

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



**UMA CONTRIBUIÇÃO PARA A MODELAGEM,  
CONSTRUÇÃO E ANÁLISE DE DESEMPENHO  
DE COMPENSADORES DE TENSÃO A REATOR  
SATURADO**

**João Areis Ferreira Barbosa Júnior**

**Uberlândia  
2013**

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

**UMA CONTRIBUIÇÃO PARA A MODELAGEM,  
CONSTRUÇÃO E ANÁLISE DE DESEMPENHO  
DE COMPENSADORES DE TENSÃO A REATOR  
SATURADO**

Tese apresentada por João Areis Ferreira Barbosa Júnior à Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

**BANCA EXAMINADORA:**

José Carlos de Oliveira, PhD – UFU (Orientador)  
Fernando Nunes Belchior, Dr – UNIFEI  
Ruth Pastôra Saraiva Leão, PhD – UFC  
José Rubens Macedo Junior, Dr – UFU  
Marcelo Lynce Ribeiro Chaves, Dr – UFU  
Milton Itsuo Samesima, Dr – UFU

Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG - Brasil

---

- B238c Barbosa Júnior, João Areis Ferreira, 1984-  
2013      Uma contribuição para a modelagem, construção e análise de  
desempenho de compensadores de tensão a reator saturado / João  
Areis Ferreira Barbosa Júnior. - 2013.  
177 f. : il.  
Orientador: José Carlos de Oliveira.  
Tese (doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Pro-  
grama de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.  
Inclui bibliografia.  
1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Sistema de energia elétrica -  
Controle de qualidade - Teses. 3. Reguladores de voltagem - Teses.  
I. Oliveira, José Carlos de, 1947- II. Universidade Federal de  
Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.  
III. Título.

---

CDU: 621.3

**UMA CONTRIBUIÇÃO PARA A MODELAGEM,  
CONSTRUÇÃO E ANÁLISE DE DESEMPENHO  
DE COMPENSADORES DE TENSÃO A REATOR  
SATURADO**

**João Areis Ferreira Barbosa Júnior**

Tese apresentada por João Areis Ferreira Barbosa Júnior à  
Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a  
obtenção do título de Doutor em Ciências.

---

Prof. José Carlos de Oliveira, Ph.D.  
(Orientador) – UFU

---

Prof. Edgard Afonso Lamounier Júnior, Ph.D.  
Coordenador do Curso de Pós-Graduação

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho a minha amada esposa Maria, aos meus pais João Areis e Ângela, a minha irmã Letícia e seu esposo Bymael, e as demais pessoas que se fizeram presentes e colaboraram para o desenvolvimento do mesmo.*

## AGRADECIMENTOS

À **Deus**, pela minha vida e por todas as graças e bênçãos derramadas ao longo dela.

Ao meu orientador, **Prof. José Carlos de Oliveira** expresso meu profundo agradecimento, por toda confiança, apoio, incentivo, orientação e especialmente pela amizade ao longo dos últimos anos durante o desenvolvimento deste trabalho.

À minha querida esposa **Maria** por todo seu amor, carinho, apoio e compreensão para o desenvolvimento desse trabalho, sobretudo pelo seu companheirismo e por suas palavras de motivação para a superação dos obstáculos para a concretização deste sonho.

À minha família, **João Areis, Ângela, Letícia e Bymael**, pelo apoio incondicional ao longo de todas as etapas de minha vida, desde a minha infância até a concretização de mais este sonho, e também pela compreensão às várias ausências do seu convívio.

Ao meu grande amigo e irmão que Deus me deu, **Isaque Nogueira Gondim**, em primeiro lugar pela amizade, e também por todo apoio e dedicação, principalmente aos temas relacionados à Engenharia Elétrica e ao tema dessa tese.

Aos meus queridos amigos (as) **Afonso, Angélica, Arnaldo, Carlos Eduardo, Fabricio Parra, José Rubens, Lucas e Paulo Henrique** pelo companheirismo, apoio, amizade e agradável convívio proporcionado nos diversos momentos de trabalho em equipe.

Aos professores **Antônio Carlos Delaiba, Aloísio de Oliveira, José Wilson Resende, Marcelo Lynce Ribeiro Chaves, Milton Itsuo Samesima, Sérgio Ferreira de Paula Silva, e Kleiber David Rodrigues** pelo auxílio e conhecimentos transmitidos.

Aos demais colegas e amigos da Pós-Graduação **Alex Reis, Fernanda Hein, Ivan Nunes, Loana Velasco e Thiago Vieira** pelo apoio e amizade.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFU, através de seus professores e funcionários, pela oportunidade de crescimento profissional e aprendizado. À **Cinara, José Maria e Kátia** pela presteza nos encaminhamentos dos assuntos vinculados com a secretaria da Pós-Graduação, bem como aqueles envolvidos com projetos de pesquisa.

A **FAPEMIG** por ter concedido suporte financeiro a esta pesquisa.

Enfim, a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a viabilização desta tese de doutorado.

---

## RESUMO

A busca por soluções para os distintos problemas da qualidade da energia elétrica, com destaque às variações das tensões de suprimento, conta, na atualidade, com uma extensa gama de produtos visando, sobretudo, a regulação dinâmica da tensão de suprimento. Não obstante tal reconhecimento, os desafios por estratégias alternativas em que pese o emprego de compensadores com propriedades operacionais e econômicas mais atrativas continuam motivando pesquisas em todo o mundo. Dentre os dispositivos fundamentados no princípio do consumo ou fornecimento de potências reativas, nos anos 60 surgiu uma concepção de produto, denominado Compensador a Reator a Núcleo Saturado – CERNS. Este é composto, fundamentalmente, por um núcleo magnético com características e enrolamentos especiais e capacitores conectados em paralelo. Embora este equipamento tenha sido amplamente utilizado no passado, a ausência de publicações sobre o tema resultou numa grande lacuna para o conhecimento, domínio e difusão desta tecnologia. Tal fato corroborou para uma demanda de esforços dedicados nos últimos anos no âmbito nacional e internacional e, à luz dos atrativos oferecidos pela presente filosofia para os reguladores, o assunto voltou a despertar interesses para as pesquisas e desenvolvimentos visando o domínio da tecnologia para o projeto, construção e operação destes compensadores. Diante do exposto, somado a esforços já alcançados através de desenvolvimentos anteriores realizados por instituições nacionais, surge esta tese, a qual encontra-se fundamentada no desenvolvimento de uma estratégia computacional para o dimensionamento do compensador, projeto básico do reator saturado e análise de desempenho no domínio do tempo. Para tanto é utilizada a plataforma ATP, de domínio público e aceitação comprovada no cenário nacional. Por fim, estudos diversos de desempenho são conduzidos para a validação da eficácia operacional e do modelo computacional desenvolvido.

**Palavras-Chave:** Regulação de Tensão, Compensadores de Reativos, Reator a Núcleo Saturado, Simulador ATP, Qualidade da Energia.

---

## ABSTRACT

The search for solutions to the various problems of power quality, especially to voltage deviation from the standard values, account today, with an extensive range of products aiming above all the dynamic regulation of the supply voltage. Despite this recognition, the challenges to find alternatives technologies that take into account the use of compensators with more attractive operational and economic properties, are still motivating research worldwide. Among the devices based on the principle of consumption or supply of reactive power, in the 60's came a product design nominated by Reactor Core Saturated Compensator- CERNS. This device is constituted by an inductive unit, comprising a magnetic core and windings with special features, connected in parallel with a capacitor unit. Although this equipment has been widely used in the past, the lack of publications on the subject resulted in a large gap in knowledge domain and dissemination of this technology. This fact contributed to a demand for dedicated efforts in recent years by national and international researchers. In the light of the attractions offered by this philosophy for voltage regulators, the subject has reawakened the interest for research and developments about the project, construction and operation of these compensators, thus aiming the technology domain. On the above, added to efforts previously made by national institutions, arises the present thesis aimed at providing a computational program to assist in the specification and basic design of saturated core reactors and means for determination of the equivalent electrical parameters needed to the model of the equipment proposed and implemented in the ATP simulator. Finally, performance studies are carried out to highlight and to validate the operational efficiency and computational model developed.

**Keywords:** Voltage Regulation, Reactive Compensator, Saturated Core Reactor, ATP program, Power Quality.

---

# SUMÁRIO

## Capítulo I

---

### Introdução Geral

1.1 Considerações iniciais .....	20
1.2 Contextualização dos desenvolvimentos atrelados com a tecnologia do Compensador Estático de Reativos a Núcleo Saturado .....	25
1.3 Contribuições desta proposta de tese.....	28
1.4 Estrutura desta proposta de tese.....	29

## Capítulo II

---

### Projeto Básico de Reatores Saturados e Determinação dos Parâmetros Elétricos Equivalentes

2.1 Considerações iniciais .....	32
2.2 Considerações sobre a conformidade da tensão em redes de distribuição de energia elétrica .....	33
2.3 Determinação das potências reativas das unidades componentes do compensador.....	36
2.4 Princípio operacional dos reatores a núcleo saturado.....	42
2.5 Projeto básico dos reatores a núcleo saturado - tipo <i>twin-tripler</i> de núcleo isolado .....	46
2.6 Determinação das indutâncias e resistências equivalentes .....	60
2.7 Aplicativo computacional para projeto de reatores saturados e determinação dos parâmetros elétricos equivalentes (PRORE 2.0) .....	67
2.8 Validação do aplicativo PRORE 2.0 .....	71
2.9 Considerações finais .....	74

## Capítulo III

---

### Modelagem de Reatores a Núcleo Saturado no Simulador ATP

3.1 Considerações iniciais .....	76
3.2 Modelo elétrico equivalente de transformadores saturáveis disponibilizados no simulador ATP .....	77
3.3 Modelagem de um reator a núcleo saturado - tipo <i>twin-tripler</i> - no simulador ATP .....	80
3.4 Implementação computacional de reatores saturados tipo <i>twin-tripler</i> no simulador ATPDRAW .....	83

---

3.5 Considerações finais .....	102
--------------------------------	-----

## **Capítulo IV**

---

### **Validação do Modelo Computacional e do Desempenho do Compensador de Reativos**

4.1 Considerações iniciais .....	103
4.2 Validação do modelo isolado do reator saturado.....	104
4.3 Validação do modelo computacional do compensador de reativos.....	120
4.4 Avaliação de desempenho do modelo quanto à correlação entre a potência reativa e a tensão .....	136
4.5 Considerações finais .....	141

## **Capítulo V**

---

### **Avaliação Computacional do Desempenho de Compensadores de Reativos a Núcleo Saturado para um Estudo de Caso**

5.1 Considerações iniciais .....	143
5.2 Sistema elétrico selecionado.....	144
5.3 Avaliação do desempenho do sistema quanto aos níveis das tensões - sem a presença do compensador.....	148
5.4 Dimensionamento do compensador utilizando o programa DICOM.....	152
5.5 Avaliação do desempenho do sistema com a presença do compensador .....	156

## **Capítulo VI**

---

### **Conclusões**

Conclusões.....	167
-----------------	-----

## **Referências Bibliográficas**

---

Referências Bibliográficas.....	172
---------------------------------	-----

---

---

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Faixas de classificação dos níveis de tensão de operação em relação ao valor de referência.....	35
Figura 2.2 – Diagrama fasorial representativo das quedas de tensão do circuito elétrico equivalente.....	37
Figura 2.3 – Compensador de reativos composto pela associação paralela de um reator saturado e um banco de capacitores fixo .....	39
Figura 2.4 – Aplicativo computacional para o dimensionamento de compensadores – DICOM.....	42
Figura 2.5 – Curva de operação dos equipamentos eletromagnéticos (Transformador de Potência – Reator a Núcleo Saturado).....	43
Figura 2.6 – Reatores a núcleo saturado – Principais arranjos construtivos.....	45
Figura 2.7 – Reator a núcleo saturado – Arranjo construtivo twin-tripler (Vista em perspectiva). ....	49
Figura 2.8 – Síntese das principais dimensões físicas do núcleo do reator saturado twin-tripler. ....	49
Figura 2.9 – Síntese das principais grandezas envolvendo os enrolamentos do reator twin-tripler. ....	55
Figura 2.10 – Curva BxH de uma chapa aço-silício de 0,3 mm de espessura.....	64
Figura 2.11 – Curva de magnetização ( $\lambda$ x i) do núcleo de aço-silício nos termos requeridos pelos simuladores computacionais. ....	66
Figura 2.12 – Tela inicial de abertura do Aplicativo PRORE 2.0. ....	68
Figura 2.13 – Dados de entrada para o Aplicativo PRORE 2.0. ....	68
Figura 2.14 – Parâmetros elétricos equivalentes para alimentar o modelo computacional do reator no aplicativo ATP. ....	69
Figura 2.15 – Principais dimensões físicas do núcleo e dos enrolamentos do projeto básico do reator saturado. ....	70
Figura 2.16 – Principais dimensões físicas do núcleo e dos enrolamentos do projeto básico do reator saturado. ....	70
Figura 2.17 – Dados de entrada – programa para projeto de reatores (PRORE 2.0). ....	71
Figura 2.18 – Principais características construtivas para o reator saturado – programa para projeto de reatores (PRORE 2.0).....	72
Figura 2.19 – Principais dimensões físicas de um dos núcleos do RNS e bobinas principal e auxiliar – 3.000 kVAr / 34,5 kV – programa para projeto de reatores (PRORE 2.0).....	72

---

Figura 2.20 – Principais parâmetros equivalentes do reator saturado – programa para projeto de reatores (PRORE 2.0).....	73
Figura 2.21 – Curva representativa da característica de saturação do reator saturado – programa para projeto de reatores (PRORE 2.0).....	73
Figura 3.1 – Circuito elétrico equivalente de um transformador monofásico de dois enrolamentos – não linear – ATP.....	78
Figura 3.2 – Arquivo ATP-file do transformador saturável monofásico de dois enrolamentos.....	79
Figura 3.3 – Reator a núcleo saturado – Arranjo construtivo twin-tripler (Vista em perspectiva).....	81
Figura 3.4 – Diagrama esquemático do reator saturado twin-tripler.....	81
Figura 3.5 – Circuito elétrico equivalente do modelo de RNS twin-tripler proposto para o aplicativo ATP.....	82
Figura 3.6 – Diagrama esquemático do modelo de RNS proposto para o programa ATP.....	83
Figura 3.7 – Transformador saturável – ATPDraw.....	85
Figura 3.8 – Arquivo ATP-file do transformador saturável.....	85
Figura 3.9 – Arquivo DBM representativo de uma das colunas do RNS twin-tripler. ....	89
Figura 3.10 – Declaração de argumentos referentes a nomes de nós.....	89
Figura 3.11 – Declaração de argumentos relacionados a valores numéricos. ....	91
Figura 3.12 – Template representativa de uma das colunas e enrolamentos do RNS twin-tripler. ....	93
Figura 3.13 – Cartões utilizados para a finalização do arquivo ATP com rotina DBM.....	94
Figura 3.14 – Execução do ATP Launcher para obtenção do arquivo representativo de uma coluna do RNS twin-tripler. ....	94
Figura 3.15 – Cartão (*.lib) representativo de uma coluna de um RNS twin-tripler. ....	95
Figura 3.16 – Curva de saturação – RNS twin-tripler – 7 kVAr em 220V. ....	96
Figura 3.17 – Criação de um novo elemento (New sup-file) na interface ATPDraw. ....	96
Figura 3.18 – Dados numéricos – RNS sup-file – ATPDraw. ....	97
Figura 3.19 – Dados referentes a nós físicos – RNS sup-file – ATPDraw.....	97
Figura 3.20 – Novo elemento criado no ATPDraw – RNS.sup. ....	98
Figura 3.21 – Ícone representativo do novo elemento criado no ATPDraw – RNS.sup.....	99
Figura 3.22 – Reator a núcleo saturado – arranjo twin-tripler.....	99
Figura 3.23 – Compensador estático a reator a núcleo saturado – CERNS. ....	101
Figura 3.24 – Reator a núcleo saturado – arranjo twin-tripler – ATP.....	101
Figura 4.1 – RNS twin-tripler – 7 kVAr/220 V – protótipo em escala reduzida.....	105

---

Figura 4.2 – Diagrama unifilar do arranjo elétrico trifásico utilizado para a avaliação do desempenho do reator saturado de forma isolada.....	106
Figura 4.3 – Estrutura laboratorial para a realização dos ensaios. ....	106
Figura 4.4 – Formas de onda individuais das tensões aplicadas nos terminais do RNS – baixa saturação.....	108
Figura 4.5 – Espectro harmônico das tensões aplicadas nos terminais do RNS – baixa saturação. ....	109
Figura 4.6 – Formas de onda individuais das correntes solicitadas pelo RNS – baixa saturação. ....	110
Figura 4.7 – Espectro harmônico das correntes solicitadas pelo RNS – baixa saturação. ....	111
Figura 4.8 – Distorção harmônica total de tensão – computacional versus experimental – baixa saturação.....	112
Figura 4.9 – Distorção harmônica total de corrente – computacional versus experimental – baixa saturação.....	112
Figura 4.10 – Formas de onda individuais das tensões aplicadas nos terminais do RNS – saturação elevada.....	114
Figura 4.11 – Espectro harmônico das tensões aplicadas nos terminais do RNS – saturação elevada.....	115
Figura 4.12 – Formas de onda individuais das correntes solicitadas pelo RNS – saturação elevada.....	116
Figura 4.13 – Espectro harmônico das correntes solicitadas pelo RNS – saturação elevada. ....	118
Figura 4.14 – Distorção total de tensão – computacional versus experimental – saturação elevada.....	118
Figura 4.15 – Distorção total de corrente – computacional versus experimental – saturação elevada.....	119
Figura 4.16 – Diagrama unifilar do arranjo elétrico utilizado nos ensaios computacional e experimental do compensador a núcleo saturado.....	120
Figura 4.17 – Estrutura laboratorial utilizada. ....	121
Figura 4.18 – Principais características dos componentes do arranjo laboratorial.....	122
Figura 4.19 – Formas de onda das tensões aplicadas nos terminais do compensador – baixa saturação.....	124
Figura 4.20 – Espectro harmônico das tensões aplicadas nos terminais do compensador – baixa saturação. ....	125
Figura 4.21 – Formas de onda individuais das correntes solicitadas pelo RNS – baixa saturação. ....	127
Figura 4.22 – Espectro harmônico das correntes solicitadas pelo RNS – baixa saturação. ....	128

---

Figura 4.23 – Distorção harmônica total de tensão – computacional versus experimental – baixa saturação.....	128
Figura 4.24 – Distorção harmônica total de corrente – computacional versus experimental – baixa saturação.....	129
Figura 4.25 – Formas de onda das tensões aplicadas nos terminais do compensador – saturação elevada.....	131
Figura 4.26 – Espectro harmônico das tensões aplicadas nos terminais do compensador – saturação elevada.....	132
Figura 4.27 – Formas de onda individuais das correntes solicitadas pelo RNS – saturação elevada.....	133
Figura 4.28 – Espectro harmônico das correntes solicitadas pelo RNS – saturação elevada.	134
Figura 4.29 – Distorção harmônica total de tensão – computacional versus experimental – saturação elevada.....	134
Figura 4.30 – Distorção harmônica total de corrente – computacional versus experimental – saturação elevada.....	135
Figura 4.31 – Arranjo elétrico para os ensaios computacionais e de campo.....	137
Figura 4.32 – RNS twin-tripler – 586 kVAr/13,8 kV – protótipo em escala real. ....	138
Figura 4.33– RNS twin-tripler – 3 MVAr/34,5 kV – protótipo em escala real.....	139
Figura 4.34– Correlação entre a tensão e a potência reativa – RNS 7 kVAr / 220 V – Resultado experimental versus computacional. ....	140
Figura 4.35 – Correlação entre a tensão e a potência reativa – RNS 586 kVAr / 13,8 kV – Resultado experimental versus computacional. ....	141
Figura 4.36 – Correlação entre a tensão e a potência reativa – RNS 3 MVAr / 34,5 kV – Resultado experimental versus computacional. ....	141
Figura 5.1 – Diagrama unifilar do sistema elétrico adotado para os estudos de desempenho do CERNS. ....	145
Figura 5.2 – Sistema elétrico implementado no ATP para os estudos de desempenho do CERNS. ....	147
Figura 5.3 – Formas de onda das tensões – barramento 13,8 kV – sem compensador. ....	150
Figura 5.4 – Vista ampliada das formas de onda das tensões – barramento 34,5 kV – sem compensador.....	152
Figura 5.5 – Programa para dimensionamento de compensadores – DICOM – Janela inicial. ....	153
Figura 5.6 – Programa para dimensionamento de compensadores – DICOM – Janela Dados de Entrada.....	154

---

Figura 5.7 – Programa para dimensionamento de compensadores – DICOM – Janela Dimensionamento do Compensador.....	155
Figura 5.8 – Formas de onda das tensões – barramento 13,8 kV – com compensador.....	158
Figura 5.9 – Formas de onda das tensões – barramento 13,8 kV – com compensador.....	159
Figura 5.10 – Espectro harmônico das tensões aplicadas nos terminais do compensador.....	161
Figura 5.11 – Formas de onda das correntes solicitadas pelo RNS.....	161
Figura 5.12 – Vista ampliada das formas de onda das correntes solicitadas pelo RNS.....	163
Figura 5.13 – Espectro harmônico das correntes solicitadas pelo RNS.....	164

---

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Pontos de conexão em Tensão Nominal superior a 1kV e inferior a 69kV.....	35
Tabela 2.2 – Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou superior a 69kV e inferior a 230kV .....	36
Tabela 2.3 – Densidade de corrente em condutores de transformadores de pequeno porte.....	57
Tabela 2.4 – Relação (BxH) de uma chapa de aço-silício de 0,3mm.....	64
Tabela 2.5 – Valores para as grandezas componentes da curva de magnetização ( $\lambda$ x i) do núcleo de aço-silício.....	66
Tabela 2.6 – Principais características construtivas – RNS 3.000 kVAr / 34,5 kV. ....	74
Tabela 4.1 – Protótipo de reator a núcleo saturado twin-tripler – 7 kVAr.....	105
Tabela 4.2 – Principais parâmetros elétricos equivalentes – RNS 7 kVAr / 220 V. ....	105
Tabela 4.3 – Síntese dos resultados – baixa saturação – protótipo de reator a núcleo saturado twin-tripler – 7 kVAr.....	113
Tabela 4.4 – Síntese dos resultados – saturação elevada – protótipo de reator a núcleo saturado twin-tripler – 7 kVAr.....	119
Tabela 4.5 – Síntese dos resultados obtidos pelo elemento indutivo do compensador – baixa saturação.....	129
Tabela 4.6 – Síntese dos resultados obtidos pelo elemento indutivo do compensador – saturação elevada.....	135
Tabela 4.7 – Protótipo de reator a núcleo saturado twin-tripler – 586 kVAr. ....	138
Tabela 4.8 – Protótipo de reator a núcleo saturado twin-tripler – 3 MVAr. ....	139
Tabela 5.1 – Nível de curto-circuito.....	145
Tabela 5.2 – Parâmetros equivalentes das redes alimentadoras .....	145
Tabela 5.3 – Parâmetros equivalentes dos transformadores.....	146
Tabela 5.4 – Características das cargas .....	146
Tabela 5.5 – Parâmetros dos capacitores.....	146
Tabela 5.6 – Síntese das tensões nos barramentos do sistema – sem compensador.....	149
Tabela 5.7 – Parâmetros elétricos equivalentes – RNS 4,3 MVAr – PRORE 2.0 .....	156
Tabela 5.8 – Síntese das tensões nos barramentos do sistema – com compensador .....	157
Tabela 5.9 – Correntes e potências solicitadas pelo RNS .....	162

---

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\dot{V}_o$	– Tensão a vazio [V];
$\dot{V}_n$	– Tensão de operação ou contratada, ou de referência [V];
$\dot{V}'$	– Nova tensão associada com um aumento da carga [V];
$\dot{V}_{reg}$	– Tensão regulada [V];
$\Delta\dot{V}_n$	– Variação de tensão sob condições normais [V];
$\Delta\dot{V}'$	– Incremento na variação de tensão após o aumento da carga [V];
$\Delta\dot{V}_c$	– Incremento na variação de tensão imposta pelo compensador [V];
$I_c$	– Corrente do compensador [A];
$I_{RNS}$	– Corrente nominal [A];
$S$	– Potência nominal do reator [kVA];
$V_n$	– Tensão nominal de operação [kV];
$\Delta P_{e\%}$	- Perdas percentuais do reator [%];
$S_m$	– Seção magnética do núcleo [ $\text{cm}^2$ ];
$C_L$	– Coeficiente para o tipo de lâmina utilizada na construção do núcleo magnético;
$N_n$	– Quantidade de núcleos magnéticos que constituem o equipamento;
$f$	– Frequência nominal [Hz];
$S_{Gn}$	– Seção geométrica do núcleo [ $\text{cm}^2$ ];
$a$	– Largura da coluna do núcleo [cm];
$L_m$	– Comprimento magnético do núcleo [cm];
$N_p$	– Número de espiras do enrolamento principal [espira];
$I_n$	– Corrente nominal no condutor [A];
$H$	– Intensidade de campo magnético [A.esp/m];
$L_j$	– Largura da janela [cm];
$H_j$	– Altura da janela [cm];
$L_m$	– Comprimento magnético do núcleo [cm];
$L_T$	– Largura total do núcleo [cm];
$H_T$	– Altura total do núcleo [cm];

---

$V_p$	– Tensão do enrolamento principal [V];
$B_m$	– Indução magnética adotada para o ponto de saturação máximo em [T];
$S_m$	– Seção magnética do núcleo [ $\text{cm}^2$ ];
$N_a$	– Número de espiras do enrolamento auxiliar [espira];
$S_{\text{fio min}}$	– Seção mínima dos condutores [ $\text{mm}^2$ ];
$J$	– Densidade de corrente no condutor [ $\text{A/mm}^2$ ].
$L_{Np}$	– Comprimento médio das espiras do enrolamento principal [cm];
$L_{Na}$	– Comprimento médio das espiras do enrolamento auxiliar [cm];
$H_b$	– Altura da bobina de enrolamentos do reator [mm];
$d_c$	– Diâmetro do condutor [mm];
$R_p$	– Resistência do enrolamento principal;
$\rho$	– Resistividade elétrica do condutor;
$R_a$	– Resistência do enrolamento principal;
$X_p$	– Reatância de dispersão do enrolamento principal [Ohm];
$L_{cu}$	– Comprimento médio das espiras do enrolamento principal e auxiliar;
$b$	– Comprimento axial da bobina [cm];
$K$	– Fator de correção;
$d$	– Espessura radial do intervalo entre as duas bobinas [cm];
$a_1$	– Largura da área da bobina principal [cm];
$a_2$	– Largura da área da bobina auxiliar [cm];
$L_p$	– Indutância do enrolamento principal [H];
$L_a$	– Indutância do enrolamento auxiliar [H];
$X_p$	– Reatância de dispersão referida ao primário do reator [Ohm];
$\lambda$	– Fluxo concatenado pelas espiras do enrolamento principal [Wb.esp];
$\Phi$	– Fluxo por espira do enrolamento [Wb];
$B$	– Densidade de fluxo magnético [T];
$i$	– Corrente solicitada pelo reator [A];
$l$	– Altura da bobina do enrolamento principal [m];

- 
- Io – Corrente no ramo magnetizante em regime permanente – [A];
- Fo – Fluxo no ramo magnetizante em regime permanente – [Wb-espira];
- Rmag – Resistência no ramo de magnetizante – [Ohm];
- R1 – Resistência no enrolamento primário – [Ohm];
- L1 – Indutância no enrolamento primário – [mH];
- N1 – Tensão nominal no enrolamento primário – [kV];
- R2 – Resistência no enrolamento secundário – [Ohm];
- L2 – Indutância no enrolamento secundário – [mH];
- N2 – Tensão nominal no enrolamento secundário – [kV];
- BUS11 – Ponto de entrada do enrolamento primário;
- BUS12 – Ponto de saída do enrolamento primário;
- BUS21 – Ponto de entrada do enrolamento secundário;
- BUS22 – Ponto de saída do enrolamento secundário;
- PXXXXA – Entrada do enrolamento principal de uma coluna magnética do RNS *twin-tripler*;
- PNXXXA – Saída do enrolamento principal;
- SXXXXA – Entrada do enrolamento auxiliar de uma coluna magnética do RNS;
- SNXXXA – Saída do enrolamento auxiliar;
- TXXXXA – Entrada do enrolamento terciário de uma coluna magnética do RNS;
- TNXXXA – Saída do enrolamento terciário;
- RMXXXX – Resistência linear e constante, conectada paralelamente a reatância de magnetização;
- RPXXXX – Resistência de dispersão do enrolamento principal;
- LPXXXX – Indutância de dispersão do enrolamento principal;
- UPXXXX – Tensão nominal do enrolamento principal;
- RSXXXX – Resistência de dispersão do enrolamento auxiliar;
- LSXXXX – Indutância de dispersão do enrolamento auxiliar;
- USXXXX – Tensão nominal do enrolamento auxiliar;
- RTXXXX – Resistência de dispersão do enrolamento terciário;

---

**LXXXX** – Indutância de dispersão do enrolamento terciário;

**UTXXXX** – Tensão nominal do enrolamento terciário.

# Capítulo I

---

## INTRODUÇÃO GERAL

### 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A melhoria da qualidade do fornecimento de energia elétrica é um processo que vem se aperfeiçoando com o transcorrer do tempo, não somente por parte das empresas concessionárias de energia elétrica, como também motivada pelos consumidores, ANEEL-PRODIST [1], [2] e o ONS [3], [4]. Neste cenário, dentre outros indicadores, quando da violação dos limites estabelecidos, medidas corretivas devem ser utilizadas para a restauração do supridor aos padrões exigidos e, neste campo, as questões associadas com a regulação das tensões constituem-se em tema de grande relevância nos contextos nacional e internacional.

Dentre os equipamentos idealizados para o cumprimento do processo de adequação dos níveis de tensão, pode-se destacar, basicamente, duas famílias distintas de tecnologias comercialmente disponíveis, quais sejam: a tecnologia de regulação de tensão de maneira indireta e a concepção destinada à regulação da tensão de forma direta. Os dispositivos indiretos se fundamentam no controle das potências reativas que se estabelecem pelos alimentadores e seus respectivos impactos sobre os níveis das tensões, enquanto os diretos, atuam pontualmente

nos valores das tensões através de equipamentos que proporcionam, via comutadores de tapes ou outros, o atendimento dos propósitos em pauta.

Focando na estratégia que encontra sustentação no controle do fluxo de potência reativa do sistema, emerge a clássica técnica do emprego de bancos de capacitores e/ou reatores, fixos ou variáveis. Além destes, deve-se destacar ainda, o emprego de outros recursos com tecnologia mecânica, eletromagnética e eletrônica. O tema, de modo geral, se fundamenta em teoria e técnicas clássicas, e, portanto, os dispositivos comercialmente em uso dispensam comentários adicionais, a não ser pela menção que os arranjos mecânicos se caracterizam pelo emprego de contatores, chaves ou disjuntores; os eletromagnéticos se baseiam na não linearidade dos materiais utilizados e os eletrônicos nos recursos tecnológicos amplamente difundidos.

Ainda no contexto da filosofia de compensação da tensão fundamentada no fornecimento ou consumo de potências reativas, não se pode deixar de mencionar os conhecidos compensadores síncronos, em uso há longa data e ainda, oferecendo, para aplicações específicas, uma alternativa bastante atrativa [5].

Não obstante os recursos supramencionados vale ressaltar que, em se tratando dos equipamentos com controle eletrônico, uma das tecnologias mais comumente difundida na atualidade se apresenta na forma dos conhecidos RCTs (Reatores Controlados a Tiristores) e CCTs (Capacitores Chaveados a Tiristores), já em uso a décadas e com eficácia comprovada [6].

Ainda no cenário dos produtos que empregam os recursos da eletrônica de potência é importante destacar um novo conceito, já materializado na forma de produtos comerciais. Nesta categoria incluem-se dispositivos diversos, com as denominações distintas, conforme seus fabricantes, os quais atuam no sentido de propiciar injeções ou consumos de potências reativas através de equipamentos eletrônicos que se apresentam fisicamente constituídos por arranjos conversores capazes de atuar como dispositivos que oferecem meios para a adequação dos

níveis de tensão utilizando, para tanto, o princípio do controle da magnitude da tensão e respectivo ângulo de fase através de disparos programados para as chaves eletrônicas que compõem as unidades inversoras. O princípio no qual se fundamenta tais compensadores encontra sustentação na denominada tecnologia UPFC (*Unified Power Flow Controller*) [7], a partir da qual foram originados uma série de produtos hoje disponíveis no mercado e designados por: STATCOM, SIPCON P, dentre outros [8], [9], [10].

No que tange aos dispositivos fundamentados na tecnologia do controle de tensão de forma direta, estes se apoiam em equipamentos capazes de atuar diretamente sobre esta grandeza, visando promover a sua adequação aos padrões exigidos. Isto pode ser conseguido pela alteração manual ou automática de tapes ou pela inserção de tensões de compensação controladas, aditivas ou subtrativas, aquelas disponibilizadas pela rede supridora. No que se refere aos reguladores baseados em mudanças de tapes, pode-se destacar produtos comerciais bastante clássicos, a exemplo dos dispositivos: Toshiba TB-R1000, também os reguladores de fabricação brasileira COOPER VR-32 e o ITB RAV-2 [11], [12], [13].

Ainda dentro do cenário dos dispositivos atuantes diretamente sobre os níveis das tensões surgiram, há relativamente pouco tempo, linhas mais modernas de produtos que empregam recursos da eletrônica de potência. Estes equipamentos possuem como filosofia básica a produção e injeção de tensões complementares às de suprimento, de forma aditiva ou subtrativa, proporcionando assim, incrementos de tensões com valores e posicionamentos angulares eletronicamente controláveis. Tais recursos, caso desejado, podem ainda viabilizar a compensação de forma independente por fase, contribuindo, concomitantemente, para o equilíbrio do suprimento. Dentro desta linha de equipamentos ressaltam as tecnologias comercialmente conhecidas por: SIPCON S, DVR, Softswitching DySC, dentre outros [10], [14]-[19].

