UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MODELAGEM E ANÁLISE DE DESEMPENHO TRANSITÓRIO E DINÂMICO DE COMPENSADORES ESTÁTICOS DE REATIVOS UTILIZANDO REATORES SATURADOS

João Areis Ferreira Barbosa Júnior

Uberlândia, Fevereiro de 2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MODELAGEM E ANÁLISE DE DESEMPENHO TRANSITÓRIO E DINÂMICO DE COMPENSADORES ESTÁTICOS DE REATIVOS UTILIZANDO REATORES SATURADOS

João Areis Ferreira Barbosa Júnior

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

José Carlos de Oliveira, PhD. (Orientador) – UFU
Arnulfo Barroso de Vasconcellos, Dr. – UFMT
Antônio Carlos Delaiba, Dr. – UFU
Milton Itsuo Samesima, Dr, - UFU

Uberlândia, Fevereiro de 2009.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

B238m Barbosa Júnior, João Areis Ferreira, 1984-
Modelagem e análise de desempenho transitório e dinâmico de compensadores estáticos de reativos utilizando reatores saturados / João Areis Ferreira Barbosa Júnior. - 2009.
120 f. : il.

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

1. Eletrônica de potência - Teses. 2. Sistemas de energia elétrica - Controle de qualidade - Teses. I. Oliveira, José Carlos de. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU: 621.38

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

MODELAGEM E ANÁLISE DE DESEMPENHO TRANSITÓRIO E DINÂMICO DE COMPENSADORES ESTÁTICOS DE REATIVOS UTILIZANDO REATORES SATURADOS

JOÃO AREIS FERREIRA BARBOSA JÚNIOR

Dissertação apresentada por João Areis Ferreira Barbosa Júnior 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. Alexandre Cardoso, Dr.
Coordenador Pró-Têmpore do Curso de Pós- Graduação

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus queridos pais, João Areis e Ângela, a minha querida irmã Letícia, ao grande amor de minha vida Nara Luísa, ao meu irmão de coração Isaque e a todos meus amigos.

AGRADECIMENTOS

A **DEUS** pela minha vida, pelos meus pais, amigos e por todas as bênçãos que Ele tem derramado sobre mim durante todos os momento de minha vida.

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

Ao professor **Arnulfo Barroso Vasconcellos** por toda a ajuda e apoio ao longo de minha carreira acadêmica, assim como pela ajuda e esclarecimentos durante as discussões sobre o tema dessa dissertação.

Ao professor **Jackson Marques Pacheco** que sempre que consultado, atendeu com bastante atenção, dando toda ajuda e apoio durante os momentos mais difíceis de discussão sobre o tema desta dissertação.

Ao professor **José de Souza Nogueira**, o responsável pelo despertar de meu interesse e amor pela vida acadêmica e pela área científica, e que sempre me incentivou e orientou durante os anos de iniciação científica na graduação.

A todos os **professores e funcionários dessa instituição**, que me acolheram de maneira maravilhosa, e que durante todos os momentos, deram total apoio para a realização deste.

A toda **minha família**, na pessoa de meus pais, irmã e cunhado, por sempre terem me incentivado em todos os momentos de minha vida, desde a infância até

os dias de hoje, pelo apoio durante a realização desta pós-graduação e pela compreensão às várias ausências do seu convívio.

À **Nara Luísa Reis de Andrade** que apesar de não estar presente ao meu lado neste momento tão importante de minha vida, teve uma contribuição excepcional durante os momentos mais importantes e felizes ao longo dos últimos anos, e que sem sombra de dúvidas, onde quer que esteja, estará muito feliz pela realização de mais esse sonho.

Ao amigo e irmão que Deus me deu, **Isaque Nogueira Gondim**, que apesar de fazer parte de minha vida há tão pouco tempo, sempre mostrou total apoio e dedicação, principalmente nos temas relacionada à Engenharia Elétrica e ao tema dessa dissertação.

Ao amigo **Ivandro Antônio Bacca**, por todo apoio e incentivo, durante as discussões sobre os assuntos relacionados à Engenharia Elétrica e ao tema dessa dissertação.

Aos queridos amigos (as) **Angélica**, **Arthur**, **Arnaldo**, **Carlos Eduardo "Cadu"**, **Elise**, **Fernanda**, **Ivan**, **Marcus Vinícius**, **Marcelo**, **Paulo Naves** e **Rodrigo Rimoldi**, que fizeram parte de meu convívio durante esses anos de mestrado, e que tiveram papel imprescindível para a realização dessa obra.

Aos demais amigos, que apesar de não terem sido citados aqui, também estão presentes nos agradecimentos que faço em meu coração, por todo carinho e apoio, ao longo de minha vida e para realização desse trabalho.

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 conciliados com cargas sazonais. Para isso, dentre as várias possibilidades encontradas no mercado, os compensadores estáticos destacam-se como uma alternativa de grande potencial para a melhoria do perfil de tensão dos sistemas elétricos. Neste cenário aparece um equipamento denominado por Compensador Estático à base de Reator a Núcleo Saturado, constituído por uma unidade magnética especial e bancos de capacitores em paralelo e em série. As propriedades construtivas e operativas deste dispositivo oferecem uma possibilidade técnica robusta, de baixo custo, com menores requisitos de manutenção e ainda, com adequado desempenho operacional no que tange ao processo da regulação dinâmica da tensão. Dentro desta linha de trabalhos, esta dissertação, complementando pesquisas anteriores, avança no sentido de oferecer uma modelagem mais completa do dispositivo e sua respectiva implementação computacional. Utilizando tais recursos, são realizados estudos investigativos sobre o desempenho do compensador em pauta diante dos processos de energização e também quando da ocorrência de súbitas variações operativas do complexo elétrico que determinam a necessidade de dispositivos para a estabilização da tensão dentro dos patamares requeridos.

Palavras-Chave: Compensador Estático a Reator a Núcleo Saturado, Qualidade da Energia, Operação Transitória e Dinâmica.

ABSTRACT

The growing demand for energy in electric systems has resulted in major operational difficulties related to voltage level control. This has led specialists to deal more strictly with the control of reactive power and voltage, mainly in the case of radial electric systems supplying seasonal loads. Amongst a variety of commercial solutions to provide voltage regulation arise the static compensators. These 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 capacitors in series and in parallel - becomes an interesting alternative, when compared to other types of equipment. The main advantages related to this product are: robustness, low cost, lower maintenance requirements and good performance. Within this scenario, the purpose of the present dissertation is to carry on further investigation related to a more comprehensive model and computational studies of transient, dynamic and steady state performance of an overall electrical system. Using a given system several studies are performed so as to highlight the equipment energization phenomena as well as the device effectiveness at compensating for system operational condition changes that require the use of voltage regulators to accomplish the power utility standards.

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

SUMÁRIO

CAPÍTULO I

1 INTRODUÇÃO 14

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS 14

1.2 ESTADO DA ARTE 16

1.3 CONTRIBUIÇÕES DESTA DISSERTAÇÃO 21

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO 22

CAPÍTULO II

2 COMPENSADOR ESTÁTICO A NÚCLEO SATURADO: FUNDAMENTOS E REGULAÇÃO DA TENSÃO 24

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS 24

2.2 CARACTERÍSTICAS DE OPERAÇÃO DOS SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA 25

2.3 CONTROLE DO FLUXO DE POTÊNCIA POR MEIO DE COMPENSADORES DE REATIVOS . 28

2.4 COMPENSADORES ESTÁTICOS A REATOR A NÚCLEO SATURADO – CERNS 29

2.5 ARRANJO ELETROMAGNÉTICO E COMPENSAÇÃO INTRÍNSECA DE HARMÔNICOS PARA OS REATORES SATURADOS 32

2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS 39

CAPÍTULO III

3 AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL DO DESEMPENHO DO REATOR SATURADO SOB CONDIÇÕES TRANSITÓRIAS DE ENERGIZAÇÃO 40

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS 40

3.2 SIMULADOR COMPUTACIONAL 41

3.3 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA UTILIZADO PARA OS ESTUDOS COMPUTACIONAIS ... 45

3.4 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO SOB CONDIÇÕES TRANSITÓRIAS DE ENERGIZAÇÃO 51

3.4.1 Transitório de Energização do Reator Saturado Isoladamente..... 51
3.4.2 Transitório de Energização - Reator Saturado e Banco de Capacitores Paralelo..... 60
3.4.3 Transitório de Energização - Reator Saturado com Banco de Capacitores Série e Banco de Capacitores Paralelo..... 67

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS 72

CAPÍTULO IV

4 ANÁLISE COMPUTACIONAL DO DESEMPENHO DO COMPENSADOR A NÚCLEO SATURADO SOB CONDIÇÕES DINÂMICAS **75**

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS..... 75

4.2 ESTUDOS DE DESEMPENHO DO COMPLEXO ELÉTRICO: TEMPO DE RESPOSTA, REGULAÇÃO DE TENSÃO E DISTORÇÕES HARMÔNICAS 77

4.2.1 Tensões no barramento de Sinop-MT, sem a presença do compensador..... 77
4.2.2 Tensões no barramento de Sinop-MT, com a inserção do reator saturado (sem capacitores)..... 81
4.2.3 Tensões no barramento de Sinop-MT, com a inserção do reator saturado e capacitor paralelo (sem capacitor paralelo)..... 90
4.2.4 Tensões no barramento de Sinop-MT, com a inserção do reator saturado e capacitores (paralelo e série)..... 99

4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS 108

CAPÍTULO V

5 CONCLUSÕES GERAIS..... **111**

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS **116**

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Representação de 2 (duas) barras interligadas por uma linha de transmissão. 26
Figura 2.2 – Característica da potência transferida da barra “s” para a barra “r” em função do ângulo de carga δsr (sem compensação). 27
Figura 2.3 – Diagrama esquemático e características V x I de um compensador estático a núcleo saturado. 31
Figura 2.4 – Reator trifásico: 33
Figura 2.5 – Esquema de conexão de um reator de 6 (seis) unidades: 35
Figura 2.6 – Diagrama fasorial do reator de 6 (seis) unidades: 37
Figura 3.1- Diagrama de bloco do reator twin-tripler à núcleo saturado isolado – modelo utilizado no simulador computacional. 43
Figura 3.2- Diagrama unifilar do sistema elétrico radial escolhido para a instalação do CERNS. 47
Figura 3.3 – Corrente transitória de energização do reator saturado isoladamente. 53
Figura 3.4 – Tensão transitória de energização do reator saturado isoladamente. .. 55
Figura 3.5 – Corrente transitória de energização do reator saturado isoladamente . 57
Figura 3.6 – Tensão transitória de energização do reator saturado isoladamente. .. 59
Figura 3.7 – Corrente transitória de energização – reator saturado. 62
Figura 3.8 – Corrente transitória de energização – banco de capacitores paralelo. . 65
Figura 3.9 – Tensão transitória de energização – reator saturado e banco de capacitores paralelo. 66
Figura 3.10 – Corrente transitória de energização – reator saturado com banco de capacitores série e banco de capacitores paralelo. 68
Figura 3.11 – Tensão transitória de energização – reator saturado com banco de capacitores série e banco de capacitores paralelo. 71
Figura 4.1 – Tensões na cidade de Sinop-MT – sem a presença do compensador. 79
Figura 4.2 – Tensões na cidade de Sinop-MT – com a presença do reator saturado isoladamente. 83

Figura 4.3 - Formas de onda das tensões do barramento de 230 kV e respectivos espectros harmônicos - com reator saturado e ausência dos capacitores paralelo e série. 86
Figura 4.4 - Formas de onda das correntes solicitadas pelo reator saturado – sem capacitores paralelo e série.....88
Figura 4.5 - Formas de onda das correntes de alimentação do reator saturado e respectivos espectros harmônicos - com reator saturado e ausência dos capacitores paralelo e série. 90
Figura 4.6 - Tensões na cidade de Sinop-MT – com a presença do reator saturado e do banco de capacitores paralelo.....92
Figura 4.7 - Formas de onda das tensões do barramento de 230 kV e respectivos espectros harmônicos – com a presença do reator saturado, banco de capacitores paralelo e ausência do capacitor série. 94
Figura 4.8 - Formas de onda das correntes solicitadas pelo reator saturado – com capacitor paralelo e ausência de capacitor série.....96
Figura 4.9 - Formas de onda das correntes de alimentação do reator saturado e respectivos espectros harmônicos – com capacitor paralelo e ausência de capacitor série. 98
Figura 4.10 - Tensões na cidade de Sinop-MT – com a presença do reator saturado e dos capacitores (paralelo e série). 102
Figura 4.11 - Formas de onda das tensões do barramento de 230 kV e respectivos espectros harmônicos – com a presença do reator saturado e dos capacitores (paralelo e série). 104
Figura 4.12 - Formas de onda das correntes solicitadas pelo reator saturado – com a presença dos capacitores (paralelo e série).....106
Figura 4.13 - Formas de onda das correntes de alimentação do reator saturado e respectivos espectros harmônicos – com a presença dos capacitores (paralelo e série). 107

LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1: Templates associados com arranjos magnéticos disponíveis no aplicativo computacional 43
Tabela 3-2: Subestação de Coxipó.....48
Tabela 3-3: Geração Manso 48
Tabela 3-4: Linha de transmissão de 230 kV – Coxipó - Sinop 48
Tabela 3-5: Transformadores 49
Tabela 3-6: Cargas 50
Tabela 3-7: CERNS 50

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os sistemas elétricos de potência devem ser planejados e operados de maneira tal que, os consumidores possam ser supridos através de um sistema que obedeça aos padrões e índices de qualidade definidos pela legislação pertinente. Dentre estes, pode-se destacar o nível de tensão dos barramentos onde as cargas dos consumidores são atendidas, como um importante fator a ser considerado dentro do contexto da qualidade de energia. Tal tema tem conduzido os estudos de planejamento e operação dos sistemas de potência a levarem 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, podendo este ser feito por intermédio do controle do fluxo da potência reativa. A importância do tema se torna ainda mais relevante em sistemas e cargas com características radiais e sazonais.

No que tange a compensação de reativos, existem inúmeras alternativas a serem empregadas para tal finalidade. Algumas são bastante tradicionais e utilizam dispositivos de funcionamento bastante simples como é o caso das unidades de capacitores automáticos instalados em paralelo ao barramento a ser compensado. Outras utilizam as mais modernas técnicas da eletrônica de

potência, como é o caso dos modernos *Unified Power Flow Controller* - UPFC's.

Sob o ponto de vista econômico, o uso de compensadores eletrônicos, embora tecnicamente atrativo, muitas vezes se apresentam como uma solução de difícil aceitação. Isto se deve, sobremaneira, aos elevados custos de aquisição e manutenção.

Diante disso, surge a necessidade da busca de outras possibilidades que consigam aliar, tanto as atribuições técnicas necessárias para um dispositivo que almeje compensar tensões quanto à viabilidade econômica deste. Nesse cenário, aparece como uma promissora opção um equipamento, no qual pesa uma reconhecida simplicidade construtiva e operativa, conciliando, ainda, excelente robustez e bom desempenho para os processos de compensação aqui requeridos. Tal alternativa consiste de um dispositivo eletromagnético cuja tecnologia foi utilizada na década de 60. Nesta época, a tecnologia da eletrônica de potência ainda era embrionária e, por isso, dispositivos eletromagnéticos se caracterizavam como equipamentos altamente atrativos. Este dispositivo, enquadrado como um dos recursos da compensação estática de reativos é formado por um núcleo magnético com propriedades saturáveis em torno do qual são montadas bobinas com arranjos especiais, e ainda, dois bancos de capacitores. Estes últimos, na forma mais genérica, se apresentam conectados em paralelo e em série. O primeiro é responsável pelo suprimento de potência reativa ao sistema, enquanto que o segundo tem por meta uma correção do estatismo do equipamento final. A combinação destas partes resulta no conhecido Compensador Estático do tipo Reator a Núcleo Saturado – CERNS. Este produto, como já destacado anteriormente possui como vantagens: boa eficiência na regulação da tensão, pequeno tempo de resposta, baixo custo, manutenção reduzida, suportabilidade às intempéries e outros. 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.

Analisando o princípio de operação do equipamento, vale ressaltar que esse tipo de compensador se diferencia bastante dos equipamentos baseados na eletrônica, pois não emprega tiristores ou qualquer sistema de controle para cumprir sua função básica. Ao contrário disso, sua filosofia de operação está fundamentada nas propriedades características intrínsecas do material constituinte do núcleo do mesmo. O reator apresenta seu núcleo de forma fechada como o de um transformador, sem enrolamento de potência no secundário.

O funcionamento do CERNS baseia-se na premissa que a potência reativa consumida pelo compensador, formado pelo conjunto caracterizado por um reator e dois bancos de capacitores (série e paralelo), assim como também pela carga, deve idealmente ser constante. Tomando por base este raciocínio, havendo uma variação na carga, a corrente na unidade magnética do compensador também é modificada, sendo mínima na condição de carga nominal e máxima na condição de carga a vazio. Por isso, diz-se que a sua reatância é auto-ajustável e não necessita de equipamentos de controle [1]. Essa variação da reatância do equipamento pode ser justificada, conforme citado anteriormente, pela propriedade intrínseca do material constituinte do núcleo do equipamento, sendo a resposta do equipamento caracterizada pela curva de saturação do núcleo.

1.2 ESTADO DA ARTE

Por se tratar de uma tecnologia já utilizada no passado, porém bastante eficaz e com grande potencialidade de aplicação nos dias atuais, o reator a núcleo saturado é bastante conhecido dentre os compensadores estáticos. Diante

deste reconhecimento, faz-se necessário relatar, ainda que brevemente, os principais detalhes históricos e resultados das publicações encontradas durante o levantamento bibliográfico efetuado sobre o tema em questão.

Segundo relatos históricos, a tecnologia de reatores saturados de múltiplos núcleos foi desenvolvida pelo Dr. E. Friedlander, provavelmente na década de 40, durante a segunda guerra mundial. Nessa época, o mesmo era empregado como multiplicador de frequência e gerador de trens de pulsos, para alimentação da grade de controle em retificadores a válvulas de mercúrio [2], [3], [4], [5].

Na década seguinte a tecnologia do reator saturado de múltiplos núcleos, fora utilizada pela GEC (*General Electric Company* – Inglaterra) no desenvolvimento do primeiro compensador estático, sendo nesta ocasião, aproveitada pela primeira vez a propriedade do equipamento em manter a tensão praticamente constante em seus terminais. O primeiro compensador estático com emprego de reatores saturados resultou num equipamento de exagerado peso e volume, assim como um desempenho precário devido à baixa qualidade do material magnético empregado. Sendo assim, a fim de se atingir a viabilidade técnica e econômica no aproveitamento prático de tal tecnologia, foram desenvolvidas, posteriormente, várias pesquisas voltadas ao desenvolvimento de materiais magnéticos com propriedades superiores aos existentes. Com isso, foram produzidos núcleos magnéticos com melhores qualidades, sendo esta evidenciada pela obtenção de um ciclo de histerese quase retangular. Assim, tornou-se 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 [7]. Além destas, houve, na sequência, outras aplicações do equipamento, principalmente no setor de transmissão do sistema elétrico.

Uma das mais importantes ocorreu no sistema de transmissão de Corrente Contínua *Cross Chanel* ligando a Inglaterra à França [8].

A fabricação de compensadores estáticos com reatores saturados pela GEC se estendeu por um período de mais de 30 anos, ao longo dos quais foram concebidos 36 equipamentos para os mais variados tipos de aplicações, tanto em sistemas industriais [2], [8], [9], [10], [11], [12], como em empresas do setor elétrico [13], [14], [15] e [16].

Com o avanço tecnológico da eletrônica de potência ocorrido nas últimas décadas, a GEC resolveu transferir a tecnologia do reator saturado para um instituto de projeto de aço na China, passando a produzir apenas compensadores estáticos controlados por tiristores. De acordo com as referências [17] e [18], mesmo após a transferência de tecnologia citada anteriormente, ainda foram fabricados e instalados na Austrália outros equipamentos de compensação de reativos utilizando o núcleo saturado.

Os conceitos e princípios básicos sobre o funcionamento dos compensadores a reator a núcleo saturado são discutidos em [16], [19], [20], [21], [22] e [23].

No que tange a efeitos negativos produzidos pelos dispositivos em discussão, as publicações [14] e [15] indicam preocupações quanto à injeção de harmônicos no sistema elétrico por parte dos compensadores a reator a núcleo saturado. Em consequência disso, surge como alternativa, para minimizar os efeitos causados pelo referido problema, algumas topologias construtivas diferenciadas que possuem características peculiares, mas que mantém a essência do princípio básico de funcionamento do equipamento em estudo. Dentre estas, pode-se destacar dois tipos de reatores comumente encontrados na literatura, uma das versões corresponde ao conhecido *twin-tripler* (12 pulsos), e a outra, denominada por *treble-tripler* (24 pulsos) [2], [14], [15], [16], [17], [18], [21] e [24].

Por fim, vale relatar que, muito embora a citação das publicações supramencionadas, observa-se, relativamente a outras áreas de pesquisa, grande escassez de uma bibliografia sobre o tema, em especial para os assuntos atrelados com o projeto e construção dos reatores saturados. A não ser pelos trabalhos produzidos nos últimos anos pela equipe de pesquisas formada por membros pertencentes à Universidade Federal de Uberlândia, em parceria com a Universidade Federal de Mato Grosso, e outros conduzidos por uma equipe de pesquisadores da Universidade Federal de Pernambuco, nada mais foi encontrado nos levantamentos feitos.

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 subsequentes danos no protótipo. Tais desenvolvimentos marcaram, dentro do contexto nacional, uma retomada às questões de projeto e construção do produto em pauta. Logo, viu-se a necessidade da continuidade das pesquisas sobre o tema, no sentido de solucionar os problemas relacionados às questões térmicas, bem como desenvolver um método otimizado para o projeto e construção de reatores saturados. Recentemente foram desenvolvidos, pelo grupo da UFU, dois trabalhos que contribuíram mais significativamente para a solução destes problemas [29] e [30].

Apesar dos grandes avanços feitos por parte desse grupo de pesquisa no sentido de buscar um conhecimento técnico mais aprofundado no que diz respeito a construção, otimização de perdas e utilização do reator saturado na compensação de reativos em um sistema real, ainda existem lacunas a serem

estudadas e preenchidas quando se trata do uso do reator saturado juntamente com capacitores paralelo e série, perfazendo assim o conjunto conhecido como CERNS.

Neste particular, um dos pontos que tem trazido preocupações quanto ao funcionamento do compensador, consiste na presença do banco de capacitores paralelo e série em operação conjunta com o reator saturado. Tal preocupação justifica-se pela possibilidade das clássicas ressonâncias série ou paralela. Sendo assim, fazem-se necessárias investigações mais detalhadas envolvendo tais combinações de parâmetros para um maior domínio da tecnologia em discussão para a compensação das tensões.

Tendo em vista que todos os trabalhos realizados até então primaram tão apenas pela combinação do reator saturado com o banco de capacitores em paralelo, ressalta-se que, a inserção e consideração dos impactos associados com o emprego do banco de capacitores série constituem-se em assuntos tratados, pela primeira vez, por esta dissertação. Vale apena observar que a referência [25], na sua avaliação experimental, acrescenta tal componente à montagem laboratorial, sem, todavia, explorar o assunto em maiores detalhes.

Reconhecendo a inexistência de documentos sobre o assunto acima, os levantamentos bibliográficos feitos focaram, de modo particular, as experiências de outras áreas de atuação que utilizam de recursos similares. Este é, por exemplo, a questão da compensação série empregada em linhas de transmissão. De fato, o uso desta tecnologia com a finalidade de melhorar a estabilidade e aumentar a potência transmitida na linha [31], [32], [33], [34], [35] e [36] consiste em tema bastante difundido no setor elétrico. No entanto, no que se refere à aplicação almejada por este trabalho, não foi encontrado nenhum artigo que relatasse sobre o emprego de capacitores em série para a melhoria das características operativas do compensador a núcleo saturado.

1.3 CONTRIBUIÇÕES DESTA DISSERTAÇÃO

Apesar dos avanços alcançados, principalmente quanto ao domínio da técnica construtiva do equipamento, ainda existem muitos desafios a serem vencidos até que os compensadores a núcleo saturado sejam plenamente conhecidos nas suas mais diversas particularidades. Reconhecendo estas questões e dando continuidade aos trabalhos anteriores, esta dissertação tem por objetivo contribuir com os seguintes pontos focais:

- Desenvolver uma modelagem mais completa do compensador através da inserção dos recursos atrelados com o emprego de bancos de capacitores em série para a melhoria do estatismo do equipamento, assim como sua respectiva implementação computacional;
- Avaliar, computacionalmente, as condições operativas do compensador estático, destacando o seu desempenho transitório durante o processo da energização;
- Avaliar, computacionalmente, o desempenho do equipamento quanto a sua dinâmica operativa diante de variações abruptas dos carregamentos impostos para uma rede elétrica adotada como caso teste;
- Investigar os impactos associados com as distorções harmônicas advindas da não-linearidade do núcleo magnético, sobretudo, no que tange a possibilidade de ressonâncias.

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 **COMPENSADOR ESTÁTICO A NÚCLEO SATURADO: FUNDAMENTOS E REGULAÇÃO DA TENSÃO**

Este capítulo tem por objetivo abordar, de forma geral, os princípios operativos e construtivos do compensador estático constituído pelo reator a núcleo saturado e os dois bancos de capacitores, paralelo e série, para o controle da tensão em sistemas elétricos. São também contemplados temas atrelados com o processo da compensação das tensões em sistemas elétricos.

Capítulo III **AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL DO DESEMPENHO DO COMPENSADOR A NÚCLEO SATURADO SOB CONDIÇÕES TRANSITÓRIAS DE ENERGIZAÇÃO**

Empregando um sistema teste representativo de uma área elétrica do complexo de uma concessionária de energia, esta unidade destina-se a avaliar, computacionalmente, a resposta do compensador estático durante condições transitórias quando dos processos de inserção do equipamento em operação.

Capítulo IV ANÁLISE COMPUTACIONAL DO DESEMPENHO DO COMPENSADOR A NÚCLEO SATURADO SOB CONDIÇÕES DINÂMICAS

Esta seção destina-se a realização, para o mesmo sistema teste do capítulo anterior, de estudos computacionais com vistas a destacar a operação do compensador e sistema, diante de alterações súbitas da carga. Complementarmente, serão também contempladas questões vinculadas com as distorções harmônicas presentes quando da estabilização do processo da compensação.

Capítulo V CONCLUSÕES GERAIS

Este capítulo destina-se a sintetizar as análises e discussões sobre os principais resultados e constatações feitas durante o desenvolvimento desta dissertação.

CAPÍTULO II

COMPENSADOR ESTÁTICO A NÚCLEO SATURADO: FUNDAMENTOS E REGULAÇÃO DA TENSÃO

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Nas últimas décadas houve uma intensa sofisticação mundial dos equipamentos elétricos e dos processos produtivos industriais em geral. Estes equipamentos mais sofisticados se tornaram mais eficientes e precisos quanto a sua aplicação nos processos produtivos, porém, extremamente sensíveis quanto à qualidade da energia necessária para o perfeito funcionamento dos mesmos. Diante disso, tem se tornado cada vez maior a preocupação com a qualidade da energia elétrica oferecida nos sistemas elétricos.

Dentre as várias questões relacionadas com os indicadores de qualidade da energia, pode-se destacar o controle e manutenção dos níveis das tensões nos sistemas elétricos de potência. Assim, para fazer frente a estas exigências foram criados no país alguns órgãos no setor elétrico com a finalidade de estabelecer normas, diretrizes e limites aos quais os fornecedores de energia elétrica devem obedecer, sobretudo para garantir o fornecimento de um produto, qual seja a energia elétrica, com o mínimo de qualidade aos seus consumidores. 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 subsequentes impactos sobre as redes elétricas. Fatos como esses têm 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, podendo-se destacar entre estes o controle do fluxo da potência reativa.

Em linhas gerais, as técnicas de compensação reativa e consequente controle da tensão dos sistemas elétricos de potência são explanados neste capítulo, destacando-se, de modo pontual, os conceitos sobre os compensadores estáticos 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.

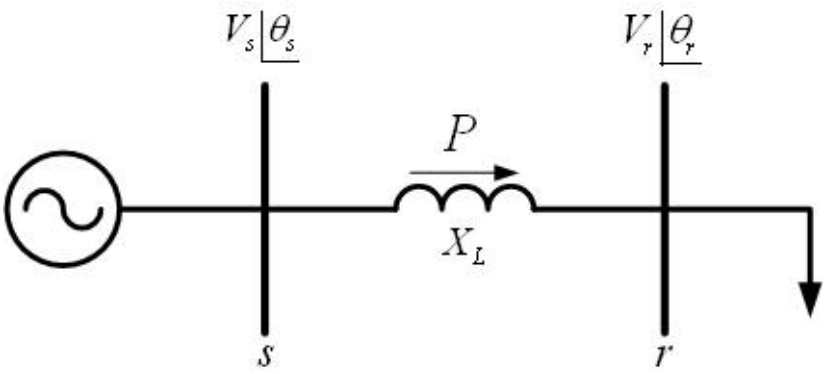


Figura 2.1 – Representação de 2 (duas) barras interligadas por uma linha de transmissão.

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).

$$P = \frac{V_s V_r}{X_L} sen\, \delta_{sr} \tag{2.1}$$

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 – Reatância 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.

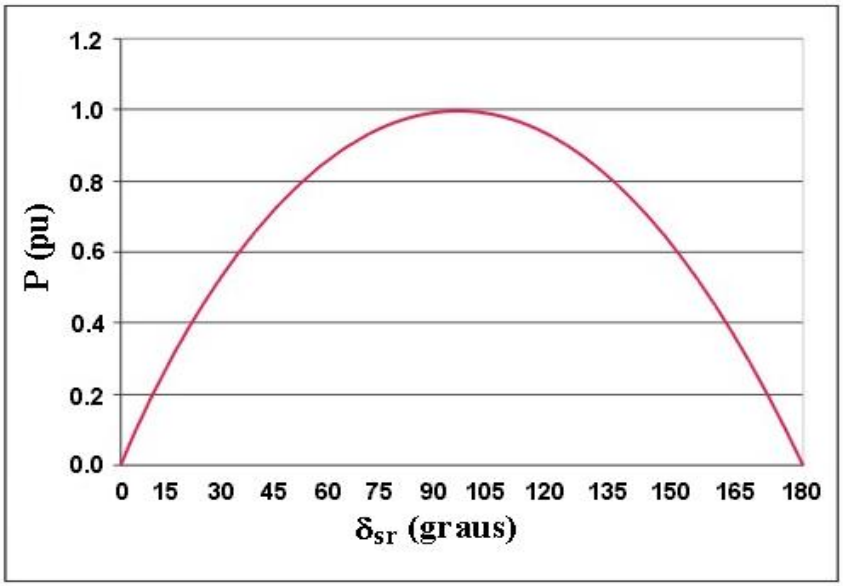


Figura 2.2 – Característica da potência transferida da barra "s" para a barra "r" em função do ângulo de carga &r (sem compensação).

Da Figura 2.2 observa-se que a máxima potência está associada ao ângulo de carga de 90º, sendo que 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 consequente diminuição da margem de reserva de geração;
- 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

Conforme visto na seção 2.2, de acordo com a equação (2.1), o fluxo de potência disponibilizado através de uma linha de transmissão é função dos seguintes parâmetros:

- Impedância equivalente;
- Magnitude das tensões nos terminais da linha de transmissão;
- Ângulo de fase entre as tensões nos terminais da LT.

Assim, para se efetuar o controle do fluxo de potência em uma linha de transmissão, também podem ser empregados dispositivos que utilizam a tecnologia de compensação reativa, conhecidos pelos profissionais do setor elétrico como compensadores estáticos, sendo que os mesmos atuam no sentido de alterar os parâmetros supracitados, de acordo com uma necessidade predeterminada. Dentro dos princípios básicos que norteiam tais dispositivos, esses podem ser agrupados em 3 (três) categorias, de acordo com as suas finalidades e o tipo de conexão ao sistema. São elas:

- Equipamentos conectados em paralelo para compensação reativa;
- Equipamentos conectados em série para compensação reativa;
- Equipamentos defasadores.

Além disso, o universo dos compensadores engloba tecnologias diversas que proporcionam a ação final desejada. Diante desse quadro, reconhece-se dentre outras filosofias, o conjunto de dispositivos dinâmicos, cuja dinamicidade de operação pode ser justificada pela presença de um controle eletrônico ou pelo princípio de operação intrínseco do equipamento, 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.

