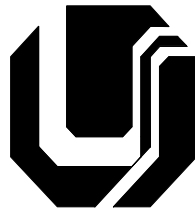


UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM
PROTÓTIPO DE REATOR SATURADO EM
ESCALA REAL: UMA ABORDAGEM
EXPERIMENTAL

ERALDO DA SILVA PEREIRA

Uberlândia, Setembro de 2008

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM PROTÓTIPO
DE REATOR SATURADO EM ESCALA REAL: UMA
ABORDAGEM EXPERIMENTAL**

Eraldo da Silva Pereira

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, perante a Banca Examinadora abaixo, como parte dos requisitos necessários á obtenção do título de Mestre em Ciências.

José Carlos de Oliveira, PhD. (Orientador) – UFU
Kleiber David Rodrigues, Dr. – UFU
Olívio Carlos Nascimento Souto, Dr. – UFU

Uberlândia, Setembro de 2008.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

P436a Pereira, Eraldo da Silva, 1956-
 Avaliação do desempenho de um protótipo de reator saturado em es-
cala real : uma abordagem experimental / Eraldo da Silva Pereira. - 2008.
 91 f. : il.

 Orientador: José Carlos de Oliveira.
 Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Progra-
ma de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
 Inclui bibliografia.

 1. Reatores elétricos - Teses. 2. Energia elétrica - Qualidade - Teses. I.
Oliveira, José Carlos de. II. Universidade Federal de Uberlândia. Progra-
ma de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU: 621.318.43

Elaborado pelo Sistema de Bibliotecas da UFU / Setor de Catalogação e Classificação

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM PROTÓTIPO DE REATOR SATURADO EM ESCALA REAL: UMA ABORDAGEM EXPERIMENTAL

ERALDO DA SILVA PEREIRA

Dissertação apresentada por Eraldo da Silva Pereira à Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências.

Prof. José Carlos de Oliveira, PhD.
Orientador

Prof. Darizon Alves de Andrade
Coordenador do Curso de
Pós- Graduação

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus queridos pais, Ennio (in memoriam) e Maria Zaramella, a minha amada esposa Emília e aos meus adoráveis filhos, Laura e Vinicius.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela força, proteção e benções em todos os momentos da minha vida.

Ao professor orientador José Carlos de Oliveira pelo incentivo, pela confiança na minha capacidade de realização, pela orientação segura e, principalmente, pela paciência, pela presteza e pela compreensão durante as etapas desafiadoras deste trabalho.

Ao professor Arnulfo Barroso Vasconcelos pelos esclarecimentos teóricos sobre a compensação reativa por meio dos Compensadores Estáticos a Reatores a Núcleo Saturado - CERNs.

Ao professor Jackson Marques Pacheco pelas informações sobre o projeto e a construção dos Reatores a Núcleo Saturado.

À minha família pelo apoio na realização do curso de mestrado e pela compreensão às várias ausências do seu convívio.

À REDE ENERGIA, na pessoa do engenheiro eletricista José Antonio Sorge - Vice Presidente de Mercado e Relações Institucionais – pelo apoio, incentivo, disponibilização do meu tempo de trabalho e aceitação das minhas eventuais ausências do escritório.

À CEMAT – Centrais Elétricas Matogrossenses S.A. pela oportunidade de realizar o ensaio do protótipo do Reator em uma das suas Subestações, na pessoa do engenheiro eletricista José Adriano Mendes da Silva, pela liberação da sua equipe para o ensaio em campo.

À MB Service, na pessoa do engenheiro eletricista Mario Marcio Calhao Barini, pela instalação provisória do reator na Subestação Coxipó, oportunizando os ensaios de campo.

Ao colega professor Bismarck Castillo Carvalho pela ajuda nos assuntos administrativos iniciais junto à UFU.

Aos colegas professores Mário Kiyoshi Kawaphara e Roberto Apolônio pela ajuda na discussão do tema desta dissertação e no ensaio de campo.

Ao colega professor Fernando Nogueira de Lima pela ajuda constante nos assuntos administrativos junto à UFMT e ao colega da pós-graduação Marcus Vinicius Borges Mendonça, nos assuntos administrativos junto à UFU.

À Acadêmica Loana Nunes Velasco pela colaboração na digitação e formatação desta Dissertação.

RESUMO

A crescente demanda de energia nos sistemas elétricos tem resultado em dificuldades crescentes na sua operação. Isso tem levado os especialistas a tratar o controle da potência reativa e da tensão com mais rigor, principalmente em sistemas elétricos com características radiais para atendimento de cargas sazonais. Para isso, os compensadores estáticos destacam-se como uma alternativa de grande potencial para o controle do fluxo de potência e melhoria do perfil de tensão dos sistemas elétricos. Nesse contexto, apresenta-se como uma alternativa atrativa em relação às outras propostas mais comercializadas no momento, um equipamento denominado CERNS – Compensador Estático a Reator a Núcleo Saturado, composto de um núcleo magnético com características e enrolamentos especiais e um conjunto de capacitores em série e em paralelo, em face da sua robustez, baixo custo, menores requisitos de manutenção e bom desempenho. Nesse cenário, surge esta dissertação cujo propósito é a investigação do comportamento de um protótipo de um reator a núcleo saturado ligado a uma rede de suprimento, para avaliar a sua efetividade e o comprometimento do seu padrão de qualidade, tais como: afundamentos e elevações de tensão, distorções harmônicas, desequilíbrios, temperatura e ruídos. Para tanto, foram realizados testes em um protótipo de reator a núcleo saturado para avaliação das seguintes questões: transitórios resultantes da energização do protótipo; correlação entre a tensão e a potência reativa, determinação das componentes harmônicas da tensão e da corrente; análise do comportamento térmico em operação contínua e verificação do nível de ruídos produzidos durante seu funcionamento.

Palavras-Chave: Reator Saturado, Compensador Estático a Reator a Núcleo Saturado, Qualidade da Energia.

ABSTRACT

The growing demand for energy in electric systems has resulted in greater difficulties to operate them. This has led specialists to deal more strictly with the control of reactive power and voltage, mainly in the case of radial electric systems, for the supply of seasonal loads. For this purpose, static compensators represent an alternative of great potential to control the power flow and improve the voltage profile of electric systems. In this context, the SCRSC or Saturated Core Reactor Static Compensator - made up of a magnetic core with special characteristics and winding and a set of capacitors in series and in parallel - becomes an interesting alternative, when compared to other types of equipment being sold at present, due to its robustness, low cost, fewer maintenance requirements and good performance. Within this scenario, the purpose of the present dissertation is to research the performance of a saturated core reactor prototype connected to a supply network, in order to assess its effectiveness and the effect on its quality standards, as for example: voltage peaks and valleys, harmonic distortions, unbalance, temperature and noise. Thus, tests were carried out on a saturated core reactor prototype to evaluate the following issues: transients as a result of prototype energizing; correlation between voltage and reactive power; definition of the harmonic components of voltage and current; analysis of the thermal performance in continuous operation and noise level verification during operation.

Keywords: Saturated Reactor, Saturated Core Reactor Static Compensator, Power Quality.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO	14
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	14
1.2 ESTADO DA ARTE.....	16
1.3 CONTRIBUIÇÕES DESTA DISSERTAÇÃO.....	18
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	19
ESTRATÉGIAS PARA O CONTROLE DE TENSÃO EM SISTEMAS ELÉTRICOS	21
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	21
2.2 CARACTERÍSTICAS DE OPERAÇÃO DOS SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA	22
2.3 CONTROLE DO FLUXO DE POTÊNCIA POR MEIO DE COMPENSADORES DE REATIVOS	25
2.4 COMPENSADORES ESTÁTICOS A REATOR A NÚCLEO SATURADO – CERNs	26
2.5 ARRANJO ELETROMAGNÉTICO E COMPENSAÇÃO INTRÍNSECA DE HARMÔNICOS PARA OS REATORES SATURADOS.....	28
2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	34
PROTÓTIPO DE REATOR SATURADO EM ESCALA REAL	35
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	35
3.2 DETALHES SOBRE O PROTÓTIPO DE REATOR EM ESCALA REAL	35
3.3 TESTES INICIAIS DO PROTÓTIPO EM FÁBRICA.....	44
3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	45
ENSAIOS DO PROTÓTIPO DO REATOR A NÚCLEO SATURADO EM CAMPO	46
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	46
4.2 EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO	47
4.3 INSTALAÇÃO FÍSICA DO REATOR.....	51
4.4 RESULTADOS OBTIDOS	55
4.4.1 – Desempenho elétrico durante o processo transitório de energização	55
4.4.2 – Desempenho elétrico em operação contínua	56

4.4.2.1 – Resultados obtidos com o reator no tap 1:	57
4.4.2.2 – Resultados obtidos com o reator no tap 2:	63
4.4.2.3 – Resultados obtidos com o reator no tap 3:	69
4.4.3 – Desempenho térmico	74
4.4.4 – Desempenho quanto ao ruído	76
4.5 ANÁLISE DAS MEDIÇÕES	77
4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	81
CONCLUSÕES GERAIS	83
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Representação de 2 (duas) barras interligadas por uma linha de transmissão.....	23
Figura 2.2 – Característica da potência transferida da barra “s” para a barra “r” em função do ângulo de carga δ_{sr} (sem compensação).	24
Figura 2.3 – Diagrama esquemático e características V x I de um compensador estático tipo reator saturado.....	27
Figura 2.4 – Reator trifásico:.....	29
Figura 2.5 – Esquema de conexão de um reator de 6 (seis) unidades:	31
(a) Conexão série; (b) Conexão paralela.....	31
Figura 2.6 – Diagrama fasorial do reator de 6 (seis) unidades:	32
Figura 3.2 – Vista superior do protótipo (cotas em milímetros).	37
Figura 3.3 – Vista frontal do protótipo (cotas em milímetros).	38
Figura 3.4 – Vista lateral do protótipo (cotas em milímetros).	39
Figura 3.5 – Arranjo físico para as bobinas e núcleos.	41
Figura 3.6 – Protótipo de reator twin-tripler em sua forma final.....	42
Figura 3.7 – Reator twin-tripler na subestação de testes – vista 1.....	42
Figura 3.8 – Reator twin-tripler na subestação de testes – vista 2.....	43
Figura 3.9 – Reator twin-tripler na subestação de testes – vista 3.....	43
Figura 4.1 – TC e TPI usados nos testes.....	47
Figura 4.2 – Para Raios para proteção do Reator.....	48
Figura 4.3 – Registrador de Perturbações.	48

Figura 4.4 - (a) Clamps de corrente 1000A/1 V; (b) Equipamento de medição e registro.	50
Figura 4.5– Termômetro Digital.	50
Figura 4.6 – Decibelímetro Digital.	51
Figura 4.7 – Diagrama Unificar da SE Coxipó.	52
Figura 4.8 – Vista 1 do reator instalado na subestação Coxipó.	53
Figura 4.9 – Vista 2 do reator instalado na subestação Coxipó.	53
Figura 4.10 –Variação das tensões e das correntes de energização do reator saturado.	55
Figura 4.11 – Relação entre a potência reativa e a tensão aplicada no reator - tap 1.	57
Figura 4.12 – Formas de onda das tensões e correntes - caso 1.1.	58
Figura 4.13 – Espectros harmônicos das tensões e correntes - caso 1.1.	58
Figura 4.14 – Formas de onda das tensões e correntes - caso 1.2.	59
Figura 4.15 – Espectros harmônicos das tensões e correntes - caso 1.2.	60
Figura 4.16 – Formas de onda das tensões e correntes - caso 1.3.	61
Figura 4.17 – Espectros harmônicos das tensões e correntes - caso 1.3.	61
Figura 4.18 – Formas de onda das tensões e correntes - caso 1.4.	62
Figura 4.19 – Espectros harmônicos das tensões e correntes - caso 1.4.	63
Figura 4.20 – Relação entre a Potência Reativa e a Tensão para o tap 2.	63
Figura 4.21 - Formas de onda das tensões e correntes - caso 2.1.	64
Figura 4.22 – Espectros harmônicos das tensões e correntes - caso 2.1.	65
Figura 4.23 – Formas de onda das tensões e correntes - caso 2.2.	66
Figura 4.24 – Espectros harmônicos das tensões e correntes - caso 2.2.	66

Figura 4.25 – Formas de onda das tensões e correntes - caso 2.3.....	67
Figura 4.26 – Espectros harmônicos das tensões e correntes - caso 2.3.	68
Figura 4.27 – Formas de onda das tensões e correntes - caso 2.4.....	69
Figura 4.28 – Espectros harmônicos das tensões e correntes - caso 2.4.	69
Figura 4.29 – Relação entre a Potência Reativa e a Tensão para o tap 3.....	70
Figura 4.30 – Formas de onda das tensões e correntes - caso 3.1.....	71
Figura 4.31 – Espectros harmônicos das tensões e correntes - caso 3.1.	71
Figura 4.32 – Formas de onda das tensões e correntes - caso 3.2.....	72
Figura 4.33 – Espectros harmônicos das tensões e correntes - caso 3.2.	73
Figura 4.34 – Formas de onda das tensões e correntes - caso 3.3.....	74
Figura 4.35 – Espectros harmônicos das tensões e correntes - caso 3.3.	74
Figura 4.36 - Medição de temperatura	75
Figura 4.37 - Medição de ruído.	76
Figura 4.38 – Relação entre a Potência Reativa e a Tensão para os tap´s 1,2 e3.....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Características físicas finais do reator saturado.....	36
Tabela 4.1 – Casos estudados para a operação em regime.....	56
Tabela 4.2 – Grandezas e valores para o caso 1.1.....	57
Tabela 4.3 – Grandezas e valores para o caso 1.2.....	59
Tabela 4.4 – Grandezas e valores para o caso 1.3.....	60
Tabela 4.5 – Grandezas e valores para o caso 1.4.....	62
Tabela 4.6 – Grandezas e valores para o caso 2.1.....	64
Tabela 4.7 – Grandezas e valores para o caso 2.2.....	65
Tabela 4.8 – Grandezas e valores para o caso 2.3.....	67
Tabela 4.9 – Grandezas e valores para o caso 2.4.....	68
Tabela 4.10 – Grandezas e valores para o caso 3.1.....	70
Tabela 4.11 – Grandezas e valores para o caso 3.2.....	72
Tabela 4.12 – Grandezas e valores para o caso 3.3.....	73
Tabela 4.13 – Medições de temperatura.....	75
Tabela 4.14 – Distorção Harmônica de Corrente.....	78

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A operação dos sistemas elétricos deve garantir aos seus clientes índices de qualidade dentro de padrões internacionalmente estabelecidos, especialmente quanto ao nível de tensão dos barramentos onde as cargas são ligadas. Para isso, os estudos de planejamento e operação devem levar em consideração o controle dos níveis de tensão, em faixas cada vez mais estreitas, de forma a garantir os valores próximos do nominal ou do nível contratado, o que pode ser feito por intermédio do controle do fluxo da potência reativa.

No contexto da compensação de reativos, como é amplamente conhecido, existe um expressivo número de soluções compreendendo desde as mais tradicionais, que empregam capacitores em derivação, até os dispositivos que utilizam as mais modernas técnicas da eletrônica, como é o caso dos controladores conhecidos por *Unified Power Flow Controller* - UPFC's.

Para algumas necessidades específicas, tais como áreas com baixa densidade populacional e grande aleatoriedade de consumo, como as encontradas em muitas linhas rurais, o uso de compensadores eletrônicos embora se constitua numa solução tecnicamente atrativa traz, conjuntamente,

inconvenientes atrelados com maiores requisitos quanto a: manutenção, custos de investimento, etc. Essa situação, com certeza, resulta no fato de que as soluções eletrônicas possam se mostrar de pequena viabilidade para tais aplicações.

Diante desse quadro, o desafio consiste em encontrar alternativas mais simples por intermédio de dispositivos que ofereçam vantagens como: baixo custo, manutenção reduzida, suportabilidade às intempéries e desempenho técnico adequado. Nesse aspecto, surge a idéia de se utilizar um dispositivo eletromagnético, já empregado no início dos anos 60, quando a tecnologia dos semicondutores era ainda incipiente. Esse dispositivo, enquadrado como um equipamento pertencente aos recursos da compensação estática fundamenta-se numa combinação de um núcleo magnético com características e enrolamentos especiais constituindo um reator e um conjunto de capacitores em série e paralelo. Esse conjunto resulta no conhecido Compensador Estático a Reator a Núcleo Saturado - CERNs. Como esclarece a literatura, tal arranjo oferece regulação apropriada para a tensão, tempo reduzido de resposta, robustez e baixa manutenção, como anteriormente posto. Essas características, adicionadas ao custo competitivo em comparação às alternativas eletrônicas, tornam esse dispositivo atrativo para uso em sistemas elétricos com as características mencionadas anteriormente.

Focando o princípio operacional dessa filosofia de equipamento, ressalta-se que esse tipo de compensador estático se diferencia bastante dos baseados na eletrônica, pois não emprega tiristores e qualquer sistema de controle para cumprir sua função básica. O reator tem o seu núcleo de forma fechada como de um transformador, sem enrolamento de potência no secundário.

O funcionamento do CERNs baseia-se na premissa que a potência reativa consumida pelo conjunto formado pelo compensador (reator+capacitor) e a carga deve, idealmente, ser constante. Havendo uma variação na carga, a corrente no reator do compensador também é modificada, sendo mínima à plena

carga e máxima na condição a vazio. Por isso, diz-se que a sua reatância é auto-ajustável e não necessita de equipamentos de controle [1].

1.2 ESTADO DA ARTE

A utilização do reator a núcleo saturado já é conhecida no âmbito dos compensadores estáticos. Várias pesquisas já foram realizadas e resultaram em publicações cujos resultados do levantamento bibliográfico efetuado são relatados a seguir.

A tecnologia de reatores saturados de múltiplos núcleos foi desenvolvida pela GEC (*General Electric Company* – Inglaterra) durante a segunda guerra mundial com a finalidade principal de ser empregada como multiplicador de frequência e gerador de trens de pulsos. O uso final estava direcionado para a alimentação de uma grade de controle para retificadores formados por válvulas de mercúrio [2], [3], [4], [5].

A capacidade de um reator saturado de múltiplos núcleos em manter sua tensão terminal praticamente constante só foi aproveitada posteriormente. O primeiro compensador estático com emprego de reatores saturados resultou num equipamento de exagerado peso e volume, assim como também um desempenho precário devido à baixa qualidade do material magnético empregado. Várias pesquisas voltadas ao desenvolvimento de materiais magnéticos com propriedades superiores foram então realizadas. Isso produziu núcleos magnéticos de alta qualidade, com destaque a um ciclo de histerese quase que retangular. Com isso foi possível a construção de reatores a núcleo saturado de alta eficiência, confiabilidade e elevada expectativa de vida [6]. As primeiras aplicações comerciais aconteceram na década de 60 e focaram, sobretudo, o controle da flutuação de tensão, principalmente em indústrias siderúrgicas [13]. Na sequência, várias outras formas de utilização, inclusive em sistemas

elétricos, foram registradas. Uma das mais importantes foi no sistema de transmissão de corrente contínua *Cross Chanel* ligando a Inglaterra à França [7].

A fabricação de compensadores estáticos com reatores saturados pela GEC permaneceu por um período de mais de 30 anos, ao longo dos quais foram fornecidos cerca de 36 equipamentos para vários tipos de aplicações em sistemas industriais [2], [7], [8], [9], [10], [11] e empresas do setor elétrico [12], [18], [19] e [20]. Posteriormente, a GEC transferiu essa tecnologia para outra empresa, passando a fabricar apenas compensadores estáticos controlados por tiristores. De acordo com as referências [14] e [15], foram fabricados e instalados na Austrália outros equipamentos de compensação de reativos a núcleo saturado.

Os conceitos e princípios básicos sobre o funcionamento dos compensadores a reator a núcleo saturado são discutidos em [16], [20], [21], [22] e [23]. Observa-se que as publicações indicam preocupações quanto à injeção de harmônicos [18] e [19] no sistema por parte dos compensadores a reator a núcleo saturado, resultando em variadas topologias para os mesmos. Para minimizar esse fato foram definidos os tipos de reatores denominados *twin-tripler* (12 pulsos) ou *treble-tripler* (24 pulsos) [2], [14], [15], [17], [18], [19], [20] e [22].

Por fim, vale relatar que, muito embora o grande número dos documentos supra mencionados, observa-se a escassez de uma bibliografia voltada para as questões de projeto e construção dos reatores saturados, a não ser pelos trabalhos produzidos pela equipe de pesquisas formada por membros pertencentes à Universidade Federal de Uberlândia em conjunto com a Universidade Federal do Mato Grosso.

Procurando romper as dificuldades próprias do processo da fabricação, os primeiros passos conhecidos em nível nacional, podem ser identificados nas referências [25], [26], [27] e [28]. Esses trabalhos relatam a construção de protótipos e também produtos em escala real. Não obstante os esforços feitos, os

documentos esclarecem as dificuldades encontradas, principalmente no que tange às questões térmicas. De fato, um dos primeiros equipamentos testados, em campo, muito embora o bom desempenho obtido quanto à sua operação eletromagnética, indicou temperaturas inadmissíveis pelos materiais componentes e subseqüentes danos no protótipo. Não obstante a isso, ressalta-se que tais desenvolvimentos marcaram, dentro do contexto nacional, uma retomada às questões de projeto e construção do produto em pauta.

