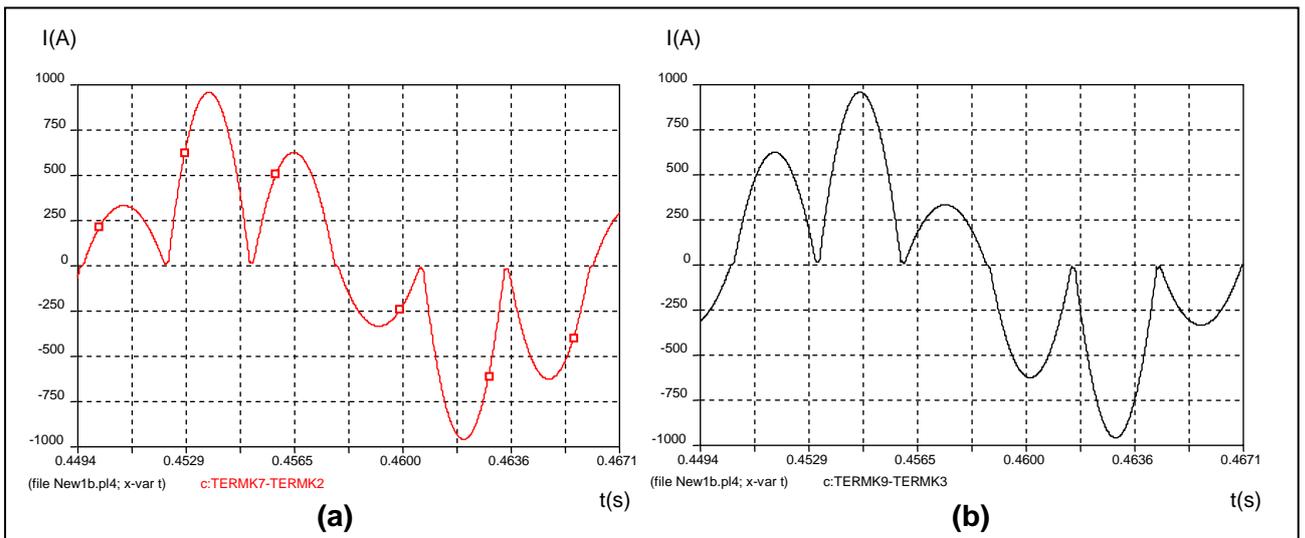


Figura 4.16 – Corrente na fase A do reator saturado com nove núcleos com delta aberto:

-
- Unidade trifásica 2, medida entre os terminais TERM7 e TERM2 (núcleo IV)

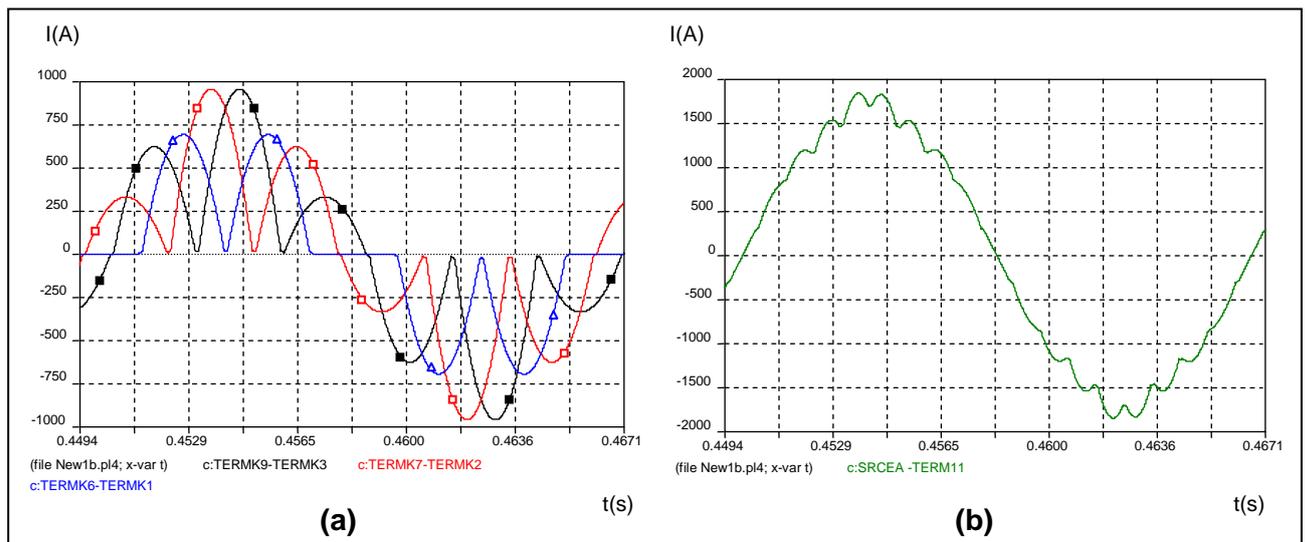


Figura 4.17 – Corrente na fase A do reator saturado com nove núcleos com delta aberto:

- △
-
-
- Unidade trifásica 1, medida entre os terminais TERM6 e TERM1 (núcleo I)
- Unidade trifásica 2, medida entre os terminais TERM7 e TERM2 (núcleo IV)

- Enrolamentos Secundários em Curto-Circuito

Com os enrolamentos secundários do reator de nove núcleos conectados em delta fechado, obteve-se, via ATP, formas de onda perfeitamente senoidais para os fluxos magnéticos na unidade 1 do equipamento, como aquelas também verificadas no modelo de seis núcleos, representadas na figura 4.9. Observa-se, portanto, a ocorrência de um único

núcleo saturado por vez, em cada unidade do reator, durante um período 60° ou $\pi/3$ radianos. Para a análise da influência do circuito do delta sobre o comportamento da unidade 1 do reator de nove núcleos, apresentam-se superpostos, na figura 4.18, o fluxo magnético presente no núcleo I e a corrente da fase A através do enrolamento de N_0 espiras.

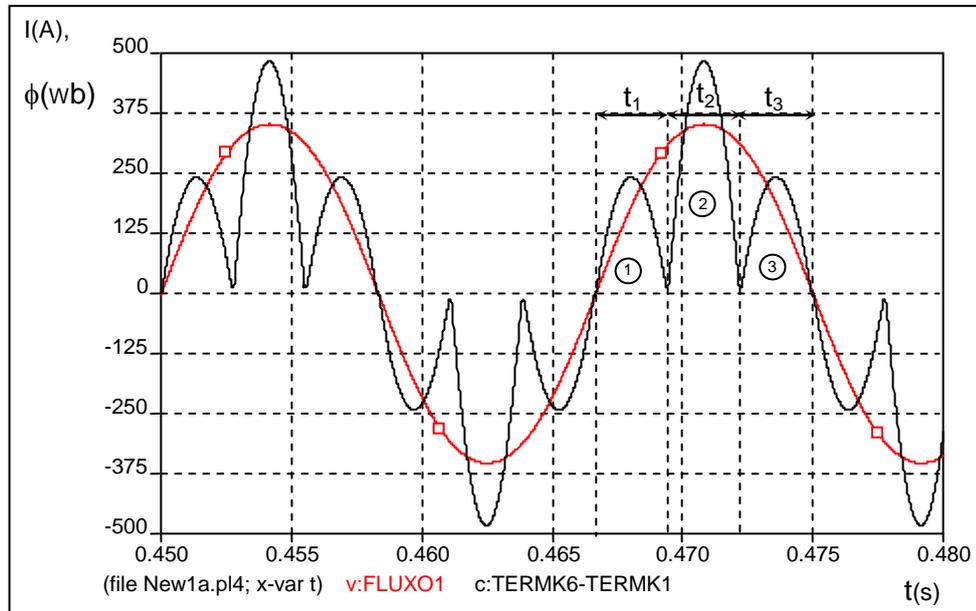


Figura 4.18 – Corrente e fluxos magnéticos na unidade 1 do reator saturado naturalmente com ligação paralela dos enrolamentos, composto por nove núcleos (delta fechado):

□ Corrente na fase A (fator de escala 1:1)

Um exame dos períodos de tempo t_1 , t_2 e t_3 , selecionados na figura 4.18, torna visível a importância de tal conexão em malha fechada no reator, uma vez que, somente após a introdução da mesma, foram produzidos três pulsos em cada semiciclo da onda de corrente. Durante os intervalos de tempo t_1 e t_3 , o núcleo I encontra-se fora da condição de saturação; portanto, os pulsos (1) e (3), de amplitudes idênticas, resultam da transferência de corrente dos enrolamentos secundários de N_3 espiras, conectados em delta, para aqueles de N_0 espiras, através do efeito de transformação. Apenas o pulso (2) será decorrência exclusiva da saturação do núcleo I, ao longo do intervalo t_2 . Os pulsos de corrente verificados na fase A de cada unidade do reator de nove núcleos estão indicados na figura 4.19. Da adição destes, resulta a corrente total do equipamento, apresentada na figura 4.20, a qual se aproxima muito mais de uma senóide do que aquela do modelo com seis núcleos, pelo fato de decorrer da combinação de um maior número de pulsos.

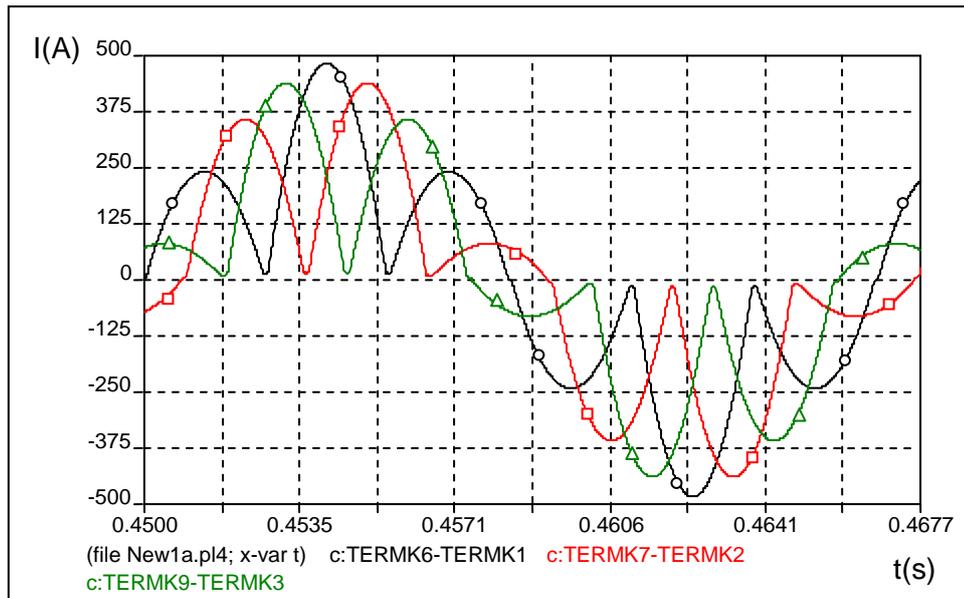


Figura 4.19 – Corrente na fase A do reator saturado com nove núcleos com delta fechado:

- Unidade trifásica 1, medida entre os terminais $term6$ e $term1$ (núcleo 1)
- △ Unidade trifásica 1, medida entre os terminais $term9$ e $term3$ (núcleo 1)

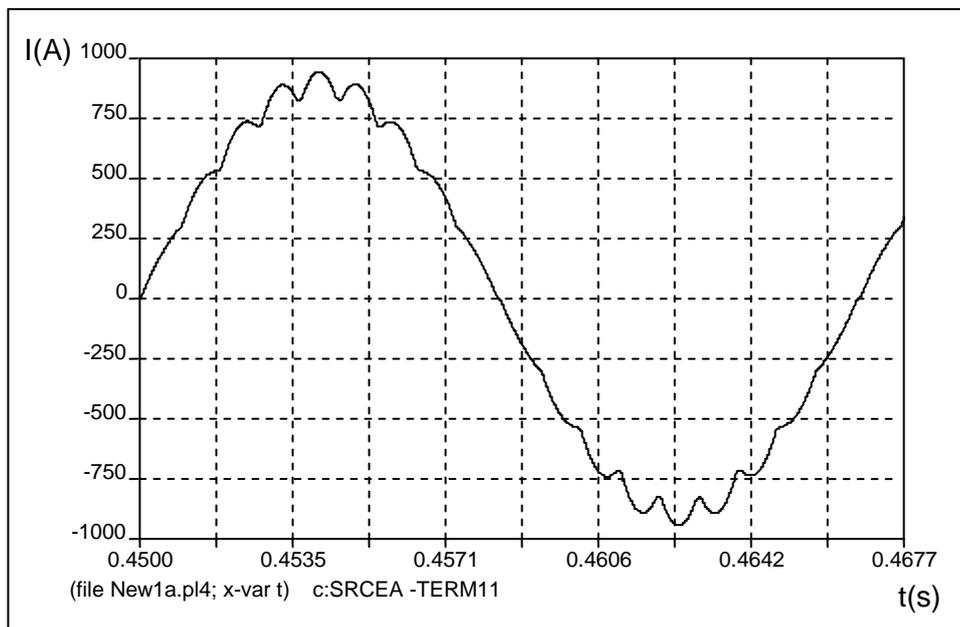


Figura 4.20 – Corrente total da fase A do reator saturado de nove núcleos com delta fechado:

CAPÍTULO 5

A COMPENSAÇÃO HARMÔNICA

5.1 – INTRODUÇÃO

Cargas não-lineares alteram a natureza senoidal das ondas de tensão e corrente através da introdução de componentes harmônicas nas mesmas, surtindo, sobre o sistema, efeitos diversos que acarretam a sua má-operação, tais como:

- Redução da eficiência de geração, transmissão e utilização de potência;
- Amplificação dos níveis de harmônicos decorrentes de ressonâncias série e paralela;
- Envelhecimento da isolamento de equipamentos acoplados à rede elétrica, com o conseqüente encurtamento da vida útil dos mesmos (Arrilaga et al.,1989).

Diante da necessidade de se assegurar a eficiência e a efetividade do suprimento de energia, níveis máximos de distorção harmônica foram definidos, respeitando-se limites de tolerância tanto do sistema quanto dos dispositivos a ele associados, suscitando assim, o desenvolvimento de um conjunto de técnicas e instrumentos de medição, cujo grau de sofisticação cresce dia a dia.

Considerando-se que o reator saturado, alvo do presente estudo, também se

enquadra no grupo de equipamentos geradores de harmônicos, verifica-se a necessidade de uma análise detalhada do processo de interferência que venha a ser exercido pelo mesmo na corrente de alimentação, bem como a busca de soluções capazes de minimizar tal impasse, o que corresponde à proposta básica deste capítulo.

5.2 – O PROCESSO DE CANCELAMENTO HARMÔNICO

Conforme mencionado no capítulo 2, o esquema especial de conexão adotado para os enrolamentos do reator saturado contendo n núcleos promove o cancelamento dos harmônicos gerados devido às propriedades não-lineares inerentes ao material ferromagnético usado em tal equipamento, com exceção daqueles de ordem $(2kn \pm 1)$, para $k \in \mathbb{N}$, que, inevitavelmente, serão injetados no sistema. Para conferir tal propriedade, foram novamente tomados para estudo os dois reatores saturados com excitação paralela selecionados no capítulo precedente, cujos parâmetros acham-se listados nos itens a e b da seção 4.2, correspondentes aos modelos contendo seis e nove núcleos, respectivamente.

Cada reator, projetado para operar em vazio numa tensão de 1,00 pu (500kV) e para consumir uma potência reativa de 150MVAR em plena carga, o que corresponde a 1,05 pu ou 525kV, teve o seu comportamento apurado para diversas tensões de suprimento e os resultados obtidos encontram-se registrados nas tabelas 5.1(modelo com seis núcleos) e 5.2 (modelo com nove núcleos). Nelas, estão representadas a intensidade da corrente consumida por cada equipamento, bem como a composição harmônica da mesma, tanto em valores percentuais da componente fundamental, quanto em Ampères, para os principais harmônicos característicos.

Uma análise comparativa das informações contidas nas tabelas 5.1 e 5.2 confirmam a constatação de Friedlander (1956) de que, quanto maior o número de núcleos presentes no reator, mais próxima de uma senóide será a forma de onda de sua corrente de alimentação, uma vez que esta será composta por um maior número de pulsos e, conseqüentemente, menor será a distorção harmônica verificada na mesma. Um outro detalhe a ser destacado corresponde ao fato de que, quando as componentes harmônicas são expressas em valores percentuais, elevadas magnitudes são observadas, especialmente em pontos de

operação próximos à condição de vazio, em que a corrente de alimentação assume valores mais baixos. Entretanto, quando tais grandezas são convertidas para Ampères, estas adquirem intensidade e importância desprezíveis em relação às presentes numa tensão igual ou superior à de plena carga.

REATOR DE SEIS NÚCLEOS COM EXCITAÇÃO PARALELA											
Valor eficaz da tensão aplicada (pu)	Valor eficaz da corrente consumida pelo reator (A)	Conteúdo harmônico (%)					Conteúdo harmônico (A)				
		11 ^o	13 ^o	23 ^o	25 ^o	Distorção harmônica total	11 ^o	13 ^o	23 ^o	25 ^o	Distorção harmônica total
1,00	14,30	27,20	19,61	7,22	6,03	35,05	3,89	2,81	1,03	0,86	5,01
1,01	35,70	43,31	34,50	6,76	3,43	56,11	15,46	12,32	2,41	1,22	20,03

Tabela 5.1 – Conteúdo harmônico da corrente de alimentação do reator de seis núcleos (valores percentuais e em Ampères) para pontos de operação distintos. numa base de 500 kV

REATOR DE NOVE NÚCLEOS COM EXCITAÇÃO PARALELA											
Valor eficaz da tensão aplicada (pu)	Valor eficaz da corrente consumida pelo reator (A)	Conteúdo harmônico (%)					Conteúdo harmônico (A)				
		17 ^o	19 ^o	35 ^o	37 ^o	Distorção harmônica total	17 ^o	19 ^o	35 ^o	37 ^o	Distorção harmônica total
1,00	14,61	10,77	9,01	0,92	0,69	16,50	1,57	1,32	0,13	0,10	2,41
1,01	33,12	19,81	14,83	3,14	3,05	25,87	6,56	4,91	1,04	1,01	8,57
1,02	57,95	10,17	4,19	0,70	0,46	11,71	5,89	2,43	0,40	0,27	6,79

Tabela 5.2 – Conteúdo harmônico da corrente de alimentação do reator de nove núcleos (valores percentuais e em Ampères) para pontos de operação distintos. numa base de 500 kV

Segundo retratam as figuras 5.1 e 5.2, referentes aos modelos com seis e nove núcleos, respectivamente, as correntes harmônicas geradas pelo reator variam de acordo com o ponto de operação que lhe é imposto, sem qualquer relação de linearidade com o mesmo, o que impossibilita uma estimativa de como será o comportamento de tal equipamento em outros níveis de tensão além daqueles considerados no presente estudo. Porém, as tabelas 5.1 e 5.2 indicam que a distorção harmônica total reduz-se com a elevação da tensão de operação.

Tomando-se a condição de plena carga, foi desenvolvida uma análise das propriedades de cancelamento harmônico apresentadas pelo reator saturado com excitação paralela, em virtude do esquema de conexão imposto aos seus enrolamentos. Para tanto, foram solicitadas, ao programa ATP, as componentes harmônicas presentes na corrente total dos reatores aqui projetados e na corrente que alimenta cada unidade física individual que constitui os mesmos. Estas grandezas foram medidas entre os nós terminais listados abaixo, tomando como base os diagramas de ligações dos reatores de seis e nove núcleos, apresentados nas figuras 4.3 e 4.4, respectivamente.