Apesar das reconhecidas e incontestáveis qualidades oferecidas pelos equipamentos destinados à regulação das tensões até agora apresentados, em algumas situações, a utilização de certas tecnologias, sobretudo aquelas fundamentadas no uso da eletrônica de potência, não obstante seus fortes atrativos tecnológicos há de se considerar que tais soluções são construtivamente mais complexas, se apresentam mais caras, exigem maiores e mais dispendiosos gastos com manutenção, etc. Disto ressalta que, para muitas aplicações esta linha de produtos pode ser substituída por outros baseados em princípios físicos mais simples, fato este que determinaria menores custos, maior robustez às condições ambientais, manutenção reduzida e mais simples, etc., em detrimento de um controle mais rígido da tensão.

No contexto acima ressurge como uma opção interessante e promissora, a qual se apresenta na forma de um equipamento com reconhecida simplicidade construtiva e operativa, e ainda, boa eficácia técnica no processo de compensação aqui requerido, o qual já foi amplamente difundido na década de 60 do século passado, quando os recursos da eletrônica de potência ainda eram embrionários. Este compensador se enquadra na categoria dos reguladores de tensão que utilizam o princípio da correlação entre as potências reativas e os níveis de tensão.

O referido dispositivo fundamenta-se, basicamente, na combinação de um núcleo magnético com características e enrolamentos especiais constituindo assim um reator a núcleo saturado (RNS) e um conjunto de capacitores conectados em série e paralelo em relação ao primeiro. Este arranjo, que recebeu o nome de Compensador Estático a Reator a Núcleo Saturado (CERNS), além das características já destacadas, oferece ainda outras vantagens inerentes ao princípio funcional, tais como: tempo de resposta rápido, boa eficiência na regulação da tensão sem a presença de qualquer tipo de controle eletrônico e por fim, grande robustez, devido sua suportabilidade às intempéries e baixa exigência de manutenção. Estas propriedades, associadas ao baixo custo de aquisição em

comparação às alternativas eletrônicas de compensação ativa, tornam este regulador bastante atrativo, sobretudo para uso em sistemas elétricos radiais, longos, que atendem a regiões de baixa densidade populacional e com grande sazonalidade em suas cargas.

O princípio físico que norteia a operação deste compensador está na característica não-linear da curva (BxH) intrínseca ao material constituinte do núcleo magnético do reator. Tomando por base este raciocínio, havendo variações nas tensões conectadas aos terminais deste regulador, haverá, por conseguinte, mudanças das características operacionais deste na forma de um maior ou menor nível de saturação do reator, e assim, dinamicamente, haverá uma resposta do equipamento na forma de um aumento ou diminuição de sua potência reativa indutiva.

Assim, para as situações associadas com reduções da tensão de suprimento do dispositivo, o reator funciona numa condição tal a absorver um valor reduzido de potência reativa e, diante desta situação, o banco de capacitores paralelo assume papel predominante no saldo de potência reativa da rede elétrica. Em contrapartida, para situações de elevação da tensão, o reator é conduzido a um nível maior de saturação e, sob tais circunstâncias, a potência reativa indutiva torna-se preponderante. Logo, o processo se comporta como se houvesse um controle inerente do dispositivo que o adapta às distintas condições impostas pelas tensões do barramento. Isto confere ao produto um desempenho dinâmico similar àquele obtido com os compensadores eletrônicos [6].

Diante do exposto fica pois esclarecido que, tendo em vista os atrativos oferecidos pela tecnologia associada com os reguladores de tensão a núcleo saturado, esta pesquisa de doutorado foi centrada neste tema, e, à luz desta opção, procede-se, na sequência, uma contextualização do estado da arte sobre este equipamento.

## **1.2 CONTEXTUALIZAÇÃO DOS DESENVOLVIMENTOS ATRELADOS COM A TECNOLOGIA DO COMPENSADOR ESTÁTICO DE REATIVOS A NÚCLEO SATURADO**

De acordo com relatos históricos, Dr. E. Friedlander foi o responsável pelo desenvolvimento da tecnologia de reatores saturados de múltiplos núcleos. O início dos trabalhos ocorreu por volta da década de 40, ainda durante a segunda guerra mundial, quando foram produzidas as primeiras versões deste equipamento. Naquela época, a principal aplicação para a referida tecnologia foi a obtenção de um multiplicador de frequências e gerador de pulsos para alimentação e controle de retificadores à válvula de mercúrio [20]-[24].

A exploração da potencialidade do reator saturado de múltiplos núcleos no processo de regulação da tensão terminal de barramentos elétricos foi realizada, pela primeira vez, 10 anos depois, na década de 50, quando a GEC (*General Electric Company* – Inglaterra) construiu o primeiro compensador estático baseado na filosofia aqui referida. Deve-se ressaltar que este primeiro compensador resultou num equipamento de exagerado peso e volume, assim como um desempenho precário devido à baixa qualidade do material magnético empregado naquele período. Tais resultados, embora pouco satisfatórios, motivaram os pesquisadores da época no desenvolvimento de núcleos magnéticos produzidos a partir de novos materiais e ligas com propriedades superiores àqueles até então conhecidos, buscando assim aprimorar a viabilidade técnica e econômica do equipamento. Isso resultou na produção de núcleos magnéticos mais adequados, cuja principal característica foi a obtenção de um ciclo de histerese mais próximo ao formato retangular e pequena área. Este novo tipo de material proporcionou a construção de reatores a núcleo saturado de alta eficiência, confiabilidade e elevada expectativa de vida [25]. Não obstante estes atrativos vale lembrar que tratam-se de ligas especiais e caras.

No que se referem às aplicações comerciais, estas iniciaram apenas na década de 60, quando foram testadas as potencialidades do equipamento no controle de flutuações de tensão em indústrias siderúrgicas [26]. Posteriormente, ocorreram várias outras aplicações em sistemas de transmissão, podendo-se destacar, entre estas, o emprego deste compensador de reativos junto ao sistema de transmissão de corrente contínua *Cross Chanel* ligando a Inglaterra à França [27].

A produção de compensadores estáticos à reatores saturados em escala comercial, pela GEC, perdurou por cerca de 20 anos, ao longo dos quais foram construídos 36 equipamentos distintos, para os mais variados tipos de aplicação [20], [28]-[31]. Ao término desse período, portanto, já nos finais dos anos 70, devido o surgimento dos dispositivos de compensação reativa fundamentados nas modernas técnicas da eletrônica de potência, a GEC optou pela venda da tecnologia de compensadores eletromagnéticos para um instituto de projeto de aço na China, mantendo apenas a produção de compensadores estáticos controlados a tiristores. De acordo com as referências [32], [33], mesmo após a transferência de tecnologia citada anteriormente, ainda foram produzidos e instalados na Austrália outros equipamentos de compensação de reativos nos termos aqui referidos.

Um ponto meritório de destaque e fundamentado na rapidez de resposta do produto, visto que o mesmo não possui qualquer tipo de controle externo ou mecanismo de chaveamento manual ou automático, refere-se à adequação da ação destes equipamentos para a regulação das tensões em instalações elétricas sujeitas a fortes flutuações atreladas à presença de cargas dinâmicas, tais como: fornos a arco, moinho e motores de grande porte [34].

Não obstante os relatos acima é importante enfatizar que, praticamente, nenhuma publicação sobre as conquistas passadas foram documentadas, fato este que determinou a necessidade de um completo resgate da tecnologia aqui

contemplada através de exaustivos trabalhos de investigação feitos e reportados em [35]-[37].

Iniciando com os conceitos e princípios básicos de funcionamento dos compensadores aqui focados, estes são pormenorizados em [35], [38]-[40]. Estas publicações, conciliadas às experiências passadas, ressaltam não apenas os atrativos oferecidos pelos compensadores à núcleo saturado, mas também esclarecem sobre alguns aspectos negativos, a exemplo da produção de distorções harmônicas injetadas no sistema [41] e [42].

Visando minimizar os impactos atribuídos à geração de correntes harmônicas, algumas alternativas construtivas foram consideradas e propostas para as concepções físicas, como é o caso dos clássicos arranjos denominados por *twin-tripler* e *treble-tripler* [34], [35], [41]-[47]. De acordo com estudos realizados em [35] ficou demonstrado que a primeira configuração constitui-se em uma solução mais simples e econômica.

Além destes trabalhos, outras duas dissertações [37], [48] também fizeram alguns avanços respectivamente quanto à avaliação do desempenho do RNS experimental e computacionalmente. O primeiro abordou questões térmicas e níveis de ruídos, enquanto o segundo iniciou as primeiras avaliações do desempenho do compensador estático a núcleo saturado na regulação das tensões em sistemas elétricos de grande porte, utilizando a ferramenta computacional SABER.

Por fim, vale destacar que, contando com os trabalhos anteriormente identificados, o fato é que, na atualidade, o grupo de pesquisadores da Universidade Federal de Uberlândia desenvolveu aplicativos computacionais através da plataforma SABER, definiu princípios para o projeto e construção de reatores a núcleo saturado e já atingiu um bom domínio do tema através da fabricação e realização de testes de desempenho das seguintes unidades magnéticas em escala real:

- Reator saturado de 600 kVAr em 13,8 kV – instalado na rede CEMAT [49];
- Reator saturado de 600 kVAr em 13,8 kV – instalado na rede elétrica da CEB [50];
- Reator saturado de 3000 kVAr em 34,5 kV – instalado na rede elétrica da CEMAT [51].

Apesar do reconhecimento dos avanços obtidos no campo do domínio da tecnologia de projeto e construção de reatores a núcleo saturado, 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. De fato, até o presente momento, as distintas referências citadas e que refletem os frutos de trabalhos de desenvolvimentos realizados encontram-se centrados tão apenas no reator saturado e não no compensador propriamente dito. Disto surgiram desafios que se apresentaram como áreas de investigações que fundamentaram a presente proposta de tese, como apresentado na seção subsequente.

### **1.3 CONTRIBUIÇÕES DESTA PROPOSTA DE TESE**

Reconhecendo a importância do tema, as conquistas já obtidas e as perspectivas que se abrem para o emprego da tecnologia aqui referida, há plena concordância que ainda existem lacunas de conhecimento a serem preenchidas para o avanço da tecnologia, através da modelagem computacional; avaliação de fenômenos de regime permanente e dinâmico; estabelecimento de uma base sólida para o projeto básico de reatores saturados; e, por fim, da proposição de meios para validação experimental do aplicativo computacional via montagens experimentais em escala reduzida. Estas diretrizes, como afirmado anteriormente, complementam o domínio do tema visto que, até o momento, todos os esforços realizados encontram-se centrados apenas no reator saturado, enquanto que o

compensador completo, no presente estado da arte, não foi considerado no contexto dos pontos acima referidos.

À luz destes pontos cardinais a presente proposta de tese de doutorado visa, pois, contribuir nos seguintes pontos focais:

- Estabelecimento das bases e procedimentos para o projeto básico de reatores a núcleo saturado tipo *twin-tripler* e determinação dos parâmetros elétricos equivalentes, obtidos a partir das informações construtivas do equipamento, nos termos requeridos pelo modelo computacional de reator saturado no simulador ATP;
- Desenvolvimento de um modelo computacional para o reator à núcleo saturado tipo *twin-tripler* e respectiva implementação no simulador ATP; e validação do modelo mediante a comparação de resultados de desempenho teórico com outros obtidos em ensaios laboratoriais;
- Evidenciar, via estudos computacionais, os desempenhos operacionais de um compensador completo (reator e capacitor paralelo), sob condições de regime dinâmico e permanente, quanto a sua eficácia no processo de regulação da tensão e distorções harmônicas.

## 1.4 ESTRUTURA DA TESE

Em consonância com o exposto, além do presente capítulo introdutório, esta tese de doutorado encontra-se estruturada através das seguintes unidades:

### Capítulo II PROJETO BÁSICO DE REATORES SATURADOS E DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS EQUIVALENTES

*Este capítulo encontra-se direcionado ao estabelecimento dos fundamentos para a elaboração de projetos básicos de reatores a núcleo saturado, e ainda, estabelecer os meios para a*

*determinação dos parâmetros elétricos equivalentes, obtidos a partir das informações construtivas do referido compensador.*

### **Capítulo III MODELAGEM DE REATORES A NÚCLEO SATURADO NO SIMULADOR ATP**

*Esta seção encontra-se direcionada à proposição e implementação computacional de um modelo de reatores a núcleo saturado, tipo twin-tripler, no aplicativo ATP.*

### **Capítulo IV VALIDAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL E DO DESEMPENHO DO COMPENSADOR DE REATIVOS**

*Uma vez obtida a representação do reator saturado no simulador ATP e inserido seu banco de capacitores em paralelo, fica pois estabelecida a topologia do compensador de reativos ora considerado. Diante deste fato, esta etapa dos trabalhos se destina a realização de estudos de desempenho do equipamento regulador diante de situações operacionais típicas, visando, sobretudo, avaliar sua resposta no que tange ao processo dinâmico e de regime permanente para a restauração da tensão aos padrões regulamentados. As atividades são realizadas de modo computacional e experimental, estratégia esta que, além de evidenciar a operacionalidade do compensador, também estabelece meios para o processo de validação da modelagem proposta.*

### **Capítulo V AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL DO DESEMPENHO DO COMPENSADOR DE REATIVOS A NÚCLEO SATURADO PARA UM ESTUDO DE CASO**

*Por fim, nesta última etapa da pesquisa são realizados trabalhos computacionais de investigação envolvendo estudos*

*computacionais e um sistema típico de uma empresa concessionária. Para tanto, é estabelecida uma rede com topologia comercial e realizados estudos diversos atrelados com súbitas alterações de carregamentos, analisando-se os impactos destas mudanças operativas sobre as tensões sem e com a presença de um compensador de reativos nos termos aqui postos.*

## **Capítulo VI CONCLUSÕES**

*Por fim, procede-se uma síntese dos principais pontos e conclusões relacionados ao trabalho. Além disso, serão ressaltadas questões vinculadas às principais contribuições deste trabalho, bem como sugestões para futuros desenvolvimentos.*

# **Capítulo II**

---

## **PROJETO BÁSICO DE REATORES SATURADOS E DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS EQUIVALENTES**

### **2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

O presente capítulo tem por objetivo principal oferecer as bases para o projeto básico de reatores a núcleo saturado, através de fundamentos teóricos e matemáticos, e ainda, determinar os parâmetros elétricos equivalentes, obtidos a partir das informações construtivas do referido compensador, para alimentar o modelo equivalente do reator no simulador ATP.

A fim de que tais metas sejam alcançadas e proporcionando uma sequência didática para os procedimentos e sua compreensão, os trabalhos realizados no decorrer desta unidade da presente tese compreendem:

- Apresentação de uma síntese dos principais tópicos associados com a legislação sobre a conformidade de tensão em redes de distribuição de energia elétrica;
- Estabelecimento de uma sistemática de cálculos visando à determinação dos principais parâmetros a serem contemplados pelo compensador, objetivando a restauração das tensões aos patamares regulamentados pela legislação;

- Contextualização sobre as principais características operativas, topologias construtivas e elementos físicos constituintes dos reatores a núcleo saturado;
- Estabelecimento dos fundamentos para o projeto básico de reatores a núcleo saturado, com ênfase aos aspectos físicos construtivos das unidades magnéticas e elétricas, conforme se faz necessário para as bases do pré-projeto do referido dispositivo;
- Proposição de uma sistemática para a determinação da curva de magnetização ( $\lambda \times i$ , fluxo concatenado *versus* corrente) e dos parâmetros elétricos equivalentes, nos termos necessários para suprir informações requeridas pelo modelo computacional do RNS no simulador ATP;
- Aprimoramento do aplicativo computacional (Aplicativo PRORE) destinado a sistematizar os procedimentos de cálculo supra referidos, produzindo, assim, uma nova versão de *software* para o projeto básico de reatores saturados, aqui denominado por PRORE-2.0.

## **2.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE A CONFORMIDADE DA TENSÃO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

A regulamentação vigente relacionada com a conformidade dos níveis de tensão de energia elétrica em regime permanente encontra-se devidamente formalizada no Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica do PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica), por meio da Resolução Normativa Nº 469/ANEEL/2011 [1]. Este módulo tem por objetivo estabelecer os procedimentos relativos à qualidade da energia elétrica - QEE, abordando a qualidade do produto e a qualidade do serviço prestado. Os procedimentos de qualidade de energia elétrica definidos neste módulo se aplicam aos sistemas de

distribuição e devem ser observados por todas as distribuidoras de energia elétrica.

Na secção 8.1 do módulo citado define-se a terminologia, caracteriza-se o fenômeno e são estabelecidos os parâmetros e valores de referência relativos à conformidade de tensão em regime permanente. Entre outros aspectos, são fixados os limites adequados, precários e críticos para os níveis de tensão em regime permanente (estado estacionário), os indicadores de qualidade, os critérios de medição e registro, e por fim, prazos para regularização e de compensação ao consumidor, caso os limites para o atendimento adequado não sejam obedecidos.

O termo conformidade de tensão elétrica se refere à comparação da tensão medida no ponto de conexão em relação aos níveis de tensão especificados como adequados, precários e críticos. Com relação aos valores de referência, as tensões medidas devem ser referenciadas a valores nominais ou a valores contratados. Deve-se ressaltar os mesmos devem ser fixados em função dos níveis de operação do sistema de distribuição, de modo que haja compatibilidade com os níveis de projeto dos equipamentos elétricos de uso final. Desta forma, o valor usado para comparação com as tensões medidas, seja o nominal ou o contratado, deve ser denominado tensão de referência.

A tensão em regime permanente deve ser avaliada através de um conjunto de leituras, de acordo com a metodologia descrita para os indicadores individuais e coletivos. Para cada tensão de referência, as leituras a ela associadas classificam-se em três categorias: adequadas, precárias e críticas, baseando-se no afastamento da leitura em relação à tensão de referência.

Seguindo os procedimentos de medição de tensão estabelecidos no Módulo 8, secção 2.6 (Instrumentação e metodologia de medição), a tensão de atendimento associada às leituras deve ser classificada segundo faixas em torno da tensão de referência adotada, conforme Figura 2.1.

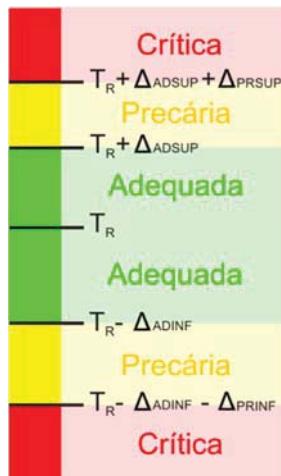


Figura 2.1 – Faixas de classificação dos níveis de tensão de operação em relação ao valor de referência.

Em que:

- Tensão de Referência: ( $T_R$ );
- Faixa de Tensão Adequada Superior: ( $T_R$  a  $T_R + \Delta_{ADSUP}$ );
- Faixa de Tensão Precária Superior: ( $T_R + \Delta_{ADSUP}$  a  $T_R + \Delta_{ADSUP} + \Delta_{PRSUP}$ );
- Faixa de Tensão Crítica Superior: ( $T_R + \Delta_{ADSUP} + \Delta_{PRSUP}$  a  $1,2T_R$ );
- Faixa de Tensão Adequada Inferior: ( $T_R$  a  $T_R - \Delta_{ADINF}$ );
- Faixa de Tensão Precária Inferior: ( $T_R - \Delta_{ADINF} - \Delta_{PRINF}$  a  $T_R - \Delta_{ADINF}$ );
- Faixa de Tensão Crítica Inferior: ( $0,1T_R$  a  $T_R - \Delta_{ADINF} - \Delta_{PRINF}$ ).

Os referidos valores correspondentes às faixas de classificação adequada, precária e crítica (superior e inferior) para as classes de tensão compreendidas entre 1 kV – 69 kV e entre 69 kV – 230 kV, são apresentados nas Tabelas 2.1 e 2.2 a seguir.

Tabela 2.1 – Pontos de conexão em Tensão Nominal superior a 1kV e inferior a 69kV

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão de Referência (TR)
Adequada	$0,93TR \leq TL \leq 1,05TR$
Precária	$0,90TR \leq TL \leq 0,93TR$
Crítica	$TL < 0,90TR$ ou $TL > 1,05TR$

*Tabela 2.2 – Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou superior a 69kV e inferior a 230kV*

<b>Tensão de Atendimento (TA)</b>	<b>Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão de Referência (TR)</b>
Adequada	$0,95\text{TR} \leq \text{TL} \leq 1,05\text{TR}$
Precária	$0,90\text{TR} \leq \text{TL} \leq 0,95\text{TR}$ ou $1,05\text{TR} < \text{TL} \leq 1,07\text{TR}$
Crítica	$\text{TL} < 0,90\text{TR}$ ou $\text{TL} > 1,07\text{TR}$

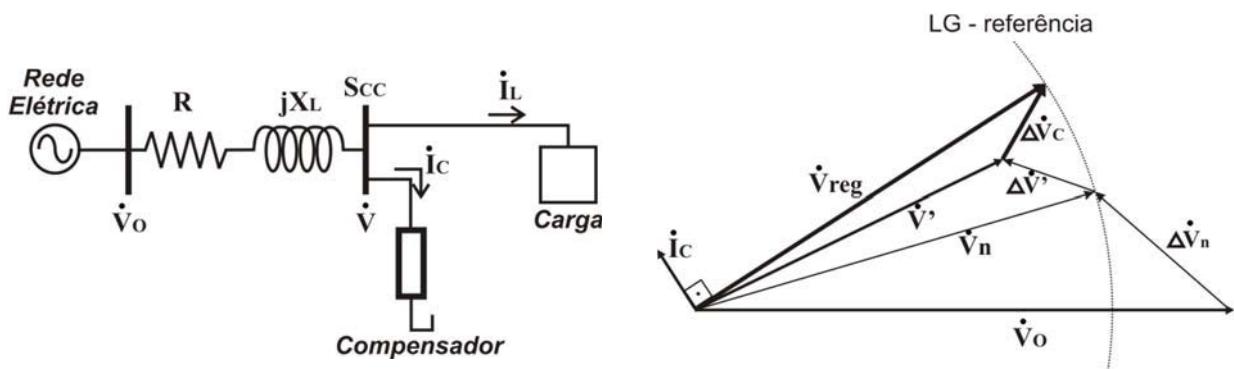
## **2.3 DETERMINAÇÃO DAS POTÊNCIAS REATIVAS DAS UNIDADES COMPONENTES DO COMPENSADOR**

Os critérios adotados para a especificação das unidades (reator e capacitor) componentes do compensador de reativos ora em discussão fundamentam-se no propósito de, a partir da configuração e parametrização de uma rede de alimentação e, uma vez constatados desvios de tensão, determinar os montantes de potências reativas (indutivas e capacitivas) que se farão necessários para a sua restauração [36].

Objetivando cumprir tais metas adota-se, para fins ilustrativos, o sistema elétrico indicado na Figura 2.2(a). Este representa um arranjo elétrico simplificado e identifica o barramento focado do processo da adequação da tensão. Complementarmente, a Figura 2.2(b) ilustra o respectivo diagrama fasorial para o ponto elétrico em destaque, mostrando as tensões para duas situações operacionais distintas. Inicialmente, é possível visualizar a condição operativa considerada nominal, a qual condiz com um valor de tensão igual ao valor normal ou contratado ( $\dot{V}_n$ ). Este valor original é tomado como referência nos desenvolvimentos matemáticos subsequentes, visto que tal valor origina o semicírculo que determina o lugar geométrico (LG) das tensões de módulo ( $\dot{V}_n$ ). Esta tensão, como é amplamente conhecida, é obtida através da composição da tensão a vazio ( $\dot{V}_0$ ) e da queda de tensão da linha ( $\Delta\dot{V}_n$ ).

Na mesma figura é apresentada uma segunda condição de funcionamento da rede, desta feita admitindo-se uma elevação na potência solicitada pela carga. Sob esta situação operativa, como se sabe, haverá uma nova tensão disponível no barramento da carga, a qual foi identificada por  $(\dot{V}')$ .

Vale ainda observar que as figuras evidenciam a inserção de um dispositivo compensador de tensão e, após a conexão deste dispositivo, a tensão nos terminais da carga, após o acréscimo do carregamento, é restaurada ao valor original. Esta última tensão foi identificada por tensão regulada ( $\dot{V}_{reg}$ ).



Nas figuras têm-se os seguintes fasores:

- $\dot{V}_o$  – tensão a vazio;
  - $\dot{V}_n$  – tensão de operação ou contratada, ou de referência;
  - $\dot{V}'$  – nova tensão associada com um aumento da carga;
  - $\dot{V}_{reg}$  – tensão regulada;
  - $\Delta\dot{V}_n$  – variação de tensão sob condições normais;
  - $\Delta\dot{V}'$  – incremento na variação de tensão após o aumento da carga;
  - $\Delta\dot{V}_c$  – incremento na variação de tensão imposta pelo compensador;
  - $\dot{I}_c$  – corrente do compensador.

Como observado, o procedimento de compensação da tensão empregado consiste num suporte de reativos para a restauração da tensão aos níveis originais, fato este que, mais uma vez, orienta para que o equipamento compensador em foco se apresente como enquadrado nos métodos indiretos de regulação, no qual a regulação de tensão acontece via compensação de reativos.

Do ponto de vista fasorial, o processo se resume no cálculo do valor eficaz da corrente de compensação ( $\dot{I}_c$ ) que venha a produzir um incremento de tensão ( $\Delta\dot{V}_c$ ) necessária à compensação da queda de tensão ( $\Delta\dot{V}'$ ) observada anteriormente.

Um raciocínio análogo, porém inverso, poderá ser aplicado caso o sistema apresente uma diminuição da carga. Naturalmente, neste novo cenário, espera-se uma elevação da tensão no barramento, indicando a necessidade de uma compensação reativa destinada a produzir um efeito contrário ao apresentado anteriormente.

A Figura 2.3 ilustra o dispositivo físico adotado para o processo da compensação aqui utilizado, o qual é composto pela associação paralela de um banco de capacitores e um reator saturado. Imaginando os dois dispositivos operando em paralelo, sem a necessidade de manobras de chaveamento visando controlar ou isolar um ou outro, não resta outra interpretação senão considerar que, caso seja necessário alterar o valor da potência reativa total (consumida ou fornecida) a hipótese mais plausível consiste em trabalhar com compensadores com recursos para alterar os montantes de reativos, como ocorre para o reator saturado indicado.

Não obstante a observação acima é conveniente ressaltar que, para fins dos dimensionamentos aqui contemplados, admitir-se-á situações extremas que ditarão os valores de potências reativas indutivas e capacitivas máximas a serem exigidas para os enquadramentos dos níveis inferiores e superiores passíveis de manifestação. A partir destas, o mecanismo de controle intrínseco do reator

saturado será incumbido de adequar as potências reativas aos valores exigidos, nos termos requeridos pelas variações de tensão.

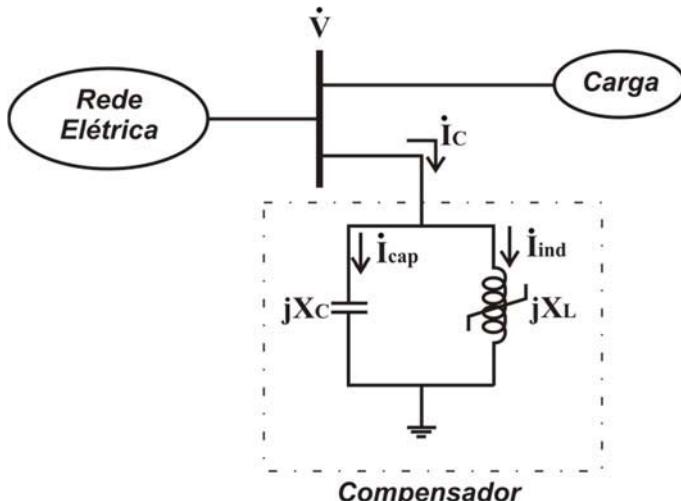


Figura 2.3 – Compensador de reativos composto pela associação paralela de um reator saturado e um banco de capacitores fixo.

Diante do exposto, fica evidenciado que, para o dimensionamento dos dispositivos de compensação, qual seja, a potência reativa e capacitância do banco de capacitores, assim como também a definição do montante de potência reativa requerida do reator, torna-se necessário o conhecimento das seguintes informações relativas ao sistema a ser compensado:

- Nível de curto-circuito do barramento (Scc) e respectiva relação X/R;
- Valor eficaz da tensão máxima registrada no barramento (carregamento mínimo);
- Valor das potências ativa e reativa de carga associadas com o carregamento mínimo;
- Valor eficaz da tensão mínima registrada no barramento (maior carregamento imposto);
- Valor das potências ativa e reativa associadas com o carregamento máximo requerido pela carga;
- Limites (máximo e mínimo) definidos para a regulação de tensão (legislação);

- Limites (máximo e mínimo) aceitáveis para a regulação de tensão;
- Valor eficaz da tensão de operação normal ou contratada ou de referência  $V_n$ .

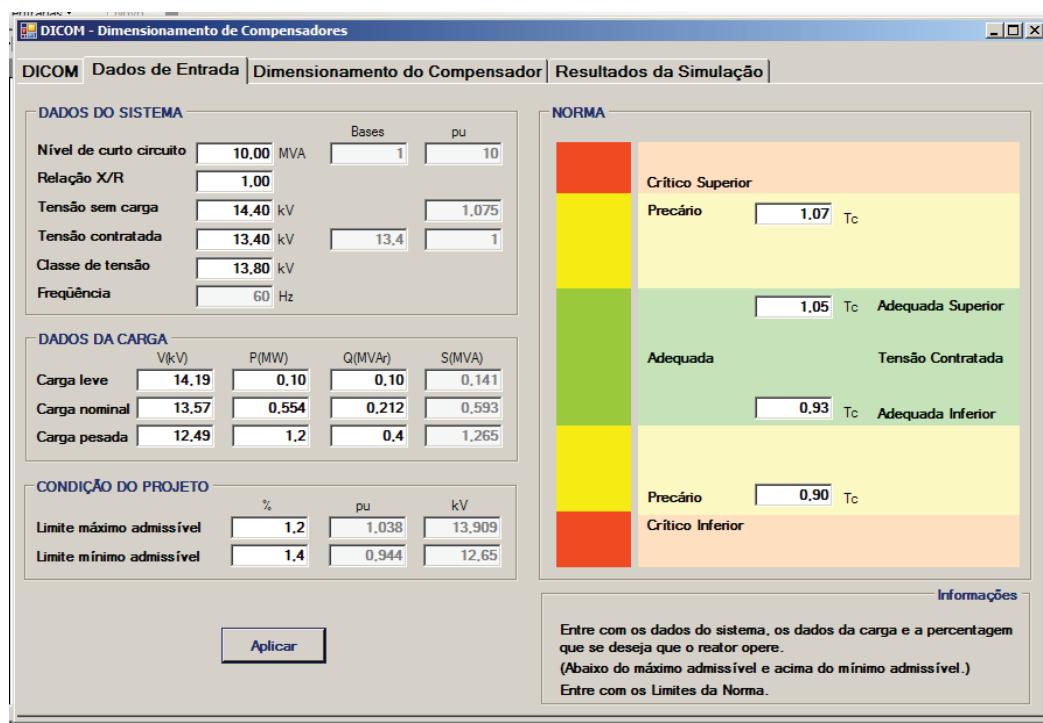
No que tange ao dimensionamento do banco de capacitores, vale ressaltar que tal cálculo deve considerar duas hipóteses quanto à presença do reator em paralelo. Uma primeira em que o RNS se encontra totalmente desconectado, e outra, para a qual o mesmo se encontra inserido de forma total ou parcial. Esta última situação, visa contemplar o fato que, quando da sua operação sob condições adversas da tensão de suprimento, o consumo de reativos indutivos é fortemente influenciado pela tensão vigente no barramento, como estabelecido pelo princípio operacional do reator aqui considerado.

Os valores das potências reativas do reator e do capacitor, para as condições extremas, são determinados em consonância com a metodologia proposta e apresentada em [36]. Esta compreende um processo iterativo de cálculo envolvendo a inserção de potências reativas para o reator e capacitor e verificando, à luz das informações próprias do sistema em pauta, o enquadramento das tensões dentro dos patamares especificados.

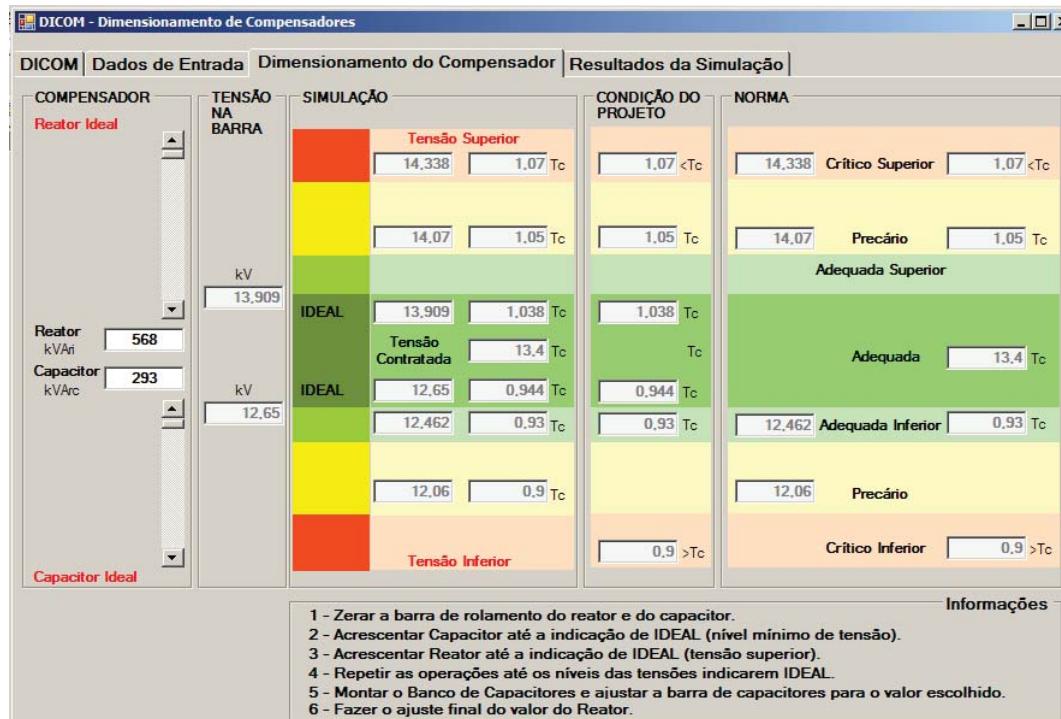
Deve-se ressaltar que, uma vez estabelecida a filosofia a ser adotada para a determinação das potências nominais do reator saturado e do banco de capacitores paralelo, esta foi materializada pela referência [36], na forma de um aplicativo computacional destinado ao “Dimensionamento de Compensadores” (DICOM), que simplifica o processo, facilitando assim a busca do equipamento mais adequado para cada situação.