1.3 CONTRIBUIÇÕES DESTA DISSERTAÇÃO

Dentro do tema geral associado com os conceitos, projeto, fabricação e operação dos compensadores estáticos de reativos fundamentados na tecnologia do reator a núcleo saturado, ainda existem grandes questionamentos a serem respondidos e, dentro desse contexto, esta dissertação, somada aos esforços conduzidos numa pesquisa paralela de doutorado: “*Determinação dos Parâmetros de Compensadores Estáticos de Reativos e Estratégia para o Projeto Otimizado de Reatores Saturados*, de Jackson Marques Pacheco” objetiva contribuir com os seguintes pontos:

- Avaliar as condições operativas de um protótipo de reator a núcleo saturado em escala real, com destaque ao seu desempenho transitório de energização e operação contínua;
- Analisar o funcionamento do reator sob diversas situações para a tensão de suprimento e sua correlação com o consumo de potência reativa, geração de correntes harmônicas, etc;
- Investigar o comportamento térmico do protótipo durante seu funcionamento contínuo e em sobrecarga;
- Verificar os níveis de ruídos produzidos pelo reator quando de sua operação sob condições de saturação; e

- Contribuir para o estabelecimento de medidas orientativas ao domínio da tecnologia da fabricação de um produto, em consonância com as necessidades técnicas e restrições operativas determinadas pela regulamentação aplicável.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Em consonância com o exposto, além do presente capítulo introdutório, esta dissertação é desenvolvida obedecendo à seguinte estrutura:

Capítulo II ESTRATÉGIAS PARA O CONTROLE DE TENSÃO EM SISTEMAS ELÉTRICOS

Este capítulo tem por objetivo abordar, de forma geral, a compensação reativa e o significado do controle de tensão para os sistemas elétricos de potência, especialmente, por meio de compensadores estáticos que utilizam um reator a núcleo saturado.

Capítulo III PROTÓTIPO DE REATOR SATURADO EM ESCALA REAL

Esta unidade da dissertação destina-se a apresentar o protótipo do reator a núcleo saturado e os testes iniciais em fábrica.

ENSAIOS DO PROTÓTIPO DO REATOR A NÚCLEO

Capítulo IV SATURADO EM CAMPO

Este capítulo está direcionado à avaliação de desempenho do protótipo de reator a núcleo saturado quando submetido a diversas condições reais de operação em campo. São focados aspectos relacionados com os transitórios de energização, formas de onda das correntes, potências reativas, temperatura de operação, ruídos, etc.

Capítulo V CONCLUSÕES GERAIS

Este capítulo contempla análises e discussões sobre os principais resultados e constatações finais atrelados com os objetivos maiores desta dissertação.

CAPÍTULO II

ESTRATÉGIAS PARA O CONTROLE DE TENSÃO EM SISTEMAS ELÉTRICOS

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os modernos conceitos vinculados com a operação dos sistemas elétricos incluem várias questões relacionadas com os indicadores de qualidade. Desses destaca-se, sobremaneira, os níveis das tensões, os quais se encontram regulamentados por portarias ou outros processos de regulamentação da matéria. De um modo especial reconhecem-se, na atualidade, os esforços conduzidos pela ANEEL no sentido do estabelecimento das diretrizes previstas pelo PRODIST (Procedimentos da Distribuição).

Se, de um lado cresce a relevância do assunto no que tange à observância dos padrões regulamentados, de outro, aumenta a demanda de potência requerida e seus subseqüentes impactos sobre as redes elétricas. Fatos como esses tem levado os especialistas a tratar o controle da potência reativa e da tensão com mais rigor, principalmente em sistemas elétricos com características radiais e com cargas de grande sazonalidade.

Diante desse quadro, os estudos de planejamento e operação devem levar em consideração o controle dos níveis de tensão em faixas cada vez mais estreitas de forma a garantir os valores próximos do nominal ou de referência,

ou ainda, do valor contratado. Isso pode ser feito por intermédio de diversos mecanismos, dentre os quais, ressalta-se o controle do fluxo da potência reativa. Nesse contexto reconhece-se que, ao longo dos anos, inúmeras soluções se apresentam como estratégias apropriadas aos fins aqui almejados. Dentre as propostas comercialmente disponíveis no mercado destacam-se as mais simples e tradicionais que empregam bancos de capacitores fixos em derivação, até as soluções fundamentadas nas modernas técnicas da eletrônica, como é o caso dos controladores unificados que empregam conversores de frequência e sofisticados arranjos de controle.

Em linhas gerais, as técnicas de compensação reativa dos sistemas elétricos de potência são explanadas neste capítulo, destacando-se, de modo pontual, os conceitos sobre os compensadores estáticos a reator a núcleo saturado.

2.2 CARACTERÍSTICAS DE OPERAÇÃO DOS SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

A maioria dos atuais sistemas elétricos de potência opera com compensações de reativos fixas ou chaveadas mecanicamente [24], juntamente com transformadores reguladores de tensão a fim de otimizar a impedância da linha, minimizar as variações de tensão em regime permanente ou em condições de lentas variações de carga.

A fim de melhor visualizar a necessidade da compensação reativa, veja o sistema de transmissão simplificado da figura 2.1.

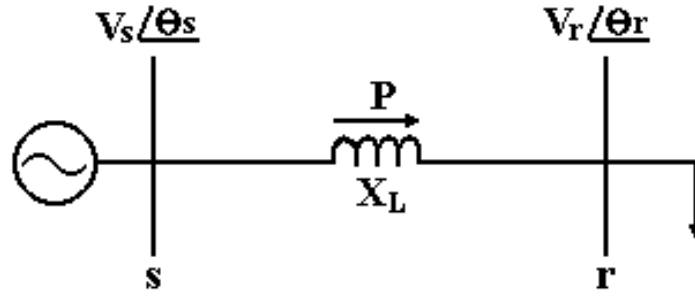


Figura 2.1 – Representação de 2 (duas) barras interligadas por uma linha de transmissão.

O fluxo de potência nessa linha, desprezando-se a resistência, é dado em função do ângulo de carga, da magnitude das tensões nos terminais e da impedância da linha, como mostra a equação (2.1).

$$P = \frac{V_s V_r}{X_L} \sin \delta_{sr} \quad (2.1)$$

onde:

P – Potência que flui da barra “s” para a barra “r”;

V_s – Magnitude da tensão na barra “s”;

V_r – Magnitude da tensão na barra “r”;

δ_{sr} – Ângulo de carga ($\theta_s - \theta_r$);

θ_s – Ângulo de fase da tensão V_s ;

θ_r – Ângulo de fase da tensão V_r ; e

X_L – Impedância da linha.

Verifica-se então que, não havendo controle algum sobre tais parâmetros, o comportamento da potência elétrica que flui da barra “s” para a barra “r” em função do ângulo de carga δ_{sr} obedece à curva apresentada na figura 2.2.

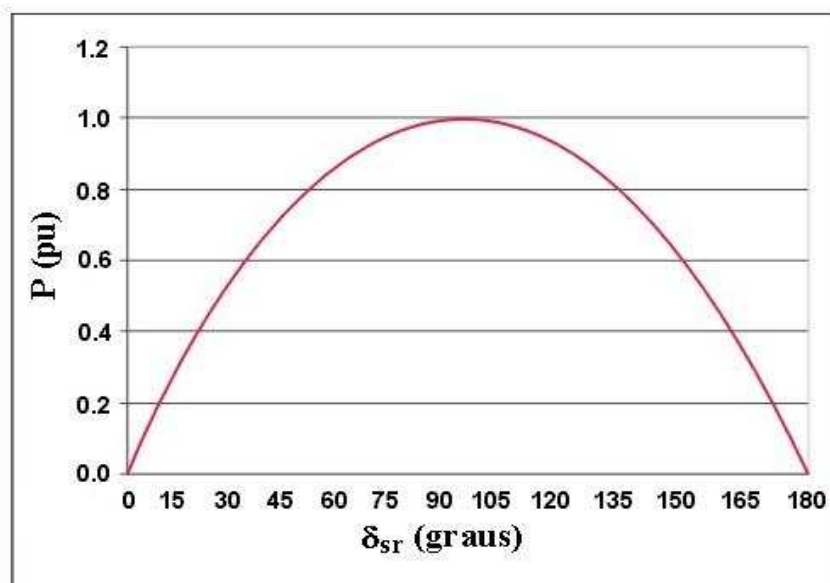


Figura 2.2 – Característica da potência transferida da barra “s” para a barra “r” em função do ângulo de carga δ_{sr} (sem compensação).

Da figura 2.2 observa-se que a máxima potência está associada ao ângulo de carga de 90°, e uma elevação desse ângulo, causada pelo aumento do carregamento da linha, implica na instabilidade do sistema de transmissão.

Verifica-se, também, na equação (2.1), que uma alteração nos parâmetros das linhas de transmissão permite obter um melhor aproveitamento das mesmas.

Diante disso, pode-se ressaltar que a compensação reativa paralela e/ou série para o controle do fluxo de potência proporciona os seguintes benefícios:

- Melhor controle do fluxo de potência;
- Aumento na capacidade de transporte das linhas de transmissão até as proximidades do seu limite;
- Menor impacto ambiental comparado com outras técnicas alternativas de expansão do sistema de transmissão;
- Maior possibilidade de transferência de potência entre redes interligadas e a conseqüente diminuição da margem de reserva de geração; e

- Amortecimento das oscilações dos sistemas de potência que podem causar danos a equipamentos e/ou limitar a capacidade de transmissão do sistema.

2.3 CONTROLE DO FLUXO DE POTÊNCIA POR MEIO DE COMPENSADORES DE REATIVOS

Focando, especificamente, os compensadores de reativos, dentro dos princípios básicos que norteiam tais dispositivos, esses podem ser agrupados em 3 (três) categorias, de acordo com as suas finalidades e conexão ao sistema. São elas:

- Equipamentos para compensação paralela;
- Equipamentos para compensação série; e
- Equipamentos defasadores.

Além disso, o universo dos compensadores engloba recursos diversos que proporcionam a ação final desejada e, diante desse quadro, reconhece-se, dentre outras filosofias, o conjunto de dispositivos dinâmicos a exemplo dos: compensadores com controle e/ou chaveamento tiristorizados; compensadores com reatores a núcleo saturado; e compensadores que utilizam a tecnologia eletrônica dos conversores PWM.

Aqueles fundamentados no princípio da saturação magnética correspondem aos dispositivos focados nesta dissertação e, por tal motivo, serão detalhados nas análises subseqüentes.

2.4 COMPENSADORES ESTÁTICOS A REATOR A NÚCLEO SATURADO – CERNs

Para as situações em que o nível de exigência não determina um controle tão refinado para as tensões, porém oferecendo desempenhos condizentes com a legislação aplicável, o desafio consiste em encontrar soluções mais simples, de menor custo de investimentos e manutenção, sem se esquecer do quesito atrelado com o desempenho técnico adequado. Nesse aspecto, surge como já mencionada, a idéia do emprego de uma tecnologia fundamentada tão apenas em princípios eletromagnéticos, similarmente aos transformadores. Essa estratégia já foi empregada no passado quando a tecnologia dos semicondutores era ainda incipiente.

O dispositivo fundamenta-se numa combinação de um núcleo magnético com características e enrolamentos especiais constituindo um reator e um conjunto de capacitores em paralelo. Complementa-se com um capacitor, ligado em série com o reator, para atuar no estatismo do núcleo magnético, ajustando sua curva de saturação. O arranjo, assim caracterizado, foi designado, no início dos anos 60, por Compensador Estático a Reator a Núcleo Saturado – CERNs.

O equipamento assim obtido oferece como vantagens inerentes ao princípio funcional as seguintes propriedades: regulação apropriada para a tensão, reduzido tempo de resposta, robustez e baixa exigência de manutenção. Essas características, adicionadas ao baixo custo em comparação às alternativas eletrônicas, evidenciam um compensador dinâmico de reativo bastante atrativo para uso em sistemas elétricos com as características mencionadas anteriormente.

Como ressaltado, esse tipo de compensador estático se diferencia substancialmente dos equipamentos que utilizam a eletrônica de potência como tecnologia de base. De fato, o equipamento em pauta não emprega qualquer tipo

de semicondutor para os chaveamentos e não exige qualquer sistema de controle para exercer sua função básica. O funcionamento do equipamento fundamenta-se no fato de que, havendo variações da tensão nos terminais do mesmo, ocorrerá alteração de suas características operacionais de forma a contribuir para a restauração do nível de tensão. Quando da ocorrência de reduções dessa grandeza, o reator funciona numa condição tal a absorver um valor reduzido de potência reativa e diante dessa situação o banco de capacitores em paralelo assume papel predominante na questão da potência reativa. Em caso contrário, isto é, uma vez manifestada uma elevação da tensão, o reator é conduzido a um nível maior de saturação e, sob tais circunstâncias, a potência reativa indutiva passa a ser preponderante. Enfim, o processo se comporta como se houvesse um controle inerente ao dispositivo que o adapta às distintas condições impostas pelas tensões do barramento, o que confere ao produto um desempenho dinâmico similar aquele obtido com os compensadores eletrônicos.

O conjunto final obtido, qual seja, o Compensador Estático de Reativos a Núcleo Saturado (CERNS), encontra-se esquematicamente indicado (domínio do tempo) na figura 2.3, a qual apresenta, também, sua curva operativa típica (domínio da freqüência).

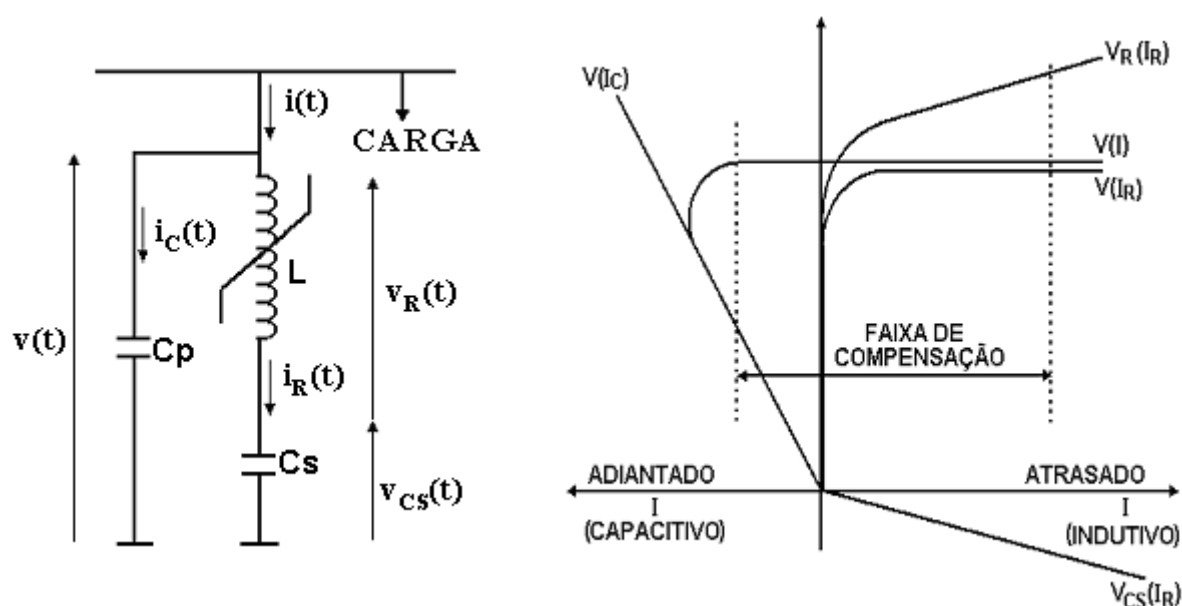


Figura 2.3 – Diagrama esquemático e características $V \times I$ de um compensador estático tipo reator saturado

Na figura 2.3 tem-se:

- $i(t)$ – Corrente no ramo entre o CERNs e o sistema CA;
- $v(t)$ – Tensão nos terminais trifásicos do CERNs;
- $v_R(t)$ – Tensão nos terminais do reator;
- $i_C(t)$ – Corrente no ramo do capacitor *shunt*;
- $v_{CS}(t)$ – Tensão nos terminais do capacitor colocado em série com o reator a núcleo saturado;
- L – Indutância do reator a núcleo saturado;
- $i_R(t)$ – Corrente no reator a núcleo saturado;
- C_p – Capacitância do capacitor em paralelo; e
- C_s – Capacitância do capacitor série.

2.5 ARRANJO ELETROMAGNÉTICO E COMPENSAÇÃO INTRÍNSECA DE HARMÔNICOS PARA OS REATORES SATURADOS

Um reator saturado, embora capaz de promover a compensação de reativos e controlar a tensão, tem a desvantagem de introduzir apreciáveis níveis de correntes harmônicas no sistema ao qual se encontra conectado. Objetivando atenuar tais efeitos negativos, foram desenvolvidas várias configurações de dispositivos trifásicos, visando reduzir o conteúdo harmônico das correntes.

O dispositivo trifásico mais simples consiste de 3 (três) reatores saturados monofásicos conectados em estrela e com o ponto comum ligado ao neutro, conforme mostra a figura 2.4(a). O arranjo pode ser visto como 3 (três) circuitos básicos independentes. Nessa condição, as componentes ímpares se manifestam nas formas de onda das correntes para cada fase, não trazendo qualquer ganho

em relação à atenuação da distorção harmônica. Todavia, a mera desconexão do neutro do reator (ou terra) do sistema resulta em expressivos ganhos para essa atenuação. Essa configuração está atrelada ao arranjo da figura 2.4(b).

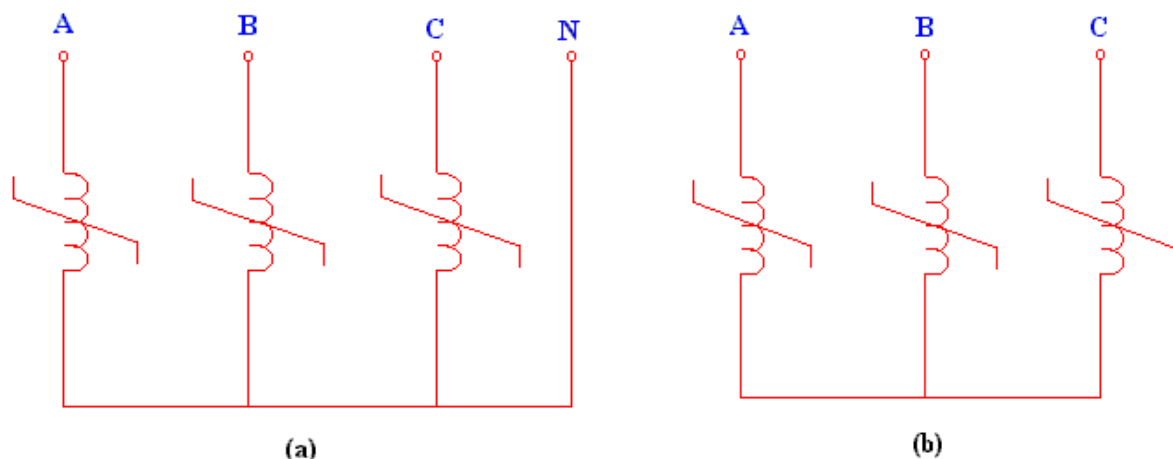


Figura 2.4 – Reator trifásico:

(a) Ponto comum-estrela conectado ao neutro;

(b) Ponto comum-estrela não conectado ao neutro.

Utilizando-se o diagrama do circuito da figura 2.4(b), isto é, o ponto comum-estrela isolado, os harmônicos triplos são excluídos pelo sistema trifásico. Cada unidade opera sobre as mesmas leis físicas, como uma unidade isolada, mas restritas aos seus limites físicos. A tensão trifásica fornecida, para fins das análises e constatações feitas a seguir, deve ser considerada equilibrada e com valor suficiente para levar as unidades à saturação. Dentro dessas hipóteses, as unidades do reator não são saturadas, a cada vez, por um período de $180^\circ / 3 = 60^\circ$, o que ocorre 2 (duas) vezes em cada ciclo da frequência de linha, mas são saturadas no restante do ciclo. O grupo assim formado provocará correntes polifásicas com harmônicas da ordem $n = (6K \pm 1) = 5, 7, 11, 13, \dots$

Por esse motivo, a busca por soluções que venham a reduzir os níveis das distorções harmônicas constitui-se em um tema de extrema relevância para o domínio da tecnologia de construção de reatores saturados.

Experiências anteriores indicam que um reator de 6 (seis) unidades (ou colunas magnéticas), formado por 2 (dois) arranjos físicos de reatores trifásicos, constitui-se numa boa medida para se atingir esse objetivo. Essas 2 (duas) estruturas físicas podem, ainda, ser conectadas em série ou paralelo, com cada unidade operando sob as mesmas leis físicas que uma unidade isolada, respeitados seus limites, os quais dependerão das disposições dos enrolamentos de cada unidade e do tipo de conexão usado. No entanto, é certo afirmar que o fluxo magnético em cada unidade e, conseqüentemente, a *fem* em cada enrolamento, para todas as unidades, serão portadoras de componentes harmônicas de ordem $(6K \pm 1) = 5, 7, 11, 13, 17, \dots$. Essa situação, como se sabe, assume que o ponto comum-estrela ou os pontos do reator não são conectados ao neutro do sistema de suprimento, e que, a tensão aplicada é elevada o suficiente para levar os núcleos à saturação.

Fixando como objetivo a eliminação ou redução das componentes harmônicas de linha de ordem 5° e 7°, pode-se, a princípio, imaginar 2 (duas) soluções. Para o caso da conexão em série, a solução consiste em eliminar tais componentes em cada um dos reatores trifásicos que perfazem o conjunto de 6 (seis) unidades. Para o caso da conexão em paralelo, a estratégia consiste em manter as harmônicas em cada uma das unidades trifásicas individuais e processar o cancelamento, quando da interligação das mesmas por meio de um mecanismo de defasagem angular entre os equipamentos.