- Reator de Seis Núcleos -

Especificação da Saída Solicitada ao Programa ATP:

Análise de Fourier da corrente total da fase A consumida pelo reator ⇒
Análise de Fourier da corrente total da fase B consumida pelo reator ⇒
Análise de Fourier da corrente total da fase C consumida pelo reator ⇒
Análise de Fourier da corrente da fase A consumida pela unidade 1 ⇒
Análise de Fourier da corrente da fase A consumida pela unidade 2 ⇒

Terminais de Medição:

SRCEA-TERM11
SRCEB-TERM12
SRCEC-TERM13
TERMK1-CURR1
TERMK2-CURR2

- Reator de Nove Núcleos -

Especificação da Saída Solicitada ao Programa ATP:

Análise de Fourier da corrente total da fase A consumida pelo reator ⇒
Análise de Fourier da corrente total da fase B consumida pelo reator ⇒
Análise de Fourier da corrente total da fase C consumida pelo reator ⇒
Análise de Fourier da corrente da fase A consumida pela unidade 1 ⇒
Análise de Fourier da corrente da fase A consumida pela unidade 2 ⇒
Análise de Fourier da corrente da fase A consumida pela unidade 3 ⇒

Terminais de Medição:

SRCEA-TERM11
SRCEB-TERM12
SRCEC-TERM13
TERMK6-TERMK1
TERMK7-TERMK2
TERMK9-TERMK3

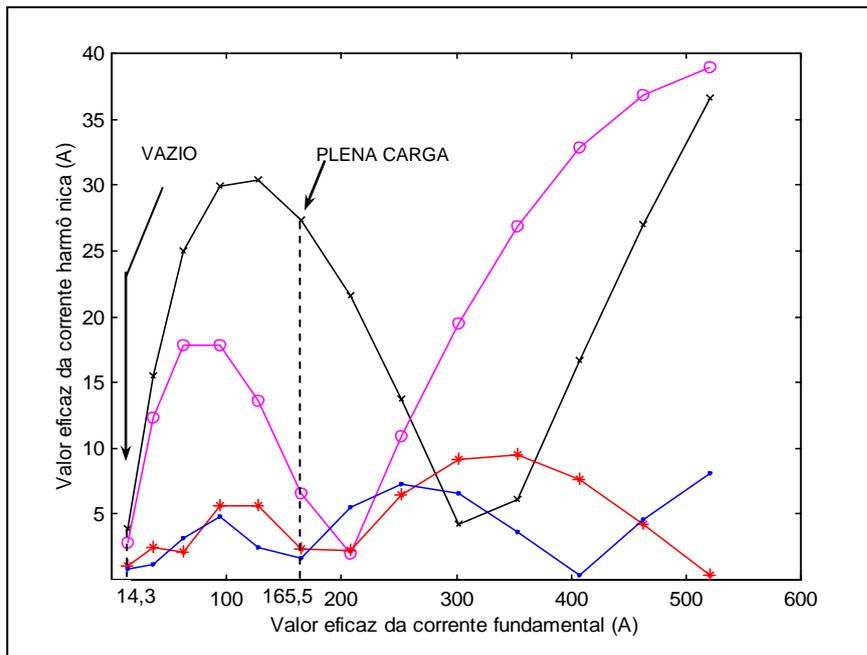


Figura 5.1 – Composição harmônica da corrente consumida pelo reator de seis núcleos para os pontos de operação indicados na tabela 5.1:

—x— Corrente harmônica de 11ª ordem

○ Corrente harmônica de 13ª ordem

•

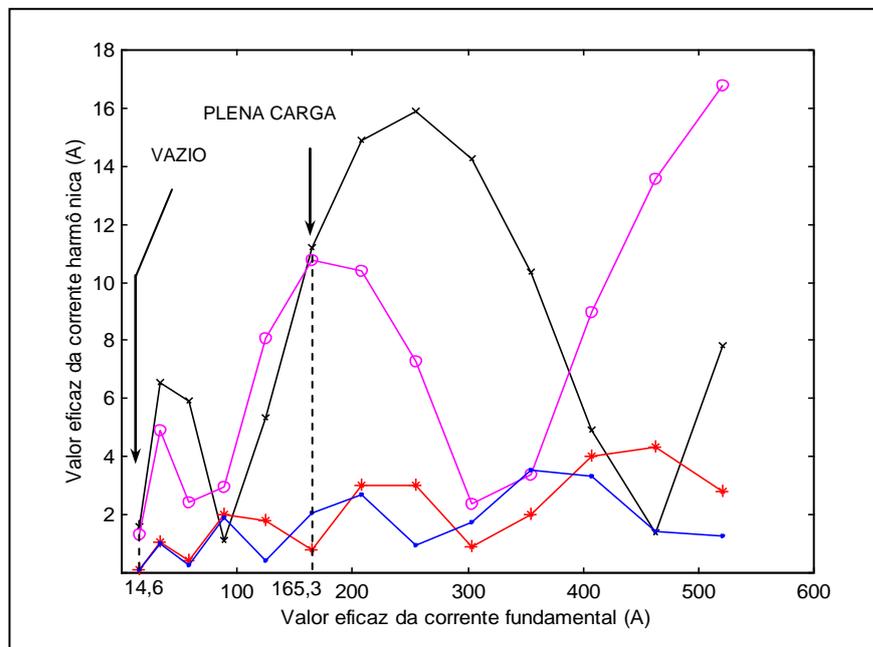


Figura 5.2 – Composição harmônica da corrente consumida pelo reator de nove núcleos para os pontos de operação indicados na tabela 5.2:

—x— Corrente harmônica de 17ª ordem

○ Corrente harmônica de 19ª ordem

•

Das informações fornecidas pelo programa ATP, as seguintes observações puderam ser feitas, selecionando-se, a princípio, apenas uma das três fases, como, por exemplo, a fase A:

- As correntes harmônicas características (de ordem $2kn \pm 1$, $\forall k \in \mathbb{N}$) contidas em cada unidade individual do reator encontram-se em fase entre si. A resultante da soma destas componentes é a principal responsável pela distorção harmônica introduzida na corrente total do reator, como ilustram as tabelas 5.3 e 5.4, referentes aos modelos com seis e nove núcleos, respectivamente. Nelas foram registradas as informações correspondentes aos dois harmônicos característicos predominantes em cada tipo de reator.

Ponto de medição	Corrente harmônica característica presente na fase A do reator de seis núcleos					
	11 ^a			13 ^a		
	Módulo	Fase	Fração da fundamental	Módulo	Fase	Fração da fundamental
	(A)	(°)	(%)	(A)	(°)	(%)

Tabela 5.3 – Valor eficaz das componentes harmônicas características de 11^a e de 13^a ordens, presentes na corrente da fase A do reator de seis núcleos, quando da sua operação na condição de

Ponto de medição	Corrente harmônica característica presente na fase A do reator de nove núcleos					
	17 ^a			19 ^a		
	Módulo	Fase	Fração da fundamental	Módulo	Fase	Fração da fundamental
	(A)	(°)	(%)	(A)	(°)	(%)

Tabela 5.4 – Valor eficaz das componentes harmônicas características de 17^a e de 19^a ordens, presentes na corrente da fase A do reator de nove núcleos, quando da sua operação na condição de

- As correntes harmônicas não características e não múltiplas de três, contidas em cada uma das P unidades trifásicas que compõem o reator, apresentam-se deslocadas entre si de $(360^\circ/P)$. Devido à tal defasagem, estas componentes cancelam-se. Entretanto, conforme ilustram as tabelas 5.5 e 5.6, relativas aos modelos de seis e nove núcleos, respectivamente, registros numéricos de tais harmônicos ainda foram observados na onda da corrente de alimentação do reator, correspondendo, portanto, a resíduos de cálculo.

Ponto de medição	Corrente harmônica não característica presente na fase A do reator de seis núcleos					
	5 ^a			7 ^a		
	Módulo (A)	Fase (°)	Fração da fundamental $I_{0/n}$	Módulo (A)	Fase (°)	Fração da fundamental (%)

Tabela 5.5 – Valor eficaz das componentes harmônicas não características e não múltiplas de três, de 5^a e de 7^a ordens, presentes na corrente da fase A do reator de seis núcleos, durante a sua operação na condição de plena carga (525kV)

Ponto de medição	Corrente harmônica não característica presente na fase A do reator de nove núcleos					
	5 ^a			7 ^a		
	Módulo (A)	Fase (°)	Fração da fundamental	Módulo (A)	Fase (°)	Fração da fundamental (%)

Tabela 5.6 – Valor eficaz das componentes harmônicas não características e não múltiplas de três, de 5^a e de 7^a ordens, presentes na corrente da fase A do reator de nove núcleos, durante a sua operação na condição de plena carga (525kV)

Sob condições de desequilíbrio, entretanto, o processo de cancelamento harmônico, visto nas tabelas 5.6 e 5.7, não mais se aplica, pois as FMMs não mais satisfazem a relação de defasagem entre si de π/n . Como nos sistemas de potência, na operação em regime permanente, um grau de desequilíbrio (V_2/V_1) da ordem de 2,0% é tido como aceitável, novas simulações foram desenvolvidas, considerando-se desequilíbrios variando num intervalo de 0,5% a 5,0%, sendo, então, analisadas as intensidades das componentes harmônicas não características de ordens mais baixas presentes na corrente total do reator. Os resultados obtidos acham-se registrados nas figuras 5.3 e 5.4, correspondentes aos modelos com seis e nove núcleos, respectivamente. Constata-se, portanto, que o processo de cancelamento harmônico é afetado pelo aumento do grau de desequilíbrio do sistema, observando-se um efeito visível especialmente sobre a componente harmônica não característica de 5^a ordem, cuja magnitude cresce de forma aproximadamente linear com o desequilíbrio.

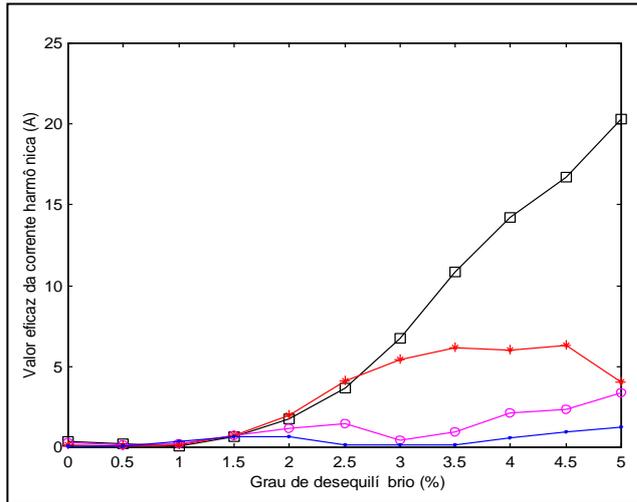


Figura 5.3 – Componentes harmônicas não características presentes na corrente de alimentação do reator de seis núcleos em função do grau de desequilíbrio do sistema:

*
— Corrente harmônica de 5ª ordem

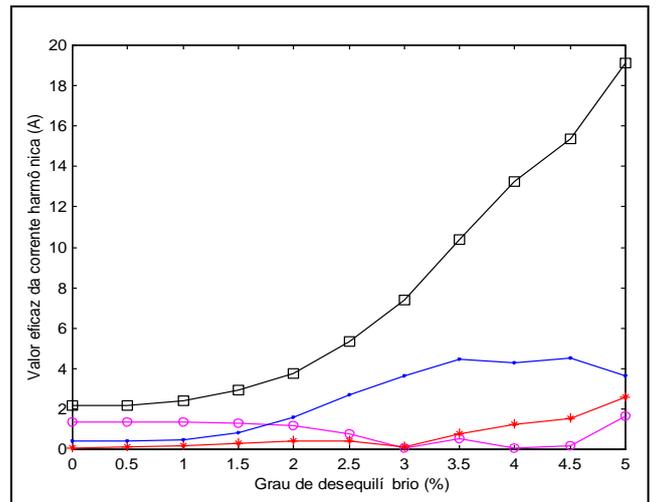


Figura 5.4 – Componentes harmônicas não características presentes na corrente de alimentação do reator de nove núcleos em função do grau de desequilíbrio do sistema:

*
— Corrente harmônica de 5ª ordem

Já as correntes harmônicas múltiplas de três são eliminadas pela própria ligação em estrela com neutro flutuante dos enrolamentos primários do reator, uma vez que tais componentes são de sequência zero. Porém, para as mesmas situações de desequilíbrio analisadas no parágrafo anterior, tal fenômeno não mais se verifica, conforme ilustram as figuras 5.5 e 5.6, correspondentes aos modelos de seis e nove núcleos, respectivamente.

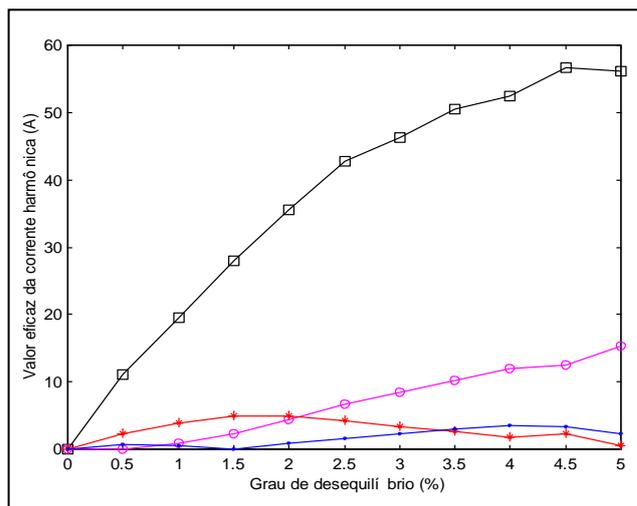


Figura 5.5 – Componentes harmônicas não características presentes na corrente de alimentação do reator de seis núcleos em função do grau de desequilíbrio do sistema:

*
— Corrente harmônica de 3ª ordem

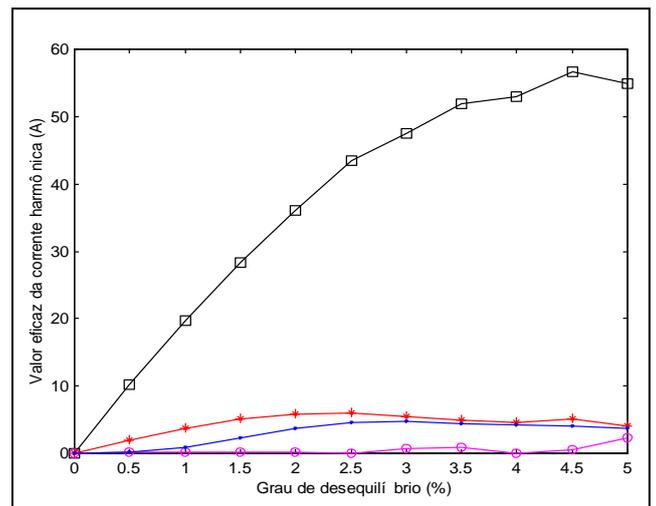


Figura 5.6 – Componentes harmônicas não características presentes na corrente de alimentação do reator de nove núcleos em função do grau de desequilíbrio do sistema:

*
— Corrente harmônica de 3ª ordem

Sendo o reator saturado uma fonte de harmônicos, simulou-se, ainda na condição de plena carga, uma situação de desequilíbrio extremo, mantendo-se uma das fases que alimentam tal equipamento aberta. Sob esta condição, os núcleos foram retirados do estado de saturação e, como era de se esperar, o reator passou a injetar, na rede elétrica, altos níveis de harmônicos ímpares de todas as ordens. Medidas corretivas para tal condição operativa pouco provável deverão, portanto, ser consideradas, caso venha a ser observada tal necessidade através de um estudo mais apurado de penetração harmônica.

Finalmente, observando-se, quanto à seqüência, a corrente total consumida pelo reator, em cada uma das fases, verifica-se que as componentes harmônicas características de ordem $(2kn-1)$, $\forall k \in \mathbb{N}$, são de seqüência positiva, enquanto aquelas de ordem $(2kn+1)$ são de seqüência negativa, segundo os exemplos apresentados nas tabelas 5.7 e 5.8, correspondentes, respectivamente, aos reatores de seis e nove núcleos.

Ponto de medição	Componente harmônica característica presente na corrente de alimentação do reator de seis núcleos					
	Seqüência positiva $(2kn-1)$			Seqüência negativa $(2kn+1)$		
	11 ^a			13 ^a		
	Módulo (A)	Fase (°)	Fração da fundamental	Módulo (A)	Fase (°)	Fração da fundamental (%)

Tabela 5.7 – Valor eficaz das componentes harmônicas características de 11^a e de 13^a ordens, presentes na corrente total das fases A, B e C do reator de seis núcleos, durante a sua operação na condição de plena carga (525kV)

Ponto de medição	Componente harmônica característica presente na corrente de alimentação do reator de nove núcleos					
	Seqüência positiva $(2kn-1)$			Seqüência negativa $(2kn+1)$		
	17 ^a			19 ^a		
	Módulo (A)	Fase (°)	Fração da fundamental	Módulo (A)	Fase (°)	Fração da fundamental (%)

Tabela 5.8 – Valor eficaz das componentes harmônicas características de 17^a e de 19^a ordens, presentes na corrente total das fases A, B e C do reator de nove núcleos, durante a sua operação na condição de plena carga (525kV)

5.2.1 – LIMITAÇÃO DE HARMÔNICOS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

Cada sistema elétrico possui configuração e características de operação próprias, o que impossibilita a adoção de um padrão único para limitação e controle de harmônicos (Arrilaga et al., 1989). Segundo a norma IEEE-519 (1992), as companhias de energia elétrica são responsáveis pela manutenção da qualidade de operação do sistema, devendo exercer controle sobre a distorção harmônica introduzida por dispositivos não-lineares na onda de tensão, mantendo-a sempre dentro dos limites máximos fixados, os quais variam de acordo com o nível de tensão do barramento em que o equipamento acha-se conectado, conforme indica a tabela 5.9.

TENSÃO NO BARRAMENTO V_n (kV)	DISTORÇÃO HARMÔNICA INDIVIDUAL (%)	DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL DHT (%)
$V_n \leq 69$	3,0	5,0
$69 < V_n \leq 161$	1,5	2,5
$V_n > 161$	1,0	1,5

Tabela 5.9 – Limites de distorção harmônica permitidos na onda de tensão, segundo o IEEE-519

A distorção harmônica total introduzida na onda de tensão é definida por:

$$DHT = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_n} \times 100\%$$

(5.1)

Onde:

V_h = Valor eficaz da componente harmônica individual da onda de tensão, em volts;

h = Ordem do harmônico;

V_n = Valor eficaz da tensão do sistema, em volts.

Conforme mencionado anteriormente, nos estudos aqui desenvolvidos, os reatores permaneceram conectados a um barramento infinito durante todo o período de simulação. Assim, para uma análise de desempenho, faz-se necessária a aplicação dos reatores a um sistema elétrico de grande porte, determinando-se, através da equação (5.1), se as correntes harmônicas injetadas por tais equipamentos, calculadas no presente capítulo,

provocarão, nas tensões do sistema, distorções dentro dos limites estipulados como aceitáveis, indicados na tabela 5.9. Neste trabalho, tanto as componentes harmônicas presentes na corrente de alimentação de cada reator aqui analisado, quanto a Distorção Harmônica Total (DHT), em valores percentuais da componente fundamental desta saída solicitada, foram fornecidas pela subrotina suporte “Análise de Fourier”, do programa ATP.

5.3 – A MINIMIZAÇÃO DO CONTEÚDO HARMÔNICO

Com o intuito de promover o combate aos harmônicos gerados pelos reatores saturados com ligação série dos enrolamentos, várias técnicas de compensação foram sugeridas por Friedlander (1956). Dentre elas, destacou-se a inserção de uma reatância fixa entre os terminais da conexão em delta dos enrolamentos secundários do reator. Este revelou-se um método limitado, uma vez que os harmônicos somente eram otimizados efetivamente em um ponto específico de operação do equipamento. Uma outra proposição, comercializada pela G.E.C. e revolucionária por sua eficiência, consistiu no uso de um reator auxiliar alimentado através da conexão em delta dos enrolamentos secundários do reator principal, capaz de adaptar-se a diferentes situações de uso, correspondendo a uma reatância variável com o nível de operação do equipamento (Ainsworth et al., 1973).

De forma similar, buscou-se, no presente trabalho, a seleção de uma tecnologia, livre de patentes, que pudesse aperfeiçoar o desempenho dos dois reatores com excitação paralela modelados e selecionados no capítulo 4, caso os níveis de harmônicos gerados por tais equipamentos se apresentassem acima dos limites recomendados, inviabilizando a operação dos mesmos no sistema elétrico.

Uma das hipóteses cogitadas fundamentou-se no uso de filtros externos sintonizados na frequência dos harmônicos característicos, que são os predominantes na corrente de alimentação do reator. Tais dispositivos correspondem a circuitos RLC série, tal como aquele indicado na figura 5.7a, cuja impedância Z é dada por:

$$Z = R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right),$$

a qual, na frequência de ressonância, f_r , reduz-se a R . Em baixas frequências, o circuito do

filtro aproxima-se das variações da reatância capacitiva, enquanto bem acima da ressonância, a impedância é governada somente pela indutância. A figura 5.7b apresenta a variação da impedância do circuito em função da frequência.