As Figuras 2.4 (a) e (b) ilustram, respectivamente, duas janelas do aplicativo computacional desenvolvido para o dimensionamento de compensadores (programa DICOM): uma relacionada com as informações de entrada necessárias para a especificação dos elementos constituintes do compensador e uma segunda janela que trata do processo propriamente dito. Este

mechanismo consiste numa busca iterativa pelo reator saturado e banco de capacitores paralelo para fins da regulação das tensões no barramento do sistema elétrico avaliado. Ressalta-se que os valores das potências reativas associadas com os reatores independem do tipo de equipamento, isto é, da configuração física do elemento indutivo. Não obstante a isto, para fins do presente trabalho, o equipamento em foco se apresenta na forma do reator tipo *twin-tripler*. Também, para o presente momento, a definição do compensador encontra-se alicerçado no fato que a carga suprida é representada meramente por um consumo  $P+jQ$ , portanto, sem qualquer correlação com eventuais não linearidades presentes.



(a) Tela para entrada dos dados



(b) Janela para busca do reator saturado e banco de capacitores  
Figura 2.4 – Aplicativo computacional para o dimensionamento de compensadores – DICOM.

## 2.4 PRINCÍPIO OPERACIONAL DOS REATORES A NÚCLEO SATURADO

O reator saturado consiste num dispositivo cujas propriedades físicas e aspectos construtivos se apresentam com grande similaridade com os transformadores de potência. Entretanto, no que tange à filosofia operacional do RNS, esta diverge daquela apresentada pelo transformador de potência, tendo em vista que o reator a núcleo saturado, conforme o próprio nome sugere, apresenta um comportamento fortemente não-linear, trabalhando na região de saturação da sua curva de operação. A Figura 2.5 evidencia as diferenças operacionais impostas pelos dois equipamentos acima referidos, quanto às questões atreladas com o nível de magnetização explorado.

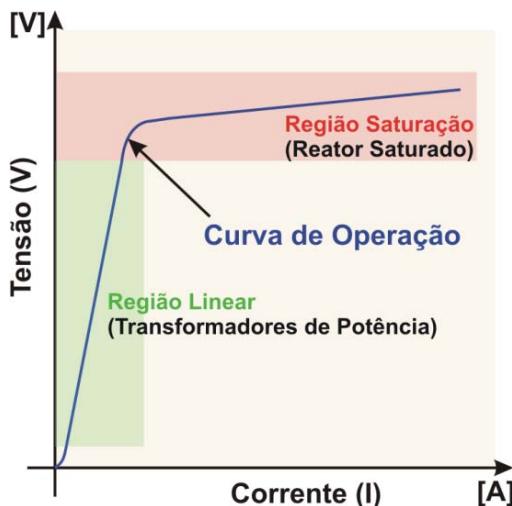


Figura 2.5 – Curva de operação dos equipamentos eletromagnéticos (Transformador de Potência – Reator a Núcleo Saturado).

Um reator saturado, embora seja capaz de promover a compensação de reativos e controlar a tensão, apresenta uma característica pouco atrativa de introduzir apreciáveis níveis de correntes harmônicas no sistema ao qual se encontra conectado, por se tratar de uma carga com característica não-linear. Além da indesejável poluição do sistema elétrico, este tema merece uma atenção especial, devido à presença de capacitores conectados em paralelo e em série com o reator, configurando assim um ambiente propício à ocorrência de fenômenos de ressonância e até mesmo ferro-ressonância. Assim, objetivando atenuar tais efeitos negativos, foram desenvolvidas várias configurações de dispositivos trifásicos, visando reduzir o conteúdo harmônico das correntes.

Por esse motivo, a busca por soluções que contribuam para a redução dos níveis de distorções harmônicas produzidas pelo equipamento, constitui um tema de extrema relevância para o domínio da tecnologia de construção de reatores saturados. De fato, reconhecem-se várias topologias construtivas objetivando a solução de tal problema, utilizando-se para tanto, das mais variadas combinações de conexões entre enrolamentos e disposição de núcleos possíveis.

A Figura 2.6 apresenta os principais arranjos eletromagnéticos utilizados para a fabricação de reatores saturados e representam evoluções naturais visando a compensação interna da produção de harmônicos de corrente.

As topologias **a**, **b** e **c**, foram as primeiras desenvolvidas, e como se pode observar, são aquelas que apresentam um esquema de conexões mais elementar e, consequentemente, traz consigo os malefícios das distorções harmônicas de ordem ( $3, 5$  e  $7$  – arranjo **a**) e ( $6K \pm 1 = 5, 7, 11, 13, 17, \dots$  – arranjos **b** e **c**, onde  $K$  é um número inteiro). Embora os arranjos **b** e **c** impliquem em impactos diferentes nas formas de ondas das correntes solicitadas pelo equipamento, sob o ponto de vista de distorção harmônica, os resultados são bastante semelhantes [35].

Já as topologias **d**, **e** e **f**, correspondem aos novos arranjos destinados a atenuação das distorções harmônicas inseridas no sistema elétrico. As combinações **d** e **e**, que produzem apenas as harmônicas de ordem ( $12K \pm 1$ ), correspondem a duas variações do arranjo *twin-tripler* (seis colunas magnéticas), sendo uma de núcleo compacto e a outra com núcleo isolado. Estas construções se justificam pelo fato que, para a primeira, há uma forte interação magnética entre as seis colunas envolvidas, enquanto que, para a segunda, devido à montagem na forma de dois núcleos eletromagnéticos independentes, os níveis de desequilíbrios encontrados para as correntes absorvidas pelo reator são menores. Vale ressaltar que nas figuras correspondentes identifica-se um conjunto de espiras definidas por  $N_p$  e outro por  $N_a$ . Estes correspondem, respectivamente, aos números de espiras dos enrolamentos principal e auxiliar, os quais são diferentes entre si [35].

Quanto a topologia **f**, esta encontra-se associada com a configuração conhecida por *treble-tripler* (nove colunas magnéticas). Isto proporciona uma eliminação ainda mais expressiva do conteúdo harmônico de corrente gerado. Para este arranjo construtivo as correntes se apresentam com ordens definidas pela relação ( $18K \pm 1$ ), portanto, similares aos clássicos sistemas de 18 pulsos.

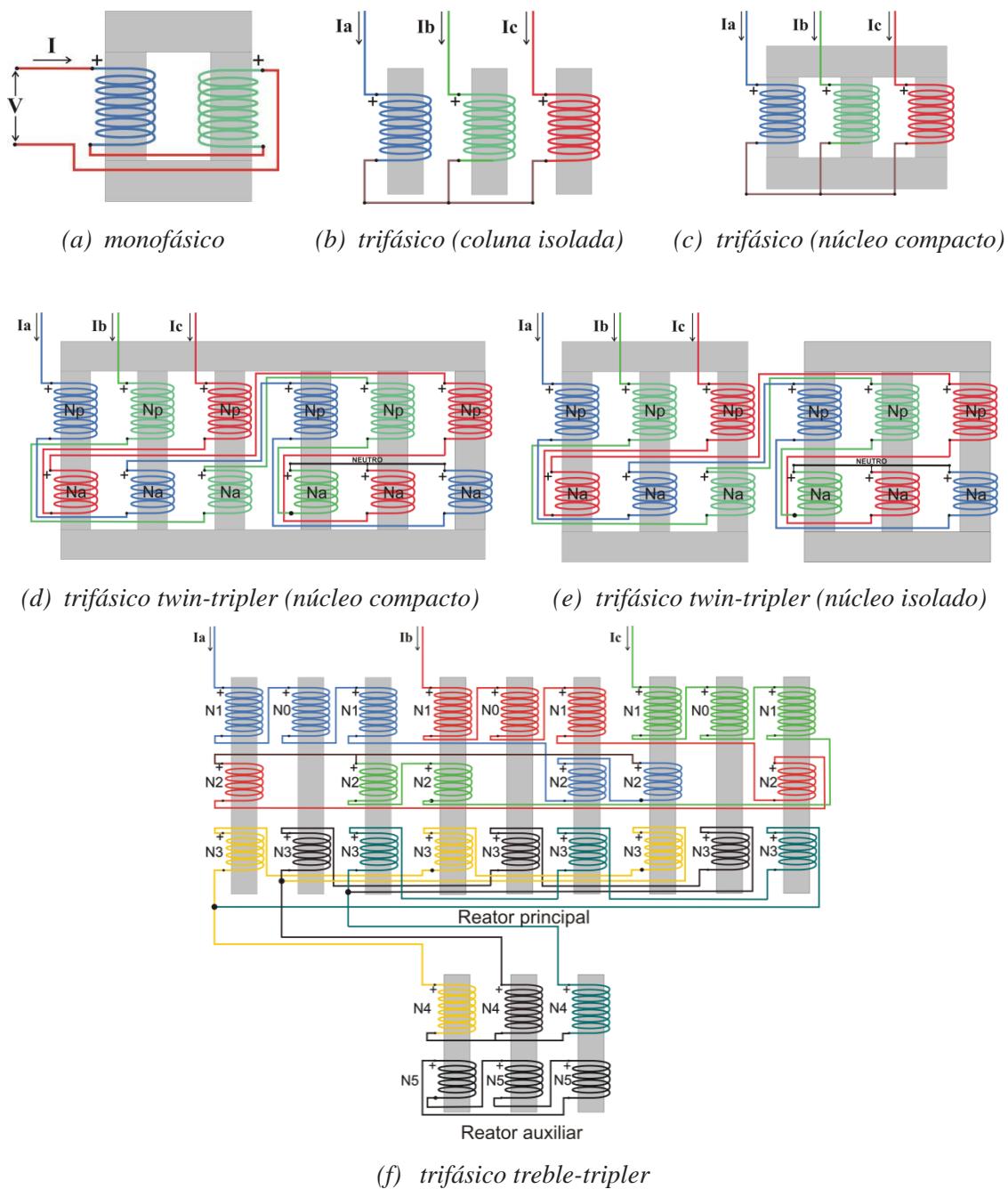


Figura 2.6 – Reatores a núcleo saturado – Principais arranjos construtivos.

A configuração *treble-tripler*, apesar de ser bastante eficiente sob o ponto de vista de cancelamento harmônico, consiste em uma solução mais cara e, portanto, menos viável sob o ponto de vista econômico. Assim, buscando um equacionamento entre viabilidade técnica e econômica, a alternativa que apresentou o melhor custo benefício foi o arranjo *twin-tripler* (núcleo isolado – arranjo *e*). Logo, toda metodologia de projeto que será apresentada

posteriormente, será desenvolvida com base nesse modelo de reator saturado, o qual se apresenta operacionalmente adequado quanto à questão da correlação entre a potência reativa e a tensão aplicada, produz um conteúdo espectral moderado e apresenta-se com uma constituição física de menor custo e peso inferior.

## **2.5 PROJETO BÁSICO DOS REATORES A NÚCLEO SATURADO - TIPO *TWIN-TRIPLEX* DE NÚCLEO ISOLADO**

Uma vez apresentada a filosofia adotada para a determinação dos montantes de reativos a serem consumidos pelo reator a núcleo saturado, tanto a potência reativa de operação em regime de saturação, quanto a respectiva tensão terminal se apresentam como grandezas conhecidas.

A partir de tais informações procede-se, na sequência, ao estabelecimento das bases para os cálculos dos parâmetros físicos construtivos (elétricos e geométricos), essenciais para a obtenção do equipamento que contemple as exigências impostas.

Para tanto, os desenvolvimentos matemáticos e teóricos se encontram alicerçados em equações clássicas que regem a teoria construtiva de transformadores, levando-se em consideração, entretanto, as particularidades e peculiaridades operativas intrínsecas do reator.

Em sintonia com o exposto segue que a sequência utilizada para os trabalhos compreende:

- Estabelecimento das características nominais do reator saturado tipo *twin-triplex*;
- Determinação dos principais parâmetros físicos (geométricos e magnéticos) dos núcleos do equipamento;

- Dimensionamento dos enrolamentos (principal e auxiliar) do reator saturado.

### **2.5.1 Características nominais do reator saturado**

As principais características associadas com o reator são:

- Potência reativa nominal ( $Q$ ) para a maior tensão passível de operação a ser regulada;
- Tensão nominal de operação ( $V_n$ );
- Frequência nominal ( $f$ );
- Corrente nominal ( $I_{RNS}$ ).

Vale ressaltar que o regulador de tensão absorverá sua potência nominal, definida em projeto, apenas durante o instante em que a tensão aplicada em seus terminais manifestar o maior nível a ser regulado para o valor nominal de operação ( $V_n$ ). Também, sempre que a tensão for inferior à nominal de operação, o RNS deverá consumir um mínimo de potência reativa (idealmente nulo), de acordo com a dinâmica imposta pela curva de operação ( $VxI$ ) intrínseca à filosofia operativa do equipamento. Tais propriedades resultam que o emprego da característica operativa, cujos detalhes já foram discutidos anteriormente, resultam que o emprego do reator a núcleo saturado se torne, também, extremamente atrativo para aplicações em sistemas radiais, sobretudo em alimentadores com tronco de grandes extensões (50 a 100 km), como o que ocorre frequentemente em regiões de baixa densidade populacional e cujos suprimentos se fazem através de linhas de 13,8kV ou 34,5 kV, por exemplo. Para tais complexos elétricos a utilização da solução ora explorada poderia ser considerada como uma alternativa ao uso de reguladores de tensão (RTs) comerciais com mudanças automática de tapes e respectivos desgastes mecânicos dos dispositivos de chaveamento.

Uma vez conhecidas a potência nominal e a tensão que conduz o RNS à condição de saturação plena, a corrente nominal ( $I_{RNS}$ ) solicitada pelo RNS pode ser determinada pela equação (2.1):

$$I_{RNS} = \left( \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V_n} \right) \cdot \left( 1 + \frac{\Delta Pe\%}{100} \right) \quad [A] \quad (2.1)$$

Em que:

$I_{RNS}$  – Corrente de linha nominal [A];

$S$  – Potência trifásica aparente nominal [kVA];

$V_n$  – Tensão de linha nominal de operação [kV];

$\Delta Pe\%$  - Perdas percentuais do reator [%].

As perdas percentuais do reator encontram-se atreladas com as perdas ativas que se manifestam no equipamento, na forma de efeito Joule e também por Histerese e Foucault no ferro. Tal valor se encontra estimado em função de projetos, construções e operações passadas, as quais apontam para níveis da ordem de 5% da potência reativa absorvida pelo reator. Esta informação empírica pode também ser extraída de dados de fabricantes através das correlações entre as perdas no ferro, por quilograma de chapa, e também em função dos níveis de indução magnética impostas ao equipamento [36]. Estas informações, somadas aos efeitos  $RI^2$  nos enrolamentos produziriam os dados requeridos. Para fins desta pesquisa foi utilizada a proporção de 5% da potência reativa correspondente.

### 2.5.2 Parâmetros geométricos e magnéticos

Na Figura 2.7, pode-se observar os principais elementos físicos constituintes de um reator saturado *twin-tripler*. Nesta ilustração foram omitidos elementos básicos como o tanque e o líquido isolante, a fim de favorecer uma melhor visualização do conjunto eletromagnético do equipamento.

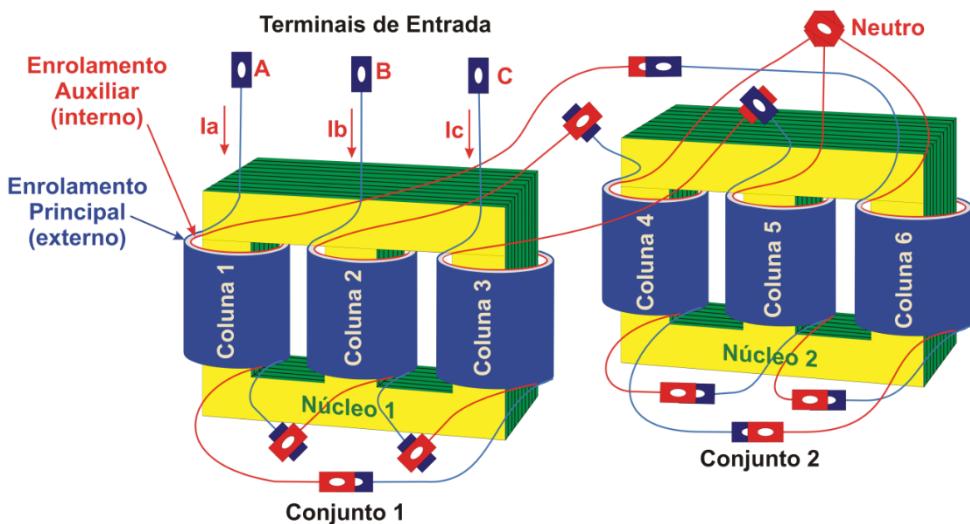


Figura 2.7 – Reator a núcleo saturado – Arranjo construtivo twin-tripler (Vista em perspectiva).

A Figura 2.8 apresenta uma visão perspectiva do núcleo do reator, destacando as principais dimensões associadas com o processo construtivo do equipamento.

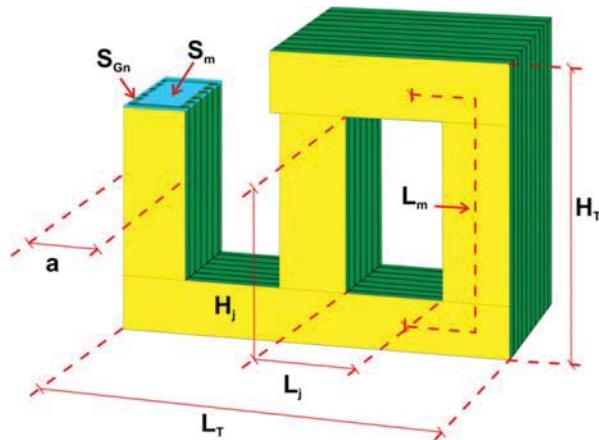


Figura 2.8 – Síntese das principais dimensões físicas do núcleo do reator saturado twin-tripler.

Na figura anterior:

- Seção magnética equivalente do núcleo ( $S_m$ );
- Seção geométrica ou física do núcleo ( $S_{Gn}$ );
- Largura da coluna (a);
- Comprimento magnético ( $L_m$ );

- Largura da janela ( $L_j$ );
- Altura da janela ( $H_j$ );
- Largura total do núcleo do reator ( $L_T$ );
- Altura total do núcleo do reator ( $H_T$ ).

*a) Seção magnética do núcleo ( $S_m$ ):*

O cálculo do núcleo de transformadores leva em consideração dois fatores básicos: o tipo de lâminas e o número de circuitos que o transformador possui. No caso dos reatores saturados, além desses dois fatores um terceiro fato deve ser considerado, qual seja, o número de estruturas magnéticas requeridas (duas para o caso em pauta). Assim, a seção magnética do núcleo de um reator saturado *twin-tripler* pode ser calculada de acordo com a equação (2.2) extraída de [52].

$$S_m = C_L \cdot \sqrt{\frac{[\frac{S}{3 \cdot N_n}] \cdot 1000}{f}} \quad [\text{cm}^2] \quad (2.2)$$

Em que:

$S_m$  – Seção magnética do núcleo [ $\text{cm}^2$ ];

$C_L$  – Coeficiente para o tipo de lâmina utilizada na construção do núcleo magnético;

$S$  – Potência trifásica nominal do reator [ $\text{kVA}$ ];

$N_n$  – Quantidade de núcleos magnéticos que constituem o equipamento;

$f$  – Frequência nominal [ $\text{Hz}$ ].

Vale ressaltar que o coeficiente  $C_L$  utilizado no projeto de transformadores, varia de acordo com o tipo de lâmina utilizada na construção do núcleo magnético do equipamento. Para lâminas comerciais utilizadas na fabricação de transformadores é utilizado  $C_L = 6,5$  [36].

Uma vez calculada a seção magnética do núcleo ( $S_m$ ), pode-se determinar a seção geométrica deste ( $S_{Gn}$ ), a qual compreende a área efetivamente a ser utilizada para os caminhos das linhas de força. Admitindo que cerca de 10% da área seja ocupada por vernizes e espaçamentos outros, isto resulta na equação (2.3).

$$S_{Gn} = 1,1 \cdot S_m \quad [\text{cm}^2] \quad (2.3)$$

Em que:

$S_{Gn}$  – Seção geométrica do núcleo [ $\text{cm}^2$ ];

$S_m$  – Seção magnética do núcleo [ $\text{cm}^2$ ].

*b) Largura da coluna do núcleo (a):*

Em sintonia com processos tradicionais utilizados para a construção de transformadores, o formato do núcleo é aproximadamente quadrado. Portanto, a largura da coluna central do núcleo pode ser obtida pela equação (2.4).

$$a = \sqrt{S_{Gn}} \quad [\text{cm}] \quad (2.4)$$

Em que:

$a$  – Largura da coluna do núcleo [ $\text{cm}$ ];

$S_{Gn}$  – Seção geométrica do núcleo [ $\text{cm}^2$ ].

*c) Comprimento magnético do núcleo do reator ( $L_m$ ):*

O comprimento magnético ( $L_m$ ) do núcleo, corresponde à porção (comprimento linear) de material magnético através do qual se estabelece uma intensidade de campo magnético ( $H$ ), produzido por um enrolamento possuindo um número de espiras ( $N_p$ ), percorridas por uma corrente ( $I_n$ ). Nestes termos, como é conhecido, a equação (2.5) expressa a correlação entre estas grandezas,

em que o campo magnético  $H$  é obtido através da relação  $BxH$  do material empregado e da definição do valor de  $B$  para o ponto de saturação escolhido.

$$L_m = \frac{N_p \cdot I_n}{H} \cdot 100 \quad [\text{cm}] \quad (2.5)$$

Em que:

$L_m$  – Comprimento magnético do núcleo [cm];

$N_p$  – Número de espiras do enrolamento principal [espira];

$I_n$  – Corrente nominal no condutor [A];

$H$  – Intensidade de campo magnético [A.esp/m].

***d) Largura da janela do núcleo do reator ( $L_j$ ):***

A largura da janela do núcleo do reator é calculada basicamente em função da largura da coluna do mesmo. Entretanto, vale ressaltar que outros parâmetros devem ser consultados no momento do dimensionamento da largura da janela, a fim de que seja verificado, se uma determinada quantidade de espiras de um condutor de seção ( $\alpha$ ), será comportada pela largura de janela calculada. Maiores detalhes sobre a determinação do número de espiras, assim como da seção do condutor que forma o enrolamento, serão abordados posteriormente.

A equação (2.6) destina-se ao cálculo da largura da janela de um reator. A constante utilizada na expressão foi extraída de [36].

$$L_j = \frac{a}{1,46} \quad [\text{cm}] \quad (2.6)$$

Em que:

$L_j$  – Largura da janela [cm];

$a$  – Largura da coluna [cm].

*e) Altura da janela do núcleo do reator ( $H_j$ ):*

A altura da janela ( $H_j$ ) do núcleo do reator deve ser dimensionada levando em consideração, além da largura da coluna ( $a$ ) do núcleo, a largura da janela ( $L_j$ ) e ainda o comprimento magnético ( $L_m$ ) do núcleo do equipamento. Uma vez determinada tal grandeza, deve-se avaliar mais uma vez, se a altura da janela calculada comportará o número de espiras do enrolamento do reator. A equação (2.7) oferece meios para o cálculo da altura da janela aqui referida.

$$H_j = L_m - 2 \cdot (a + L_j) \quad [\text{cm}] \quad (2.7)$$

Em que:

$H_j$  – Altura da janela [cm];

$L_m$  – Comprimento magnético do núcleo [cm];

$a$  – Largura da coluna [cm];

$L_j$  – Largura da janela [cm].

*f) Largura total do núcleo do reator ( $L_T$ ):*

Uma vez conhecidas as larguras da coluna ( $a$ ) e da janela ( $L_j$ ) do núcleo, pode-se então, determinar a largura total ( $L_T$ ) do núcleo do equipamento. Esta grandeza pode ser determinada através da equação (2.8).

$$L_T = 2 \cdot L_j + 3 \cdot a \quad [\text{cm}] \quad (2.8)$$

Em que:

$L_T$  – Largura total do núcleo [cm];

$L_j$  – Largura da janela [cm];

$a$  – Largura da coluna [cm].

**g) Altura total do núcleo do reator ( $H_T$ ):**

Quanto à altura total ( $H_T$ ), esta pode ser calculada a partir da largura da coluna (a) e da altura da janela do reator saturado ( $H_j$ ). Estas dimensões oferecem subsídios para o conhecimento da geometria aproximada que irá perfazer o núcleo. Vale ressaltar que os dois núcleos eletromagnéticos que formam o arranjo construtivo do reator aqui focado são idênticos.

Por fim, a altura total pode ser determinada através da equação (2.9).

$$H_T = 2 \cdot a + H_j \quad [\text{cm}] \quad (2.9)$$

Em que:

$H_T$  – Altura total do núcleo [cm];

$a$  – Largura da coluna [cm];

$H_j$  – Altura da janela [cm].

### 2.5.3 Enrolamentos (principal e auxiliar)

No que tange aos enrolamentos, o arranjo construtivo, como previamente esclarecido, encontra-se constituído por 6 (seis) bobinas (Figura 2.6-e) para cada núcleo magnético, sendo um enrolamento principal ( $N_p$ ) e outro auxiliar ( $N_a$ ), concêntricos, para cada coluna, perfazendo um total de 12 (doze) bobinas para o conjunto final.

Para o caso dos reatores saturados a terminologia utilizada para os enrolamentos baseia-se em tão apenas definir: enrolamento principal ( $N_p$ ) e enrolamento auxiliar ( $N_a$ ). A Figura 2.9 ilustra tais bobinas, as quais se encontram dispostas de forma concêntricas em relação ao núcleo.

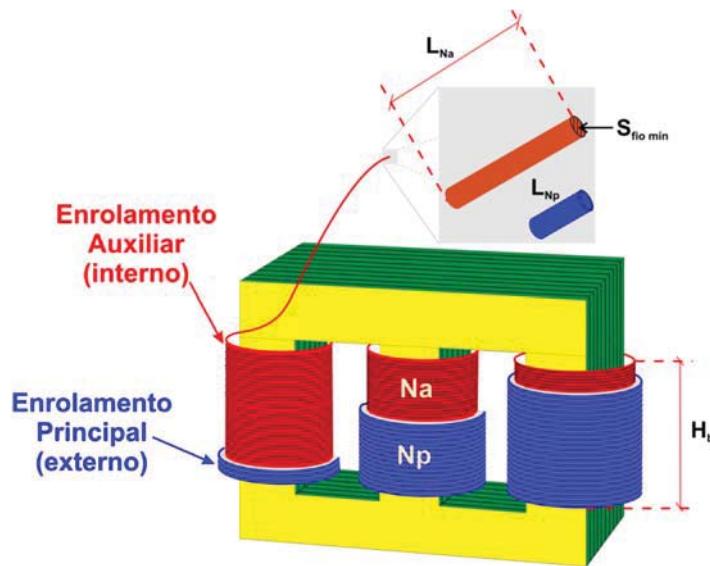


Figura 2.9 – Síntese das principais grandezas envolvendo os enrolamentos do reator *twin-tripler*.

O processo para o dimensionamento físico das bobinas do reator saturado *twin-tripler* compreende as seguintes etapas:

- Cálculo do número de espiras do enrolamento principal ( $N_p$ );
- Cálculo do número de espiras do enrolamento auxiliar ( $N_a$ );
- Determinação da seção mínima do condutor ( $S_{fio\ min}$ ) utilizado nos enrolamentos;
- Determinação do comprimento médio das espiras do enrolamento principal ( $L_{Np}$ );
- Definição do comprimento médio das espiras do enrolamento auxiliar ( $L_{Na}$ );
- Cálculo da altura da bobina ( $H_b$ ).

*a) Número de espiras do enrolamento principal ( $N_p$ ):*

O número de espiras do enrolamento principal do reator saturado depende basicamente do nível da tensão de operação nominal do equipamento, da potência nominal, e também, da geometria e dimensões do núcleo do reator. Fundamentado

em princípios estabelecidos em [52], a equação (2.10) apresenta uma expressão para a determinação do número de espiras do enrolamento principal ( $N_p$ ) do RNS. Deve-se ressaltar, que o referido cálculo leva em consideração a tensão para a qual, o equipamento irá absorver do sistema sua potência nominal de projeto.

$$N_p = \frac{V_p \cdot 10^8}{4,44 \cdot B_m \cdot S_m \cdot f} \quad [\text{espira}] \quad (2.10)$$

Em que:

$N_p$  – Número de espiras do enrolamento principal do reator [espira];

$V_p$  – Tensão do enrolamento principal [V];

$B_m$  – Indução magnética adotada para o ponto de saturação máximo em [T];

$S_m$  – Seção magnética do núcleo [ $m^2$ ];

$f$  – Frequência nominal [Hz].

**b) Número de espiras do enrolamento auxiliar ( $N_a$ ):**

O número de espiras do enrolamento auxiliar ( $N_a$ ) está diretamente ligado ao número de espiras do enrolamento principal ( $N_p$ ). Esta dependência faz-se necessária graças ao arranjo construtivo escolhido, neste caso o *twin-tripler*, a fim de que se atinja a compensação intrínseca de harmônicos nos termos classicamente conhecidos. Este arranjo requer uma defasagem de  $30^\circ$  entre as *fmms* da bobina principal e auxiliar, fato este que conduz a uma relação de espiras  $N_a/N_p$  igual a 0,366, independente da potência e nível da tensão de operação do equipamento, consegue-se um auto cancelamento de correntes harmônicas, tal que o espectro de frequências resultante e injetado na rede de alimentação comprehende:  $n=1,11,13,23,25,\dots$ , ou, de um modo geral ( $n=12K\pm1$ ), conforme descrito em [35].

Portanto, uma vez conhecido  $N_p$ , através da equação (2.11) obtém-se ( $N_a$ ).

$$N_a = N_p \cdot 0,366 \quad [\text{espira}] \quad (2.11)$$

Em que:

$N_a$  – Número de espiras do enrolamento auxiliar [espira];

$N_p$  – Número de espiras do enrolamento principal [espira].

*c) Seção mínima do condutor ( $S_{fio \min}$ ):*

Para se calcular a seção mínima dos condutores que formam os enrolamentos do reator, é preciso fixar a densidade de corrente nos mesmos. De acordo com a literatura clássica que trata do projeto e construção de transformadores [52], são obtidos melhores resultados quanto à irradiação de calor no equipamento, quando a densidade de corrente nos condutores são mantidas dentro dos limites indicados pela Tabela 2.3. A partir desta, pode-se observar que os resultados apresentados são válidos para equipamentos de pequeno porte, devendo-se estes receber as devidas adequações para a representação de equipamentos de maior porte. Além disso, deve-se ressaltar que quanto maior o porte do equipamento, menor deverá ser o limite fixado para a densidade de corrente, visando atender ao objetivo de minimizar os efeitos térmicos no equipamento. Não obstante tais informações serem aplicáveis à construção de transformadores, não foram encontradas quaisquer orientações diretamente afeitas ao projeto de reatores. Por tal motivo, as mesmas diretrizes foram empregadas para os fins aqui postos.

*Tabela 2.3 – Densidade de corrente em condutores de transformadores de pequeno porte.*

Potência [VA]	Densidade de Corrente [A/mm <sup>2</sup> ]
500	3
500 até 1.000	2,5
1.000 até 3.000	2

Uma vez fixado o valor da densidade de corrente ( $J$ ), a seção mínima do condutor poderá ser calculada através da equação (2.12).

$$S_{fio\ min} = \frac{I_n}{J} \quad [\text{mm}^2] \quad (2.12)$$

Em que:

$S_{fio\ min}$  – Seção mínima dos condutores [ $\text{mm}^2$ ];

$I_n$  – Corrente nominal no condutor [A];

$J$  – Densidade de corrente no condutor [ $\text{A}/\text{mm}^2$ ].

*d) Comprimento médio das espiras do enrolamento principal ( $L_{Np}$ ):*

O cálculo do comprimento médio das espiras do enrolamento principal ( $L_{Np}$ ) consiste basicamente da determinação do comprimento linear de condutor utilizado na composição do enrolamento principal. Para tanto, deve-se levar em consideração o número de espiras no enrolamento ( $N_p$ ) e a seção magnética do núcleo, acrescida em 10% para compensar fatores de empilhamento e bobinamento. Esta informação se prende ao fato que o comprimento linear dos condutores, obviamente, determinará o valor da resistência ôhmica da bobina.

Assim, o cálculo de tal grandeza pode ser feito através da equação (2.13).

$$L_{Np} = 1,1 \cdot N_p \cdot \sqrt{4\pi \cdot S_m} \quad [\text{cm}] \quad (2.13)$$

Em que:

$L_{Np}$  – Comprimento médio das espiras do enrolamento principal [cm];

$N_p$  – Número de espiras do enrolamento principal [espira];

$S_m$  – Seção magnética do núcleo [ $\text{cm}^2$ ].

*e) Comprimento médio das espiras do enrolamento auxiliar ( $L_{Na}$ ):*

De maneira semelhante ao caso anterior, o cálculo do comprimento médio linear das espiras do enrolamento auxiliar é feito em consonância com a equação

(2.14). Nesta, constata-se o uso de um fator igual a 1,05 que é atribuído ao fato que as bobinas do enrolamento auxiliar são construídas de forma concêntrica e interna ao principal.

$$L_{Na} = 1,05 \cdot N_a \cdot \sqrt{4\pi \cdot S_m} \quad [\text{cm}] \quad (2.14)$$

Visando maior clareza para a interpretação das grandezas envolvidas, muito embora as mesmas já tenham sido identificadas anteriormente, os seus significados são transcritos a seguir:

$L_{Na}$  – Comprimento médio das espiras do enrolamento auxiliar [cm];

$N_a$  – Número de espiras do enrolamento auxiliar [espira];

$S_m$  – Seção magnética do núcleo [ $\text{cm}^2$ ].