Dentre os compensadores citados, aqueles fundamentados no princípio da saturação magnética correspondem aos dispositivos focados nesta dissertação e, por tal motivo, serão detalhados nas análises subsequentes.

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, cujo desempenho técnico também seja adequado. Nesse aspecto, conforme já mencionado anteriormente, surge a idéia do emprego de uma tecnologia fundamentada tão apenas em princípios eletromagnéticos, similarmente aos transformadores.

Como já apontado anteriormente, 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, o que possibilita assim uma compensação reativa tanto nos instantes de elevação quanto naqueles de redução nas tensões do sistema ao qual o equipamento encontra-se conectado. Além desses, o equipamento ainda pode ser complementado com outro capacitor, sendo este ligado em série com o reator, para atuar no estatismo do núcleo magnético, ajustando sua curva de saturação ou curva de trabalho. 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, sendo tais alterações justificadas pela não linearidade da curva B x H do material constituinte do núcleo magnético do reator. Quando da ocorrência de reduções na tensão, 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 a Reator 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 frequência).

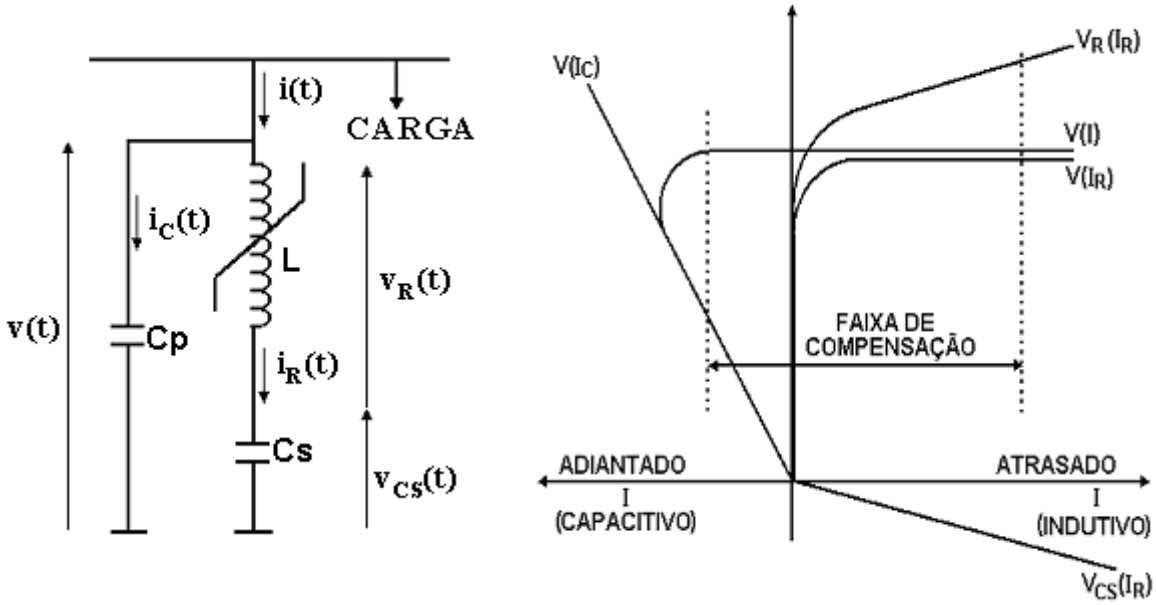


Figura 2.3 – Diagrama esquemático e características V x I de um compensador estático a núcleo saturado.

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;

Cp – Capacitância do capacitor em paralelo;

Cs – Capacitância do capacitor série.

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

Um reator saturado, embora seja 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, por se tratar de uma carga com característica não-linear. Apesar dos harmônicos terem se tornado um problema corriqueiro nos sistemas de potência e instalações elétricas no mundo; neste caso em específico, o mesmo deve receber a máxima atenção possível, principalmente devido à presença dos capacitores paralelo e série que compõem o conjunto compensador, a fim de se evitar consequências mais graves ao equipamento e ao sistema elétrico. Sendo assim, 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).

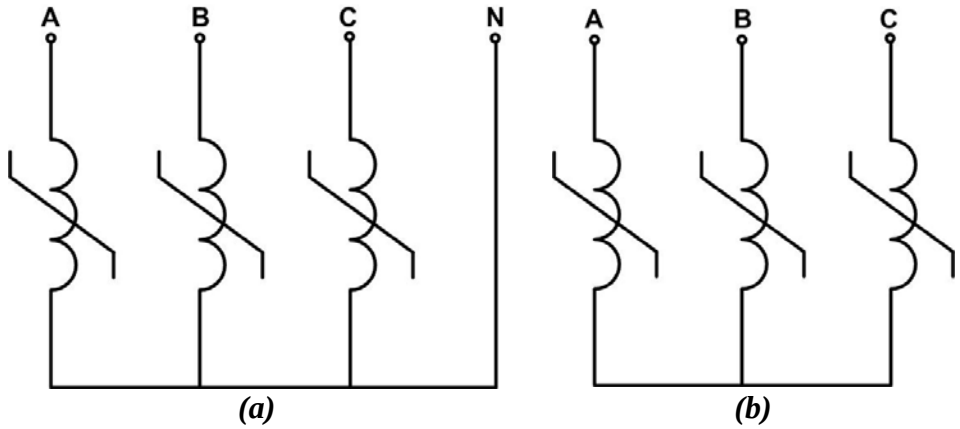


Figura 2.4 – Reator trifásico:
(a) Ponto comum-estrela conectado ao neutro;
(b) Ponto comum-estrela não conectado ao neutro.

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 180º / 3 = 60º, o que ocorre 2 (duas) vezes em cada ciclo da frequência de

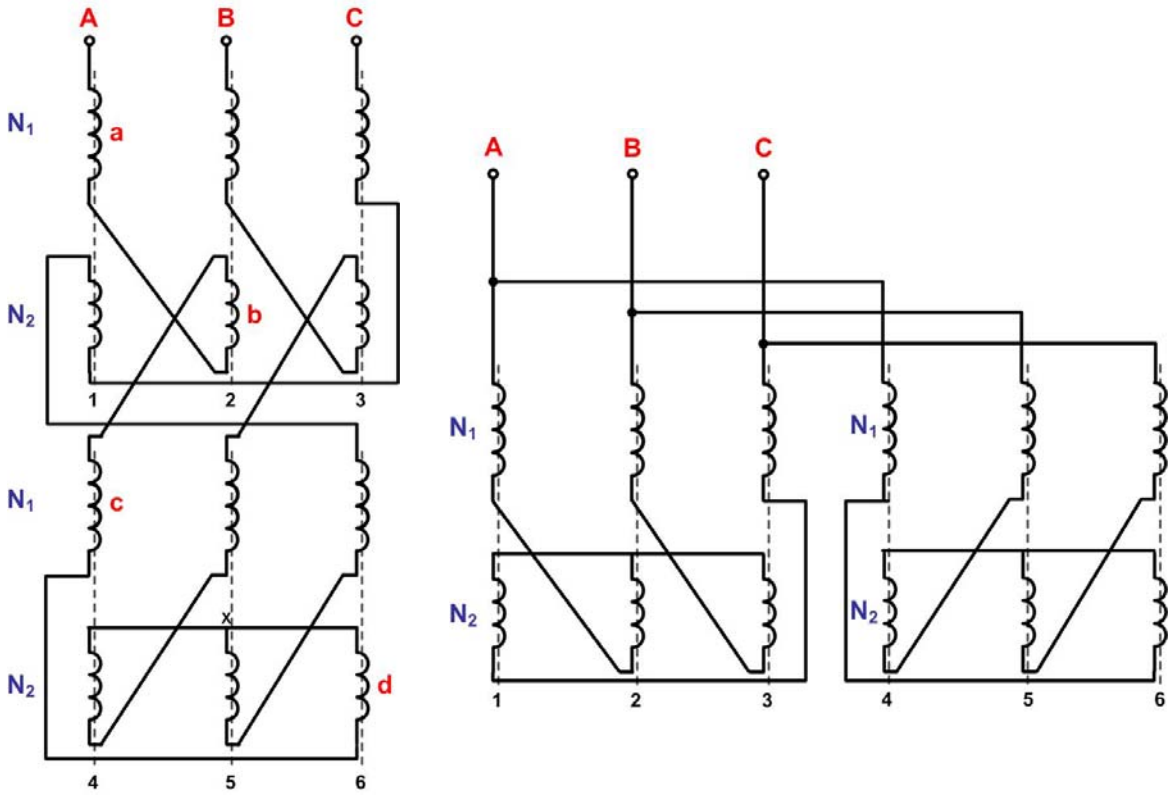
linha, mas são saturadas no restante do ciclo. O grupo assim formado provocará correntes polifásicas com harmônicas da ordem $n = (6K \pm 1) = 5, 7, 11, 13, \ldots$, sendo K um número inteiro.

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, consequentemente, a *fem* em cada enrolamento, para todas as unidades, serão portadoras de componentes harmônicas de ordem $(6K \pm 1) = 5, 7, 11, 13, 17, \ldots$. 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°.

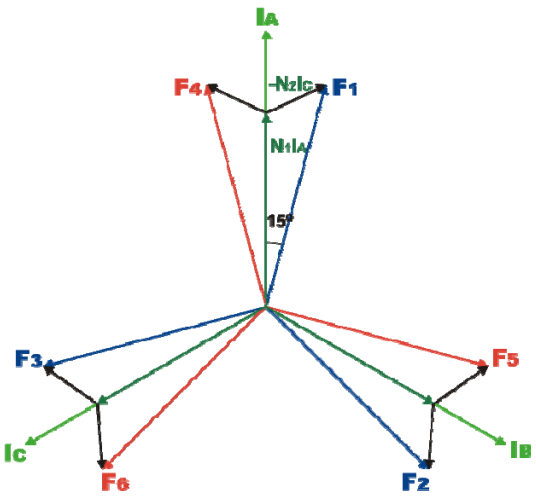


(a) *(b)*

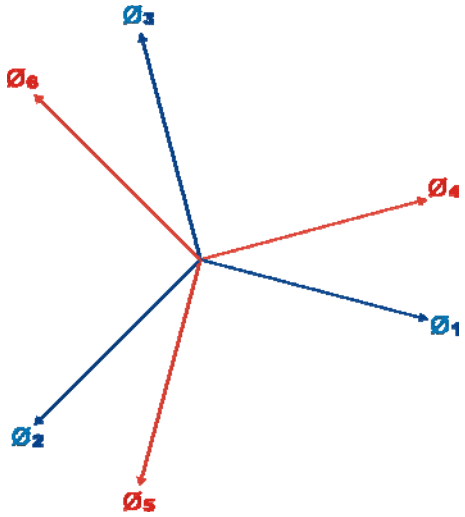
Figura 2.5 – Esquema de conexão de um reator de 6 (seis) unidades:
(a) Conexão série;

(b) Conexão paralela.

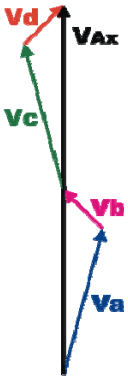
De modo a proporcionar a almejada defasagem de 30°, os enrolamentos são projetados de acordo com o diagrama fasorial da Figura 2.6 (a), ou seja, com uma razão de espiras $N_2/N_1 = 0{,}366$, assegurando assim uma família de 6 (seis) ondas das *fmm's* (forças magnetomotrizes) deslocadas de 30° uma da 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 $N_1.I_A$, em fase com a corrente na fase **A,** com $N_2.I_C$, 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).



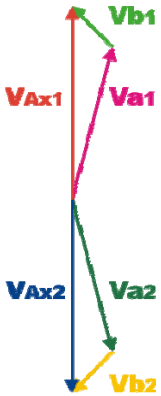
(a)



(b)



Fundamental



Fundamental

5º Harmônico

5º Harmônico

7º Harmônico

7º Harmônico

(c) *(d)*

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* $\left(\text{da forma } N \, {d\varphi}/{dt}\right)$ 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 $V_a = N_1 \, {d\varphi_1}/{dt}$ está adiantada de $90°$ de Φ_1, por conseguinte, em fase com F_1 e atrasada $15°$ de I_A. O 5º e o 7º harmônico desta tensão estão atrasados de I_A por $15°$ x $5 = 75°$ e $15°$ x $7 = 105°$ de I_A, respectivamente. A componente fundamental da tensão $V_b = N_2 \, {d\varphi_2}/{dt}$ está em oposição de fase com F_2 e, por conseguinte, adiantada $45°$ de I_A e o 5º e o 7º harmônicos estão adiantados de $45°$ x $5 = 225°$ e $45°$ x $7 = 315°$ 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 de 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, assim como também, tecidos comentários sobre os fundamentos que regem a estrutura física e operacional dos compensadores a núcleo saturado.

Inicialmente foram apresentados os conceitos da operação dos sistemas elétricos de potência e a importância da utilização de estratégias para a compensação de reativos. Também foram evidenciadas as principais grandezas que determinam as características de operação dos sistemas elétricos, constatada a possibilidade do controle do fluxo de potência por meio da compensação reativa e, por fim, destacados os benefícios alcançados com essa medida.

Em seguida foram apresentados os princípios de operação dos compensadores no controle do fluxo de potência e, de modo especial, foi apresentado o compensador estático constituído por um reator a núcleo saturado (CERNS). Devido aos problemas conhecidos e associados com a geração de correntes harmônicas pelo reator saturado, foram apresentadas as possibilidades de arranjos dos enrolamentos para assegurar uma operação com a devida redução do conteúdo harmônico. Ficou, pois esclarecido os motivos pelos quais, comercialmente, são empregadas as configurações conhecidas por reatores de 6 (seis) unidades, qual seja, o *twin-tripler*. Esta estratégia para a composição da parte eletro-magnética apresenta uma boa combinação entre custos e redução de harmônicos para a corrente de linha do reator, a qual passa a produzir somente componentes de ordem $(12K \pm 1)$, isto é, mostrando um desempenho similar aos arranjos retificadores de 12 pulsos, tão conhecidos da eletrônica de potência.

CAPÍTULO III

AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL DO DESEMPENHO DO REATOR SATURADO SOB CONDIÇÕES TRANSITÓRIAS DE ENERGIZAÇÃO

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os processos de energização de capacitores, transformadores, entrada e saída de carga, e outros, como é sabidamente conhecido no cenário da engenharia elétrica, produzem fenômenos transitórios que podem, para muitas situações, gerar impactos de grande repercussão na operação das redes elétricas. À luz deste reconhecimento, surge o interesse, nesse trabalho, para os estudos de desempenho do compensador a núcleo saturado sob condições transitórias de energização.

Ainda, reconhecendo que o compensador estático a núcleo saturado, propriamente dito, é composto por três partes principais, quais sejam: o reator saturado, o banco de capacitores em paralelo e o banco de capacitores em série; torna-se essencial o conhecimento do processo individual e coletivo do equipamento quando de sua inserção na rede.

Para que seja realizada a avaliação de desempenho do compensador a núcleo saturado, faz-se necessário realizar a modelagem do mesmo em um programa que realiza simulações no domínio do tempo. A modelagem isolada do reator saturado, já realizada e validada em trabalhos anteriores, não se constitui em tema que exige maiores detalhamentos nesta dissertação [25], todavia, a implementação computacional do arranjo completo não foi contemplada neste e em outro documento encontrado na fase do levantamento do estado da arte sobre o tema. Além deste aspecto, a referência supra mencionada, em nenhum momento, explorou os fenômenos transitórios atrelados com as energizações do reator saturado.

Objetivando atender às lacunas acima caracterizadas, o presente capítulo tem por objetivos:

- Caracterizar o sistema utilizado para fins dos estudos transitórios focados nesta etapa dos trabalhos;
- Apresentar e discutir resultados de desempenho do processo de energização do reator saturado de forma isolada e, na sequência, com suas unidades capacitivas.

3.2 SIMULADOR COMPUTACIONAL

Inicialmente cabe ressaltar que a utilização do simulador computacional para fins de avaliações de desempenho de um reator saturado, através de técnicas de modelagem no domínio do tempo, consiste em uma estratégia de modelagem já contemplada em trabalhos anteriores ao presente, como mostrado em [11] e [12]. Estes documentos mostraram que este aplicativo oferece uma alternativa bastante apropriada aos fins deste trabalho e evidencia propriedades

operativas bastante esclarecedores sobre a funcionabilidade do reator sob condições de regime transitório e permanente, ainda durante sua fase de planejamento. Logo, tal aplicativo se mostra como uma excelente opção para a realização dos estudos almejados por este trabalho, tendo em vista que o equipamento sob estudo, qual seja o CERNS, apresenta em sua constituição básica bancos de capacitores (série e paralelo) e um reator saturado, sendo que o modelo deste último, como ressaltado, já encontra-se devidamente validado.

Não obstante o fato que a base computacional empregada, seus recursos disponíveis pela biblioteca e os procedimentos para a modelagem tenham sido exaustivamente explorados nos documentos anteriormente referidos, por motivos didáticos, apresenta-se, na seqüência, uma síntese dos principais pontos atrelados com o programa em pauta.

O simulador computacional utilizado contém modelos de dispositivos eletrônicos, magnéticos ou dispositivos eletromagnéticos prontamente disponibilizados em sua biblioteca para utilização pelos usuários. Estes recursos oferecidos pelo aplicativo computacional utilizado permitem representar componentes e dispositivos em termos de suas equações integrais e diferenciais ou equações algébricas lineares ou não lineares. Quando se trata de sistemas analógicos contínuos, o simulador repetidamente soluciona um conjunto simultâneo de equações diferenciais não lineares.

Dentre os dispositivos disponibilizados pelo simulador, aqueles de maior interesse à representação de componentes eletromagnéticos, como reatores e transformadores, incorporam dois tipos de circuitos: elétrico e magnético.

De um modo genérico a representação de dispositivos eletromagnéticos requer recursos vinculados com as seguintes partes fundamentais:

- Enrolamentos – associados com as grandezas elétricas;
- Núcleos magnéticos – associados com as grandezas magnéticas.

A fusão destas unidades permite concluir que, uma vez aplicada uma tensão nos terminais de numa bobina construída sobre um núcleo magnético, ela é percorrida por uma corrente elétrica e, como consequência, surge uma força magnetomotriz (f.m.m.) no núcleo magnético e, concomitantemente, ocorre um fluxo magnético e uma força eletromotriz (f.e.m.) induzida.

A estrutura do simulador computacional se baseia numa variedade de blocos de dispositivos (modelos representados por *templates*) incorporados e disponibilizados em sua biblioteca, capazes de simular os fenômenos elétricos e magnéticos de modo simultâneo.

Os principais *templates* associados com dispositivos eletromagnéticos são relacionados na Tabela 3.1.

Tabela 3-1: Templates associados com arranjos magnéticos disponíveis no aplicativo computacional

Dispositivo	Nome do Template
Núcleo magnético linear	core.sin
Núcleo magnético não linear	corenl.sin/jamodel.sin
Indutor com acoplamento mútuo	ml.sin
Enrolamento	wind.sin

A título de exemplificação, a Figura 3.1 indica a lógica seguida para se modelar o reator *twin-tripler* com núcleo isolado.

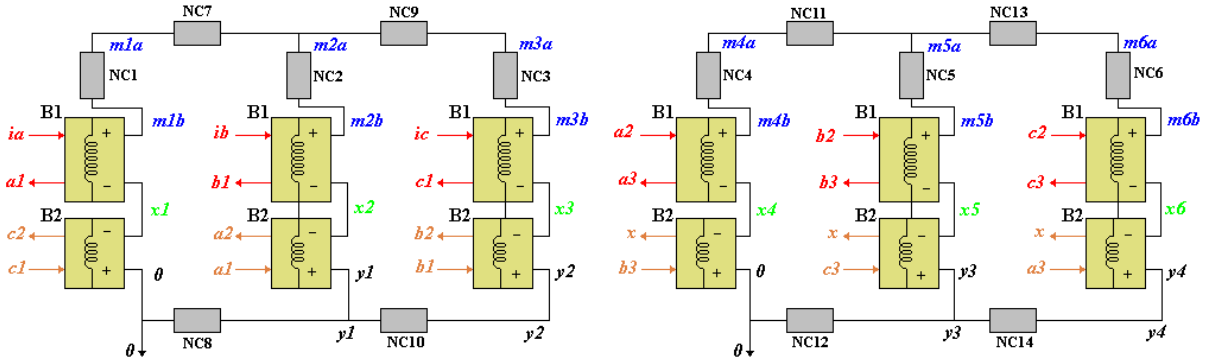


Figura 3.1- Diagrama de bloco do reator twin-tripler à núcleo saturado isolado – modelo utilizado no simulador computacional.

Na Figura 3.1:

- NC1 até NC14 – Núcleos magnéticos não lineares, modelados através do template "Nonlinear Core (corenl)";
- m1a até m6a, m1b até m6b, x1 até x6, y1 até y4 e 0 – São pontos de conexão das partes do núcleo que representam o espaço do núcleo, com enrolamento e sem enrolamento;
- B1 – Bobinas superiores, possuindo número de espiras N, modeladas via template "Winding (wind)";
- B2 – Bobinas inferiores, com 0,366N espiras, representadas através do template "Winding (wind)";
- ia e a1, ib e b1, ic e c1, c2 e c1, a2 e a1, b2 e b1, a2 e a3, b2 e b3, c2 e c3, x e b3, x e c3, x e a3 – São pólos elétricos que representam a alimentação das bobinas do reator em uma ligação zig-zag, com um defasamento angular de 30º entre cada conjunto, sendo ia, ib e ic modelados através do template "sine". Os demais pinos denotam interligações entre bobinas.

Uma vez apresentados os pontos fundamentais associados com o simulador selecionado para os estudos, procede-se, na sequência, à caracterização do sistema elétrico utilizado para os estudos e aos estudos de desempenho do compensador estático a reator a núcleo saturado propriamente dito.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA UTILIZADO PARA OS ESTUDOS COMPUTACIONAIS

O arranjo selecionado para fins dos estudos computacionais considerados nesta dissertação primou pela utilização de um sistema elétrico real do Estado de Mato Grosso. Tal opção se recaiu, fundamentalmente, no fato que o complexo a ser apresentado, exige para a sua operação, a instalação de um compensador de reativos e, por tal motivo, admitiu-se que investigações, no âmbito do mesmo, pudessem revelar informações práticas sobre necessidades reais do sistema elétrico brasileiro.

A linha de transmissão de 230 kV que alimenta a região norte do Estado de Mato Grosso está interligada ao Sistema Nacional através da Subestação de Coxipó, situada na cidade de Cuiabá – MT. Esta subestação, com barra dupla em 230 e 138 kV e um barramento simples em 13,8kV, possui uma capacidade de transformação de 3 x 100 MVA + 1 x 70 MVA. Desta originam-se alimentadores que suprem a rede da CEMAT através de 04 linhas em 138 kV. Na região de Nobres o complexo encontra-se interligado também com a Usina de MANSO, com potência instalada de 220 MW, constituída por 4 geradores de 55 MW cada.

No diagrama unifilar da Figura 3.2, que mostra o sistema implementado no simulador computacional para fins dos estudos aqui almejados, a geração de MANSO foi representada, simplificadamente, por uma fonte, que representa a potência total produzida por esta usina, e por um único transformador elevador de 13,8/230 kV de 240 MVA de potência. A linha de transmissão entre a Usina de Manso e o ponto de conexão na região de Nobres é de aproximadamente 62 km.

Na sua trajetória, o sistema encontra a primeira localidade atendida, que corresponde ao município de **NOVA MUTUM.** Isto ocorre através de uma subestação do tipo subtransmissão, constituída por um barramento simples em 230 e 69 kV, e capacidade de transformação de 1 x 30 MVA, com modo de operação semi-assistida.

No município de **LUCAS DO RIO VERDE** encontra-se outra subestação de subtransmissão e distribuição, também com barramento simples em 230 e 13,8 kV e capacidade de transformação de 1 x 30 MVA, com modo de operação semi-assistida.

No município de **SORRISO,** também se tem outra subestação de subtransmissão, com barramento simples em 230 e 69 kV e capacidade de transformação de 1 x 30 MVA, com modo de operação semi-assistida.

Ao final de sua trajetória, a linha de transmissão encontra o município de **SINOP**, com uma subestação de transmissão constituída por barras simples em 230 e 138 kV, com uma capacidade de transformação de 1 x 100 MVA, com modo de operação semi-assistida. Neste ponto, o fornecimento para a CEMAT ocorre através de uma linha em 138 kV. Esta subestação possui 2 conjuntos de compensadores lineares de 20 MVAr e 1 banco de capacitores de 30 MVAr, porém ambos desativados. Isso justifica a não inclusão destes no sistema sob estudo.

Conforme já evidenciado, o sistema é do tipo radial, constituído por uma linha de transmissão que interliga a Subestação de Coxipó à Subestação de Sinop, com características típicas apropriadas para o emprego de compensadores de reativos. Este possui uma extensão aproximada de 451 km.

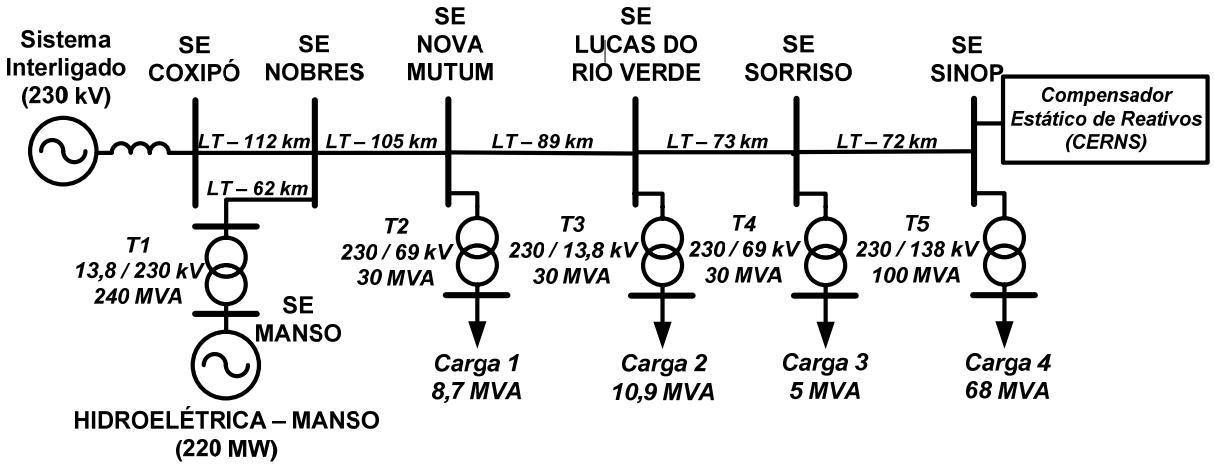


Figura 3.2- Diagrama unifilar do sistema elétrico radial escolhido para a instalação do CERNS.

Em consonância com as informações da topologia do sistema elétrico escolhido para os estudos e destacados no diagrama unifilar da Figura 3.2, tem-se que os principais componentes existentes e inseridos no aplicativo computacional encontram-se referenciados nas Tabelas 3.2 a 3.7. Nestas encontram-se expostas às principais características elétricas da Subestação do Coxipó, da Geração de Manso, os parâmetros elétricos e comprimento das linhas de transmissão de 230 kV que interligam as subestações, as potências e características de transformadores e cargas, e, finalmente, os parâmetros elétricos do compensador estático a núcleo saturado (CERNS). Vale destacar que os dados especificados, relativos ao sistema elétrico, foram fornecidos pela Eletronorte, para um projeto de P&D ELETRONORTE/UFMT, que contou também com a participação de membros da UFU. No que se refere aos parâmetros elétricos e construtivos do CERNS, estes foram obtidos a partir de um aplicativo computacional, desenvolvido em pesquisas anteriormente realizadas por este grupo de pesquisa [29], destinado ao dimensionamento do compensador estático a núcleo saturado e do banco de capacitores paralelo que

compõem o compensador. No que tange ao valor do capacitor série, este foi obtido através de uma sistemática clássica que utilizou cálculos de circuitos elétricos para uma compensação de 10% da reatância saturada do reator.

Tabela 3-2: Subestação de Coxipó

Principais características elétricas	
Potência de Curto-Circuito Trifásica (MVA)	4711
Tensão Nominal (kV)	230
Impedância de Curto-Circuito (Ω)	11,23
Frequência [Hz]	60

Tabela 3-3: Geração Manso

Principais características elétricas	
Potência de Curto-Circuito Trifásica (MVA)	4000
Tensão Nominal (kV)	13,8
Frequência [Hz]	60

Tabela 3-4: Linha de transmissão de 230 kV – Coxipó - Sinop

Linhas de Transmissão	Comprimento (km)	Resistência (Ω/km)	Reatância Indutiva (Ω/km)	Reatância Capacitiva (Ω.km)
Coxipó - Nobres	112	0,0819	0,49574	298382.7654
Manso - Nobres	62	0,0819	0,49574	298382.7654
Nobres – N. Mutum	105	0,0819	0,49574	298382.7654
N. Mutum – L. Rio Verde	89	0,0819	0,49574	298382.7654
L. Rio Verde - Sorriso	73	0,0819	0,49574	298382.7654
Sorriso - Sinop	72	0,0819	0,49574	298382.7654

Tabela 3-5: Transformadores

Transformadores	Parâmetros						
	VP (kV)	VS (kV)	R (%)	X (%)	C1 (pF)	C2 (pF)	C12 (pF)
UHE Manso 1 Transformador 240 MVA 230/13,8 kV	13,8	230	1	8	1000	1000	1000
SE Nova Mutum 1 Transformador 30 MVA 230/69 kV	230	69	1	3,5	1000	1000	1000
SE Lucas Rio Verde 1 Transformador 30 MVA 230/13,8 kV	230	13,8	1	3,5	1000	1000	1000
SE Sorriso 1 Transformador 30 MVA 230/69 kV	230	69	1	3,5	1000	1000	1000
SE Sinop 1 Transformador 100 MVA 230/138 kV	230	138	1	3,5	1000	1000	1000

Onde:

- VP - Tensão primária (kV);
- VS - Tensão secundária (kV);
- R - Resistência (%);
- X - Reatância (%);
- C1 - Capacitância de fuga do primário (pF);
- C2 - Capacitância de fuga do secundário (pF);
- C12 - Capacitância de fuga entre o primário e o secundário (pF).

Tabela 3-6: Cargas

Consumidores	Potência Carga (MVA)	Tensão Nominal (kV)	Tipo de Ligação
Nova Mutum	8,0 MW + j 3,4 MVAr	69	Y
Lucas do Rio Verde	10,0 MW + j 4,3 MVAr	13,8	Y
Sorriso	4,6 MW + j 1,9 MVAr	69	Y
Sinop (Carga Pesada)	62,7 MW + j 26,5 MVAr	138	Y
Sinop (Carga Leve)	18,42 MW+ j 7,82 MVAr	138	Y

Tabela 3-7: CERNS

DADOS DO REATOR	
Item	**Características e dados nominais**
Potência [MVAr]	25
Classe de Tensão [kV]	230
Frequência [Hz]	60
Fases	3
Número de espiras superior	536
Número de espiras inferior	196
Indução de saturação [T]	1,62
Área do núcleo [cm^2]	1811,59
DADOS DO BANCO DE CAPACITORES (PARALELO)	
Item	**Características e dados nominais**
Potência [MVAr]	15
Classe de Tensão [kV]	230
Frequência [Hz]	60
Fases	3
Tipo de conexão	Estrela aterrada
DADOS DO BANCO DE CAPACITORES (SÉRIE)	
Item	**Características e dados nominais**
Capacitância por fase [μF]	109,5
Reatância Capacitiva por fase [Ω]	24,2

3.4 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO SOB CONDIÇÕES TRANSITÓRIAS DE ENERGIZAÇÃO

Para se fazer a avaliação do CERNS sob condições transitórias de operação é importante identificar o comportamento físico das partes que compõem o dispositivo global. Neste sentido, inicialmente, procede-se apenas a energização do reator saturado e, na sequência, da unidade magnética somada com os bancos de capacitores, paralelo e série.

Adicionalmente à investigação subdividida nos termos acima propostos, considera-se ainda relevante o conhecimento dos impactos associados com as cargas supridas pelo sistema. Por tal motivo, as investigações ainda contemplarão condições operativas diversas para os suprimentos da cidade de Sinop.