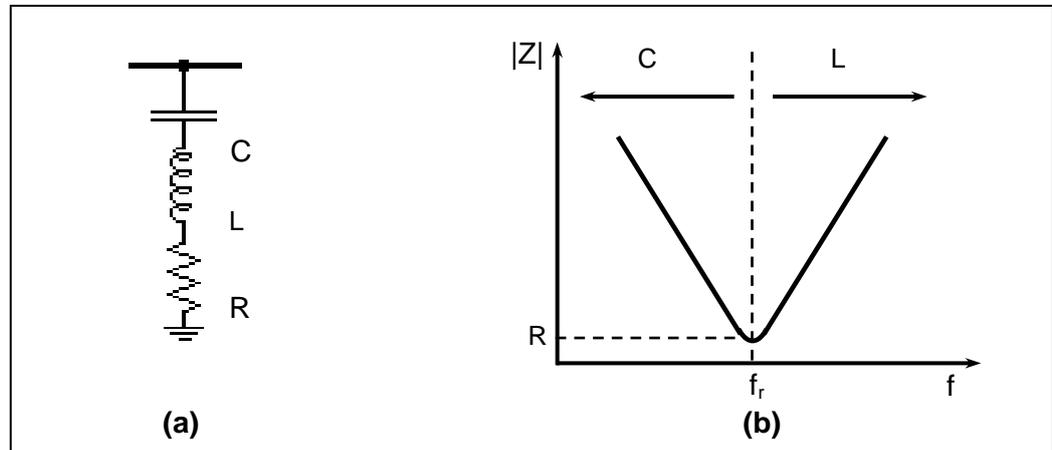


Figura 5.7 – Filtro passivo de sintonia única:

(a) Circuito elétrico

Os filtros foram conectados em derivação nos terminais da ligação em delta dos enrolamentos secundários de cada unidade trifásica dos reatores com excitação paralela, conforme ilustra a figura 5.8, em que se encontra representada apenas a unidade 1 do modelo contendo seis núcleos.

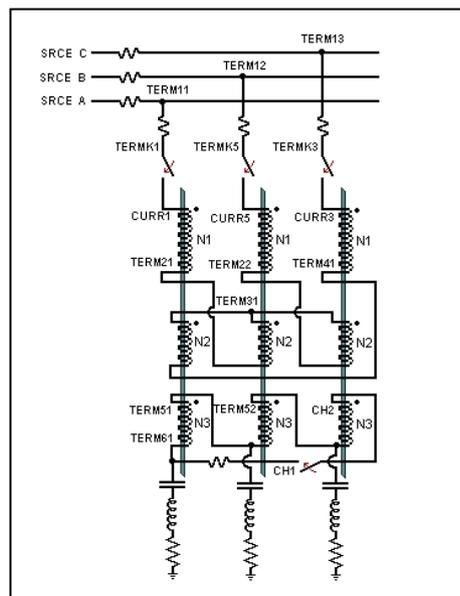


Figura 5.8 – Unidade trifásica 1 do reator de seis núcleos, com filtros passivos conectados em derivação em cada terminal do delta,

Sucessivas simulações foram desenvolvidas, considerando-se a operação de cada reator em plena carga (525kV ou 1,05pu), até que uma minimização efetiva do conteúdo harmônico da corrente total do equipamento, em virtude da introdução de filtros no mesmo, fosse verificada.

Os estudos envolveram filtros sintonizados nas frequências dos principais harmônicos característicos, isto é, aqueles de ordem 11, 13, 23 e 25, para o modelo de seis núcleos e 17, 19, 35 e 37, para o modelo de nove núcleos. Para cada frequência considerada, diversos valores de indutância foram testados para os filtros, variando num intervalo de 0,1 a 2,0 vezes a indutância dos enrolamentos de N_3 espiras do delta.

Os resultados fornecidos pelo programa ATP revelaram que a operação simultânea de dois filtros em cada terminal do delta, sintonizados nas frequências características não foi satisfatória, aumentando, inclusive, o nível de distorção harmônica da corrente de alimentação. Porém, os estudos nos quais um único filtro foi adicionado a cada terminal, como indicado na figura 5.8, apresentaram resultados promissores.

A seleção da frequência de sintonia ideal decorreu das informações reunidas nas tabelas 5.1 e 5.2 apresentadas previamente, correspondentes ao comportamento dos reatores contendo seis e nove núcleos, respectivamente, em diversos pontos de operação e sem qualquer tipo de compensação externa. Nelas, os registros numéricos da operação em 1,05 pu sugeriram, para o modelo de seis núcleos, um ajuste da sintonia dos filtros na frequência do 11^o ou do 13^o harmônico, ou numa faixa intermediária a ambos, pelo fato de as magnitudes das correntes harmônicas de 11^a e 13^a ordens serem muito superiores àsquelas de 23^a e 25^a ordens, devendo, portanto, o processo de combate ser direcionado às duas primeiras (figura 5.1). A mesma suposição pôde ser feita a respeito do modelo de nove núcleos, buscando-se uma frequência de sintonia no 17^o ou no 19^o harmônico, ou entre ambos, em virtude de as magnitudes das correntes características de 35^a e 37^a ordens serem muito pequenas (figura 5.2). Todas as considerações feitas acima foram investigadas através do ATP, o qual confirmou a veracidade das mesmas, possibilitando, inclusive, a extração das seguintes conclusões:

i. Efeitos dos Filtros de Harmônicos na Corrente de Alimentação

- O tipo de filtro mais efetivo para o modelo de seis núcleos foi aquele sintonizado na

frequência do 12^o harmônico, com uma indutância correspondente a 1,73 vezes aquela do enrolamento de N₃ espiras. Após a inserção de tal filtro em todos os terminais de cada conexão em delta do reator, obteve-se uma redução de aproximadamente 70% na distorção harmônica total da corrente de alimentação, conforme indica a tabela 5.10.

REATOR DE SEIS NÚCLEOS COM EXCITAÇÃO PARALELA			
Caso estudado	Valor eficaz da corrente total do reator	Conteúdo harmônico da corrente total do reator	
		(A)	(%)

Tabela 5.10– Atuação dos filtros sintonizados na frequência do harmônico de 12^a ordem, no combate à distorção harmônica da corrente total do reator de seis núcleos. na condição de

- Para o modelo de nove núcleos, o tipo de filtro que apresentou o melhor desempenho foi aquele sintonizado na frequência do harmônico de 18^a ordem, com uma indutância igual ao dobro daquela do enrolamento de N₃ espiras. Neste caso, verificou-se uma redução na distorção harmônica total da corrente de alimentação em torno de 30%, segundo as informações registradas na tabela 5.11.

REATOR DE NOVE NÚCLEOS COM EXCITAÇÃO PARALELA			
Caso estudado	Valor eficaz da corrente total do reator	Conteúdo harmônico da corrente total do reator	
		(A)	(%)

Tabela 5.11 – Atuação dos filtros sintonizados na frequência do harmônico de 18^a ordem, no combate à distorção harmônica da corrente total do reator de nove núcleos. na condição de

- Ainda de acordo com a tabela 5.10, observa-se que os filtros de 12^o harmônico atuaram basicamente sobre a corrente harmônica de 11^a ordem, reduzindo bruscamente a sua magnitude, que é a principal responsável pela distorção da corrente total do equipamento. Já os filtros sintonizados na frequência do 18^o harmônico, conectados ao modelo de nove núcleos, reduziram tanto o 17^o quanto o 19^o harmônicos, sendo, porém, mais efetivos sobre o

primeiro, conforme as informações reunidas na tabela 5.11.

ii. Efeitos dos Filtros de Harmônicos na Corrente do Delta

- A corrente do delta, que antes da introdução dos filtros ótimos era fundamentalmente de 3^o harmônico, passou a apresentar também uma componente de 60Hz de elevada intensidade, a qual diminuiu o efeito magnetizante do delta e, conseqüentemente, ocasionou a redução da corrente total consumida pelo reator. Tais observações são válidas tanto para o modelo de seis quanto para o de nove núcleos e acham-se reunidas na tabela 5.12. Quanto às correntes harmônicas triplas presentes no delta, nenhuma alteração em suas magnitudes foi registrada após o acréscimo dos filtros, como indica a tabela 5.13.

Caso em estudo	REATOR DE SEIS NÚCLEOS		REATOR DE NOVE NÚCLEOS	
	Valor eficaz da corrente de alimentação	Valor eficaz da componente de 60Hz no delta da unidade 1	Valor eficaz da corrente de alimentação	Valor eficaz da componente de 60Hz no delta da unidade 1

Tabela 5.12 – Alteração da magnitude da componente de 60Hz da corrente do delta em virtude do acréscimo de filtros sintonizados na freqüência do 12^o harmônico no reator de seis núcleos e de 18^o harmônico no reator de nove núcleos, na condição de plena carga (1,05 pu)

Caso em estudo	REATOR DE SEIS NÚCLEOS	REATOR DE NOVE NÚCLEOS
		Valor eficaz das correntes harmônicas triplas no delta da unidade 1

Tabela 5.13 – Magnitude das correntes harmônicas triplas presentes no delta com e sem a presença de filtros sintonizados na freqüência do 12^o harmônico no reator de seis núcleos e de 18^o harmônico no reator de nove núcleos, na condição de plena carga (1,05 pu)

- As correntes harmônicas características, de ordem $(2kn\pm 1) \forall k \in \mathbb{N}$, que eram praticamente nulas no delta, adquiriram uma elevada magnitude após a introdução dos filtros. No modelo de seis núcleos, tal fenômeno apresentou-se mais acentuado sobre as correntes harmônicas de

11^a e 13^a ordens, especialmente na de 11^o harmônico, conforme ilustra a tabela 5.14. Os filtros sintonizados na frequência do 18^o harmônico atuaram da mesma forma no reator de nove núcleos, aumentando a magnitude das correntes harmônicas características no delta, particularmente aquelas de 17^a e 19^a ordens, segundo o exposto na tabela 5.15. Foi através deste meio que os filtros atuaram no processo de compensação do reator: correntes harmônicas características foram introduzidas no delta, as quais cancelaram as componentes de ordem idêntica presentes na corrente de alimentação, não sendo a oposição de fase entre ambas um requisito para a ocorrência de tal fenômeno, de acordo com os dados reunidos nas tabelas 5.14 e 5.15.

REATOR DE SEIS NÚCLEOS COM EXCITAÇÃO PARALELA								
Caso em	Valor eficaz das componentes harmônicas características na corrente do delta da unidade 1				Valor eficaz das componentes harmônicas características na corrente de alimentação			
	11 ^o	13 ^o	23 ^o	25 ^o	11 ^o	13 ^o	23 ^o	25 ^o

Tabela 5.14 – Componentes harmônicas características observadas na corrente de alimentação e do delta antes e após a introdução de filtros sintonizados na frequência do 12^o harmônico, durante a operação do reator de seis núcleos em condição de carga normal (1,05 pu)

REATOR DE NOVE NÚCLEOS COM EXCITAÇÃO PARALELA								
Caso em	Valor eficaz das componentes harmônicas características na corrente do delta da unidade 1				Valor eficaz das componentes harmônicas características na corrente de alimentação			
	17 ^o	19 ^o	35 ^o	37 ^o	17 ^o	19 ^o	35 ^o	37 ^o

Tabela 5.15 – Componentes harmônicas características observadas na corrente de alimentação e do delta antes e após a introdução de filtros sintonizados na frequência do 18^o harmônico, durante a operação do reator de nove núcleos em condição de carga normal (1,05 pu)

O comportamento de ambos os reatores, compensados pelos seus respectivos

filtros, foi analisado para diferentes tensões de suprimento, variando de 1,00 a 1,12 pu, numa base de 500kV. Tanto a intensidade da corrente total consumida por cada reator quanto a composição harmônica da mesma, em Ampères e em valores percentuais da componente fundamental, foram solicitadas ao programa ATP e estão registradas nas tabelas 5.16 e 5.17, referentes aos modelos de seis e nove núcleos, respectivamente.

REATOR DE SEIS NÚCLEOS COM EXCITAÇÃO PARALELA											
Valor eficaz da tensão aplicada (pu)	Valor eficaz da corrente consumida pelo reator (A)	Conteúdo harmônico (%)					Conteúdo harmônico (A)				
		11 ^o	13 ^o	23 ^o	25 ^o	DHT	11 ^o	13 ^o	23 ^o	25 ^o	DHT
1,00	4,50	20,19	77,50	31,60	26,95	92,00	0,91	3,49	1,42	1,21	4,14
1,01	18,02	15,12	69,16	13,95	7,00	73,41	2,72	12,46	2,51	1,26	13,23

Tabela 5.16 – Conteúdo harmônico da corrente de alimentação do reator de seis núcleos compensado por filtros de 12^o harmônico (valores percentuais e em Ampères). em pontos de operação distintos. numa

REATOR DE NOVE NÚCLEOS COM EXCITAÇÃO PARALELA											
Valor eficaz da tensão aplicada (pu)	Valor eficaz da corrente consumida pelo reator (A)	Conteúdo harmônico (%)					Conteúdo harmônico (A)				
		17 ^o	19 ^o	35 ^o	37 ^o	DHT	17 ^o	19 ^o	35 ^o	37 ^o	DHT
1,00	5,52	11,22	20,53	3,24	2,52	45,60	0,62	1,13	0,18	0,14	2,52
1,01	23,49	10,20	16,07	4,01	3,96	24,88	2,40	3,77	0,94	0,93	5,84

Tabela 5.17 – Conteúdo harmônico da corrente de alimentação do reator de nove núcleos compensado por filtros de 18^o harmônico (valores percentuais e em Ampères). em pontos de operação distintos. numa

O efeito surtido pelos filtros de 12^o harmônico sobre o desempenho do reator de seis núcleos pode ser visualizado através das curvas plotadas nas figuras 5.9 e 5.10. Cada uma delas compara as intensidades das principais correntes harmônicas características antes e depois da introdução de filtros, para os diversos níveis de tensão de alimentação indicados nas tabelas 5.1 e 5.16. Observando-as, fica claro que a atuação dos filtros, na compensação do modelo de seis núcleos, foi bastante satisfatória ao longo da faixa de operação considerada, especialmente na redução do 11^o e 13^o harmônicos (figura 5.9).

Os mesmos registros gráficos foram feitos também para o reator contendo nove núcleos, estando apresentada, nas figuras 5.11 e 5.12, uma comparação entre as intensidades das correntes harmônicas predominantes em tal equipamento, a partir das informações contidas nas tabelas 5.2 e 5.17, sem qualquer tipo de compensação e com o uso de filtros sintonizados na frequência do harmônico de 18^a ordem. Para os níveis de tensão de alimentação considerados, os resultados da compensação harmônica produzida por tais filtros foram positivos, sendo mais pronunciados sobre as correntes harmônicas de 17^a e 19^a ordens, conforme indica a figura 5.11.

Os arquivos de entrada para a simulação no programa ATP dos reatores de seis e nove núcleos, compensados por filtros externos de 12^o e 18^o harmônicos, estão apresentados nos anexos V e VI, respectivamente. Os parâmetros referentes a cada filtro adotado acham-se listados a seguir:

- Reator de Seis Núcleos:

Parâmetros do filtro sintonizado na frequência do 12^o harmônico, introduzido em cada terminal da conexão em delta de todas as unidades trifásicas do reator:

Indutância do delta (enrolamento de N ₃ espiras) :	30,05 mH
Resistência do filtro:	0,001 Ω
Indutância do filtro (= 1,73·Indutância do delta) :	52,00 mH
Capacitância do filtro:	0,94 μF

- Reator de Nove Núcleos:

Parâmetros do filtro sintonizado na frequência do 18^o harmônico, introduzido em cada terminal da conexão em delta de todas as unidades trifásicas do reator:

Unidade trifásica 1:

Indutância do delta (enrolamento de N_3 espiras) : 19,00 mH
 Resistência do filtro: 0,001 Ω
 Indutância do filtro (= 2,0·Indutância do delta) : 38,00 mH
 Capacitância do filtro: 0,57 μ F

Unidades trifásicas 2 e 3:

Indutância do delta (enrolamento de N_3 espiras) : 43,20 mH
 Resistência do filtro: 0,001 Ω
 Indutância do filtro (= 2,0·Indutância do delta) : 86,4 mH
 Capacitância do filtro: 0,25 μ F

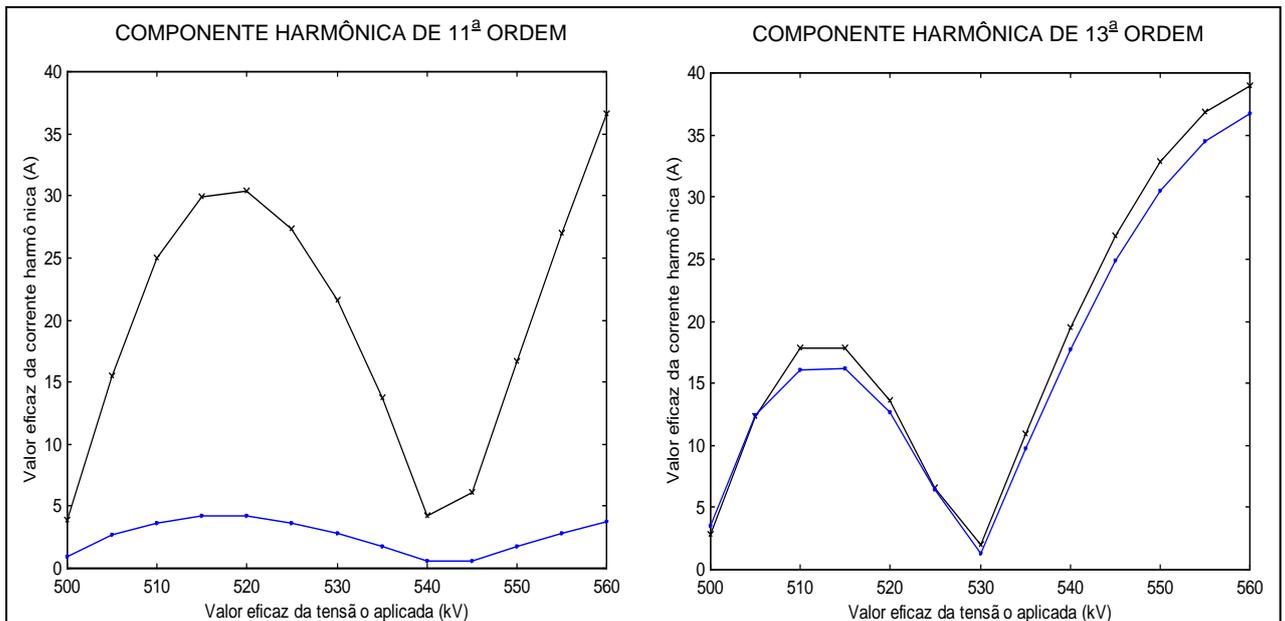


Figura 5.9 – Processo de compensação das componentes harmônicas de 11^a e 13^a ordens presentes na corrente total do reator de seis núcleos, antes e após a introdução de filtros sintonizados na frequência do 12^o harmônico, considerando-se uma faixa de operação entre 1,00 e 1,12 pu, numa base de 500kV

- Restauração da tensão de

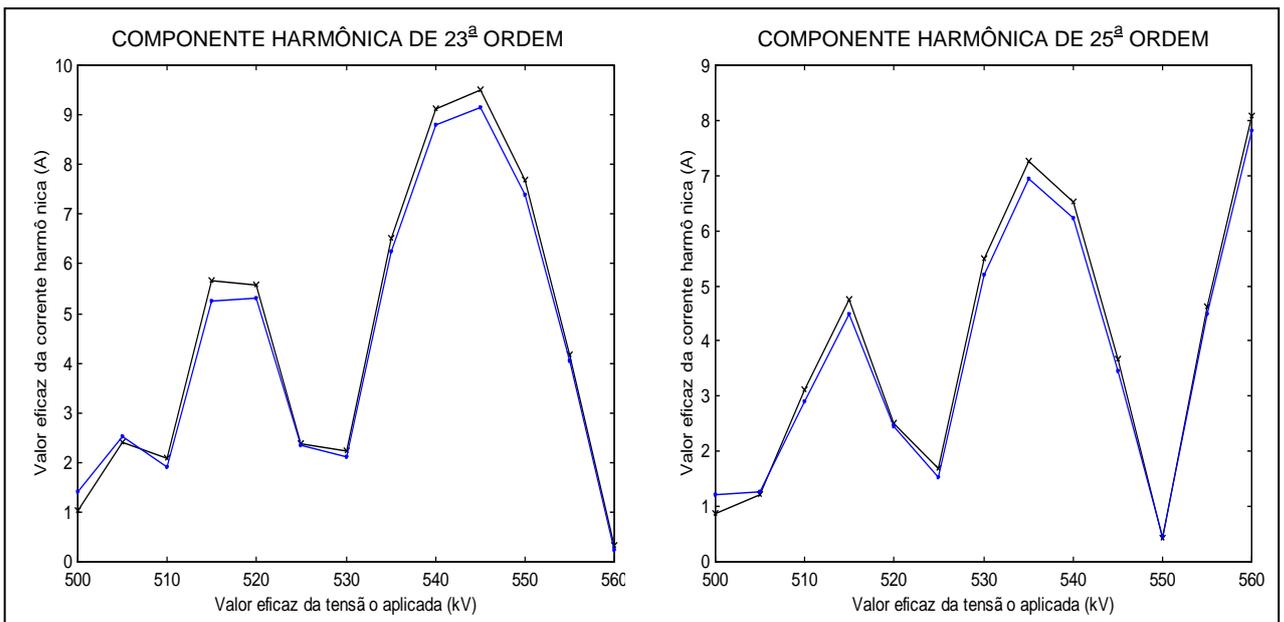


Figura 5.10 – Processo de compensação das componentes harmônicas de 23ª e 25ª ordens presentes na corrente total do reator de seis núcleos, antes e após a introdução de filtros sintonizados na frequência do 12º harmônico, considerando-se uma faixa de operação entre 1,00 e 1,12 pu, numa base de 500kV