Objetivando atender aos propósitos supra mencionados, podem-se reconhecer várias possibilidades de disposições de enrolamentos que asseguram a operação simétrica das unidades. Uma delas consiste no uso de 2 (dois) enrolamentos *zig-zag* com ângulo de 30° entre eles, conectados em série ou paralelo, como ilustrado na figura 2.5. A técnica da compensação angular encontra forte sustentação nas soluções clássicas empregadas pela eletrônica de potência para a obtenção de sistemas retificadores de 12 pulsos, quando são

exigidas 2 (duas) unidades retificadoras supridas por intermédio de transformadores defasados de 30°.

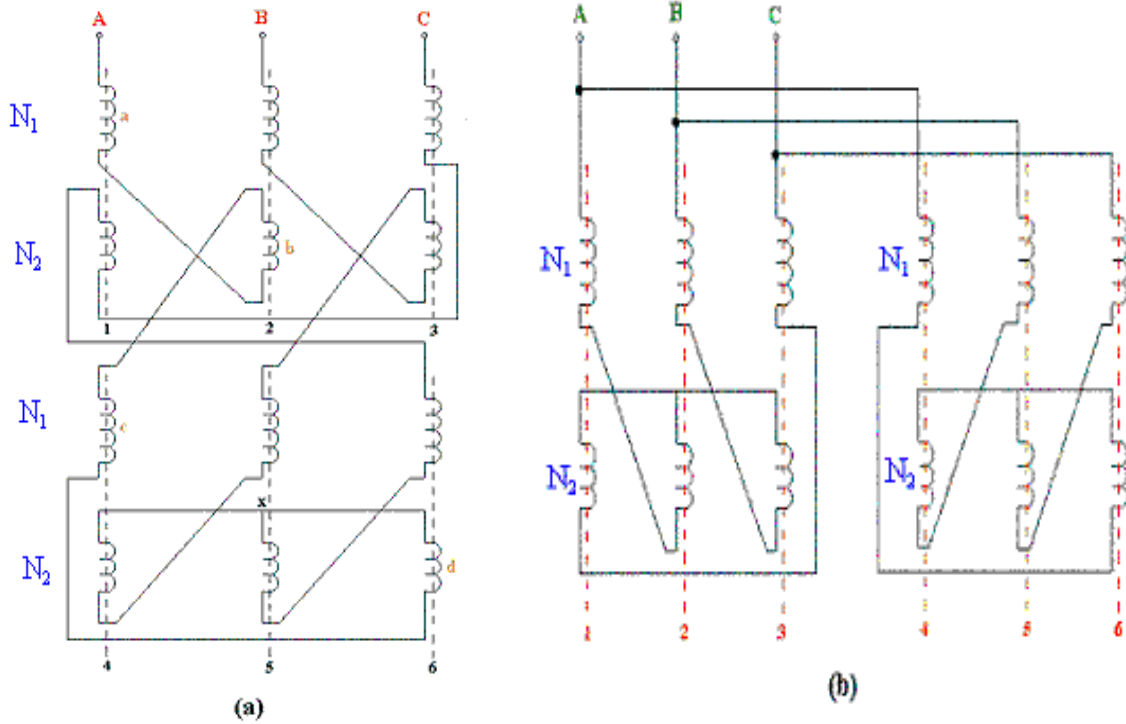


Figura 2.5 – Esquema de conexão de um reator de 6 (seis) unidades:

(a) Conexão série; (b) Conexão paralela.

De modo a proporcionar a almejada defasagem de 30°, os enrolamentos são projetados de acordo com o diagrama fasorial da figura 2.6(a), ou seja, com uma razão de espiras $N_2/N_1 = 0,366$, assegurando assim uma família de 6 (seis) ondas das fmm 's (forças magnetomotrizes) deslocadas de 30° uma da outra, utilizando um conjunto de correntes trifásicas equilibradas. A fmm em cada núcleo é a soma das fmm 's nos enrolamentos daquele núcleo. Assim sendo, F_1 será, por exemplo, dado pela soma de $N_1 \cdot I_A$, em fase com a corrente na fase **A**, com $N_2 \cdot I_C$, em oposição de fase com a corrente na fase **C**. O diagrama fasorial

dos fluxos é exatamente o mesmo, mas atrasado de 90° , como mostra a figura 2.6(b).

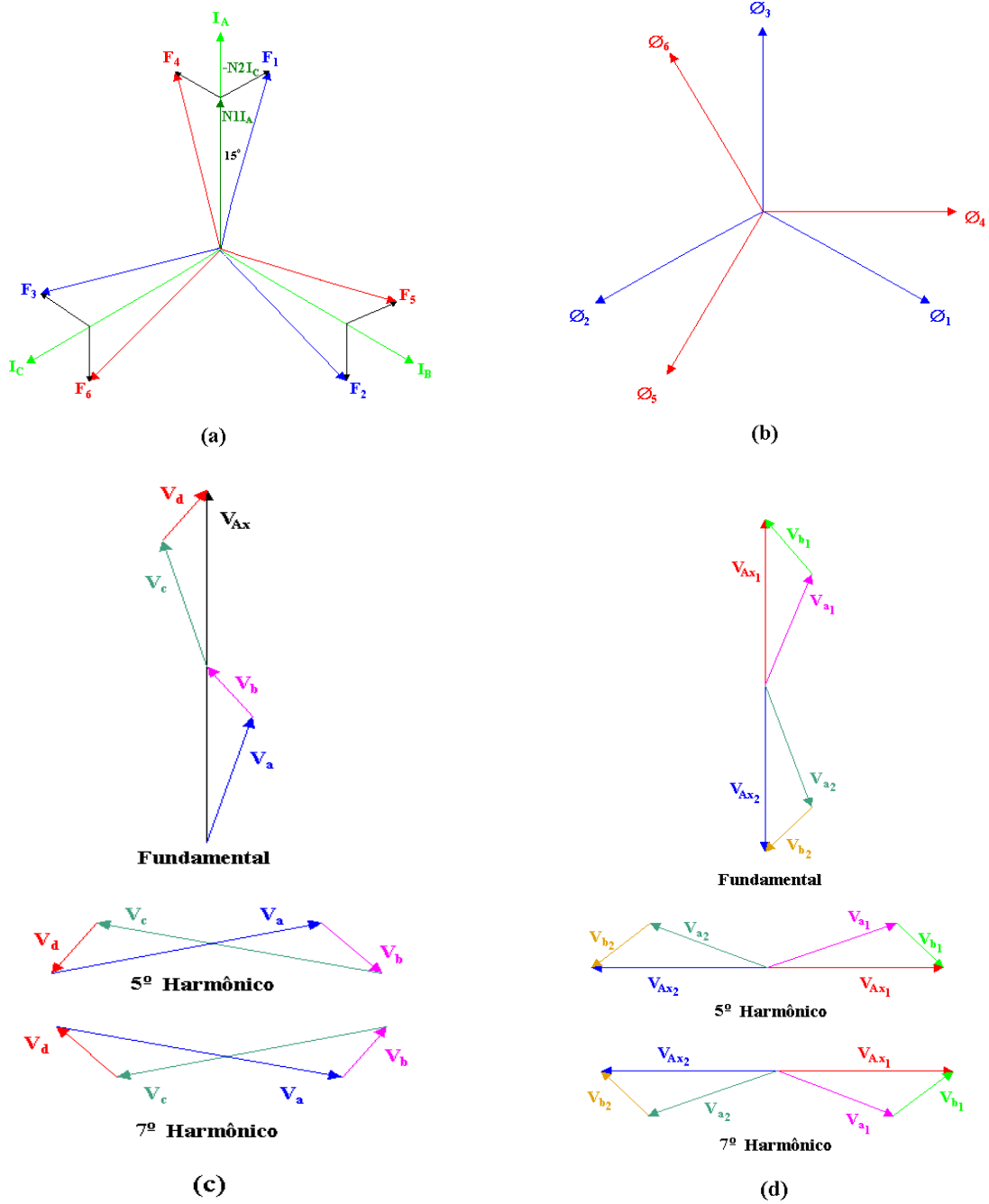


Figura 2.6 – Diagrama fasorial do reator de 6 (seis) unidades:

- (a) Fmm's; (b) Fluxos;
- (c) Tensão de fase para o ponto comum-estrela na conexão série;
- (d) Tensão de fase para o ponto estrela-comum na conexão paralela.

A componente fundamental, assim como, os componentes harmônicos de ordem 5º e 7º da tensão entre a fase **A** e o ponto comum-estrela (ou pontos) são mostrados na figura 2.6(c) e (d) para as conexões série e paralela, respectivamente. Para a conexão série, por exemplo, a tensão V_{AX} é a soma das *fmm's* (da forma $N \frac{d\phi}{dt}$) nos enrolamentos **a, b, c, e d** indicados na figura 2.5(a). Considerando a corrente I_A como referência, a componente fundamental da tensão $V_a = N_1 \frac{d\phi_1}{dt}$ está adiantada de 90º de Φ_1 , por conseguinte, em fase com F_1 e atrasada 15º de I_A . O 5º e o 7º harmônico desta tensão estão atrasados de I_A por $15^\circ \times 5 = 75^\circ$ e $15^\circ \times 7 = 105^\circ$ de I_A , respectivamente. A componente fundamental da tensão $V_b = N_2 \frac{d\phi_2}{dt}$ está em oposição de fase com F_2 e, por conseguinte, adiantada 45º de I_A e o 5º e o 7º harmônicos estão adiantados de $45^\circ \times 5 = 225^\circ$ e $45^\circ \times 7 = 315^\circ$ de I_A , respectivamente. O mesmo procedimento pode ser aplicado às outras tensões.

Do exposto segue que o 5º e o 7º harmônico de tensão são nulos na conexão série, e o mesmo ocorrendo com as correntes no reator e nas linhas. Essa propriedade confere a designação de um equipamento de 12 pulsos, como tradicionalmente ocorre para o caso de unidades retificadoras que apresentam o mesmo conteúdo harmônico supra mencionado.

Na conexão paralela as tensões do reator apresentam o 5º e o 7º harmônico, sendo que um desempenho similar se observa para as correntes do reator. No entanto, esses harmônicos estão em oposição fase em cada *zig-zag*, e, por conseguinte, cancelam-se na interligação. As correntes de linha não apresentam, portanto, o 5º e o 7º harmônico.

2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente capítulo, de caráter informativo, foi desenvolvido no sentido de proporcionar uma visão geral a respeito da compensação reativa por meio de compensadores estáticos a reator a núcleo saturado.

Para tanto, inicialmente foram apresentados os conceitos da operação dos sistemas elétricos de potência associados ao indicador da qualidade do nível de tensão e a necessidade de aplicação da filosofia de compensação de reativos. Também foram evidenciadas as características de operação dos sistemas elétricos, constatada a possibilidade do controle do fluxo de potência por meio da compensação reativa e destacados os benefícios alcançados com essa medida.

Em seguida foram apresentados os princípios de operação dos compensadores no controle do fluxo de potência e apresentados os tipos de equipamentos de compensação reativa dos sistemas elétricos.

De modo especial foi apresentado o compensador estático a reator a núcleo saturado (CERNS) e descritos os seus principais aspectos na compensação de reativos e evidenciada a sua forma de atuação, já que se trata do equipamento cujo princípio está baseado na operação de um reator de núcleo saturado, cuja análise experimental de um protótipo em campo é objeto desta dissertação.

Finalmente foram apresentadas as possibilidades de arranjos dos enrolamentos dos reatores para assegurar uma operação simétrica na unidade com a devida redução do conteúdo harmônico associado com as correntes de linha.

Por tais motivos surge a versão comercial formada por reatores de 6 (seis) unidades, qual seja, o *twin-tripler* estudado neste capítulo. Esse equipamento apresenta uma melhor forma de onda da corrente de linha, sendo que essas correntes contêm somente harmônicas de ordem $(12K \pm 1)$, comportando-se de modo similar aos arranjos de 12 pulsos tão conhecidos da eletrônica de potência.

CAPÍTULO III

PROTÓTIPO DE REATOR SATURADO EM ESCALA REAL

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Uma vez que as bases voltadas para a definição dos principais componentes de um compensador estático de reativos, do pré-projeto de reatores saturados e, finalmente, do projeto final de um protótipo em escala real de um reator saturado constituíram-se em temas detalhadamente explorados em [29], esta unidade da dissertação encontra-se direcionada tão apenas à apresentação do produto final obtido e a sintetizar os testes iniciais de desempenho realizados no âmbito da fábrica.

3.2 DETALHES SOBRE O PROTÓTIPO DE REATOR EM ESCALA REAL

Fundamentado nas premissas e resultados fornecidos em [29], a tabela 3.1 resume as principais características elétricas e informações construtivas

relacionadas com o reator projetado e focadas nas análises subseqüentes deste trabalho.

Tabela 3.1 – Características físicas do reator saturado.

<i>Item</i>	<i>Característica</i>
Potência	570 kVAr
Classe de tensão	15 kV
Frequência	60 Hz
Fases	03
Número de <i>taps</i>	04
Peso do reator	4900 kg
Volume de óleo	1400 litros
Meio isolante	Óleo mineral
Material dos enrolamentos	Cobre eletrolítico
Núcleo	Aço silício GO-0,27 mm
Isoladores	Porcelana
Comutador	Acionamento externo
Tanque	Confeccionado com aço carbono
Pintura	Cor cinza claro padrão MUNSELL N6,5
Área do núcleo	198,02 cm ²
Caminho magnético médio	1962 mm
Número espiras superior	284
Número espiras inferior	104
Fator de empilhamento	0,967
Indução de saturação	1,7 T

As figuras 3.2, 3.3 e 3.4 são ilustrativas das dimensões definidas para o projeto final do protótipo de reator.

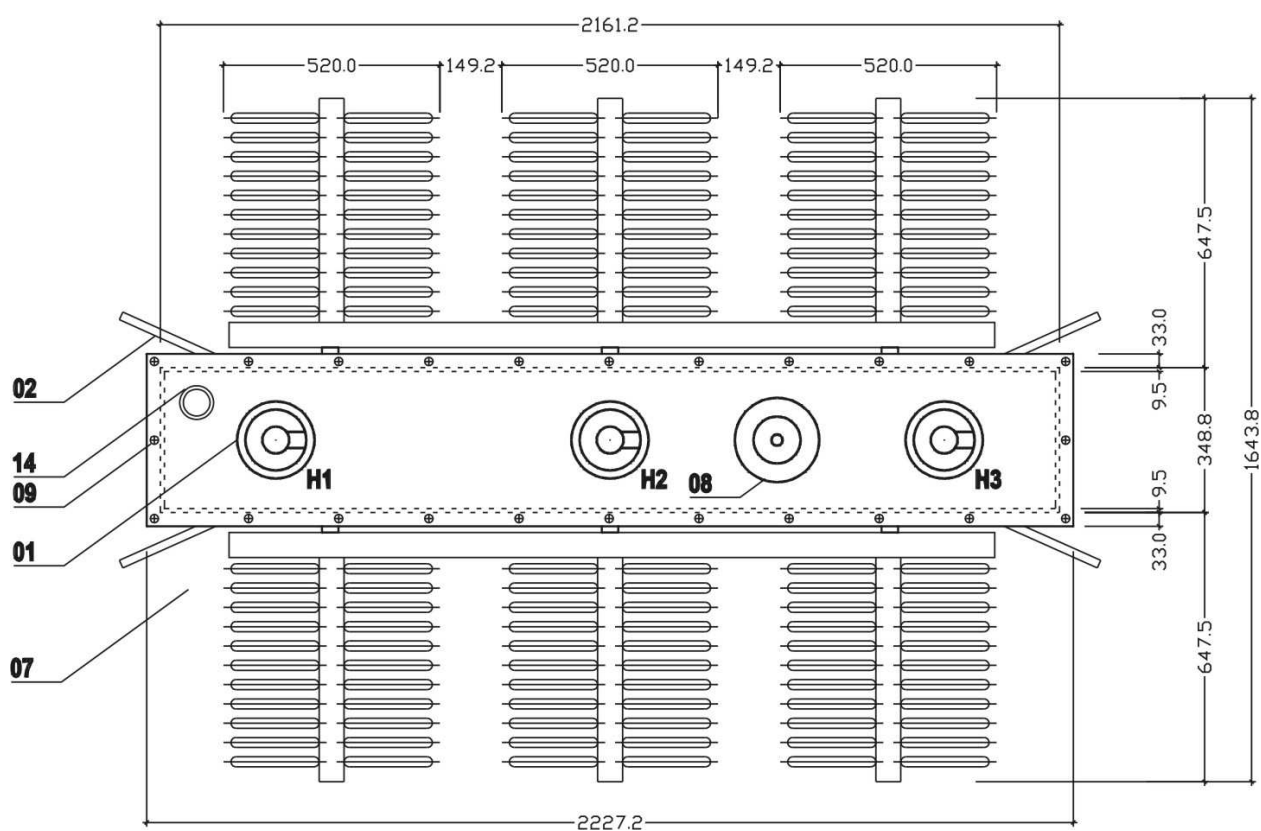


Figura 3.2 – Vista superior do protótipo (cotas em milímetros).

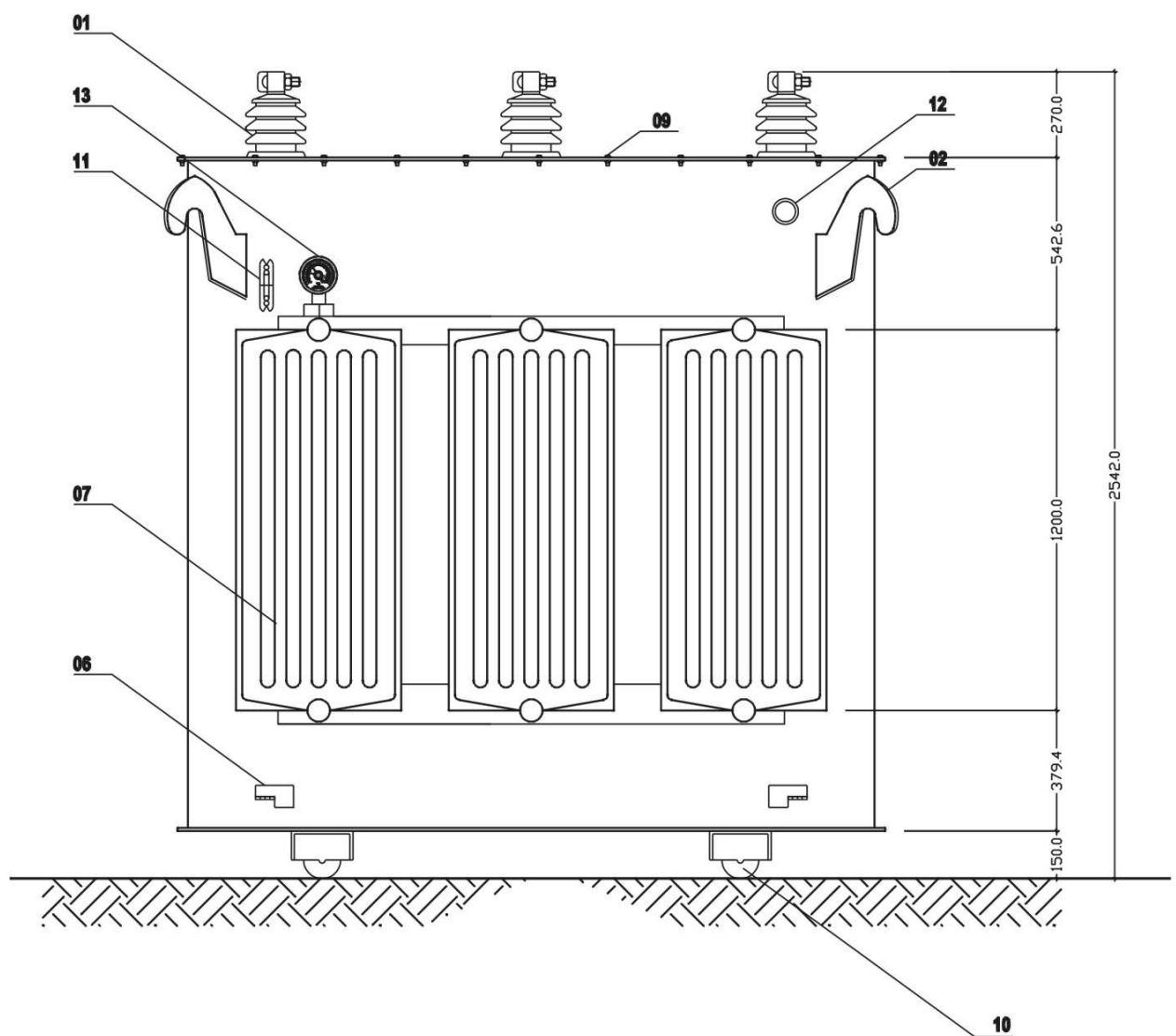


Figura 3.3 – Vista frontal do protótipo (cotas em milímetros).