3.4.1 Transitório de Energização do Reator Saturado isoladamente

Nesta condição foi realizada a energização da unidade magnética isoladamente. Para tanto, o reator saturado foi conectado ao barramento de 230 kV da cidade de Sinop-MT, conforme pode ser observado no diagrama unifilar do sistema analisado.

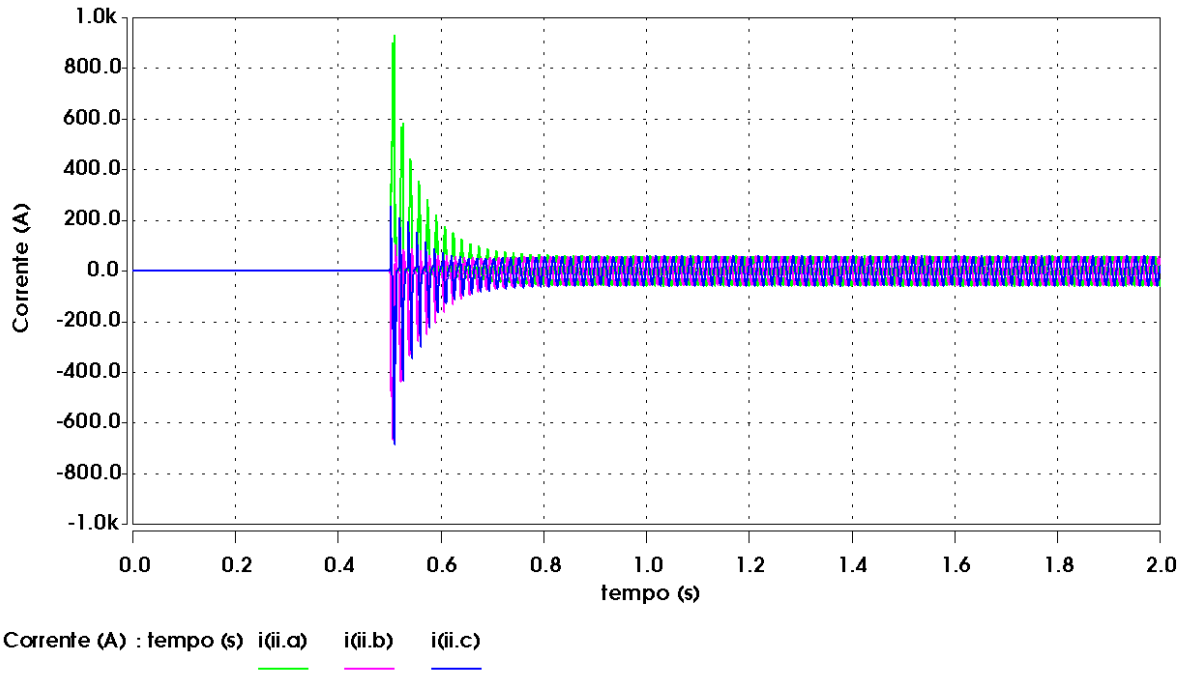
Os casos estudados foram:

a) Energização do sistema considerando uma carga leve para Sinop-MT, isto é, a cidade apresentando uma demanda de 18,4MW + j 7,8 MVAr. Para tal situação, em t=0,5 s é realizada a energização do reator saturado e o processo de avaliação se estende por um período total de 2 segundos;

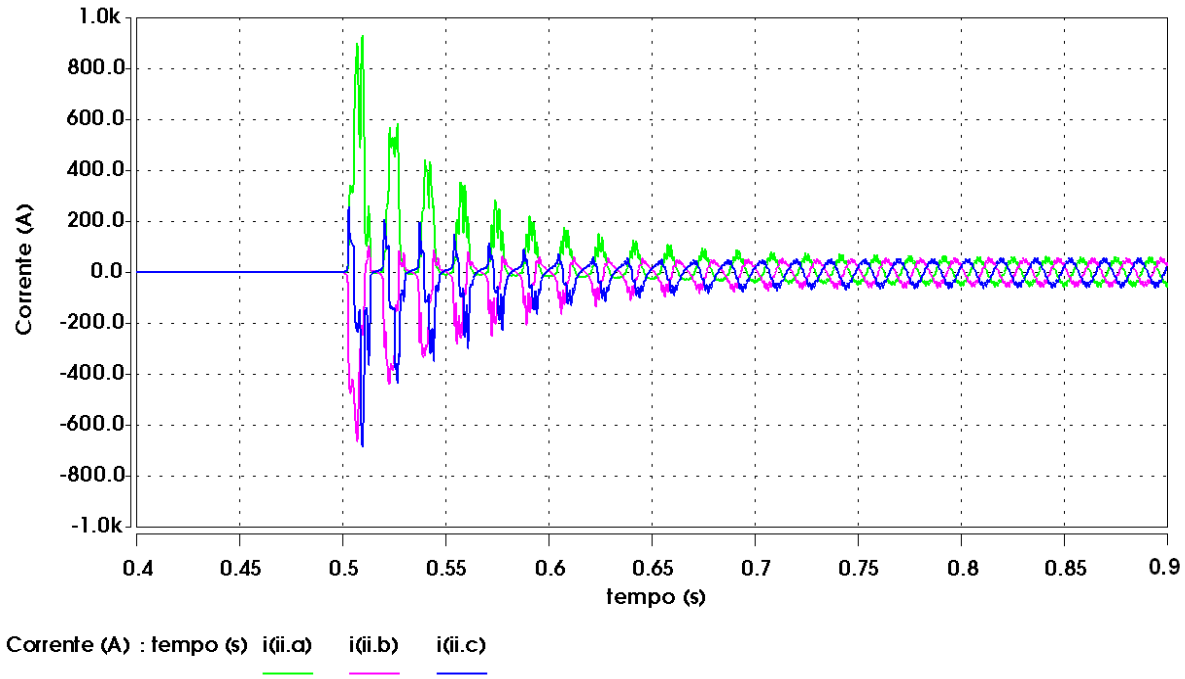
b) Posteriormente, repete-se a mesma simulação, no entanto, submetendo o sistema a uma condição de carga pesada para a cidade de Sinop-MT, a qual passa a apresentar uma demanda de 62,7 MW + j 26,5 MVAr. Para esta nova situação, o instante de entrada do reator saturado e o tempo total de simulação foram os mesmos.

(I) CONDIÇÃO: CARGA LEVE

A seguir, têm-se os resultados obtidos das formas de onda das correntes de linha e das tensões de fase, durante o processo de energização do reator saturado, destacando, sobretudo, o transitório de energização da corrente absorvida pelo equipamento e a tensão em seus terminais. O desempenho das formas de onda para as correntes pode ser visualizado nas Figuras 3.3 enquanto que as tensões podem ser observadas nas Figuras 3.4.



(a) Formas de onda das correntes ao longo do intervalo total de estudo.



(b) Zoom das formas de onda.

Figura 3.3 – Corrente transitória de energização do reator saturado isoladamente.

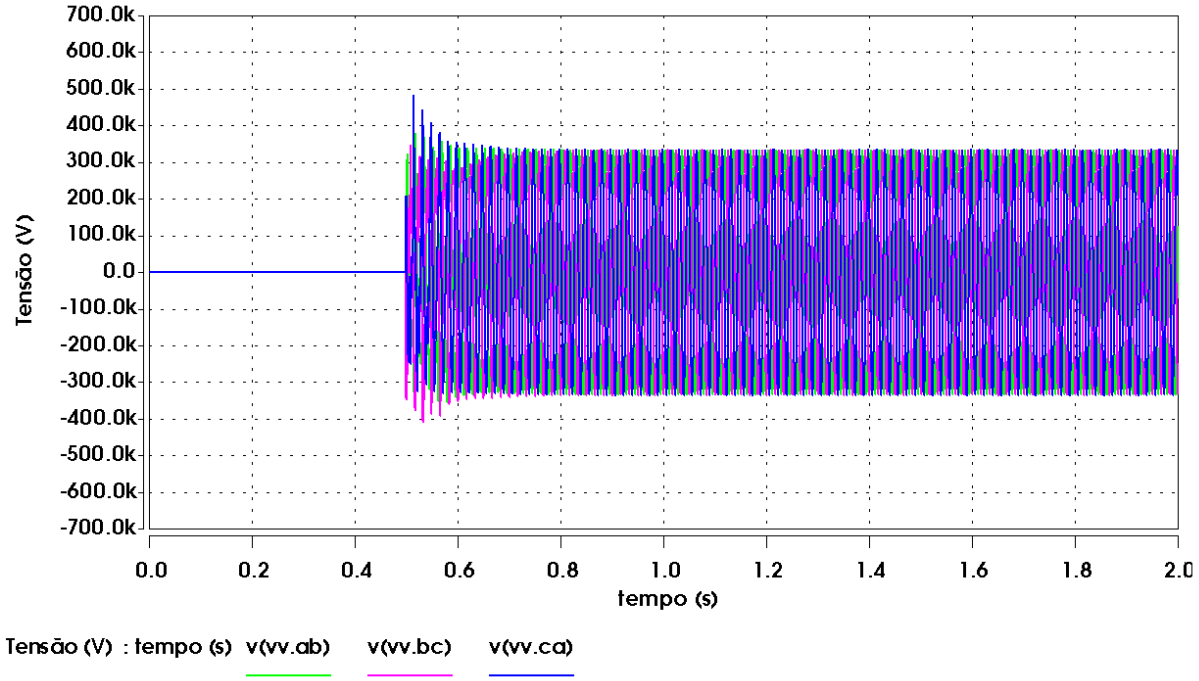
Os picos de corrente das fases A, B e C, respectivamente em relação ao pico da corrente nominal do reator são analisados na sequência. Vale ressaltar que esta referência de corrente será utilizada para este e todos os demais casos a serem considerados nesta dissertação. Tal procedimento permitirá que os porcentuais de acréscimos dos picos transitórios estejam sempre referidos a uma mesma base, fato este que conduzirá a uma pronta análise comparativa entre os distintos resultados a serem obtidos. Para a presente situação foram encontrados os seguintes resultados:

- **Fase A**: o valor de pico encontrado foi de 929,8 A, o qual, comparativamente ao valor de pico da corrente nominal, de 88,8 A (valor este associado com a potência nominal do reator, de 25 MVAr, correspondente pois a um valor eficaz de corrente de 62,8

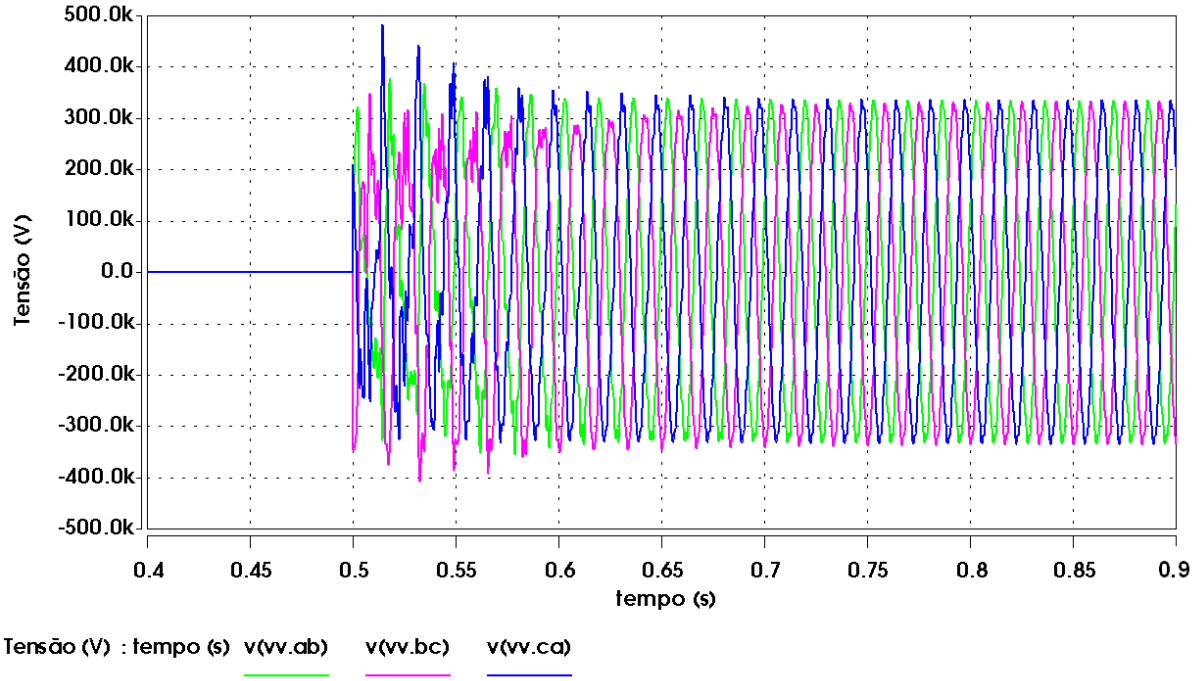
A), evidencia que no instante da energização a mesma atinge cerca de 10,5 vezes o valor nominal;

- **Fase B**: para esta fase o pico registrado durante o transitório foi de -665,4 A, o qual, comparativamente ao pico da corrente nominal, indica que o transitório ocasionou um valor 7,5 vezes maior;
- **Fase C**: a terceira fase indica um pico de -685,2 A. Mais uma vez, comparando-o com o pico da corrente nominal fica evidenciado que o transitório conduziu a 7,7 vezes o pico da corrente nominal.

Na sequência são indicadas as formas de onda das tensões nos terminais do reator saturado, isto é, para o barramento de 230 kV. Obedecendo a mesma estratégia anterior, são indicados os resultados ao longo do intervalo total de estudos e também detalhes em torno do momento da energização do equipamento.



(a) Formas de onda das tensões ao longo do intervalo total de estudo.



(b) Zoom das formas de onda.

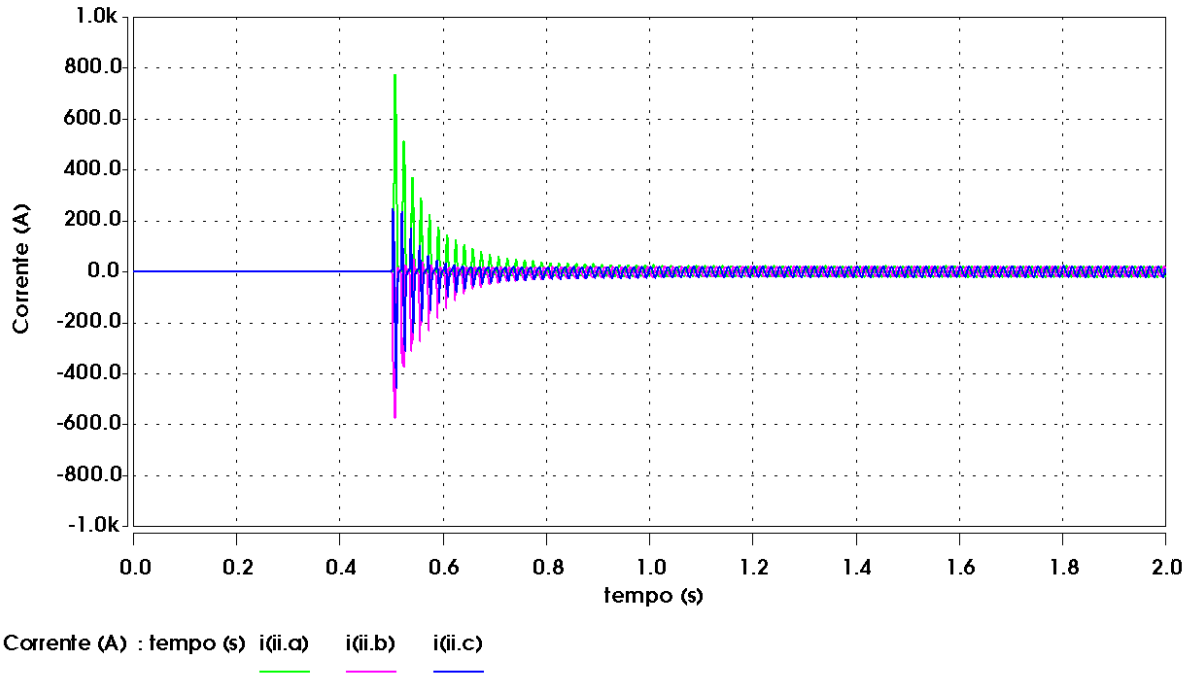
Figura 3.4 – Tensão transitória de energização do reator saturado isoladamente.

Durante a energização do equipamento, pode-se observar por meio das Figuras 3.4, os impactos que o processo causa sobre o barramento de suprimento. Os valores de pico das tensões podem ser visualizados e indicam um comportamento normal dentro do contexto dos fenômenos aqui tratados. Os valores de pico encontrados para as fases AB, BC e CA, foram, respectivamente, de 113%, 122% e 144% dos valores de pico em regime permanente. Vale observar que o valor de referência empregado para os cálculos das elevações de tensão foi o correspondente nível de regime permanente atingido, e não, como feito para a corrente, o respectivo valor nominal. No que tange à frequência de oscilação encontrada, esta, como seria esperado, está associadas com as respostas dos vários circuitos L e C presentes no arranjo.

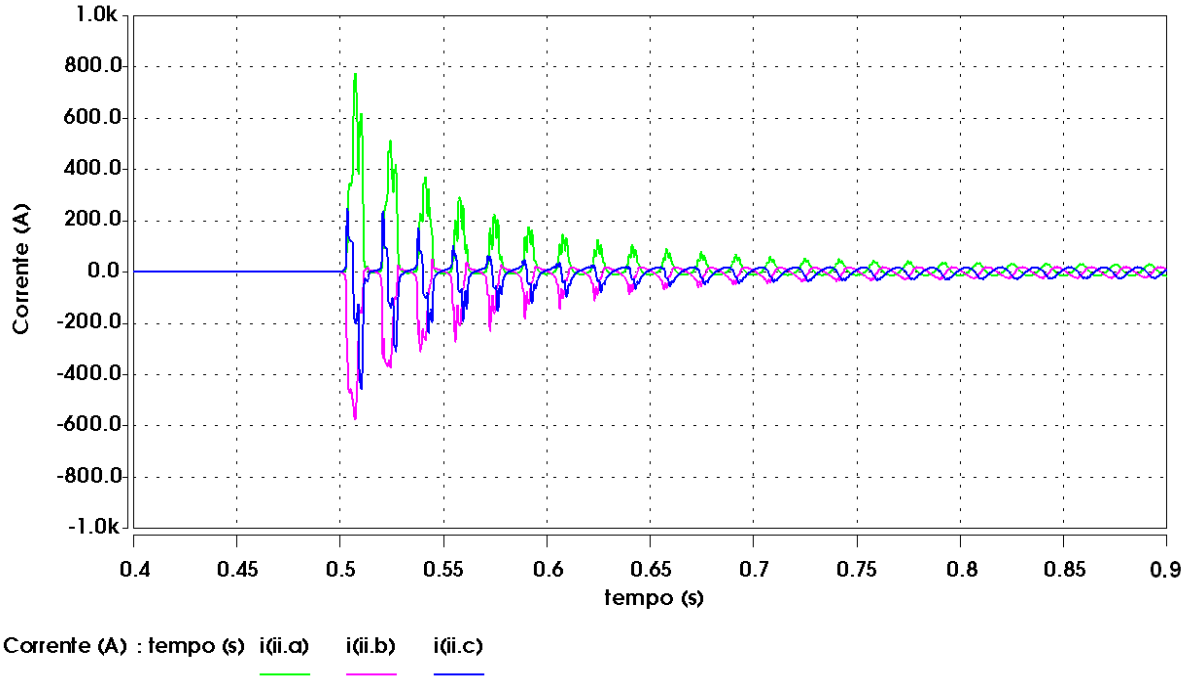
(II) CONDIÇÃO: CARGA PESADA

A seguir têm-se os correspondentes resultados obtidos para as formas de onda das correntes de linha e para as tensões nos terminais do reator durante o processo de energização, todavia, para outro carregamento imposto à cidade de SINOP. A nova carga absorvida, que era de 18,4 MW + j 7,8 MVAr, passou para 62,7 MW + j 26,5 MVAr.

Os desempenhos para as correntes transitórias podem ser visualizados através das Figuras 3.5, enquanto que as respectivas tensões são indicadas nas Figuras 3.6.



(a) Formas de onda das correntes ao longo do intervalo total de estudo.



(b) Zoom das formas de onda.

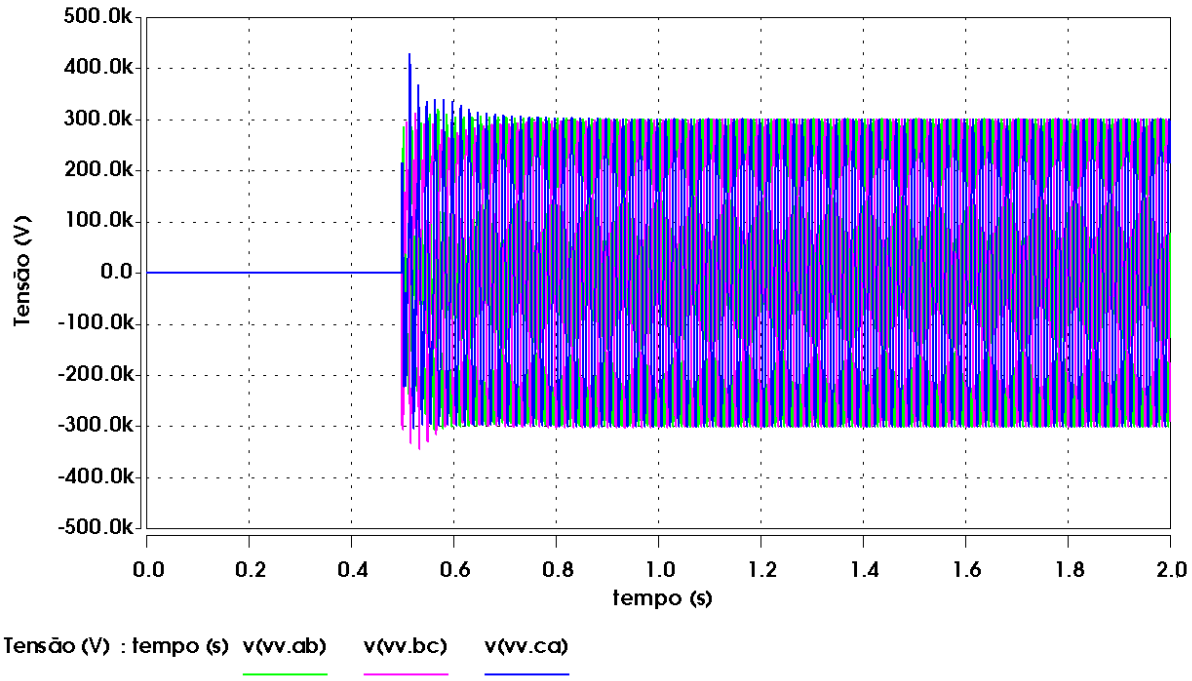
Figura 3.5 – Corrente transitória de energização do reator saturado isoladamente

Para a situação associadas com o carregamento pesado constata-se que os valores máximos alcançados pelas correntes das fases A, B e C, respectivamente em relação ao pico da corrente nominal, foram:

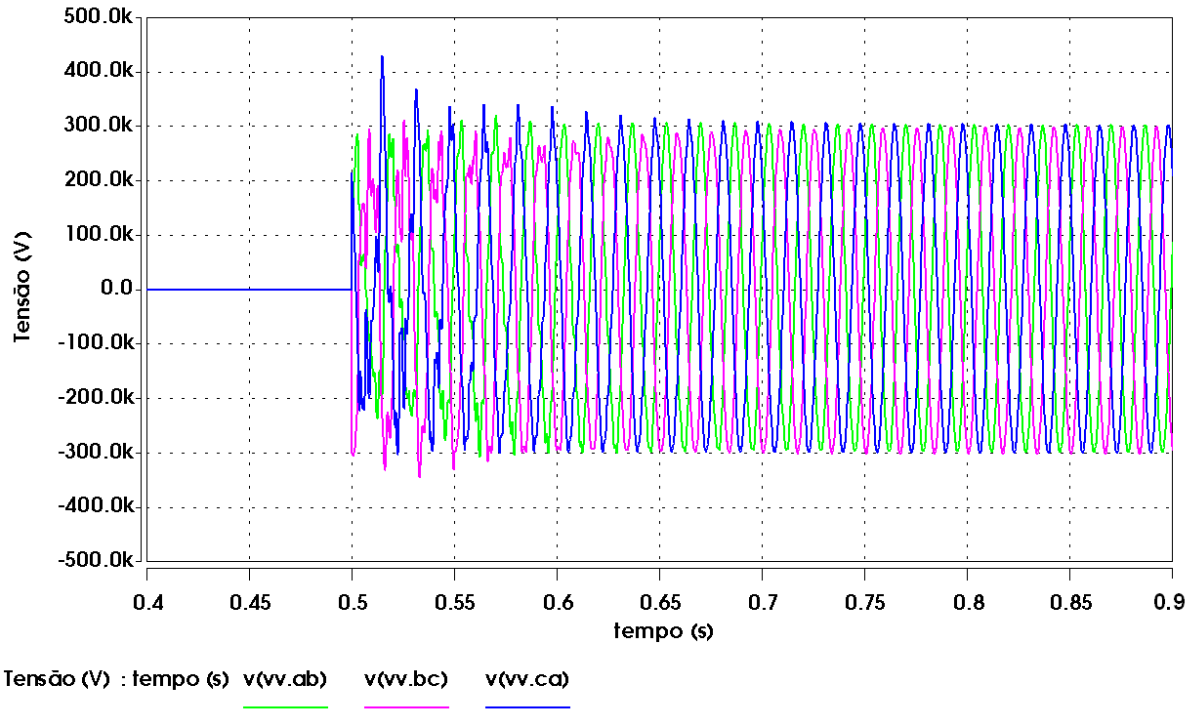
- **Fase A**: o maior valor de pico encontrado para esta fase foi de 775,7 A, sendo que este, comparativamente ao valor de pico da corrente nominal do reator saturado, de 88,8 A, demonstra que o transitório de energização conduz a um pico de corrente de 8,7 vezes o valor nominal;
- **Fase B**: para a segunda fase, o pico de corrente observado durante o transitório foi de -557 A, valor este correspondente a 6,3 vezes o valor nominal;

- **Fase C**: nesta fase, o pico da corrente durante a energização do reator foi de -457 A, o qual, em relação ao pico da corrente nominal, demonstra que durante o transitório de energização, a mesma experimentou um valor de 5 vezes o valor de pico nominal.

A influência do transitório de energização apresentado nas correntes solicitadas pelo equipamento, sobre o barramento ao qual o mesmo está conectado, pode ser observada nas figuras a seguir. Assim como no caso anterior, pode-se observar um perfil das tensões nos terminais do equipamento, destacando especialmente o momento de energização deste.



(a) Formas de onda das tensões ao longo do intervalo total de estudo.



(b) Zoom das formas de onda.

Figura 3.6 – Tensão transitória de energização do reator saturado isoladamente.

Para a presente condição de operação, os picos das tensões das fases AB, BC e CA, foram, respectivamente em relação aos valores de pico das tensões em regime permanente, de 106%, 114% e 142%. Mais uma vez, estes cálculos foram realizados tomando por referência o valor de pico da tensão estabilizada.

Diante dos resultados apresentados, fica caracterizada uma grande similaridade entre os desempenhos transitórios para as duas condições de carregamento. Tal identidade se faz presente através das formas de onda e nas frequências de oscilação. De fato, quando da operação com carga pesada constatou-se, como seria esperado devido a um maior nível de amortecimento introduzido pela carga, amplitudes inferiores àqueles encontrados com carga leve. Portanto, objetivando reduzir a redundância tanto no que tange à apresentação de resultados e discussões, optou-se, daqui para diante, a inserção,

apenas, dos resultados de desempenho atrelados com o funcionamento do complexo e compensador para os carregamentos designados por leve. Esta escolha está relacionada com o fato que tal situação conduz, via de regra, a transitórios mais elevados que aqueles atrelados com os carregamentos pesados.

3.4.2 Transitório de Energização - Reator Saturado e Banco de Capacitores Paralelo

Os estudos contemplados nesta seção envolvem, desta feita, a energização do reator saturado e do banco de capacitores paralelo, portanto, o compensador de reativos propriamente dito começa a se apresentar na sua forma mais completa. Também, objetivando ressaltar com a devida clareza os impactos associados com a conexão de uma e outra parte, optou-se pela realização das manobras em tempos distintos. Assim, o reator é inicialmente energizado e, somente após sua estabilização na rede, procede-se ao chaveamento do banco de capacitores. Também, é importante observar que tal estratégia encontra sustentação no fato que, a entrada simultânea destes dois componentes não é recomendada uma vez que, as interações dos fenômenos transitórios de ambos podem agravar substancialmente o processo, como detectado em estudos realizados e não inseridos no corpo desta dissertação.

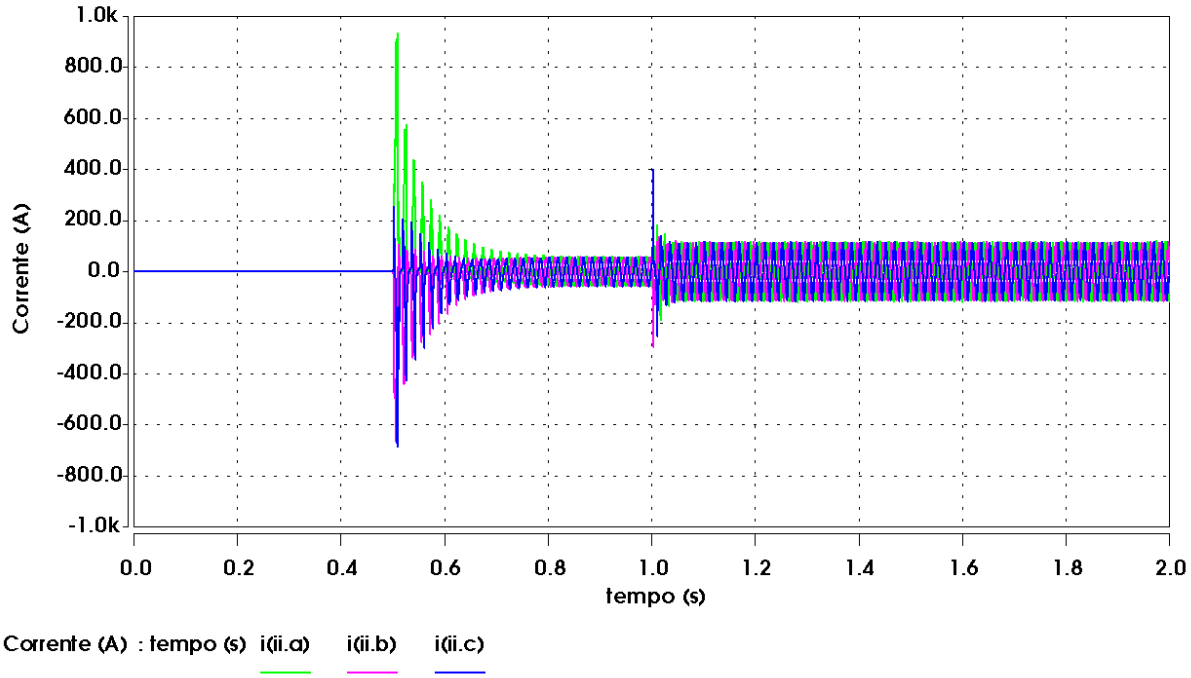
O ponto de conexão do equipamento ao sistema foi o mesmo do caso anterior, qual seja, o barramento de 230 kV localizado na cidade de Sinop-MT.