• Restauração da tensão

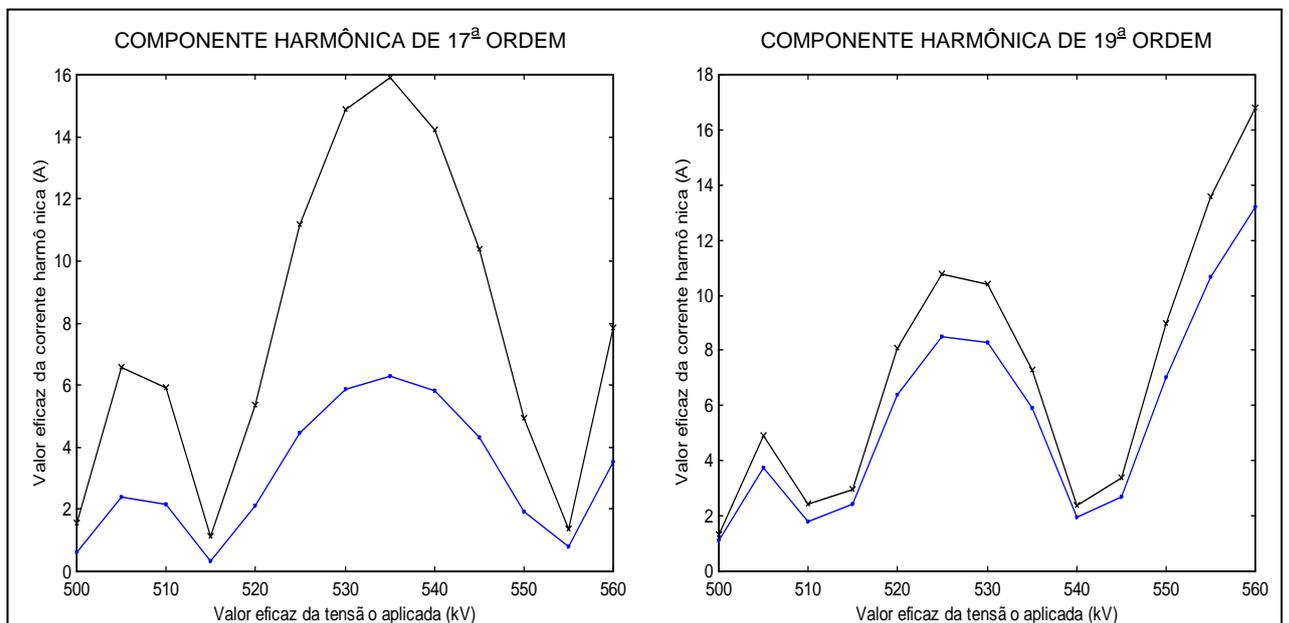


Figura 5.11 – Processo de compensação das componentes harmônicas de 17ª e 19ª ordens presentes na corrente total do reator de nove núcleos, antes e após a introdução de filtros sintonizados na frequência do 18º harmônico, considerando-se uma faixa de operação entre 1,00 e 1,12 pu, numa base de 500kV

• Restauração da tensão

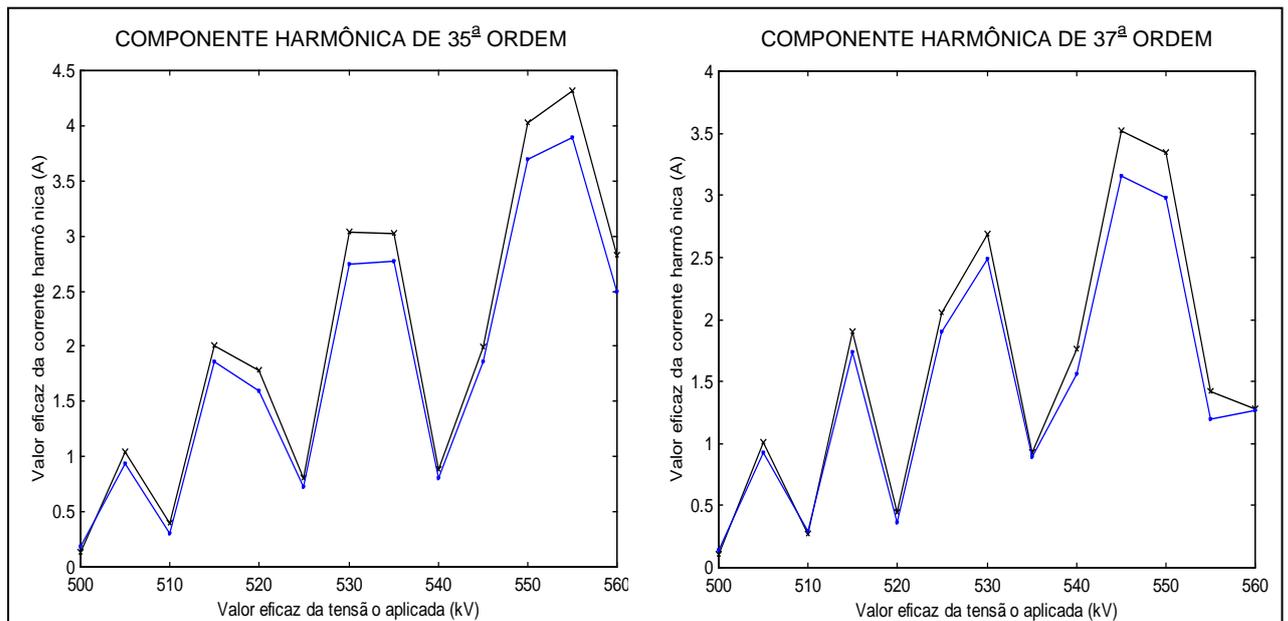


Figura 5.12 – Processo de compensação das componentes harmônicas de 35ª e 37ª ordens presentes na corrente total do reator de nove núcleos, antes e após a introdução de filtros sintonizados na frequência do 18º harmônico, considerando-se uma faixa de operação entre 1,00 e 1,12 pu, numa base de 500kV

As figuras 5.13 e 5.14, a seguir, apresentam, respectivamente, o espectro harmônico da corrente de alimentação dos reatores com seis e nove núcleos, em percentagem da componente fundamental, antes e após a introdução do esquema de compensação por filtros, para a condição de plena carga (1,05 pu).

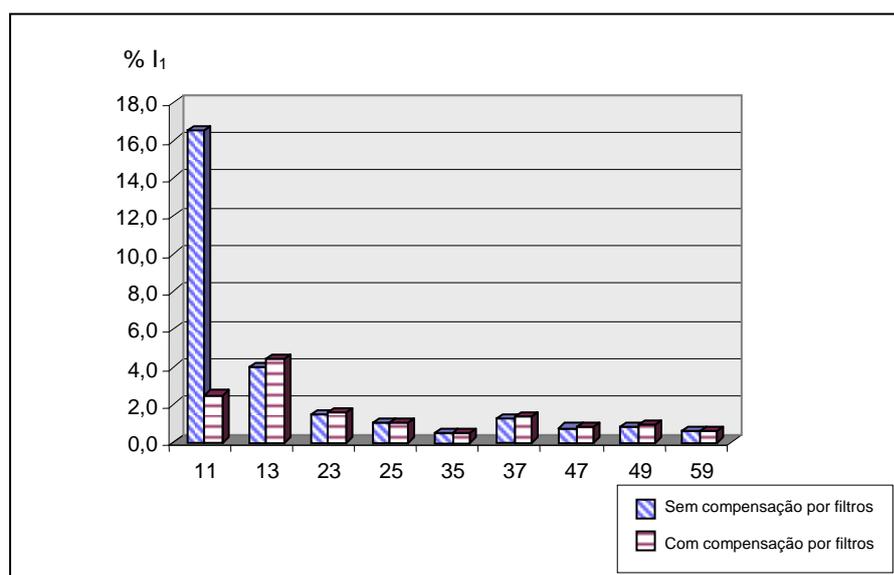


Figura 5.13 – Espectro harmônico da corrente de alimentação do reator de seis núcleos, antes e após a introdução de filtros sintonizados na frequência do 12º harmônico, na condição de plena carga (1,05 pu), numa

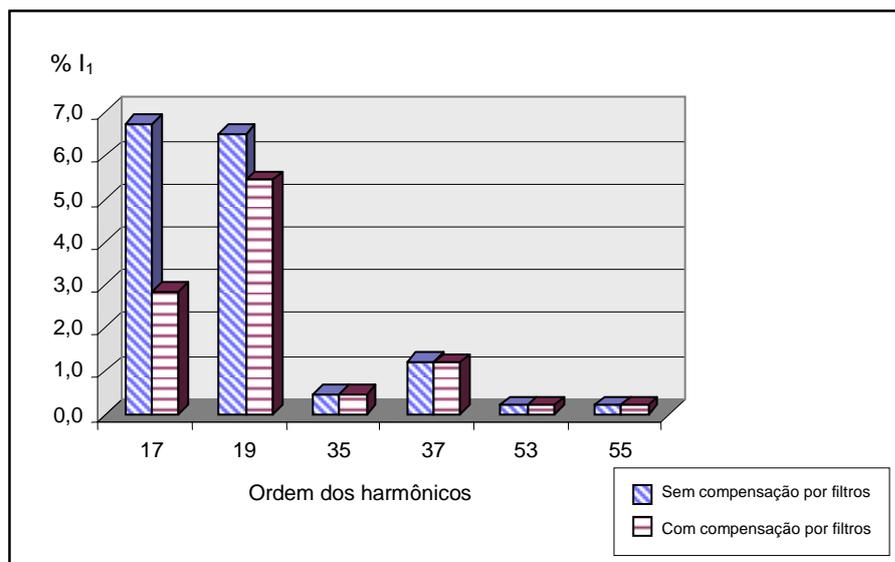


Figura 5.14 – Espectro harmônico da corrente de alimentação do reator de nove núcleos, antes e após a introdução de filtros sintonizados na frequência do 19º harmônico, na condição de plena carga (1,05 pu) numa

No decorrer das pesquisas envolvendo a compensação harmônica do reator saturado com excitação paralela, foi também analisado o efeito da variação da inclinação da característica $V \times I$ adotada sobre o desempenho deste equipamento. Como sobretensões de até 10% do valor nominal do sistema são ainda aceitáveis, para operação em regime permanente, outros reatores foram modelados, tomando-se, como ponto de partida para o projeto, inclinações superiores àquela de 5% na região de saturação, fixada no presente trabalho. Os resultados obtidos, referentes a estes novos equipamentos, encontram-se reunidos nas tabelas 5.18 (modelos contendo seis núcleos) e 5.19 (modelos contendo nove núcleos). Também foram fornecidos os parâmetros correspondentes aos reatores rotulados como ótimos no capítulo precedente, os quais acham-se em destaque em ambas as tabelas. Em todos os casos considerados, o joelho da característica $V \times I$ foi mantido em 1,00 pu (500kV), conforme o usual. Assegurou-se, também, que o consumo total de corrente pelos reatores estivesse no mesmo nível daquele estabelecido nas diretrizes de projeto apresentadas no capítulo 4, isto é, 165A, na condição de plena carga e, no máximo, 16,5A, na operação em vazio.

De acordo com o exposto nas tabelas 5.18 e 5.19, conclui-se que, para um valor constante de B_s , o aumento da inclinação da característica $V \times I$ reduz sensivelmente a distorção harmônica introduzida pelos reatores na corrente de alimentação, durante a condição de plena carga, e ainda promove uma notável redução do diâmetro e da altura dos núcleos dos modelos propostos, enquanto o comprimento de cada unidade permanece praticamente

inalterado. Para as inclinações mais acentuadas, a altura dos equipamentos sofre tamanha redução, que praticamente iguala-se àquela de um transformador de potência convencional.

REATOR DE SEIS NÚCLEOS							
Inclinação da característica $V \times I$	Parâmetros dos núcleos			Operação em vazio		Operação em plena carga	
	Bs (T)	Diâmetro (m)	Altura (m)	Corrente (A)	Distorção harmônica total (%)	Corrente (A)	Distorção harmônica total

Tabela 5.18 – Variação das dimensões físicas e do desempenho do reator saturado de seis núcleos em função do aumento da inclinação da característica $V \times I$ adotada

REATOR DE NOVE NÚCLEOS							
Inclinação da característica $V \times I$	Parâmetros dos núcleos			Operação em vazio		Operação em plena carga	
	Bs (T)	Diâmetro (m)	Altura (m)	Corrente (A)	Distorção harmônica total (%)	Corrente (A)	Distorção harmônica total

Tabela 5.19 – Variação das dimensões físicas e do desempenho do reator saturado de nove núcleos em função do aumento da inclinação da característica $V \times I$ adotada

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 – CONCLUSÕES GERAIS

O estudo sobre o reator saturado naturalmente, com excitação paralela, iniciou-se com a proposição de um algoritmo de projeto que lançou as bases para definição das dimensões físicas e do circuito elétrico equivalente do referido equipamento. De posse de tais informações, foi possível a determinação de um modelo digital que propiciou uma análise detalhada e confiável de muitos dos aspectos relacionados à pesquisa, através de simulações no programa ATP. Tal software, além de ser de domínio público, tornou-se, por sua credibilidade, uma tradição entre os engenheiros da área de sistemas de potência, além de oferecer um grau de flexibilidade que os modelos físicos em escala reduzida jamais seriam capazes de dispor.

A presença de enrolamentos secundários conectados em delta, em cada unidade do equipamento, mostrou-se indispensável, uma vez que a corrente de 3^o harmônico que circula através destes enrolamentos em malha fechada possui um efeito magnetizante que não só aumenta, como também altera o estado de saturação dos núcleos. Sem a conexão em delta, observou-se, em cada unidade trifásica do reator com excitação paralela, um processo de saturação idêntico àquele da modelagem série: apenas um núcleo fora da condição saturada por vez. Somente após a introdução delta foi constatado o comportamento característico da modelagem paralela, oposto àquele dos reatores série: um único núcleo saturado por vez, durante um período de 60° elétricos, em cada unidade trifásica. Verificou-se ainda que se o reator saturado com excitação paralela, operando sob a condição de plena carga, tiver suas conexões em delta abertas, a onda de fluxo magnético em cada núcleo perderá a sua natureza senoidal, o processo de geração dos pulsos de corrente em cada unidade trifásica será alterado e o consumo de potência reativa, por parte do equipamento, tornar-se-á praticamente nulo. Desta forma, para que, após a abertura de tais circuitos, as mesmas especificações de operação

sejam atendidas, um reajuste dos parâmetros físicos e elétricos do reator far-se-á necessário, especialmente no que tange à indução magnética B_s imposta aos núcleos, a qual irá adquirir valores extremamente elevados.

As dimensões físicas das unidades trifásicas que compõem o reator saturado diminuem com o aumento do número de núcleos presentes no equipamento. Devido a tal fato, uma comparação entre os dois modelos selecionados para análise no presente trabalho, contendo seis e nove núcleos, apontaram o reator de nove núcleos como sendo aquele mais adequado para a operação em níveis elevados de potência, em virtude de as unidades físicas do modelo contendo seis núcleos apresentarem altura e peso exagerados. Objetivando-se ter uma idéia da ordem de grandeza dos equipamentos aqui projetados, a estrutura única da unidade trifásica do modelo de nove núcleos (contendo N_1 , N_2 e N_3 espiras), de 50 MVAr, foi dividida em três unidades monofásicas individuais, garantindo-se um mesmo desempenho magnético. Cada uma delas apresentou 6,36m de altura, 4,96m de comprimento e 3,94m de largura, com um peso total (parte ativa) correspondendo a 144310kg. Uma unidade monofásica de um transformador típico de 500kV/100MVA possui cerca de 4,53m de altura, 4,60m de comprimento, 3,50m de largura e parte ativa pesando, aproximadamente, 61000kg. Como pode ser observado, as dimensões físicas do reator saturado com excitação paralela são, normalmente, superiores às daquelas de um transformador convencional, de potência aproximada. No caso do modelo de 150MVAr de nove núcleos, com a divisão das estruturas trifásicas em unidades monofásicas, obteve-se uma redução significativa de comprimento e, conseqüentemente, de peso, que, em primeira instância, não representam nenhuma restrição à construção de tal equipamento, se suas dimensões físicas forem comparadas às do transformador de potência mais elevada que se encontra atualmente em operação nos sistemas elétricos de 500kV.

Entretanto, caso a altura ou o peso sejam fatores que inviabilizem a confecção ou o transporte das unidades do reator, técnicas construtivas mais elaboradas serão necessárias. Uma outra opção, conforme foi aqui demonstrado, seria o aumento da inclinação da característica $V \times I$ adotada, o que promoveria uma redução considerável, não só da altura e do diâmetro dos núcleos do reator (permanecendo o comprimento das unidades praticamente inalterados), como também da distorção harmônica total que o mesmo introduz no sistema durante a sua operação na condição de plena carga. Uma outra possibilidade de redução das dimensões físicas do reator é a imposição de um valor mais elevado de indução magnética B_s

aos seus núcleos. Entretanto, a adoção de tal medida resultará no aumento da potência consumida pelo reator durante a sua operação em vazio, de acordo com as conclusões já obtidas no capítulo 4.

Da avaliação do desempenho dos dois reatores aqui selecionados, confirmou-se que, quanto maior o número de núcleos que compõem tais equipamentos, menor será a distorção harmônica introduzida na corrente de alimentação, uma vez que esta reunirá um maior número de pulsos, o que a tornará mais próxima de uma senóide. Para se promover a minimização do nível de harmônicos gerado pelos reatores, optou-se pela utilização de filtros externos, em cada terminal das conexões em delta presentes em tais equipamentos, obtendo-se resultados satisfatórios. No modelo de seis núcleos, filtros sintonizados na frequência do 12^o harmônico, com uma indutância igual a 1,73 vezes aquela do enrolamento de N_3 espiras do delta, reduziram a distorção harmônica total da corrente de alimentação de plena carga em torno de 70%, atuando, principalmente, sobre o harmônico característico de 11^a ordem. Já no modelo de nove núcleos, filtros sintonizados na frequência do 18^o harmônico, com uma indutância correspondente a 2,00 vezes aquela do delta, diminuíram em 30% tal distorção, combatendo tanto o 17^o quanto o 19^o harmônicos, sendo, porém, mais efetivos sobre o primeiro.

Em pesquisas anteriores, desenvolvidas pelo Grupo de Engenharia Elétrica e Sistemas de Potência da Universidade Federal de Pernambuco, alguns reatores saturados naturalmente com ligação série dos enrolamentos foram projetados e analisados. Dentre eles, optou-se por um modelo de nove núcleos, com inclinação de 5% na região de saturação (joelho em 500kV) e consumo de uma potência reativa de 150MVAR na condição de plena carga (525kV), para ser tomado para uma análise comparativa de comportamento em relação àquele de nove núcleos com excitação paralela e especificações de operação idênticas, estudado no presente trabalho. Estando ambos os reatores com seus enrolamentos secundários conectados em delta, sem qualquer esquema de compensação adicional e considerando-se a condição de plena carga, constatou-se que o modelo com excitação paralela, cujos núcleos possuem altura de 4,30m e diâmetro de 1,00m, injetam, na corrente de alimentação, uma distorção harmônica da ordem de 9,62%, inferior àquela de 16,55%, introduzida pelos modelos série, os quais encerram núcleos com 3,84m de altura e 0,53m de diâmetro. Entretanto, o esquema de compensação harmônica do reator série, patenteado pela G.E.C. e baseado na introdução de um reator auxiliar ao equipamento, apesar de mais dispendioso, mostrou-se de extrema eficiência em relação aos filtros de harmônicos sugeridos para a

modelagem paralela: com o reator auxiliar, a distorção harmônica observada na corrente de alimentação do modelo série foi reduzida para 3,75%, enquanto no reator com excitação paralela, o uso de filtros reduziu tal parâmetro para 6,80%. Diante do exposto, a opção por uma das duas formas construtivas de reator dependerá de uma ponderação entre a viabilidade de confecção de tais equipamentos e o desempenho dos mesmos quando em operação em um sistema elétrico de grande porte, avaliado através dos resultados fornecidos por um estudo detalhado de penetração harmônica.