*f) Altura da bobina ( $H_b$ ):*

O último parâmetro a ser determinado consiste na altura da bobina, dado este imprescindível para o cálculo da reatância de dispersão dos enrolamentos do reator *twin-tripler*.

A equação (2.15) apresenta a formulação para a altura da bobina e, tendo em mente que os enrolamentos são formados por várias camadas, o número de espiras a ser considerado no cálculo será aquele presente em uma das camadas que formam o enrolamento multicamadas.

$$H_b = d_c \cdot N_p \quad [\text{mm}] \quad (2.15)$$

Em que:

$H_b$  – Altura da bobina de enrolamentos do reator [mm];

$d_c$  – Diâmetro do condutor [mm];

$N_p$  – Número de espiras do enrolamento principal [espira].

## 2.6 DETERMINAÇÃO DAS INDUTÂNCIAS E RESISTÊNCIAS EQUIVALENTES

De acordo com procedimentos clássicos, o desenvolvimento de modelos matemáticos e respectivas implementações em simuladores computacionais passa, necessariamente, pelo estabelecimento de circuitos elétricos e magnéticos equivalentes. Assim sendo, torna-se extremamente importante a estimativa dos valores dos componentes representados (indutâncias e resistências) para as distintas partes que perfazem o reator, assim como também a disponibilização de informações atreladas com a curva de magnetização do produto.

Em se tratando de reatores saturados, nos termos aqui postos, os seguintes componentes emergem como essenciais ao processo da simulação:

- Resistência do enrolamento principal;
- Resistência do enrolamento auxiliar;
- Indutância de dispersão do enrolamento principal;
- Indutância de dispersão do enrolamento auxiliar;
- Curva de magnetização dada pela relação entre o fluxo concatenado e a corrente ( $\lambda \times i$ ).

### a) *Resistência do enrolamento principal ( $R_p$ ):*

A resistência do enrolamento principal ( $R_p$ ), por fase de cada núcleo, pode ser calculada através das seguintes informações: material, comprimento e seção transversal. Uma vez conhecidos tais dados, a equação (2.16) conduz ao valor da resistência do enrolamento ( $N_p$ ).

$$R_p = \rho \cdot \frac{L_{Np}}{S_{fio \ min}} \quad [\text{ohm}] \quad (2.16)$$

Em que:

$R_p$  – Resistência do enrolamento principal [Ohm];

$\rho$  – Resistividade elétrica do condutor [Ohm.m];

$L_{Np}$  – Comprimento médio das espiras do enrolamento principal [m];

$S_{fio\ min}$  – Seção mínima dos condutores [ $m^2$ ].

*b) Resistência do enrolamento auxiliar ( $R_a$ ):*

De maneira análoga, a resistência do enrolamento auxiliar pode ser calculada a partir das mesmas informações anteriores, conforme equação 2.17, porém, considerando comprimento médio do enrolamento auxiliar:

$$R_a = \rho \cdot \frac{L_{Na}}{S_{fio\ min}} \quad [\text{ohm}] \quad (2.17)$$

Em que:

$R_a$  – Resistência do enrolamento principal [Ohm];

$\rho$  – Resistividade elétrica do condutor [Ohm.m];

$L_{Na}$  – Comprimento médio das espiras do enrolamento auxiliar [m];

$S_{fio\ min}$  – Seção mínima dos condutores [ $m^2$ ].

*c) Indutância de dispersão do enrolamento principal ( $L_p$ ):*

Observando-se o aspecto construtivo associado com a montagem da bobina principal e, fazendo-se um paralelo com formulações propostas em [52], tem-se que a reatância (e respectiva indutância) de dispersão acima referida pode ser estimada de acordo com a equação (2.18).

$$X_p = 7,9 \cdot \frac{f \cdot l_{cu} \cdot N_p^2}{b} \cdot K \left( d + \frac{a_1 + a_2}{3} \right) \cdot 10^{-8} \quad [\text{ohm}] \quad (2.18)$$

Em que:

$X_p$  – Reatância de dispersão do enrolamento principal [Ohm];

$f$  – Frequência nominal [Hz];

$l_{cu}$  – Comprimento médio das espiras do enrolamento principal e auxiliar:

$$l_{cu} = \frac{l_{cu_p} + l_{cu_a}}{2} \quad [\text{cm}] \quad (2.19)$$

$N_p$  – Número de espiras do enrolamento principal [espira];

$b$  – Comprimento axial da bobina [cm];

$K$  – Fator de correção;

$d$  – Espessura radial do intervalo entre as duas bobinas [cm];

$a_1$  – Largura da área da bobina principal [cm];

$a_2$  – Largura da área da bobina auxiliar [cm].

O fator de correção  $K$ , por sua vez, pode ser calculado através da equação (2.20).

$$K = 1 - \frac{1}{2\pi} - \frac{2 \cdot d + a_1 + a_2}{H_b} \quad (2.20)$$

Em que:

$d$  – Espessura radial do intervalo entre as duas bobinas [cm];

$a_1$  – Largura da área da bobina principal [cm];

$a_2$  – Largura da área da bobina auxiliar [cm];

$H_b$  – Altura (comprimento axial da bobina) [cm].

Por fim:

$$L_p = \frac{X_p}{2\pi f} \cdot \frac{N_p}{N_p + N_a} \quad [\text{H}] \quad (2.21)$$

Em que:

$L_p$  – Indutância do enrolamento principal [H];

$X_p$  – Reatância de dispersão referida ao primário do reator [Ohm];

$f$  – Frequência nominal [Hz];

$N_p$  – Número de espiras do enrolamento principal [espira];

$N_a$  – Número de espiras do enrolamento auxiliar [espira].

*d) Indutância de dispersão do enrolamento auxiliar ( $L_a$ ):*

De maneira análoga, pode-se realizar o cálculo da indutância aproximada do enrolamento auxiliar fazendo-se uso da equação (2.22).

$$L_a = \frac{X_p}{2\pi f} \cdot \frac{N_a}{N_p + N_a} \quad [\text{H}] \quad (2.22)$$

Em que:

$L_a$  – Indutância do enrolamento auxiliar [H];

$X_p$  – Reatância de dispersão referida ao primário do reator [Ohm];

$f$  – Frequência nominal [Hz];

$N_p$  – Número de espiras do enrolamento principal [espira];

$N_a$  – Número de espiras do enrolamento auxiliar [espira].

*e) Curva de magnetização - relação ( $\lambda \times i$ ):*

A característica da curva de magnetização do material que compõe o reator saturado depende, basicamente, do tipo de material utilizado para as chapas que perfazem o núcleo do equipamento. Dentre os tipos mais empregados comercialmente ressaltam-se as chapas de aço-silício, em que pese suas especificidades de fabricação. Muito embora ainda seu uso seja em escala reduzida, não se pode ignorar uma forte tendência do emprego de ligas amorfas. Entretanto, esta tecnologia ainda não se apresenta com grande difusão no mercado.

A Figura 2.10 apresenta a curva de magnetização da chapa de aço-silício utilizada nos protótipos de reatores saturados até então construídos. Estas informações se apresentam como base de referência para o estabelecimento da relação entre os fluxos concatenados e as respectivas correntes de magnetização.

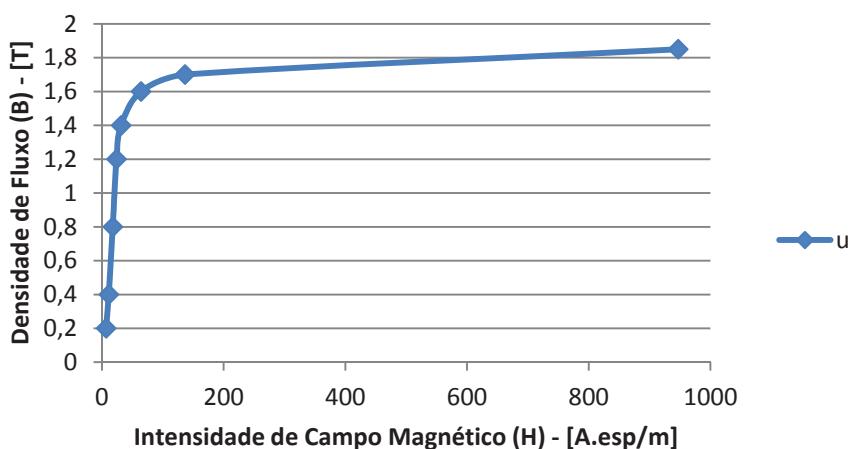


Figura 2.10 – Curva BxH de uma chapa aço-silício de 0,3 mm de espessura.

A partir da correlação da Figura 2.10 pode-se extrair dados para a composição da Tabela 2.4, a qual se apresenta em termos da relação (BxH) requerida pelos modelos computacionais. A correlação entre as grandezas foram extraídas de catálogos de fabricantes, como explicitado em [35].

Tabela 2.4 – Relação (BxH) de uma chapa de aço-silício de 0,3mm.

H [A.esp/m]	B [T]
6,684	0,2
11,099	0,4
17,729	0,8
23,805	1,2
31,495	1,4
*64,166	*1,6
136,311	1,7
946,842	1,85
7.419.427	2
30.000	2,1

\* Início ou “joelho” da curva de magnetização.

### ➤ Fluxo concatenado ( $\lambda$ )

Para a determinação dos valores individuais dos fluxos concatenados utiliza-se da seguinte sequência de cálculos:

$$\lambda = N_p \cdot \Phi \quad [\text{Wb. esp}] \quad (2.23)$$

Em que:

$\lambda$  – Fluxo concatenado pelas espiras do enrolamento principal [Wb.esp];  
 $N_p$  – Número de espiras do enrolamento principal [espira];  
 $\Phi$  – Fluxo por espira do enrolamento [Wb].

O fluxo por espira acima referido é matematicamente definido como:

$$\Phi = B \cdot S_m \quad [\text{Wb}] \quad (2.24)$$

Em que:

$\Phi$  – Fluxo por espira do enrolamento [Wb];  
 $B$  – Densidade de fluxo magnético [T];  
 $S_m$  – Seção magnética do núcleo do reator [ $\text{m}^2$ ].

### ➤ Corrente (i)

A partir dos valores individuais relativos à intensidade de campo magnético pode-se, na sequência, calcular a corrente total solicitada pelo equipamento.

$$i = \frac{H \cdot l}{N_p} \quad [\text{A}] \quad (2.25)$$

Em que:

$i$  – Corrente solicitada pelo reator [A];  
 $H$  – Intensidade de campo magnético no núcleo do reator [A.esp/m];  
 $l$  – Altura da bobina do enrolamento principal [m];  
 $N_p$  – Número de espiras do enrolamento principal [espira].

Por fim, obtém-se a desejada relação exigida pelos programas computacionais que disponibilizam modelos saturados para os mais distintos componentes eletromagnéticos presentes nas redes elétricas.

---

A título de ilustração, tem-se a correlação entre os fluxos magnéticos e correntes expressos na Figura 2.11, a qual representa uma relação específica e aplicada a um protótipo de reator de 7 kVAr e 220 V. Este corresponde ao reator utilizado para as investigações conduzidas nos capítulos subsequentes a este.

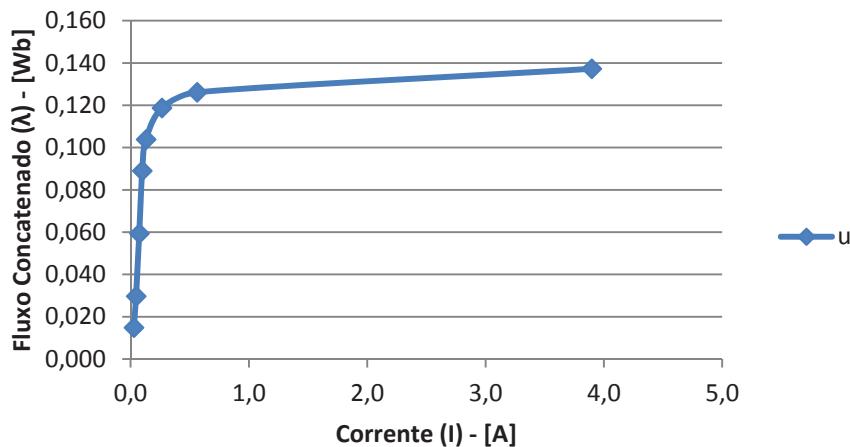


Figura 2.11 – Curva de magnetização ( $\lambda \times i$ ) do núcleo de aço-silício nos termos requeridos pelos simuladores computacionais.

Complementarmente, a Tabela 2.5 fornece os valores que perfazem a relação magnética aqui contemplada.

Tabela 2.5 – Valores para as grandezas componentes da curva de magnetização ( $\lambda \times i$ ) do núcleo de aço-silício.

Fluxo Concatenado ( $\lambda$ ) [Wb]	Corrente (I) [A]
0,015	0,028
0,030	0,046
0,059	0,073
0,089	0,098
0,104	0,130
<b>*0,119</b>	<b>*0,264</b>
0,126	0,561
0,137	3,896
0,148	30,532
0,156	123,453

\* Início ou “joelho” da curva de magnetização.

## 2.7 APLICATIVO COMPUTACIONAL PARA PROJETO DE REATORES SATURADOS E DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS EQUIVALENTES (PRORE 2.0)

Apresentado os fundamentos teóricos e matemáticos necessários para o projeto básico de reatores saturados, os trabalhos prosseguem na direção de sistematizar o processo de cálculo visando um *software* destinado à caracterização das principais informações construtivas de um reator saturado do tipo *twin-tripler*.

Vale ressaltar que os procedimentos aqui relatados se apresentam na forma de avanços em relação ao processo proposto em [36]. Esta referência, ainda utilizando princípios bastante empíricos, contemplou os primeiros passos para o fornecimento de dados construtivos para o reator. Disto resultou que o novo programa desenvolvido nesta proposta de tese, que se apresenta como uma segunda versão do *software* de cálculo passou a ser designado por (PRORE 2.0). Este novo aplicativo, além de oferecer as principais informações construtivas do equipamento, também determina os parâmetros elétricos equivalentes para a modelagem do dispositivo numa plataforma computacional, a exemplo do ATP. Deve-se destacar ainda, que o programa foi desenvolvido em linguagem *Visual Basic*.

A seguir são apresentadas as janelas do programa, com as principais características envolvidas em cada etapa:

### *(a) Dados de entrada*

Na Figura 2.12 pode-se visualizar a janela principal do programa PRORE 2.0, sendo esta denominada “Dados de Entrada”. Como pode ser constatado, nesta encontram-se definidas as informações requeridas para os cálculos do reator, as quais são: potência reativa desejada e o nível de tensão para o qual deverá ocorrer o referido consumo de reativos.



Figura 2.12 – Tela inicial de abertura do Aplicativo PRORE 2.0.

*(b) Projeto do reator*

Uma vez calculada as correntes, na aba “Projeto do Reator”, o programa determina as principais características necessárias para a construção do dispositivo. Estas se encontram ilustradas na Figura 2.13, a qual é indicativa de dados elétricos e dimensões construtivas do núcleo e dos enrolamentos do equipamento em foco.

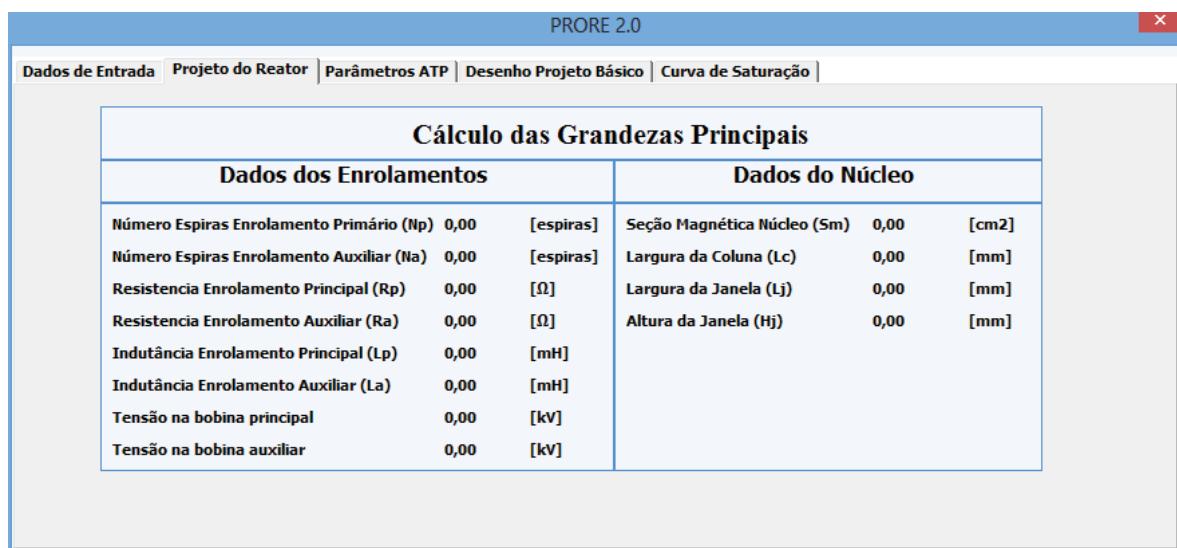


Figura 2.13 – Dados de entrada para o Aplicativo PRORE 2.0.

*(c) Parâmetros elétricos equivalentes para simulação no ATP*

Em sintonia com as formulações aqui apresentadas para a determinação dos parâmetros do circuito elétrico equivalente, a Figura 2.14 ilustra a janela “Parâmetros ATP”, a qual fornece os principais parâmetros elétricos equivalentes necessários para a representação do reator saturado no simulador ATP.

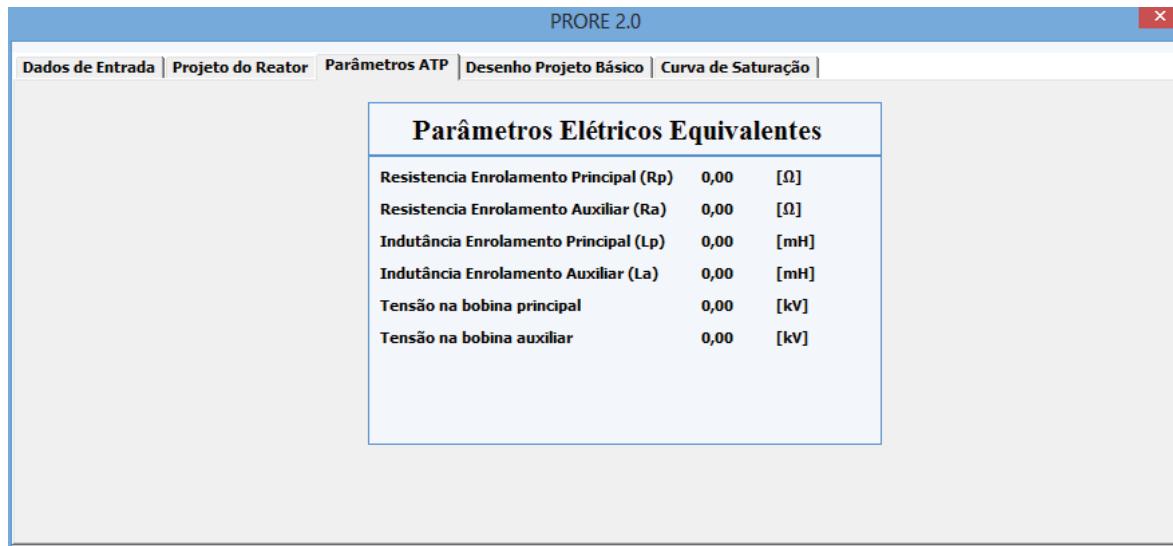


Figura 2.14 – Parâmetros elétricos equivalentes para alimentar o modelo computacional do reator no aplicativo ATP.

*(d) Desenho projeto básico*

Nesta aba do programa PRORE 2.0, ilustrada na Figura 2.15, é apresentado um resumo com as principais dimensões físicas do núcleo do equipamento e o referido número de espiras dos enrolamentos principal e auxiliar. Tais informações são esboçadas em uma imagem representativa do núcleo do reator saturado.

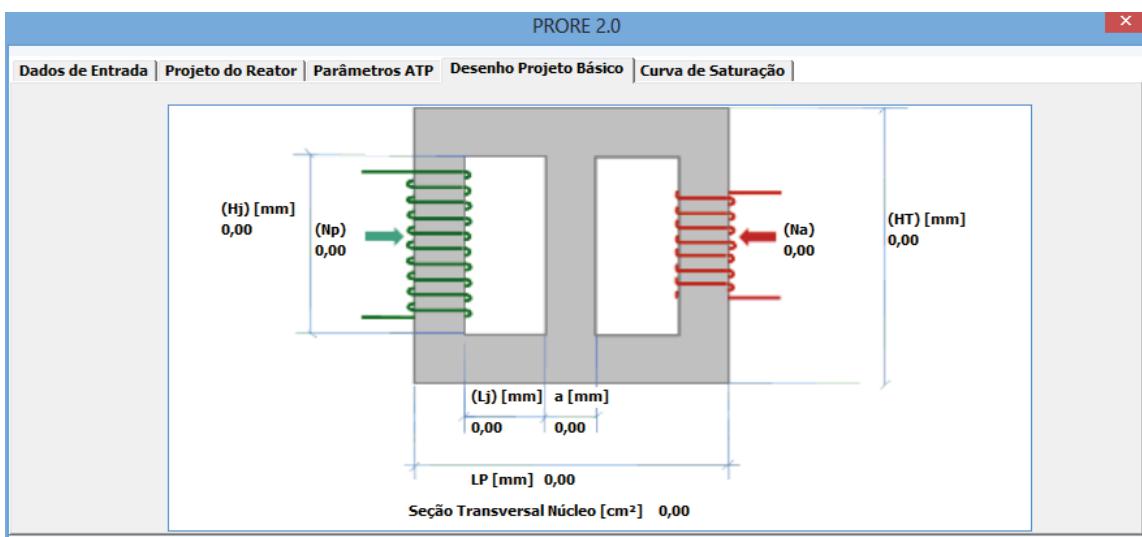


Figura 2.15 – Principais dimensões físicas do núcleo e dos enrolamentos do projeto básico do reator saturado.

#### (e) Curva de saturação

Por fim, na Figura 2.16 pode-se visualizar a janela do programa denominada “Curva de Saturação”. Como o próprio nome sugere, nesta aba são determinados os pares de pontos associados ao fluxo concatenado em função da corrente solicitada pelo reator, sendo estes representativos da curva de saturação do equipamento, informação esta necessária para o modelo de reator saturado implementado no ATP.

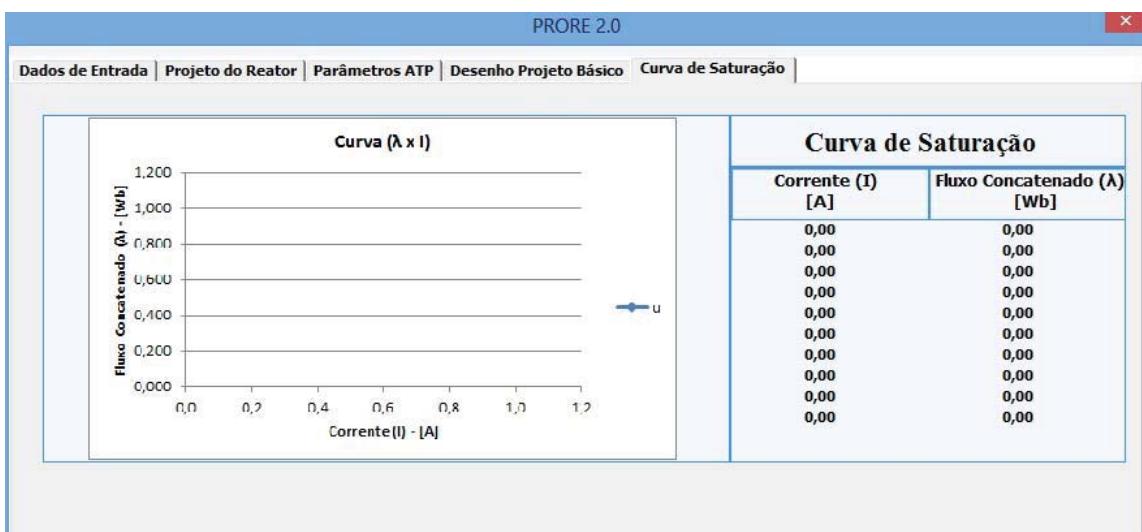


Figura 2.16 – Curva de saturação e respectivos pares de pontos para o projeto básico do reator saturado.

## 2.8 VALIDAÇÃO DO APLICATIVO PRORE 2.0

Uma vez estabelecidas as bases e elaborado o programa destinado ao projeto básico de um reator saturado, nos termos aqui postos, procede-se, nesta etapa dos trabalhos, à utilização desta ferramenta visando ilustrar o seu uso e, através da comparação dos resultados advindos deste aplicativo com um equipamento já construído e em operação, oferecer meios para uma primeira etapa do processo de validação da ferramenta desenvolvida. Para tanto, os trabalhos terão por foco o dimensionamento físico e os parâmetros elétricos equivalentes de um protótipo de reator saturado em escala comercial, com potência reativa de até 3.000 kVAr e destinado à instalação numa rede de 34,5 kV.

A Figura 2.17 ilustra a janela inicial do referido programa com os respectivos dados de entrada necessários para a especificação do reator saturado, o qual, para a presente situação, deverá apresentar um consumo de 3.000 kVAr em 36 kV, lembrando que o valor de referência ou nominal é de 34,5 kV.



Figura 2.17 – Dados de entrada – programa para projeto de reatores (PRORE 2.0).

Isto posto, segue que o programa PRORE 2.0, dentro da lógica discutida, fornece as informações construtivas para o reator saturado, como indicado na Figura 2.18. Complementarmente, a Figura 2.19 ilustra a estrutura física informada. Deve-se ressaltar que tanto o número de espiras do enrolamento

principal, quanto do enrolamento auxiliar, tiveram seus resultados arredondados, resultando assim em uma relação aproximada de 0,366.

Cálculo das Grandezas Principais				
Dados dos Enrolamentos			Dados do Núcleo	
Número Espiras Enrolamento Primário (Np)	240	[espiras]	Seção Magnética Núcleo (Sm)	603,8641 [cm <sup>2</sup> ]
Número Espiras Enrolamento Auxiliar (Na)	88	[espiras]	Largura da Coluna (Lc)	290,0000 [mm]
Resistência Enrolamento Principal (Rp)	0,1809	[Ω]	Largura da Janela (Lj)	198,0000 [mm]
Resistência Enrolamento Auxiliar (Ra)	0,0632	[Ω]	Altura da Janela (Hj)	1.982,000 [mm]
Indutância Enrolamento Principal (Lp)	11,2702	[mH]		
Indutância Enrolamento Auxiliar (La)	4,1249	[mH]		
Tensão na bobina principal	9,2396	[kV]		
Tensão na bobina auxiliar	3,3817	[kV]		

Figura 2.18 – Principais características construtivas para o reator saturado – programa para projeto de reatores (PRORE 2.0).

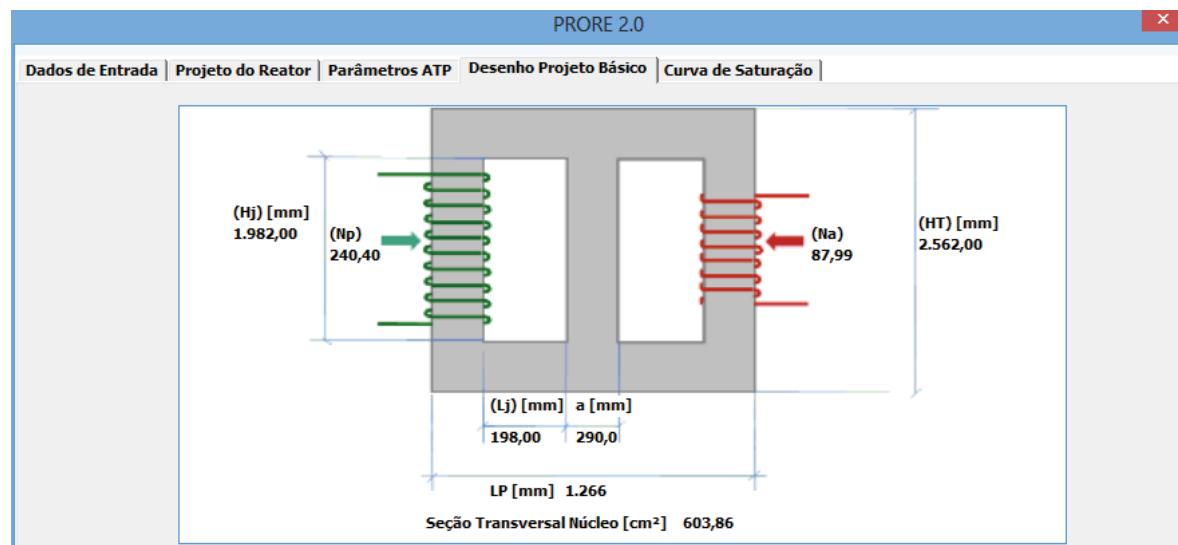


Figura 2.19 – Principais dimensões físicas de um dos núcleos do RNS e bobinas principal e auxiliar – 3.000 kVAr / 34,5 kV – programa para projeto de reatores (PRORE 2.0).

Quanto aos parâmetros elétricos equivalentes e representativos do dispositivo acima projetado, grandezas estas essenciais ao processo de simulação do equipamento no simulador ATP, estas encontram-se fornecidas na Figura 2.20.

## CAPITULO II – Projeto Básico de Reatores Saturados e Determinação dos Parâmetros Elétricos Equivalentes

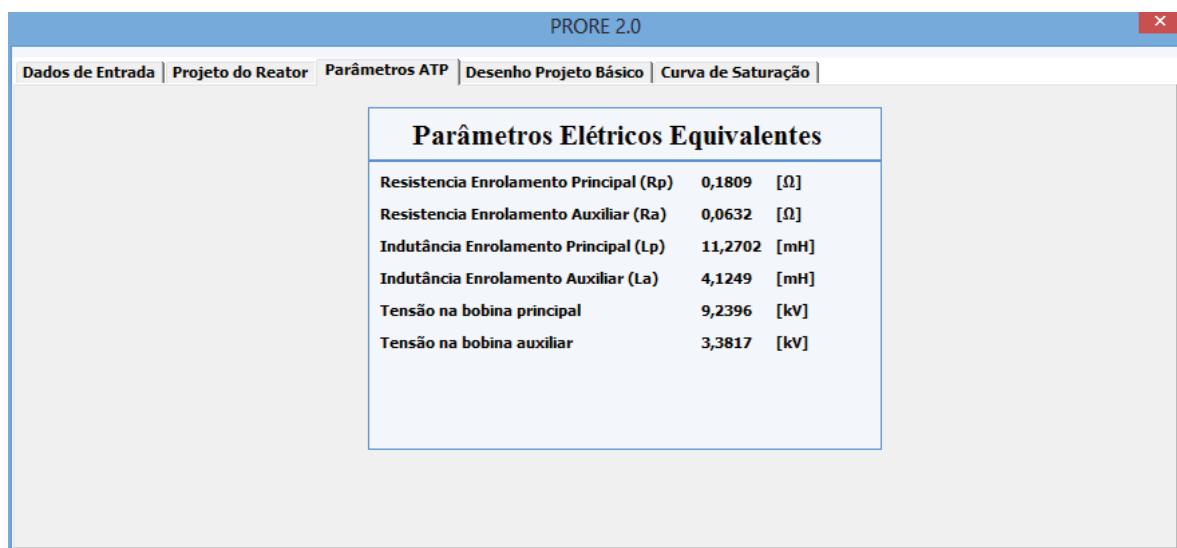


Figura 2.20 – Principais parâmetros equivalentes do reator saturado – programa para projeto de reatores (PRORE 2.0).

Outra informação de suma importância para a representação do reator a núcleo saturado refere-se a sua curva de saturação. A Figura 2.21 apresenta o resultado fornecido pelo programa.

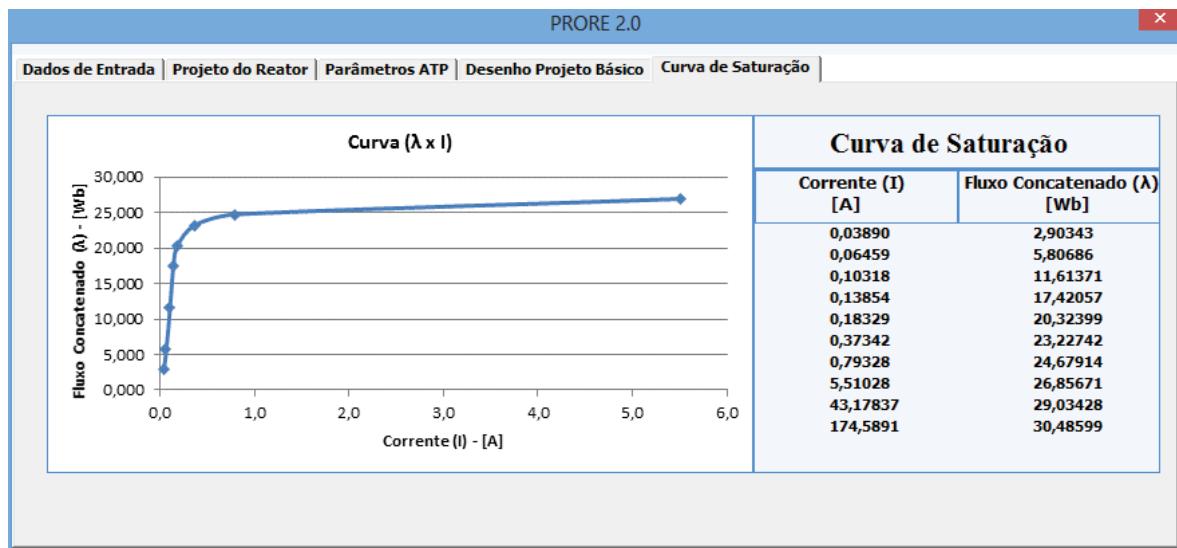


Figura 2.21 – Curva representativa da característica de saturação do reator saturado – programa para projeto de reatores (PRORE 2.0).