Para a simulação do evento transitório de energização do equipamento, e ainda, objetivando facilitar uma comparação adequada em relação ao caso anterior, o caso investigado corresponde ao processo de energização do sistema

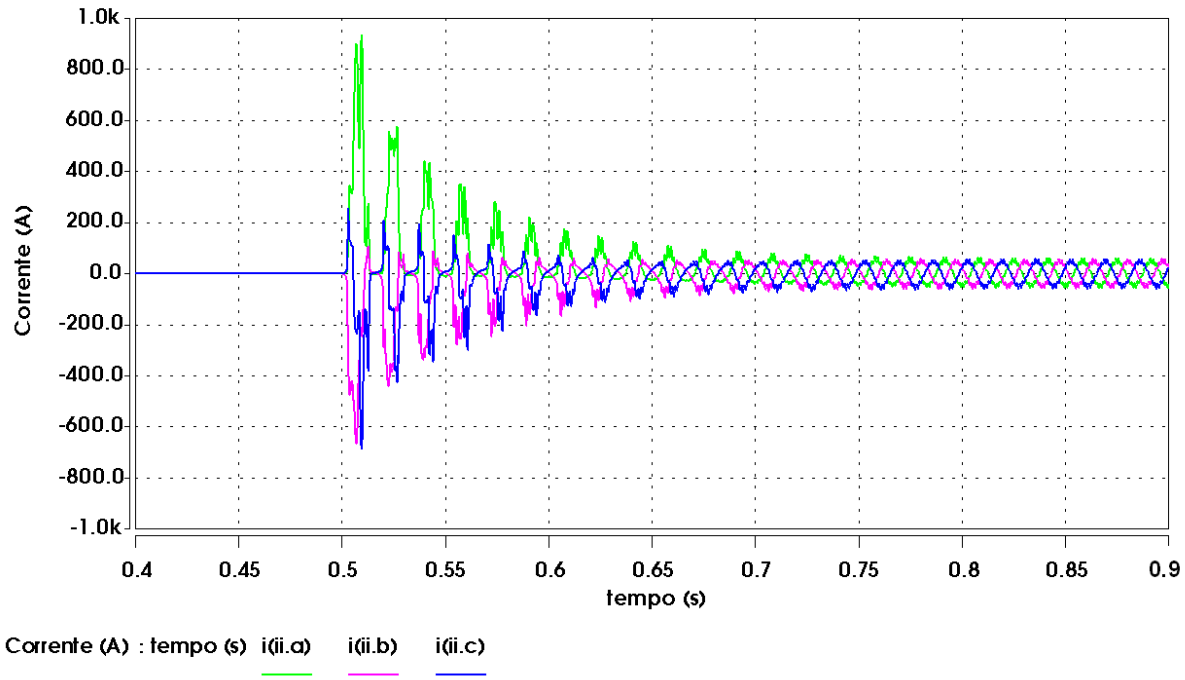
considerando em Sinop-MT a presença de uma carga leve, cuja demanda apresentada é de 18,4 MW + j 7,8 MVAr.

Em t=0,5 s é realizada a energização do reator saturado e no instante de t=1 s, procede-se a energização do banco de capacitores paralelo. Os estudos se estendem por um intervalo de tempo total de 2 segundos.

Os resultados a seguir, mostram as formas de onda das correntes de linha do reator saturado, do banco de capacitores e das tensões aplicadas nos terminais deste (que é a mesma do banco de capacitores paralelo), durante o processo de energização. As formas de onda para tais grandezas podem ser visualizadas nas Figuras 3.7.



(a) Formas de onda das correntes ao longo do intervalo total de estudo.



(b) Zoom das formas de onda.

Figura 3.7 – Corrente transitória de energização – reator saturado.

A Figura 3.7 evidencia, num primeiro momento, os impactos associados com a entrada do reator isoladamente e, na sequência, um fenômeno transitório ocorrido no reator e atrelado com a energização do banco de capacitores. De fato, tão logo o banco de capacitores paralelo entra em funcionamento, a tensão do barramento se eleva e, nestas circunstâncias, o reator é conduzido a um nível maior de saturação. Isto ocasiona um aumento da corrente consumida pela unidade indutiva do equipamento. Dentro desta lógica operativa podem ser verificados os seguintes desempenhos para os picos de corrente das fases A, B e C, respectivamente em relação ao pico da corrente nominal do reator:

- ***Nos instantes subsequentes à energização do reator saturado isoladamente***

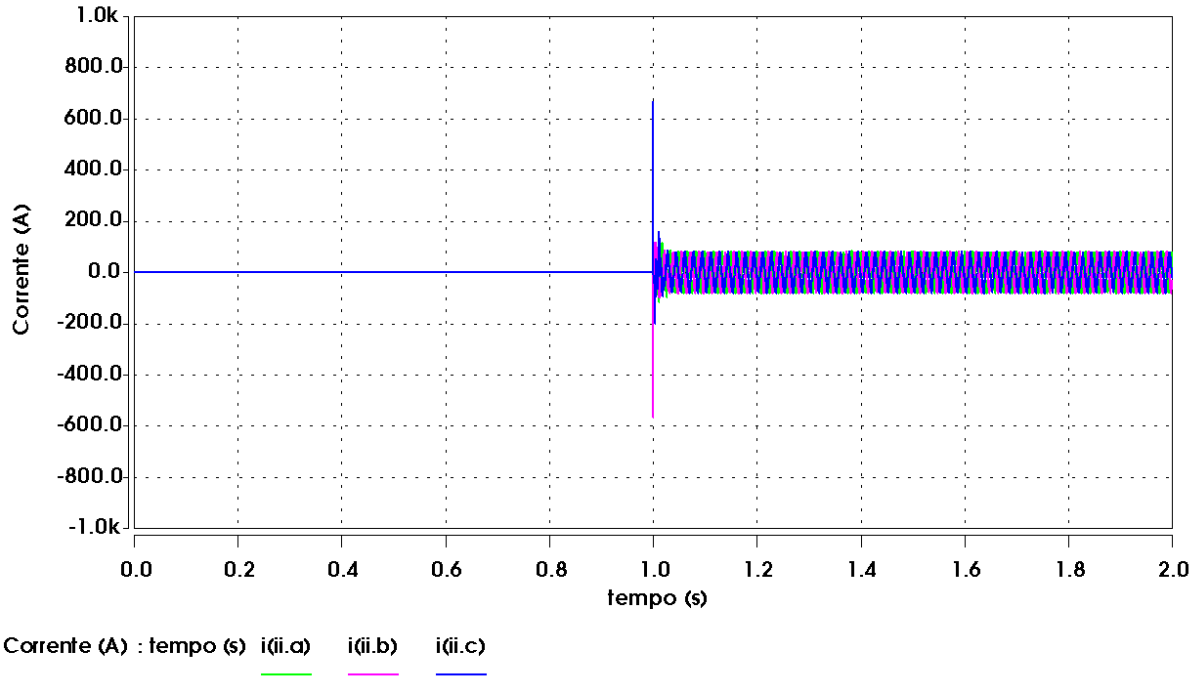
  - **Fase A**: o valor de pico durante o transitório de energização do reator saturado foi de 933 A, sendo este valor de 10,5 vezes o valor do pico da corrente nominal;
  - **Fase B**: na segunda fase o valor de pico observado foi de -665,5 A, o qual corresponde a 7,5 vezes o valor de pico da corrente nominal;
  - **Fase C**: nesta, o máximo valor instantâneo registrado foi de -686,88 A, a qual é 7,7 vezes o pico da corrente nominal.

- ***Nos instantes subsequentes à energização do banco de capacitores paralelo***

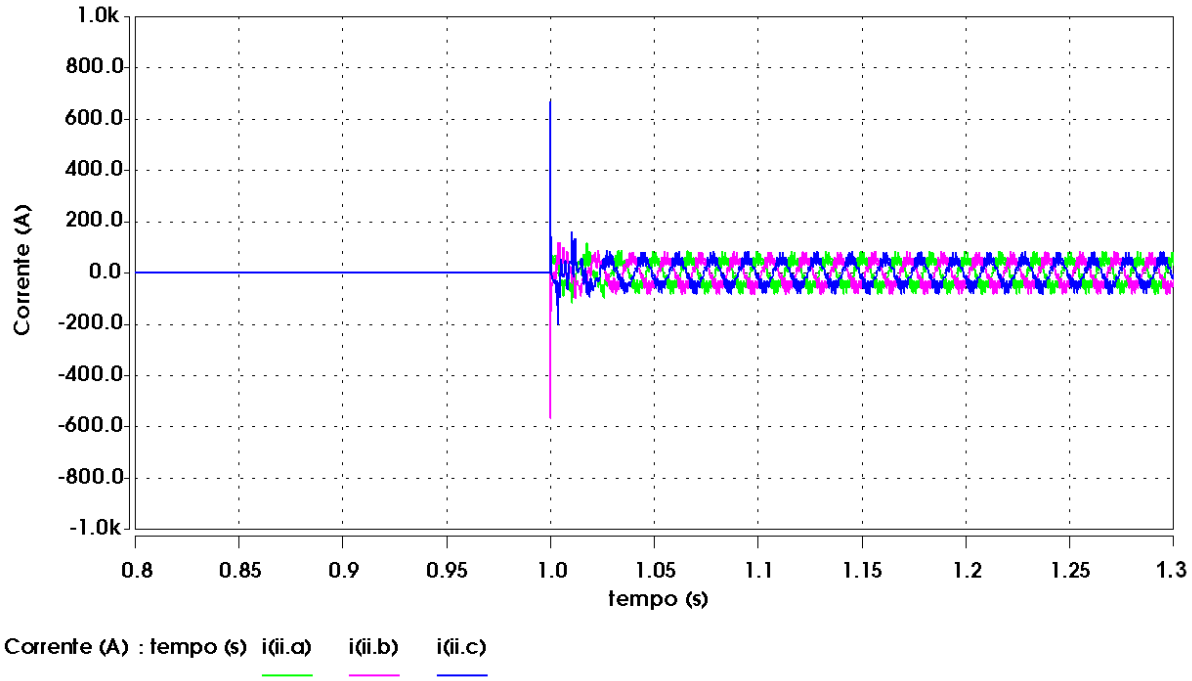
  - **Fase A**: o valor de pico da corrente solicitada pelo reator saturado, durante o transitório de energização do banco de capacitores paralelo foi de 185,1 A, o qual é 2 vezes o valor de pico da corrente nominal do mencionado componente do compensador;
  - **Fase B**: para a segunda fase o valor de pico da corrente solicitada pelo reator foi de -296,5 A. Novamente, comparando este ao pico da corrente nominal, tem-se que o transitório atingiu um valor de 3,3 vezes o pico da corrente nominal;
  - **Fase C**: o valor de pico para a corrente solicitada pelo reator nesta fase foi de 401,76 A, o qual é de 4,5 vezes o valor nominal correspondente.

Estudos similares, porém envolvendo o chaveamento simultâneo do reator e banco de capacitores, indicaram picos de corrente da ordem de 30% acima dos encontrados anteriormente. Somado a isto, há ainda de se reconhecer que as possibilidades de fenômenos vinculados com ferro-ressonância constituem-se em preocupações que podem ser substancialmente incrementadas caso as energizações não obedeçam à estratégia utilizada, qual seja, a realização de chaveamentos do reator e do capacitor em tempos distintos.

Objetivando ilustrar os fenômenos ocorridos com o banco de capacitores propriamente dito, as Figuras 3.8 destacam as correntes transitórias encontradas quando da entrada desta unidade. Os impactos observados estão em total consonância com as expectativas e não são explorados em maiores detalhes por não oferecerem maiores informações além daquelas já tradicionalmente conhecidas.



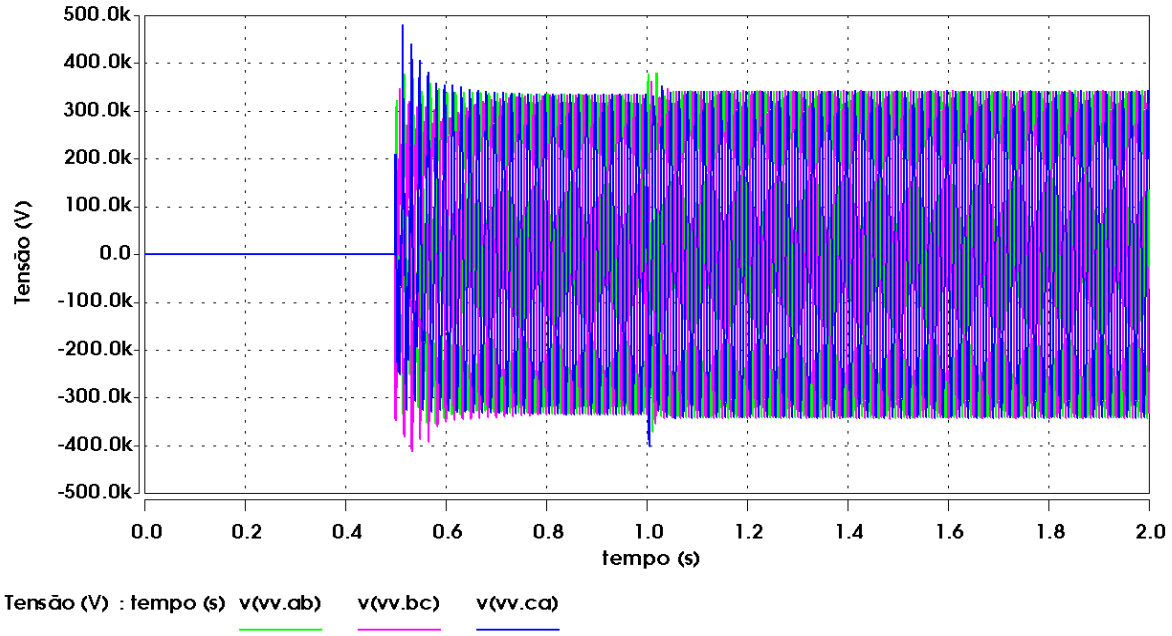
(a) Formas de onda das correntes ao longo do intervalo total de estudo.



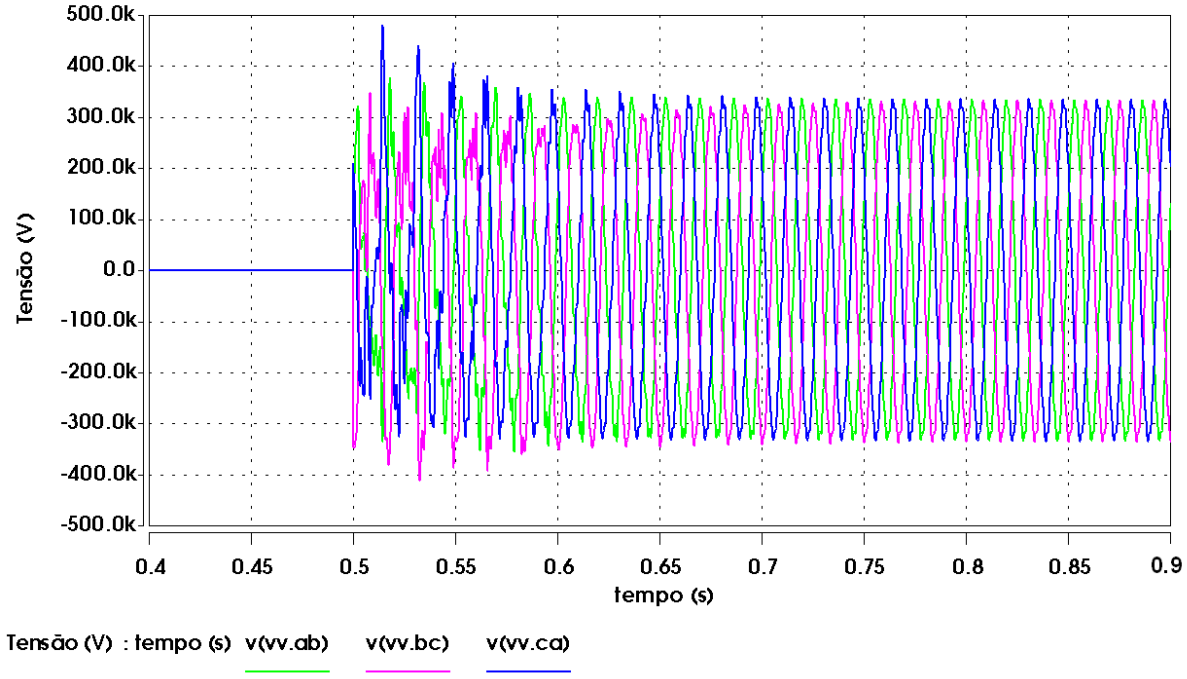
(b) Zoom das formas de onda.

Figura 3.8 – Corrente transitória de energização – banco de capacitores paralelo.

Quanto aos impactos dos transitórios de energização dos equipamentos sobre a tensão do barramento de 230 kV, as Figuras 3.9 ilustram desempenhos que, mais uma vez, são bastante semelhantes àqueles já observados quando do processo de energização do reator isoladamente.



(a) Formas de onda das tensões ao longo do intervalo total de estudo.



(b) Zoom das formas de onda.

Figura 3.9 – Tensão transitória de energização – reator saturado e banco de capacitores paralelo.

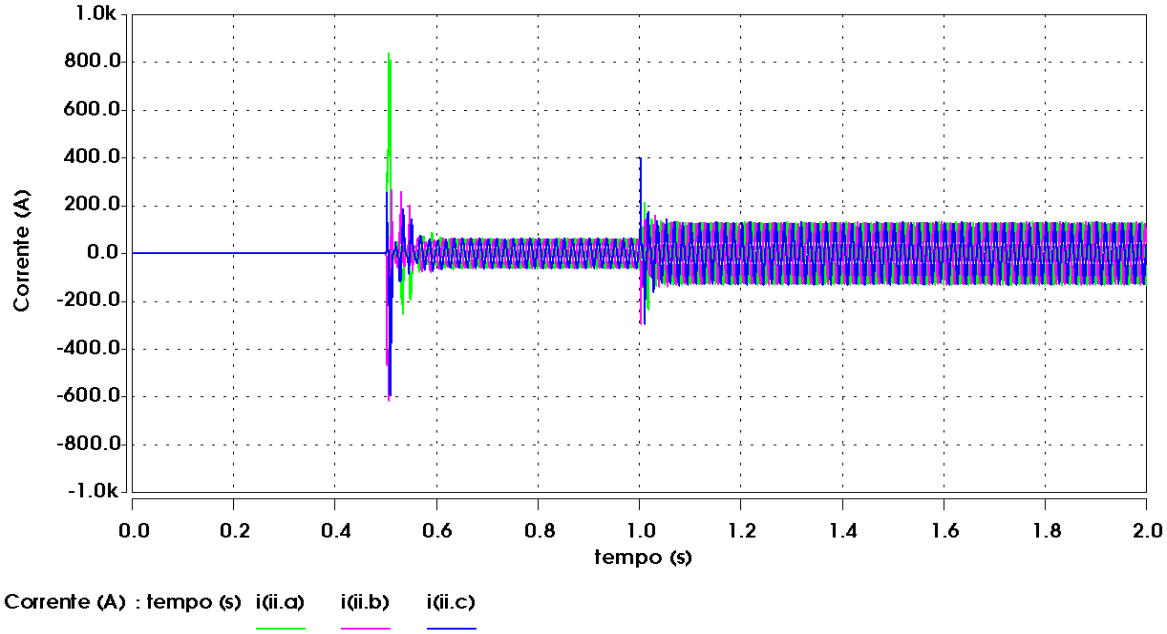
Os valores de pico encontrados para as tensões entre as fases AB, BC e CA, foram, respectivamente, de 110%, 119% e 140% dos valores de pico das respectivas grandezas em regime permanente. Tais resultados, também se comparados ao transitório de energização do reator saturado isolado, se mostraram ligeiramente superiores para as fases AB e BC, e levemente inferior em relação à fase CA.

3.4.3 Transitório de Energização - Reator Saturado com Banco de Capacitores Série e Banco de Capacitores Paralelo

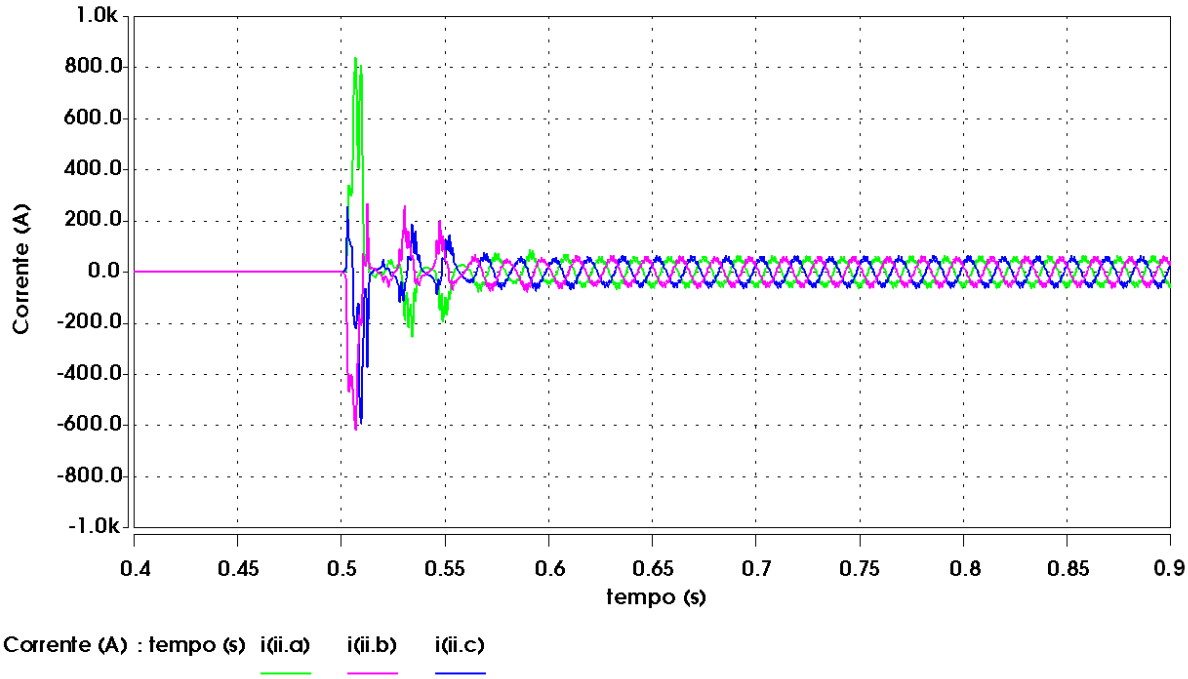
Finalmente, objetivando uma análise mais completa do desempenho transitório do compensador como um todo, com as suas três unidades básicas constituintes, foram conduzidas investigações sobre o processo de conexão do equipamento, nos termos anteriormente utilizados. Portanto, considera-se, mais uma vez, que o conjunto formado pelo reator e respectivo capacitor série, em t=0,5 s, é energizado pelo barramento de 230 kV, e que, em t=1 s, o banco de capacitores paralelo passa a integrar o conjunto. No que se refere à carga da cidade de Sinop, como já esclarecido, esta corresponde à situação de suprimento sob o que denominou por condição leve.

Os resultados a seguir mostram as formas de onda das correntes de linha solicitadas pelo reator saturado, pelo banco de capacitores em paralelo, e ainda, das tensões nos terminais do compensador estático obtido.

Iniciando pelas correntes associadas com o funcionamento do reator (e capacitor série), as Figuras 3.10 mostram o desempenho transitório das correntes de linha deste componente do equipamento.



(a) Formas de onda das correntes ao longo do intervalo total de estudo.



(b) Zoom das formas de onda.

Figura 3.10 – Corrente transitória de energização – reator saturado com banco de capacitores série e banco de capacitores paralelo.

Os resultados acima mostram que nos momentos subsequentes à entrada do reator e respectivo capacitor série, que ocorre em t=0,5 s, os picos das correntes foram:

- ***Nos instantes subsequentes à energização do reator saturado com respectivo capacitor série***

  - **Fase A**: o máximo valor da corrente solicitada pelo ramo indutivo foi de 837,4 A, valor este que conduz a 9,4 vezes o pico da corrente nominal do reator saturado;
  - **Fase B**: seguindo o mesmo raciocínio, o resultado apresentado para a fase B foi de -616,5 A, o que equivale a 6,9 vezes o pico da corrente nominal;
  - **Fase C**: para esta fase o valor de pico da corrente foi de -596,4 A, o qual representa 6,7 vezes o pico da corrente nominal.

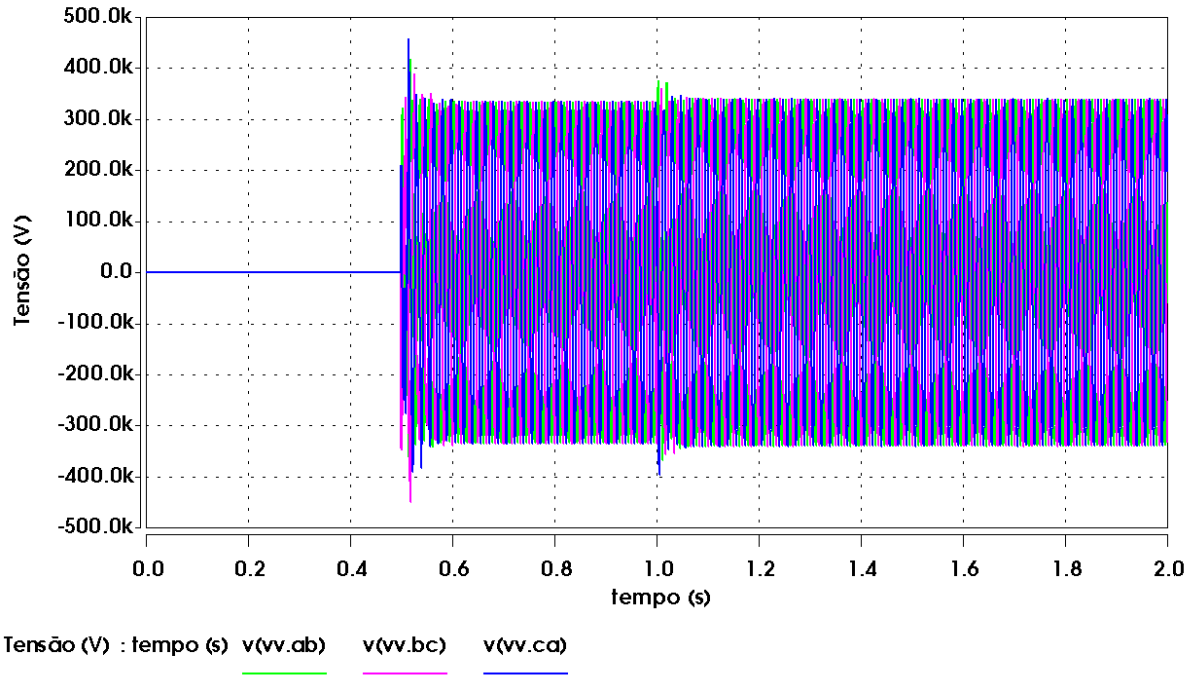
- ***Nos instantes subsequentes à energização do capacitor paralelo***

  - **Fase A**: o valor de pico da corrente solicitada pelo reator, durante o transitório de energização do banco de capacitores paralelo, foi de -234,6 A. Este resultado, em relação ao pico da corrente nominal do reator, equivale a 2,6 vezes o valor nominal;
  - **Fase B**: o máximo pico da corrente foi de -296,5 A, ou seja, de 3,3 vezes o pico da corrente nominal;
  - **Fase C**: o valor de pico para a corrente nesta fase foi de 401,2 A, que equivale a 4,5 vezes o valor nominal.

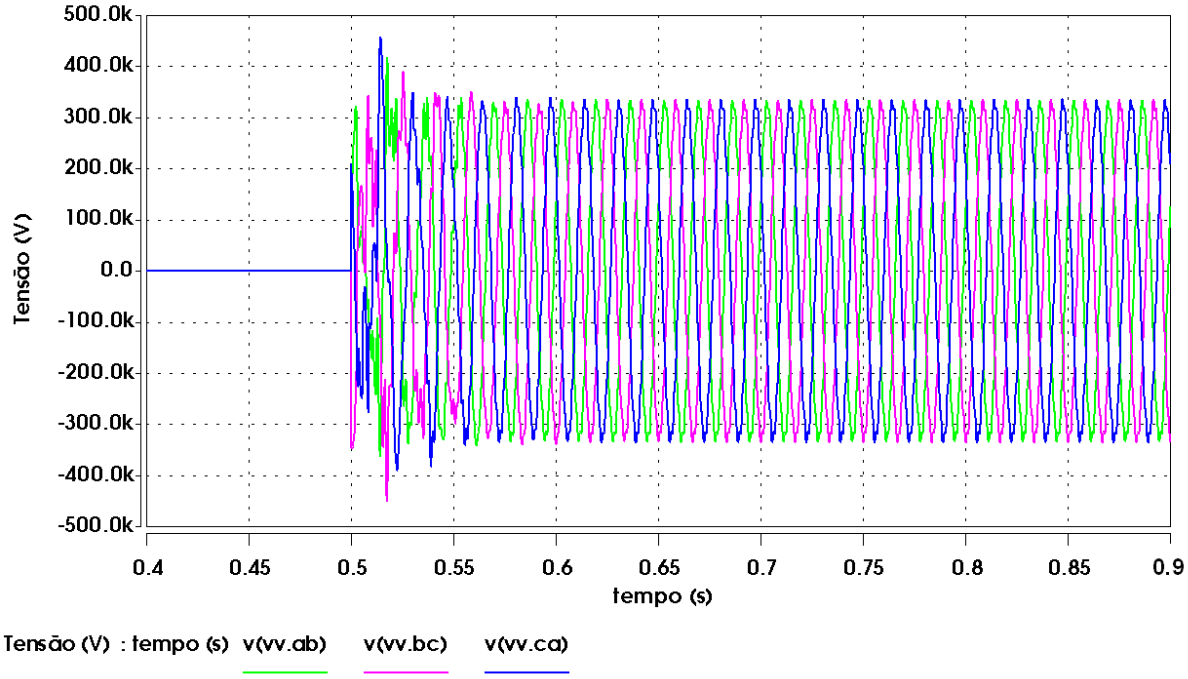
A partir dos resultados extraídos das Figuras 3.10, pode-se observar que a presença do banco de capacitores conectado em série ao reator saturado, não provocou alterações significativas nos máximos valores das correntes de linha durante o instante de energização do reator saturado. Na verdade, estes valores se mostraram inferiores se comparados àqueles obtidos no caso em que o reator saturado é energizado isoladamente, ou em relação ao caso que é introduzido um banco de capacitores paralelo junto ao reator. Para o segundo instante t=1 s, em que acontece a energização do banco de capacitores paralelo, os valores máximos atingidos pelas correntes se mostraram praticamente iguais aos resultados obtidos para o caso 3.3.2.

No que tange aos resultados para as correntes do banco de capacitores paralelo, estes se mostraram similares àqueles apresentados anteriormente, quando não havia a inserção do banco série. Por tal motivo considera-se dispensável apresentar os novos gráficos representativos do comportamento transitório das mesmas.

Nas Figuras 3.11 são apresentadas as formas de onda das tensões nos terminais do reator (e capacitor série) e do banco de capacitores paralelo, as quais ilustram os impactos causados pelos transitórios de energização das unidades do compensador de reativos em pauta. As formas de onda e valores obtidos são similares àqueles descritos para o caso anterior, exceto pela frequência de oscilação, a qual se mostra maior.



(a) Formas de onda das tensões ao longo do intervalo total de estudo.



(b) Zoom das formas de onda.

Figura 3.11 – Tensão transitória de energização – reator saturado com banco de capacitores série e banco de capacitores paralelo.

Os valores de pico obtidos para as tensões entre as fases AB, BC e CA, foram, respectivamente de 123%, 132% e 134% dos valores de pico de regime permanente. Quando da entrada dos bancos de capacitores paralelo, os picos encontrados foram, como anteriormente, inferiores a tais níveis. Por tal motivo não são quantificados neste momento.

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente capítulo foi dedicado aos estudos de desempenho transitório quando do processo de energização dos componentes básicos que formam o compensador estático fundamentado na dinâmica operacional de um reator a núcleo saturado. Tais preocupações estão alicerçadas nas constantes preocupações que envolvem a operação das redes elétricas quando da entrada de dispositivos de grande porte e com reconhecidos efeitos sobre as características associadas com picos e frequências de oscilação, principalmente, quando de suas inserções junto a complexos elétricos em operação.

Os trabalhos contemplados focaram, num primeiro momento, a questão da escolha de um sistema elétrico típico, o qual, pelas suas características operativas, constitua-se num arranjo apropriado à instalação de um compensador de reativos nos moldes aqui focado. Dentro deste enfoque, e ainda, devido aos atrativos oferecidos por um complexo elétrico localizado na região centro-oeste do Brasil, que, em sua forma original, apresenta particularidades e dificuldades no que tange ao assunto regulação de tensão, a opção feita recaiu sobre uma rede da Eletronorte que alimenta a cidade de Sinop-MT e outras cargas. A distribuição é de competência da CEMAT.