6.2 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Desenvolvimento de novas simulações, envolvendo a aplicação, em um sistema elétrico de grande porte, dos reatores aqui modelados, possibilitando uma análise completa do desempenho de tais equipamentos no controle das tensões nos barramentos;
- Construção de um modelo reduzido de reator saturado com excitação paralela, objetivando não apenas a confirmação de todos os aspectos de projeto aqui abordados, como também as características operacionais deste equipamento observadas através das simulações desenvolvidas no programa ATP;
- Aplicação, na estrutura magnética, de materiais de novas tecnologias, como, por exemplo, os metais amorfos, que apresentam uma característica $B \times H$ com níveis de saturação mais baixos em relação àqueles dos aços de grãos orientados tradicionais;
- Otimização do algoritmo de projeto proposto, buscando, assim, uma redução das dimensões físicas do reator, tanto em decorrência do emprego de um menor volume de cobre e ferro, como da adoção de uma tecnologia de isolamento mais avançada;
- Introdução de enrolamentos adicionais ao reator, para, com o uso de eletrônica de potência, promover o controle do nível de saturação dos núcleos;
- Aperfeiçoamento do esquema de compensação por filtros, proposto neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AINSWORTH, J. D., FRIEDLANDER, E., RALLS, K. J. *Recent Developments towards Long Distance A.C. Transmission Using Saturated Reactors*. IEE International Conference on High Voltage D.C. and/or A.C. Power Transmission, Paper 107, London, 19th –23rd November, 1973.

ATP – ALTERNATIVE TRANSIENTS PROGRAM, Rule Book, 1987.

ARRILAGA, J., BRADLEY, D.A., BODGER, P.S. *Power System Harmonics*. 1st edition, John Wiley & Sons Ltd., 1989.

BECKER, H., BRANDES, D., GAPPA, K. *Three Phase Shunt Reactors with Continuously Controlled Reactive Current*. CIGRE, Proceedings of the 24th Session, Vol. 2, Paper 31-13, 1972.

BIKI, M. A., YARVIK, Ya. Ya. *Outlook for Creation of a Controlled Reactor for a Nominal Voltage of 1150kV, Power of 500-1000MVA*. Elektrotehnika, Vol. 62, N^o 2, p. 28-29, 1991.

CAMPONÊS DO BRASIL, D. O. *Aplicação de Reatores Saturados em Sistemas de Transmissão*. Tese de Mestrado, UFPE, Maio 1996.

CARVALHO JÚNIOR, M. A. *Steady-State Representation of Reactive Compensating in HVDC Converter Station*. Ph.D Thesis, UMIST, September 1983.

CEPEL. *Estudo Introdutório do Reator com Saturação Controlada (RSC)*. Relatório Técnico 903, Projeto 1100, Outubro 1997.

EVDOKUNIN, G. A., KORSHUNOV, Ye. V. *Computer Model and some Performances of Controlled Reactor for A.C. Power Transmission Lines*. St. Petersburg Technical University.

DALE, S.H., DUNHAM, C.R., FRIEDLANDER, E. *Square Wave Transformers and Their Use in Static Control of Mercury Arc Rectifiers*. G.E.C. Journal, Vol. 19, p. 229-238, October 1952.

DOMMEL, H. W., YAN, A., WEI, S. *Harmonics from Transformer Saturation*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PWRD-1, N^o 2, p. 209-215, April 1986.

EBERT, J.A. *Power Transformer Operation at Over and Underexcitation, Benefits and Consequences*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, N^o 1, p. 192-197, January 2000.

FERREIRA, F.M.C. *Aplicação de Reatores com Saturação Natural em Sistemas de Extra Alta Tensão*. Dissertação de Mestrado, Dezembro 1998.

FISHER, F. J., FRIEDLANDER, E. *D.C. Controlled 100 MVA Reactor*. GEC Journal, p. 93-104, April 1955.

FRIEDLANDER, E. *Principle and Analysis of a Stabilized Phase Multiplier Type of Magnetic Frequency Convertor*. Electrical Energy, Vol. 1, p. 55-66, October 1956.

FRIEDLANDER, E. *Static Network Stabilization: Recent Progress in Reactive Power Control*. G.E.C. Journal, Vol. 33, N^o 2, p. 58-65, 1956.

GEORGE, Y., SIRONI, A., HULSE, G. *Analytical and Numerical Modelling of Saturable Reactors*. ACEC Review, N^o 1-2, p. 29-44, 1978.

HUMPAGE, W.D., NGUYEN, T. T. *Saturated Reactor Compensator Model: Electromagnetic Transient Formulation for Main- and Auxiliary-Core Winding Systems*. IEE Proceedings, Vol. 134, N^o 3, p. 245-254, May 1987.

IEEE STD. 519-1992. *IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, USA, April 1993.

JOHNSON, L. J., RAUCH, S. E. *Magnetic Frequency Multiplier*. AIEE Transactions, Vol. 73, p. 448-452, March 1955.

KAWASAKI STEEL CORPORATION. *RG-H: High Magnetic Induction Grain Oriented Silicon Steel*.

MAGNATA DA FONTE, L. A. *Reatores Saturados: Alguns Aspectos Operacionais e de Projeto*. Tese de Mestrado, UFPE, Dezembro 1997.

REDL, R., TENTI, P., WYK, J. D. V., *Power Electronics' Polluting Effects*. IEEE Spectrum, May 1997.

SAY, M. G. *Alternating Current Machines*. Pitman Publishing, 4th edition, London, 1976.

SIRONI, G. G., VAN HULSE, J. R. *Transient Behaviour of a Static Compensator with Ferromagnetic Non-Linearity*. IEEE Transaction on Magnetics, Vol. MAG-13, N^o 5, p. 1299-1301, September 1977.

SMITH, O. J. M., SALIHI, J. T. *Analysis and Design of Magnetic Frequency Multiplier*. AIEE Transactions, Vol. 74, N^o 5, p. 99-106, March 1955.

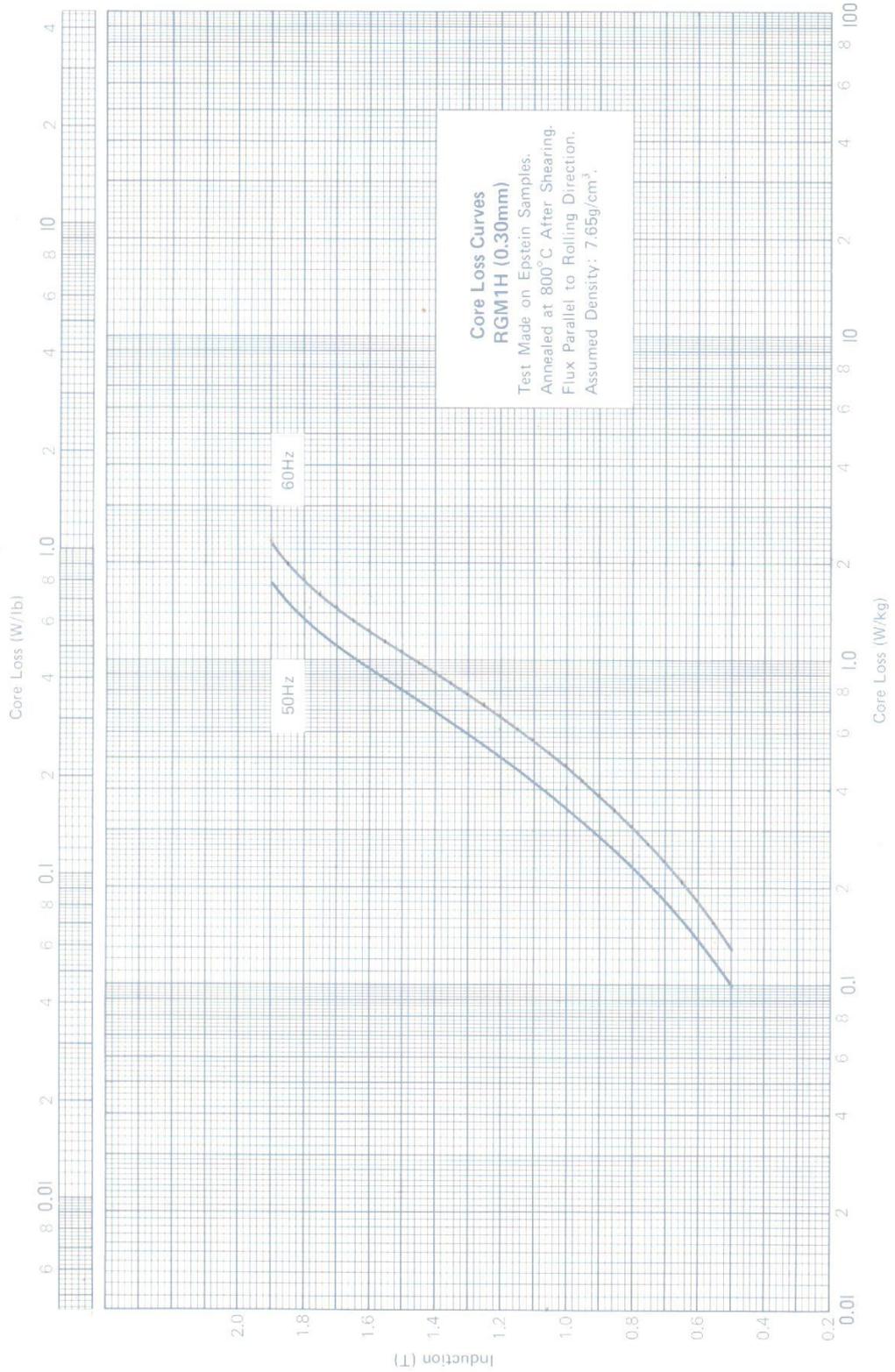
THANAWALA, H. L., WILLIAMS, W. P., YOUNG, D. J. *Static Reactive Compensators for A.C. Power Transmission: Ten Years' Operational Experience with Saturated Reactors*. G.E.C Journal of Science & Technology, Vol. 45, N^o 3, 1978.

VLADISLAVLEV, M. N., POOL, A. T., TELLINEN, Yu. Yu., YARVIK, Ya. Ya. *Anticipated Technical-Economic Indices of a 525kV, 180MVA Saturated Reactor. Elektrotehnika*, Vol. 62, N^o 2, p. 37-39, 1991.

YILDIRIM, D., FUCHS, E. F. *Measured Transformer Derating and Comparison with Harmonic Loss Factor (F_{HL}) Approach. IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 15, N^o 1, p. 186-191, January 2000.

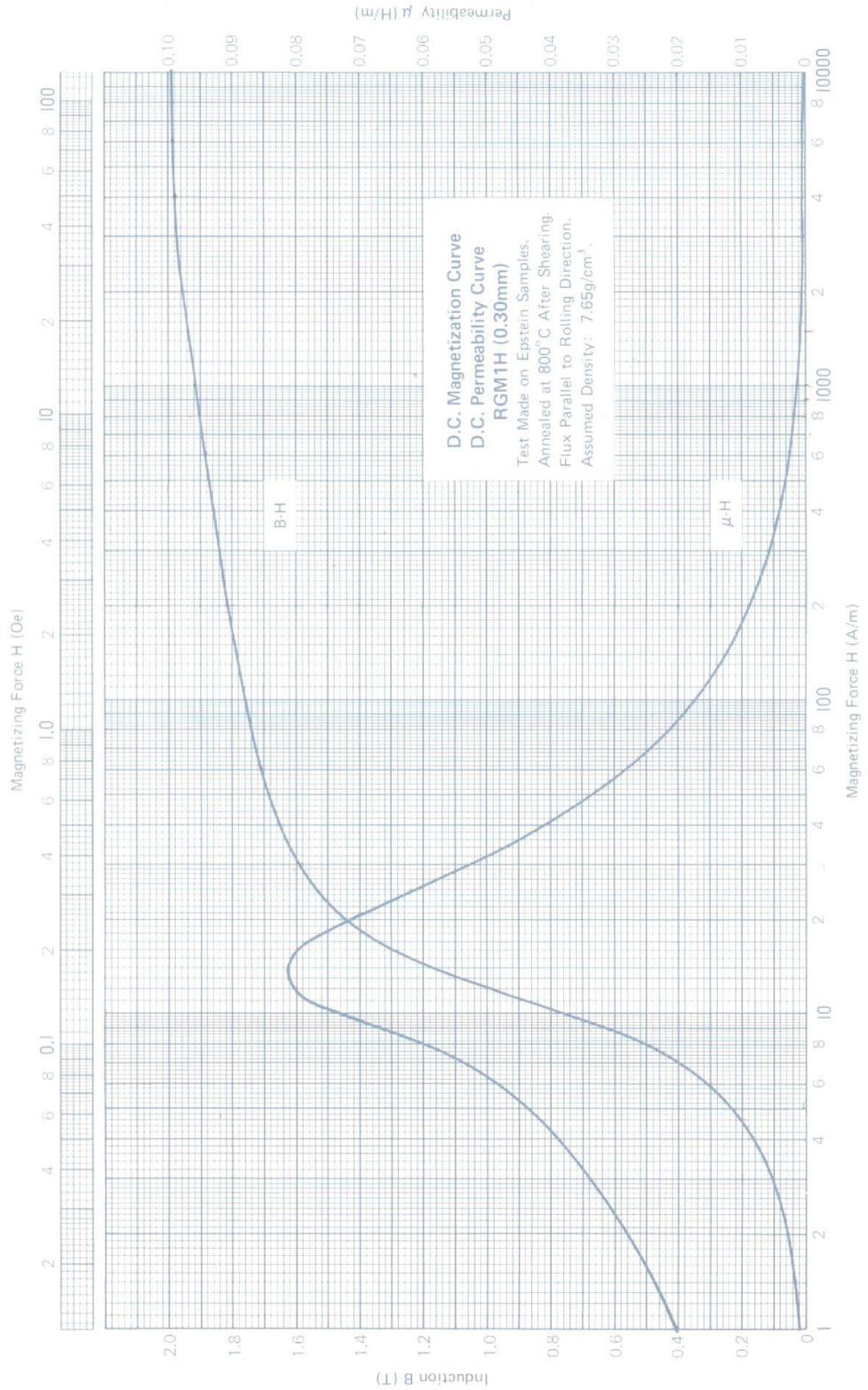
ANEXO I – Curva de Perdas Específicas no Núcleo

Fonte: Kawasaki Steel Corporation



ANEXO II – Curva de Magnetização Adotada para o Ferro

Fonte: Kawasaki Steel Corporation



ANEXO III - Arquivo de Entrada para Simulação do Reator de Seis Núcleos no ATP
(Alimentação por Fonte de Tensão de 1,05 pu, numa Base de 500 kV)

BEGIN NEW DATA CASE

C

=====
=====

C REATOR DE SEIS NUCLEOS COM DELTA FECHADO SEM COMPENSACAO POR
FILTROS DE C HARMONICOS

C TENSÃO DA FONTE DE SUPRIMENTO: 525KV (CONDICAO DE PLENA CARGA)

C POTENCIA REATIVA CONSUMIDA EM PLENA CARGA: 150MVAR

C

=====
===

C

C

POWER FREQUENCY 60.

1.0E-6 50.E-2 60.

0500 10 1 1 1 0 0 2

0

C 1 2 3 4 5 6

7 8

C

3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
1234567890

C

=====
=====

C SEGMENTO TACS

C

=====
=====

TACS HYBRID

C

C BLOCOS DE FUNCOES

C

C ANALISE DE FLUXO, INDUCAO MAGNETICA, CORRENTE, FORCA MAGNETOMOTRIZ
E TENSOES C NA UNIDADE 1, COM ANALISE DE FOURIER DE CADA SAIDA TACS

C

C INDUCOES MAGNETICAS NOS NUCLEOS DA UNIDADE 1 DO REATOR

C

C BMAG = FLUXO/AREA

BMAG1	+FLUXO1		1.250
BMAG2	+FLUXO2	1.250	
BMAG3	+FLUXO3		1.250
C BMAG4	+FLUXO4		1.250
C BMAG5	+FLUXO5		1.250
C BMAG6	+FLUXO6		1.250

C

C TENSÃO ENTRE OS TERMINAIS DOS ENROLAMENTOS PRIMÁRIOS DE CADA NÚCLEO DA
UNIDADE C 1 DO REATOR

C

VENR1	+CURR1	-TERM21	1.0000
VENR2	+CURR5	-TERM22	1.0000
VENR3	+CURR3	-TERM41	1.0000
C VENR4	+CURR6	-TERM14	1.0000
C VENR5	+CURR4	-TERM15	1.0000
C VENR6	+CURR2	-TERM16	1.0000

C

C FLUXO MAGNETICO DETERMINADO A PARTIR DA TENSÃO ENTRE OS TERMINAIS DOS
C ENROLAMENTOS PRIMÁRIOS DA UNIDADE 1

C

1FLUXO1	+VENR1		1.0000
---------	--------	--	--------

1.0

	556.0	
1FLUXO2	+VENR2	1.0000
1.0		
	556.0	
1FLUXO3	+VENR3	1.0000
1.0		
	556.0	
C 1FLUXO4	+VENR4	1.0000
C 1.0		
C	556.0	
C 1FLUXO5	+VENR5	1.0000
C 1.0		
C	556.0	
C 1FLUXO6	+VENR6	1.0000
C 1.0		
C	556.0	
C		
C FORCAS MAGNETOMOTRIZES NA FASE A		
C		
N1IA1	+TERMK1	556.0
N3I1	+CH1	340.0
N2IA3	+TERMK3	204.0
N1IA6	+TERMK2	556.0
N2IB5	+TERMK4	204.0
N3I6	+CH3	340.0
N1IB2	+TERMK5	556.0
N2IA1	+TERMK1	204.0
N1IC3	+TERMK3	556.0
N2IB2	+TERMK5	204.0

N1IC6	+TERMK6			556.0
N2IA6	+TERMK2			204.0
N1IB5	+TERMK4			556.0
N2IC4	+TERMK6			204.0

C

C FMM NO NUCLEO I, II E III (ENROLAMENTOS PRIMARIOS E SECUNDARIO (DELTA))

C

FMMI	+N1IA1	-N2IA3	-N3I1	1.0000
FMMII	+N1IB2	-N2IA1	-N3I1	1.0000
FMMIII	+N1IC3	-N2IB2	-N3I1	1.0000
C FMMIV	+N1IC6	-N2IA6	-N3I6	1.0000
C FMMV	+N1IB5	-N2IC4	-N3I6	1.0000
C FMMVI	+N1IA6	-N2IB5	-N3I6	1.0000