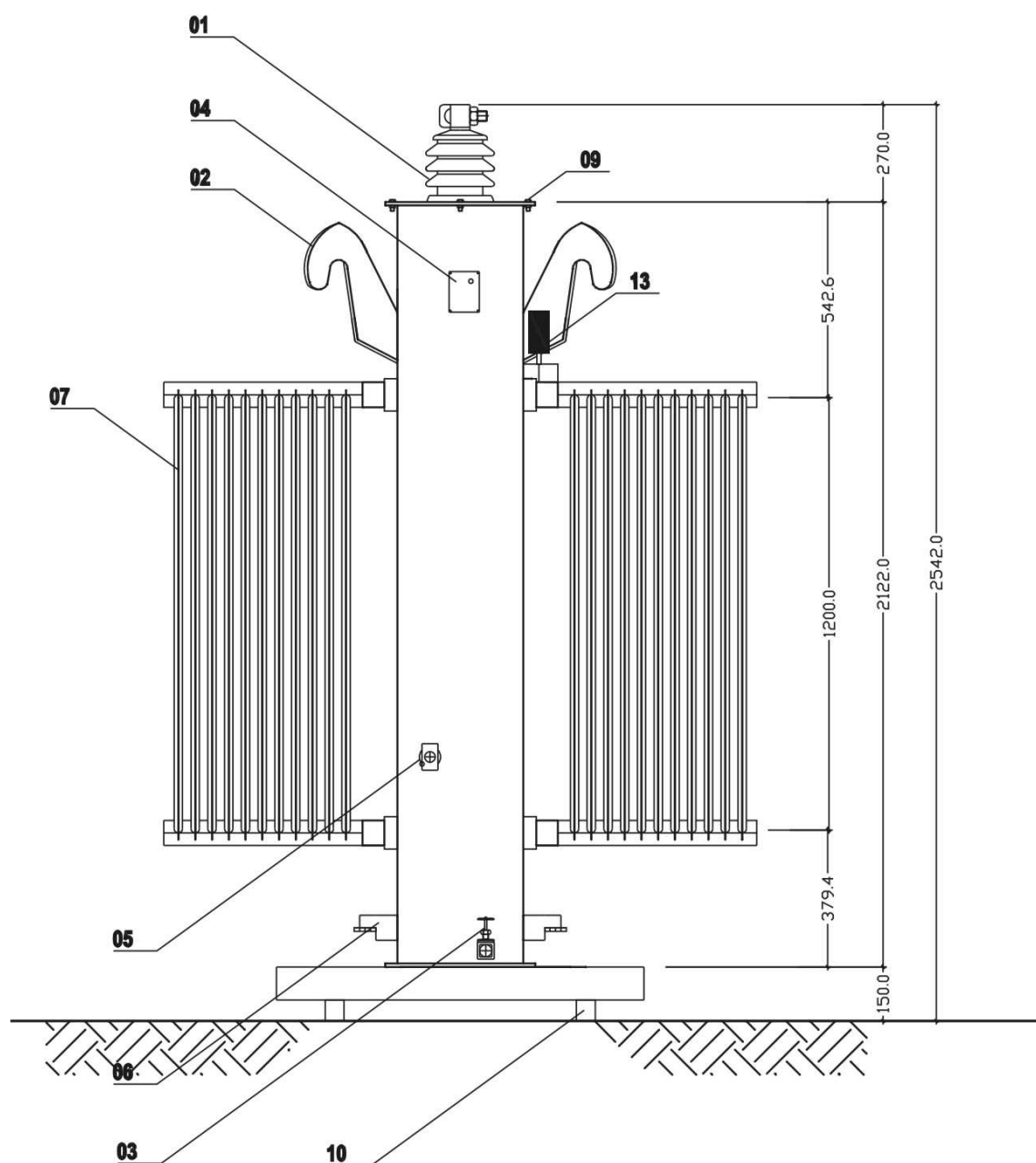


Figura 3.4 – Vista lateral do protótipo (cotas em milímetros).

As identificações feitas nas figuras anteriores correspondem aos acessórios abaixo descritos:

- 01 – Bucha AT
- 02 – Orelha de suspensão
- 03 – Válvula para drenagem de óleo
- 04 – Placa de Identificação
- 05 – Dispositivo de aterramento
- 06 – Estrutura de apoio para macaco
- 07 – Radiadores
- 08 – Tampa de inspeção
- 09 – Grampo de fixação
- 10 – Roda bidirecional
- 11 – Indicador externo de nível de óleo
- 12 – Válvula de alívio
- 13 – Termômetro
- 14 – Acionamento do comutador externo

De forma complementar, a figura 3.5 apresenta as informações construtivas do núcleo do reator e das bobinas que formam o arranjo eletromagnético do reator *twin-tripler*.

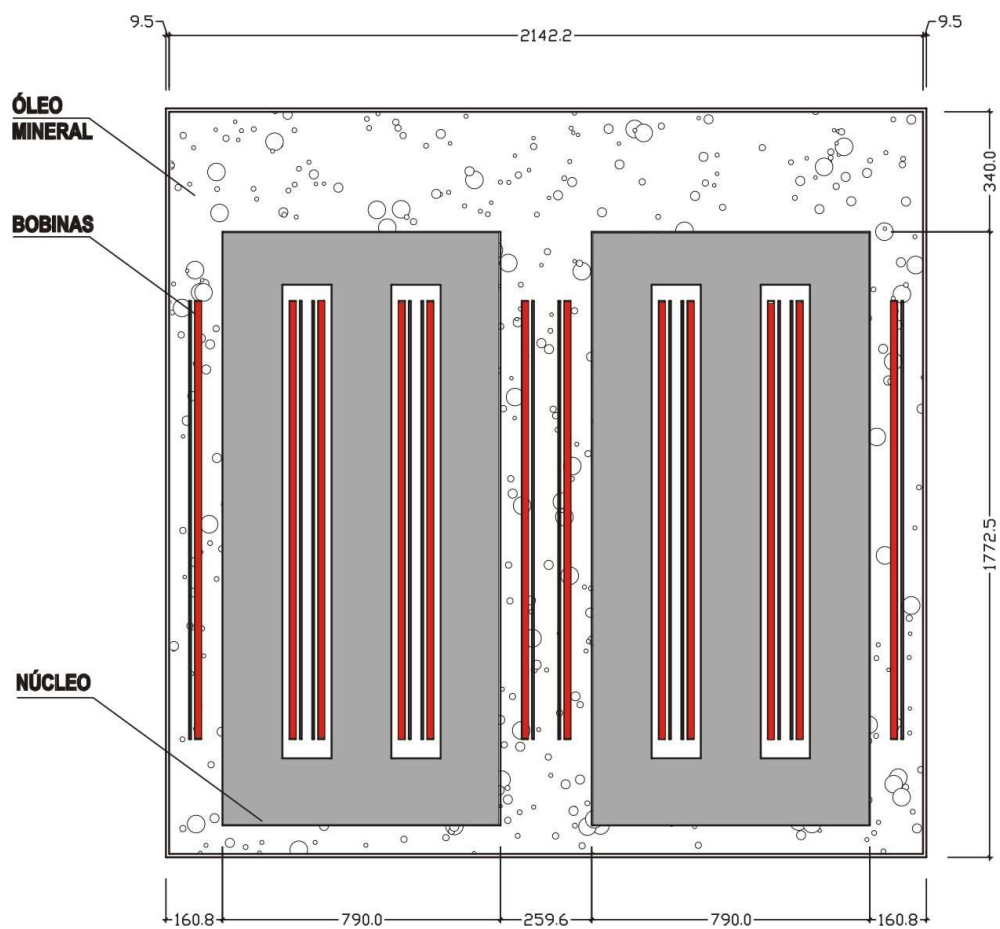


Figura 3.5 – Arranjo físico para as bobinas e núcleos.

A figura 3.6 mostra o protótipo de reator após sua montagem final na fábrica.



Figura 3.6 – Protótipo de reator twin-tripler em sua forma final.

As figuras 3.7, 3.8 e 3.9 mostram 3 (três) vistas distintas do reator.



Figura 3.7 – Reator twin-tripler na subestação de testes – vista 1.



Figura 3.8 – Reator twin-tripler na subestação de testes – vista 2.



Figura 3.9 – Reator twin-tripler na subestação de testes – vista 3.

3.3 TESTES INICIAIS DO PROTÓTIPO EM FÁBRICA

Uma vez concluídos os trabalhos de construção do protótipo de reator em escala real, procedeu-se, dentro das limitações impostas pelo porte do equipamento e das disponibilidades dos equipamentos de testes do fabricante, aos seguintes testes em fábrica:

- Resistência de Isolamento: foram encontrados valores superiores a 100 M Ω entre as partes físicas testadas, às quais se aplicam a avaliação em questão;
- Aplicação de tensão trifásica: face às limitações impostas pela fonte de alimentação disponível na fábrica, foram aplicadas tensões trifásicas que atingiram um valor eficaz de 10,35 kV (fase-fase). Esse valor, como se constata, é inferior ao nominal do reator, porém, qualquer tentativa acima desse patamar resultaria em uma corrente de alimentação superior à disponibilidade da rede trifásica disponível para os testes. Para esse nível de tensão obteve-se uma corrente eficaz de 0,39 A, o que corresponde a uma absorção de potência reativa de cerca de 7 kVAr (1,2% da potência nominal) por parte do reator. Não obstante o baixo nível de tensão, as correntes e potência se mostraram compatíveis com as expectativas;
- Foram também observadas as questões relacionadas com a temperatura, o ruído, a estanqueidade e a outros aspectos, sem que se constataste qualquer anomalia. Todavia, um posicionamento final sobre tais questões somente pode ser estabelecido com a realização dos testes em campo, sob condições críticas de tensões.

Os resultados obtidos na fábrica foram indicativos do bom desempenho do protótipo no que tange ao seu isolamento e outras propriedades. Esse fato orientou para o encaminhamento do reator para testes em campo.

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo foi dedicado à apresentação das principais características elétricas dos reatores saturados e das dimensões físicas resultantes de uma metodologia para dimensionamento de um protótipo de reator [29].

Além disso, foram também discutidos os resultados de testes preliminares feitos no âmbito da fábrica do protótipo de reator saturado. Esses testes evidenciaram que o produto obtido se apresenta dentro das expectativas e, diante desse quadro, o equipamento foi instalado numa subestação da CEMAT, qual seja a SE Coxipó, em Cuiabá – MT, para prosseguimento dos ensaios de desempenho, conforme detalhado no capítulo IV.

CAPÍTULO IV

ENSAIOS DO PROTÓTIPO DO REATOR A NÚCLEO SATURADO EM CAMPO

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O presente capítulo tem como objetivo analisar o desempenho do reator a núcleo saturado de 570 kVAr – 13,8 kV por meio de ensaios de campo.

Os testes realizados e informações coletadas são de grande relevância para a avaliação de desempenho do produto quanto aos seguintes pontos:

- Transitórios advindos dos processos de energização e abertura do dispositivo;
- Correlação entre a tensão aplicada e a potência reativa;
- Determinação das componentes harmônicas;
- Análise do comportamento térmico em operação contínua;
- Verificação do nível de ruído produzido pelo reator durante o seu funcionamento.

4.2 EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO

Objetivando esclarecer sobre os recursos utilizados para a realização dos trabalhos de campo destinados aos testes de desempenho do protótipo de reator, apresentam-se, abaixo, os principais equipamentos empregados:

a) Transformadores de medição

Na conexão do reator foram instalados 3 (três) transformadores de potencial (TP's) e 3 (três) transformadores de corrente (TC's), como mostrado na figura 4.1.

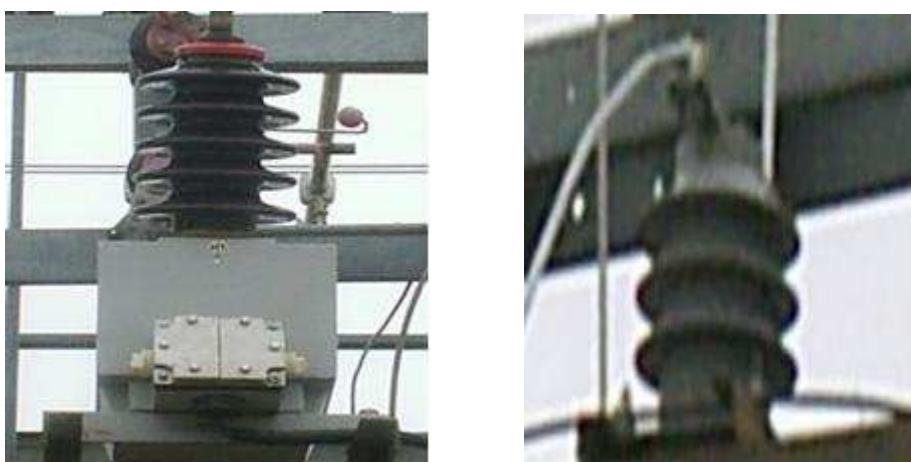


Figura 4.1 – TC e TPI usados nos testes.

As características dos transformadores para instrumentos são:

- TC de 13,8kV: 25X50/50X100/5/5A, 0,3C100 e 10A200, FT=1,3;
- TPI de 13,8kV: 0,3P75-600VA, relação de $13.800^3/115/115^3V$.

b) Proteção contra sobretensões

Objetivando oferecer meios para proteger o reator contra sobretensões passíveis de ocorrência durante os ensaios, foram instalados nas buchas do reator 3 (três) pára-raios poliméricos de 12,5kV-10kA, ilustrados na figura 4.2.



Figura 4.2 – Para Raios para proteção do Reator.

c) Instrumentos registradores

Para o registro da variação das grandezas elétricas envolvidas no processo da energização do equipamento foi utilizado o Registrador de Perturbações modelo RPIV – R4 – 8 do fabricante *REASON* mostrado na figura 4.3.

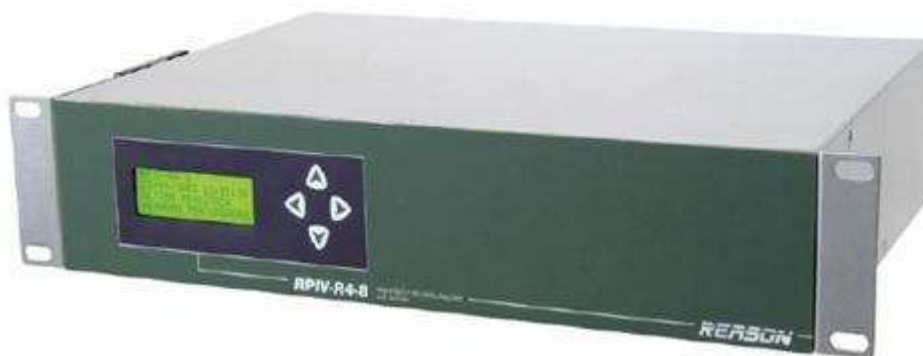


Figura 4.3 – Registrador de Perturbações.

Tal equipamento possui as seguintes características básicas:

- 4 entradas de tensão até 115 V ou $115/\sqrt{3}$ V;
- 4 entradas de corrente até 5 A;
- 16 entradas digitais e 4 relés de sinalização;
- Disponibilização dos resultados dos registros quanto às formas de onda, valores eficazes e ângulos de fase.

Para medição e análise das grandezas elétricas durante os testes em operação de regime permanente foi utilizado o analisador de energia *VIP – System 3*, fabricante *Elcontrol* mostrado na figura 4.4. Esse equipamento não admite ajustes de escalas, conforme pode ser observado nos registros das formas de onda de correntes e de tensões e de seus respectivos espectros harmônicos, e possui:

- Capacidade para medir variações de tensão de até 600 Volts entre fase e neutro com correntes de fase de até 1000 A em sistemas de baixa tensão;
- Na função de analisador de energia, as medições efetuadas e registradas (atualizadas a cada segundo) são: tensão, corrente, fator de potência e potências trifásica total e individual para as 3 (três) fases; corrente de neutro, frequência, rotação de fase; potências ativa instantânea, média e máxima das 3 (três) fases e trifásica; potências aparente instantânea, média e máxima das 3 (três) fases e trifásica; potências reativa instantânea, média e máxima das 3 (três) fases e trifásica; distorção harmônica percentual das 3 (três) fases e trifásica; consumo de energia ativa e reativa, $\text{tg}\phi$ média e $\text{cos}\phi$ médio das 3 (três) fases e trifásica;

- Na função de analisador de harmônicos (uso do *Black Box* de harmônicos) as medições efetuadas e registradas (atualizadas a cada segundo) são: tensão, corrente, fator de potência e potências trifásica total e individual para as três fases para diversas ordens harmônicas; formas de onda de tensão e corrente individual para cada fase; distorção harmônica de tensão e corrente.



(a)



(b)

Figura 4.4 - (a) Clamps de corrente 1000A/1 V; (b) Equipamento de medição e registro.

Para as medições de temperatura foi utilizado um termômetro digital, modelo 500, escala: -35°C à $+500^{\circ}\text{C}$, resolução: $0,1^{\circ}\text{C}$, exatidão: $\pm 2\%$, do fabricante *Kiltherm*, como ilustra a figura 4.5.



Figura 4.5– Termômetro Digital.

Para as medições de ruído empregou-se um decibelímetro digital, modelo MSL – 1325, escala: 32db a 130 db, resolução: 0,1 db, precisão: + - 1,5 db, do fabricante MINIPA, indicado na figura 4.6.



Figura 4.6 – Decibelímetro Digital.

4.3 INSTALAÇÃO FÍSICA DO REATOR

Para a realização dos ensaios, o reator foi instalado na subestação distribuidora Coxipó, em Cuiabá-MT, pertencente ao sistema elétrico da Cemat – Centrais Elétricas Matogrossenses S.A., empresa controlada pela REDE ENERGIA e responsável pela distribuição de energia elétrica no estado de Mato Grosso. Essa subestação possui potência transformadora, de 138 kV para 13,8 kV, de 60 MVA, com 2 (dois) transformadores de 20/25/30 MVA. A subestação Coxipó é responsável pelo suprimento de energia elétrica de parte da cidade de Cuiabá por intermédio de 11 alimentadores de distribuição de 13,8 kV, conforme diagrama unifilar da figura 4.7.

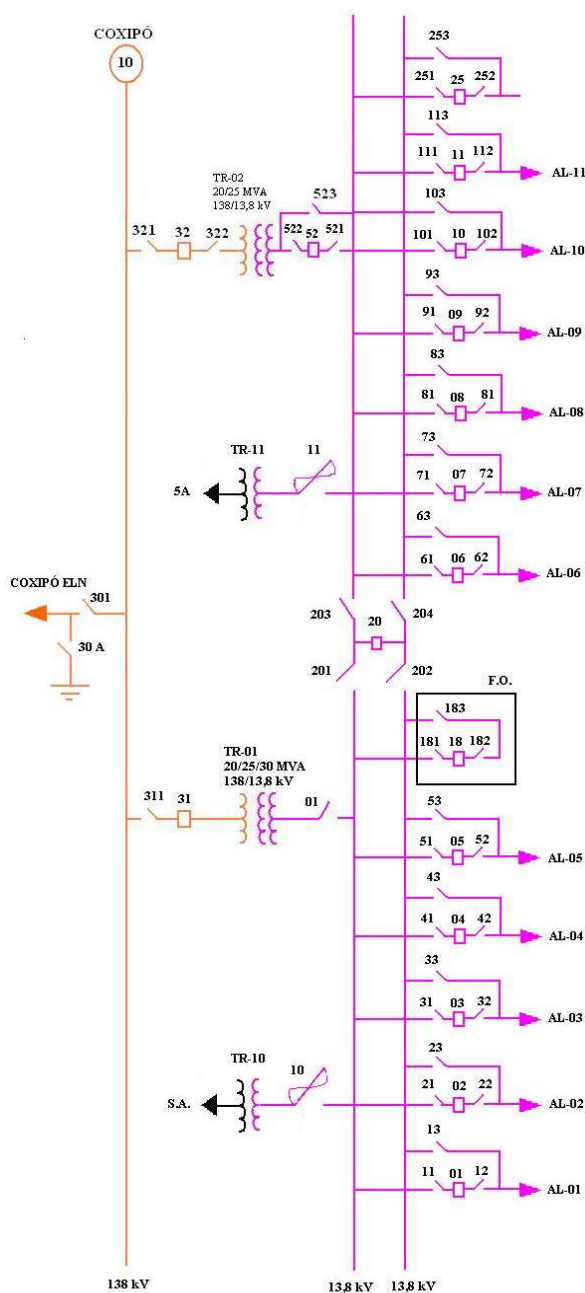


Figura 4.7 – Diagrama Unificar da SE Coxipó.

O reator foi instalado em um espaço físico disponível nas proximidades do barramento de 13,8 kV, utilizando-se dos equipamentos disponíveis para a proteção (cubículo de proteção e medição) de um dos alimentadores (AL 05), cuja carga havia sido transferida para outros alimentadores. A montagem feita é ilustrada nas figuras 4.8 e 4.9.