Por fim, a Tabela 2.6 refere-se a uma comparação direta entre as principais características físicas para o reator, nos termos definidos pelo programa elaborado e os dados finais de projeto definidos pelo fabricante. Como pode ser observado,

os resultados se mostram bastante próximos e consistentes. As divergências podem ser justificadas pela inserção de fatores intrínsecos à experiência do fabricante quanto ao processo e procedimentos construtivos, a exemplo de: cortes de chapas, formas de montagem dos núcleos, entreferros, etc.

*Tabela 2.6 – Principais características construtivas – RNS 3.000 kVAr / 34,5 kV.*

<b>Característica Construtiva</b>	<b>PRORE 2.0</b>	<b>Protótipo Construído</b>
Número de espiras do enrolamento principal (Np) [espiras]	240	253
Número de espiras do enrolamento auxiliar (Na) [espiras]	88	92
Seção magnética do núcleo (Sm) [cm <sup>2</sup> ]	604	605
Largura da coluna (a) [mm]	290	300
Largura da janela (Lj) [mm]	198	160
Altura da janela (Hj) [mm]	1982	1982

## **2.9 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O presente capítulo apresentou os fundamentos físicos e uma sistemática para o projeto básico de reatores saturados, a partir da definição da potência reativa a ser consumida para um dado nível de tensão, visando, sobretudo, a compatibilização dos níveis desta grandeza aos requisitos normativos.

A partir da potência reativa assim determinada, baseando-se em procedimentos tradicionalmente empregados para projetos de transformadores, foi estabelecida uma metodologia para fins de um dimensionamento básico de reatores saturados do tipo *twin-tripler*. O processo proposto, além de oferecer dados importantes para a construção destes equipamentos, também proporcionou meios para uma estimativa dos parâmetros elétricos equivalentes, visando, sobretudo, a modelagem destes dispositivos em programas computacionais que utilizam técnicas de modelagem no domínio do tempo.

O produto final obtido em consonância com estas metas foi materializado na forma de um aplicativo computacional, denominado por PRORE 2.0.

Por fim, através do uso da referida ferramenta computacional, procedeu-se um estudo de caso envolvendo a especificação de um equipamento de 3.000 kVAr em 34,5 kV, objetivando a validação da metodologia implementada. A opção feita por este reator fundamentou-se na existência de um produto já projetado e construído, fato este que permitiu uma pronta comparação das informações processadas pelo programa com os dados construtivos do equipamento em escala real.

Os resultados obtidos se mostraram satisfatórios e encorajadores, ratificando assim a eficiência da sistemática proposta, o que evidencia que a ferramenta computacional desenvolvida se apresenta como um instrumento balizador para o processo de construção de reatores a núcleo saturado do tipo *twin-tripler*.

Apesar da boa aderência entre os resultados, vale reconhecer que, cada fabricante, à luz de sua experiência, irá sempre complementar o processo até o estabelecimento do projeto final, tendo em vista que outras questões, a exemplo daquelas de origens térmicas, mecânicas, de isolamentos, geometria construtiva, e outras, fazem parte integrante dos procedimentos individuais de cada produtor.

# Capítulo III

---

## MODELAGEM DE REATORES A NÚCLEO SATURADO NO SIMULADOR ATP

### 3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Uma vez apresentadas as bases voltadas ao pré-projeto de reatores saturados *twin-tripler* e determinação dos parâmetros elétricos equivalentes representativos do equipamento supramencionado, este capítulo encontra-se direcionado à proposição de uma estratégia de modelagem do reator através de técnicas de representação no domínio do tempo.

Diante do exposto, o conteúdo abordado no presente capítulo apresenta os seguintes pontos focais:

- Proposição de um modelo equivalente de reatores a núcleo saturado tipo *twin-tripler* no simulador ATP, fundamentado nas características elétricas de modelos de dispositivos pré-existentes neste aplicativo computacional;
- Implementação do modelo computacional de um reator a núcleo saturado tipo *twin-tripler* na interface gráfica do aplicativo ATPDraw;

- Apresentação do modelo computacional de compensador a núcleo saturado proposto e inserido no programa ATP.

## 3.2 MODELO ELÉTRICO EQUIVALENTE DE TRANSFORMADORES SATURÁVEIS DISPONIBILIZADOS NO SIMULADOR ATP

O *Alternative Transients Program* (ATP) consiste numa plataforma computacional destinada à modelagem e simulação de circuitos elétricos no domínio do tempo. Este programa é amplamente conhecido e difundido no setor elétrico nacional e internacional, tendo em vista que o mesmo corresponde a um *software* de domínio livre. Como o próprio nome sugere, esta ferramenta permite a realização de estudos investigativos não apenas em regime permanente, mas apresenta também a potencialidade de permitir a reprodução, via simulação computacional, dos mais variados eventos transitórios e dinâmicos factíveis de manifestação nos sistemas elétricos.

Este recurso apresenta ainda em sua biblioteca modelos matemáticos correspondentes a uma série de dispositivos e componentes presentes nos sistemas elétricos, tais como: fontes de alimentação, chaves, linhas de transmissão, cabos, máquinas elétricas, cargas, transformadores, etc. Tais modelos encontram-se representados por parâmetros concentrados ou distribuídos, apresentando, ainda, possibilidades de inserção de eventuais não linearidades, como é o caso do presente estudo.

Focando uma exemplificação diretamente afeita aos interesses desta pesquisa, a Figura 3.1 apresenta o circuito elétrico equivalente de um transformador monofásico, não linear, de dois enrolamentos, também conhecido por “*Saturable Transformer*”. Este recurso se encontra disponibilizado na biblioteca do ATP.

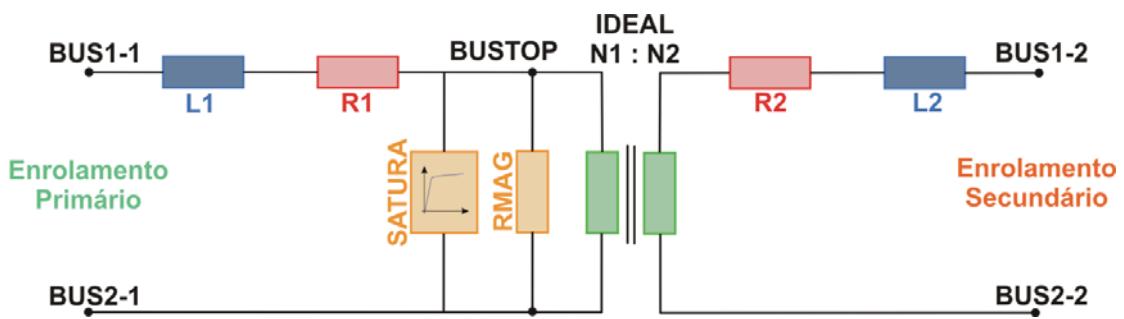


Figura 3.1 – Circuito elétrico equivalente de um transformador monofásico de dois enrolamentos – não linear – ATP.

Conforme pode-se observar, o modelo é composto basicamente por um transformador ideal de dois enrolamentos ( $N1:N2$ ), sendo este o responsável pela representação da relação de transformação entre os enrolamentos primário e secundário. Adicionado a isto, o mesmo ainda apresenta as impiedâncias dos enrolamentos do equipamento, na forma de resistências e indutâncias de dispersão dos enrolamentos primário e secundário, respectivamente ( $R1$  e  $L1$  – enrolamento primário) e ( $R2$  e  $L2$  – enrolamento secundário). Além disso, o circuito equivalente mostra um ramo responsável pela representação do efeito de saturação do transformador (SATURA), sendo este conectado no circuito que representa o enrolamento primário. Por fim, as perdas associadas com o processo de magnetização, também conhecidas por perdas no núcleo, são representadas através de um elemento resistivo linear (RMAG). Este último é conectado no circuito representativo do enrolamento primário, paralelamente ao ramo de saturação.

A Figura 3.2 apresenta o respectivo cartão do transformador saturável monofásico de dois enrolamentos, destacado em vermelho no arquivo “ATP-file”, cujo equivalente elétrico foi apresentado anteriormente.

Figura 3.2 – Arquivo ATP-file do transformador saturável monofásico de dois enrolamentos.

As principais informações necessárias para suprir o modelo de transformador ora apresentado são:

✓ *INFORMAÇÕES ELÉTRICAS:*

- $I_o$  – Corrente no ramo magnetizante em regime permanente – [A];
  - $F_o$  – Fluxo no ramo magnetizante em regime permanente – [Wb-espira];
  - $R_{mag}$  – Resistência no ramo de magnetizante – [Ohm];
  - $R_1$  – Resistência no enrolamento primário – [Ohm];
  - $L_1$  – Indutância no enrolamento primário – [mH];
  - $N_1$  – Tensão nominal no enrolamento primário – [kV];
  - $R_2$  – Resistência no enrolamento secundário – [Ohm];
  - $L_2$  – Indutância no enrolamento secundário – [mH];
  - $N_2$  – Tensão nominal no enrolamento secundário – [kV];

✓ **INFORMAÇÕES SOBRE A CURVA DE MAGNETIZAÇÃO:**

- (Corrente, Fluxo) – Pares de pontos de corrente *versus* fluxo concatenado, representativos da curva de saturação do

transformador representado no ATP. Vale ressaltar que os valores de corrente e fluxo correspondem a amplitudes máximas – [A] e [Wb.espira];

✓ *INFORMAÇÕES SOBRE OS NÓS:*

- BUS11, BUS12 – Pontos de entrada e saída do enrolamento primário;
- BUS21, BUS22 – Pontos de entrada e saída do enrolamento secundário.

### **3.3 MODELAGEM DE UM REATOR A NÚCLEO SATURADO - TIPO *TWIN-TRIPLEX* - NO SIMULADOR ATP**

Como visto, o reator a núcleo saturado consiste em um dispositivo eletromagnético com características construtivas e operacionais muito semelhantes aos transformadores de potência, divergindo apenas quanto ao ponto de operação nominal, visto que, o primeiro opera na região de saturação enquanto o segundo opera no joelho da curva de magnetização.

Uma vez que o modelo equivalente elétrico para um transformador monofásico, incluindo efeitos de saturação, já se faz presente no ATP, e que este se apresenta com características físicas capazes de representar uma coluna da estrutura física do reator *twin-triplex*, isto orientou para uma adequação deste recurso aos fins aqui almejados.

Iniciando pela Figura 3.3, esta ilustra a topologia física do reator saturado *twin-triplex*, enquanto a Figura 3.4 apresenta seu respectivo arranjo elétrico.

A partir das figuras apresentadas, pode-se, mais uma vez, observar que o RNS é constituído basicamente por dois núcleos magnéticos idênticos, sendo cada núcleo formado por três colunas magnéticas e apresentando dois enrolamentos concêntricos por coluna.

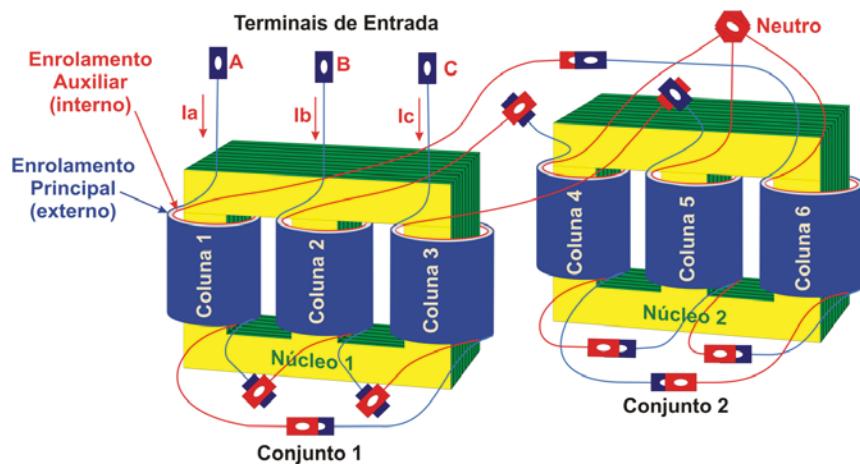


Figura 3.3 – Reator a núcleo saturado – Arranjo construtivo twin-tripler (Vista em perspectiva).

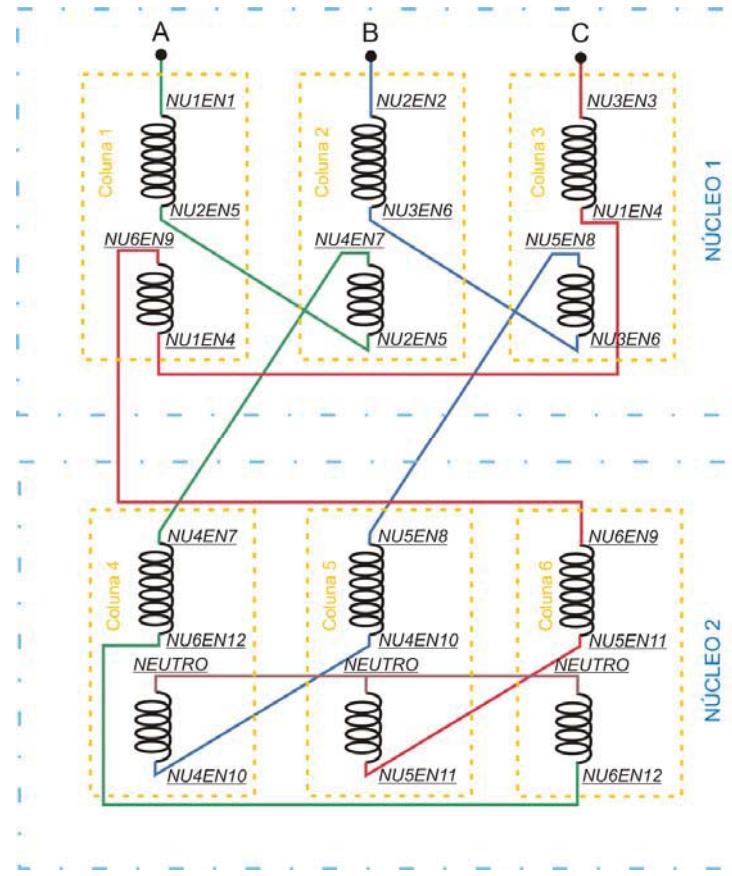


Figura 3.4 – Diagrama esquemático do reator saturado twin-tripler.

A estratégia utilizada para a representação do RNS no ATP consiste, pois, em utilizar o modelo de transformador saturável pré-existente no programa, observando-se particularidades para a representação de cada coluna magnética do

RNS. Seguindo esta estratégia, a Figura 3.5 destaca o circuito elétrico equivalente do reator saturado *twin-tripler* destinado à implementação no programa ATP. Conforme se observa, o mesmo fundamenta-se basicamente no circuito elétrico do transformador saturável existente no referido aplicativo, respeitadas, evidentemente, as particularidades de cada equipamento e tomando-se o devido cuidado para adequar os recursos existentes para uma correta representação das características elétricas dos enrolamentos principal e auxiliar de cada coluna magnética do reator. Vale ressaltar que as conexões entre os enrolamentos foram omitidas para facilitar a visualização do diagrama esquemático.

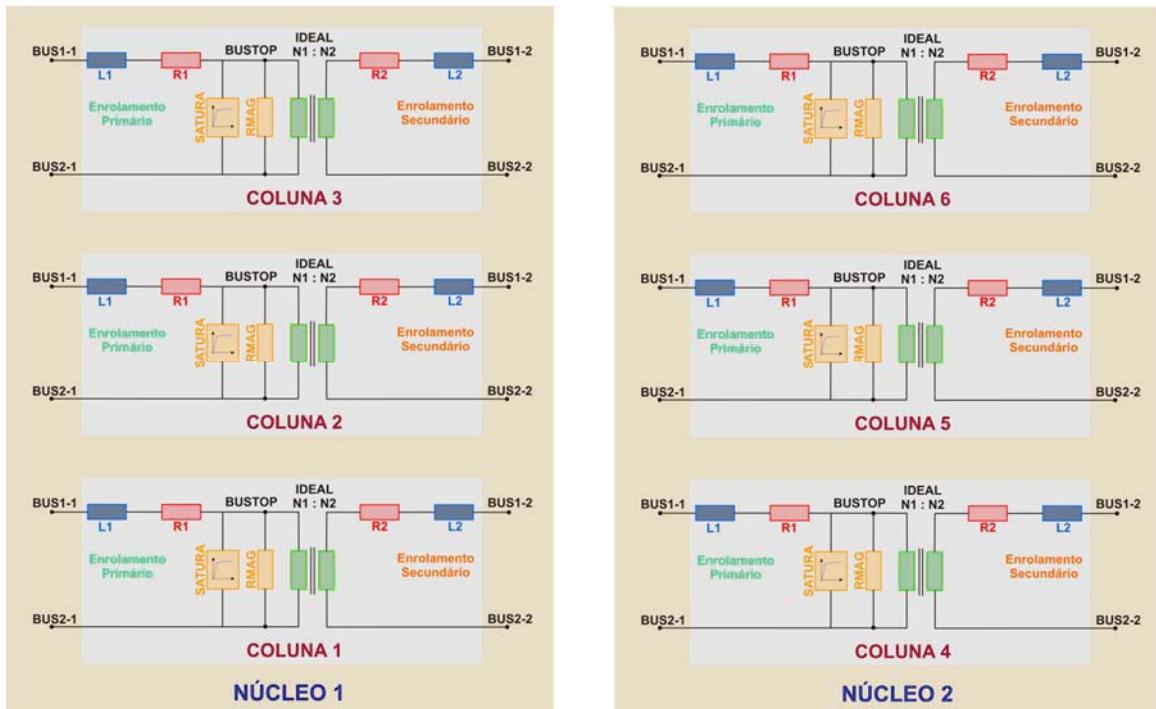


Figura 3.5 – Circuito elétrico equivalente do modelo de RNS *twin-tripler* proposto para o aplicativo ATP.

Por fim, a Figura 3.6 apresenta um diagrama esquemático resumido com as devidas conexões elétricas entre os enrolamentos, visando a correspondência física do arranjo *twin-tripler* para o reator saturado.

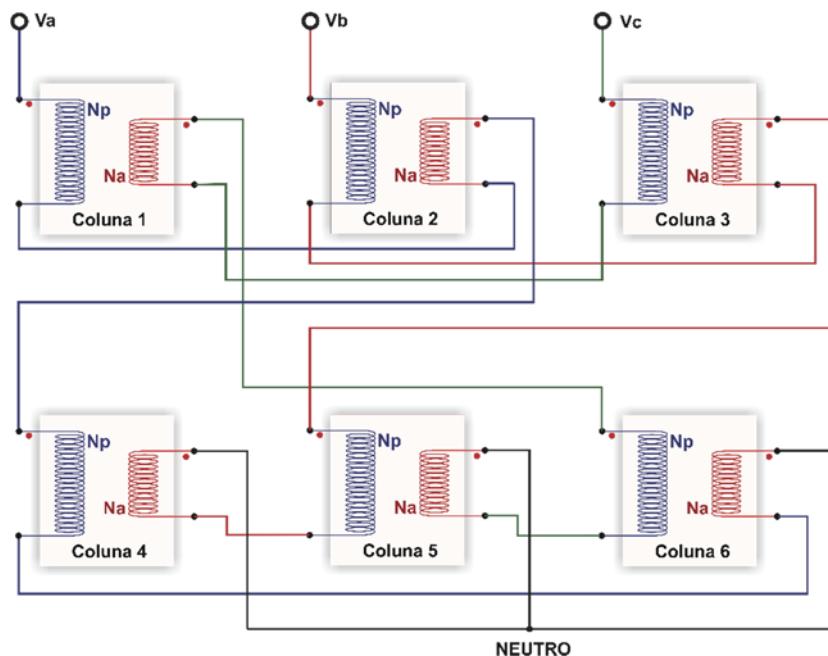


Figura 3.6 – Diagrama esquemático do modelo de RNS proposto para o programa ATP.

Através da Figura 3.6 pode-se notar que cada bloco representa uma coluna magnética do RNS, com os respectivos nós de entrada e saída do enrolamento principal e do auxiliar.

### 3.4 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DE REATORES SATURADOS

#### TIPO TWIN-TRIPLER NO SIMULADOR ATPDRAW

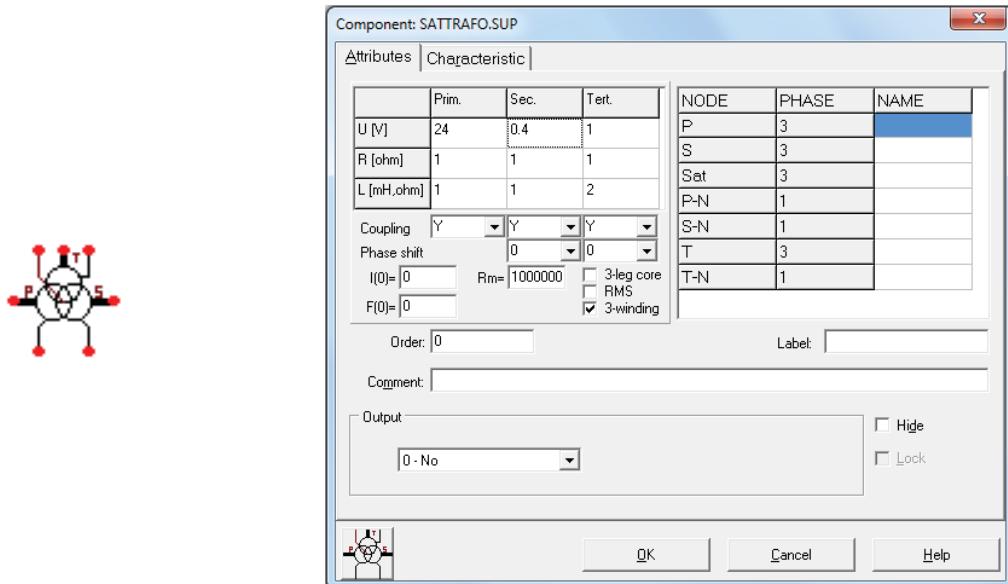
Esta seção destina-se ao processo de implementação do modelo computacional do RNS no aplicativo ATP, atividades essas que se encontram desenvolvidas dentro da seguinte lógica sequencial:

- Etapa 1: Identificação e caracterização do arquivo representativo de transformadores monofásicos pré-existentes na biblioteca do ATP;
- Etapa 2: A partir dos fundamentos já estabelecidos através do modelo pré-existente, procede-se, então, à criação do cartão DBM, que visa a inserção do RNS no referido programa;

- Etapa 3: Na sequência procede-se ao processamento do cartão DBM com vistas a criação do arquivo (\*.lib), o qual passa a representar uma das colunas do RNS, atendendo suas particularidades elétricas e magnéticas;
- Etapa 4: Uma vez obtido o arquivo acima referido é criado um bloco representativo de uma das colunas, que representa as dimensões físicas e magnéticas do núcleo e também os enrolamentos principal e auxiliar. Assim, é criado um novo elemento na interface gráfica ATPDraw, o qual, mais uma vez, se apresenta como uma das colunas do reator saturado;
- Etapa 5: Em sintonia com as interconexão elétricas previstas para o reator *twin-tripler* são feitas as ligações entre as distintas bobinas principais e auxiliares;
- Etapa 6: Apresentação de um modelo computacional para a representação do compensador de reativos a núcleo saturado no aplicativo ATPDraw.

### **3.4.1 Arquivo de transformador saturável - ATP**

O fundamento que norteia a utilização de um recurso pré-existente na plataforma ATP, como já mencionado, se apoia no fato que a estrutura construtiva de um reator saturado apresenta grande similaridade com a de transformadores. Com esta concepção física em mente, as Figuras 3.7 (a) e (b) ilustram o elemento representativo do transformador saturável existente no ATPDraw, enquanto a Figura 3.8 apresenta o respectivo arquivo “ATP-file”.



(a) Elemento disponibilizado no ATP

(b) Variáveis de entrada

Figura 3.7 – Transformador saturável – ATPDraw.

```
BEGIN NEW DATA CASE
C -----
C Generated by ATPDRAW outubro, terça-feira 4, 2011
C A Bonneville Power Administration program
C Programmed by H. K. Høidalen at SEfAS - NORWAY 1994-2003
C -----
C   dT <> Tmax <> Kopt <> Copt >
C     1.E-6   .001
C     500      1      1      1      1      0      5      0      6      1      7      0      8
C     1       2       1       3       4       0       5       0       6       1       7       0       8
C 3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
/BRANCH
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><>>>0
  TRANSFORMER           X0003A  1.E6
  9999
  1X0001AXX0004          1.    1.    24.
  2X0002AXX0005          1.    1.    .4
  3X0006AXX0007          1.    2.    1.
  TRANSFORMER X0003A      X0003B
  1X0001BXX0004
  2X0002BXX0005
  3X0006BXX0007
  TRANSFORMER X0003A      X0003C
  1X0001CXX0004
  2X0002CXX0005
  3X0006CXX0007
/OUTPUT
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK
```

Figura 3.8 – Arquivo ATP-file do transformador saturável.

### 3.4.2 Cartão DBM

Uma das alternativas disponibilizadas no ATP a partir de 1983 é a possibilidade de se trabalhar com módulos de seções da rede elétrica, ou

*templates*, permitindo, assim, a combinação entre elementos de valores fixos ou variáveis com argumentos. Neste particular, vale lembrar que os valores correspondem a entidades numéricas, enquanto que os argumentos se referem a nós elétricos [53]. Esta versátil ferramenta corresponde a rotina “DATA BASE MODULE”, presente no referido programa.

Esta rotina é estruturada em duas partes:

- A primeira referente à lista de declaração de “argumentos”, na qual são apresentados os nomes alusivos a todos os nós externos, internos e variáveis numéricas no modelo de componente elétrico representado;
- A segunda correspondente ao “*template*” ou modelo elétrico equivalente propriamente dito, atrelado ao componente representado no programa ATP.

É importante observar que os argumentos podem ser agrupados em três categorias:

- ARG: que representam nomes de nós externos;
- NUM: que representam nomes de variáveis com valores numéricos;
- DUM: referentes a nomes de nós internos dos modelos existentes no programa ATP.

Diante do exposto, a estrutura de um arquivo que utilize a rotina “DATA BASE MODULE” deve obedecer a seguinte sequência de entrada para os cartões do ATP:

1) BEGIN NEW DATA CASE --NOSORT--

*Este corresponde ao primeiro cartão de entrada do ATP, representando assim, a indicação do início da execução de um novo arquivo ATP;*

## 2) DATA BASE MODULE

*Este cartão de comando especial, existente no software, quando requisitado, aciona a referida rotina de apoio DBM, que busca todas as informações fornecidas pelo usuário para as cadeias de caracteres referentes a todos os tipos de argumentos apresentados e estabelece os respectivos valores numéricos de interesse, permitindo, assim, uma otimização dos processamentos por meio da utilização do comando (\$INCLUDE);*

## 3) \$ERASE

*O referido cartão é utilizado para apagar o buffer da memória do cartão de saída;*

## 4) ARG, NUM, DUM (lista de declaração de argumentos)

*A lista de declaração de argumentos define quando um é nomeado, sendo declarada como um nó externo ou uma variável de entrada, ou quando o mesmo será um nó interno ao circuito elétrico equivalente do componente representado no ATP;*

### a) ARG nome1, nome2, ...

*O mesmo representa argumentos referentes a nomes de nós. Deve-se salientar a necessidade de atenção para a sequência dos argumentos listados, devendo estas corresponder à sequência de valores listados na (\$INCLUDE), e ainda, à quantidade de caracteres utilizada no nome do argumento;*

### b) NUM value1, value2

*Todos os nomes de argumentos relacionados a valores numéricos devem ser declarados na lista NUM;*

c) DUM dummy1, dummy2

*Estes devem sempre estar relacionados a nomes de nós internos do módulo, não devendo aparecer na lista de argumentos do tipo ARG ou NUM;*

5) Template (/BRANCH, /SWITCH, /SOURCE, ...)

*Corresponde a todo ou qualquer modelo equivalente de componente ou rede elétrica existente no programa ATP. Ao utilizar tal recurso deve-se atentar para a correta colocação dos argumentos do tipo ARG (argumentos para nós externos), NUM (argumentos para valores numéricos) e DUM (argumentos para nós internos) no “template”;*

6) BEGIN NEW DATA CASE

*Nesta posição, o presente cartão é utilizado como um marcador para separação de caso;*

7) C (cartão de comentário)

*O cartão de comentário utilizado nesta posição sinaliza o fim da rotina DBM;*

8) \$PUNCH

*Este comando deve ser usado para extrair os resultados e informações armazenados na memória “punch buffer”. Estes resultados contêm os pontos numéricos de todos os argumentos utilizados no “template”, e o próprio “template”, formando assim um novo cartão. Este último auxilia na aceleração de futuros processamentos de circuitos ou elementos elétricos por meio do emprego do comando (\$INCLUDE);*

9) BEGIN NEW DATA CASE

*Novamente o uso do referido cartão como um marcador para separação de caso;*

## 10) BLANK

*O presente cartão encerra todos os casos e, portanto, finaliza a simulação.*

Uma vez apresentada à estrutura para criação de um arquivo utilizando a rotina “DATA BASE MODULE”, procede-se a criação de um arquivo representativo de uma das colunas do RNS fazendo uso, para tanto, da rotina DBM disponibilizada pelo programa ATP. A Figura 3.9 apresenta o cartão estruturado através do uso da rotina DBM.

```
BEGIN NEW DATA CASE
DATA BASE MODULE
$ERASE
ARG,PXXXXA,PNXXXX,SXXXXA,SNXXXX,TXXXXA,TNXXXX,SATXXA
ARG,IOXXXX,FOXXXX,RMXXXX,RPXXXX,LPXXXX,UPXXXX
ARG,RSXXXX,LSXXXX,USXXXX,RTXXXX,LTXXXX,UTXXXX
NUM,IOXXXX,FOXXXX,RMXXXX,RPXXXX,LPXXXX,UPXXXX
NUM,RSXXXX,LSXXXX,USXXXX,RTXXXX,LTXXXX,UTXXXX
C 1 2 3 4 5 6 7 8
C 3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
TRANSFORMER IOXXXXFOXXXXSATXXARMXXXX
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\curva23.lib 0
1PXXXXAPXXXX RPXXXXLPXXXXUPXXXX
2SXXXXASNXXXX RSXXXXLSXXXXUSXXXX
3TXXXXATNXXXX RTXXXXLTXXXXUTXXXX
BEGIN NEW DATA CASE
C
$PUNCH
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK
```

Figura 3.9 – Arquivo DBM representativo de uma das colunas do RNS *twin-tripler*.

A Figura 3.10 ilustra os nomes de argumentos de nós (ARG) utilizados para a criação do modelo representativo de uma das colunas magnéticas do RNS *twin-tripler*.

```
ARG,PXXXXA,PNXXXX,SXXXXA,SNXXXX,TXXXXA,TNXXXX,SATXXA
ARG,IOXXXX,FOXXXX,RMXXXX,RPXXXX,LPXXXX,UPXXXX
ARG,RSXXXX,LSXXXX,USXXXX,RTXXXX,LTXXXX,UTXXXX
```

Figura 3.10 – Declaração de argumentos referentes a nomes de nós.

Na sequência tem-se a legenda dos respectivos nomes de argumentos de nós utilizados durante a criação do referido modelo elétrico equivalente:

- PXXXXA: Entrada do enrolamento principal de uma coluna magnética do RNS *twin-tripler*;

- PNXXXX: Saída do enrolamento principal;
- SXXXXA: Entrada do enrolamento auxiliar de uma coluna magnética do RNS;
- SNXXXX: Saída do enrolamento auxiliar;
- TXXXXX: Entrada do enrolamento terciário de uma coluna magnética do RNS;
- TNXXXX: Saída do enrolamento terciário;
- SATXXA (BUSTOP): Ponto de conexão do ramo magnetizante do modelo, sendo este ponto também conhecido como “BUSTOP”, conforme apresentado na Figura 3.1, o qual denomina a unidade monofásica;
- I0XXXX e F0XXXX (corrente e fluxo): Pares de pontos usados para definir a indutância linear do ramo de magnetização no primeiro enrolamento, durante a solução fasorial em regime permanente;
- RMXXXX (Rmag): Resistência linear e constante, conectada paralelamente a reatância de magnetização;
- RPXXXX (R<sub>1</sub>): Resistência de dispersão do enrolamento principal;
- LPXXXX (L<sub>1</sub>): Indutância de dispersão do enrolamento principal;
- UPXXXX (V<sub>N</sub>): Tensão nominal do enrolamento principal;
- RSXXXX (R<sub>2</sub>): Resistência de dispersão do enrolamento auxiliar;
- LSXXXX (L<sub>2</sub>): Indutância de dispersão do enrolamento auxiliar;
- USXXXX (V<sub>N</sub>): Tensão nominal do enrolamento auxiliar;

- RTXXXX (R<sub>3</sub>): Resistência de dispersão do enrolamento terciário;
- LTXXXX (L<sub>3</sub>): Indutância de dispersão do enrolamento terciário;
- UTXXXX (V<sub>N</sub>): Tensão nominal do enrolamento terciário;

Muito embora o RNS *twin-tripler* apresente em sua constituição física apenas dois enrolamentos por coluna magnética, o modelo aqui proposto apresenta três enrolamentos por coluna, onde os enrolamentos principais e auxiliares são utilizados para a realização das conexões elétricas representativas do arranjo *twin-tripler*, enquanto o terceiro pode ser utilizado, se necessário, para a representação das perdas no núcleo, em substituição a inclusão destas na forma da resistência do ramo magnetizante.

Uma vez compreendidos os nomes dos respectivos argumentos do tipo (ARG), faz-se necessário a declaração de todos os argumentos relacionados a valores numéricos. A Figura 3.11 apresenta os referidos argumentos tipo (NUM).

```
NUM ,IOXXXX ,FOXXXX ,RMXXXX ,RPXXXX ,LPXXXX ,UPXXXX  
NUM ,RSXXXX ,LSXXXX ,USXXXX ,RTXXXX ,LTXXXX ,UTXXXX
```

Figura 3.11 – Declaração de argumentos relacionados a valores numéricos.