Uma vez caracterizado o sistema e conhecidas as informações relativas à topologia, dados, operação e outras informações, procedeu-se à especificação

básica do compensador, culminando pelo conhecimento do reator, capacitor paralelo e capacitor série, capazes de proporcionar uma regulação da tensão nos termos exigidos pela legislação. Este equipamento constituiu-se no dispositivo focado nos trabalhos investigados associados com os fenômenos transitórios de energização explorados nesta dissertação.

Em consonância com procedimentos de campo, optou-se pela realização de estudos de chaveamentos das unidades básicas constituintes do compensador de forma isolada, isto é, as unidades indutiva e capacitiva (paralela) foram sequencialmente chaveadas. Assim procedendo, tornou-se mais clara a contribuição de cada uma delas para os fenômenos considerados e, utilizando desta estratégia, os resultados obtidos mostraram que:

- Os valores transitórios das correntes de energização, obtidos a partir das simulações: do reator saturado isoladamente, do reator saturado em conjunto com um banco de capacitores em paralelo, e ainda, do reator saturado com um banco de capacitores série e outro em paralelo, não evidenciaram níveis preocupantes e que viessem a produzir esforços diferentes que aqueles classicamente conhecidos quando da energização de transformadores e bancos de capacitores;
- Os níveis mais acentuados de picos de corrente ocorreram quando da entrada do reator saturado;
- Apesar das preocupações quanto à instalação do banco de capacitores paralelo e série junto ao reator saturado, os resultados obtidos demonstraram que a instalação destes, não acarretou maiores problemas no que tange ao agravamento dos transitórios de energização;
- Quanto aos efeitos desses transitórios nos barramentos de conexão dos componentes do compensador de reativos, estes se mostraram

totalmente condizentes com o esperado, sem a caracterização de qualquer anomalia outra que os impactos esperados.

Diante do exposto, os resultados obtidos deixaram claro que os fenômenos transitórios envolvidos com a energização das unidades do compensador de reativos a núcleo saturado não evidenciaram fenômenos outros que não aqueles já tradicionalmente conhecidos na engenharia elétrica. Isto não implica a inexistência de efeitos preocupantes, mas sim, que cuidados, nos mesmos moldes que aqueles já considerados na tecnologia e operação de equipamentos clássicos, como transformadores e capacitores, continuam sendo aplicáveis. Também, os efeitos aqui avaliados não excluem possíveis dificuldades associadas com a operação de regime permanente e dinâmica, a exemplo de ressonâncias harmônicas e outras, as quais serão focadas no próximo capítulo desta dissertação.

CAPÍTULO IV

ANÁLISE COMPUTACIONAL DO DESEMPENHO DO COMPENSADOR A NÚCLEO SATURADO SOB CONDIÇÕES DINÂMICAS

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A operação do compensador a núcleo saturado sob regime transitório, conforme visto no capítulo anterior foi de grande importância para o conhecimento dos fenômenos atrelados com o processo de energização do dispositivo. Todavia, aspectos outros, associados com a operação do equipamento em regime permanente e mesmo dinâmico, não foram explorados com a devida atenção nos estudos realizados. Devido a tal fato, e ainda, à luz do foco principal do dispositivo em pauta, que está centrado na sua ação para prover a regulação da tensão, torna-se essencial, para a compreensão da eficácia operativa do mesmo, que sejam feitas investigações complementares. Estas, dentre outros objetivos, devem primar pela identificação da eficácia operativa quanto aos tempos de respostas, distorções harmônicas, etc.

Assim, a fim de se avaliar o desempenho dinâmico do compensador a núcleo saturado, serão utilizados os modelos estabelecidos, implementados e utilizados no capítulo anterior. Da mesma forma, o complexo elétrico contemplado nos estudos corresponde ao mesmo já identificado. Diante desta opção torna-se desnecessária a descrição, em detalhes, do arranjo considerado para os estudos computacionais.

No que tange às situações utilizadas como casos estudados, estas também estão associadas com as mesmas condições impostas anteriormente, ou seja, situações associadas com alívios repentinos de cargas e subsequentes inserções destas de forma abrupta.

Assim, objetivando avaliar as condições descritas anteriormente, o presente capítulo apresenta como principais objetivos:

- Identificar os níveis de tensão no barramento da cidade de Sinop sob condições de carga pesada, passando para leve e, na sequência, retornando as condições de carregamento originais;
- Estudos de desempenho do arranjo sem e com a presença do CERNS;
- Discutir o desempenho do processo de estabilização da tensão, com destaque aos tempos de atuação do compensador e ainda, sob o ponto de vista das distorções harmônicas.

4.2 ESTUDOS DE DESEMPENHO DO COMPLEXO ELÉTRICO: TEMPO DE RESPOSTA, REGULAÇÃO DE TENSÃO E DISTORÇÕES HARMÔNICAS

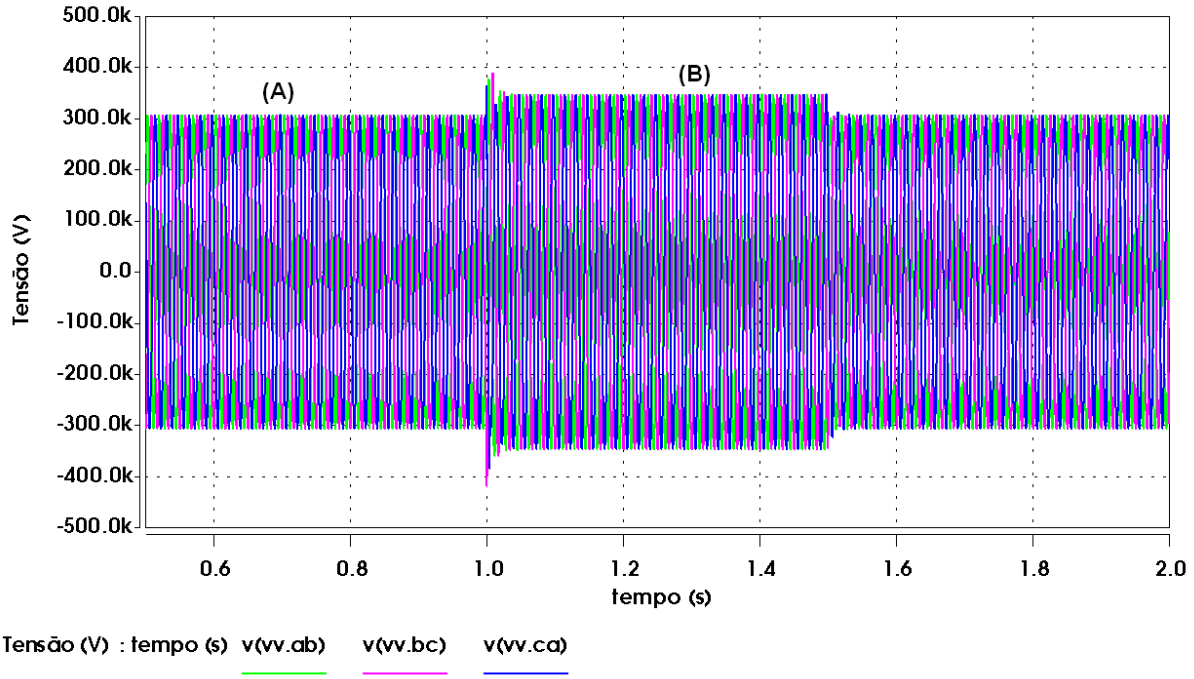
Na sequência são apresentados os resultados de desempenho do complexo elétrico para as mesmas situações utilizadas para o Capítulo III, a saber:

- Imposição das variações súbitas de carga na ausência do compensador a núcleo saturado;
- Imposição das mesmas condições operativas com a inserção do compensador em pauta, considerando, entretanto, que as unidades componentes do regulador sejam incluídas de forma gradual. Inicialmente apenas o reator, na sequência o reator e seu respectivo banco de capacitores em paralelo e, finalmente, o arranjo completo.

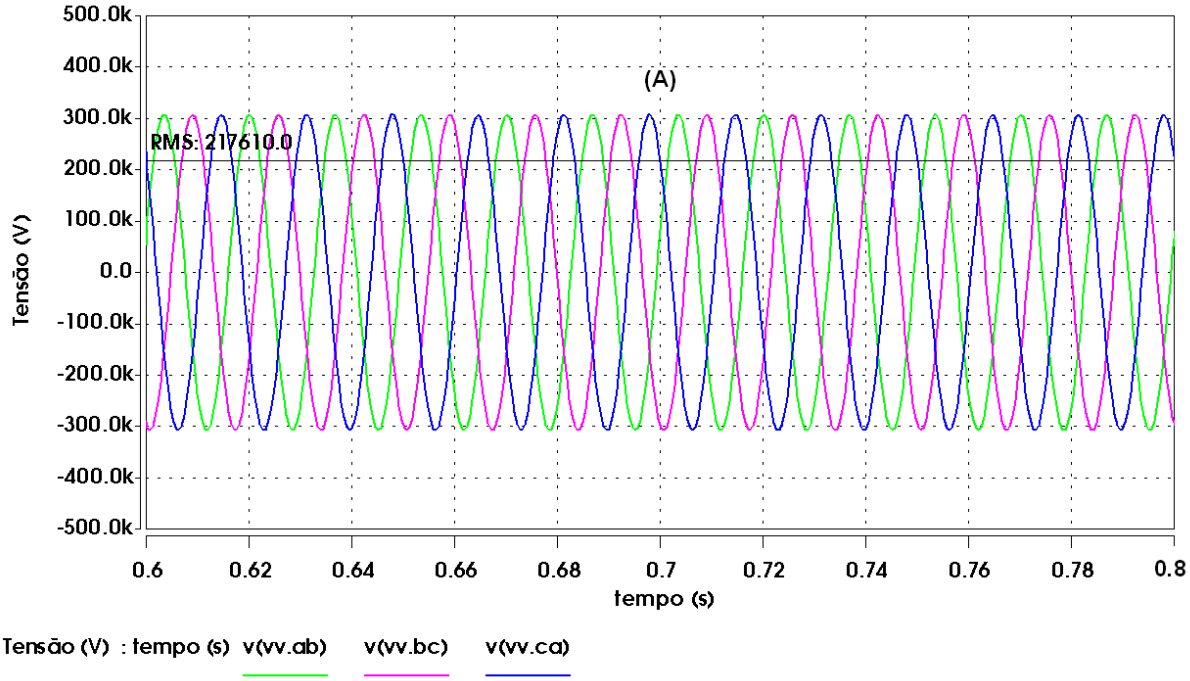
4.2.1 Tensões no barramento de Sinop-MT, sem a presença do compensador

Os primeiros resultados, apresentados abaixo, estão relacionados com o perfil das tensões do barramento da cidade de Sinop, sem a presença do dispositivo de compensação. Este estudo, correspondente ao caso denominado por referência para as investigações, visa, acima de tudo, verificar se os limites de tensão estabelecidos pelos órgãos reguladores do setor, diante das variações abruptas e expressivas de carga, foram respeitados ou não.

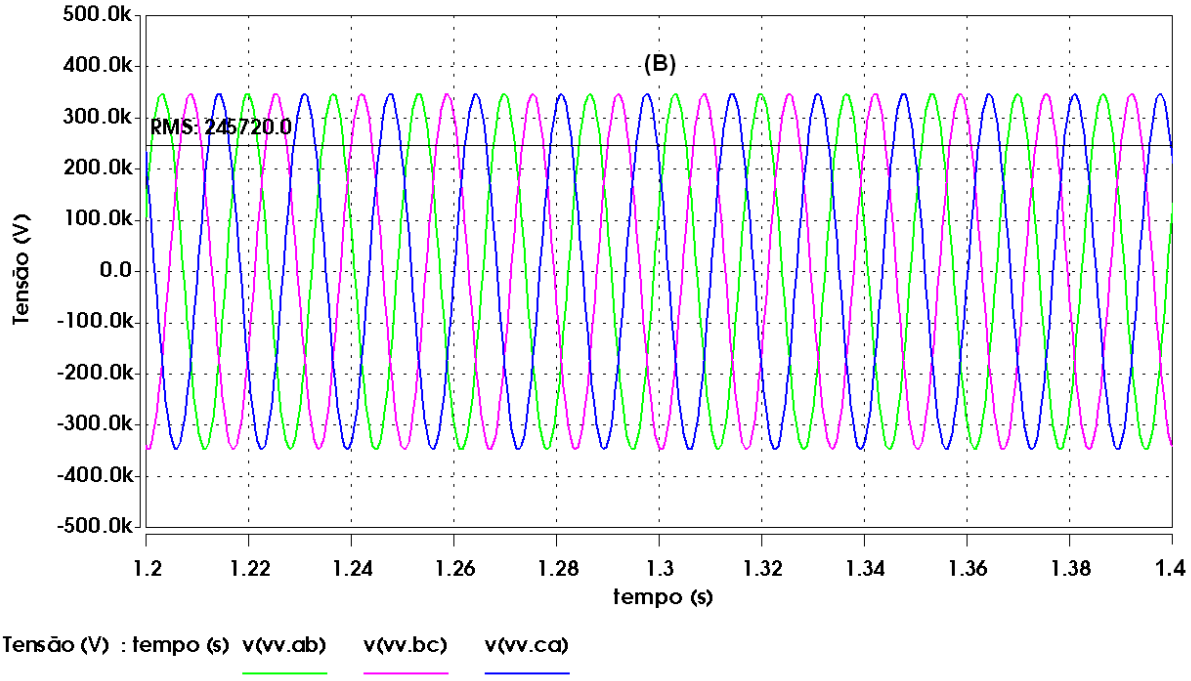
A seguir têm-se os resultados obtidos para as formas de onda das tensões no barramento de 230 kV da cidade de Sinop-MT, para um intervalo de simulação de 0,5 a 2 segundos – Figura 4.1 (a). As tensões eficazes para as condições de carregamento pesado (região "A" da Figura 4.1 (a)), apresentando um consumo de 62,7 MW + j 26,5 MVAr, e o desempenho da mesma grandeza após uma súbita perda de carga do sistema – carga leve, representada pela região "B" da Figura 4.1 (a), com uma demanda de 18,4MW + j 7,8 MVAr, são claramente evidenciadas no gráfico completo e também nos detalhamentos oferecidos.



(a) Formas de onda das tensões do barramento de 230 kV ao longo do intervalo total de estudo.



(b) Zoom na região "A" – carregamento pesado.



(c) Zoom na região "B" – carregamento leve.

Figura 4.1 – Tensões na cidade de Sinop-MT – sem a presença do compensador.

Nas Figuras 4.1, pode-se observar as formas de onda das tensões no barramento de 230 kV da cidade de Sinop, bem como os valores eficazes para estas, para as condições de carregamento pesado e de carga leve. É importante ressaltar, novamente, que os desempenhos obtidos expressam a operação da rede elétrica sem a presença de qualquer unidade componente do compensador de reativos sob análise.

Dentro das condições impostas foram obtidos os seguintes resultados:

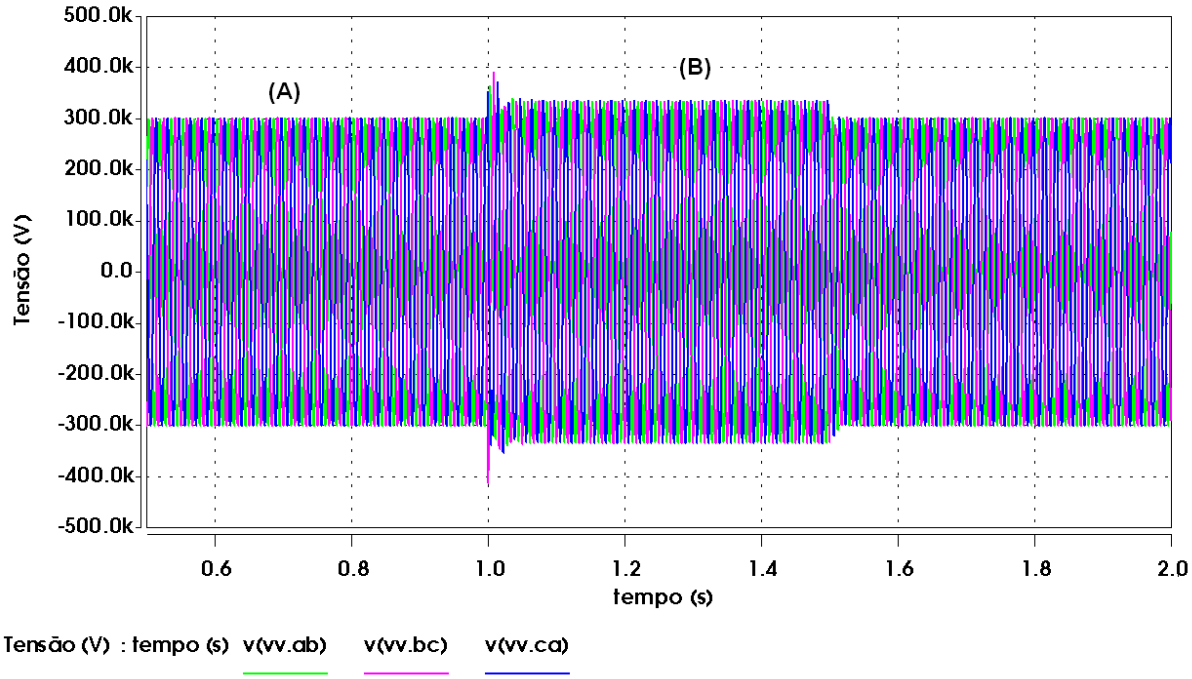
- ***Carregamento pesado***: para esta condição, a tensão eficaz para a fase A, se apresentou com 217,6 kV. Tal valor foi extraído da Figura 4.1 (b). O valor encontrado está 5,4 % abaixo do valor nominal que é de 230 kV. Portanto, tal nível encontra-se abaixo do limite mínimo recomendável para a tensão sob foco, cujo valor adequado seria de até 5% inferior ao nominal.
- ***Carregamento leve:*** para a condição de carregamento leve, a tensão eficaz para a fase A foi de 245,7 kV, como evidencia a Figura 4.1 (c). Este valor está 6,83 % acima do valor nominal e é indicativa que houve violação do limite máximo recomendável para a tensão neste nível de tensão, que é de 5 % acima do valor nominal.

Do exposto segue que, à luz dos fenômenos impostos, as variações de carga impactaram nas tensões de forma tal que as mesmas ultrapassaram os limites estabelecidos pela legislação em vigor. Este fato determina, pois a necessidade da instalação de medidas mitigadoras para os problemas, o que será feito nos estudos subsequentes.

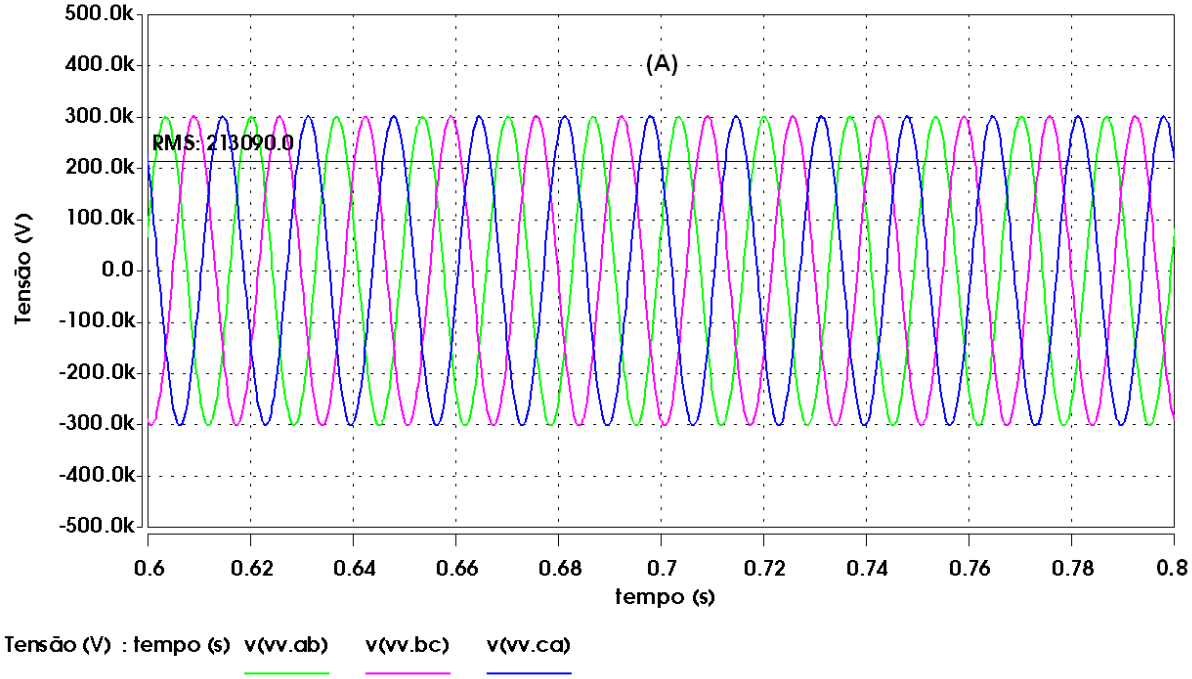
4.2.2 Tensões no barramento de Sinop-MT, com a inserção do reator saturado (sem capacitores)

Para avaliar os efeitos associados com a inclusão do compensador estático de reativos focados nesta dissertação optou-se por um processo sequencial de inserção das suas unidades básicas constituintes. Assim sendo, o primeiro elemento do compensador a ser instalado no barramento de 230 kV da cidade de Sinop consiste no reator saturado propriamente dito, o qual, de antemão, sabe-se que é um componente consumidor de reativos. Portanto, não é de se esperar qualquer ganho quando da ocorrência de afundamentos de tensão, mas apenas, quando da manifestação de elevações desta grandeza. Também, tendo em vista que o dimensionamento de potência deste componente foi realizado por um aplicativo computacional direcionado a tal processo, é de se esperar que o reator inserido consiga restabelecer os padrões de tensão, quando de sua elevação, aos patamares previstos pela legislação.

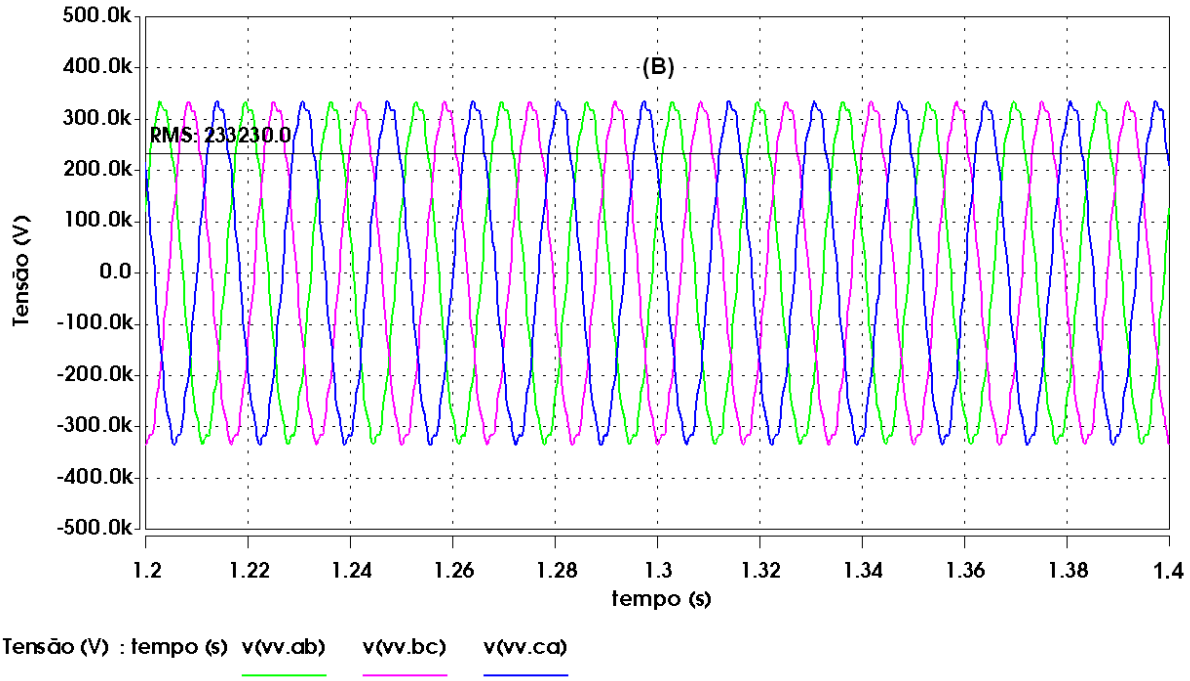
Nas figuras a seguir, podem-se observar os resultados obtidos para as formas de onda das tensões no barramento sob estudo, para o intervalo de simulação de 0,5 a 2 segundos. Obedecendo a mesma lógica anteriormente empregada, as, Figuras 4.2 (a), 4.2 (b) e 4.2 (c) esclarecem os desempenhos obtidos na forma mais completa e em detalhes para as regiões de carga leve e pesada.



(a) Formas de onda das tensões do barramento de 230 kV ao longo do intervalo total de estudo.



(b) Zoom na região "A" – carregamento pesado.



(c) Zoom na região "B" – carregamento leve.

Figura 4.2 – Tensões na cidade de Sinop-MT – com a presença do reator saturado isoladamente.

Os desempenhos obtidos para as tensões, com a presença do reator saturado, revelam que:

- ***Carregamento pesado***: a tensão eficaz para tal região de operação foi de 213 kV, como pode ser observado na Figura 4.2 (b). Este valor está 7,4 % abaixo do valor nominal que é de 230 kV, portanto, abaixo do limite mínimo recomendável que é de 5 %.
- ***Carregamento leve***: neste caso, a tensão eficaz para a fase A foi de 233,23 kV, como indicado na Figura 4.2 (c). Este valor está 1,4 % acima do valor nominal que é de 230 kV, não violando assim, o limite máximo recomendável para a tensão neste nível de tensão, que é de 5 %.

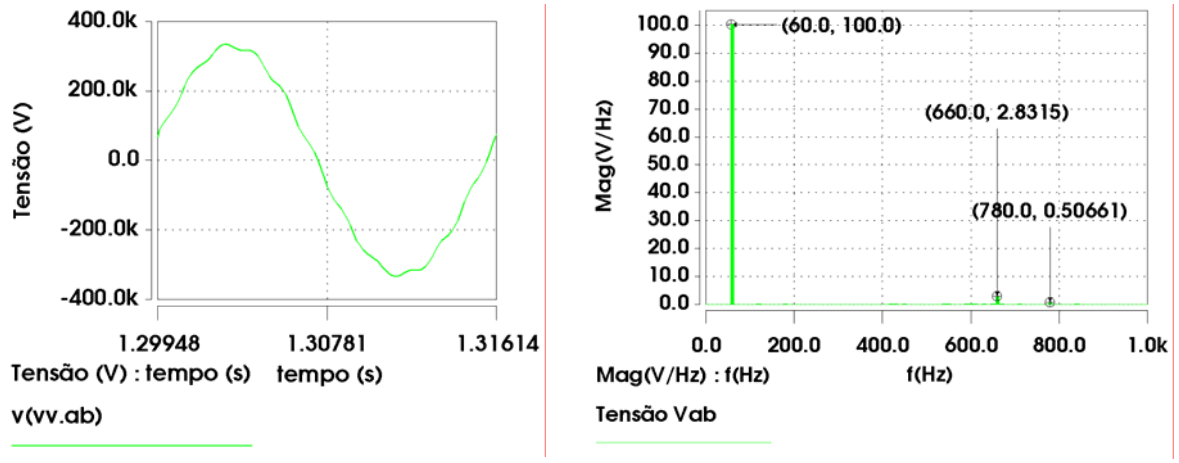
- ***Tempo de resposta:*** os gráficos representativos do comportamento global evidenciam que o reator saturado atua com uma rapidez da ordem de 2,2 ciclos, comprovando, desta forma, as expectativas previstas pela teoria que rege o assunto.

Os resultados obtidos demonstram, pois que a atuação do reator saturado na compensação de reativos e consequente controle das tensões no barramento sob estudo foi eficaz no que tange ao enquadramento da tensão elevada. Por outro lado, durante a condição de carregamento pesado houve uma pequena redução no valor eficaz da tensão. Tal fato é perfeitamente justificável, pois, apesar do reator saturado ser um dispositivo que possui uma característica de auto-regulação intrínseca a sua propriedade construtiva e funcional, mesmo sem estar na condição de operação nominal, o mesmo permanece ativo no sistema, porém absorvendo uma corrente mínima do sistema ao qual se encontra conectado. Assim sendo, muito embora o grande porte do reator definido para utilização nesta dissertação (25 MVAr), uma pequena corrente absorvida pelo mesmo causa os efeitos constados.

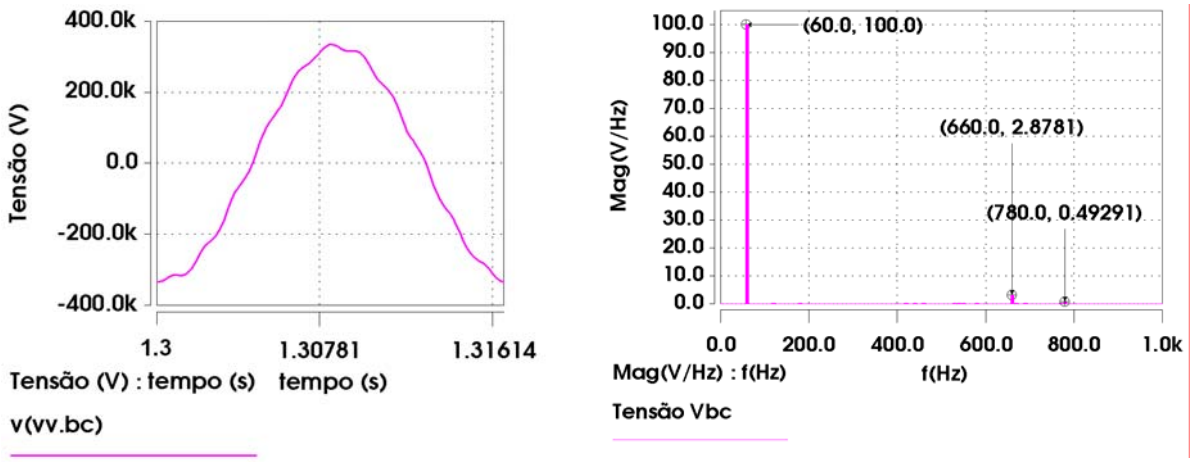
O reator saturado, apesar de suas conhecidas qualidades no que tange a regulação de tensão apresenta, como é amplamente conhecido, o inconveniente de introduzir distorções harmônicas no sistema. Assim, como fora descrito no estado da arte sobre o assunto, este equipamento apresenta um comportamento semelhante ao de um retificador de 12 pulsos, merecendo, portanto, uma atenção especial sobre tal assunto.

Objetivando, pois esclarecer sobre tal efeito apresenta-se, abaixo, detalhes das formas de onda das correntes do reator, tensão de suprimento e respectivos espectros harmônicos.

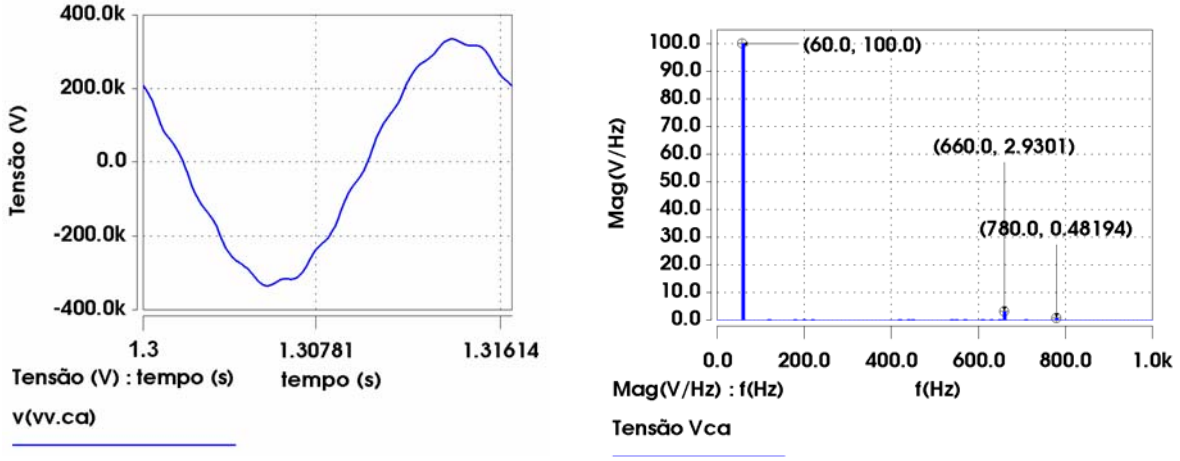
Iniciando pela Figura 4.3, esta mostra, respectivamente, as tensões fase-fase encontradas para as fases AB, BC e CA e seus correspondentes espectros de frequência (em termos porcentuais calculados a partir do valor da grandeza fundamental). Vale destacar que os resultados anexados a esta dissertação correspondem à situação em que o reator encontra-se atuando para a redução do nível da tensão, isto é, para o caso do carregamento leve.