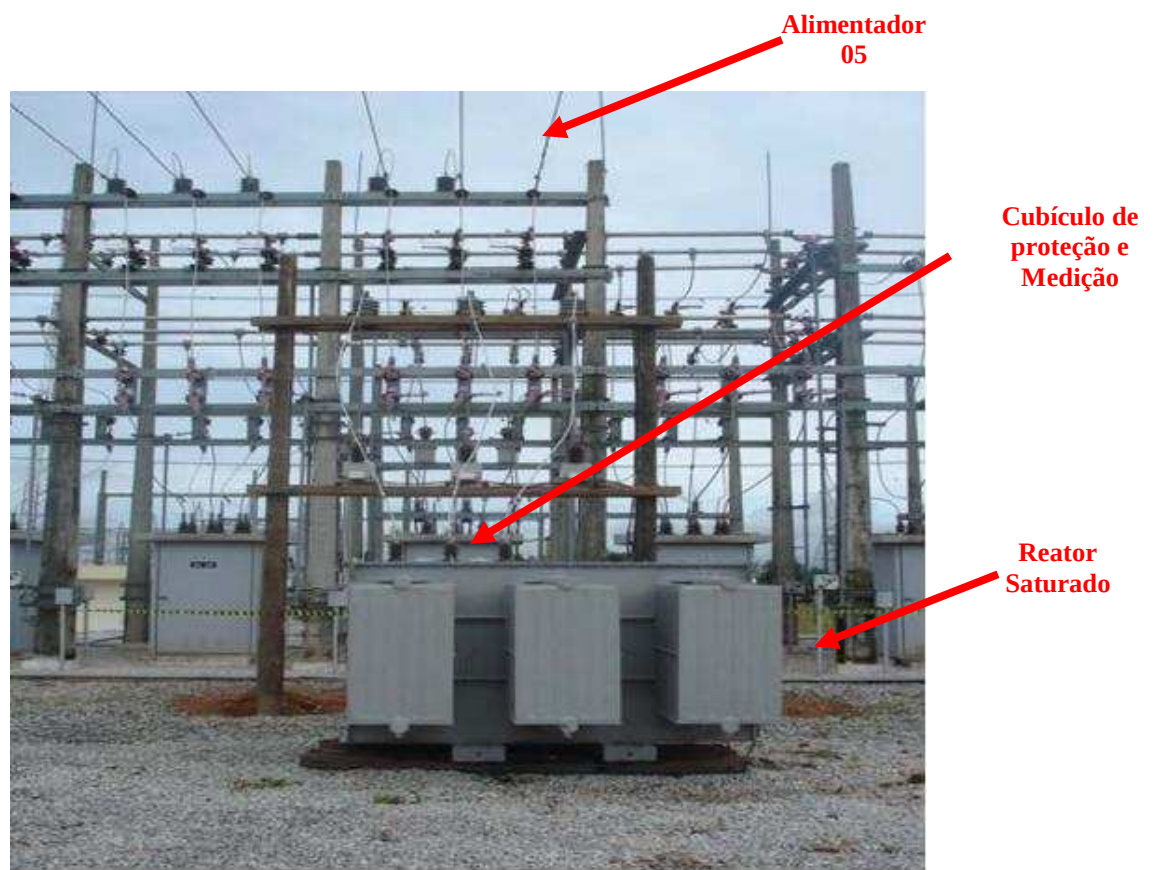


Figura 4.8 – Vista 1 do reator instalado na subestação Coxipó.



Figura 4.9 – Vista 2 do reator instalado na subestação Coxipó.

Os testes iniciais de energização foram realizados no dia 18/03/2007 (domingo), dia em que a carga é reduzida. Os ensaios foram também conduzidos no dia 20/03/2007 (terça-feira) para verificar o comportamento do reator em operação contínua e avaliar as questões associadas com aquecimentos e ruídos. Numa primeira fase dos experimentos foi feita a energização do reator e obtidos os dados relativos às tensões e correntes durante todo o período transitório até a estabilização da corrente do dispositivo. Em seguida, para a realização dos testes com variação de tensão, toda a carga atendida pela subestação foi transferida para um dos barramentos de 13,8 kV (barra principal) e alimentada por apenas um dos transformadores que compõem a subestação. Assim procedendo foi possível a liberação de um transformador para o suprimento isolado do reator e, dessa forma, tornou-se factível a realização dos ensaios de operação do equipamento para distintos níveis de tensão. Vale observar que as alterações das tensões foram viabilizadas por meio de alterações manuais do comando de tapes do transformador dedicado aos testes.

Diante do exposto foram realizadas monitorações das seguintes grandezas:

- Tensões e correntes nas 3 (três) fases durante a energização e sob condições normais de operação;
- Tensões e correntes nas três 3 (fases) para distintos valores de tensão;
- Potências reativas para distintas tensões;
- Temperaturas e ruídos associados com o funcionamento do reator.

4.4 RESULTADOS OBTIDOS

Apresentam-se, na sequência, os resultados e discussões dos registros operacionais feitos em campo.

4.4.1 – Desempenho elétrico durante o processo transitório de energização

As ondas de correntes e de tensões trifásicas de linha, desde o instante da energização do reator até sua estabilização comportaram-se de forma adequada.

A figura 4.10 ilustra os perfis das tensões e correntes obtidas em valores eficazes.

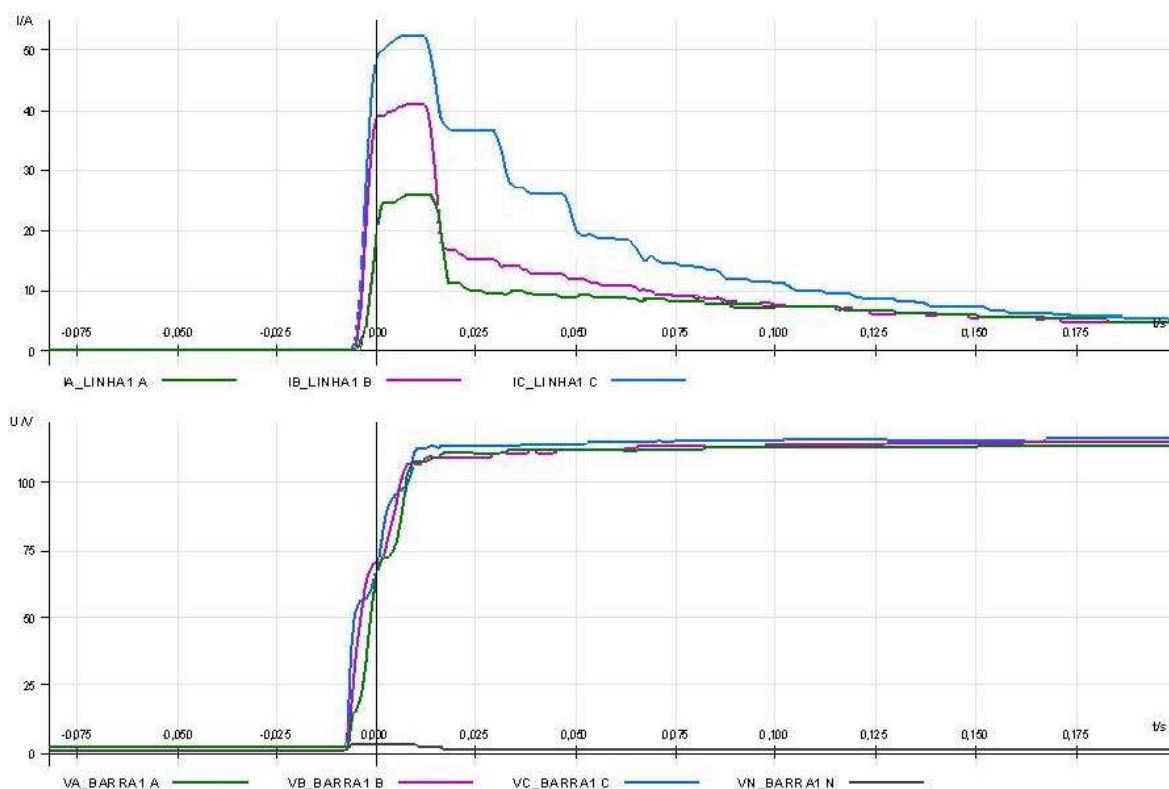


Figura 4.10 –Variação das tensões e das correntes de energização do reator saturado.

O fenômeno transitório produziu um perfil de corrente de energização típico para reatores não-lineares e os valores registrados não revelam maiores

preocupações para com os níveis atingidos. De fato, esses valores mostram proporções bastante inferiores aos padrões encontrados nos transitórios de energização de transformadores convencionais. De modo análogo, não se detectou qualquer anomalia significativa para as tensões de suprimento durante esses períodos. Essas afirmativas são aplicáveis para os distintos tapes empregados ou para distintos níveis de tensão de suprimento do equipamento.

4.4.2 – Desempenho elétrico em operação contínua

Para os testes operativos em regime contínuo, dentre uma grande gama de ensaios, optou-se por apresentar e discutir nesta seção as situações sintetizadas na Tabela 4.1.

Como se constata, estas avaliações compreendem:

- 3 (três) posições para os tapes do reator;
- Distintas tensões para o suprimento do reator (obtidas pela mudança do tape do transformador de 138/13,8 kV), para cada um dos tapes escolhidos para o reator.

Tabela 4.1 – Casos estudados para a operação em regime.

Caso	Tap	Características operacionais
1.1	1	Tensão de 13,2 kV
1.2	1	Tensão de 13,7 kV
1.3	1	Tensão de 13,8 kV
1.4	1	Tensão de 14,2 kV
2.1	2	Tensão de 12,5 kV
2.2	2	Tensão de 13,1 kV
2.3	2	Tensão de 13,9 kV
2.4	2	Tensão de 14,1 kV
3.1	3	Tensão de 13,1 kV
3.2	3	Tensão de 13,6 kV
3.3	3	Tensão de 13,7 kV

4.4.2.1 – Resultados obtidos com o reator no tap 1:

A figura 4.11 indica o desempenho do reator, ajustado no *tap* 1, quanto a correlação entre a potência reativa e a tensão aplicada em seus terminais.

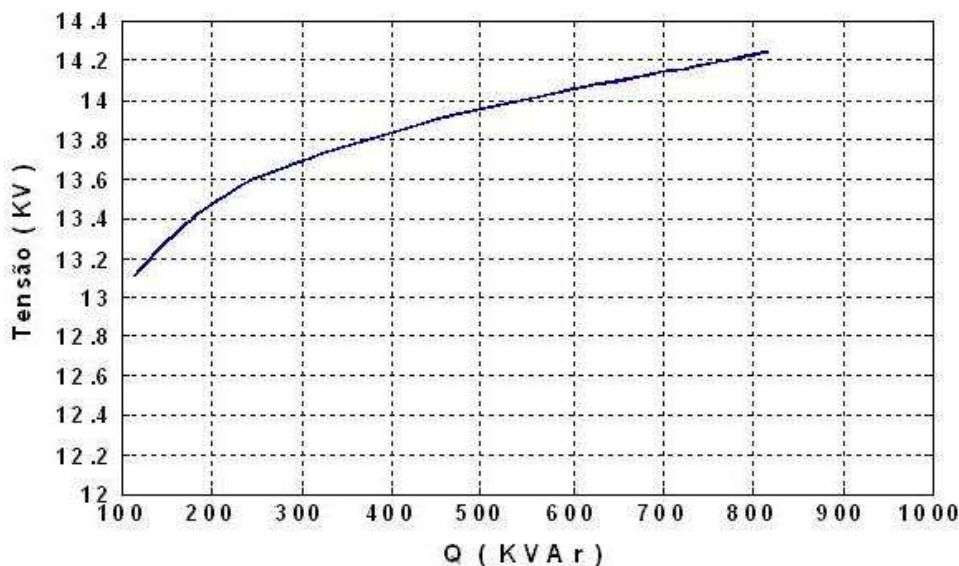


Figura 4.11 – Relação entre a potência reativa e a tensão aplicada no reator - tap 1.

Na sequência são destacadas as formas de onda para as correntes de linha para distintos valores de tensões. Todos os casos estão relacionados com a operação do reator ajustado na posição de *tap* 1.

(i) – Reator no tap 1 - tensão de 13,2 kV – Caso 1.1:

A tabela 4.2 sintetiza as principais grandezas e respectivos valores obtidos no ensaio.

Tabela 4.2 – Grandezas e valores para o caso 1.1.

Grandeza	Valor
Tensão fase-fase	13,2 kV
Corrente de linha	5,1 A
Distorção total de corrente	12 %
Potência aparente	117,3 kVA
Potência reativa	114,8 kVA _r
Perdas	8,3 kW

As formas de onda das correntes de linha e das tensões nos terminais do reator, assim como os correspondentes espectros de frequência para as tensões e correntes são destacados nas figuras 4.12 e 4.13.

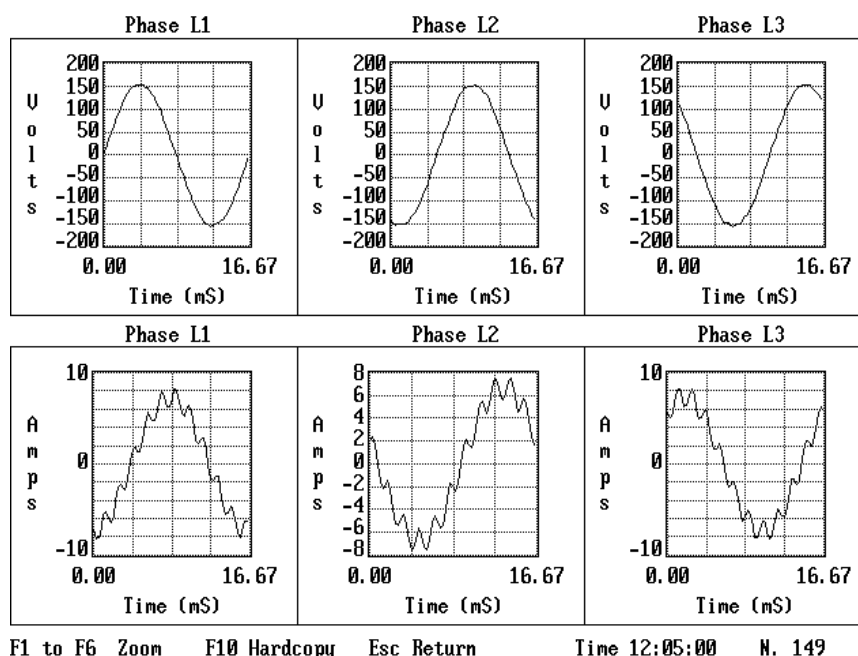


Figura 4.12 – Formas de onda das tensões e correntes - caso 1.1.

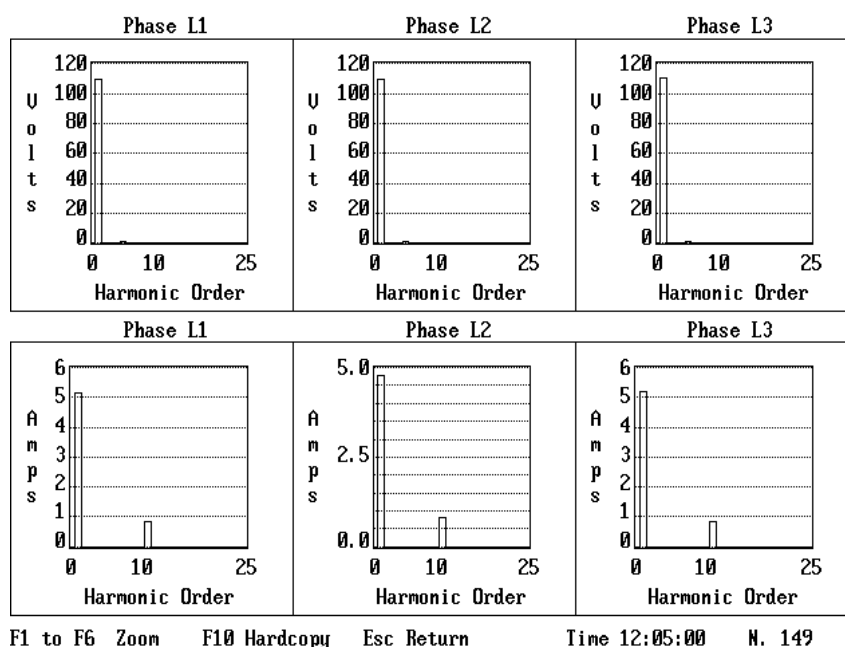


Figura 4.13 – Espectros harmônicos das tensões e correntes - caso 1.1.

(ii) – Reator no *tap* 1 com tensão de 13,7 kV – Caso 1.2:

A tabela 4.3 indica as principais grandezas e respectivos valores obtidos do ensaio em questão, o qual difere do anterior apenas pelo nível da tensão aplicada.

Tabela 4.3 – Grandezas e valores para o caso 1.2.

Grandeza	Valor
Tensão fase-fase	13,7 kV
Corrente de linha	14,3 A
Distorção total de corrente	15 %
Potência aparente	337,6 kVA
Potência reativa	328,1 kVAr
Perdas	16,7 kW

As formas de onda das correntes de linha e das tensões nos terminais do reator, assim como os correspondentes espectros de frequência para as tensões e correntes são destacados nas figuras 4.14 e 4.15.

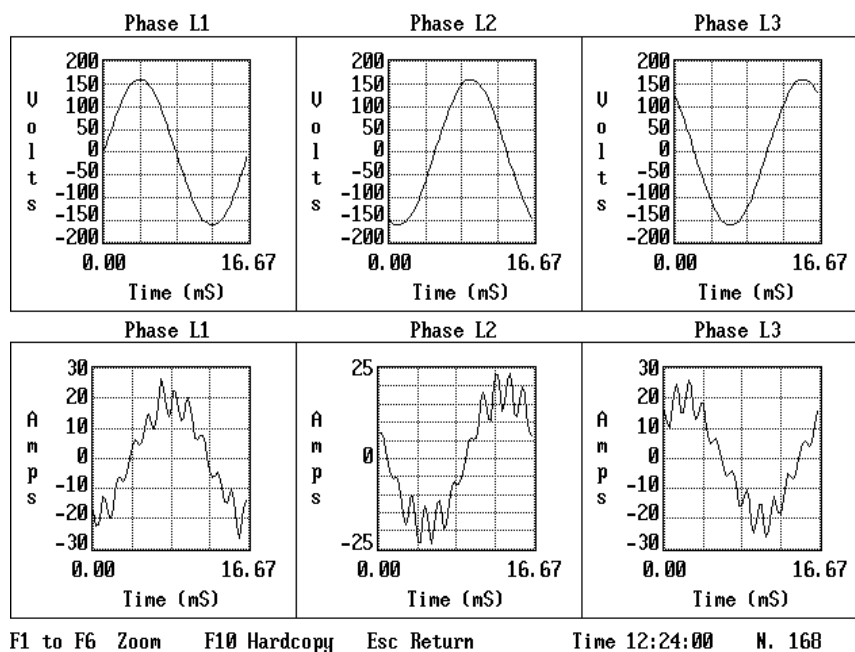
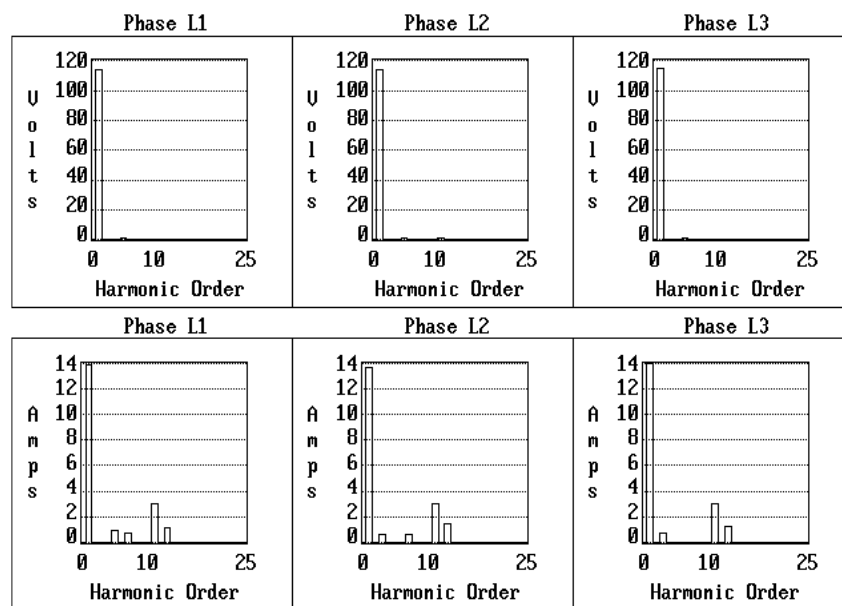


Figura 4.14 – Formas de onda das tensões e correntes - caso 1.2.



F1 to F6 Zoom F10 Hardcopy Esc Return Time 12:24:00 N. 168
 Figura 4.15 – Espectros harmônicos das tensões e correntes - caso 1.2.

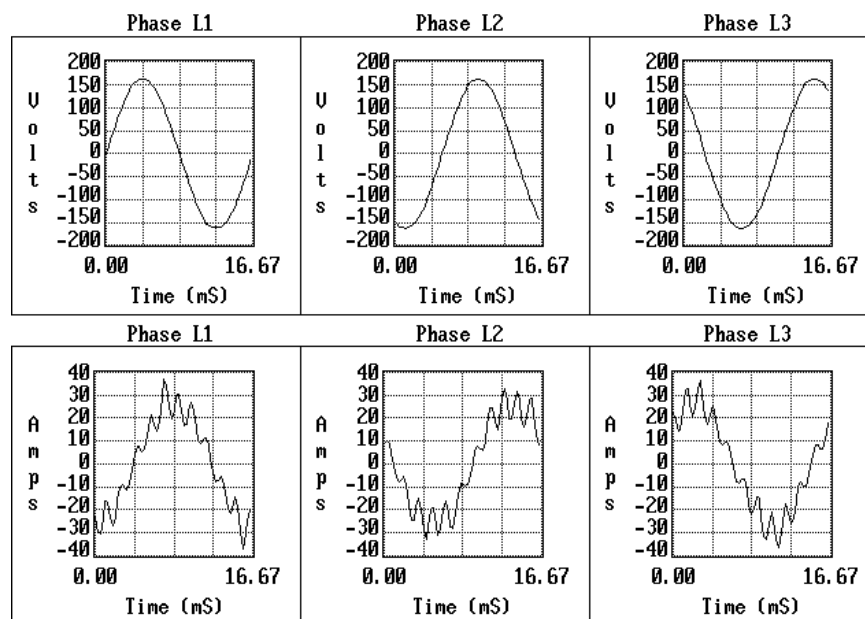
(iii) – Reator no *tap* 1 com tensão de 13,8 kV – Caso 1.3:

Utilizando o valor nominal de 13,8 kV como tensão de suprimento, a tabela 4.4 apresenta as principais grandezas e respectivos valores obtidos no ensaio.