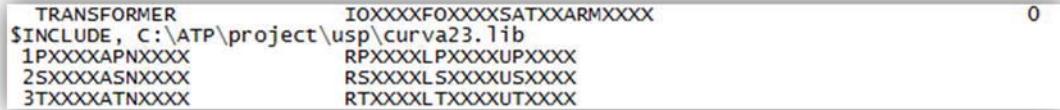
A legenda com os respectivos nomes de argumentos de valores numéricos encontram-se identificados a seguir:

- I0XXXX e F0XXXX (corrente e fluxo): Os pares de pontos usados para definir a indutância linear representativa do ramo de magnetização no primeiro enrolamento, durante a solução fasorial em regime permanente, devem ser expressos na forma de valores de pico, para a corrente e fluxo, com as respectivas unidades [Ampère] e [Volt-segundo];

- RMXXXX (R<sub>mag</sub>): O valor da resistência de magnetização leva em consideração as perdas no núcleo por excitação, devendo a mesma ser expressa em [Ohm];
- RPXXXX (R<sub>1</sub>): Resistência de dispersão do enrolamento principal, expressa em [Ohm];
- LPXXXX (L<sub>1</sub>): Indutância de dispersão do enrolamento principal, expressa em [mH] ou em [Ohm], dependendo do valor de XOPT;
- UPXXXX (V<sub>N</sub>): Tensão nominal do enrolamento principal, expressa em [V];
- RSXXXX (R<sub>2</sub>): Resistência de dispersão do enrolamento secundário, expressa em [Ohm];
- LSXXXX (L<sub>2</sub>): Indutância de dispersão do enrolamento secundário, expressa em [mH] ou em [Ohm], dependendo do valor de XOPT;
- USXXXX (V<sub>N</sub>): Tensão nominal do enrolamento secundário, expressa em [V];
- RTXXXX (R<sub>3</sub>): Resistência de dispersão do enrolamento terciário, expressa em [Ohm];
- LTXXXX (L<sub>3</sub>): Indutância de dispersão do enrolamento terciário, expressa em [mH] ou em [Ohm], dependendo do valor de XOPT;
- UTXXXX (V<sub>N</sub>): Tensão nominal do enrolamento terciário, expressa em [V].

Após a declaração dos nomes de argumentos de nós (ARG) e de valores numéricos (NUM), obtém-se o (*template*) ou modelo elétrico equivalente do componente ou circuito elétrico que se queira representar, o qual, para o presente

caso, corresponde a uma das colunas do reator saturado *twin-tripler*. A Figura 3.12 apresenta o referido *template*.



```
TRANSFORMER
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\curva23.lib
1PXXXXAPNXXXX  I0XXXXFOXXXXSATXXARMXXXX
2SXXXXASNXXXX  RPXXXXLPXXXXUPXXXX
3TXXXXATNXXXX  RSXXXXLSXXXXUSXXXX
                           RTXXXXLTXXXXUTXXXX
```

0

Figura 3.12 – Template representativa de uma das colunas e enrolamentos do RNS *twin-tripler*.

Apresenta-se, a seguir, a nomenclatura empregada para o referido *template*:

- TRANSFORMER: Nome do *template* existente no ATP para a representação de uma das colunas magnéticas do RNS, com respectivos enrolamentos;
- I0XXXX e F0XXXX (corrente e fluxo): Valores numéricos referentes aos pares de pontos usados para definir a indutância linear representativa do ramo de magnetização no primeiro enrolamento;
- SATXXA: Ponto de conexão do ramo magnetizante do modelo, também conhecido por BUSTOP;
- RMXXXX (Rmag): Valor numérico da resistência de magnetização;
- \$INCLUDE: Arquivo incluído ao *template*, para a representação da curva de saturação do RNS através de pares de pontos de corrente e fluxo;
- 1PXXXXAPNXXXX: Nós de entrada e saída do enrolamento principal;
- RPXXXX, LPXXXX e UPXXXX: Valores numéricos associados com a resistência, indutância e tensão nominal do enrolamento principal;

- 2SXXXXASNXXXX: Nós de entrada e saída do enrolamento auxiliar;
- RSXXXX, LSXXXX e USXXXX: Valores numéricos associados com a resistência, indutância e tensão nominal do enrolamento auxiliar;
- 3TXXXXATNXXXX: Nós de entrada e saída do enrolamento terciário;
- RTXXXX, LTXXXX e UTXXXX: Valores numéricos associados com a resistência, indutância e tensão nominal do enrolamento terciário, caso este seja utilizado.

Por fim, a Figura 3.13 apresenta alguns cartões de comando existentes no ATP, visando a criação de um novo componente, mediante o uso da rotina DBM.

```
BEGIN NEW DATA CASE
C
$PUNCH
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK
```

Figura 3.13 – Cartões utilizados para a finalização do arquivo ATP com rotina DBM.

### 3.4.3 Arquivo representativo de uma coluna do RNS

Para a obtenção do arquivo representativo de uma das colunas de um RNS basta executar o arquivo ATP recém-criado. Isto é feito através do “ATP Launcher”, cuja janela encontra-se ilustrada através da Figura 3.14.

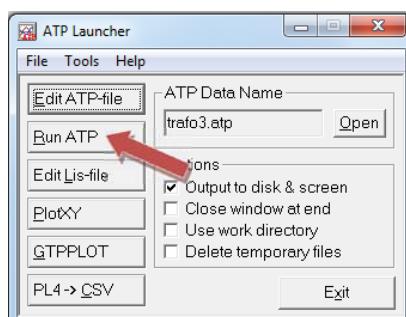


Figura 3.14 – Execução do ATP Launcher para obtenção do arquivo representativo de uma coluna do RNS twin-tripler.

O resultado obtido com a execução do ATP *Launcher* consiste no cartão (\*.lib), mostrado na Figura 3.15. Nesta, pode-se constatar os meios utilizados para a inserção das informações próprias às características elétricas dos enrolamentos e da curva de saturação. Para a situação ilustrada foram utilizados os dados associados com um protótipo de RNS construído, em escala reduzida, de potência de 7 kVAr – 220V. Vale ressaltar que os pares de pontos de corrente e fluxo concatenado foram indexados ao modelo por meio do comando \$INCLUDE.

```
KARD 2 2 2 2 13 13 13 13 13 13 14 14 14 14 14 14 15 15 15 15 15 15 15
KARG 7 8 9 10 1 2 11 12 13 3 4 14 15 16 5 6 17 18 19
KBEG 39 27 33 45 3 9 27 33 39 3 9 27 33 39 3 9 27 33 39
KEND 44 32 38 50 8 14 32 38 44 8 14 32 38 44 8 14 32 38 44
KTEX 1 0 0 0 1 1 0 0 1 1 0 0 0 1 1 0 0 0 1 1 0 0 0
$ERASE
C 1 2 3 4 5 6 7 8
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
  TRANSFORMER IOXXXXFOXXXXSATXXARMXXXX
C $INCLUDE, C:\ATP\project\usp\curva16.lib
  0.028 0.016
  0.046 0.031
  0.073 0.062
  0.13 0.109
  0.264 0.125
  0.561 0.132
  3.896 0.144
  30.532 0.1555
  123.453 0.1633
  9999.
C End of $INCLUDE.  File name = C:\ATP\project\usp\curva16.lib
  1PXXXXAPNXXXX RPXXXXLPXXXXUPXXXX
  2SXXXXASNXXXX RSXXXXLSXXXXUSXXXX
  3TXXXXATNXXXX RTXXXXLTXXXXUTXXXX
$EOF  User-supplied header cards follow. 30-Nov-10 15:02:13
ARG, PXXXXA, PNXXXX, SXXXXA, SNXXXX, TXXXXA, TNXXXX, SATXXA
ARG, IOXXXX, FOXXXX, RMXXXX, RPXXXX, LPXXXX, UPXXXX
ARG, RSXXXX, LSXXXX, USXXXX, RTXXXX, LTXXXX, UTXXXX
NUM, IOXXXX, FOXXXX, RMXXXX, RPXXXX, LPXXXX, UPXXXX
NUM, RSXXXX, LSXXXX, USXXXX, RTXXXX, LTXXXX, UTXXXX
```

Figura 3.15 – Cartão (\*.lib) representativo de uma coluna de um RNS twin-tripler.

A Figura 3.16 exemplifica a curva da relação fluxo *versus* corrente para o reator ora considerado.

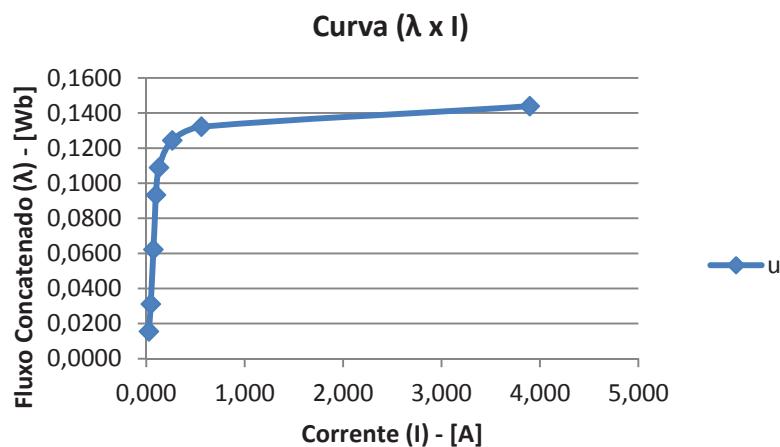


Figura 3.16 – Curva de saturação – RNS twin-tripler – 7 kVAr em 220V.

#### 3.4.4 Novo elemento disponibilizado na interface gráfica ATPDraw

Concluída a criação de um novo modelo elétrico no programa ATP, para a utilização deste na interface ATPDraw, faz-se necessário a criação de um novo elemento (\*.sup). Este destina-se, como já informado, à representação de uma das colunas que compõem a estrutura magnética e elétrica de um RNS *twin-tripler*.

Para tanto, o primeiro passo executado no programa ATPDraw foi a seleção da opção “*new sup-file*” para a criação de um novo elemento do tipo (sup-file) ou (\*.sup). Esta ação encontra-se ilustrada na Figura 3.17.

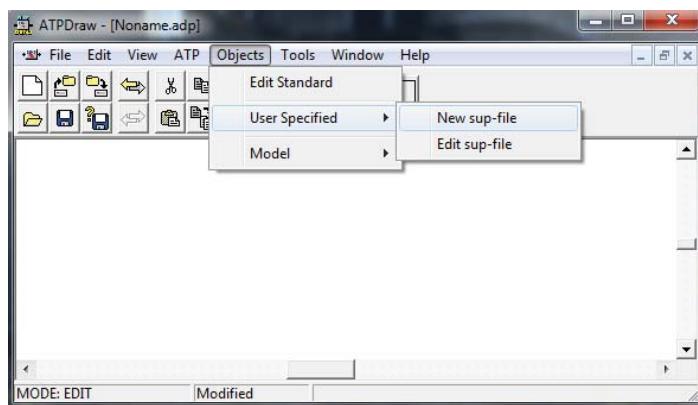


Figura 3.17 – Criação de um novo elemento (New sup-file) na interface ATPDraw.

Cumprida tal tarefa são abertas as janelas mostradas nas Figuras 3.18 e 3.19, onde são inseridas, respectivamente, as informações relacionadas com os dados localizados na aba “Data” e aos nós físicos localizados na aba “Nodes” para o novo componente criado.

Argumentos  
Numéricos  
NUM

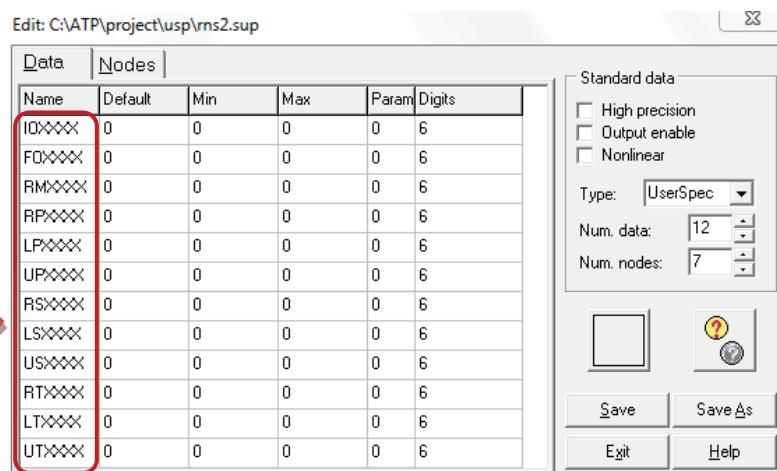


Table data (Data tab):

Name	Default	Min	Max	Param	Digits
IOXXXX	0	0	0	0	6
FOXXXX	0	0	0	0	6
RMXXXX	0	0	0	0	6
RPXXXX	0	0	0	0	6
LPXXXX	0	0	0	0	6
UPXXXX	0	0	0	0	6
RSXXXX	0	0	0	0	6
LSXXXX	0	0	0	0	6
USXXXX	0	0	0	0	6
RTXXXX	0	0	0	0	6
LTXXXX	0	0	0	0	6
UTXXXX	0	0	0	0	6

Figura 3.18 – Dados numéricos – RNS sup-file – ATPDraw.

Argumentos  
Representativos  
de nós físicos  
ARG

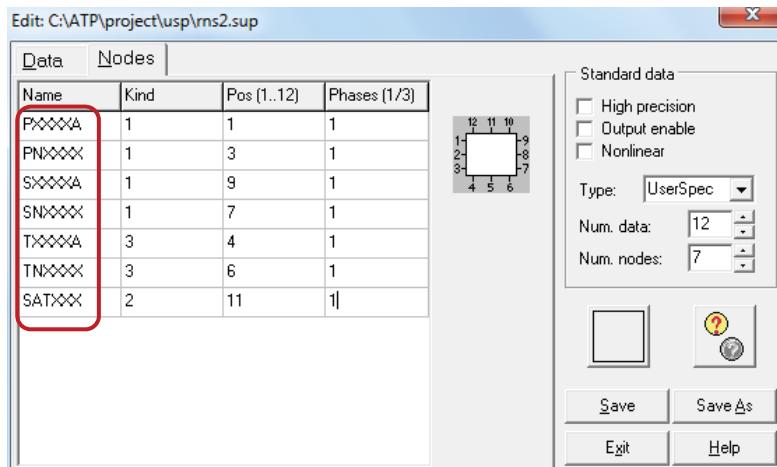


Table data (Nodes tab):

Name	Kind	Pos (1..12)	Phases (1/3)
PXXXXA	1	1	1
PNXXXX	1	3	1
SXXXXA	1	9	1
SNXXXX	1	7	1
TXXXXA	3	4	1
TNXXXX	3	6	1
SATXXXX	2	11	1

Figura 3.19 – Dados referentes a nós físicos – RNS sup-file – ATPDraw.

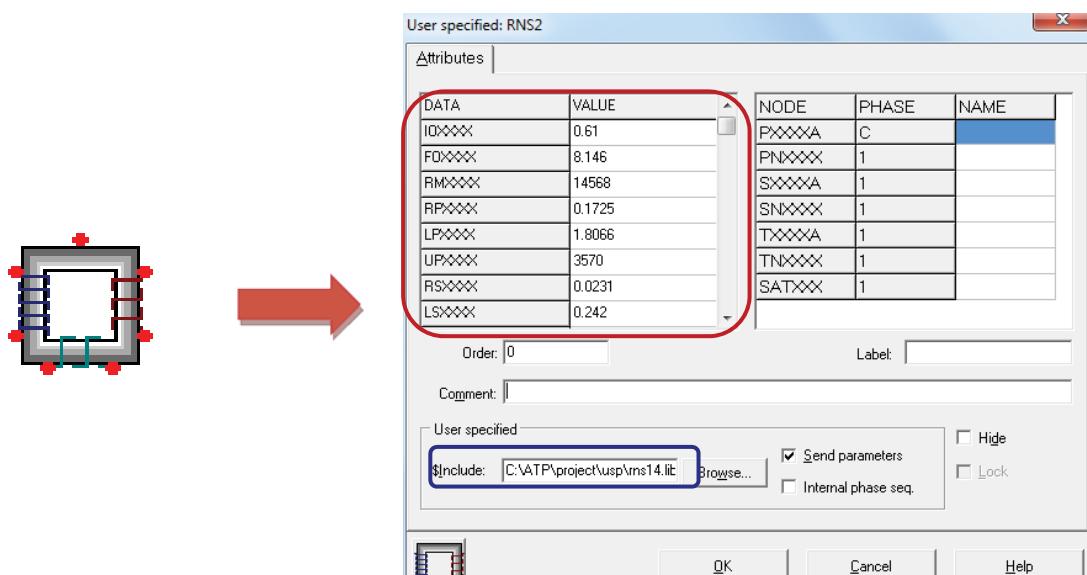
No que se referem às informações numéricas (Data), estas devem ser inseridas nesta aba com todos os argumentos que representem nomes de variáveis com valores numéricos (argumentos do tipo NUM). Valer ressaltar que a ordem em que os mesmos são inseridos na janela (*New sup-file*), deve obedecer rigorosamente a mesma sequência para os argumentos NUM apresentada no cartão (\*.lib).

Quanto às informações contidas na aba “Nodes”, estas representam todos os nós físicos do novo elemento criado. Logo, neste caso, são consideradas apenas as informações ou argumentos declarados em ARG, que representam nós físicos neste novo componente.

Uma vez inseridas todas as informações referentes a argumentos numéricos e aos nós elétricos do novo elemento criado deve-se salvar o processo, e finalizar a etapa de criação de um novo elemento no ATPDraw.

As Figuras 3.20 (a) e (b) ilustram, respectivamente, o novo componente produzido e a janela para parametrização elétrica do mesmo.

A Figura 3.20 (b) destaca, em vermelho, os parâmetros elétricos numéricos a serem inseridos no modelo. Além disso, no parâmetro \$INCLUDE, destacado em azul, deve-se inserir o arquivo (\*.lib). Vale ressaltar que as informações elétricas inseridas no modelo RNS.sup devem ser condizentes com os parâmetros físicos e elétricos utilizados para o cálculo da curva de saturação, sendo esta última inserida no arquivo (\*.lib) conforme explicitado anteriormente.



(a) Elemento criado

(b) Janela de parametrização elétrica do componente

Figura 3.20 – Novo elemento criado no ATPDraw – RNS.sup.

### 3.4.5 Montagem do arranjo *twin-tripler* no ATPDraw

Por fim, objetivando a composição física do reator saturado aqui considerado, deve-se proceder a interligação elétrica entre as colunas magnéticas (com respectivos enrolamentos) nos termos definidos pela estrutura do equipamento. Isto dever ser feito empregando-se seis unidades, cada qual representada pelo novo elemento RNS.sup criado na interface ATPDraw, como mostrado nas Figuras 3.21 e 3.22, relacionadas, respectivamente, com uma coluna individual e o equipamento na sua forma final. Vale ressaltar que, muito embora o ponto de conexão “Bustop” tenha sido disponibilizado durante a criação do modelo representativo da coluna do reator saturado, o mesmo não foi utilizado para a conexão *twin-tripler*.

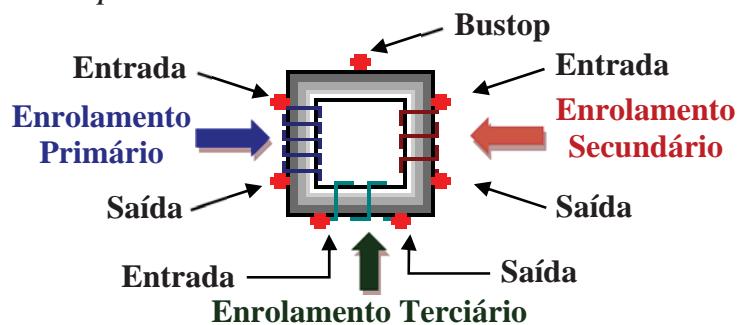


Figura 3.21 – Ícone representativo do novo elemento criado no ATPDraw – RNS.sup.

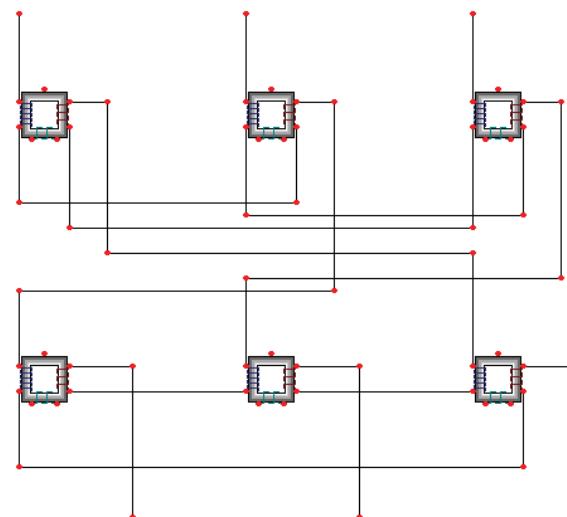


Figura 3.22 – Reator a núcleo saturado – arranjo *twin-tripler*.

Os três elementos superiores (RNS.sup) correspondem às colunas magnéticas do primeiro núcleo do RNS *twin-tripler*, enquanto os três inferiores estão relacionados às três colunas magnéticas do segundo núcleo do RNS.

Deve-se ressaltar que, no modelo proposto e implementado no simulador ATP, não existe qualquer acoplamento magnético entre as três colunas dos núcleos trifásicos que perfazem as duas unidades magnéticas. Isto, a princípio, sugere uma discordância física já que, o arranjo construtivo contempla, para cada composição trifásica, três colunas magneticamente interligadas. Não obstante esta aparente inconsistência, a ausência de acoplamento no modelo computacional se justifica em função de que o princípio operativo sequencial, através do qual cada coluna passa por estágios de saturação e não saturação, não permite interações eletromagnéticas entre as mesmas e, diante deste fato, apenas as bobinas de uma mesma coluna magnética possuem acoplamentos. Este fato justifica o motivo pelo qual a proposta aqui feita se mostra adequada aos propósitos almejados. Maiores entendimentos sobre esta assertiva podem ser encontradas em [35].

### **3.4.6 Modelo computacional disponibilizado para o compensador de reativos**

Uma vez estabelecido e apresentado os passos necessários para a implementação computacional do RNS no programa ATP, em sintonia com a estrutura física própria de um compensador, a qual compreende um conjunto formado por uma unidade indutiva (reator saturado) e outra capacitiva (banco fixo), procede-se, nesta etapa, a apresentação do modelo completo implementado no simulador ATP.

Esta concepção, conforme mencionado, forma o denominado Compensador Estático a Reator a Núcleo Saturado (CERNS), cujo arranjo topológico e correspondente representação no programa ATPDraw são indicados, respectivamente, nas Figura 3.23 (a) e (b).

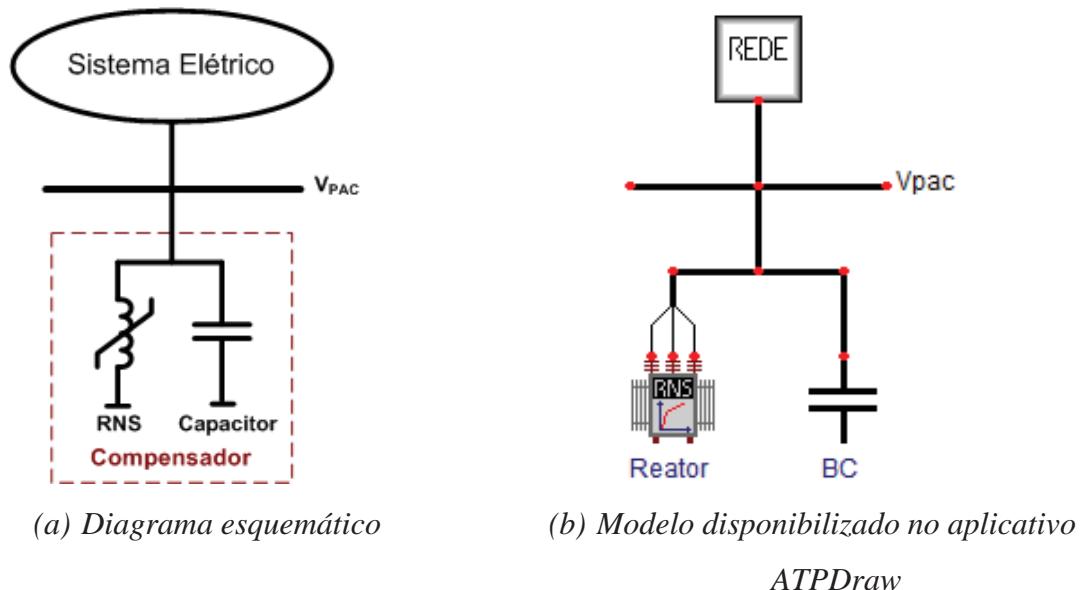


Figura 3.23 – Compensador estático a reator a núcleo saturado – CERNS.

Deve-se ressaltar que o reator saturado visualizado encontra-se, de fato, comprimido na forma de um único ícone. As Figuras 3.24 (a) e (b) ilustram respectivamente os circuitos expandidos e comprimidos do reator a núcleo saturado, que expressam o resultado final dos trabalhos de implementação do compensador em pauta no programa ATP.

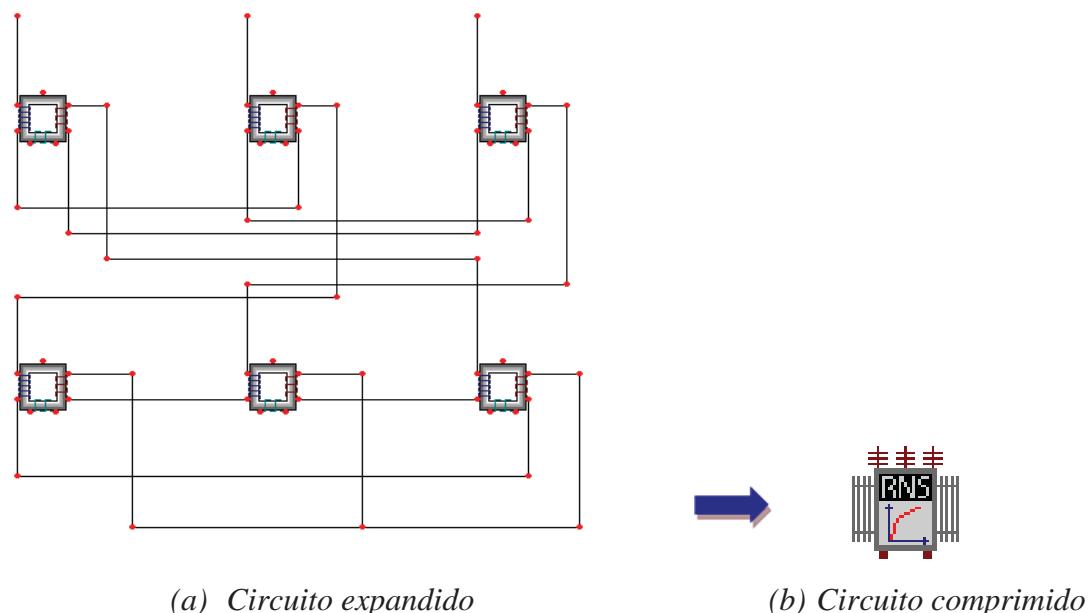


Figura 3.24 – Reator a núcleo saturado – arranjo twin-tripler – ATP.

### **3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Este capítulo foi centrado na proposição e implementação computacional de um modelo equivalente de reatores a núcleo saturado tipo *twin-tripler* no programa ATP, e posteriormente a representação do compensador de reativos a núcleo saturado no referido aplicativo. Como visto, a lógica estabelecida se apoiou em recursos pré-existentes para a representação de transformadores saturáveis disponibilizados no referido aplicativo. Entretanto, a adequação do modelo exigiu um conjunto de particularidades e procedimentos, os quais foram detalhados no texto. Estas atividades culminaram na proposta aqui consolidada e inserida na interface ATPDraw.

# Capítulo IV

---

## VALIDAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL E DO DESEMPENHO DO COMPENSADOR DE REATIVOS

### 4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Uma vez estabelecidos os procedimentos para o dimensionamento de compensadores de reativos a núcleo saturado, apresentados os fundamentos e as diretrizes para a realização do projeto básico de reatores saturados e desenvolvida uma proposta de modelagem computacional com respectiva inserção na plataforma ATPDraw, esta seção encontra-se centrada numa sistemática voltada para a validação dos desenvolvimentos até agora feitos.

Desta forma, o presente capítulo possui como principal objetivo a análise de desempenho de um compensador de reativos no que tange à sua habilidade e propriedades para a restauração de tensões aos patamares definidos pela legislação em vigor.

Visando atender a tais propósitos, como seria natural, a opção feita recaiu sobre um arranjo laboratorial, em escala reduzida, para a realização dos testes e subsequente modelagem no simulador ATP. Esta estrutura, devido ao fato que o

protótipo de reator disponível se apresenta como uma unidade de 7 kVAr, foi centrada nesta premissa e os demais componentes adequados a tal realidade.

Utilizando a composição factível de execução em ambiente laboratorial, tornou-se então possível a realização de ensaios diversos objetivando a formação de uma base de referência para a correlação com correspondentes estudos conduzidos computacionalmente.

À luz destas metas, a estrutura concebida para a presente unidade da tese encontra-se assim constituída:

- Avaliação computacional e experimental do desempenho, em regime permanente e sob distintos níveis de saturação, para o protótipo de reator a núcleo saturado, em escala reduzida, conectado na rede elétrica;
- Análise do desempenho do arranjo laboratorial montado, constituído por um alimentador radial, cargas variáveis e, com a inserção do compensador de reativos aqui contemplado;
- Por fim, utilizando-se de informações associadas com o reator ensaiado e outros dois protótipos de reatores em escala real, procede-se a um estudo avaliativo da resposta destes quanto a correlação entre as suas potências reativas em função das tensões em seus terminais, empregando-se, mais uma vez, dados experimentais e computacionais sobre a mencionada interdependência.

## **4.2 VALIDAÇÃO DO MODELO DO REATOR A NÚCLEO SATURADO**

Os trabalhos conduzidos nesta seção encontram-se alicerçados num reator saturado, como já dito, em escala reduzida e apropriado para investigações laboratoriais. O arranjo físico deste dispositivo encontra-se ilustrado na Figura 4.1 e suas principais características encontram-se destacadas na Tabela 4.1.



Figura 4.1 – RNS twin-tripler – 7 kVAr/220 V – protótipo em escala reduzida.

Tabela 4.1 – Protótipo de reator a núcleo saturado twin-tripler – 7 kVAr.

Principais Características	
Potência Nominal	7 kVAr
Classe de Tensão	220 V
Tensão de Saturação Nominal	221,8 V
Corrente Nominal	13,6 A
Nº Espiras Enrolamento Principal	37 espiras
Nº Espiras Enrolamento Auxiliar	14 espiras

No que tange aos parâmetros elétricos equivalentes, através da metodologia proposta e sistematizada no aplicativo PRORE 2.0 obtém-se os resultados indicados na Tabela 4.2. Vale destacar que todas as informações componentes da tabela correspondem a valores sob condições de saturação plena.

Tabela 4.2 – Principais parâmetros elétricos equivalentes – RNS 7 kVAr / 220 V.

Característica Construtiva	Resultados PRORE 2.0
Resistência do enrolamento principal (Rp)	0,0111 Ω
Resistência do enrolamento auxiliar (Ra)	0,0015 Ω
Indutância do enrolamento principal (Lp)	0,1388 mH
Indutância do enrolamento auxiliar (La)	0,0186 mH
Tensão na bobina principal	57 V
Tensão na bobina auxiliar	21 V

Quanto ao arranjo laboratorial, este se apresenta indicado através do diagrama unifilar da Figura 4.2, o qual é composto por uma fonte de suprimento, um transformador destinado à variação das tensões nos terminais do reator e, por

fim, o reator a núcleo saturado *twin-tripler*. Portanto, como se constata, trata-se de uma estrutura extremamente simplificada, a qual, todavia, se mostrou apropriada para o cumprimento das metas estabelecidas nesta fase das atividades de validação.

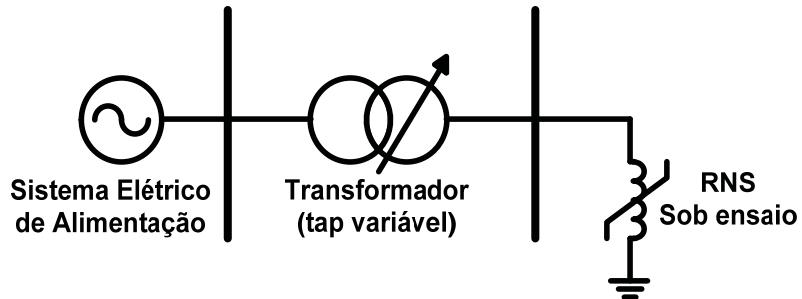


Figura 4.2 – Diagrama unifilar do arranjo elétrico trifásico utilizado para a avaliação do desempenho do reator saturado de forma isolada.

A Figura 4.3 ilustra a estrutura física correspondente.

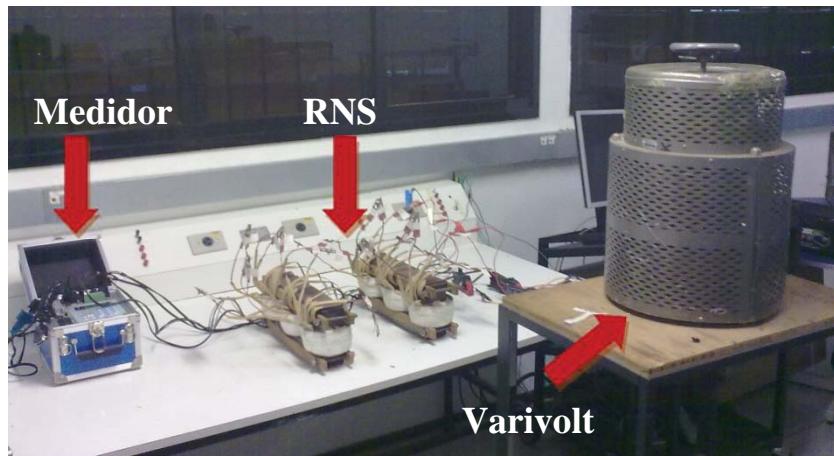


Figura 4.3 – Estrutura laboratorial para a realização dos ensaios.