(a) Tensão AB.



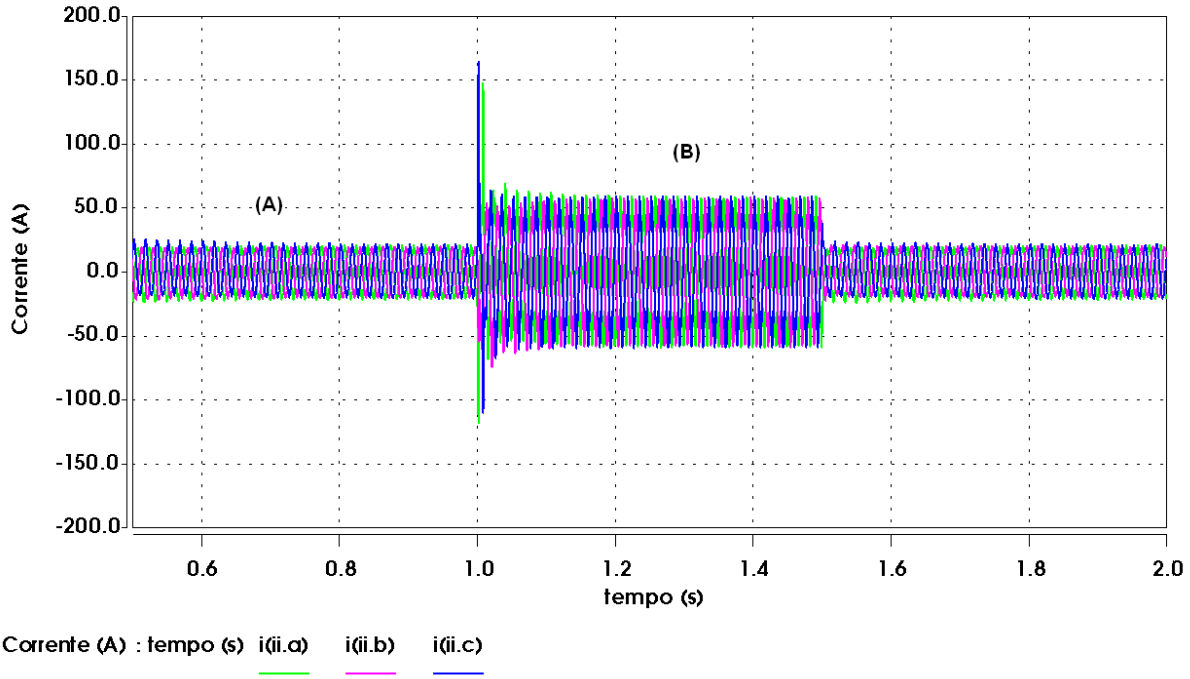
(b) Tensão BC.



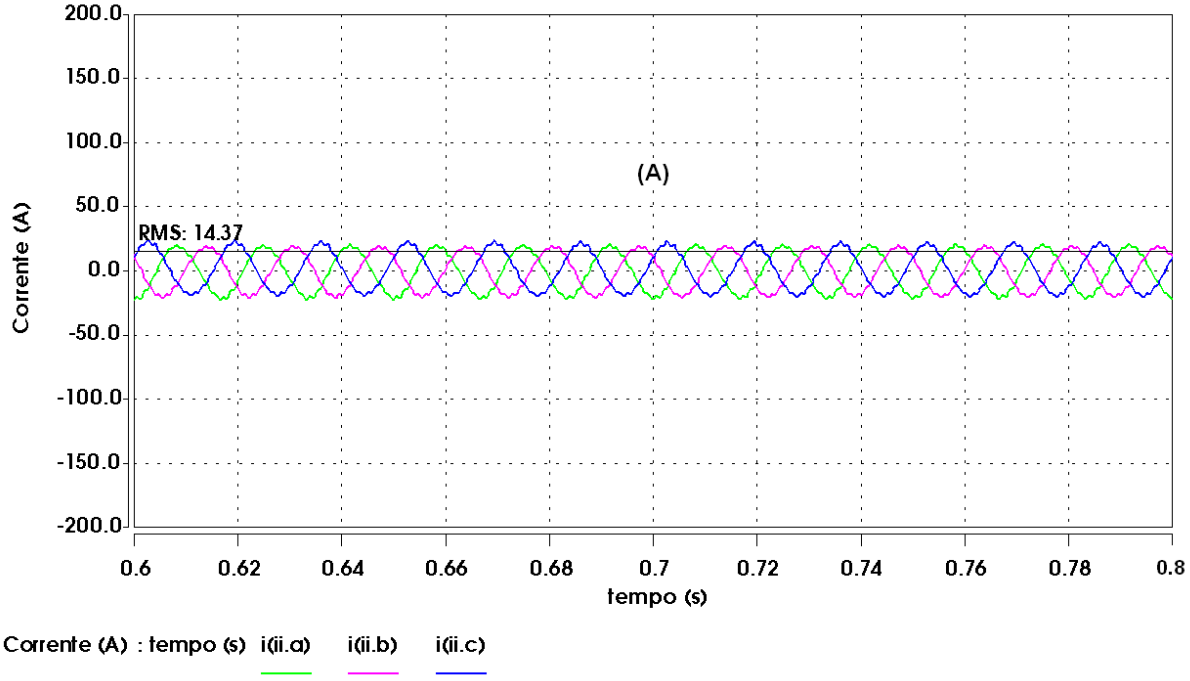
(c) Tensão CA.

Figura 4.3 - Formas de onda das tensões do barramento de 230 kV e respectivos espectros harmônicos - com reator saturado e ausência dos capacitores paralelo e série.

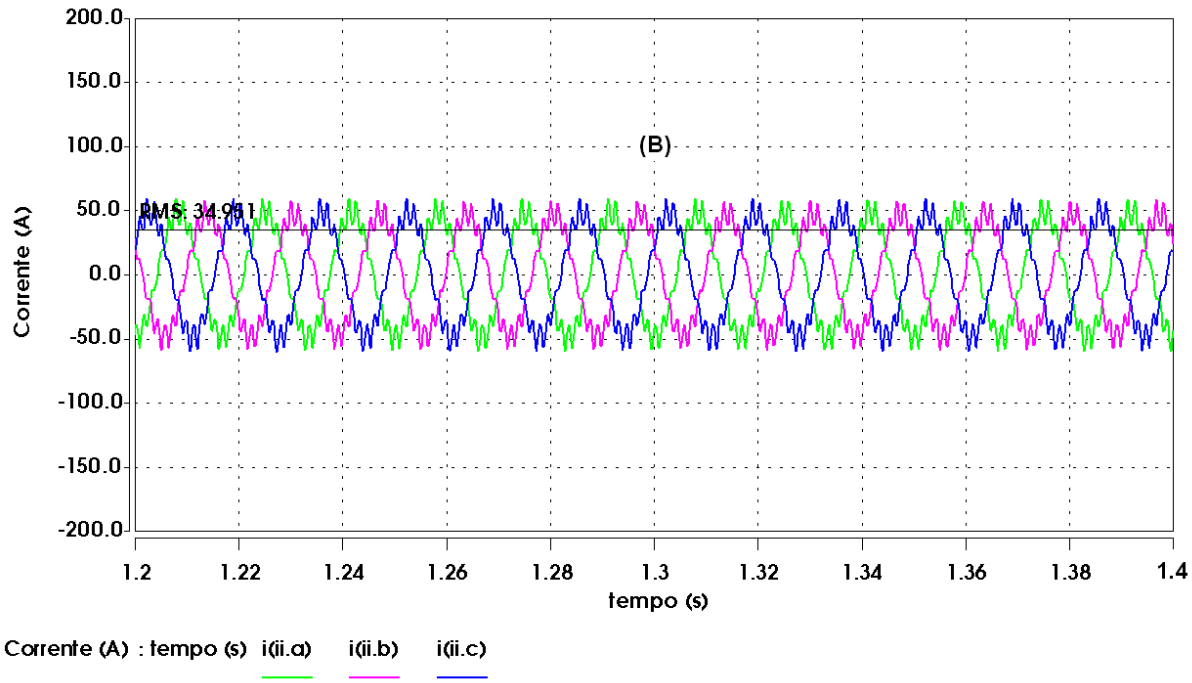
No que tange as correntes de linha fornecidas ao reator, estas se encontram fornecidas nas Figuras 4.4, que correspondem aos desempenhos para as linhas A, B e C, assim como também seus correspondentes espectros harmônicos. A situação exemplificada está vinculada com o denominado carregamento leve.



(a) Correntes solicitadas pelo reator saturado – sem capacitores paralelo e série.



(b) Zoom da região "A" – carregamento pesado.



(c) Zoom da região "B" – carregamento leve.

Figura 4.4 - Formas de onda das correntes solicitadas pelo reator saturado – sem capacitores paralelo e série.

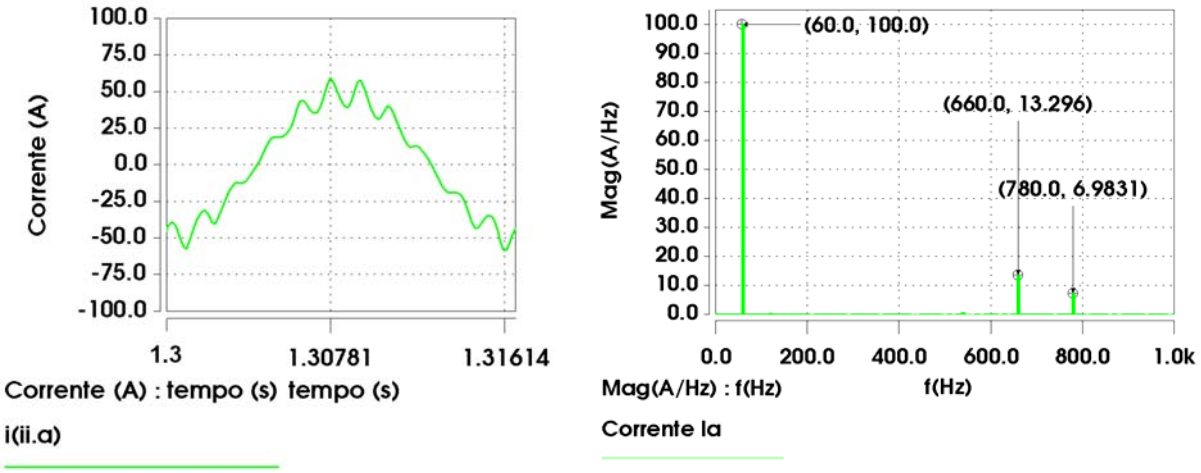
Os resultados para as correntes de linha do reator mostram que:

- ***Carregamento pesado***: a corrente eficaz de linha solicitada pelo reator saturado para esta situação de carregamento é de 14,37 A. Vale lembrar que a corrente do reator saturado para a condição nominal é de 62,8 A.
- ***Carregamento leve***: para a condição em que houve um alívio de carga, a corrente eficaz de linha solicitada pelo reator saturado elevou-se para 34, 9 A.

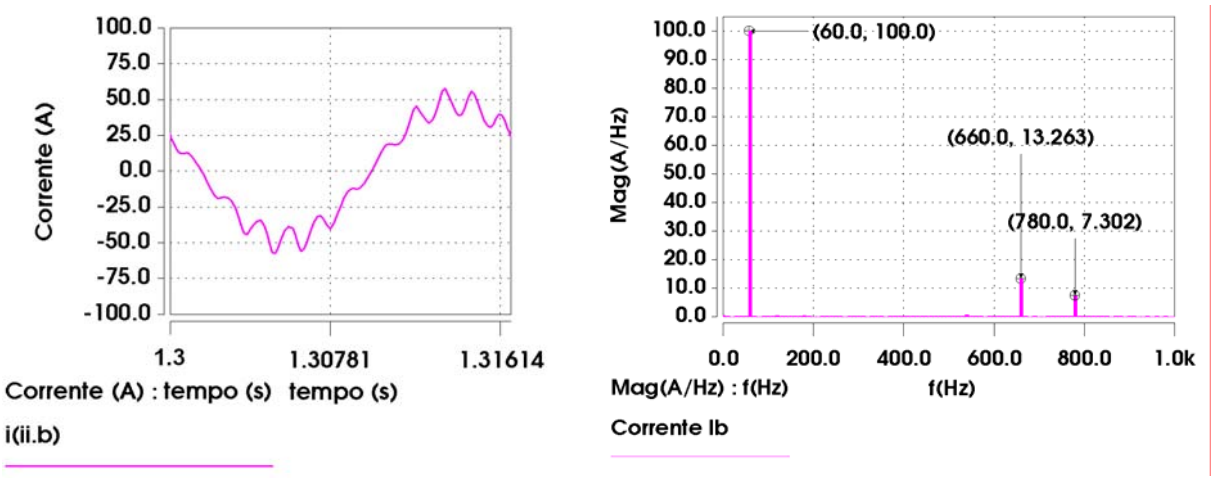
Os resultados obtidos mostraram que, para a situação em que o nível da tensão estava abaixo da nominal (carga pesada), o equipamento solicitou da rede uma corrente de aproximadamente 20 % da corrente nominal. No entanto,

durante uma súbita diminuição no carregamento do sistema o reator, num curto intervalo de tempo, passou a solicitar do sistema uma corrente da ordem de 55 % do valor nominal, e assim procedendo, foi possível manter a tensão do barramento sob estudo dentro dos limites aceitáveis.

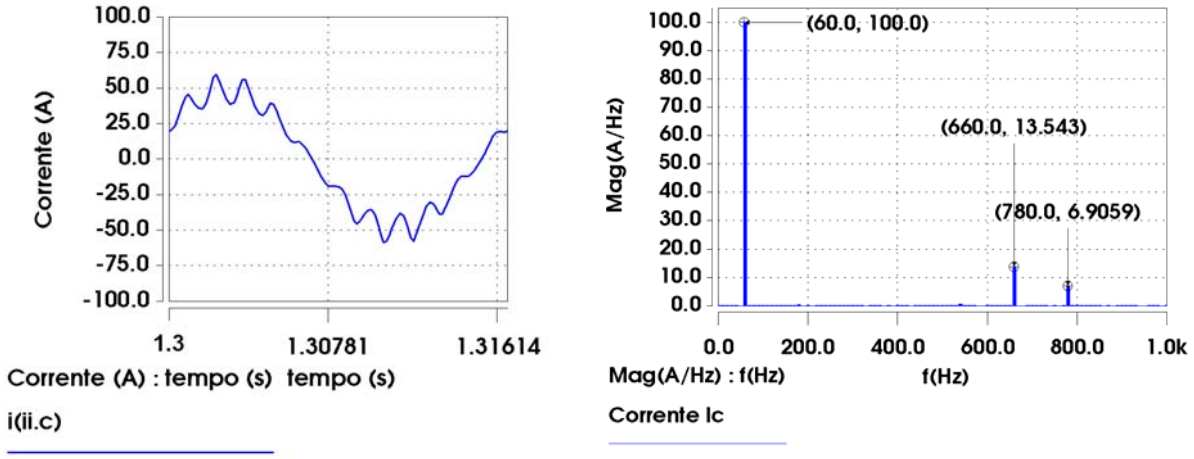
No que se refere às formas de onda das correntes de linha do reator e seus correspondentes espectros harmônicos, estas encontram-se detalhadas nas Figuras 4.5. Desta feita observa-se um maior nível de distorção para as mesmas, como previsto pela teoria sobre o assunto.



(a) Corrente da linha A.



Corrente da linha B.



(c) Corrente da linha C.

Figura 4.5 - Formas de onda das correntes de alimentação do reator saturado e respectivos espectros harmônicos - com reator saturado e ausência dos capacitores paralelo e série.

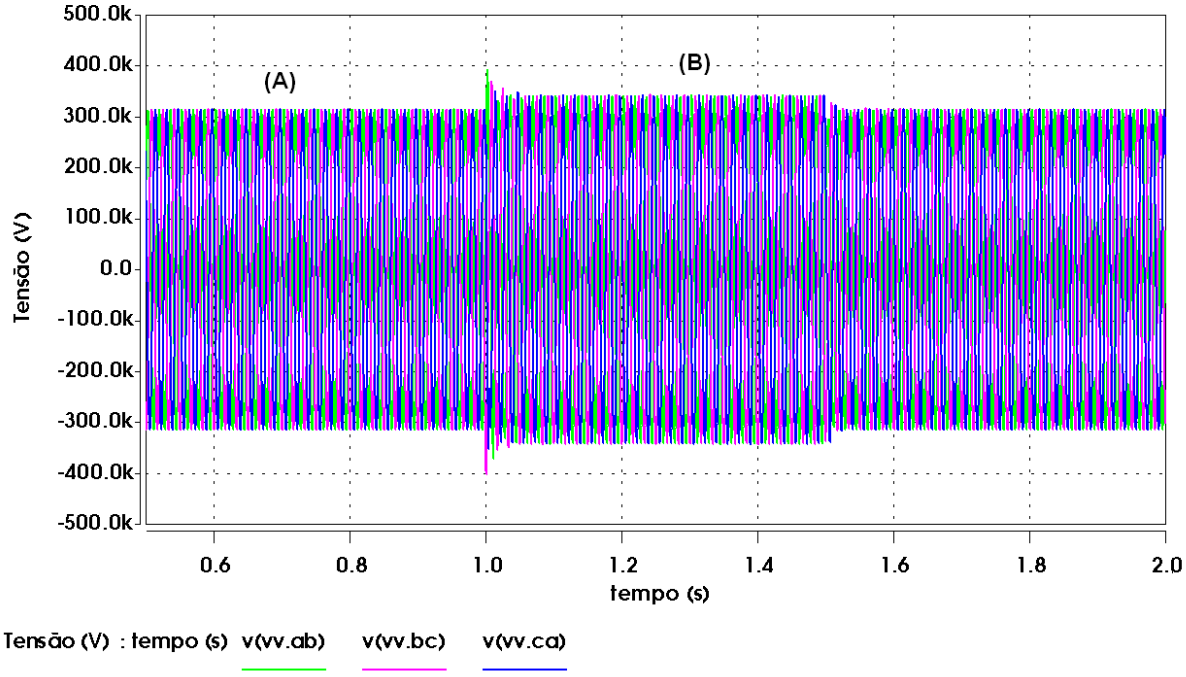
De acordo com os resultados obtidos nas Figuras 4.5, a distorção harmônica total de corrente (DHT_i) foi de 15 % (calculados em relação ao valor fundamental atual e não o nominal). Comparativamente a outros equipamentos não-lineares utilizados em sistemas de energia, a exemplo dos retificadores de potência, os valores detectados são compatíveis com os padrões normalmente encontrados.

4.2.3 Tensões no barramento de Sinop-MT, com a inserção do reator saturado e capacitor paralelo (sem capacitor série)

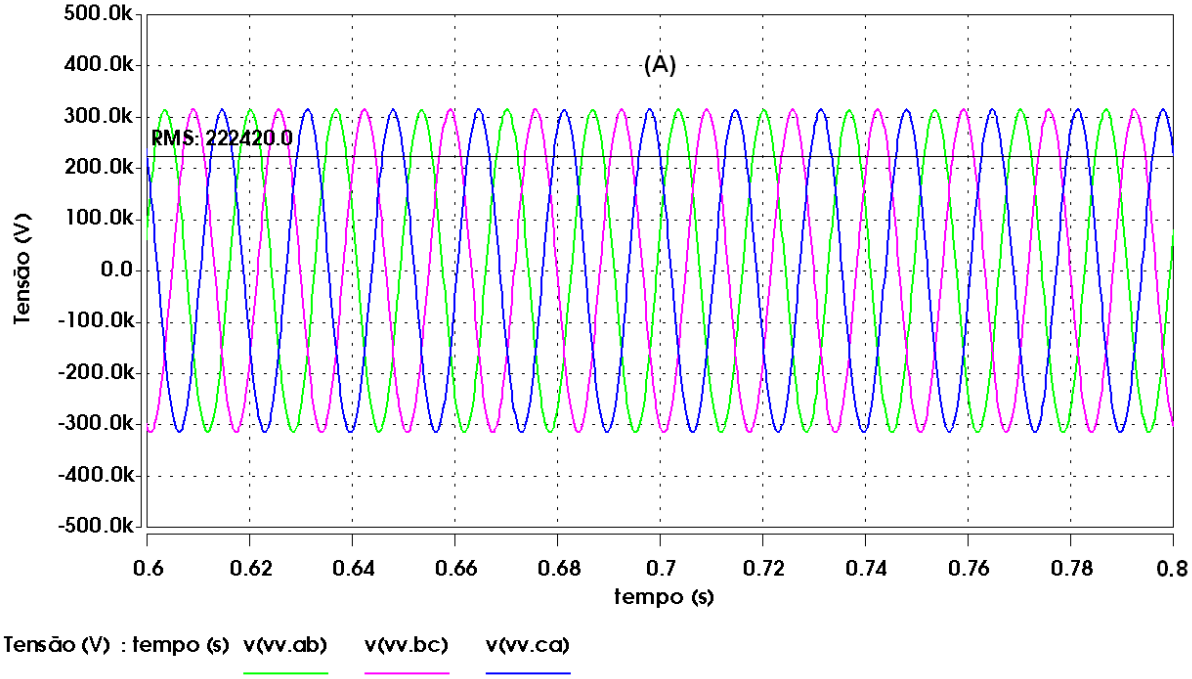
O presente caso considera a mesma situação operacional para a rede elétrica, exceto pelo fato que o compensador de reativos passa a contar com sua unidade indutiva (reator saturado) e o banco de capacitores em paralelo. Este, como informado anteriormente, também foi dimensionado com vistas a atender

a questão do afundamento de tensão e, dentro desta premissa, também deve oferecer o enquadramento da tensão para as situações que conduzam a uma redução da mesma.

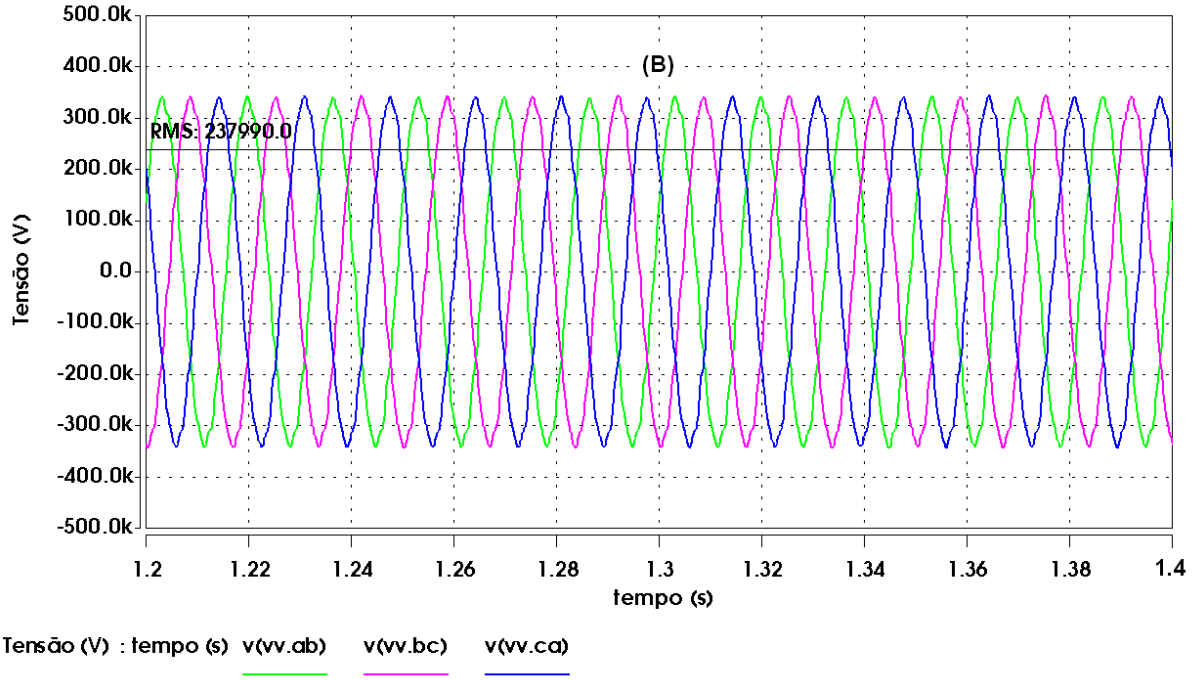
Considerando, pois o funcionamento do arranjo constituído pelo sistema elétrico supridor, cargas e compensador, os resultados obtidos para as alterações de carregamento impostas, no que tange às tensões em 230 kV, podem ser visualizados através das Figuras 4.6.



(a) Formas de onda das tensões do barramento de 230 kV ao longo do intervalo total de estudo.



(b) Zoom na região "A" – carregamento pesado.



(c) Zoom na região "B" – carregamento leve.

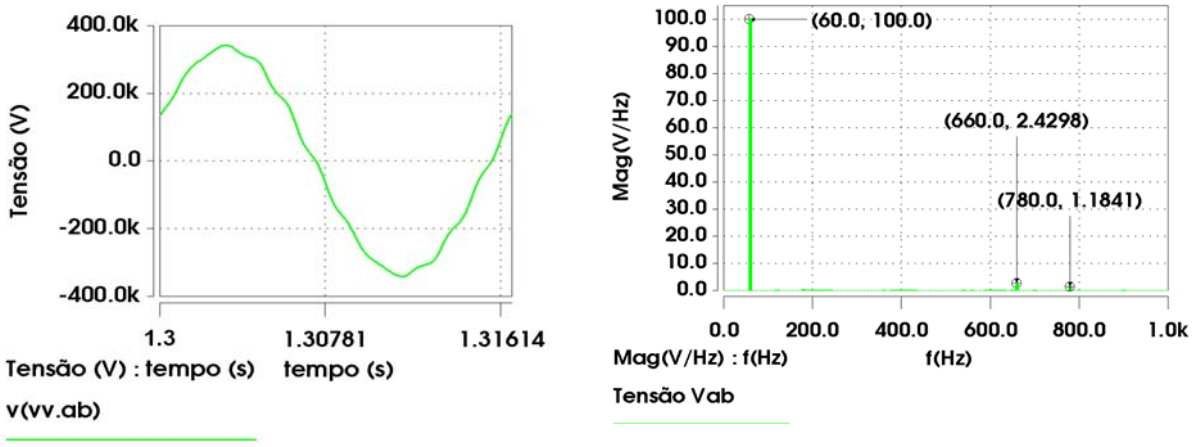
Figura 4.6 - Tensões na cidade de Sinop-MT – com a presença do reator saturado e do banco de capacitores paralelo.

O sistema, na forma proposta e diante das súbitas alterações de carga, conduziu aos seguintes resultados:

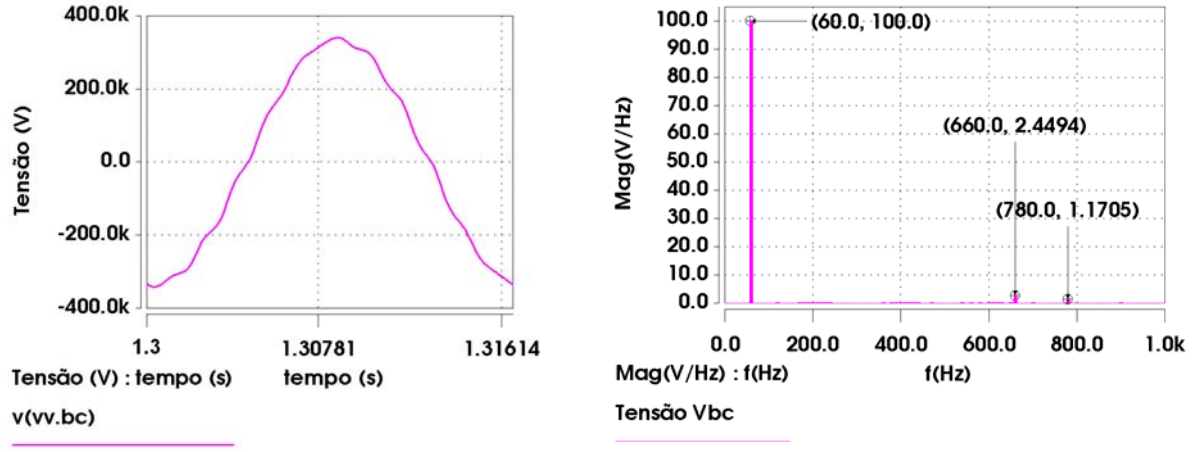
- ***Carregamento pesado***: os resultados demonstram que a tensão eficaz entre fases foi de 222,4 kV. Tal valor, se comparado a tensão nominal de 230 kV, encontra-se 3,3 % abaixo do valor nominal, portanto, dentro do limite mínimo recomendável, que é de 5 %.
- ***Carregamento leve***: a tensão eficaz ficou em torno de 238 kV. Este valor está 3,5 % acima do nominal, portanto, novamente, encontra-se dentro do limite máximo que é de 5 %.
- ***Tempo de resposta:*** os gráficos representativos do comportamento global evidenciam que o dispositivo compensador (sem o capacitor série) atua com uma rapidez da ordem de 2,3 ciclos, comprovando, desta forma, as expectativas previstas pela teoria que rege o assunto.

A partir dos resultados indicados nas Figuras 4.6, pode-se constatar a eficácia do compensador de reativos formado pelo reator saturado e seu banco de capacitores em paralelo quanto à manutenção das tensões dentro dos limites recomendáveis pelos órgãos do setor.

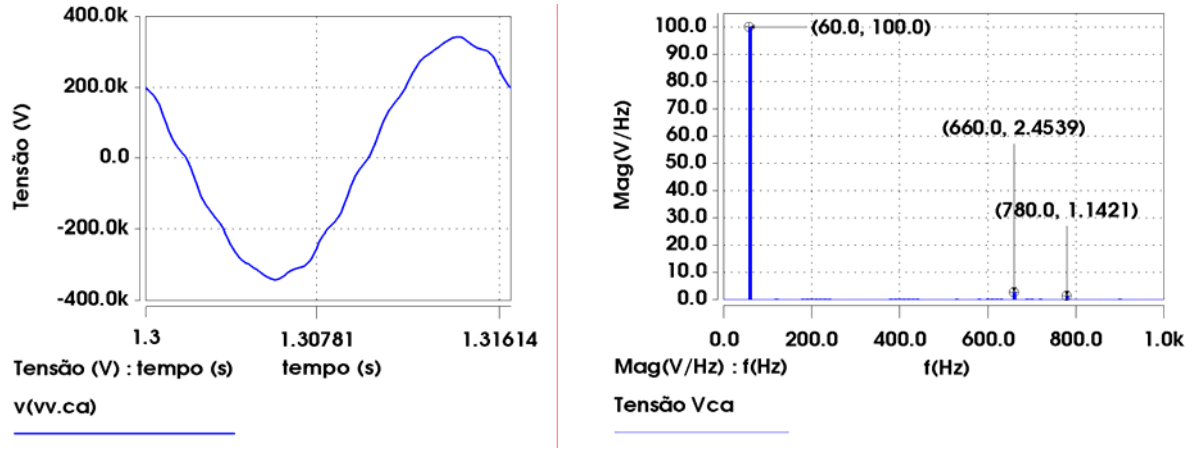
De modo análogo ao procedido anteriormente, as Figuras 4.7 expressam as formas de onda das tensões em mais detalhes e também os respectivos espectros harmônicos.



(a) Tensão AB.



(b) Tensão BC.