Tabela 4.4 – Grandezas e valores para o caso 1.3.

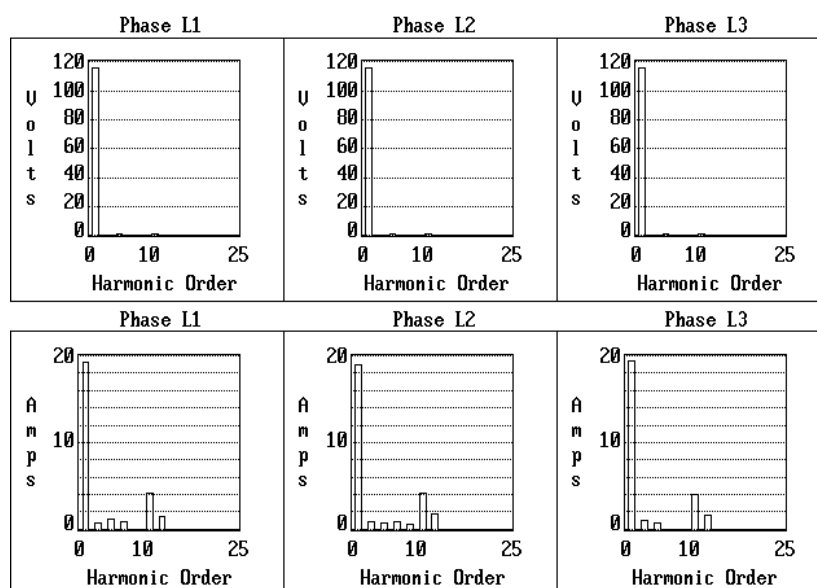
Grandeza	Valor
Tensão fase-fase	13,8 kV
Corrente de linha	19,8 A
Distorção total de corrente	22 %
Potência aparente	474 kVA
Potência reativa	461,4 kVAr
Perdas	21,5 kW

De modo similar aos casos anteriores, as formas de onda das correntes de linha e das tensões nos terminais do reator, assim como os correspondentes espectros de frequência para as tensões e correntes são fornecidas pelas figuras 4.16 e 4.17.



F1 to F6 Zoom F10 Hardcopy Esc Return Time 12:29:00 N. 173

Figura 4.16 – Formas de onda das tensões e correntes - caso 1.3.



F1 to F6 Zoom F10 Hardcopy Esc Return Time 12:29:00 N. 173

Figura 4.17 – Espectros harmônicos das tensões e correntes - caso 1.3.

(iv) – Reator no tap 1 com tensão de 14,2 kV – Caso 1.4:

Como último teste do reator para o tap 1, a tensão foi incrementada ao seu valor máximo. As grandezas mais relevantes e respectivos valores obtidos do ensaio são também indicados na tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Grandezas e valores para o caso 1.4.

Grandeza	Valor
Tensão fase-fase	14,2 kV
Corrente de linha	33,8 A
Distorção total de corrente	21 %
Potência aparente	833,4 kVA
Potência reativa	815,4 kVAr
Perdas	39,5 kW

As formas de onda das correntes de linha e das tensões nos terminais do reator, assim como os correspondentes espectros de frequência para as tensões e correntes são destacados nas figuras 4.18 e 4.19.

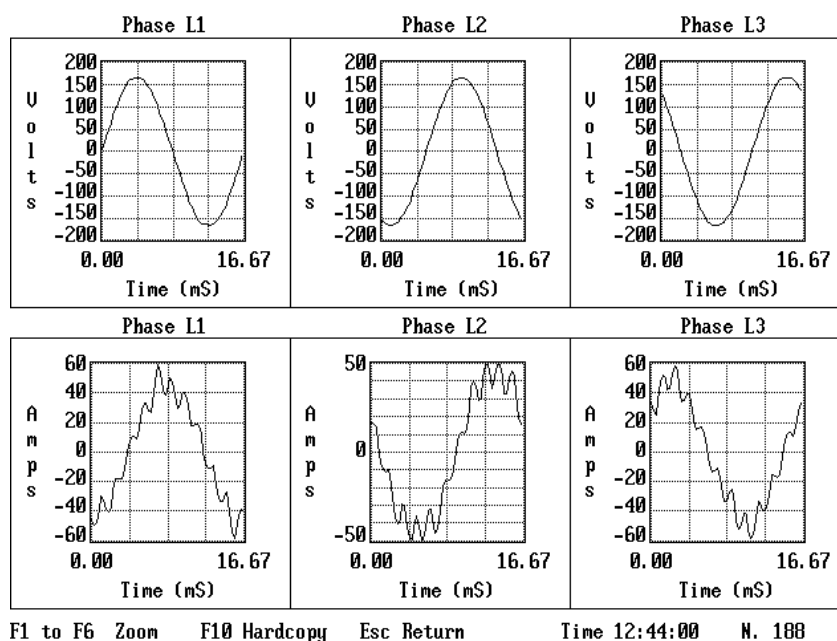
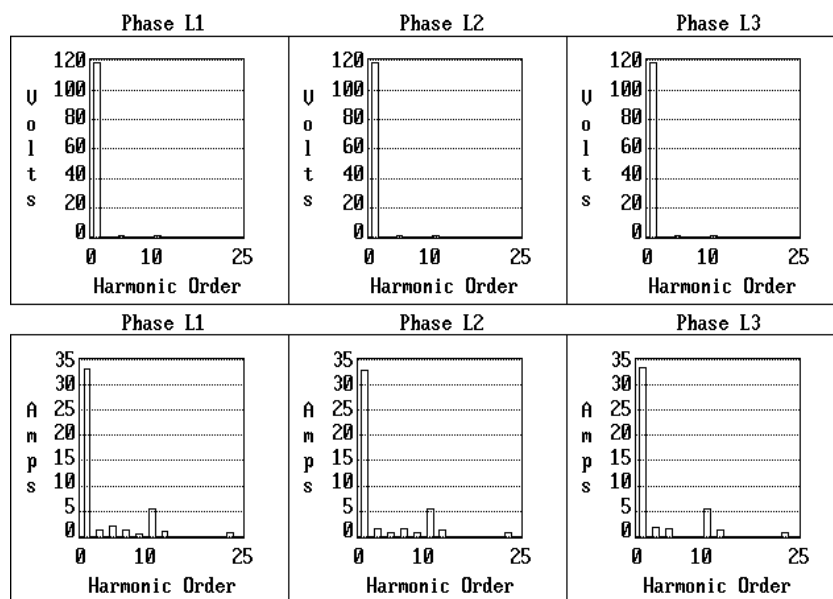


Figura 4.18 – Formas de onda das tensões e correntes - caso 1.4.



F1 to F6 Zoom F10 Hardcopy Esc Return Time 12:44:00 N. 188
 Figura 4.19 – Espectros harmônicos das tensões e correntes - caso 1.4.

4.4.2.2 – Resultados obtidos com o reator no tap 2:

O conjunto de resultados apresentados a seguir corresponde a uma repetição dos testes, utilizando-se o tap 2 no reator saturado. Nessa condição, a figura 4.20 indica o desempenho do reator quanto ao seu consumo de potência reativa, em função da tensão aplicada em seus terminais.

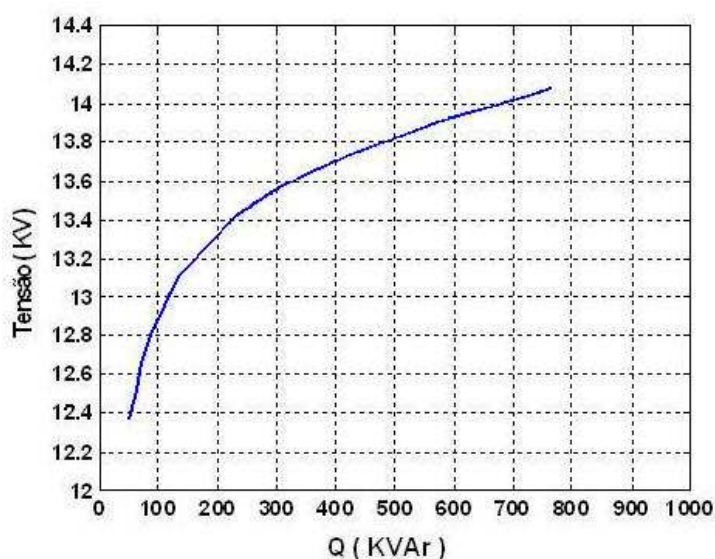


Figura 4.20 – Relação entre a Potência Reativa e a Tensão para o tap 2.

Na sequência são destacadas as formas de onda para as correntes de linha para distintos valores de tensões. Todos os casos estão relacionados com a operação do reator ajustado na posição de *tap* 2.

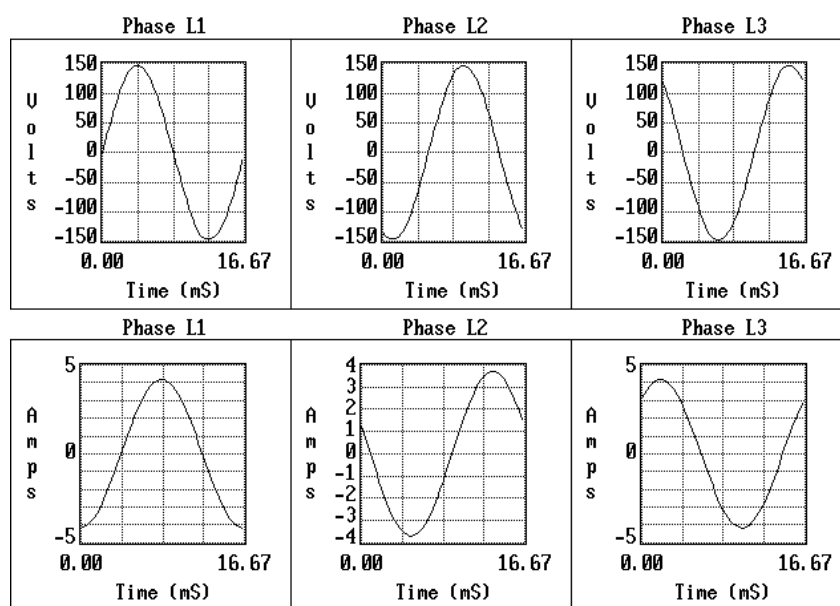
(i) – Reator no *tap* 2 com tensão de 12,5 kV – Caso 2.1:

Seguindo a mesma forma de apresentação dos resultados, a tabela 4.6 sintetiza as principais grandezas e respectivos valores obtidos do ensaio.

Tabela 4.6 – Grandezas e valores para o caso 2.1.

Grandeza	Valor
Tensão fase-fase	12,5 kV
Corrente de linha	2,9 A
Distorção total de corrente	1 %
Potência aparente	62,5 kVA
Potência reativa	61,0 kVAr
Perdas	6,8 kW

Mais uma vez, as formas de onda das correntes de linha e das tensões nos terminais do reator, assim como os correspondentes espectros de frequência para as tensões e correntes são destacados nas figuras 4.21 e 4.22.



F1 to F6 Zoom F10 Hardcopy Esc Return Time 10:15:00 N. 39

Figura 4.21 - Formas de onda das tensões e correntes - caso 2.1.

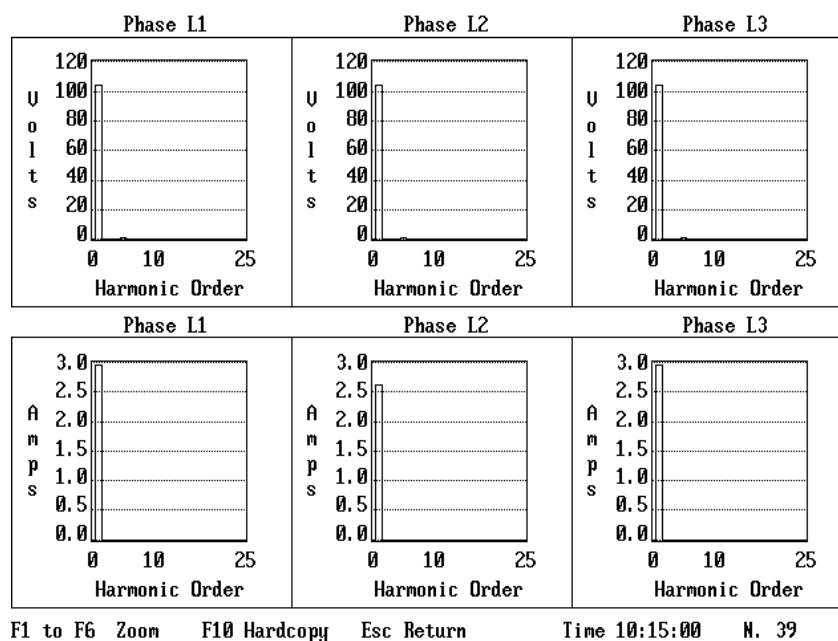


Figura 4.22 – Espectros harmônicos das tensões e correntes - caso 2.1.

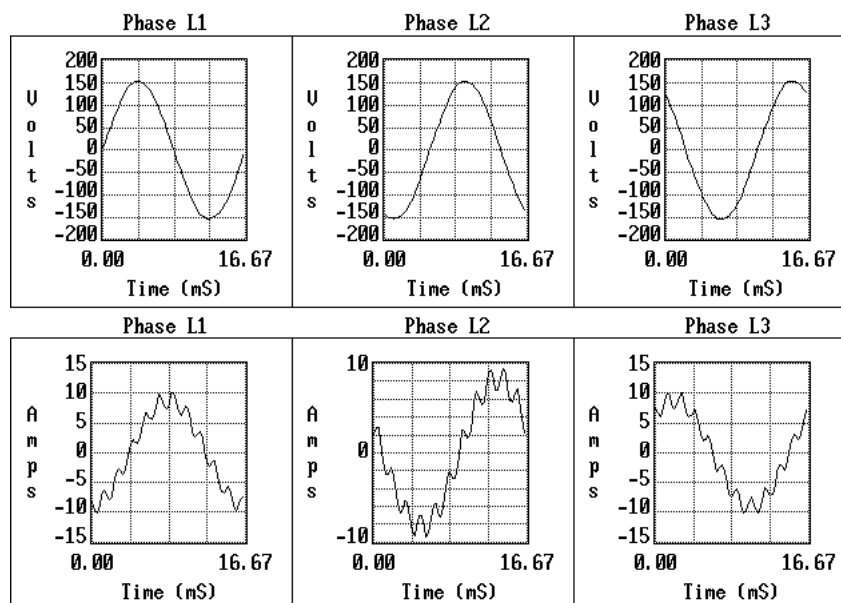
(ii) – Reator no tap 2 com tensão de 13,1 kV – Caso 2.2:

Aumentando a tensão para o valor de 13,1 kV, a tabela 4.7 sintetiza as principais grandezas e respectivos valores obtidos do ensaio.

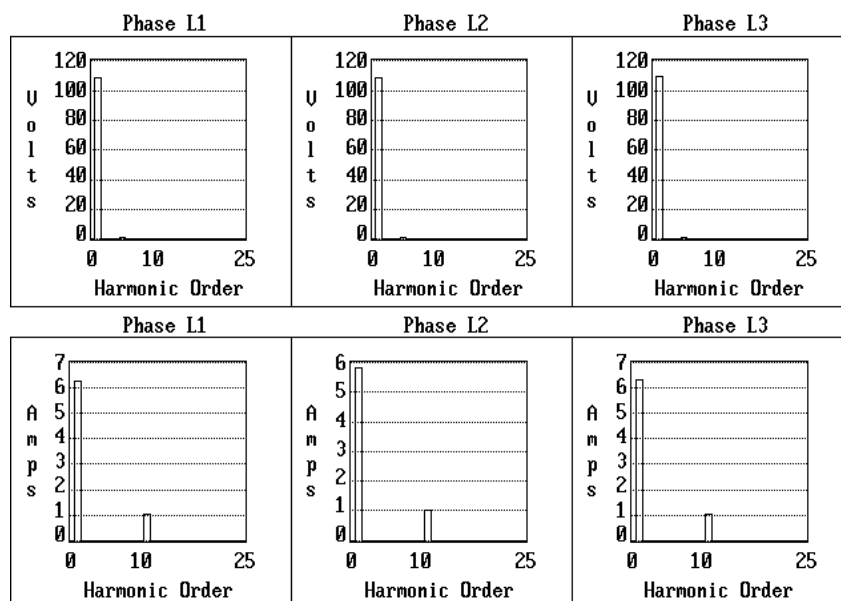
Tabela 4.7 – Grandezas e valores para o caso 2.2.

Grandeza	Valor
Tensão fase-fase	13,1 kV
Corrente de linha	6,2 A
Distorção total de corrente	16 %
Potência aparente	141,5 kVA
Potência reativa	139,3 kVAr
Perdas	9,1 kW

Para essa tensão de suprimento, as formas de onda das correntes de linha e das tensões nos terminais do reator, assim como os correspondentes espectros de frequência para as tensões e correntes são destacados nas figuras 4.23 e 4.24.



F1 to F6 Zoom F10 Hardcopy Esc Return Time 10:48:00 N. 72
 Figura 4.23 – Formas de onda das tensões e correntes - caso 2.2.



F1 to F6 Zoom F10 Hardcopy Esc Return Time 10:48:00 N. 72
 Figura 4.24 – Espectros harmônicos das tensões e correntes - caso 2.2.

(iii) – Reator no tap 2 com tensão de 13,9 kV – Caso 2.3:

Aumentando-se a tensão para 13,9 kV, a tabela 4.8 destaca as principais grandezas e respectivos valores obtidos no ensaio.

Tabela 4.8 – Grandezas e valores para o caso 2.3.

Grandeza	Valor
Tensão fase-fase	13,9 kV
Corrente de linha	24,9 A
Distorção total de corrente	23 %
Potência aparente	598,8 kVA
Potência reativa	586,6 kVAr
Perdas	27,7 kW

As formas de onda das correntes de linha e das tensões nos terminais do reator, assim como os correspondentes espectros de frequência para as tensões e correntes são destacados nas figuras 4.25 e 4.26.

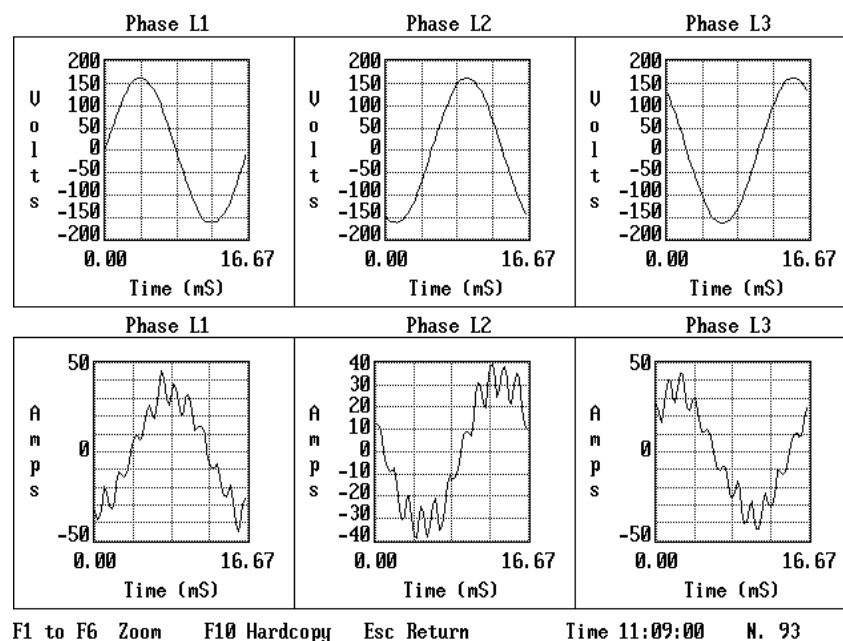
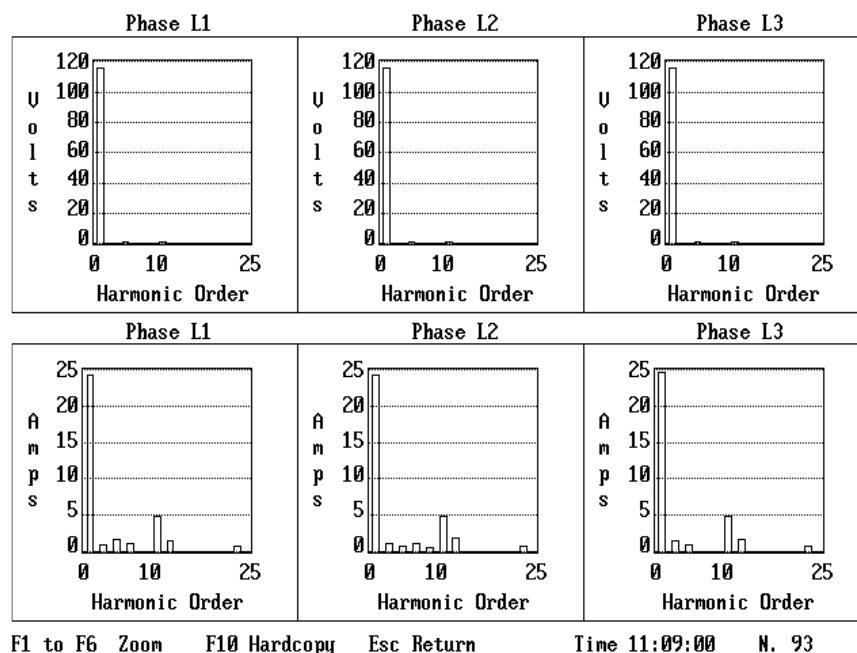


Figura 4.25 – Formas de onda das tensões e correntes - caso 2.3.