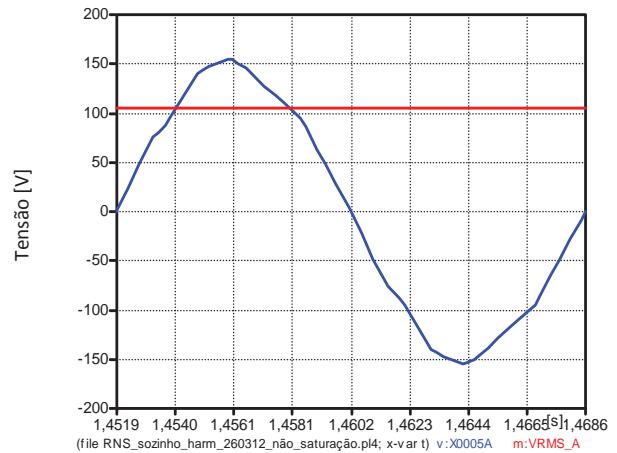
Uma vez estabelecida a estrutura física, as avaliações consistem em utilizar tensões similares, tanto no ambiente laboratorial como na simulação computacional e, diante de variações impostas para estas grandezas, caracterizar o desempenho do protótipo de reator sob condições associadas com o seu funcionamento em distintas situações de saturação. Para cada uma delas, são coletadas informações relacionadas com as formas de onda e valores para as tensões e correntes, potências reativas correspondentes, etc.

Muito embora os resultados a serem apresentados e explorados se mostrem condizentes com as expectativas, é relevante destacar que o reator saturado ora referido, o qual foi construído para outros fins, não se encontra dimensionado de forma compatível com as potências da fonte e demais cargas. Isto, todavia, não foi uma característica restritiva aos propósitos deste trabalho.

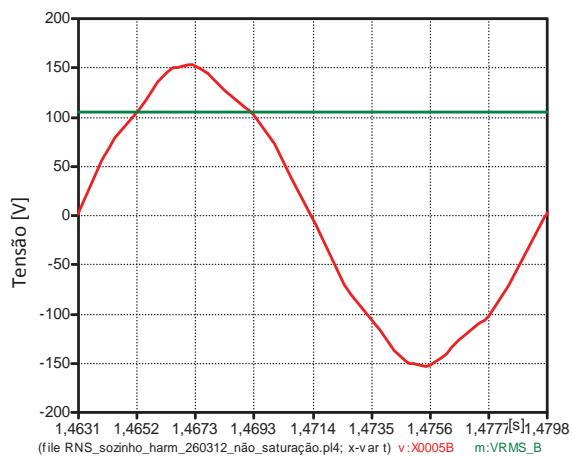
#### **4.2.1 Avaliação de desempenho do RNS - baixa saturação**

Neste caso procedeu-se a avaliação do desempenho do reator em regime permanente de operação, para uma situação de baixa saturação, a qual, foi atrelada com uma tensão de suprimento de aproximadamente 80% da tensão de linha 220 V.

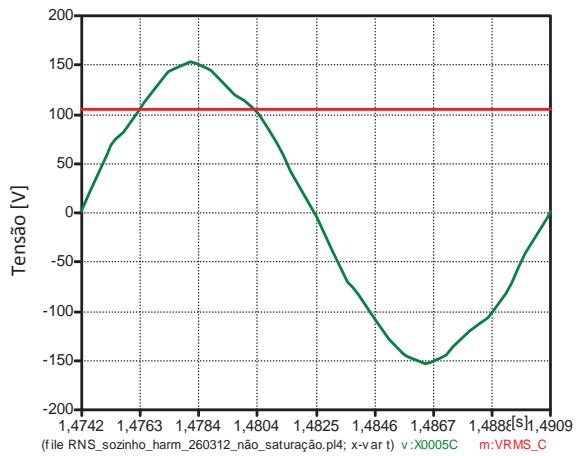
As formas de onda das tensões (fase-neutro) aplicadas nos estudos computacionais e na avaliação experimental, para as três fases do reator, bem como os respectivos valores eficazes, encontram-se ilustrados nas Figuras 4.4. Como se observa, diante de uma tensão experimental originalmente distorcida, a mesma condição foi utilizada para os estudos teóricos. Além disso, deve-se ressaltar que as respectivas formas de ondas analisadas encontram-se defasadas de 120° elétricos, muito embora tal deslocamento angular não tenha sido indicado nas figuras subsequentes. Os espectros de frequência correspondentes encontram-se mostrados nas Figuras 4.5. Nestas, a utilização do valor da grandeza fundamental, de 100%, foi omitida para maior clareza das informações atreladas com as distorções harmônicas encontradas.



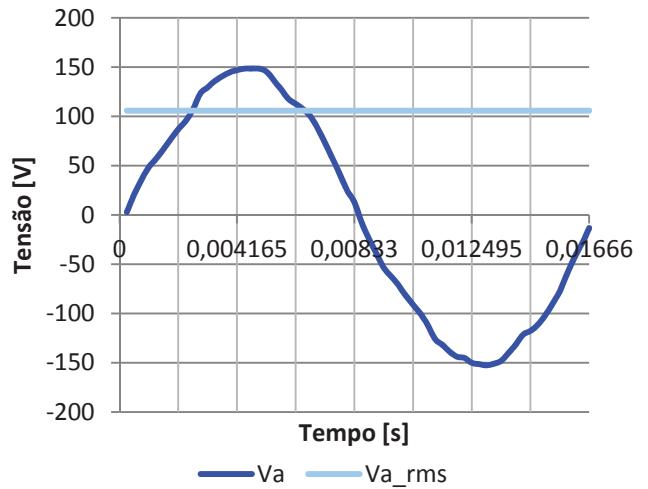
(a) Tensão  $v_a(t)$  – Computacional



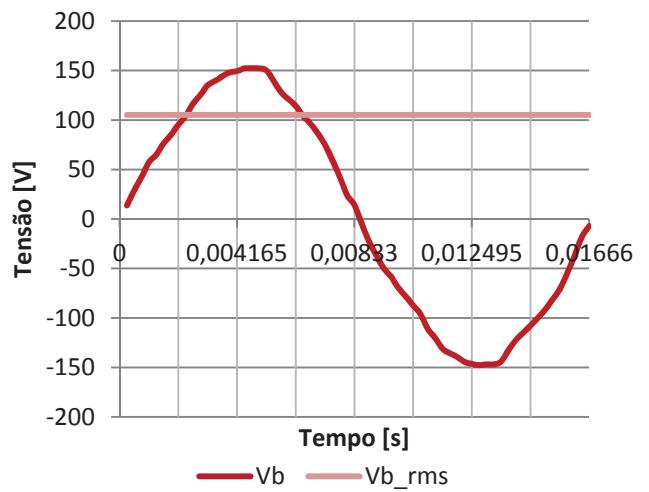
(c) Tensão  $v_b(t)$  – Computacional



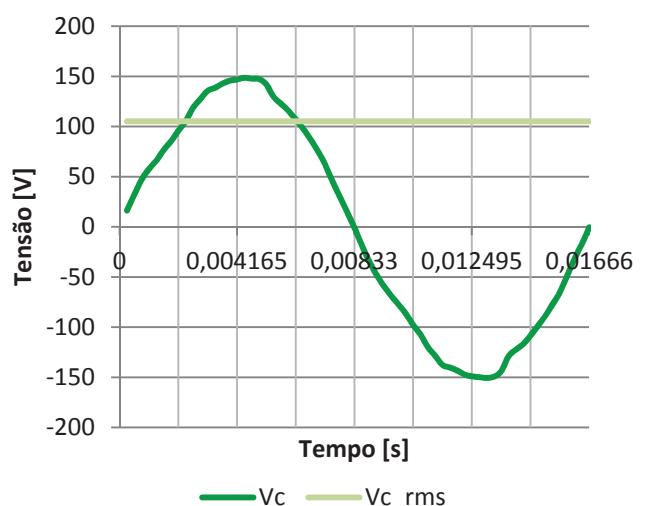
(e) Tensão  $v_c(t)$  – Computacional



(b) Tensão  $v_a(t)$  – Experimental

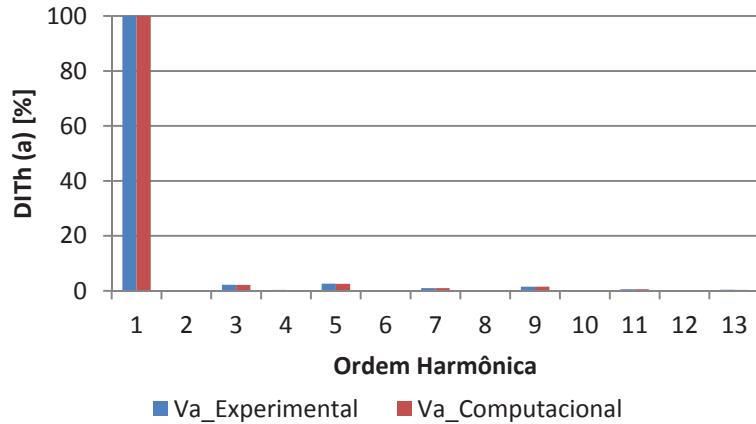


(d) Tensão  $v_b(t)$  – Experimental

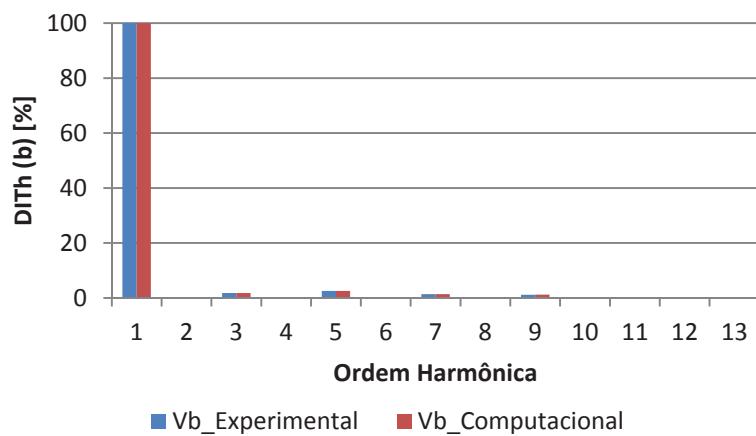


(f) Tensão  $v_c(t)$  – Experimental

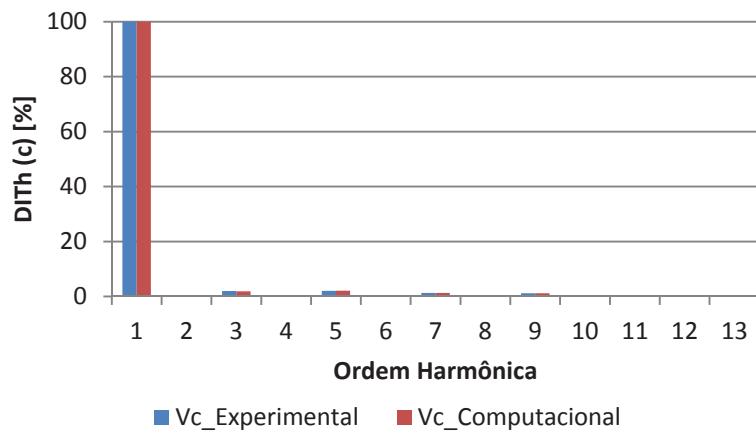
Figura 4.4 – Formas de onda individuais das tensões aplicadas nos terminais do RNS – baixa saturação.



(a) Espectro harmônico –  $V_a$  – Comparação computacional versus experimental



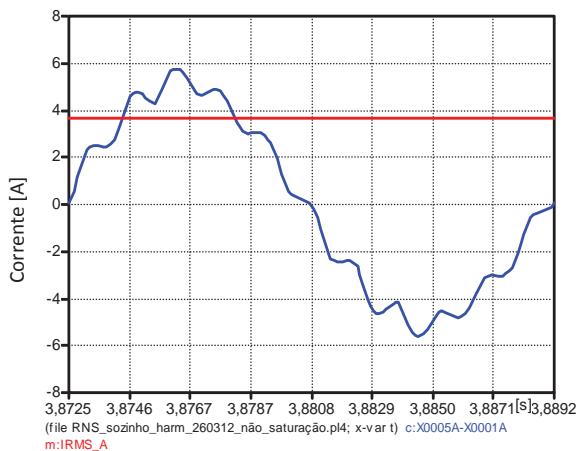
(b) Espectro harmônico –  $V_b$  – Comparação computacional versus experimental



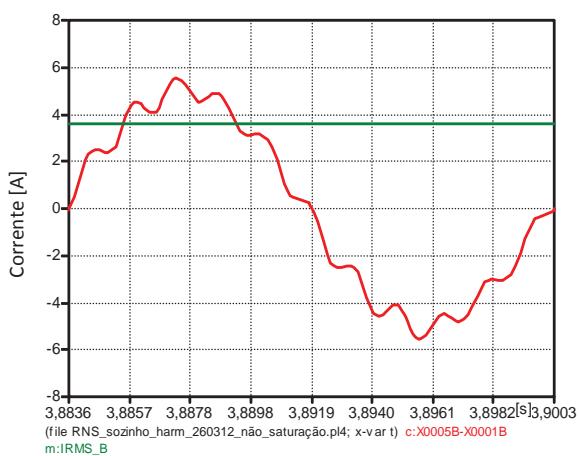
(c) Espectro harmônico –  $V_c$  – Comparação computacional versus experimental

Figura 4.5 – Espectro harmônico das tensões aplicadas nos terminais do RNS – baixa saturação.

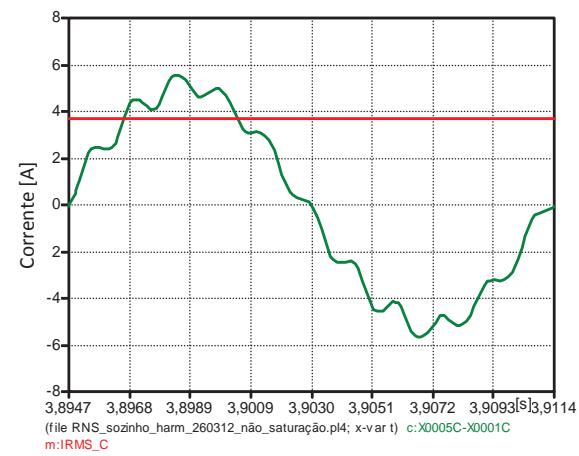
Quanto às correntes de linha do reator, estas e seus correspondentes espectros de frequência encontram-se indicados nas Figuras 4.6 e 4.7.



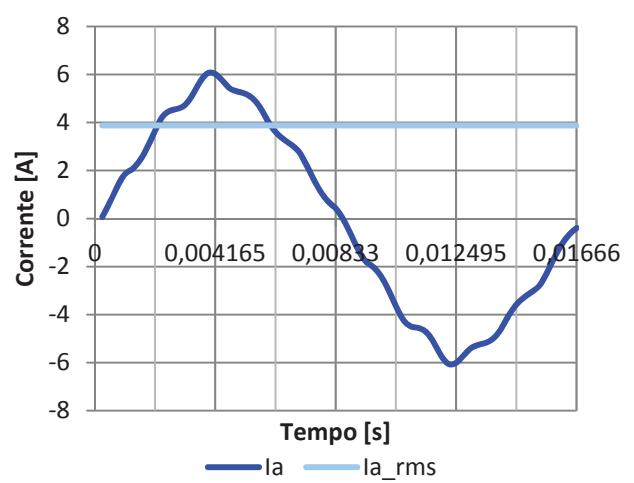
(a) Corrente de linha a – Computacional



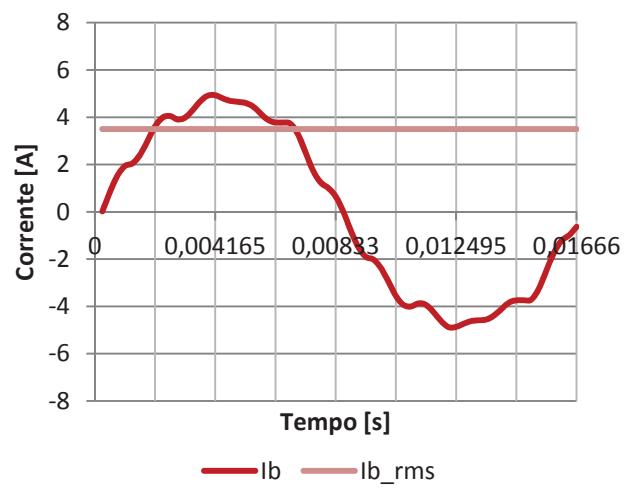
(c) Corrente de linha b – Computacional



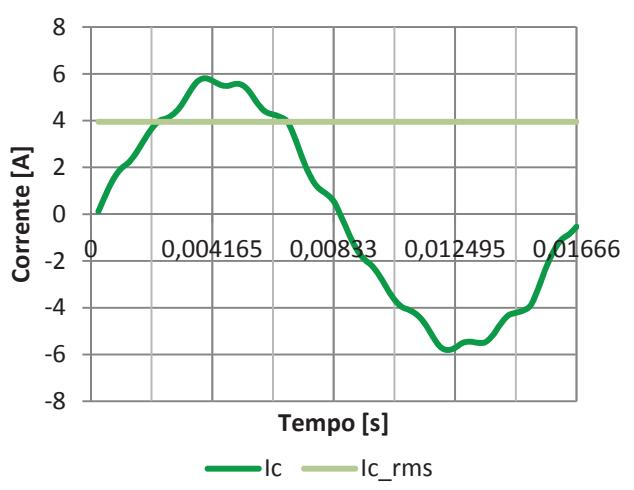
(e) Corrente de linha c – Computacional



(b) Corrente de linha a – Experimental

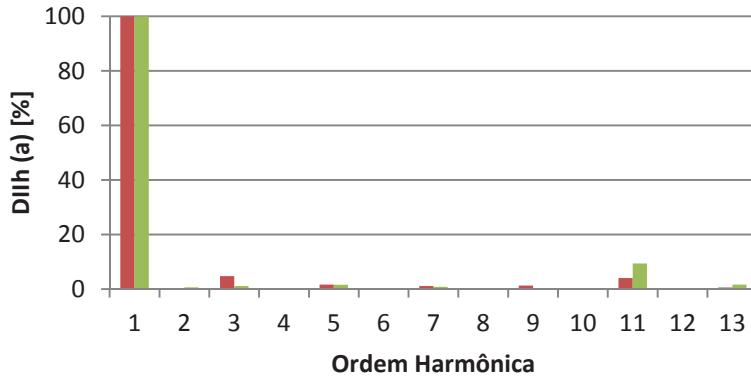


(d) Corrente de linha b – Experimental

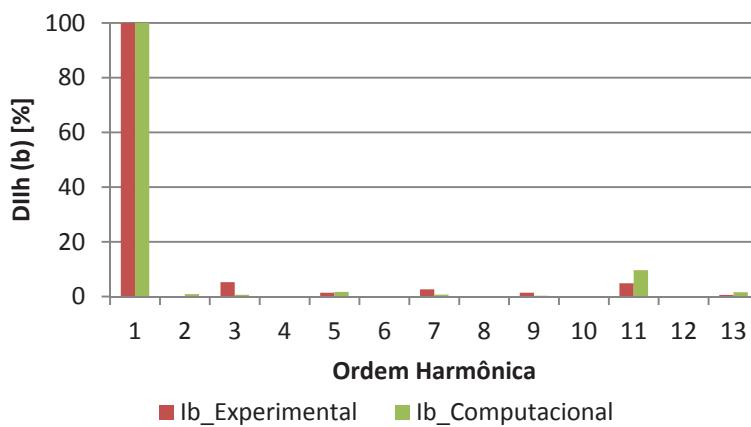


(f) Corrente de linha c – Experimental

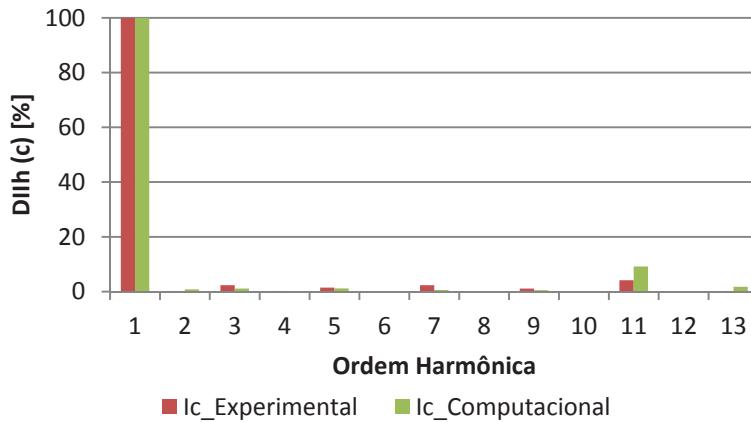
Figura 4.6 – Formas de onda individuais das correntes solicitadas pelo RNS – baixa saturação.



(a) Espectro harmônico –  $I_a$  – Comparação computacional versus experimental



(b) Espectro harmônico –  $I_b$  – Comparação computacional versus experimental



(c) Espectro harmônico –  $I_c$  – Comparação computacional versus experimental

Figura 4.7 – Espectro harmônico das correntes solicitadas pelo RNS – baixa saturação.

As Figuras 4.8 e 4.9 apresentam os resultados obtidos para as distorções totais de tensão e corrente, respectivamente, levando em consideração tanto os estudos computacionais quanto os ensaios experimentais. É importante ressaltar

que, para estas distorções, foi utilizada a escala máxima do gráfico de 100%, valore este que, novamente, representa a grandeza fundamental associada.

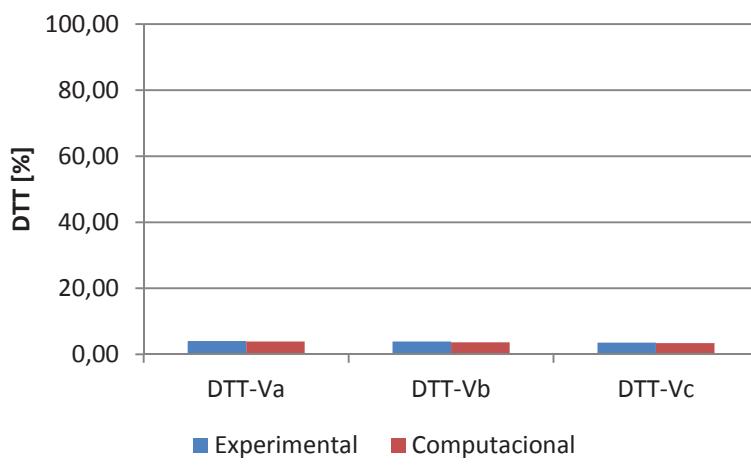


Figura 4.8 – Distorção harmônica total de tensão – computacional versus experimental – baixa saturação.

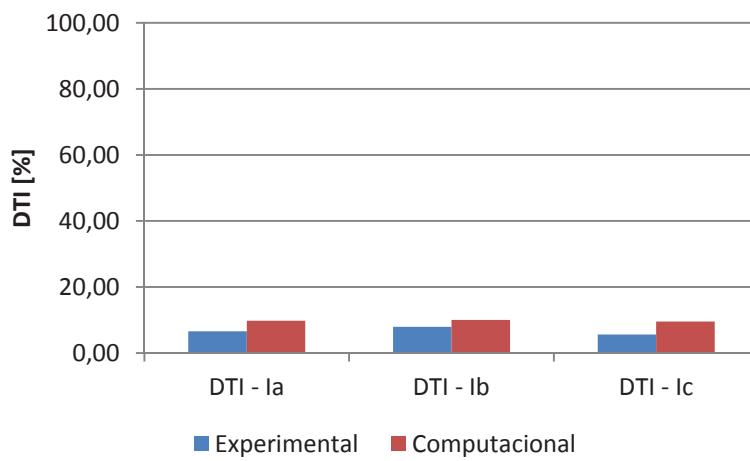


Figura 4.9 – Distorção harmônica total de corrente – computacional versus experimental – baixa saturação.

Por fim, a Tabela 4.3 sintetiza os resultados apresentados anteriormente e ressalta uma boa aderência entre os desempenhos experimentais e computacionais. As diferenças constatadas, principalmente quanto às distorções harmônicas se devem, dentre outras causas, a adoção de: divergências entre as curvas de saturação impostas no simulador e as reais; assimetrias construtivas e simplificações associadas com os modelos elétricos; existência de entreferro não

inserido nos modelos, etc. Não obstante a isto, como já mencionado, os resultados se apresentam condizentes.

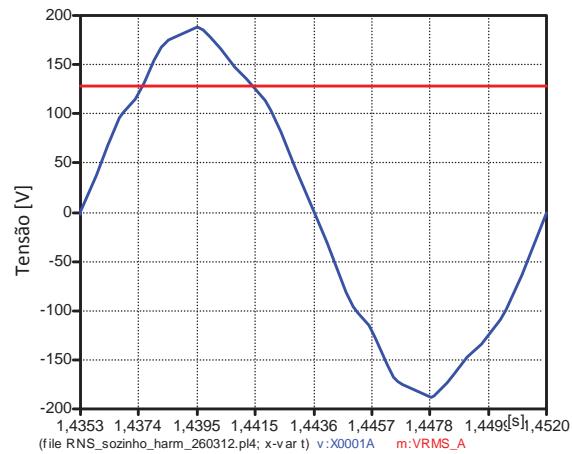
*Tabela 4.3 – Síntese dos resultados – baixa saturação – protótipo de reator a núcleo saturado twin-tripler – 7 kVAr.*

Grandezas Avaliadas	Experimental	Computacional
V <sub>a</sub>	105,8 V	105,8 V
V <sub>b</sub>	105,2 V	105,1 V
V <sub>c</sub>	104,9 V	104,9 V
I <sub>a</sub>	3,9 A	3,7 A
I <sub>b</sub>	3,5 A	3,6 A
I <sub>c</sub>	3,9 A	3,8 A
DTT – V <sub>a</sub>	4,0 %	3,9 %
DTT – V <sub>b</sub>	3,9 %	3,7 %
DTT – V <sub>c</sub>	3,5 %	3,4 %
DTI – I <sub>a</sub>	6,6 %	9,8 %
DTI – I <sub>b</sub>	7,9 %	10,0 %
DTI – I <sub>c</sub>	5,6 %	9,5 %

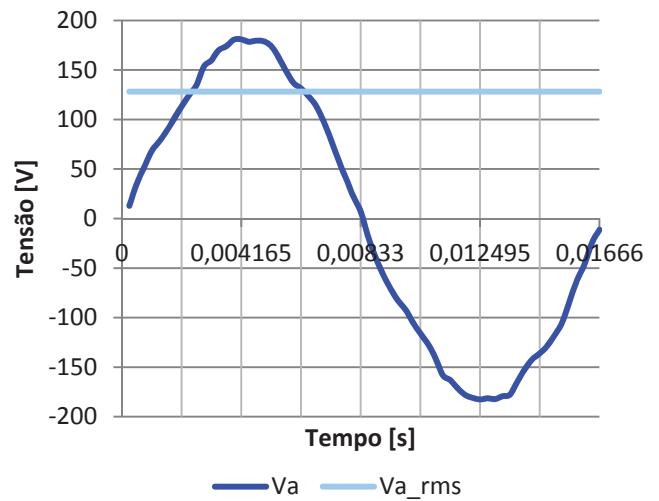
#### 4.2.2 Avaliação de desempenho do RNS – saturação elevada

Nesta segunda condição de operação, o reator saturado foi submetido à aplicação da tensão que o conduziu à situação de plena saturação, isto é, para um ponto de funcionamento associado com um consumo de potência reativa definido na etapa da especificação básica do compensador. Isto equivale a utilização de uma tensão trifásica de alimentação de 222 V quer no ambiente laboratorial como computacional. Ressalta-se que muito embora se reconheça que este nível de tensão se apresenta como valor nominal típico, o projeto do protótipo disponível para os trabalhos possui tal característica de operação, portanto, os experimentos ficaram restritos a este limite operacional.

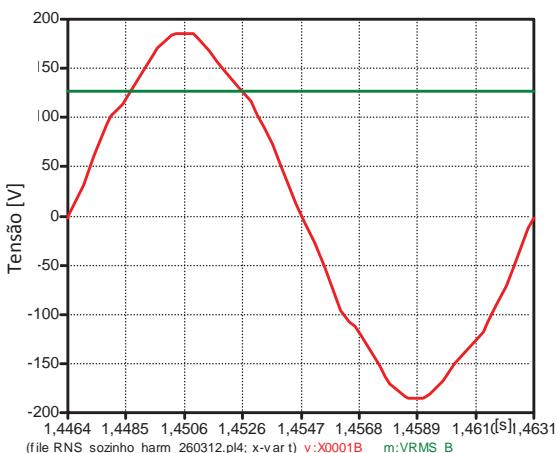
As formas de onda das tensões de fase aplicadas nos estudos computacionais e na avaliação experimental encontram-se ilustradas na Figura 4.10, enquanto que seus correspondentes espectros em frequência se apresentam na Figura 4.11.



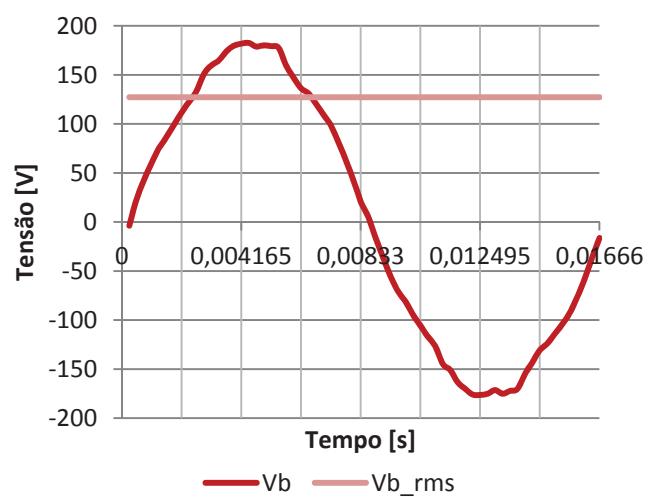
(a) Tensão  $v_a(t)$  – Computacional



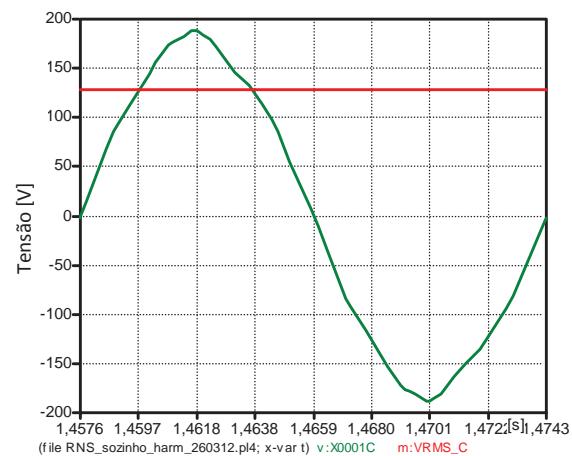
(b) Tensão  $v_a(t)$  – Experimental



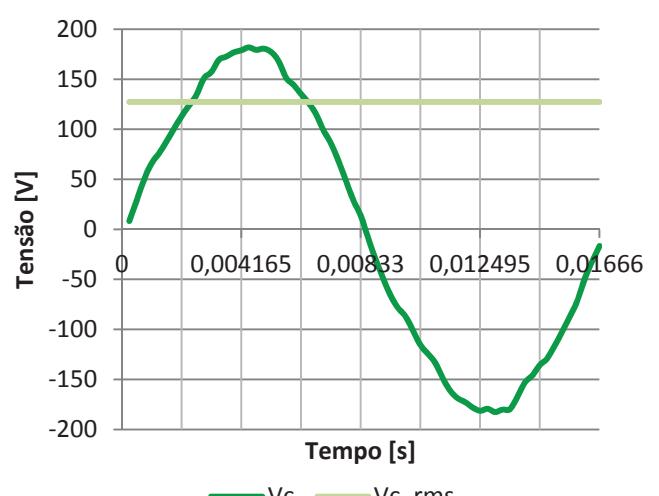
(c) Tensão  $v_b(t)$  – Computacional



(d) Tensão  $v_b(t)$  – Experimental

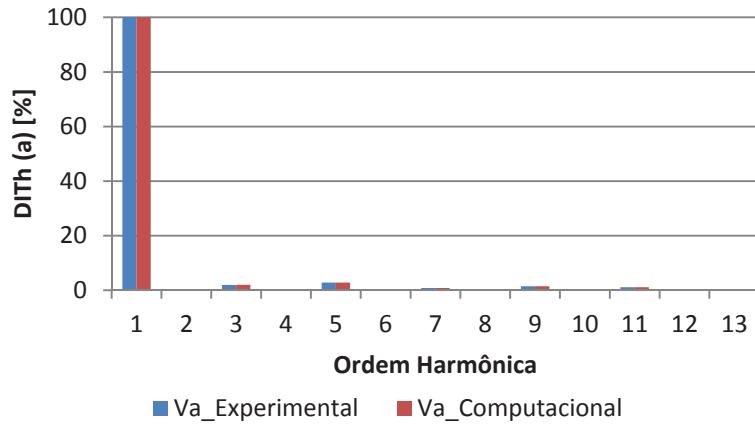


(e) Tensão  $v_c(t)$  – Computacional

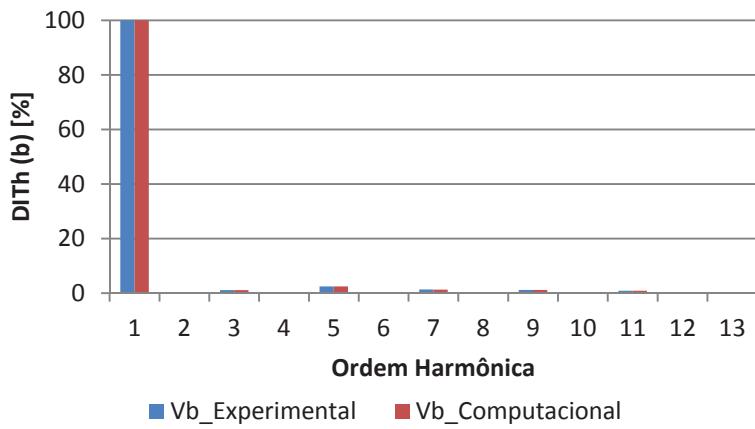


(f) Tensão  $v_c(t)$  – Experimental

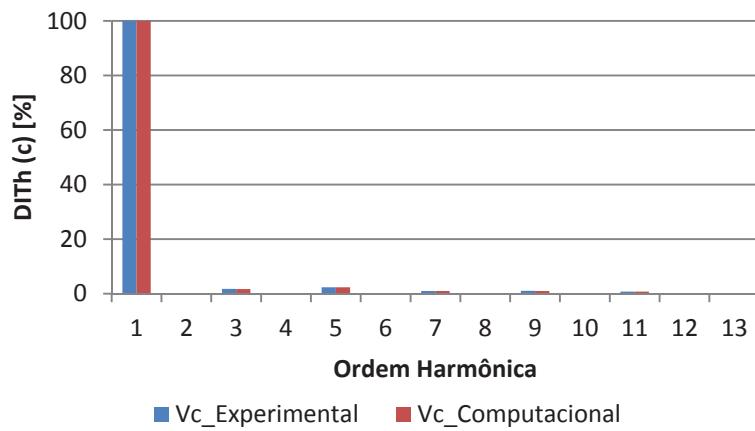
Figura 4.10 – Formas de onda individuais das tensões aplicadas nos terminais do RNS – saturação elevada.