C

C FONTES

C

90CURR1

90TERM21

90CURR5

90TERM22

90CURR3

90TERM41

C 90CURR6

C 90TERM14

C 90CURR4

C 90TERM15

C 90CURR2

C 90TERM16

91TERMK1

91TERMK2

91TERMK3

91TERMK4

91TERMK5

91TERMK6

91CH1

91CH3

C

C SAIDAS

C

C 33BMAG1

C 33BMAG2

C 33BMAG3

C 33BMAG4

C 33BMAG5

C 33BMAG6

C 33FLUX01

C 33FLUX02

C 33FLUX03

C 33FLUX04

C 33FLUX05

C 33FLUX06

C 33FMMI

C 33FMMII

C 33FMMIII

C 33FMMIV

C 33FMMV

C 33FMMVI

C

C CONDIC0ES INICIAIS

C

77BMAG2 0.0

77BMAG1 0.0

77BMAG3 0.0

C 77BMAG4 0.0

C 77BMAG5 0.0

C 77BMAG6 0.0

77FLUXO1 0.0

77FLUXO2 0.0

77FLUXO3 0.0

C 77FLUXO4 0.0

C 77FLUXO5 0.0

C 77FLUXO6 0.0

BLANK

C

C

=====
=====

C FINALIZACAO DO SEGMENTO TACS

C

=====
=====

C

/BRANCH

C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >

C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><>0

C

C RESISTENCIA DE FONTE

C

SRCEA TERM11 0.001
1

SRCEB TERM12 0.001

SRCEC TERM13 0.001

C

C RESISTENCIA ANTERIOR AS CHAVES

C

TERM11TERMK1 1.E-9

TERM11TERMK2 1.E-9

TERM13TERMK3 1.E-9

TERM12TERMK4 1.E-9

TERM12TERMK5 1.E-9

TERM13TERMK6 1.E-9

TERM61CH1 1.E-9

TERM64CH3 1.E-9

C

C ACRESCIMO DE NO FICTICIO PARA RETIRADA DO SINAL DA ROTINA TACS E
INTRODUCAO DO

C MESMO NA REDE ELETRICA

C

FMMI 1.000

FMMII 1.000

FMMIII 1.000

C FMMIV 1.000

C FMMV 1.000

C FMMVI 1.000

BMAG1 1.000

BMAG2 1.000

BMAG3 1.000

C BMAG4 1.000

C BMAG5 1.000
C BMAG6 1.000
FLUXO1 1.000
FLUXO2 1.000
FLUXO3 1.000
C FLUXO4 1.000
C FLUXO5 1.000
C FLUXO6 1.000

C

C =====

C TRANSFORMADORES MONOFASICOS DE TRES ENROLAMENTOS

C =====

C

C Io: Cols 27-32 Fo: 33-38 Rmag: 45-50 R: 27-32 L: 33-38 V: 39-44

C Terminal 1: Cols 3-8 Terminal 2: Cols 9-14

C

C

C *** NUCLEO 1 ***

C

TRANSFORMER 0.0106 8.9TRANS11.00E9

0

1.05575540e-002 8.89600000e+000
2.11151079e-002 2.66880000e+001
3.16726619e-002 4.44800000e+001
4.22302158e-002 7.11680000e+001
6.33453237e-002 1.33440000e+002
8.44604317e-002 2.22400000e+002
1.05575540e-001 3.38048000e+002
2.11151079e-001 6.40512000e+002

3.16726619e-001 7.11680000e+002
4.43417266e-001 7.38368000e+002
6.33453237e-001 7.60608000e+002
8.44604317e-001 7.73952000e+002
1.05575540e+000 7.82848000e+002
2.11151079e+000 8.09536000e+002
4.22302158e+000 8.27328000e+002
6.33453237e+000 8.36224000e+002
8.44604317e+000 8.45120000e+002
9.50179856e+000 8.49568000e+002
2.11151079e+001 8.71808000e+002
4.22302158e+001 8.80704000e+002
6.33453237e+001 8.82038400e+002
8.44604317e+001 8.83372800e+002
1.05575540e+002 8.84707200e+002
1.12332374e+002 8.85152000e+002
1.79478417e+002 8.89600000e+002
8.86834532e+002 9.34080000e+002
1.59419065e+003 9.78560000e+002
8.66775180e+003 1.33440000e+003

9999

1CURRE1 TERM21	2.336	-0.50	556.0
2TERM31TERM41	1.239	8.27	204.0
3TERM51TERM61	0.484	11.33	340.0

C

C

C *** NUCLEO 2 ***

C

TRANSFORMER TRANS1

TRANS2

1CURR5 TERM22

2TERM31TERM21

3TERM52TERM51

C

C

C *** NUCLEO 3 ***

C

TRANSFORMER TRANS1

TRANS3

1CURR3 TERM41

2TERM31TERM22

3CH2 TERM52

C

C

C *** NUCLEO 4 ***

C

TRANSFORMER TRANS1

TRANS4

1CURR6 TERM14

2TERM44TERM16

3TERM54TERM64

C

C

C *** NUCLEO 5 ***

C

TRANSFORMER TRANS1

TRANS5

1CURR4 TERM15

2TERM44TERM14

3TERM55TERM54

C

C

C *** NUCLEO 6 ***

C

TRANSFORMER TRANS1

TRANS6

1CURR2 TERM16

2TERM44TERM15

3CH4 TERM55

C

C

C RESISTENCIA DO NEUTRO DO REATOR

C

TERM31 1.0E9

TERM44 1.0E9

C

C RESISTENCIA NOS DELTAS DOS SECUNDARIOS

C

TERM61 1.0E9

TERM64 1.0E9

C

C

=====
=====

C ACRESCIMO DE CHAVES ENTRE OS TERMINAIS DA FASE "A" PARA A
VERIFICACAO DA COR-

C RENTE E DA COMPENSACAO DE HARMONICOS, RESULTANDO NO THD TOTAL DA
FASE "A" DA

C LINHA (SRCEA-TERM11)

C

=====
=====

C

/SWITCH

C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >

TERMK1CURR1 -1. 20.

1

TERMK2CURR2 -1. 20.

1

TERMK3CURR3 -1. 20.

1

TERMK4CURR4 -1. 20.

1

TERMK5CURR5 -1. 20.

1

TERMK6CURR6 -1. 20.

1

CH1 CH2 -1. 20.

1

CH3 CH4 -1. 20.

1

C

/SOURCE

C < n 1><>< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART
>< TSTOP >

14SRCEA 0 428660. 60. 0. -
1. 10.

14SRCEB 0 428660. 60. -120. -
1. 10.

14SRCEC 0 428660. 60. 120. -
1. 10.

60FMMI

60FMMII

60FMMIII

C 60FMMIV

C 60FMMV

C 60FMMVI

60BMAG1

60BMAG2

60BMAG3

C 60BMAG4

C 60BMAG5

C 60BMAG6

60FLUXO1

60FLUXO2

60FLUXO3

C 60FLUXO4

C 60FLUXO5

C 60FLUXO6

BLANK BRANCH

BLANK SWITCH

BLANK SOURCE

C SAIDAS

FMMI FMMII FMMIIIBMAG1 BMAG2 BMAG3 FLUXO1FLUXO2FLUXO3

C FMMIV FMMV FMMVI BMAG4 BMAG5 BMAG6 FLUXO4FLUXO5FLUXO6

SRCEA

BLANK OUTPUT

C

C

=====
=====

C ANALISE DE FOURIER

C

=====
=====

C

FOURIER ON 60

C 1 2 3 4 5 6
7 8

C
34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
1234567890

C =====

C CORRENTE DE RAMO

C =====

194	13.430.0	SRCEA TERM11	
	5.0	483.3333	500.0

194	13.430.0	CH1 CH2	
	5.0	483.3333	500.0

C =====

C FORCAS MAGNETOMOTRIZES NA FASE A

C =====

144	13.430.0	FMMI	
	5.0	483.3333	500.0

C 144	13.430.0	FMMVI	
C	5.0	483.3333	500.0

C =====

C FLUXO E INDUCAO MAGNETICA

C =====

144	13.430.0	BMAG1	
	5.0	483.3333	500.0

144	13.430.0	BMAG2	
	5.0	483.3333	500.0

144	13.430.0	FLUXO1	
	5.0	483.3333	500.0

144	13.430.0	FLUXO2	
	5.0	483.3333	500.0

BLANK

BLANK PLOT

BEGIN NEW DATA case

BLANK

C

C

C

=====
=====

C

PARAMETROS ADOTADOS

C

=====
=====

C SPLENA --> 150.0 MVA

C VPLENA --> 525.0 KV

C BS --> 1.991 T

C HS --> 11273.00 A.espira/m

C IPLENA --> 164.9572 A

C IVAZIO --> 8.2479 A

C

=====
=====

C

DETERMINACAO DO NUMERO DE ESPIRAS

C

=====
=====

C SECAO DO NUCLEO --> 0.8000 m2

C DIAMETRO DO NUCLEO --> 1.0093 m

C ALTURA DO NUCLEO --> 5.8700 m

C No --> 680 espiras

C N1 --> 556 espiras

C N2 --> 204 espiras

C N3 --> 340 espiras

C

=====
=====

C DIMENSOES DOS CONDUTORES

C

=====
=====

C * Enrolamentos 0,1 e 2(primario):

C s12(secao co condutor calculada) --> 27.4929 mm2

C lc12(largura do condutor) --> 5.8270 mm

C hc12 --> 5.1900 mm

C a12 (secao obtida)--> 29.6000 mm2

C ncond1 --> 1 condutores

C ncond2 --> 1 condutores

C * Enrolamento 3(secundario):

C I3 --> 164.9572 A

C s3(secao calculada) --> 54.9857 mm2

C lc3 --> 9.2660 mm

C hc3 --> 6.5440 mm

C a3(secao obtida) --> 58.6000 mm2

C ncond3 --> 1 condutores

C

=====
=====

C ARQUITETURA DOS ENROLAMENTOS DO REATOR

C

=====
=====

C * Isolacao:

C Ya --> 365.4347 mm

C Yb --> 259.7840 mm

C Yc --> 60.9380 mm

C Yd --> 720.6835 mm

C * Isolamento entre espiras para os enrolamentos primarios(No, N1 e N2):

C Ye12 --> 6.0622 mm
C * Isolamento entre espiras para o enrolamento secundario(N3):
C Ye3 --> 3.5467 mm
C * Execucao do enrolamento:
C Le --> 4.4286 m
C Area da travessa --> 1.0619 m
C Area da trajetoria de retorno --> 0.5309 m
C Diametro da travessa --> 1.0305 m
C Diametro da trajetoria de retorno --> 0.5152 m
C Profundidade da travessa e do retorno --> 1.0305 m

C
=====

COMPOSICAO DOS ENROLAMENTOS

C
=====

C * Enrolamento N1:
C lb1 --> 11.9892 mm
C hb1 --> 22.7044 mm
C ncam1 --> 2 camadas
C Ncond1 --> 278 condutores
C nbob1 --> 278 bobinas
C * Enrolamento N2:
C lb2 --> 11.9892 mm
C hb2 --> 11.3522 mm
C ncam2 --> 1 camadas
C Ncond2 --> 204 condutores
C nbob2 --> 204 bobinas
C * Enrolamento N3:

C lb3 --> 12.9127 mm
C hb3 --> 10.1907 mm
C ncam3 --> 1 camadas
C Ncond3 --> 340 condutores
C nbob3 --> 340 bobinas

C

=====
=====

C INDUTANCIA DOS ENROLAMENTOS(nucleo de tres enrolamentos)

C

=====
=====

C * Reatancias referidas ao enrolamento N1:

C X1 --> -0.4985 ohms

C X2 --> 8.2654 ohms

C X3 --> 11.3334 ohms

C

=====
=====

C RESISTENCIA DOS ENROLAMENTOS

C

=====
=====

C * Enrolamento 1:

C Rca1 --> 2.3357 ohms

C * Enrolamento 2:

C Rca2 --> 1.2387 ohms

C * Enrolamento 3:

C Rca3 --> 0.4836 ohms

ANEXO IV - Arquivo de Entrada para Simulação do Reator de Nove Núcleos no ATP
(Alimentação por Fonte de Tensão de 1,05 pu, numa Base de 500 kV)

BEGIN NEW DATA case

C

=====
=====

C REATOR DE NOVE NUCLEOS COM DELTA FECHADO SEM COMPENSACAO POR
FILTROS DE C HARMONICOS

C TENSÃO DA FONTE DE SUPRIMENTO: 525KV (CONDICAO DE PLENA CARGA)

C POTENCIA REATIVA CONSUMIDA EM PLENA CARGA: 150MVAR

C

=====
===

C

C

POWER FREQUENCY 60.

1.0E-5 50.E-2 60.
0500 01 1 1 1 0 0 2
0

C 1 2 3 4 5 6
7 8

C

3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
1234567890

C

=====
=====

C SEGMENTO TACS

C

=====
=====

TACS HYBRID

C

C BLOCOS DE FUNCOES

C

C ANALISE DE FLUXO, INDUCAO MAGNETICA, CORRENTE, FORCA MAGNETOMOTRIZ
E TENSOES C NA UNIDADE 1, COM ANALISE DE FOURIER DE CADA SAIDA TACS

C

C INDUCOES MAGNETICAS NOS NUCLEOS DA UNIDADE 1 DO REATOR

C

C BMAG = FLUXO/AREA

BMAG1	+FLUXO1	1.266
BMAG2	+FLUXO2	1.266
BMAG3	+FLUXO3	1.266

C

C TENSÃO ENTRE OS TERMINAIS DOS ENROLAMENTOS PRIMARIOS DE CADA NUCLEO DA
UNIDADE C 1 DO REATOR

C

VENR1	+TERMK1 -TERM21	1.0000
VENR2	+TERMG2 -TERM21	1.0000
VENR3	+TERMG4 -TERM21	1.0000

C

C FLUXO MAGNETICO DETERMINADO A PARTIR DA TENSÃO ENTRE OS TERMINAIS DOS
C ENROLAMENTOS PRIMÁRIOS DA UNIDADE 1

1FLUXO1	+VENR1	1.0000
1.0		
	689.0	
1FLUXO2	+VENR2	1.0000
1.0		
	689.0	
1FLUXO3	+VENR3	1.0000

1.0

689.0

C

C FORCAS MAGNETOMOTRIZES NA UNIDADE 1

C

NOIA1	+TERMK6		689.0
N3I1	+CH4		345.0
NOIB1	+TERMG1		689.0
NOIC1	+TERMG3		689.0
FMMI	+NOIA1	-N3I1	1.0000
FMMII	+NOIB1	-N3I1	1.0000
FMMIII	+NOIC1	-N3I1	1.0000

C

C FONTES

C

90TERMK1

90TERM21

90TERMG2

90TERMG4

91TERMK6

91TERMG1

91TERMG3

91CH4

C

C SAIDAS

C

C 33BMAG2

C 33FLUXO1

C 33FLUXO2

C 33BMAG1

C 33FMMI

C 33FMMIV

C 33FMMVII

C 33VENR1

C 33VENR2

C

C CONDICOOES INICIAIS

C

77BMAG2 0.0

77BMAG1 0.0

77BMAG3 0.0

77FLUXO1 0.0

77FLUXO2 0.0

77FLUXO3 0.0

BLANK

C

=====
=====

C FINALIZACAO DO SEGMENTO TACS

C

=====
=====

/BRANCH

C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >

C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><>0

C

C RESISTENCIA DE FONTE

C

SRCEA TERM11	0.001
1	
SRCEB TERM12	0.001
SRCEC TERM13	0.001

C

C RESISTENCIA ANTERIOR AS CHAVES

C

TERM11TERMK6	1.E-9
TERM11TERMK7	1.E-9
TERM11TERMK9	1.E-9
TERM12TERMK0	1.E-9
TERM12TERMG1	1.E-9
TERM12TERMG5	1.E-9
TERM13TERMK8	1.E-9
TERM13TERMG3	1.E-9
TERM13TERMG7	1.E-9
TERM61CH4	1.E-9
TERM62CH5	1.E-9
TERM63CH6	1.E-9

C

C ACRESCIMO DE NO FICTICIO PARA RETIRADA DO SINAL DA ROTINA TACS E
INTRODUCAO DO

C MESMO NA REDE ELETRICA

C

FMMI	1.000
FMMII	1.000
FMMIII	1.000
BMAG1	1.000
BMAG2	1.000

BMAG3 1.000
FLUXO1 1.000
FLUXO2 1.000
FLUXO3 1.000
CURRU1 1.000

C

C =====

C TRANSFORMADORES MONOFASICOS DE DOIS E TRES ENROLAMENTOS

C =====

C

C Io: Cols 27-32 Fo: 33-38 Rmag: 45-50 R: 27-32 L: 33-38 V: 39-44

C Terminal 1: Cols 3-8 Terminal 2: Cols 9-14

C

C UNIDADE DE DOIS ENROLAMENTOS-MODELO1

C

C *** NUCLEO 1 ***

C

TRANSFORMER 0.0062 10.9TRANS11.00E9

0

6.24092888e-003 1.08862000e+001

1.24818578e-002 3.26586000e+001

1.87227866e-002 5.44310000e+001

2.49637155e-002 8.70896000e+001

3.74455733e-002 1.63293000e+002

4.99274311e-002 2.72155000e+002

6.24092888e-002 4.13675600e+002

1.24818578e-001 7.83806400e+002

1.87227866e-001 8.70896000e+002

2.62119013e-001 9.03554600e+002

3.74455733e-001 9.30770100e+002
4.99274311e-001 9.47099400e+002
6.24092888e-001 9.57985600e+002
1.24818578e+000 9.90644200e+002
2.49637155e+000 1.01241660e+003
3.74455733e+000 1.02330280e+003
4.99274311e+000 1.03418900e+003
5.61683599e+000 1.03963210e+003
1.24818578e+001 1.06684760e+003
2.49637155e+001 1.07773380e+003
3.74455733e+001 1.07936673e+003
4.99274311e+001 1.08099966e+003
6.24092888e+001 1.08263259e+003
6.64034833e+001 1.08317690e+003
1.06095791e+002 1.08862000e+003
5.24238026e+002 1.14305100e+003
9.42380261e+002 1.19748200e+003
5.12380261e+003 1.63293000e+003

9999

1TERMK1TERM21 4.394 35.90 689.0

2TERM51TERM61 0.740 7.15 345.0

C

C *** NUCLEO 2 ***

C

TRANSFORMER TRANS1

TRANS2

1TERMG2TERM21

2TERM52TERM51

C

C

C *** NUCLEO 3 ***

C

C

TRANSFORMER TRANS1

TRANS3

1TERMG4TERM21

2CH1 TERM52

C

C

C UNIDADES COM 3 ENROLAMENTOS POR NUCLEO - MODELO 2

C

C

C *** NUCLEO 4 ***

C

C

TRANSFORMER 0.0084 8.1TRANS41.00E9

0

8.39843750e-003 8.08960000e+000

1.67968750e-002 2.42688000e+001

2.51953125e-002 4.04480000e+001

3.35937500e-002 6.47168000e+001

5.03906250e-002 1.21344000e+002

6.71875000e-002 2.02240000e+002

8.39843750e-002 3.07404800e+002

1.67968750e-001 5.82451200e+002

2.51953125e-001 6.47168000e+002

3.52734375e-001 6.71436800e+002

5.03906250e-001 6.91660800e+002

6.71875000e-001 7.03795200e+002

8.39843750e-001 7.11884800e+002

1.67968750e+000 7.36153600e+002
3.35937500e+000 7.52332800e+002
5.03906250e+000 7.60422400e+002
6.71875000e+000 7.68512000e+002
7.55859375e+000 7.72556800e+002
1.67968750e+001 7.92780800e+002
3.35937500e+001 8.00870400e+002
5.03906250e+001 8.02083840e+002
6.71875000e+001 8.03297280e+002
8.39843750e+001 8.04510720e+002
8.93593750e+001 8.04915200e+002
1.42773438e+002 8.08960000e+002
7.05468750e+002 8.49408000e+002
1.26816406e+003 8.89856000e+002
6.89511719e+003 1.21344000e+003

9999

1TERMK2TERM22	3.245	-0.69	512.0
2TERM28TERM24	2.513	20.55	273.0
3TERM53TERM62	0.740	16.27	345.0

C

C

C *** NUCLEO 5 ***

C

C

TRANSFORMER TRANS4

TRANS5

1TERMG6TERM23

2TERM28TERM22

3TERM54TERM53

C

C

C *** NUCLEO 6 ***

C

TRANSFORMER TRANS4

TRANS6

1TERMK4TERM24

2TERM28TERM23

3CH2 TERM54

C

C

C *** NUCLEO 7 ***

C

TRANSFORMER TRANS4

TRANS7

1TERMK3TERM25

2TERM29TERM26

3TERM55TERM63

C

C

C *** NUCLEO 8 ***

C

TRANSFORMER TRANS4

TRANS8

1TERMK5TERM26

2TERM29TERM27

3TERM56TERM55

C

C

C *** NUCLEO 9 ***

C

TRANSFORMER TRANS4

TRANS9

1TERMG8TERM27

2TERM29TERM25

3CH3 TERM56

C

C RESISTENCIA DO NEUTRO DO REATOR

C

TERM21 1.0E9

TERM28 1.0E9

TERM29 1.0E9

C

C RESISTENCIA NOS DELTAS DOS SECUNDARIOS

C

TERM61 1.0E9

TERM62 1.0E9

TERM63 1.0E9

C

C

=====
=====

C ACRESCIMO DE CHAVES ENTRE OS TERMINAIS DA FASE "A" PARA A
VERIFICACAO DA COR-

C RENTE E DA COMPENSACAO DE HARMONICOS, RESULTANDO NO THD TOTAL DA
FASE "A" DA

C LINHA (SRCEA-TERM11)

C

=====
=====

C

/SWITCH

C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >

TERMK6TERMK1 -1. 20.

1

TERMG1TERMG2 -1. 20.

1

TERMG3TERMG4 -1. 20.

1

TERMK7TERMK2 -1. 20.

1

TERMG5TERMG6 -1. 20.

1

TERMK8TERMK4 -1. 20.

1

TERMK9TERMK3 -1. 20.

1

TERMK0TERMK5 -1. 20.

1

TERMG7TERMG8 -1. 20.