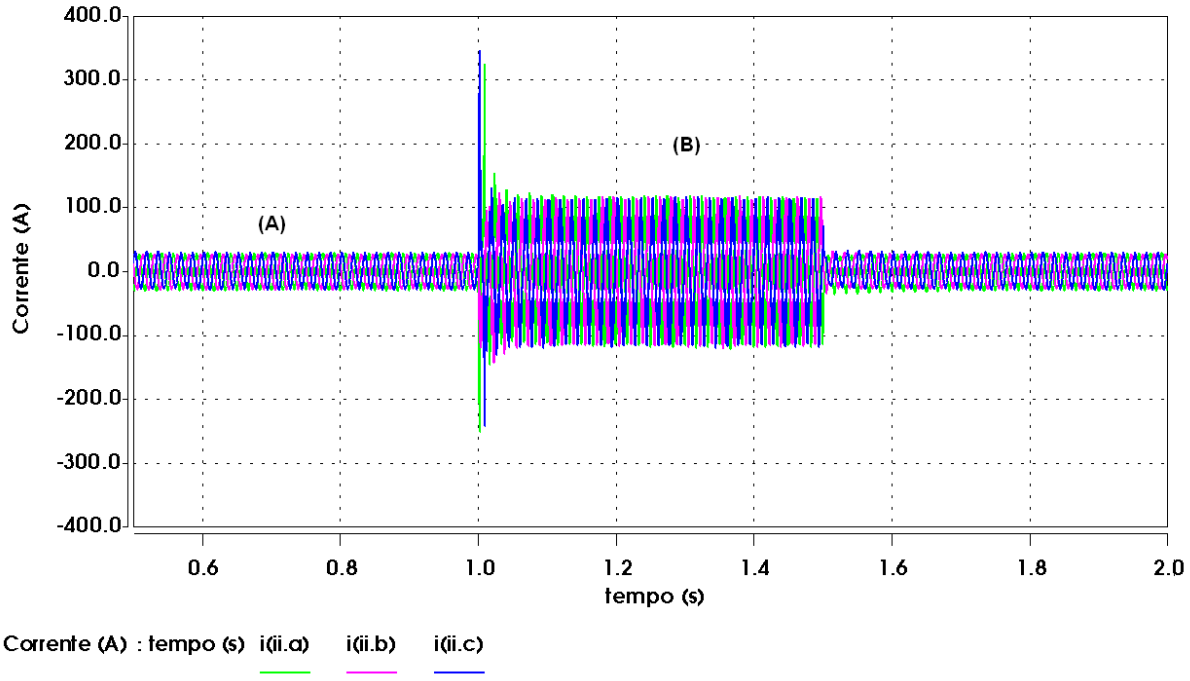


(c) Tensão CA.

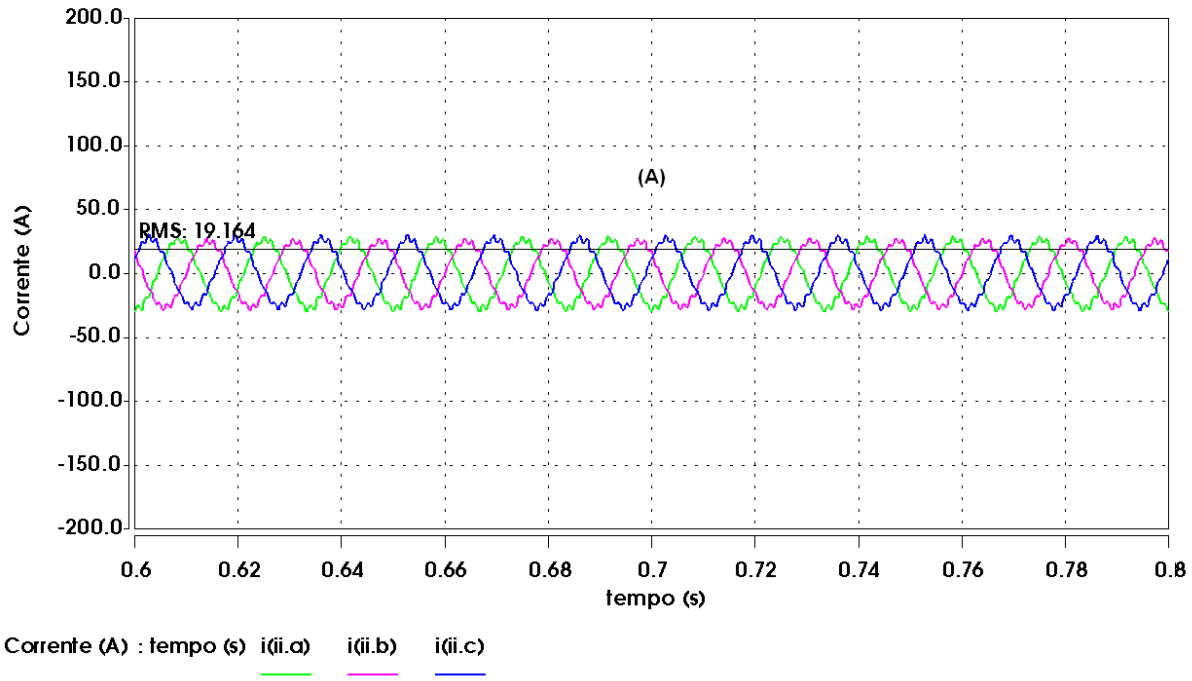
Figura 4.7 - Formas de onda das tensões do barramento de 230 kV e respectivos espectros harmônicos – com a presença do reator saturado, banco de capacitores paralelo e ausência do capacitor série.

Para o presente caso os valores das distorções harmônicas detectadas para o barramento de 230 kV ficaram nas imediações dos 2,7 %. Os resultados, ligeiramente inferiores aos encontrados para o caso anterior, se justificam pela presença do banco de capacitores, o qual pode atuar como amplificador ou atenuador das distorções. Para o presente caso ocorreu à última situação, muito embora, como discutido na sequência, tenha sido registrado um aumento das correntes harmônicas injetadas pelo reator.

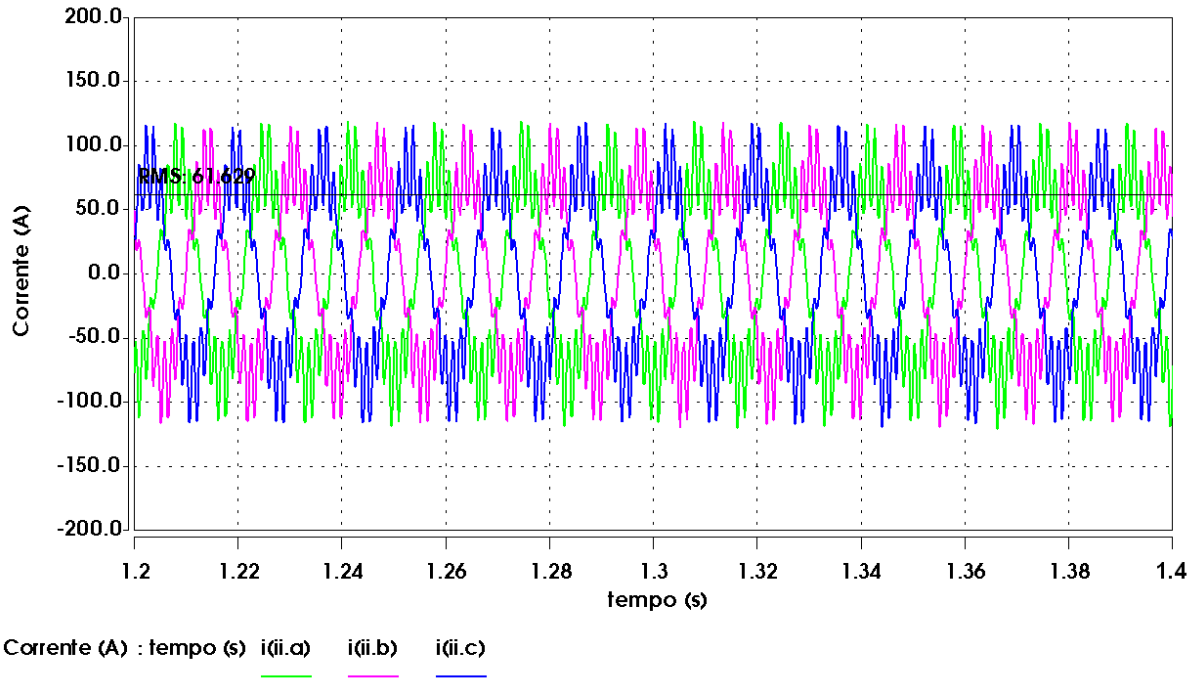
No que se refere aos resultados associados com as correntes absorvidas pelo reator saturado, estas encontram-se fornecidas nas Figuras 4.8.



(a) Correntes solicitadas pelo reator saturado – com capacitor paralelo e ausência de capacitor série.



(b) Zoom na região "A" – carregamento pesado.



(c) Zoom na região "B" – carregamento leve.

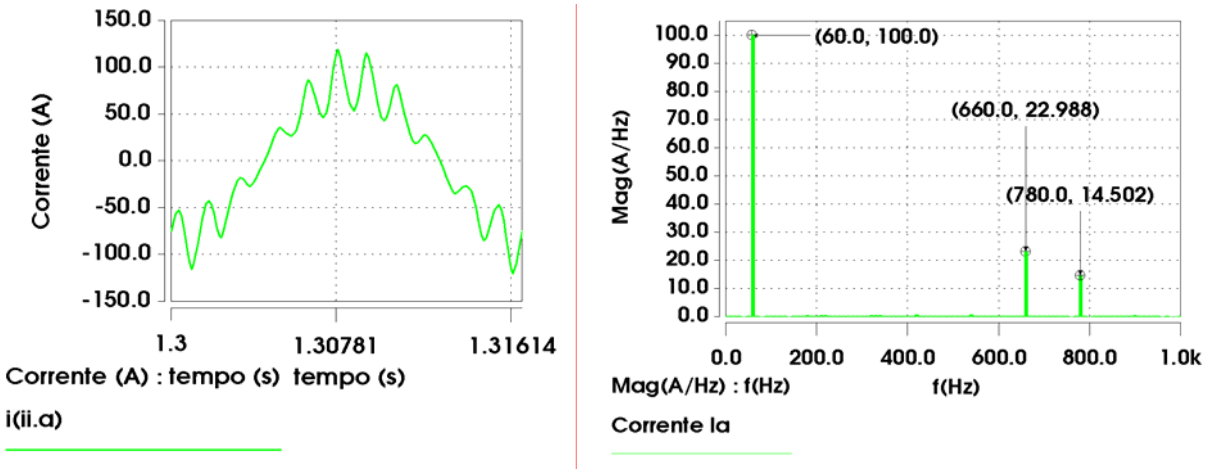
Figura 4.8 - Formas de onda das correntes solicitadas pelo reator saturado – com capacitor paralelo e ausência de capacitor série.

Os resultados apresentados nas Figuras 4.8 evidenciam que:

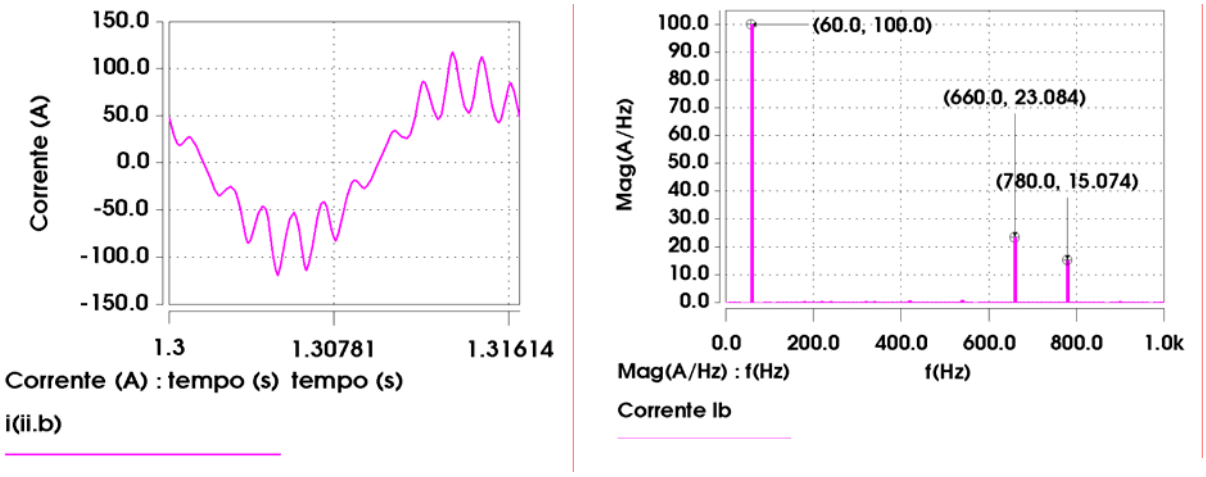
- ***Carregamento pesado***: neste caso o valor eficaz da corrente de linha solicitada pelo reator saturado foi de 19,16 A.
- ***Carregamento leve***: nesta condição a corrente de linha requerida pelo reator saturado foi de 61,63 A.

Através destes resultados, pode-se constatar que os valores eficazes das correntes solicitadas pelo reator saturado, comparativamente ao caso anterior, mostraram elevações em seus valores. Como previsto, a presença do banco de capacitores causa uma elevação das tensões no barramento ao qual o reator encontra-se conectado. Em resposta a isso, para cumprir seu papel de impedir a variação das tensões em seus terminais, o reator é conduzido a um maior nível de saturação e isto determina um incremento da potência reativa solicitada do sistema. Para atender a tal demanda as correntes correspondentes são majoradas e isto ocasionou um novo nível de operação que aumentou as correntes solicitadas do sistema para ambas as condições de carregamento. O percentual da corrente eficaz para a condição de carregamento pesado em relação à corrente nominal ficou em torno de 30%. Para a condição de carga leve, pode-se dizer que o reator saturado praticamente atingiu sua condição de funcionamento nominal, tendo em vista que a corrente do equipamento para a condição nominal de funcionamento é de 62,75 A, ou seja, a nova corrente do reator foi de 98,3% do respectivo valor nominal.

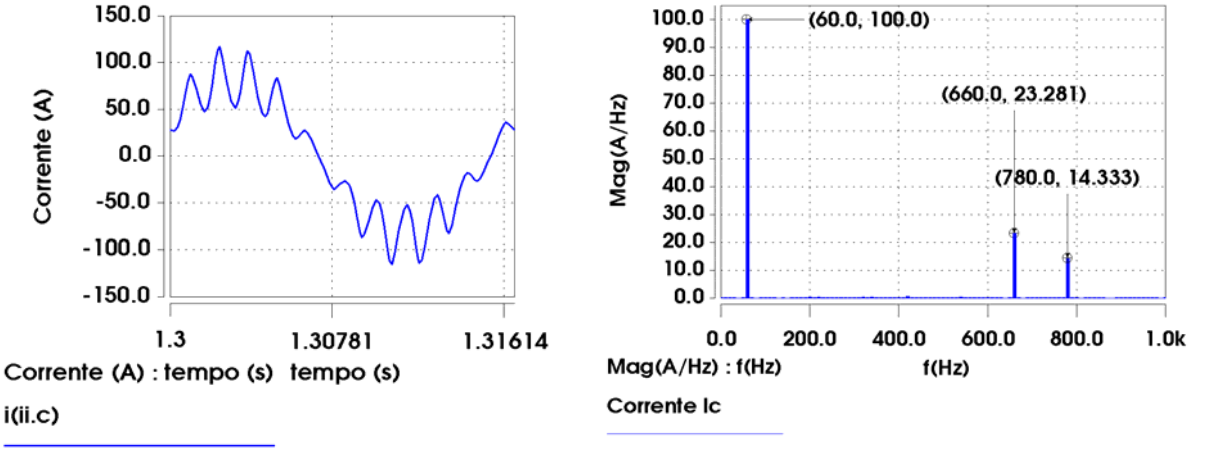
A seguir, nas Figuras 4.9, tem-se maiores detalhes das formas de onda das correntes visando, sobretudo, a análise das mesmas quanto às questões das distorções harmônicas.



(a) Corrente de linha A.



(b) Corrente de linha B.



(c) Corrente de linha C.

Figura 4.9 - Formas de onda das correntes de alimentação do reator saturado e respectivos espectros harmônicos – com capacitor paralelo e ausência de capacitor série.

De acordo com as informações contidas nas Figuras 4.9, a distorção harmônica total de corrente (DHT_i) ficou em torno de 27,5 %. Tal valor, calculado com base num valor de referência correspondente ao nível fundamental de operação, se mostra, mais uma vez, condizente com vários equipamentos não-lineares de potência. Também, ressalta-se que, tais distorções referem-se ao conteúdo espectral das correntes do reator e não são as mesmas injetadas na rede de suprimento (devido ao capacitor paralelo).

4.2.4 Tensões no barramento de Sinop-MT, com a inserção do reator saturado e dos capacitores (paralelo e série)

Muito embora os resultados apresentados pelo reator saturado em conjunto com o banco de capacitores paralelo tenham se mostrado satisfatórios, como estabelecido neste trabalho, o desempenho do equipamento pode ainda ser melhorado pela inserção de um capacitor série no conjunto. Este esperado incremento das características operativas do compensador final se deve, sobremaneira, aos efeitos que o capacitor série exerce sobre o que se denomina por "estatismo" do equipamento, isto é, sobre sua característica VxI (tensão versus corrente) ou VxQ (tensão versus potência).

O fundamento da afirmativa acima está alicerçado no fato que, pela inclusão de uma reatância capacitiva em série com outra, de característica eminentemente indutiva (reator), parte desta última é compensada, resultado, assim, que este ramo seja visto pelo sistema como uma impedância menor. À luz disto, o reator saturado será afetado quanto ao seu funcionamento, passando, para uma mesma tensão, a operar num maior nível de saturação. Isto resulta, ao final, numa melhoria da característica da relação entre a tensão do barramento de

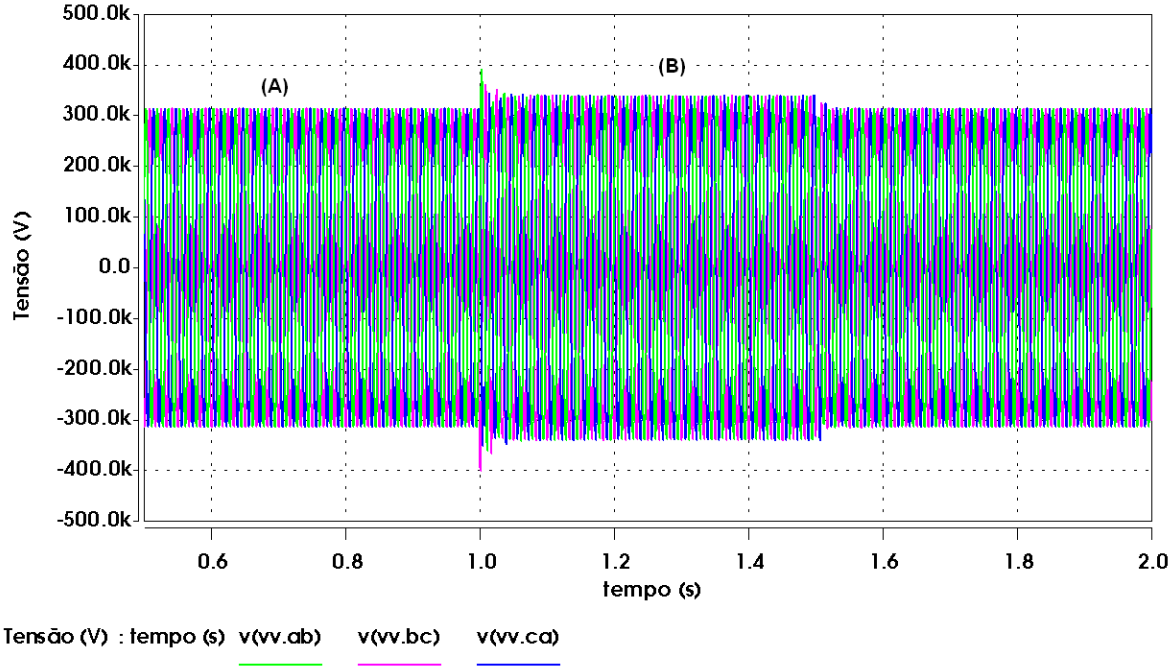
suprimento do compensador em relação à potência do reator. Naturalmente, para que isto não ocasione sobrecargas para o reator, o mesmo deverá ser adequadamente previsto para o funcionamento nestas condições.

Não obstante os aspectos positivos supra mencionados, vale observar que a inclusão de capacitores em conjunto com unidades magnéticas pode resultar em fenômenos indesejáveis, a exemplo das ferroressonâncias, ressonâncias harmônicas, etc. Portanto, torna-se imperativo que estudos sejam conduzidos com vistas ao conhecimento do tema e, caso haja a manifestação de efeitos prejudiciais, que estes sejam previamente conhecidos e mitigados.

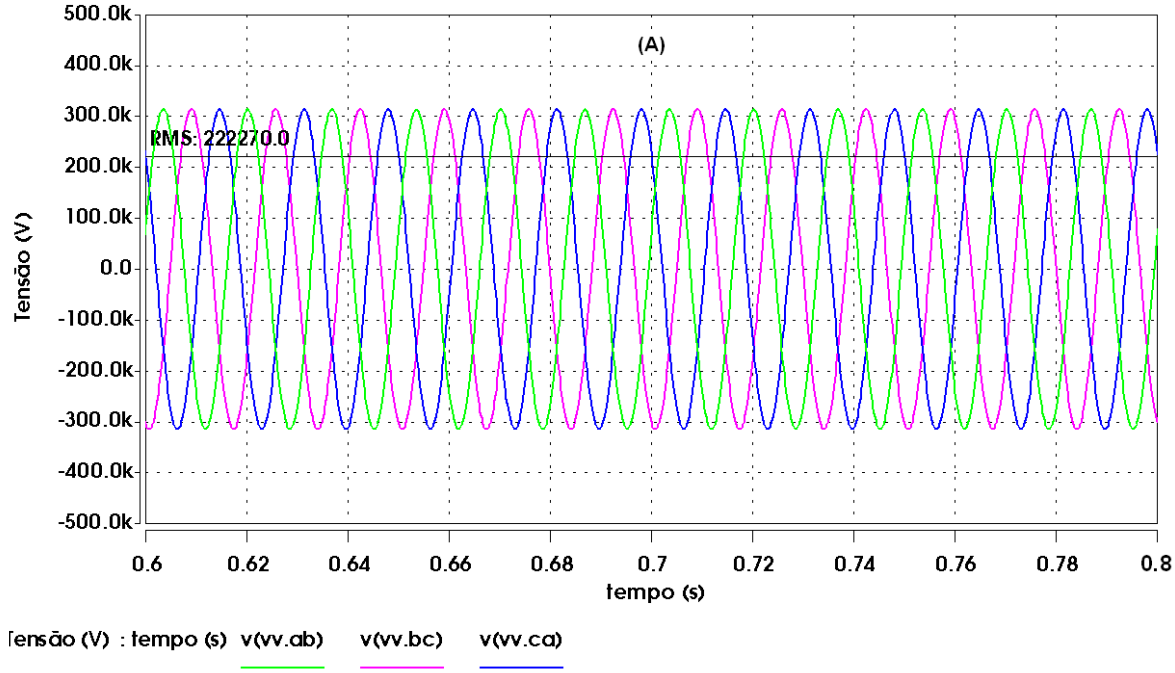
Inserido, pois dentro destes propósitos, os estudos subsequentes, direcionados a avaliação operativa do compensador com suas três unidades básicas constituintes, constituem-se no foco desta unidade da dissertação.

As investigações conduzidas, descritas e discutidas nesta etapa dos trabalhos estão, mais uma vez, atreladas com as mesmas condições operativas anteriormente empregadas. Assim, utilizando o mesmo arranjo elétrico, as mesmas variações de carga e o compensador, agora com um banco de capacitores série, escolhido de forma a proporcionar uma melhoria do estatismo ou da regulação de tensão, foram produzidos os resultados subsequentes. Ressalta-se que a reatância do banco de capacitores série foi determinada para uma compensação de 10% da reatância original do reator na região saturada.

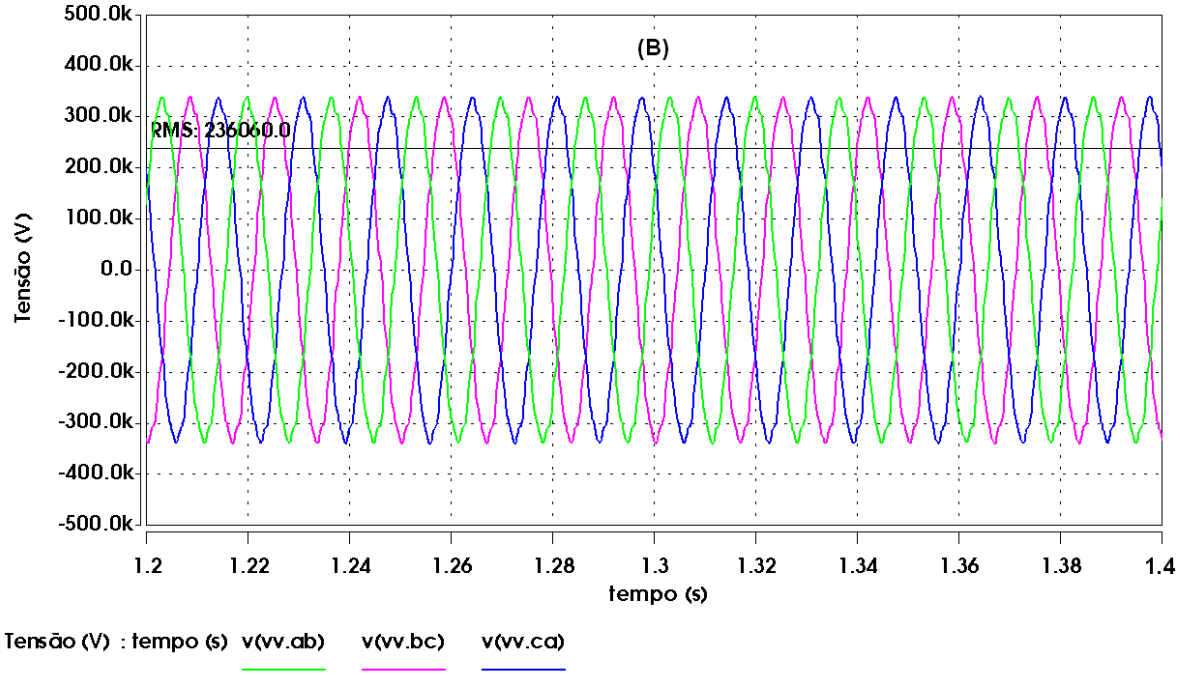
As Figuras 4.10 expressam as formas de onda das tensões do barramento analisado, frente às variações de carga do sistema já conhecidas, levando em consideração o compensador estático de reativos em sua forma completa.



(a) Formas de onda das tensões do barramento de 230 kV ao longo do intervalo total de estudo.



(b) Zoom da região "A" – carregamento pesado.



(c) Zoom da região "B" – carregamento leve.

Figura 4.10 - Tensões na cidade de Sinop-MT – com a presença do reator saturado e dos capacitores (paralelo e série).

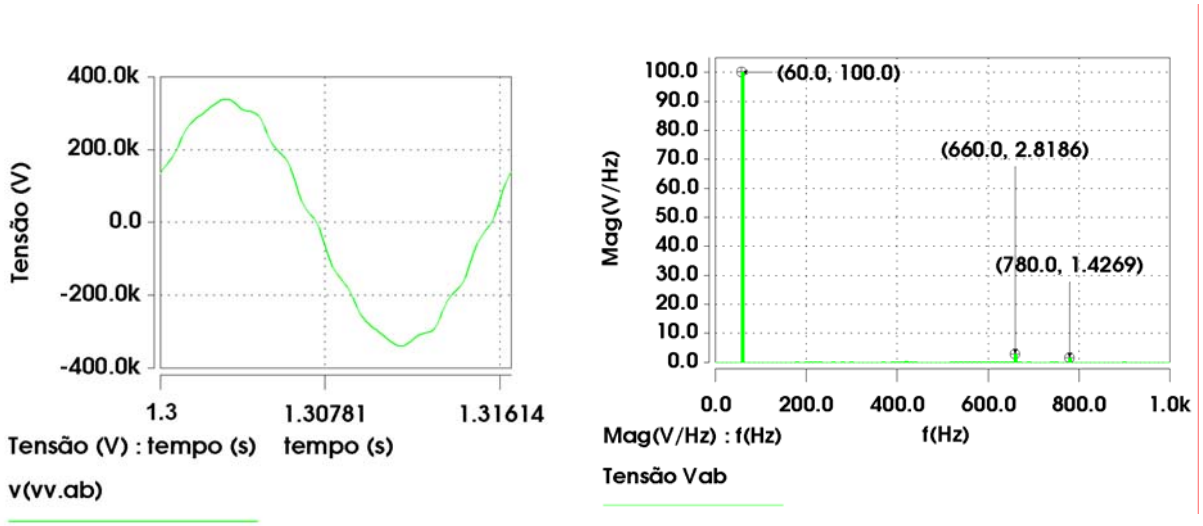
Os resultados numéricos obtidos revelam que:

- ***Carregamento pesado***: para esta condição, o valor eficaz das tensões entre fases foi de 222,3 kV, estando este, 3,3 % abaixo do valor nominal. Logo, este se apresenta dentro do limite mínimo adequado, que é de 5 %.
- ***Carregamento leve***: o valor eficaz das tensões, para esta situação ficou em torno de 236 kV. Este valor está 2,6 % acima do valor nominal para esta grandeza, e dentro do limite máximo adequado que é de 5 %.
- ***Tempo de resposta:*** os gráficos representativos do comportamento global evidenciam que o dispositivo compensador (com o capacitor

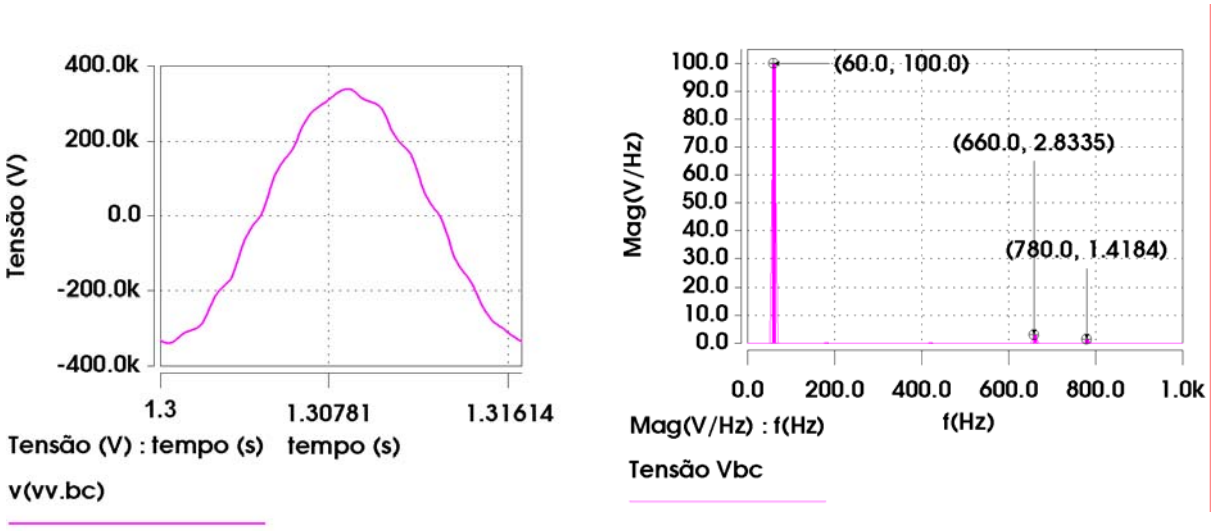
série) atua com uma rapidez da ordem de 2,8 ciclos, comprovando, desta forma, as expectativas previstas pela teoria que rege o assunto.

Os resultados obtidos das Figuras 4.10, demonstraram que o compensador a núcleo saturado, na sua composição completa, apresentou resultados ainda melhores do que aqueles apresentados pelo compensador formado pelo reator saturado e banco de capacitores paralelo. Tais melhorias ficaram destacadas para a condição de carregamento leve, onde as tensões que para o caso anterior, que eram de 238 kV passaram para 236 kV. Para que tal melhoria ocorresse, embora modesta para o caso sob análise, a corrente absorvida pelo reator foi, para o presente caso, um pouco maior que aquela constatada quando da ausência do capacitor série. Isto será visto em maiores detalhes quando da análise das correntes absorvidas pelo ramo indutivo do compensador.