F1 to F6 Zoom F10 Hardcopy Esc Return Time 11:09:00 N. 93
Figura 4.26 – Espectros harmônicos das tensões e correntes - caso 2.3.

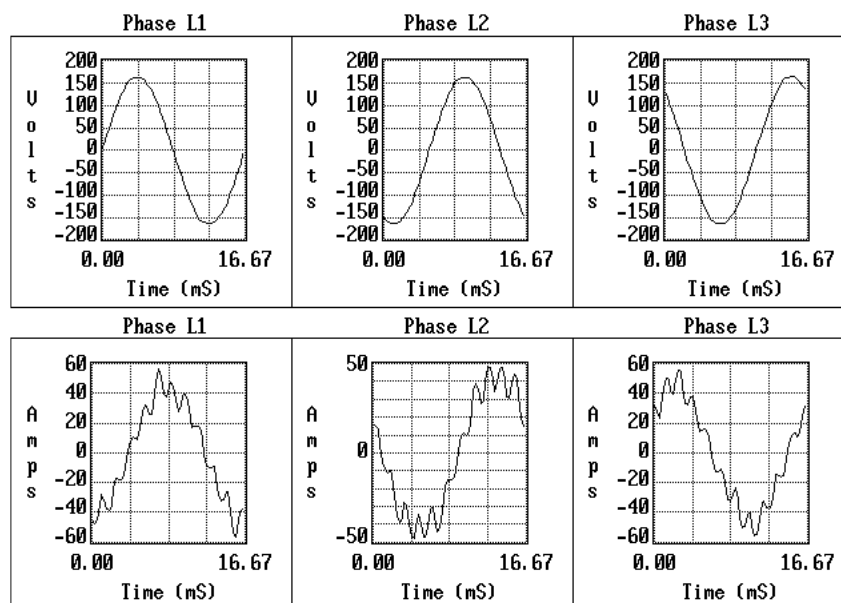
(iv) – Reator no *tap* 2 com tensão de 14,1 kV – Caso 2.4:

O maior valor de tensão aplicado ao reator no *tap* 2 e demais características operacionais obtidas estão indicados na tabela 4.9.

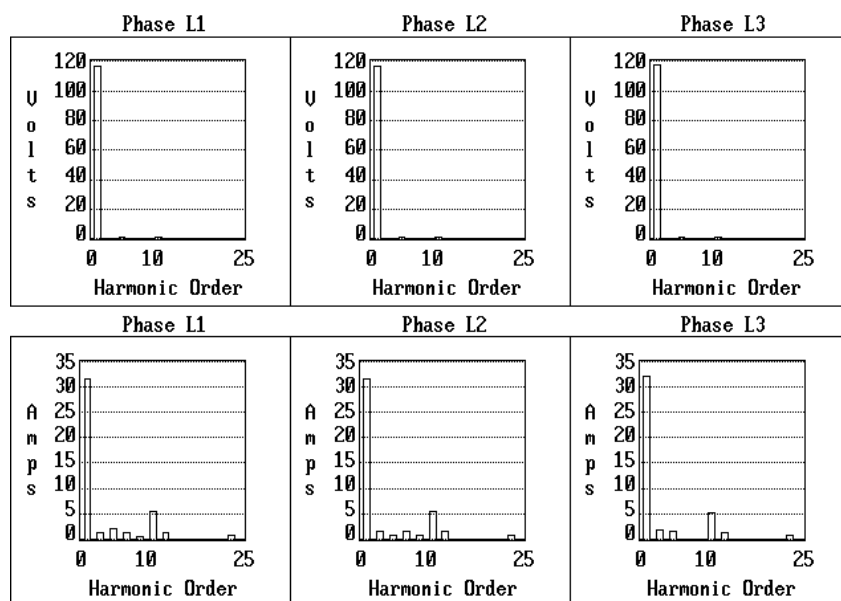
Tabela 4.9 – Grandezas e valores para o caso 2.4.

Grandeza	Valor
Tensão fase-fase	14,1 kV
Corrente de linha	32,1 A
Distorção total de corrente	20 %
Potência aparente	781,5 kVA
Potência reativa	772,0 kVAr
Perdas	37,4 kW

Tal como para os demais testes, as formas de onda das correntes de linha e das tensões nos terminais do reator, assim como os correspondentes espectros de frequência para as tensões e correntes são destacados nas figuras 4.27 e 4.28.



F1 to F6 Zoom F10 Hardcopy Esc Return Time 11:18:00 N. 102
 Figura 4.27 – Formas de onda das tensões e correntes - caso 2.4.



F1 to F6 Zoom F10 Hardcopy Esc Return Time 11:18:00 N. 102
 Figura 4.28 – Espectros harmônicos das tensões e correntes - caso 2.4.

4.4.2.3 – Resultados obtidos com o reator no tap 3:

Ajustando o *tap* do reator para a posição 3, a figura 4.29 indica o desempenho do reator quanto ao seu consumo de potência reativa, em função da tensão aplicada em seus terminais.

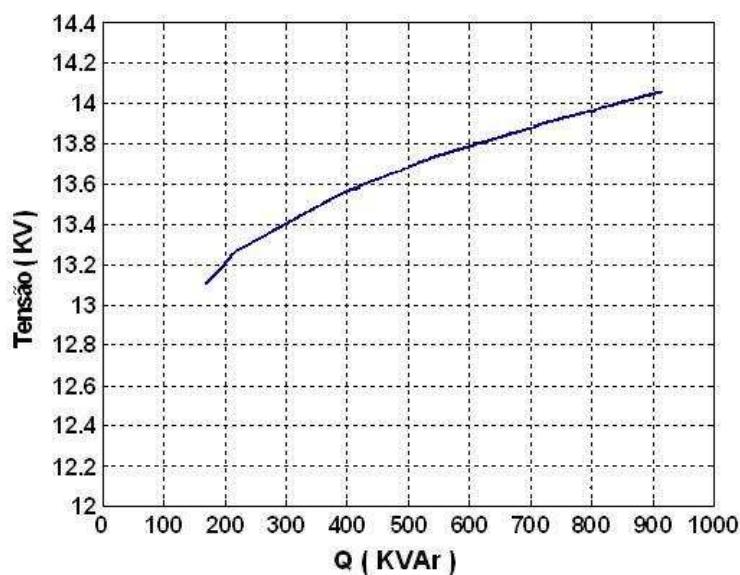


Figura 4.29 – Relação entre a Potência Reativa e a Tensão para o tap 3.

Também, de modo similar ao realizado para as demais posições de *tap* no reator, apresenta-se, na seqüência, as formas de onda para as correntes de linha para distintos valores de tensões com o reator no *tap* 3.

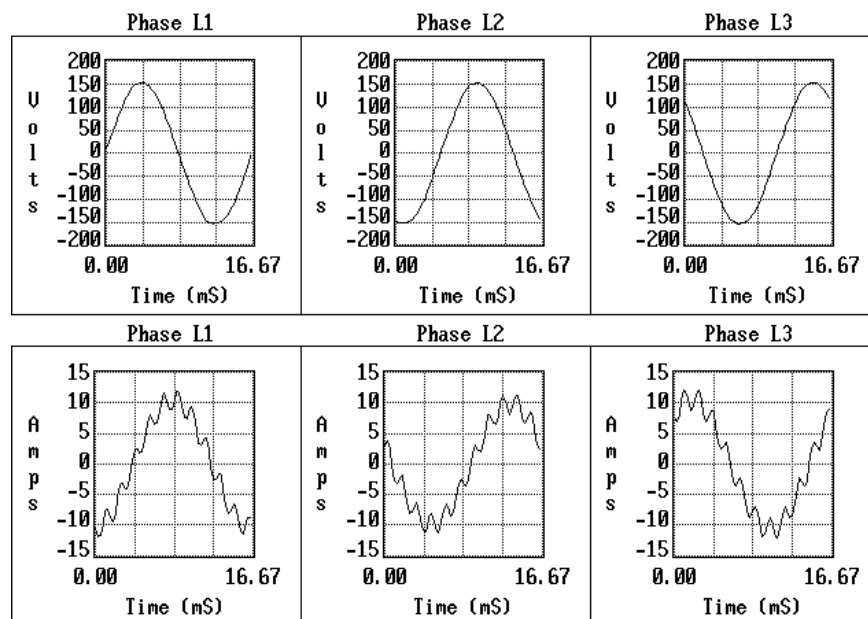
(i) – Reator no *tap* 3 com tensão de 13,1 kV – Caso 3.1:

Utilizando uma tensão de suprimento de 13,1 kV, a tabela 4.10 fornece as principais grandezas e respectivos valores obtidos no ensaio.

Tabela 4.10 – Grandezas e valores para o caso 3.1.

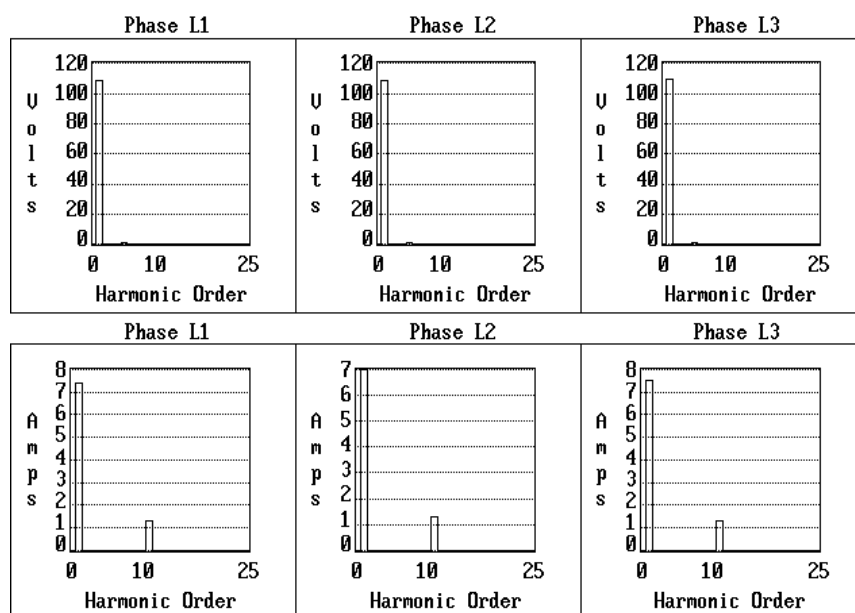
Grandeza	Valor
Tensão fase-fase	13,1 kV
Corrente de linha	7,4 A
Distorção total de corrente	18 %
Potência aparente	168,7 kVA
Potência reativa	165,5 kVAr
Perdas	9,4 kW

As formas de onda das correntes de linha e das tensões nos terminais do reator, assim como os correspondentes espectros de frequência para as tensões e correntes são destacados nas figuras 4.30 e 4.31.



F1 to F6 Zoom F10 Hardcopy Esc Return Time 11:27:00 N. 111

Figura 4.30 – Formas de onda das tensões e correntes - caso 3.1.



F1 to F6 Zoom F10 Hardcopy Esc Return Time 11:27:00 N. 111

Figura 4.31 – Espectros harmônicos das tensões e correntes - caso 3.1.

(ii) – Reator no *tap* 3 com tensão de 13,6 kV – Caso 3.2:

Incrementando a tensão de suprimento para 13,5 kV, as principais grandezas e respectivos valores obtidos no ensaio encontram-se na tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Grandezas e valores para o caso 3.2.

Grandeza	Valor
Tensão fase-fase	13,6 kV
Corrente de linha	17,6 A
Distorção total de corrente	23 %
Potência aparente	413,8 kVA
Potência reativa	400,5 kVAr
Perdas	19,0 kW

As formas de onda das correntes de linha e das tensões nos terminais do reator, assim como os correspondentes espectros de frequência para as tensões e correntes são destacados nas figuras 4.32 e 4.33.

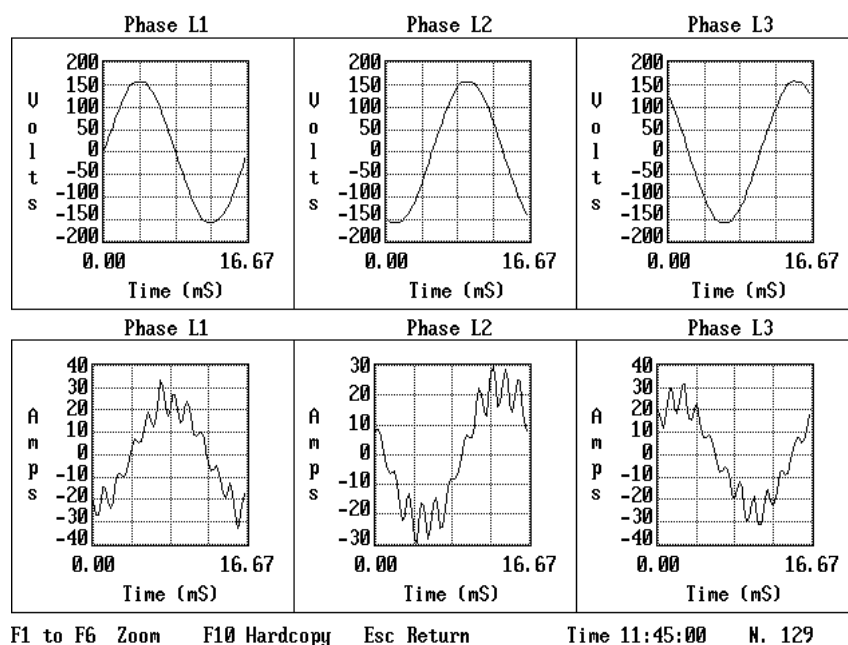
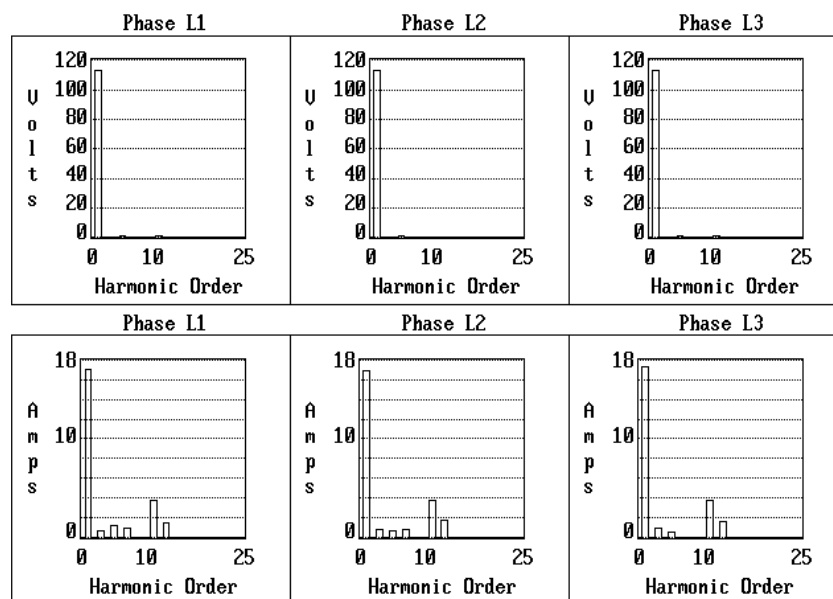


Figura 4.32 – Formas de onda das tensões e correntes - caso 3.2.



F1 to F6 Zoom F10 Hardcopy Esc Return Time 11:45:00 N. 129
Figura 4.33 – Espectros harmônicos das tensões e correntes - caso 3.2.

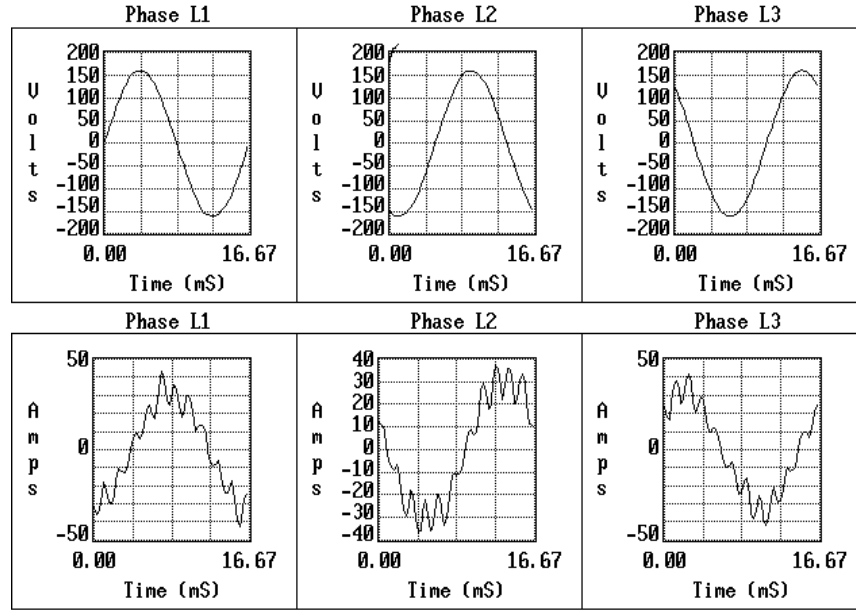
(iii) – Reator no *tap* 3 com tensão de 13,7 kV – Caso 3.3:

Os principais resultados que sintetizam a operação do reator no *tap* 3, sob uma tensão de 13,7 kV, são apresentados na tabela 4.12.

Tabela 4.12 – Grandezas e valores para o caso 3.3.

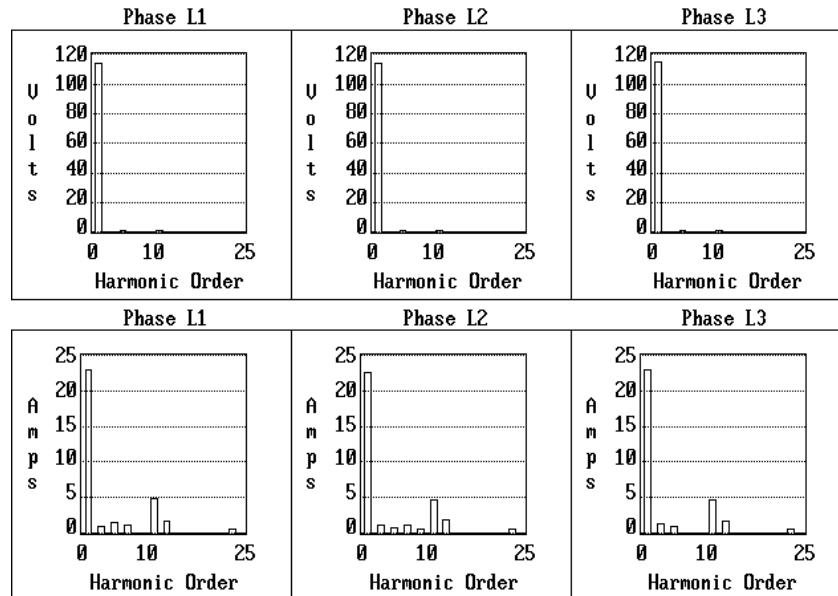
Grandeza	Valor
Tensão fase-fase	13,7 kV
Corrente de linha	23,5 A
Distorção total de corrente	24 %
Potência aparente	558,4 kVA
Potência reativa	540,4 kVAr
Perdas	13,8 kW

Da mesma maneira dos casos anteriores, as formas de onda das correntes de linha e das tensões nos terminais do reator, assim como os correspondentes espectros de frequência para as tensões e correntes são destacados nas figuras 4.34 e 4.35.



F1 to F6 Zoom F10 Hardcopy Esc Return Time 11:51:00 N. 135

Figura 4.34 – Formas de onda das tensões e correntes - caso 3.3.



F1 to F6 Zoom F10 Hardcopy Esc Return Time 11:51:00 N. 135

Figura 4.35 – Espectros harmônicos das tensões e correntes - caso 3.3.

4.4.3 – Desempenho térmico

Para a análise do comportamento térmico do equipamento foram observadas as variações de temperatura do reator em operação contínua. Foram registradas as temperaturas durante os testes de variação de potência, por meio

da variação de tensão do barramento de 13,8 kV, até que a potência absorvida pelo reator atingisse o valor de 900 kVAr.

As temperaturas do óleo refrigerante foram coletadas do termômetro do reator e as temperaturas externas, obtidas nas imediações do seu tanque foram medidas com um termômetro digital conforme indicado na figura 4.36.



Figura 4.36 - Medição de temperatura

Os resultados obtidos demonstram que não foi atingido o valor máximo admitido pelo isolamento e encontram-se disponíveis na tabela 4.13

Tabela 4.13 – Medições de temperatura.

Horário da Medição	Medição do Termômetro do reator (° C) - A	Medição do Termômetro Digital (° C) - B	Temperatura Ambiente (° C) - C	Variação de Temperatura (° C)	
				A-C	B-C
13:20	35	28	26	9	2
13:35	36	29	26	10	3
13:50	37	40	26	11	14
14:05	39	42	27	12	15
14:20	41	46	29	12	17
14:35	45	48	29	16	19
14:50	46	51	28	18	23
15:10	49	52	26	23	26
15:25	51	56	26	26	30
15:40	55	66	28	28	38
15:55	57	70	28	29	41

Horário da Medição	Medição do Termômetro do reator (° C) - A	Medição do Termômetro Digital (° C) - B	Temperatura Ambiente (° C) - C	Variação de Temperatura (° C)	
				A-C	B-C
16:10	59	69	27	32	37
16:25	61	73	29	32	44
16:40	63	74	27	36	47
16:55	65	77	28	37	49

4.4.4 – Desempenho quanto ao ruído

A medição de ruído produzida pelo reator foi efetuada conforme ilustra a figura 4.37.



Figura 4.37 - Medição de ruído.