1

CH4 CH1 -1. 20.

1

CH5 CH2 -1. 20.

1

CH6 CH3 -1. 20.

1

C

/SOURCE

C < n 1><>< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART
>< TSTOP >

14SRCEA 0 428660. 60. 0. -
1. 10.

14SRCEB 0 428660. 60. -120. -
1. 10.

14SRCEC 0 428660. 60. 120. -
1. 10.

60FMMI

60FMMII

60FMMIII

60BMAG1

60BMAG2

60BMAG3

60FLUXO1

60FLUXO2

60FLUXO3

60CURRU1

BLANK BRANCH

BLANK SWITCH

BLANK SOURCE

C SAIDAS

FMMI FLUXO1BMAG1

FMMII FLUXO2BMAG2

FMMIIIFLUXO3BMAG3

CURRU1SRCEA

BLANK OUTPUT

C

C

C

=====
=====

C ANALISE DE FOURIER

C

=====
=====

C

FOURIER ON 60

C 1 2 3 4 5 6
7 8

C
3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
1234567890

C =====

C CORRENTE DE RAMO

C =====

194	13.430.0	SRCEA TERM11		
	5.0	483.3333	500.0	
194	13.430.0	TERMK6TERMK1		
	5.0	483.3333	500.0	
194	13.430.0	TERMK7TERMK2		
	5.0	483.3333	500.0	
194	13.430.0	TERMK9TERMK3		
	5.0	483.3333	500.0	

C =====

C FORCAS MAGNETOMOTRIZES

C =====

C 144	13.430.0	FMMI		
C	5.0	483.3333	500.0	
C 144	13.430.0	FMMII		
C	5.0	483.3333	500.0	
C 144	13.430.0	FMMIII		
C	5.0	483.3333	500.0	

C =====

C FLUXO E INDUCAO MAGNETICA

C =====

C 144	13.430.0	BMAG1		
C	5.0	483.3333	500.0	

C 144	13.430.0	BMAG2		
C	5.0	483.3333	500.0	
C 144	13.430.0	BMAG3		
C	5.0	483.3333	500.0	
C 144	13.430.0	FLUX01		
C	5.0	483.3333	500.0	
C 144	13.430.0	FLUX02		
C	5.0	483.3333	500.0	
C 144	13.430.0	FLUX03		
C	5.0	483.3333	500.0	

BLANK

BLANK PLOT

BEGIN NEW DATA case

BLANK

C

C

C

=====
=====

C PARAMETROS ADOTADOS

C

=====
=====

C SPLENA --> 150.0 MVA

C VPLENA --> 525.0 KV

C BS --> 1.990 T

C HS --> 10640.000 A.espira/m

C kn --> 7.700

C IPLENA --> 164.9572 A

C IVAZIO --> 8.2479 A

C

=====
=====

C

DETERMINACAO DO NUMERO DE ESPIRAS

C

=====
=====

C SECAO DO NUCLEO --> 0.7900 m2

C DIAMETRO DO NUCLEO --> 1.0029 m

C ALTURA DO NUCLEO --> 4.3000 m

C No --> 689 espiras

C N1 --> 512 espiras

C N2 --> 273 espiras

C N3 --> 345 espiras

C

=====
=====

C

DIMENSOES DOS CONDUTORES

C

=====
=====

C * Enrolamentos 0,1 e 2(primario):

C sol2(secao co condutor calculada) --> 18.3286 mm2

C lcol2(largura do condutor) --> 6.5440 mm

C hcol2 --> 2.9060 mm

C ao12 (secao obtida)--> 18.4000 mm2

C ncondo --> 1 condutores

C ncond1 --> 1 condutores

C ncond2 --> 1 condutores

C * Enrolamento 3(secundario):

C I3 --> 109.8121 A

C s3(secao calculada) --> 36.6040 mm2

C lc3 --> 7.3480 mm
C hc3 --> 5.8270 mm
C a3(secao obtida) --> 40.5000 mm2
C ncond3 --> 1 condutores

C

=====
=====

C ARQUITETURA DOS ENROLAMENTOS DO REATOR

C

=====
=====

C * Isolacao:

C Ya --> 365.4347 mm

C Yb --> 259.7840 mm

C Yc --> 60.9380 mm

C Yd --> 720.6835 mm

C * Isolamento entre espiras para os enrolamentos primarios (No, N1 e N2):

C Ye012 --> 6.0622 mm

C * Isolamento entre espiras para o enrolamento secundario (N3):

C Ye3 --> 3.5512 mm

C * Execucao do enrolamento:

C Le --> 2.8586 m

C Area da travessa --> 1.0481 m

C Area da trajetoria de retorno --> 0.5240 m

C Diametro da travessa --> 1.0238 m

C Diametro da trajetoria de retorno --> 0.5119 m

C Profundidade da travessa e do retorno --> 1.0238 m

C

=====
=====

C COMPOSICAO DOS ENROLAMENTOS

C

=====
=====

C * Enrolamento No:

C lbo --> 12.7062 mm

C hbo --> 36.2728 mm

C ncamo --> 4 camadas

C Ncondo --> 173 condutores

C nbobo --> 173 bobinas

C * Enrolamento N1:

C lb1 --> 12.7062 mm

C hb1 --> 27.2046 mm

C ncam1 --> 3 camadas

C Ncond1 --> 171 condutores

C nbob1 --> 171 bobinas

C * Enrolamento N2:

C lb2 --> 12.7062 mm

C hb2 --> 18.1364 mm

C ncam2 --> 2 camadas

C Ncond2 --> 137 condutores

C nbob2 --> 137 bobinas

C * Enrolamento N3:

C lb3 --> 10.9992 mm

C hb3 --> 18.9563 mm

C ncam3 --> 2 camadas

C Ncond3 --> 173 condutores

C nbob3 --> 173 bobinas

C

=====
=====

C INDUTANCIA DOS ENROLAMENTOS(nucleo de dois enrolamentos)

C

=====
=====

C * Reatancias referidas ao enrolamento No:

C Xom1 --> 35.9041 ohms

C X3m1 --> 7.1540 ohms

C

=====
=====

C INDUTANCIA DOS ENROLAMENTOS(nucleo de tres enrolamentos)

C

=====
=====

C * Reatancias referidas ao enrolamento N1:

C X1m2 --> -0.6945 ohms

C X2m2 --> 20.5453 ohms

C X3m2 --> 16.2710 ohms

C

=====
=====

C RESISTENCIA DOS ENROLAMENTOS

C

=====
=====

C * Enrolamento 0:

C Rcao --> 4.3937 ohms

C * Enrolamento 1:

C Rca1 --> 3.2446 ohms

C * Enrolamento 2:

C Rca2 --> 2.5133 ohms

C * Enrolamento 3:

C Rca3 --> 0.7397 ohms

**ANEXO V - Arquivo de Entrada para Simulação do Reator de Seis Núcleos no ATP com
Uso de Filtros Passivos Sintonizados no 12º Harmônico (Alimentação por
Fonte de Tensão de 1,05 pu, numa Base de 500 kV)**

BEGIN NEW DATA case

C

=====
=====

C REATOR DE SEIS NUCLEOS COM DELTA FECHADO COM COMPENSACAO POR
FILTROS DE C HARMONICOS

C TENSÃO DA FONTE DE SUPRIMENTO: 525KV (CONDICAO DE PLENA CARGA)

C POTENCIA REATIVA CONSUMIDA EM PLENA CARGA: 150MVAR

C

=====
===

C

C

POWER FREQUENCY 60.

1.0E-6 50.E-2 60.

0500 10 1 1 1 0 0 2

0

C

34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
1234567890

C

=====
=====

C SEGMENTO TACS

C

=====
=====

TACS HYBRID

C

C BLOCOS DE FUNCOES

C

C ANALISE DE FLUXO, INDUCAO MAGNETICA, CORRENTE, FORCA MAGNETOMOTRIZ
E TENSOES C NA UNIDADE 1, COM ANALISE DE FOURIER DE CADA SAIDA TACS

C

C INDUCOES MAGNETICAS NOS NUCLEOS DA UNIDADE 1 DO REATOR

C

C BMAG = FLUXO/AREA

BMAG1 +FLUXO1 1.250

BMAG2 +FLUXO2 1.250

BMAG3 +FLUXO3 1.250

C

C TENSÃO ENTRE OS TERMINAIS DOS ENROLAMENTOS PRIMARIOS DE CADA NUCLEO DA
UNIDADE C 1 DO REATOR

C

VENR1 +CURR1 -TERM21 1.0000

VENR2 +CURR5 -TERM22 1.0000

VENR3 +CURR3 -TERM41 1.0000

C

C FLUXO MAGNETICO DETERMINADO A PARTIR DA TENSÃO ENTRE OS TERMINAIS DOS
C ENROLAMENTOS PRIMÁRIOS DA UNIDADE 1

C

1FLUXO1 +VENR1 1.0000

1.0

556.0

1FLUXO2 +VENR2 1.0000

1.0

556.0

1FLUXO3 +VENR3 1.0000

1.0

556.0

C

C FORCAS MAGNETOMOTRIZES

C

N1IA1	+TERMK1			556.0
N3I1	+CH1			340.0
N2IA3	+TERMK3			204.0
N1IA6	+TERMK2			556.0
N2IB5	+TERMK4			204.0
N3I6	+CH3			340.0
N1IB2	+TERMK5			556.0
N2IA1	+TERMK1			204.0
N1IC3	+TERMK3			556.0
N2IB2	+TERMK5			204.0
N1IC6	+TERMK6			556.0
N2IA6	+TERMK2			204.0
N1IB5	+TERMK4			556.0
N2IC4	+TERMK6			204.0
FMMI	+N1IA1	-N2IA3	-N3I1	1.0000
FMMII	+N1IB2	-N2IA1	-N3I1	1.0000
FMMIII	+N1IC3	-N2IB2	-N3I1	1.0000

C

C FONTES

C

90CURR1

90TERM21

90CURR5

90TERM22

90CURR3

90TERM41

91TERMK1

91TERMK2

91TERMK3

91TERMK4

91TERMK5

91TERMK6

91CH1

91CH3

C

C CONDICÕES INICIAIS

C

77BMAG2 0.0

77BMAG1 0.0

77BMAG3 0.0

77FLUXO1 0.0

77FLUXO2 0.0

77FLUXO3 0.0

BLANK

C

=====
=====

C FINALIZAÇÃO DO SEGMENTO TACS

C

=====
=====

/BRANCH

C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >

C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><>0

C

C RESISTÊNCIA DE FONTE

C

SRCEA TERM11	0.001
1	
SRCEB TERM12	0.001
SRCEC TERM13	0.001

C

C RESISTENCIA ANTERIOR AS CHAVES

C

TERM11TERMK1	1.E-9
TERM11TERMK2	1.E-9
TERM13TERMK3	1.E-9
TERM12TERMK4	1.E-9
TERM12TERMK5	1.E-9
TERM13TERMK6	1.E-9
TERM61CH1	1.E-9
TERM64CH3	1.E-9

C

C ACRESCIMO DE NO FICTICIO PARA RETIRADA DO SINAL DA ROTINA TACS E INTRODUCAO DO

C MESMO NA REDE ELETRICA

C

FMMI	1.000
FMMII	1.000
FMMIII	1.000
BMAG1	1.000
BMAG2	1.000
BMAG3	1.000
FLUXO1	1.000
FLUXO2	1.000
FLUXO3	1.000

C =====

C TRANSFORMADORES MONOFASICOS DE TRES ENROLAMENTOS

C =====

C

C Io: Cols 27-32 Fo: 33-38 Rmag: 45-50 R: 27-32 L: 33-38 V: 39-44

C Terminal 1: Cols 3-8 Terminal 2: Cols 9-14

C

C

C *** NUCLEO 1 ***

C

TRANSFORMER 0.0106 8.9TRANS11.00E9
0

1.05575540e-002 8.89600000e+000

2.11151079e-002 2.66880000e+001

3.16726619e-002 4.44800000e+001

4.22302158e-002 7.11680000e+001

6.33453237e-002 1.33440000e+002

8.44604317e-002 2.22400000e+002

1.05575540e-001 3.38048000e+002

2.11151079e-001 6.40512000e+002

3.16726619e-001 7.11680000e+002

4.43417266e-001 7.38368000e+002

6.33453237e-001 7.60608000e+002

8.44604317e-001 7.73952000e+002

1.05575540e+000 7.82848000e+002

2.11151079e+000 8.09536000e+002

4.22302158e+000 8.27328000e+002

6.33453237e+000 8.36224000e+002

8.44604317e+000 8.45120000e+002

9.50179856e+000 8.49568000e+002
2.11151079e+001 8.71808000e+002
4.22302158e+001 8.80704000e+002
6.33453237e+001 8.82038400e+002
8.44604317e+001 8.83372800e+002
1.05575540e+002 8.84707200e+002
1.12332374e+002 8.85152000e+002
1.79478417e+002 8.89600000e+002
8.86834532e+002 9.34080000e+002
1.59419065e+003 9.78560000e+002
8.66775180e+003 1.33440000e+003

9999

1CURRE1 TERM21	2.336	-0.50	556.0
2TERM31TERM41	1.239	8.27	204.0
3TERM51TERM61	0.484	11.33	340.0

C

C

C *** NUCLEO 2 ***

C

TRANSFORMER	TRANS1	TRANS2
-------------	--------	--------

1CURRE5 TERM22

2TERM31TERM21

3TERM52TERM51

C

C

C *** NUCLEO 3 ***

C

TRANSFORMER	TRANS1	TRANS3
-------------	--------	--------

1CURRE3 TERM41

2TERM31TERM22

3CH2 TERM52

C

C

C *** NUCLEO 4 ***

C

TRANSFORMER TRANS1

TRANS4

1CURR6 TERM14

2TERM44TERM16

3TERM54TERM64

C

C

C *** NUCLEO 5 ***

C

TRANSFORMER TRANS1

TRANS5

1CURR4 TERM15

2TERM44TERM14

3TERM55TERM54

C

C

C *** NUCLEO 6 ***

C

TRANSFORMER TRANS1

TRANS6

1CURR2 TERM16

2TERM44TERM15

3CH4 TERM55

C

C

C RESISTENCIA DO NEUTRO DO REATOR

C

TERM31 1.0E9

TERM44 1.0E9

C

C RESISTENCIA NOS DELTAS DOS SECUNDARIOS

C

TERM51 1.0E9

TERM52 1.0E9

TERM61 1.0E9

TERM54 1.0E9

TERM55 1.0E9

TERM64 1.0E9

C

C

=====
=====

C ACRESCIMO DE FILTROS DE HARMONICOS NOS DELTAS DE CADA UNIDADE

C

=====
=====

C

C

=====
=====

C UNIDADE 1

C

=====
=====

C

C RESISTENCIAS DOS FILTROS DE HARMONICOS

C

TERM51TF1	0.0010
TERM52TF3	0.0010
TERM61TF5	0.0010

C

C REATANCIAS DOS FILTROS DE HARMONICOS

TF2	19.61
TF4	19.61
TF6	19.61

C

C CAPACITANCIAS DOS FILTROS DE HARMONICOS

TF1	TF2	0.940
TF3	TF4	0.940
TF5	TF6	0.940

C

C

=====
====

C

UNIDADE 2

C

=====
====

C

C RESISTENCIAS DOS FILTROS DE HARMONICOS

C

TERM54TF7	0.0010
TERM55TF9	0.0010
TERM64TF13	0.0010

C

C REATANCIAS DOS FILTROS DE HARMONICOS

TF8	19.61
TF10	19.61
TF14	19.61

C

C CAPACITANCIAS DOS FILTROS DE HARMONICOS

TF7	TF8	0.940
TF9	TF10	0.940
TF13	TF14	0.940

C

=====

=====

C ACRESCIMO DE CHAVES ENTRE OS TERMINAIS DA FASE "A" PARA A VERIFICACAO DA COR-

C RENTE E DA COMPENSACAO DE HARMONICOS, SOLICITANDO O THD TOTAL DA FASE "A" DA

C LINHA (SRCEA-TERM11)

C

=====

=====

C

/SWITCH

C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >

1	TERMK1CURR1	-1.	20.
1	TERMK2CURR2	-1.	20.
1	TERMK3CURR3	-1.	20.
1	TERMK4CURR4	-1.	20.
1	TERMK5CURR5	-1.	20.
1	TERMK6CURR6	-1.	20.

CH1 CH2 -1. 20.
1

CH3 CH4 -1. 20.
1

C

/SOURCE

C < n 1><>< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART
>< TSTOP >

14SRCEA 0 428660. 60. 0. -
1. 10.

14SRCEB 0 428660. 60. -120. -
1. 10.

14SRCEC 0 428660. 60. 120. -
1. 10.

60FMMI

60FMMII

60FMMIII

60BMAG1

60BMAG2

60BMAG3

60FLUXO1

60FLUXO2

60FLUXO3

BLANK BRANCH

BLANK SWITCH

BLANK SOURCE

C SAIDAS

FMMI FMMII FMMIIIBMAG1 BMAG2 BMAG3 FLUXO1FLUXO2FLUXO3

SRCEA

BLANK OUTPUT

C

C

C

=====
=====

C ANALISE DE FOURIER

C

=====
=====

C

FOURIER ON 60

C	1	2	3	4	5	6
7	8					

C

3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
1234567890

C =====

C CORRENTE DE RAMO

C =====

194	13.430.0		SRCEA TERM11
	5.0	483.3333	500.0

194	13.430.0	CH1	CH2
	5.0	483.3333	500.0

C =====

C FORCAS MAGNETOMOTRIZES NA FASE A

C =====

144	13.430.0		FMMI
	5.0	483.3333	500.0

C =====

C FLUXO E INDUCAO MAGNETICA

C =====

144	13.430.0		BMAG1
	5.0	483.3333	500.0

144	13.430.0	BMAG2		
	5.0	483.3333	500.0	
144	13.430.0	FLUXO1		
	5.0	483.3333	500.0	
144	13.430.0	FLUXO2		
	5.0	483.3333	500.0	

BLANK

BLANK PLOT

BEGIN NEW DATA case

BLANK

C

C

C

=====
====

C

PARAMETROS ADOTADOS

C

=====
====

C SPLENA --> 150.0 MVA

C VPLENA --> 525.0 KV

C BS --> 1.99 T

C HS --> 11273.00 A.espira/m

C IPLENA --> 164.9572 A

C IVAZIO --> 8.2479 A

C

=====
====

C

DETERMINACAO DO NUMERO DE ESPIRAS

C

=====
====

C SECAO DO NUCLEO --> 0.8000 m2
C DIAMETRO DO NUCLEO --> 1.0093 m
C ALTURA DO NUCLEO --> 5.8700 m
C No --> 680 espiras
C N1 --> 556 espiras
C N2 --> 204 espiras
C N3 --> 340 espiras

C

=====
====

C DIMENSOES DOS CONDUTORES

C

=====
====

C * Enrolamentos 0,1 e 2(primario):

C s12(secao co condutor calculada) --> 27.4929 mm2

C lc12(largura do condutor) --> 5.8270 mm

C hc12 --> 5.1900 mm

C a12 (secao obtida)--> 29.6000 mm2

C ncond1 --> 1 condutores

C ncond2 --> 1 condutores

C * Enrolamento 3(secundario):

C I3 --> 164.9572 A

C s3(secao calculada) --> 54.9857 mm2

C lc3 --> 9.2660 mm

C hc3 --> 6.5440 mm

C a3(secao obtida) --> 58.6000 mm2

C ncond3 --> 1 condutores

C

=====
====

C ARQUITETURA DOS ENROLAMENTOS DO REATOR

C

=====
=====

C * Isolacao:

C Ya --> 365.4347 mm

C Yb --> 259.7840 mm

C Yc --> 60.9380 mm

C Yd --> 720.6835 mm

C * Isolamento entre espiras para os enrolamentos primarios (No, N1 e N2):

C Ye12 --> 6.0622 mm

C * Isolamento entre espiras para o enrolamento secundario (N3):

C Ye3 --> 3.5467 mm

C * Execucao do enrolamento:

C Le --> 4.4286 m

C Area da travessa --> 1.0619 m

C Area da trajetoria de retorno --> 0.5309 m

C Diametro da travessa --> 1.0305 m

C Diametro da trajetoria de retorno --> 0.5152 m

C Profundidade da travessa e do retorno --> 1.0305 m

C

=====
=====

C COMPOSICAO DOS ENROLAMENTOS

C

=====
=====

C * Enrolamento N1:

C lb1 --> 11.9892 mm

C hb1 --> 22.7044 mm

C ncam1 --> 2 camadas

C Ncond1 --> 278 condutores

C nbob1 --> 278 bobinas

C * Enrolamento N2:

C lb2 --> 11.9892 mm

C hb2 --> 11.3522 mm

C ncam2 --> 1 camadas

C Ncond2 --> 204 condutores

C nbob2 --> 204 bobinas

C * Enrolamento N3:

C lb3 --> 12.9127 mm

C hb3 --> 10.1907 mm

C ncam3 --> 1 camadas

C Ncond3 --> 340 condutores

C nbob3 --> 340 bobinas

C

=====
====

C INDUTANCIA DOS ENROLAMENTOS(nucleo de tres enrolamentos)

C

=====
====

C * Reatancias referidas ao enrolamento N1:

C X1 --> -0.4985 ohms

C X2 --> 8.2654 ohms

C X3 --> 11.3334 ohms

C

=====
====

C RESISTENCIA DOS ENROLAMENTOS

C

=====
====

C * Enrolamento 1:
C Rca1 --> 2.3357 ohms
C * Enrolamento 2:
C Rca2 --> 1.2387 ohms
C * Enrolamento 3:
C Rca3 --> 0.4836 ohms

C

=====
=====

C PARAMETROS DO FILTRO

C

=====
=====

C * Resistencia:
C Rfiltro --> 0.001 ohms
C * Reatancia:
C Xlfiltro --> 19.6067 ohms
C * Capacitancia:
C C1 --> 0.9395 microFarad

**ANEXO VI - Arquivo de Entrada para Simulação do Reator de Nove Núcleos no ATP com
Uso de Filtros Passivos Sintonizados no 18º Harmônico (Alimentação por
Fonte de Tensão de 1,05 pu, numa Base de 500 kV)**

BEGIN NEW DATA case

C

=====
=====

C REATOR DE SEIS NUCLEOS COM DELTA FECHADO COM COMPENSACAO POR
FILTROS DE C HARMONICOS

C TENSÃO DA FONTE DE SUPRIMENTO: 525KV (CONDICAO DE PLENA CARGA)

C POTENCIA REATIVA CONSUMIDA EM PLENA CARGA: 150MVAR

C

=====
===

C

C

POWER FREQUENCY 60.