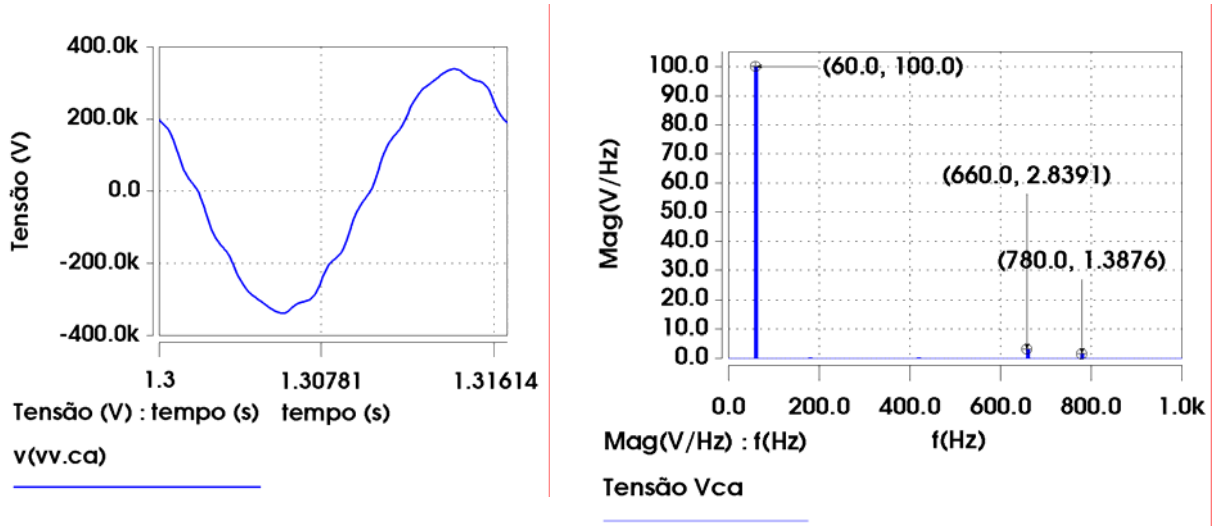
Nas Figuras 4.11 observam-se, em maiores detalhes, as tensões fase-fase e seus respectivos espectros harmônicos.



(a) Tensão AB.



(b) Tensão BC.

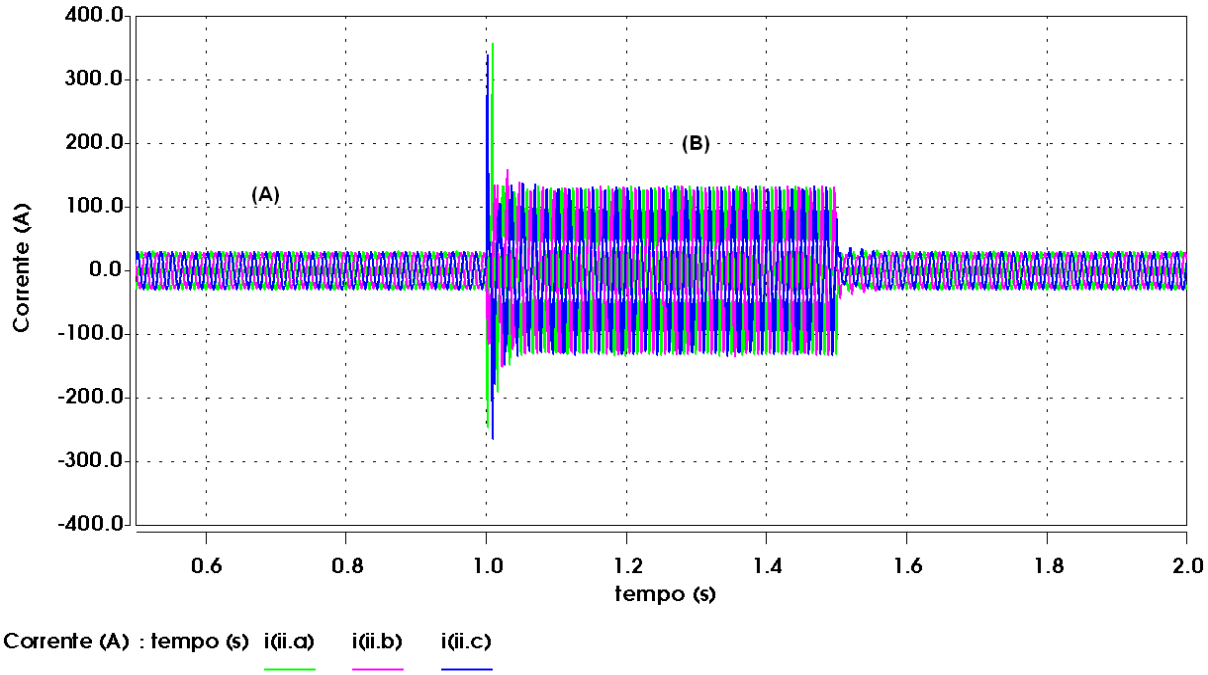


(c) Tensão CA.

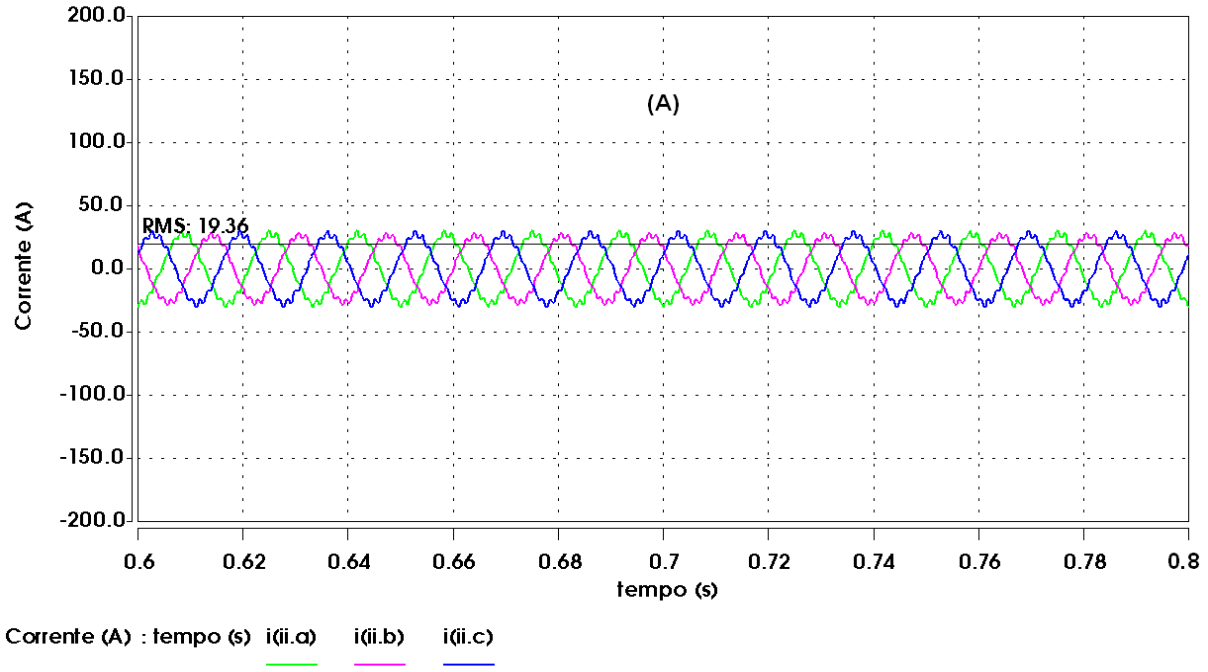
Figura 4.11 - Formas de onda das tensões do barramento de 230 kV e respectivos espectros harmônicos – com a presença do reator saturado e dos capacitores (paralelo e série).

Para a situação operacional sob consideração constata-se que a distorção harmônica total de tensão manifestada no barramento de 230 kV da cidade de Sinop, ficou em torno de 3,1 %. Este resultado se mostrou um pouco superior, quando comparado ao caso anterior. Isto pode ser justificado pela modificação do ponto de operação do reator saturado, como já explicado, e que conduziu o dispositivo magnético a um maior nível de saturação.

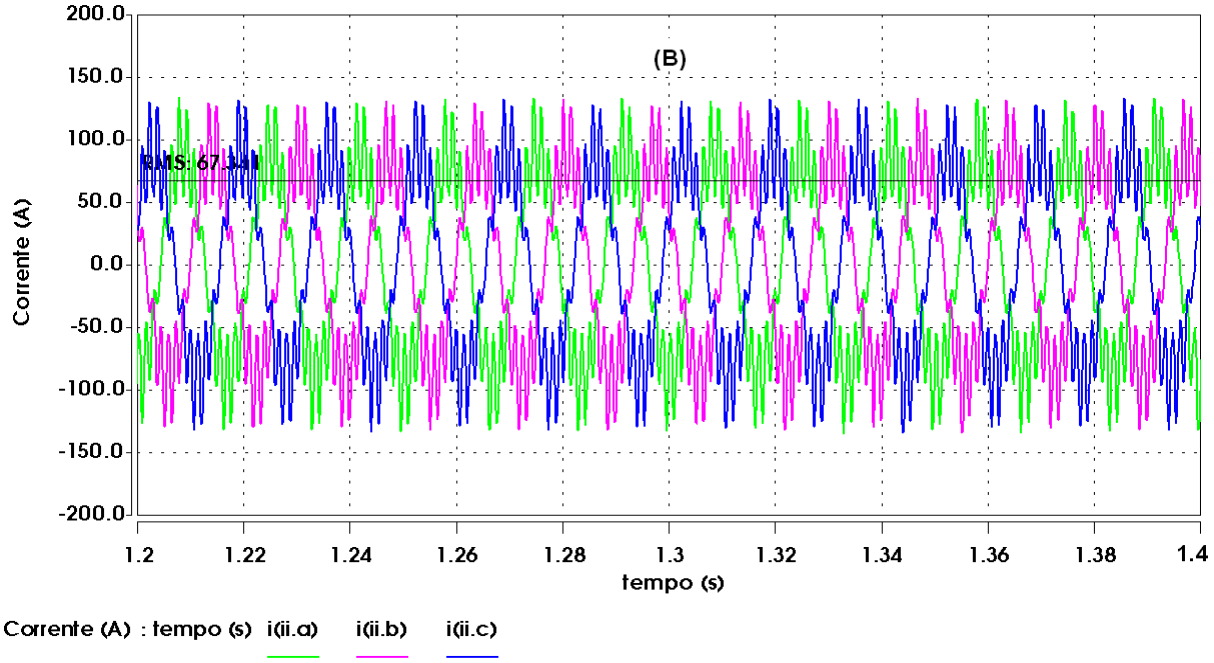
No que tange aos resultados referentes às correntes de linha absorvidas pelo reator saturado, estas se encontram apresentadas nas Figuras 4.12.



(a) Correntes solicitadas pelo reator saturado – com a presença dos capacitores (paralelo e série).



(b) Zoom na região "A" – carregamento pesado.



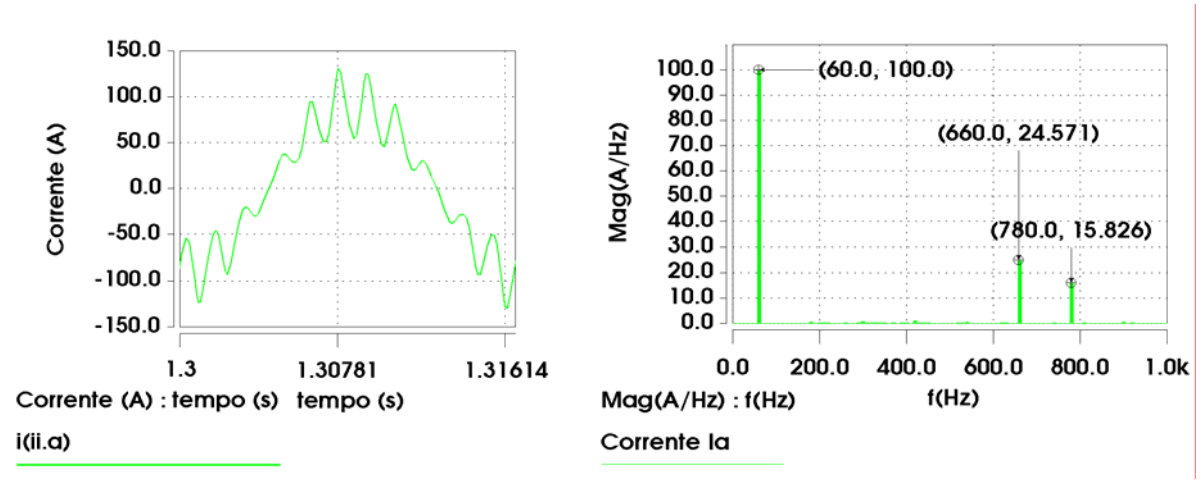
(c) Zoom na região "B" – carregamento leve.

Figura 4.12 - Formas de onda das correntes solicitadas pelo reator saturado – com a presença dos capacitores (paralelo e série).

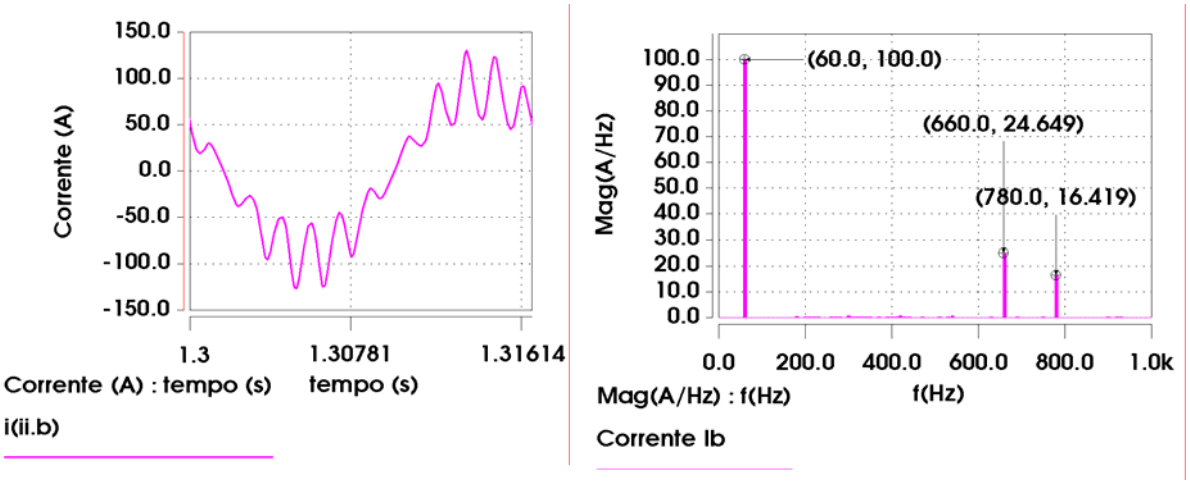
Os resultados anteriores permitem observar que:

- ***Carregamento pesado***: para esta condição, o valor eficaz da corrente de linha solicitada pelo reator saturado foi de 19,36 A.
- ***Carregamento leve***: nesta condição de carregamento, a corrente de linha requerida pelo reator saturado foi de 67,3 A.

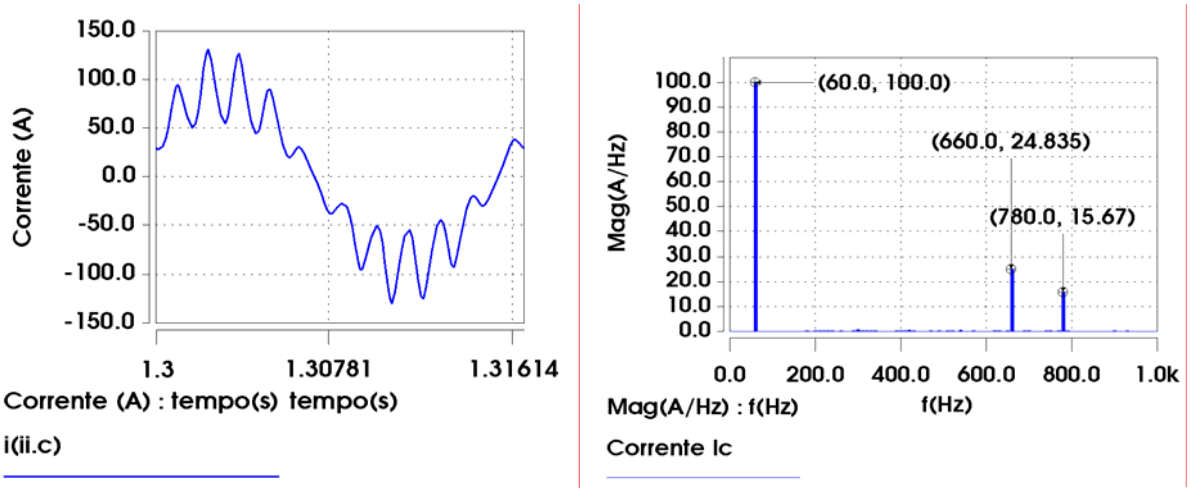
Os desempenhos acima discutidos evidenciam, pois que houve uma alteração no ponto de operação do reator saturado, que por sua vez absorveu uma maior corrente do sistema, principalmente na condição de carregamento leve. O incremento ocorrido na corrente ficou em torno de 7 %. Este aumento na corrente solicitada pelo reator justifica a redução em torno de 2 kV ocorrida na tensão. As Figuras 4.13 mostram, em detalhes, as formas de onda das correntes já estabilizadas e seus respectivos espectros harmônicos.



(a) Corrente da linha A.



(b) Corrente da linha B.



(c) Corrente da linha C.

Figura 4.13 - Formas de onda das correntes de alimentação do reator saturado e respectivos espectros harmônicos – com a presença dos capacitores (paralelo e série).

No que se refere aos níveis obtidos para as distorções harmônicas totais para as correntes, estes se apresentam nas imediações de 29,4 %, valor este um pouco superior àquele apresentado para a situação anterior.

4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo teve como meta principal avaliar o compensador a núcleo saturado sob condições dinâmicas de operação e de regime permanente. Para tanto o sistema elétrico em foco, os carregamentos associados com a cidade de Sinop, e ainda, a estrutura constituinte do compensador de reativos a núcleo saturado foram alteradas. Dentro deste contexto várias situações operativas foram avaliadas e, dentre os diversos casos investigados, foram selecionadas situações típicas factíveis de ocorrência para o complexo sob foco.

Dentro destas premissas, os diversos estudos realizados evidenciaram que:

- O sistema analisado demonstrou, em um primeiro momento, que na ausência de qualquer dispositivo de compensação, os níveis de tensão do barramento de 230 kV da cidade de Sinop-MT, encontravam-se fora dos limites mínimo e máximo estabelecidos pelos órgãos reguladores, caracterizando, assim, a necessidade da instalação de um equipamento de compensação de reativos destinado a regulação da tensão neste local;
- O reator saturado demonstrou claramente sua propriedade de regulação de tensão para as condições de elevação de tensão, todavia, o equipamento, sem a presença do banco de capacitores em

paralelo, como seria esperado, foi ineficaz quando da ocorrência de tensões abaixo dos valores recomendados. Nas condições impostas para a presente situação foi possível observar questões associadas com o tempo de resposta do reator, que se mostrou compatível com as citações encontradas na literatura, e ainda, ficou evidenciada, com clareza, a questão da geração harmônica do reator nas condições operativas sob saturação;

- A operação adequada do compensador, no que tange a regulação de tensão, tanto quando da ocorrência de elevação quanto afundamento de tensão, foi realçada quando da operação conjunta do reator saturado com o banco de capacitores paralelo. Nesta situação, as tensões para as condições de carregamento impostas para o sistema se mantiveram dentro dos limites adequados recomendados pelos órgãos reguladores do setor, demonstrando assim a eficácia do dispositivo. Quanto à questão do tempo de resposta do compensador e também das distorções harmônicas, mais uma vez foram ratificadas previsões tradicionalmente feitas para o funcionamento do compensador em pauta;
- A situação representativa do funcionamento do compensador em sua forma mais completa, isto é, com a presença das três unidades de potência básicas constituintes do equipamento, foi também considerada nos estudos. Diante desta conjuntura ficou esclarecido que o funcionamento do regulador de tensão foi objeto de melhorias quando ao seu efeito final sobre as tensões. Para os parâmetros utilizados para o compensador não foram observadas anormalidades operativas vinculadas com agravamento de transitórios, ferroressonâncias ou mesmo ressonâncias harmônicas. Entretanto, é

importante salientar que tais constatações não podem ser estendidas a outros casos e parâmetros, sendo que, cada qual exigirá estudos similares aos aqui conduzidos. No que tange à questão da regulação da tensão, mesmo tendo-se empregado um capacitor série associado com uma compensação modesta da reatância saturada do reator, obteve-se ganhos encorajadores para a continuação do emprego desta técnica para a melhoria do estatismo do compensador. Finalmente, foi observado que os efeitos do capacitor série sobre o tempo de resposta do conjunto não foi significativo, o compensador continuou a exercer suas funções em intervalos inferiores a 3 ciclos.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES GERAIS

Não obstante as considerações e comentários feitos ao término de cada capítulo considera-se essencial neste momento, destacar as principais constatações obtidas dos estudos realizados ao longo desta dissertação.

O Capítulo I foi direcionado a uma contextualização do tema central desta pesquisa, com destaque a apresentação de uma síntese dos principais documentos bibliográficos encontrados, e ainda, a identificação das áreas ainda merecedoras de atenção sobre a questão dos compensadores estáticos que utilizam o reator a núcleo saturado como dispositivo para o controle dinâmico da potência reativa. Uma vez realizadas tais tarefas, foi também estabelecido o planejamento do projeto que culminou na presente dissertação.

Objetivando oferecer uma contribuição didática à formação do leitor e sobre a aplicabilidade de compensadores estáticos de reativos, o Capítulo II destacou os principais aspectos relacionados com o controle de tensão nos sistemas elétricos de potência por meio da compensação reativa. Uma vez estabelecidos os fundamentos que regem as estratégias para a regulação da tensão, foram tecidos comentários gerais voltados para o emprego da filosofia de compensação empregando os reatores a núcleo saturado operando conjuntamente com bancos de capacitores em paralelo e em série com a

mencionada unidade magnética. Dentro deste contexto, foram ainda contemplados os fundamentos físicos que norteiam a construção dos reatores saturados, com destaque aos arranjos dos enrolamentos para assegurar uma operação adequada em que pese à redução do conteúdo harmônico associado com as correntes de linha deste equipamento.

O cerne do Capítulo III foi dedicado aos estudos de desempenho transitório quando do processo de energização dos componentes básicos que formam o compensador estático. Para tanto foi selecionado um sistema elétrico com características e propriedades reais, em operação na região norte do estado do Mato Grosso. O ponto focal considerado para os estudos corresponde ao barramento de suprimento, em 230 kV, de uma próspera cidade daquele estado, qual seja: Sinop. A grande particularidade deste arranjo está numa configuração radial, longa distância e um consumo com reconhecido nível de variação da carga. À luz destas condições, à priori sabe-se que tal barramento apresenta, sem a inserção de mecanismos reguladores, reconhecidos problemas com os níveis de tensão. Este fato resultou na implementação, nos últimos tempos, de um compensador estático de reativos para a estabilização da tensão dentro dos padrões exigidos pela regulamentação em vigor.

Uma vez realizado o dimensionamento dos parâmetros básicos de um compensador de reativos, hipoteticamente escolhido como um CERNS procedeu-se à implementação do equipamento numa base computacional que emprega técnicas de modelagem no domínio do tempo. Assim agindo tornou-se factível estudos computacionais de desempenho do complexo elétrico como um todo, isto é: rede de alimentação, carga e compensador. Impondo distintas condições operacionais e também para a composição física do regulador de tensão utilizado foram então feitos vários estudos investigativos. Os primeiros, descritos no Capítulo III, tiveram por meta a identificação de eventuais problemas decorrentes dos processos de energização das unidades magnéticas e

capacitivas que formam o compensador. Os resultados demonstraram que os máximos valores atingidos pelas correntes durante o transitório de energização do equipamento, no que tange a corrente solicitada pelo reator saturado, se mostraram similares àqueles detectados quando da energização de transformadores. Portanto, os valores encontrados para tais correntes estão em consonância com as preocupações e soluções já adotadas quando do projeto e construção destes últimos produtos. Complementarmente, visando o conhecimento dos fenômenos associados com a conexão dos reatores e seus respectivos bancos de capacitores, estudos adicionais revelaram que, uma vez realizados os chaveamentos do reator e do banco paralelo em momentos distintos, os efeitos registrados se apresentaram nas mesmas proporções que aqueles obtidos com o reator isolado.

O Capítulo IV contemplou estudos de desempenho computacional do compensador visando a identificação da sua operação quando da manifestação de súbitas variações de carga, além de investigações sobre as propriedades operativas quando da estabilização do processo de regulação da tensão. Dentro destas premissas, os diversos estudos realizados evidenciaram que o sistema analisado demonstrou, em um primeiro momento, que na ausência de qualquer dispositivo de compensação, os níveis de tensão do barramento de 230 kV da cidade de Sinop-MT, encontravam-se fora dos limites mínimo e máximo estabelecidos pelos órgãos reguladores, isto é, as maiores e menores tensões se encontravam em patamares superiores às variações de 5 % permitidas para a classe de tensão em pauta, para que os padrões de suprimento sejam considerados como adequados. Após a inserção apenas da unidade magnética, constatou-se que os problemas associados com tensões elevadas foram resolvidos, enquanto que os níveis inferiores foram ainda mais prejudicados. Para as condições impostas para a presente situação foi possível observar que o tempo de resposta do reator se mostrou compatível com as indicações apontadas

pela literatura, ou seja, o equipamento reagiu em um intervalo de tempo da ordem de 2 ciclos. No que tange às distorções harmônicas para as correntes, como seria esperado, apenas aquelas caracterizadas pelas ordens $12K\pm1$ se fizeram presentes.

Quando da inserção do banco de capacitores em paralelo com o reator, verificou-se então que tanto os níveis superiores como inferiores para as tensões do barramento de 230 kV foram enquadrados dentro dos padrões definidos como adequados. Na presença deste componente capacitivo, novamente, tanto o tempo de resposta do compensador como as harmônicas de corrente se mantiveram nos padrões anteriormente observados, a não ser pela alteração dos níveis das componentes harmônicas que foram incrementadas face a presença do capacitor.

Finalmente, uma última situação, representativa do funcionamento do compensador em sua forma mais completa foi também considerada nos estudos. Diante desta conjuntura ficou esclarecido que o funcionamento do regulador de tensão, com o funcionamento conjunto do reator saturado, capacitor paralelo e capacitor série, ocasionou ganhos encorajadores que motivaram o emprego do capacitor série para a melhoria do estatismo do equipamento final. Não foram observados efeitos significativos do capacitor série sobre o tempo de resposta do conjunto e também não foram encontrados, para os estudos feitos, problemas atrelados com ressonâncias harmônicas.

Muito embora os resultados gerais tenham sido esclarecedores sobre a operação do complexo elétrico envolvendo rede de suprimento, carga e compensador de reativos a núcleo saturado, ressalta-se que o otimismo dos desempenhos obtidos não podem ser prontamente estendidos a outras situações e configurações. De fato, é importante ressaltar que cada sistema exigirá estudos próprios para a verificação das situações operacionais impostas e, uma vez constatados fenômenos prejudiciais, estes deverão merecer avaliações

complementares, inclusive com a implementação de possíveis soluções classicamente empregadas na engenharia elétrica.

Outro ponto a ser considerado está centrado nas questões merecedoras de futuros desenvolvimentos. Neste particular, após este período de dedicação ao tema focado nesta dissertação sugere-se que sejam realizados trabalhos adicionais com vistas a:

- Verificação experimental dos resultados obtidos através da construção de protótipos em escala reduzida e realização de experimentos em laboratórios;
- Investigações adicionais empregando para tanto outros arranjos e situações, visando a identificação de problemas operacionais não detectados para o sistema selecionado para o presente estudo;
- Avaliação de soluções mitigadoras para as questões transitórias e também para as distorções harmônicas;
- Estudos complementares sobre a sensibilidade do compensador para diferentes níveis de correção do estatismo.

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. 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. Recife, 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**,** p. 229 – 238, England, October 1952.

[5] - FISHER, F. J., FRIEDLANDER, E., **DC Controlled 100 MVA Reactor.** GEC Journal, p. 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, p. 55-66, October 1956.

[7] - THANAWALA, H. J., WILLIANS, 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.

[8] - OLIVEIRA, J. C., **Compensação de Reativos em Sistemas Elétricos.** Gráfica da UFU, Uberlândia, 1986.

[9] - 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.

[10] - AINSWORTH, J. D., FRIEDLANDER, E., RALLS, K. J., **Recent Developments Towards Long Distance AC Transmission Using Saturated Reactor.** International Conference on High Voltage DC and/or AC Power Transmission, London, November 1973.

[11] - 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.

[12] - STEVENSON, W. D., **Elements of Power Systems Analysis.** Mc-Graw Hill Book Company, 4th Edition, USA.

[13] - 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.

[14] - CARVALHO JUNIOR, M. A., **Steady State Representation of Reactive Compensating in HVDC Converter Station.** PhD Thesis, Umist, September 1983.

[15] - FERREIRA, F. M. C., **Aplicação de Reatores com Saturação Natural em Sistemas de Extra-Alta Tensão.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Dezembro 1998.

[16] - MAGNATA DA FONTE, L. A., **Reatores Saturados: Alguns Aspectos Operacionais e de Projeto.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Dezembro 1997.

[17] - 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.

[18] - 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 1995.

[19] - 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.

[20] - LEAL, F. S., **Reatores Saturados com Excitação Paralela.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Novembro 2000.

[21] - KUSKO, A., **Poliphase Closed-Core Reactors**. IEEE Transactions (Pas), Vol. 84, p. 57 – 64, January 1965.

[22] - PACHECO, E. J. P., **Systems Voltage Control Using Saturated Iron Cored Reactors.** PhD Thesis, Umist, November 1977.

[23] - GEC SWITCHGEAR LIMITED, **The Control of System Voltage Using AC Saturated Reactors**. GEC Publication.

[24] - 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.

[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, Uberlândia, Setembro 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 (SBQEE), Anais, Vol. II, p.356-361, Belém-PA, 2005.

[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 Performance Analysis of Treble-Tripler and Twin-Tripler Saturated Core Reactor Compensators.** In: VII Conferência Internacional de Aplicações Industriais (INDUSCON), Anais, Vol. Único, Recife-PE, 2006.

[28] - VASCONCELLOS, A. B., OLIVEIRA, J. C., APOLÔNIO, R., **Saturated Core Reactor Static Computational Versus Experimental Performance 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, Uberlândia, Setembro 2008.

[30] - PEREIRA, E. S., **Avaliação do Desempenho de um Protótipo de Reator Saturado em Escala Real: Uma Abordagem Experimental.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Setembro 2008.

[31] - MISKE, S. A., **Considerations for the Application of Series Capacitors to Radial Power Distribution Circuits.** In: Power Engineering Society Summer Meeting, Seattle, 2000.

[32] - MANEATIS, J. A., HUBACHER, E. J., ROTHENBUHLER, W. N., SABATH, J., **500 kV Series Capacitor Installations in California.** In: IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems (PAS), Vol. 90, p. 1138 – 1149, May 1971.

[33] - SANDOVAL, N., MOLINA, A., PETERSSON, A., STRÖMBERG, G., SAMUELSSON, J., **Introduction of Series Capacitors in the Venezuelan EHV-grid.** In: Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America, TDC '06. IEEE/PES, 2006.

[34] - LIMA, J. C., LINDBERG, P., **Operational Experience of 800 kV Series Capacitors.** Power Engineering Society Inaugural Conference and Exposition in Africa, Durban, South Africa, 2005.

[35] - ABDEL-AZIZ, E. Z., AL-MULHIM, M. A., **Application of Series Capacitors to the East-Central Tie Lines in Saudi Arabia.** Universities Power ENGINEERING Conference, 39 th International, 2004.

[36] - GRÜNBAUM, R., SAMUELSSON, J., **Series Capacitors Facilitate Long Distance AC Power Transmission.** Power Tech, IEEE, Russia, 2005.