Como não existe normalização específica no Brasil para o reator a núcleo saturado, foi efetuada uma analogia com as normas técnicas dos transformadores e reatores da ABNT (NBR 5356 – Transformadores de Potência. Especificação, NBR 7277 – Medição do Nível de Ruído em Transformadores e Reatores. Método de Ensaio) e das concessionárias. Essa analogia tem como objetivo

verificar se o ruído produzido pelo reator encontra-se dentro da faixa tolerável e admissível dos equipamentos cujos aspectos construtivos são semelhantes.

O ruído produzido pelo reator funcionando sob as condições anteriormente indicadas variou de 70 a 80 dB conforme a potência reativa absorvida pelo mesmo.

4.5 ANÁLISE DAS MEDIÇÕES

Comparando-se os resultados obtidos para os casos analisados, observa-se que:

- Para o *tap* 2 (posição central que corresponde ao valor nominal) do reator, na tensão de 0,95 pu (13,1 kV), o reator absorve uma potência reativa da ordem de 140 kVAr. Aumentado-se a tensão para 1,01 pu (13,9 kV) de tensão, a potência ficou em torno de 580 kVAr (102% da potência nominal) e, para uma tensão de 1,02 pu (14,1 kV), a potência foi de 772 kVAr;
- Para o *tap* 3 (menor quantidade de espiras e conseqüente menor valor requerido para a tensão associada com a potência nominal), o reator absorve praticamente 540 kVAr (95% da potência nominal) na tensão de 0,99 pu (13,7 kV);
- No que tange ao funcionamento do reator, sob o ponto de vista de forma de onda e harmônicos, constatou-se, como seria esperada, a forte correlação entre a potência reativa de operação e a geração de correntes harmônicas. Nesse particular ressalta-se que, a não ser por algumas ordens não características registradas, fato esse comum quando se leva em conta que qualquer produto real, possui desvios das hipóteses ideais consideradas nos desenvolvimentos teóricos. Verificou-se total consonância entre os resultados e aqueles

previstos pelos arranjos eletromagnéticos designados por reator *Twin-Tripler* constituídos por 2 (dois) blocos trifásicos magneticamente desacoplados. As componentes harmônicas detectadas encontram-se enquadradas na lei de formação anteriormente posta, a qual estabelece que as ordens harmônicas esperadas são aquelas definidas pela $12K+1$;

- Observa-se ainda que, embora o reator apresente comportamento não linear, à medida que aumenta a absorção da potência reativa para o controle da tensão, ou seja, quando o reator passa a atuar na região de saturação, ocorre o aumento da geração de harmônicos;
- Especificamente em relação aos harmônicos de tensão medidos nas 3 (três) fases, os valores das distorções harmônicas totais não excederam os limites máximos definidos pelo ONS (Sub Módulo 2.2 – Padrões de Desempenho da Rede Básica, de 24/12/2002 – Tabela 4) que estabelece, para tensões de fornecimento menores que 69 kV, um THDv limite de 6%. Os resultados obtidos estão em sintonia com tais recomendações;
- Para as correntes, os valores máximos encontrados para as distorções harmônicas totais (THDi) ficaram em torno de 24%, conforme mostra a tabela 4.14, atendendo, também, o estabelecido pelo ONS.

Tabela 4.14 – Distorção Harmônica de Corrente.

Corrente (A)	Fundamental	DI% - Distorção Harmônica de Corrente
I1	18,58	24,57
I2	18,43	24,31
I3	18,69	23,22

- As informações coletadas das temperaturas determinadas por meio do termômetro interno do reator revelaram valores entre 35° C a 65° C, enquanto a temperatura externa medida pelo termômetro digital variou de 28° C a 77° C. A temperatura ambiente, durante os testes, ficou entre 26° C e 28° C;
- A variação entre a temperatura registrada no termômetro do reator e a temperatura ambiente oscilou de 9° C a 37° C e entre a temperatura externa medida pelo termômetro digital e a temperatura ambiente variou de 2° C a 49° C;
- Analisando os valores medidos pelo termômetro digital e pelo termômetro interno do reator, observa-se que a temperatura externa (carcaça) encontra-se acima da temperatura interna do reator para, praticamente, todas as medições efetuadas. Isso pode sinalizar a possível ocorrência de fluxos de dispersão nos enrolamentos do reator, fenômeno esse que se mostra um ponto relevante para estudos complementares;
- Ressalta-se que a isolação da parte ativa (bobinas) do núcleo ferromagnético do reator é feita por papel isolante impregnado em óleo mineral isolante, tipo naftênico ou parafínico. A isolação sólida, em sua maior parte de papel, possui como elemento principal celulose, que é um composto orgânico formado por longas cadeias de anéis de glicose. O número médio de unidades de anidroglicose na molécula da celulose é definido como o grau de polimerização do papel. Em se tratando de um papel novo, esse número deve variar de 1200 a 1400, sendo que a degradação das ligações entre as unidades afeta diretamente a sua resistência mecânica e isto, por sua vez, possui fortes impactos na vida útil do equipamento. Dentro desse contexto, vale destacar que as medições térmicas orientam para o fato que o

reator não apresentou sobre-aquecimento, mesmo com o aumento da tensão nos seus terminais e conseqüente aumento da potência reativa;

- Com relação aos ruídos, é importante lembrar que os limites não são determinados pelo equipamento em si, mas sim pelos níveis de poluição sonora toleráveis pelo ser humano. Ao se determinar um valor máximo de ruído para um determinado equipamento, está fixando-se, na verdade, um valor limite que não prejudique o conforto, o bem estar e a saúde das pessoas. Os valores máximos de ruídos admissíveis para equipamentos com potência semelhantes a do reator ensaiado variam de acordo com a concessionária e situam-se na faixa de 56 a 67 dB (decibéis). A NBR 7277 (NBR 7277 – Medição do Nível de Ruído em Transformadores e Reatores. Método de Ensaio) e a NBR 5356 (Transformadores de Potência. Especificação), que determinam os métodos de ensaios e servem de base e referência para todas as outras normalizações, apontam para um limite de cerca de 70 dB para uma potência similar;
- Quanto à questão em pauta constatou-se que o reator, funcionando sob as condições anteriormente destacadas, produziu nível audível da ordem de 75 decibéis, estando pouco acima dos limites estabelecidos para um equipamento desse porte;
- Ao contrário de um transformador, que apresenta uma operação constante e menos sujeita a variações abruptas, o reator é mais dinâmico, tendo o seu funcionamento com potência nominal ou acima, apenas quando as tensões se apresentam acima da normal de operação do sistema.

4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante dos testes realizados com o reator instalado na subestação Coxipó, em Cuiabá, MT, verificou-se que:

- Os valores transitórios das correntes de energização do equipamento não evidenciaram níveis preocupantes e que viessem a produzir esforços tão acentuados quanto aqueles constatados nas energizações de transformadores;
- No que tange à relação entre a potência reativa absorvida pelo reator e a tensão em seus terminais, os resultados obtidos encontram-se ilustrados na figura 4.38. Essa relação ratifica as premissas estabelecidas quando às expectativas operacionais do produto em discussão e ainda, que a posição de *tap* 3 possibilita o funcionamento do equipamento nos termos estabelecidos como base para o projeto, ou seja, que sob uma tensão de 13,8 kV o reator absorva uma potência reativa de 570 kVAr.

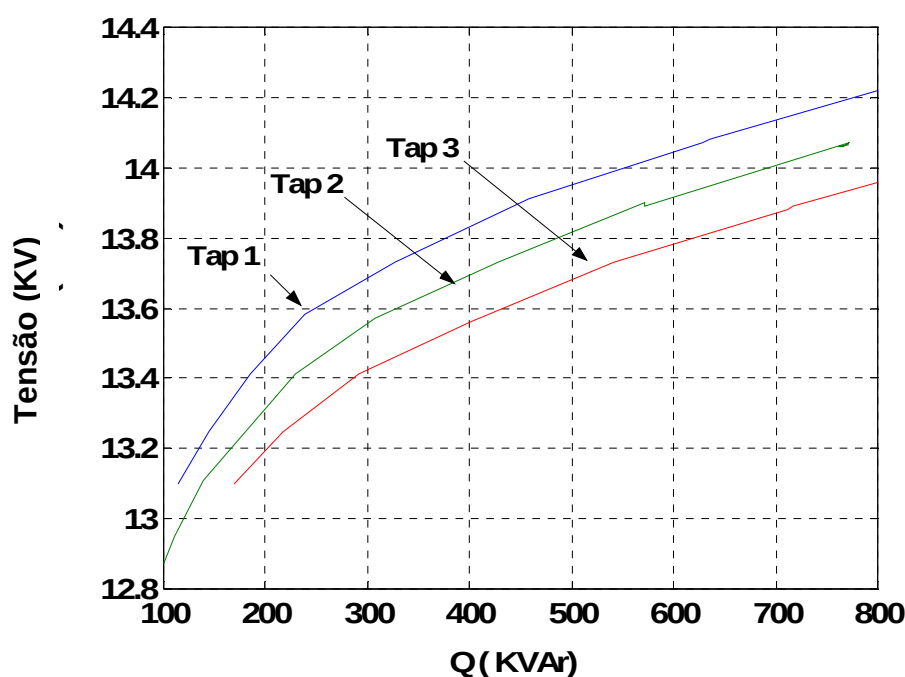


Figura 4.38 – Relação entre a Potência Reativa e a Tensão para os tap's 1, 2 e 3.

- Quanto às distorções harmônicas e respectivas ordens, os valores encontrados estão em consonância com as expectativas do projeto, assim como também as perdas obtidas durante o funcionamento do equipamento da ordem de 4%;
- No que se refere à temperatura de operação observou-se, durante os testes de longa duração (intervalos de tempo superiores a 2 (duas) horas), que não houve, em nenhuma situação, elevações de temperatura significativas em relação aos limites admissíveis;
- Como já mencionado, o fato dos valores das temperaturas externas medidas apresentarem-se acima dos valores medidos no óleo do reator indica a possibilidade da existência de fluxos de dispersão nos enrolamentos do reator, tema esse ainda merecedor de maiores investigações;
- No que se refere à questão dos ruídos, pode-se também concluir que é baixo o nível de interferência produzido pelo reator, mesmo em curtos períodos de tempo quando em operação com potência acima da nominal, uma vez que os valores se apresentaram dentro do limite de 80 dB. Esse limite, como destacado, encontra-se próximo aos valores referenciados nas normas técnicas.

Diante dessas constatações, fica evidenciado que os resultados obtidos em campo ratificaram as previsões teóricas e comprovam o sucesso operacional do protótipo ensaiado e, conseqüentemente, do projeto desenvolvido.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES GERAIS

Em complementação às considerações gerais apresentadas ao término de cada capítulo, considera-se essencial destacar as principais constatações obtidas nos estudos realizados para esta dissertação.

O Capítulo I apresentou os aspectos técnicos e econômicos que viabilizam a utilização do compensador estático tipo reator a núcleo saturado e sua correlação com o tema “Qualidade da Energia Elétrica”. As conclusões apresentadas resultam da uma revisão bibliográfica sobre o estado da arte dos estudos envolvendo dispositivos que empregam tal tecnologia e estabelecidos os objetivos gerais e a estrutura desta dissertação.

Visando ampliar o entendimento da aplicabilidade do compensador estático a reator a núcleo saturado nos sistemas elétricos, o Capítulo II destacou os principais aspectos relacionados com o controle de tensão nos sistemas elétricos de potência em corrente alternada por meio da compensação reativa. Nesse sentido, foram observadas possíveis soluções com instalação de dispositivos fundamentados na compensação reativa paralela, série e no controle do ângulo de carga. Também foram descritos os principais aspectos na compensação de reativos por intermédio do CERNs e evidenciada a sua forma de atuação.

O Capítulo II ainda apresentou a fundamentação teórica do compensador estático a reator a núcleo saturado e as diversas possibilidades para arranjos dos

enrolamentos dos reatores para assegurar uma operação adequada, com reduzido conteúdo harmônico associado com as correntes de linha.

O cerne do Capítulo III foi direcionado à apresentação das características técnicas do equipamento projetado e à apresentação do produto final construído por um fabricante nacional de transformadores. Nesse capítulo foram também sintetizados os resultados dos testes preliminares feitos ainda na fábrica e que orientaram para a instalação do produto em campo e a realização dos ensaios definitivos com vistas a verificar o desempenho do reator em uma instalação real.

O Capítulo IV foi voltado para a avaliação de desempenho do protótipo de reator a núcleo saturado em campo, quando submetido às condições reais de operação de um sistema elétrico. Para isso, o protótipo foi instalado em uma subestação de distribuição que permitisse a sua energização e operação contínua para avaliação das suas grandezas elétricas, especialmente, no que se refere à relação entre a variação da potência reativa com a tensão de operação.

Quanto às questões associadas com os processos de energização, verificou-se que os valores máximos das correntes atingidas não se mostraram em proporções preocupantes, se comparadas às clássicas correntes transitórias de energização de transformadores.

Quanto ao desempenho sob condições de regime permanente e, em especial sob a ação de distintos valores de tensão, com os *tap*'s ajustados nas 3 (três) posições disponibilizadas pelo projeto, constatou-se uma resposta do reator, quanto às potências reativas consumidas, de forma adequada e compatível com as premissas estabelecidas no projeto do produto. De um modo especial ressalta-se que o *tap* 3 viabilizou um ponto de operação em total sintonia com os parâmetros base do projeto, ou seja, de um consumo de 570 kVAr sob 13,8 kV de tensão de suprimento.

Quanto às distorções harmônicas verificou-se que os valores encontrados estão em consonância com as expectativas do projeto, assim como também as perdas obtidas durante o funcionamento do reator.

No que se refere à temperatura de operação observou-se, durante os testes de longa duração (intervalos de tempo superiores a 2 (duas) horas), que não houve, em nenhuma situação, elevações de temperatura significativas em relação aos limites admissíveis, o que comprova a eficácia do projeto, inclusive quanto a disposição física dos 2 (dois) núcleos magnéticos.

Tal como já foi devidamente ressaltado anteriormente, mais uma vez considera-se importante registrar que as temperaturas externas medidas apresentaram-se acima dos valores medidos no óleo do reator, fato esse indicativo da existência de fluxos de dispersão que se estabelecem pela carcaça do reator.

Pelos valores medidos durante os testes, também foi possível constatar que os níveis de ruídos produzidos pelo reator, mesmo com potência acima da nominal, encontram-se próximos dos valores referenciados nas normas técnicas.

Do exposto segue que os resultados obtidos nos testes efetuados com o reator ratificam as previsões teóricas e comprovam o sucesso operacional do equipamento projetado.

Embora os principais objetivos do trabalho tenham sido atingidos, como para qualquer outra área de conhecimento, investigações complementares, com certeza, ainda se fazem necessárias. Dessas pode-se destacar:

- Estudos direcionados a identificar e eliminar os fenômenos que ocasionaram as elevações de temperatura na carcaça ou tanque do reator;
- Busca de alternativas voltadas para a minimização das perdas associadas com a operação do reator;

- Modelagem do reator para fins de investigações dos fenômenos transitórios quando da energização do dispositivo isolado e mesmo em conjunto com as demais partes constituintes do compensador de reativos completo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - REIS, A. K. C., **Compensação de Potência Reativa Através do Controle da Saturação de Reatores**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia. Fevereiro, 1997.
- [2] - DUGAN, R. C., Mc GRANAGHAN, M. F., **Electrical Power Systems Quality**. Editora Mc-Graw Hill, EUA – 1995.
- [3] - BRASIL, D. O. C., **Aplicação de Reatores Saturados em Sistemas de Transmissão**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. Maio, 1996.
- [4] - DALE, S. H., DUNHAN, C. R., FRIEDLANDER, E., **Square Wave Transformer and Their Use in Static Control of Mercury Arc Rectifiers**. GEC Journal, pp 229 – 238, England, October 1952.
- [5] - FISHER, F. J., FRIEDLANDER, E., **DC Controlled 100 MVA Reactor**. GEC Journal, pp 93 – 104, England, April 1955.
- [6] - FRIEDLANDER, E., **Principle and Analysis of a Stabilized Phase Multiplier Type of Magnetic Frequency Convertor**. Electrical Energy, Vol. I, pp 55-66, October 1956.

- [7] - OLIVEIRA, J. C., **Compensação de Reativos em Sistemas Elétricos**. Gráfica da UFU, Uberlândia, 1986.
- [8] - BREWER, G. L., WELCH, I. M., HORWILL, C., THANAWAL, A. H. L., YOUNG, D. J., **The Application of Static VAR Compensators to the English Terminal of the 2000 MW HVDC Cross Chanel Link**. 27th Cigré Session, paper 14-07, Paris, 1986.
- [9] - AINSWORTH, J. D., FRIEDLANDER, E., RALLS, K. J., **Recent Developements Towarts Long Distance AC Transmission Using Saturated Reactor**. International Conference on High Voltage DC and/or AC Power Transmission, London, November 1973.
- [10] - AINSWORTH, J. D., FRIEDLANDER, E., YACAMINI, R., **Application of Saturated Reactor to AC Voltage Stabilization for HVDC Transmission and Other Large Convertors**. IEEE Pas Summer Meeting and EHV/UHV Conference, Vancouver, July 1973.
- [11] - STEVENSON, W. D., **Elements of Power Systems Analysis**. Mc-Graw Hill Book Company, 4th Edition, USA.
- [12] - THANAWALA, H. J., KELHAM, W.O., CRAWSHAW, A. M., **Static Compensators Using Thyristor Control With Saturated Reactors and With Low Reactance Linear Reactors**. IEE Conference on Thyristor and Variable Static Equipment for AC and DC Transmission, London, 1981.

- [13] - THANAWALA, H. J., WILLIAMS, W. P., YOUNG, D. J., **Static Reactive Compensators for AC Power Transmission**. GEC Power Transmission Division, Publication No. 1491 – 10, Replitec From GEC Journal, Vol. 45, Number 3, England, 1979.
- [14] - THANAWALA, H. J., YOUNG, D. J., **Saturated Reactors – Recent Applications in Power Systems**. GEC Power Transmission Division, Publication No. 1490 – 5, Replited From Energy International, Vol. 7, Number 11, November 1970.
- [15] - CARVALHO, M. A., **Aplicação de Reatores Saturados em Sistemas de Transmissão**. XIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE), Grupo IV, Camboriú, Outubro de 1995.
- [16] - STEWARD, J. R., HUMPAGE, W. D., CHOI, S. S., GARROOD, A. J., NGUYEN, T. T., **Measurements on Long Distance Transmission Interconnection With Saturated Reactor Compensator**. IEE Proceedings, Vol. 134, No. 6, November 1987.
- [17] - AINSWORTH, J. D., GAVRILOVIC, A., THANAWALA, H. L., **Static and Synchronous Compensators for HVDC Transmission Convertors Connected to Weak AC Systems**. International Conference on Large High Voltage Electric Systems, 31 – 01, Paris – France, August 27 – September 4, 1980.

- [18] - CARVALHO JUNIOR, M. A., **Steady State Representation of Reactive Compensating in HVDC Converter Station**. PhD Thesis, Umist, September 1983.
- [19] - FERREIRA, F. M. C., **Aplicação de Reatores com Saturação Natural em Sistemas de Extra-Alta Tensão**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, Dezembro de 1998.
- [20] - MAGNATA DA FONTE, L. A., **Reatores Saturados: Alguns Aspectos Operacionais e de Projeto**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, Dezembro de 1997.
- [21] - LEAL, F. S., **Reatores Saturados com Excitação Paralela**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, Novembro de 2000.
- [22] - KUSKO, A., **Poliphase Closed-Core Reactors**. IEEE Transactions (Pas), Vol. 84, January 1965, pp 57 – 64.
- [23] - PACHECO, E. J. P., **Systems Voltage Control Using Saturated Iron Cored Reactors**. PhD Thesis, Umist, November 1977.
- [24] - GEC SWITCHGEAR LIMITED. **The Control of System Voltage Using AC Saturated Reactors**. GEC Publication.
- [25] - VASCONCELLOS, A. B., **Modelagem, Projeto e Construção de Compensadores Estáticos tipo Reator a Núcleo Saturado Para Melhoria da Qualidade da Energia: Análise Computacional e**

Validação Experimental. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Uberlândia, Setembro de 2004.

- [26] - VASCONCELLOS, A. B., OLIVEIRA, J. C., APOLÔNIO, R., **Análise de Desempenho Dinâmico de um Compensador Estático Tipo Reator a Núcleo Saturado.** In: VI SEMINÁRIO BRASILEIRO SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA, 2005, BELEM-PA, 2005. v. II. P.356-361.
- [27] - VASCONCELLOS, A. B., APOLONIO, R., BELCHIOR, F. N., DAMACENO, V. G., VENDRAMINI, J. F., OLIVEIRA, J. C., PEREIRA, L. H. S., BARBOSA JÚNIOR, J. A. F., **Comparative Perfomance Análýsis of Treble-Tripler and Twin-Tripler Saturad Core Reactor Compensators.** In: VII CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE APLICAÇÕES INDUSTRIAIS, 2006, RECIFE-PE, 2006. v. ÚNICO.
- [28] - VASCONCELLOS, A. B., OLIVEIRA, J. C., APOLÔNIO, R., **Saturatde Core Reactor Static Computacional Versus Experimental Perfomance Analysis.** In: 11 th INTERNATIONAL CONFERENCE ON HARNONICS AND QUALITY OF POWER, New York, 2004.
- [29] - PACHECO, J. M., **Determinação dos Parâmetros de Compensadores Estáticos de Reativos e Estratégia para o Projeto Otimizado de Reatores Saturados.** Tese Doutorado. Universidade Federal de Uberlândia, Setembro de 2008.