1.0E-5 50.E-2 60.
0500 01 1 1 1 0 0 2
0

C 1 2 3 4 5 6
7 8

C

3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
1234567890

C

=====
=====

C SEGMENTO TACS

C

=====
=====

TACS HYBRID

C

C BLOCOS DE FUNCOES

C

C ANALISE DE FLUXO, INDUCAO MAGNETICA, CORRENTE, FORCA MAGNETOMOTRIZ
E TENSOES C NA UNIDADE 1, COM ANALISE DE FOURIER DE CADA SAIDA TACS

C

C INDUCOES MAGNETICAS NOS NUCLEOS DA UNIDADE 1 DO REATOR

C

C BMAG = FLUXO/AREA

BMAG1	+FLUXO1	1.266
BMAG2	+FLUXO2	1.266
BMAG3	+FLUXO3	1.266

C

C TENSÃO ENTRE OS TERMINAIS DOS ENROLAMENTOS PRIMARIOS DE CADA NUCLEO DA
UNIDADE C 1 DO REATOR

VENR1	+TERMK1 -TERM21	1.0000
VENR2	+TERMG2 -TERM21	1.0000
VENR3	+TERMG4 -TERM21	1.0000

C

C FLUXO MAGNETICO DETERMINADO A PARTIR DA TENSÃO ENTRE OS TERMINAIS DOS
C ENROLAMENTOS PRIMÁRIOS DA UNIDADE 1

C

1FLUXO1	+VENR1	1.0000
1.0		
	689.0	
1FLUXO2	+VENR2	1.0000
1.0		
	689.0	
1FLUXO3	+VENR3	1.0000
1.0		

689.0

C FORCAS MAGNETOMOTRIZES

C

NOIA1	+TERMK6		689.0
N3I1	+CH4		345.0
NOIB1	+TERMG1		689.0
NOIC1	+TERMG3		689.0
FMMI	+NOIA1	-N3I1	1.0000
FMMII	+NOIB1	-N3I1	1.0000
FMMIII	+NOIC1	-N3I1	1.0000

C

C FONTES

C

90TERMK1

90TERM21

90TERMG2

90TERMG4

90TERM51

90TERM61

91TERMK6

91TERMG1

91TERMG3

91CH4

C

C SAIDAS

C

33BMAG2
33FLUXO1
33FLUXO2
33BMAG1
33FMMI
33FMMIV
33FMMVII
33VENR1
33VENR2

C

C CONDICÕES INICIAIS

C

77BMAG2 0.0
77BMAG1 0.0
77BMAG3 0.0
77FLUXO1 0.0
77FLUXO2 0.0
77FLUXO3 0.0

BLANK

C

=====
=====

C FINALIZAÇÃO DO SEGMENTO TACS

C

=====
=====

/BRANCH

C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >

C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><>0

C

C RESISTENCIA DE FONTE

C

SRCEA TERM11 0.001
1

SRCEB TERM12 0.001

SRCEC TERM13 0.001

C

C RESISTENCIA ANTERIOR AS CHAVES

C

TERM11TERMK6 1.E-9

TERM11TERMK7 1.E-9

TERM11TERMK9 1.E-9

TERM12TERMK0 1.E-9

TERM12TERMG1 1.E-9

TERM12TERMG5 1.E-9

TERM13TERMK8 1.E-9

TERM13TERMG3 1.E-9

TERM13TERMG7 1.E-9

TERM61CH4 1.E-9

TERM62CH5 1.E-9

TERM63CH6 1.E-9

C

C ACRESCIMO DE NO FICTICIO PARA RETIRADA DO SINAL DA ROTINA TACS E
INTRODUCAO DO

C MESMO NA REDE ELETRICA

C

FMMI 1.000

FMMII 1.000

FMMIII 1.000

BMAG1 1.000

BMAG2 1.000
BMAG3 1.000
FLUXO1 1.000
FLUXO2 1.000
FLUXO3 1.000

C

C =====

C TRANSFORMADORES MONOFASICOS DE DOIS E TRES ENROLAMENTOS

C =====

C

C Io: Cols 27-32 Fo: 33-38 Rmag: 45-50 R: 27-32 L: 33-38 V: 39-44

C Terminal 1: Cols 3-8 Terminal 2: Cols 9-14

C

C UNIDADE DE DOIS ENROLAMENTOS-MODELO1

C

C *** NUCLEO 1 ***

C

TRANSFORMER 0.0062 10.9TRANS11.00E9

0

6.24092888e-003 1.08862000e+001

1.24818578e-002 3.26586000e+001

1.87227866e-002 5.44310000e+001

2.49637155e-002 8.70896000e+001

3.74455733e-002 1.63293000e+002

4.99274311e-002 2.72155000e+002

6.24092888e-002 4.13675600e+002

1.24818578e-001 7.83806400e+002

1.87227866e-001 8.70896000e+002

2.62119013e-001 9.03554600e+002

3.74455733e-001 9.30770100e+002
4.99274311e-001 9.47099400e+002
6.24092888e-001 9.57985600e+002
1.24818578e+000 9.90644200e+002
2.49637155e+000 1.01241660e+003
3.74455733e+000 1.02330280e+003
4.99274311e+000 1.03418900e+003
5.61683599e+000 1.03963210e+003
1.24818578e+001 1.06684760e+003
2.49637155e+001 1.07773380e+003
3.74455733e+001 1.07936673e+003
4.99274311e+001 1.08099966e+003
6.24092888e+001 1.08263259e+003
6.64034833e+001 1.08317690e+003
1.06095791e+002 1.08862000e+003
5.24238026e+002 1.14305100e+003
9.42380261e+002 1.19748200e+003
5.12380261e+003 1.63293000e+003

9999

1TERMK1TERM21 4.394 35.90 689.0

2TERM51TERM61 0.740 7.15 345.0

C

C *** NUCLEO 2 ***

C

TRANSFORMER TRANS1

TRANS2

1TERMG2TERM21

2TERM52TERM51

C

C

C *** NUCLEO 3 ***

C

C

TRANSFORMER TRANS1

TRANS3

1TERMG4TERM21

2CH1 TERM52

C

C

C UNIDADES COM 3 ENROLAMENTOS POR NUCLEO - MODELO 2

C

C

C *** NUCLEO 4 ***

C

C

TRANSFORMER 0.0084 8.1TRANS41.00E9

0

8.39843750e-003 8.08960000e+000

1.67968750e-002 2.42688000e+001

2.51953125e-002 4.04480000e+001

3.35937500e-002 6.47168000e+001

5.03906250e-002 1.21344000e+002

6.71875000e-002 2.02240000e+002

8.39843750e-002 3.07404800e+002

1.67968750e-001 5.82451200e+002

2.51953125e-001 6.47168000e+002

3.52734375e-001 6.71436800e+002

5.03906250e-001 6.91660800e+002

6.71875000e-001 7.03795200e+002

8.39843750e-001 7.11884800e+002

1.67968750e+000 7.36153600e+002
3.35937500e+000 7.52332800e+002
5.03906250e+000 7.60422400e+002
6.71875000e+000 7.68512000e+002
7.55859375e+000 7.72556800e+002
1.67968750e+001 7.92780800e+002
3.35937500e+001 8.00870400e+002
5.03906250e+001 8.02083840e+002
6.71875000e+001 8.03297280e+002
8.39843750e+001 8.04510720e+002
8.93593750e+001 8.04915200e+002
1.42773438e+002 8.08960000e+002
7.05468750e+002 8.49408000e+002
1.26816406e+003 8.89856000e+002
6.89511719e+003 1.21344000e+003

9999

1TERMK2TERM22	3.245	-0.69	512.0
2TERM28TERM24	2.513	20.55	273.0
3TERM53TERM62	0.740	16.27	345.0

C

C

C *** NUCLEO 5 ***

C

C

TRANSFORMER TRANS4

TRANS5

1TERMG6TERM23

2TERM28TERM22

3TERM54TERM53

C

C

C *** NUCLEO 6 ***

C

TRANSFORMER TRANS4

TRANS6

1TERMK4TERM24

2TERM28TERM23

3CH2 TERM54

C

C

C *** NUCLEO 7 ***

C

TRANSFORMER TRANS4

TRANS7

1TERMK3TERM25

2TERM29TERM26

3TERM55TERM63

C

C

C *** NUCLEO 8 ***

C

TRANSFORMER TRANS4

TRANS8

1TERMK5TERM26

2TERM29TERM27

3TERM56TERM55

C

C

C *** NUCLEO 9 ***

C

TRANSFORMER TRANS4

TRANS9

1TERMG8TERM27

2TERM29TERM25

3CH3 TERM56

C

C RESISTENCIA DO NEUTRO DO REATOR

C

TERM21 1.0E9

TERM28 1.0E9

TERM29 1.0E9

C

C RESISTENCIA NOS DELTAS DOS SECUNDARIOS

C

TERM61 1.0E9

TERM62 1.0E9

TERM63 1.0E9

C

C

=====
====

C ACRESCIMO DE FILTROS DE HARMONICOS NOS DELTAS DE CADA UNIDADE

C

=====
====

C

C

=====
====

C

UNIDADE 1

C

=====
=====

C

C RESISTENCIAS DOS FILTROS DE HARMONICOS

C

TERM51TF1	0.0010
TERM52TF3	0.0010
TERM61TF5	0.0010

C

C REATANCIAS DOS FILTROS DE HARMONICOS

TF2	14.31
TF4	14.31
TF6	14.31

C

C CAPACITANCIAS DOS FILTROS DE HARMONICOS

TF1	TF2	0.572
TF3	TF4	0.572
TF5	TF6	0.572

C

C

=====
=====

C

UNIDADE 2

C

=====
=====

C

C RESISTENCIAS DOS FILTROS DE HARMONICOS

C

TERM53TF7	0.0010
-----------	--------

TERM54TF9 0.0010

TERM62TF13 0.0010

C

C REATANCIAS DOS FILTROS DE HARMONICOS

TF8 32.54

TF10 32.54

TF14 32.54

C

C CAPACITANCIAS DOS FILTROS DE HARMONICOS

TF7 TF8 0.252

TF9 TF10 0.252

TF13 TF14 0.252

C

=====
====

C UNIDADE 3

C

=====
====

C

C RESISTENCIAS DOS FILTROS DE HARMONICOS

C

TERM55TF11 0.0010

TERM56TF15 0.0010

TERM63TF17 0.0010

C

C REATANCIAS DOS FILTROS DE HARMONICOS

TF12 32.54

TF16 32.54

TF18 32.54

C

C CAPACITANCIAS DOS FILTROS DE HARMONICOS

TF11	TF12	0.252
TF15	TF16	0.252
TF17	TF18	0.252

C

C RESISTENCIA EM PARALELO COM OS FILTROS

C

TERM61	1.0E9
TERM62	1.0E9
TERM63	1.0E9
TERM51	1.0E9
TERM52	1.0E9
TERM53	1.0E9
TERM54	1.0E9
TERM55	1.0E9
TERM56	1.0E9

C

C

=====
=====

C ACRESCIMO DE CHAVES ENTRE OS TERMINAIS DA FASE "A" PARA A VERIFICACAO DA COR-

C RENTE E DA COMPENSACAO DE HARMONICOS, RESULTANDO NO THD TOTAL DA FASE "A" DA

C LINHA (SRCEA-TERM11)

C

=====
=====

C

/SWITCH

C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >

TERMK6	TERMK1	-1.	20.
TERMG1	TERMG2	-1.	20.
TERMG3	TERMG4	-1.	20.
TERMK7	TERMK2	-1.	20.
TERMG5	TERMG6	-1.	20.
TERMK8	TERMK4	-1.	20.
TERMK9	TERMK3	-1.	20.
TERMK0	TERMK5	-1.	20.
TERMG7	TERMG8	-1.	20.
CH4	CH1	-1.	20.
1			
CH5	CH2	-1.	20.
1			
CH6	CH3	-1.	20.
1			
C			

/SOURCE

C < n 1><>< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART
>< TSTOP >

14SRCEA	0	428660.	60.	0.	-
1.	10.				
14SRCEB	0	428660.	60.	-120.	-
1.	10.				
14SRCEC	0	428660.	60.	120.	-
1.	10.				
60FMMI					
60FMMII					
60FMMIII					
60BMAG1					
60BMAG2					

60BMAG3

60FLUXO1

60FLUXO2

60FLUXO3

BLANK BRANCH

BLANK SWITCH

BLANK SOURCE

C SAIDAS

FMMI FLUXO1BMAG1

FMMII FLUXO2BMAG2

FMMIII FLUXO3BMAG3

BLANK OUTPUT

C

C

=====
=====

C ANALISE DE FOURIER

C

=====
=====

C

FOURIER ON 60

C	1	2	3	4	5	6
7	8					

C

34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
1234567890

C =====

C corrente de ramo

C =====

194	13.430.0	SRCEA TERM11	
	5.0	483.3333	500.0

194	13.430.0	CH4	CH1
	5.0	483.3333	500.0
194	13.430.0	CH5	CH2
	5.0	483.3333	500.0
194	13.430.0	CH6	CH3
	5.0	483.3333	500.0

C =====

C forcas magnetomotrizes

C =====

144	13.430.0	FMMI	
	5.0	483.3333	500.0
144	13.430.0	FMMII	
	5.0	483.3333	500.0
144	13.430.0	FMMIII	
	5.0	483.3333	500.0

C =====

C fluxo e inducao magnetica

C =====

144	13.430.0	BMAG1	
	5.0	483.3333	500.0
144	13.430.0	BMAG2	
	5.0	483.3333	500.0
144	13.430.0	BMAG3	
	5.0	483.3333	500.0
144	13.430.0	FLUXO1	
	5.0	483.3333	500.0
144	13.430.0	FLUXO2	
	5.0	483.3333	500.0
144	13.430.0	FLUXO3	

5.0

483.3333

500.0

BLANK

BLANK PLOT

BEGIN NEW DATA case

BLANK

C

C

C

=====
=====

C

PARAMETROS ADOTADOS

C

=====
=====

C SPLENA --> 150.0 MVA

C VPLENA --> 525.0 KV

C BS --> 1.99 T

C HS --> 10640.00 A.espira/m

C kn --> 7.700

C IPLENA --> 164.9572 A

C IVAZIO --> 8.2479 A

C

=====
=====

C

DETERMINACAO DO NUMERO DE ESPIRAS

C

=====
=====

C SECAO DO NUCLEO --> 0.7900 m2

C DIAMETRO DO NUCLEO --> 1.0029 m

C ALTURA DO NUCLEO --> 4.3000 m

C No --> 689 espiras

C N1 --> 512 espiras

C N2 --> 273 espiras

C N3 --> 345 espiras

C

=====
=====

C DIMENSOES DOS CONDUTORES

C

=====
=====

C * Enrolamentos 0,1 e 2(primario):

C sol2(secao co condutor calculada) --> 18.3286 mm2

C lcol2(largura do condutor) --> 6.5440 mm

C hcol2 --> 2.9060 mm

C aol2 (secao obtida)--> 18.4000 mm2

C ncondo --> 1 condutores

C ncond1 --> 1 condutores

C ncond2 --> 1 condutores

C * Enrolamento 3(secundario):

C I3 --> 109.8121 A

C s3(secao calculada) --> 36.6040 mm2

C lc3 --> 7.3480 mm

C hc3 --> 5.8270 mm

C a3(secao obtida) --> 40.5000 mm2

C ncond3 --> 1 condutores

C

=====
=====

C ARQUITETURA DOS ENROLAMENTOS DO REATOR

C

=====
=====

C * Isolacao:
C Ya --> 365.4347 mm
C Yb --> 259.7840 mm
C Yc --> 60.9380 mm
C Yd --> 720.6835 mm

C * Isolamento entre espiras para os enrolamentos primarios (No, N1 e N2):

C Ye012 --> 6.0622 mm

C * Isolamento entre espiras para o enrolamento secundario (N3):

C Ye3 --> 3.5512 mm

C * Execucao do enrolamento:

C Le --> 2.8586 m

C Area da travessa --> 1.0481 m

C Area da trajetoria de retorno --> 0.5240 m

C Diametro da travessa --> 1.0238 m

C Diametro da trajetoria de retorno --> 0.5119 m

C Profundidade da travessa e do retorno --> 1.0238 m

C

=====
=====

C COMPOSICAO DOS ENROLAMENTOS

C

=====
=====

C * Enrolamento No:

C lbo --> 12.7062 mm

C hbo --> 36.2728 mm

C ncamo --> 4 camadas

C Ncondo --> 173 condutores

C nbobo --> 173 bobinas

C * Enrolamento N1:

C lb1 --> 12.7062 mm
C hb1 --> 27.2046 mm
C ncam1 --> 3 camadas
C Ncond1 --> 171 condutores
C nbob1 --> 171 bobinas

C * Enrolamento N2:

C lb2 --> 12.7062 mm
C hb2 --> 18.1364 mm
C ncam2 --> 2 camadas
C Ncond2 --> 137 condutores
C nbob2 --> 137 bobinas

C * Enrolamento N3:

C lb3 --> 10.9992 mm
C hb3 --> 18.9563 mm
C ncam3 --> 2 camadas
C Ncond3 --> 173 condutores
C nbob3 --> 173 bobinas

C

=====
====

C INDUTANCIA DOS ENROLAMENTOS(nucleo de dois enrolamentos)

C

=====
====

C * Reatancias referidas ao enrolamento No:

C Xom1 --> 35.9041 ohms
C X3m1 --> 7.1540 ohms

C

=====
====

C INDUTANCIA DOS ENROLAMENTOS(nucleo de tres enrolamentos)

C

=====
=====

C * Reatancias referidas ao enrolamento N1:

C X1m2 --> -0.6945 ohms

C X2m2 --> 20.5453 ohms

C X3m2 --> 16.2710 ohms

C

=====
=====

C RESISTENCIA DOS ENROLAMENTOS

C

=====
=====

C * Enrolamento 0:

C Rcao --> 4.3937 ohms

C * Enrolamento 1:

C Rca1 --> 3.2446 ohms

C * Enrolamento 2:

C Rca2 --> 2.5133 ohms

C * Enrolamento 3:

C Rca3 --> 0.7397 ohms

C

=====
=====

C PARAMETROS DO FILTRO

C

=====
=====

C UNIDADE 1:

C * Resistencia:

C Rfiltro --> 0.001 ohms

C * Reatancia:

C X1filtro --> 14.3080 ohms
C * Capacitancia:
C C1 --> 0.5722 microFarad
C UNIDADEs 2 e 3:
C * Resistencia:
C Rfiltro --> 0.001 ohms
C * Reatancia:
C X23filtro --> 32.5421 ohms
C * Capacitancia:
C C23 --> 0.2516 microFarad