(a) Espectro harmônico –  $V_a$  – Comparação computacional versus experimental



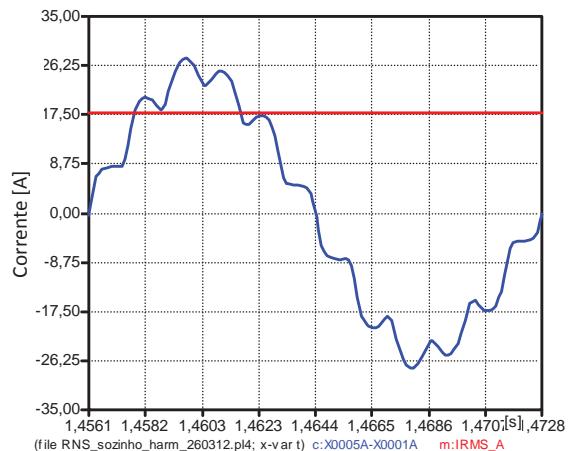
(b) Espectro harmônico –  $V_b$  – Comparação computacional versus experimental



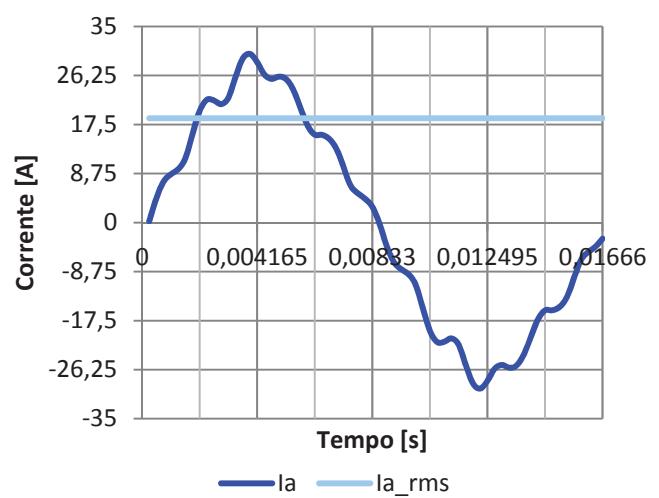
(c) Espectro harmônico –  $V_c$  – Comparação computacional versus experimental

Figura 4.11 – Espectro harmônico das tensões aplicadas nos terminais do RNS – saturação elevada.

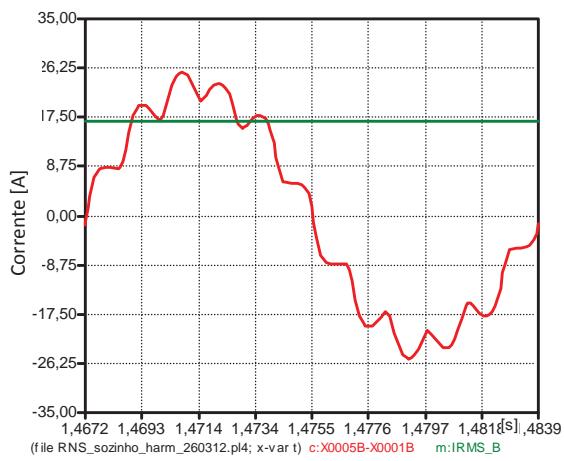
Complementarmente, as Figuras 4.12 ilustram as formas de onda das correntes trifásicas absorvidas pelo equipamento para a condição de saturação elevada. Quanto as defasagens de 120° entre as grandezas, estas, como anteriormente, não foram indicadas, muito embora as mesmas existam.



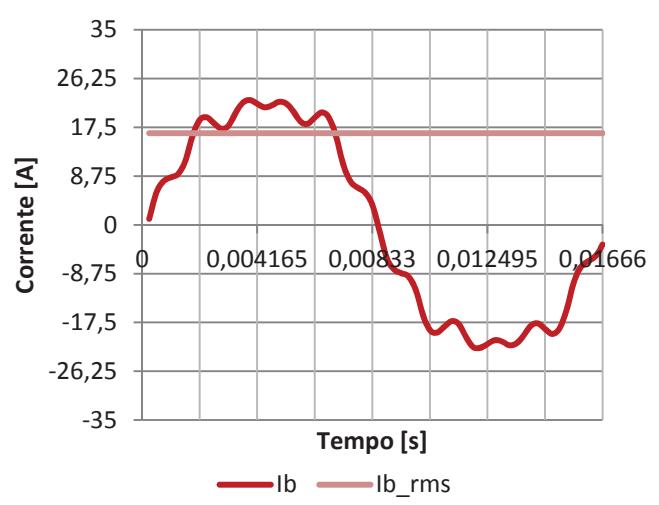
(a) Corrente de linha a – Computacional



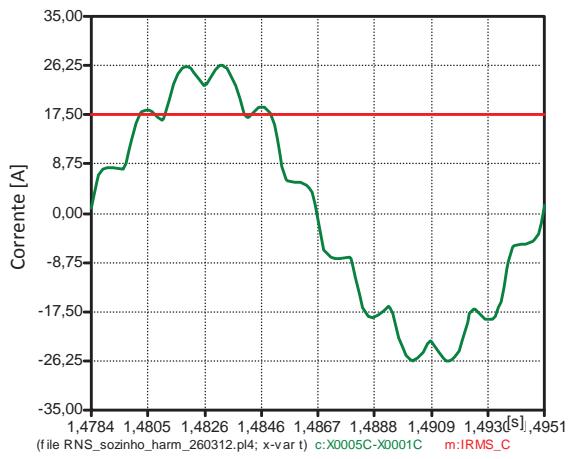
(b) Corrente de linha a – Experimental



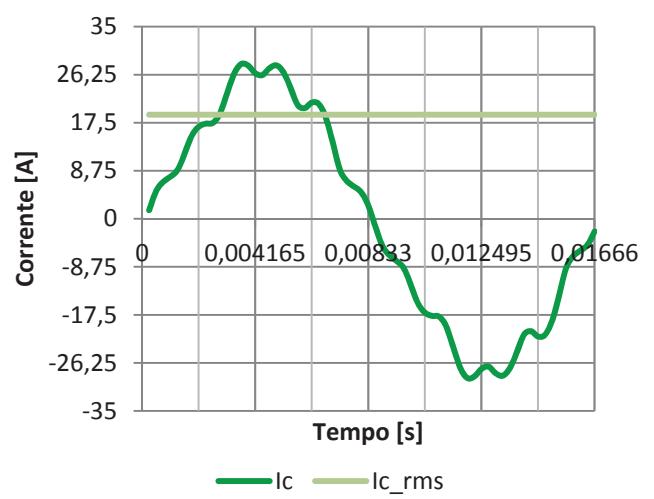
(c) Corrente de linha b – Computacional



(d) Corrente de linha b – Experimental



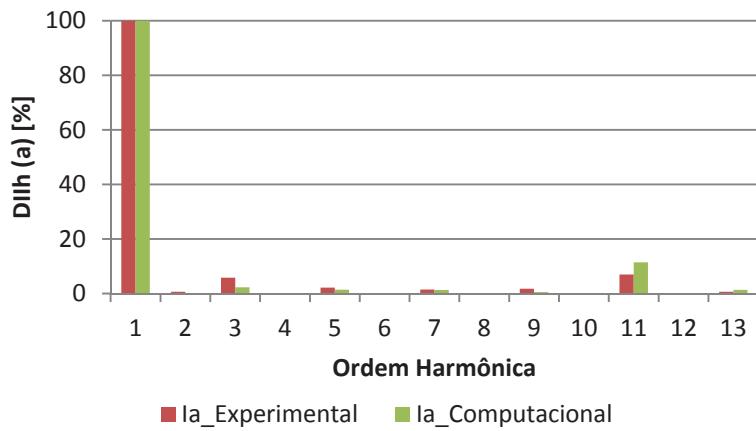
(e) Corrente de linha c – Computacional



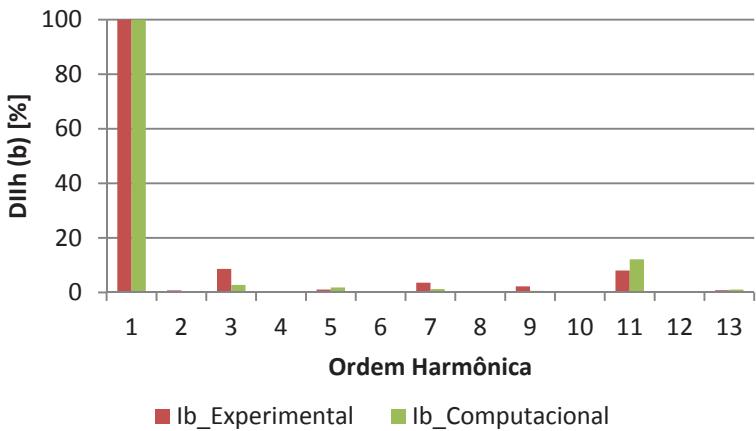
(f) Corrente de linha c – Experimental

Figura 4.12 – Formas de onda individuais das correntes solicitadas pelo RNS – saturação elevada.

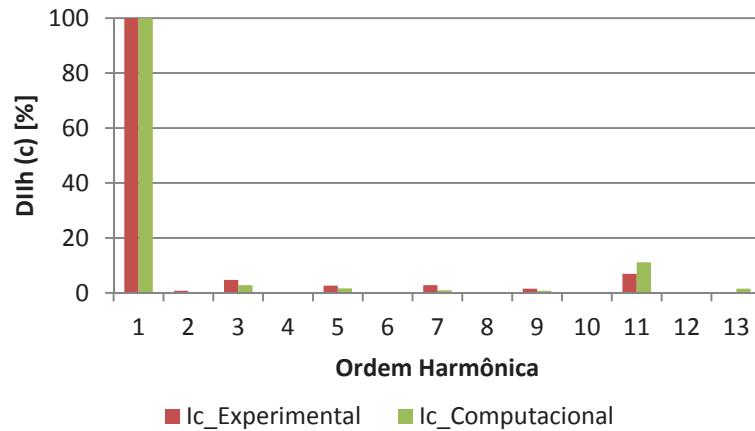
Os respectivos espectros harmônicos de corrente para as formas de onda obtidas computacionalmente e experimentalmente são apresentados na Figura 4.13. Muito embora apenas as ordens definidas pela relação  $12k \pm 1$  fossem esperadas, é importante reconhecer que tal condição somente ocorreria se a tensão de suprimento se apresentasse totalmente senoidal. Como esta condição frequentemente não ocorre, isto se apresenta como um primeiro motivo para o não cancelamento das demais ordens ímpares presentes nos espectros de frequência. Somado a isto, há ainda a se considerar que o pleno cancelamento somente ocorrerá com uma construção física dos núcleos de forma tal que as colunas que compõem o arranjo trifásico sejam absolutamente iguais. Tendo em vista a montagem empregada, na forma de um núcleo trifásico de três colunas, é evidente que tal propriedade não é obedecida.



(a) Espectro harmônico –  $I_a$  – Comparação computacional versus experimental



(b) Espectro harmônico –  $I_b$  – Comparação computacional versus experimental



(c) Espectro harmônico –  $I_c$  – Comparação computacional versus experimental

Figura 4.13 – Espectro harmônico das correntes solicitadas pelo RNS – saturação elevada.

No que se refere às distorções harmônicas totais de tensão e corrente, os resultados computacionais e experimentais são apresentados nas Figuras 4.14 e 4.15.

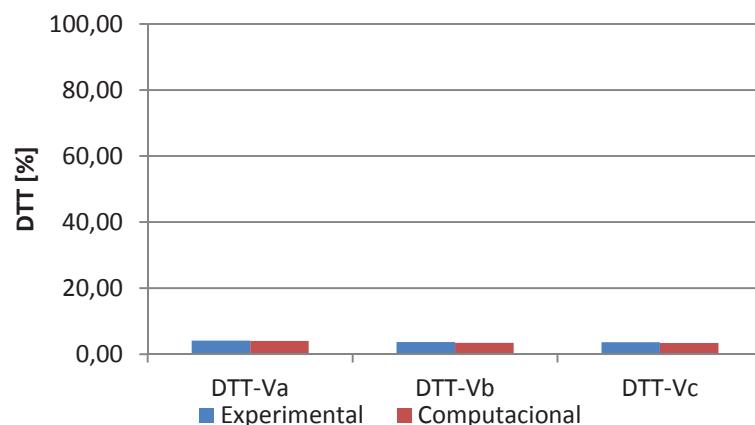


Figura 4.14 – Distorção total de tensão – computacional versus experimental – saturação elevada.

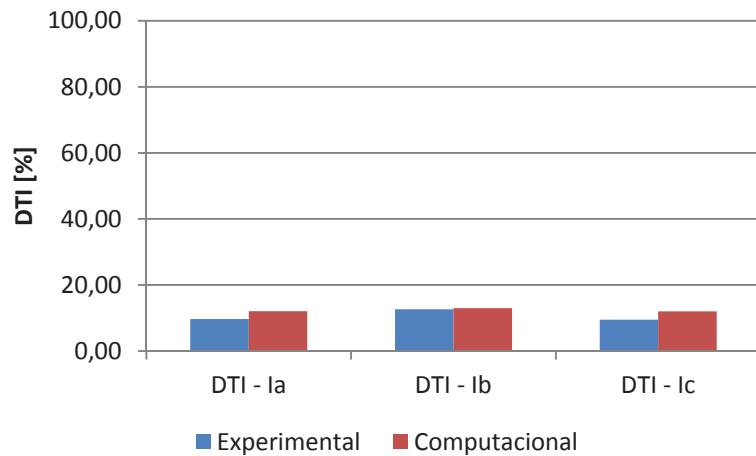


Figura 4.15 – Distorção total de corrente – computacional versus experimental – saturação elevada.

A Tabela 4.4 apresenta um resumo comparativo dos principais resultados obtidos tanto para os estudos computacionais e experimentais vinculados com o funcionamento do reator sob saturação elevada. Mais uma vez, pode-se observar uma boa correlação entre os valores obtidos, inclusive para as distorções harmônicas.

Tabela 4.4 – Síntese dos resultados – saturação elevada – protótipo de reator a núcleo saturado twin-tripler – 7 kVar.

Grandezas Avaliadas	Experimental	Computacional
Va	128,2 V	128,2 V
Vb	127,3 V	127,2 V
Vc	128,0 V	128,0 V
Ia	18,6 A	17,7 A
Ib	16,4 A	16,9 A
Ic	19,0 A	17,6 A
DTT – Va	4,1 %	4,0 %
DTT – Vb	3,7 %	3,4 %
DTT – Vc	3,6 %	3,7 %
DTI – Ia	9,7 %	12,0 %
DTI – Ib	12,6 %	13,0 %
DTI – Ic	9,5 %	12,0 %

### 4.3 VALIDAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL DO COMPENSADOR DE REATIVOS

Uma vez avaliado o desempenho do reator saturado operando isoladamente, a presente seção é dedicada à análise do desempenho do referido equipamento operando conjuntamente com um banco de capacitores, perfazendo, assim, o conhecido compensador estático a núcleo saturado.

Para os fins aqui almejados, diferentemente do arranjo simplificado empregado para os estudos da correlação entre o funcionamento de um reator saturado operando isoladamente, para os estudos em pauta faz-se necessário o emprego de uma estrutura mais completa, a qual se apresenta com a constituição indicada na Figura 4.16 e comprehende: uma fonte de alimentação programável, uma impedância auxiliar em série, dois conjuntos de cargas do tipo impedância constante e, por fim, o compensador a núcleo saturado composto pelas unidades indutiva e capacitativa.

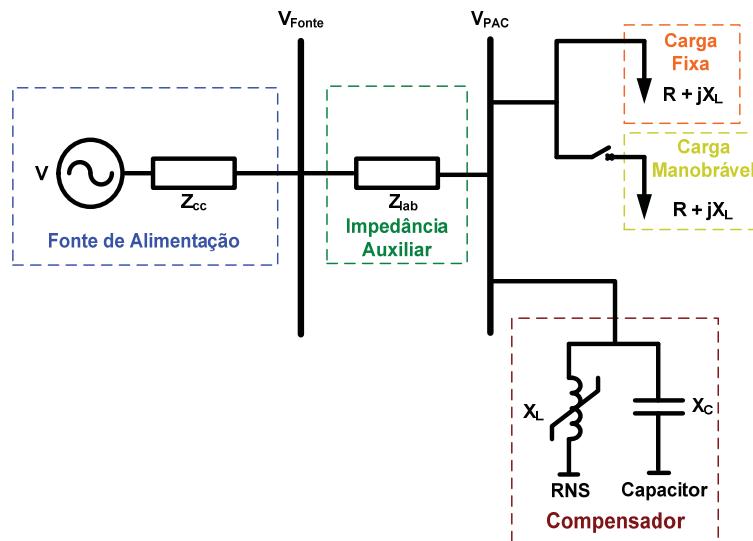


Figura 4.16 – Diagrama unifilar do arranjo elétrico utilizado nos ensaios computacional e experimental do compensador a núcleo saturado.

A Figura 4.17 mostra o arranjo físico montado para os fins avaliativos aqui contemplados e maiores detalhes sobre os componentes constituintes da estrutura podem ser identificados na Figura 4.18.

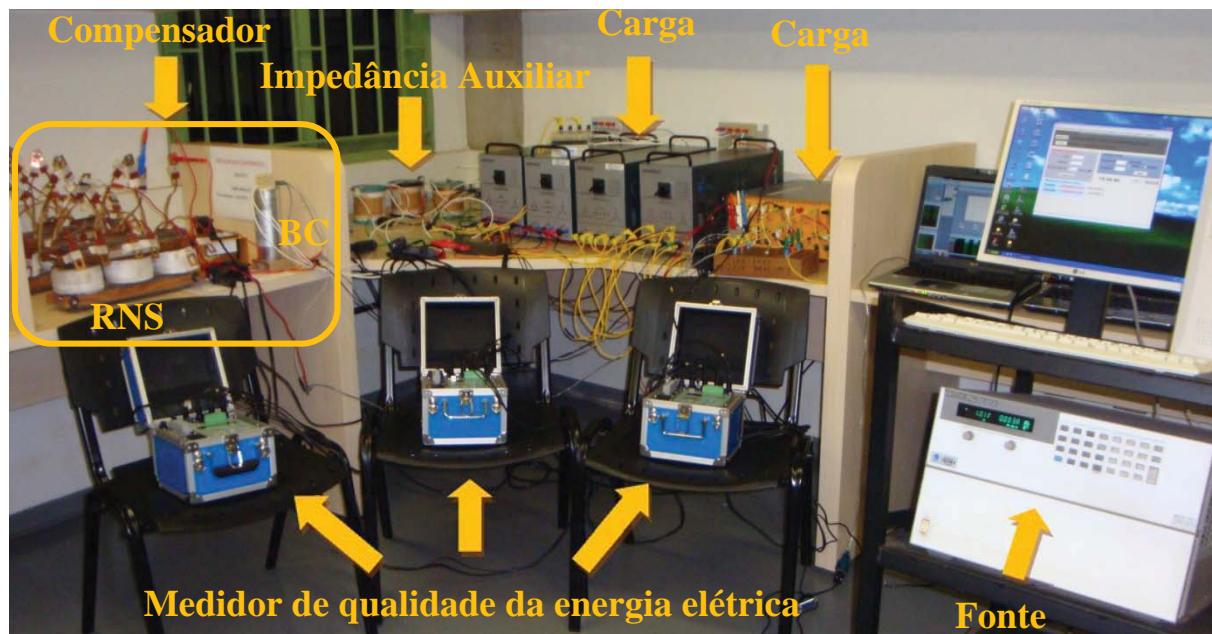
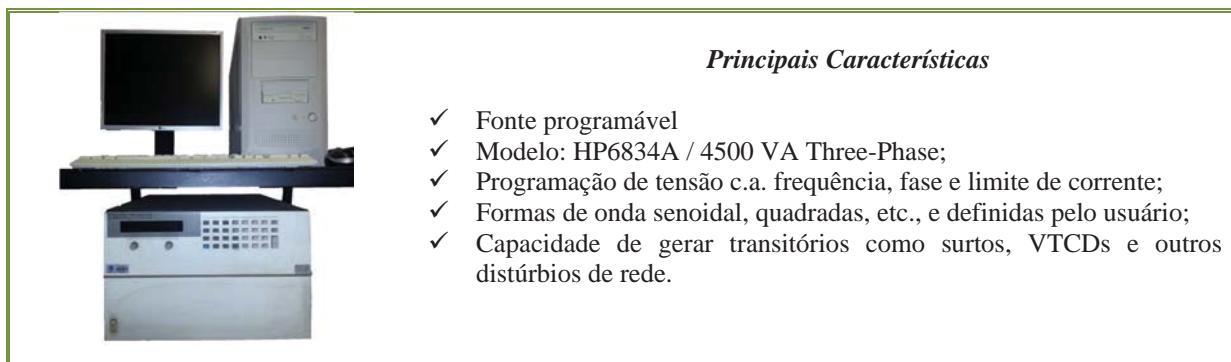
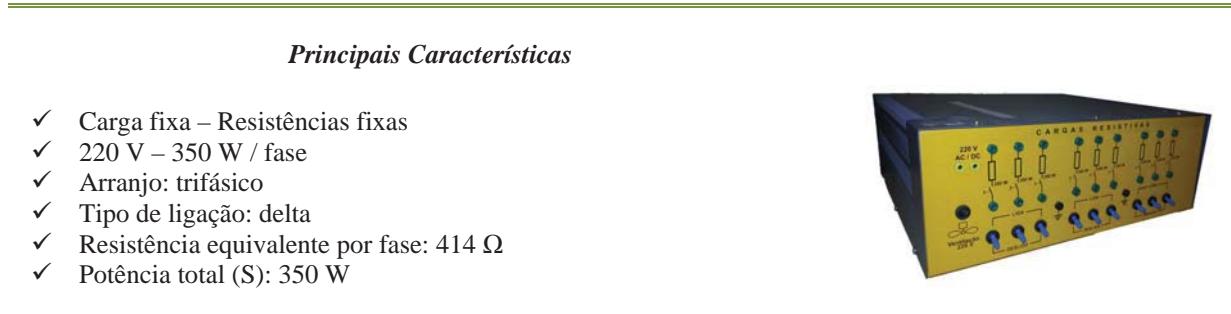


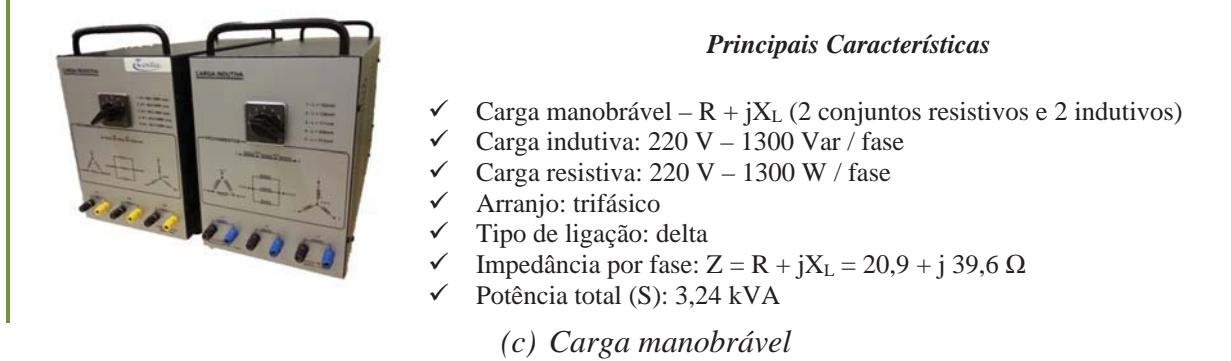
Figura 4.17 – Estrutura laboratorial utilizada.



(a) Fonte de alimentação



(b) Carga fixa



(c) Carga manobrável

*Principais Características*

- ✓ Impedância auxiliar inserida no laboratório ( $Z_{lab}$ )
- ✓ Indutor enrolado artesanalmente
- ✓ Indutância de 11,3 mH
- ✓ 3 unidades monofásicas (1 unidade/fase)



(d) Impedância auxiliar

*Principais Características*



- ✓ Reator a Núcleo Saturado - RNS
- ✓ 220 V – 7 kVAr
- ✓ Arranjo: trifásico (*twin-tripler*)
- ✓ Tipo de ligação: estrela não aterrado
- ✓ Conexões: zig-zag

(e) Reator a núcleo saturado

*Principais Características*

- ✓ Capacitor EPCOS
- ✓  $V_N$ : 220 V
- ✓  $Q_N$ : 5 kVAr
- ✓ Arranjo: trifásico
- ✓ Tipo de ligação: delta



(f) Capacitor

*Principais Características*



- ✓ Registrador Marh 21
- ✓ Memória de 4Mb
- ✓ Tensão alimentação: CA 70 a 600V
- ✓ Frequência: 50Hz ou 60Hz
- ✓ Exatidão: Classe 0,5 para tensões e correntes e classe 1 para potências
- ✓ Avaliação de perturbações na rede elétrica (conteúdo harmônico de tensão e corrente, variações momentâneas de tensão, “sag”, “swell”, etc)

(g) Medidor de qualidade da energia elétrica

Figura 4.18 – Principais características dos componentes do arranjo laboratorial.

O compensador a núcleo saturado utilizado neste caso em questão é o mesmo anteriormente empregado.

No que se refere ao processo avaliativo, a estratégia utilizada foi a da realização da seguinte sequência operativa para o circuito estabelecido, quer em no ambiente laboratorial e para os estudos computacionais:

- **Intervalo 1:** Inicialmente foi imposta uma situação operativa tal que o sistema se encontra sob carregamento pleno, devendo-se destacar, para esta condição e as demais, a presença do CERNS;
- **Intervalo 2:** Na sequência, procede-se uma rejeição de parte do carregamento, fato este representado pela desconexão de 85% da carga associada com o caso anterior;
- **Intervalo 3:** Por fim, é feita a reinserção da carga retirada, fato este que restabelece as condições iniciais adotadas.

#### **4.3.1 Avaliação de desempenho do compensador para os Intervalos 1 e 3**

Para esta primeira investigação, a qual, como dito, encontra-se vinculada com o denominado carregamento pleno e sob uma tensão de barramento dentro dos padrões esperados, buscou-se verificar o desempenho do CERNS. Como seria esperado, para tal condição operativa é desejável que o consumo de reativos do reator deve ser o menor, visto o mesmo funcionar sob os menores níveis de saturação.

Na Figura 4.19 pode-se visualizar as formas de onda das tensões medidas nas fases A, B e C do barramento de conexão do CERNS, tanto para os estudos computacionais quanto nos ensaios experimentais. Os respectivos espectros harmônicos das tensões podem ser observados através da Figura 4.20.

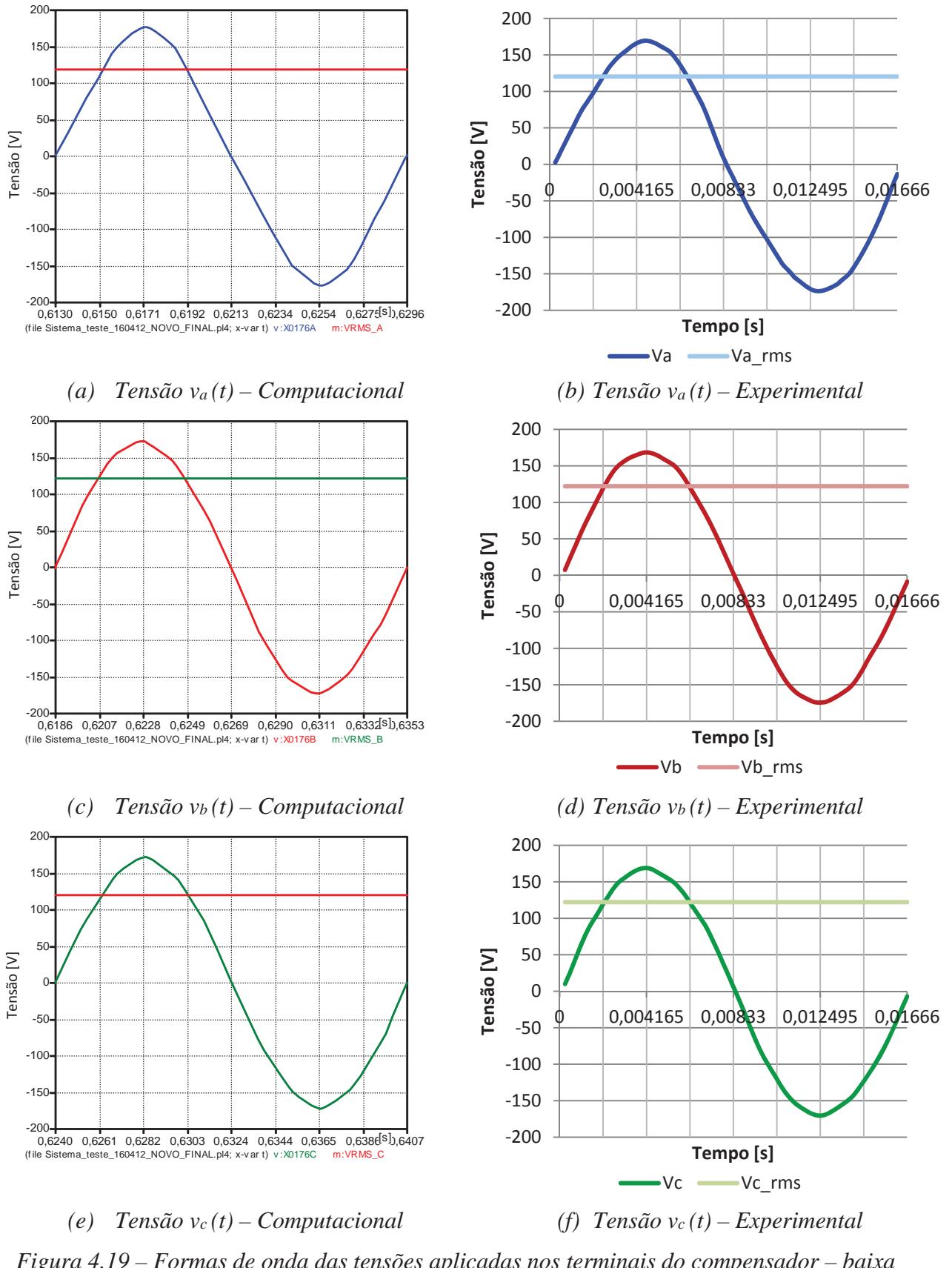
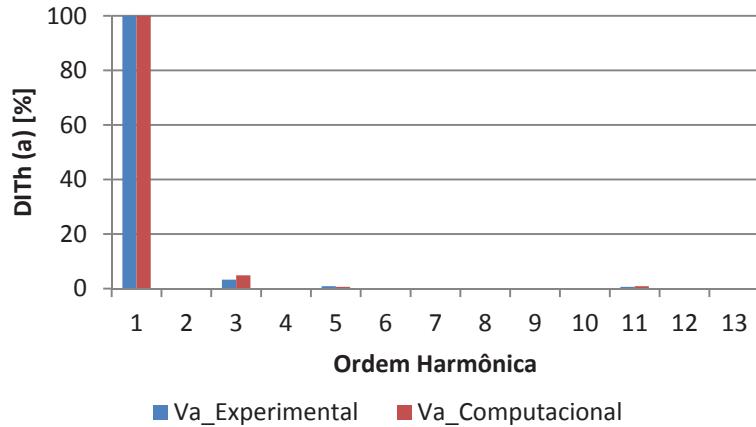
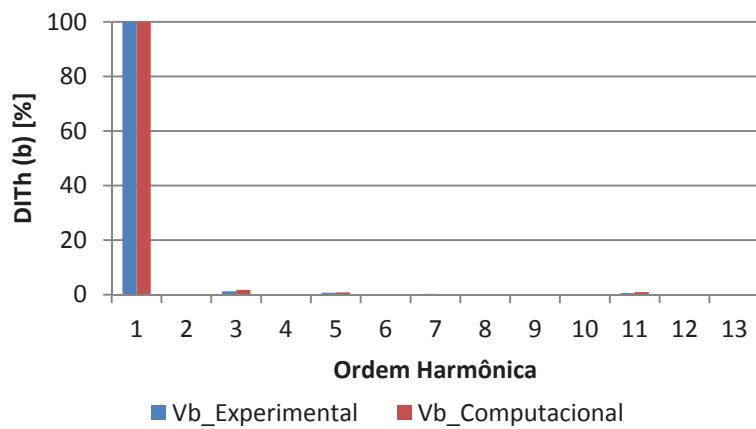


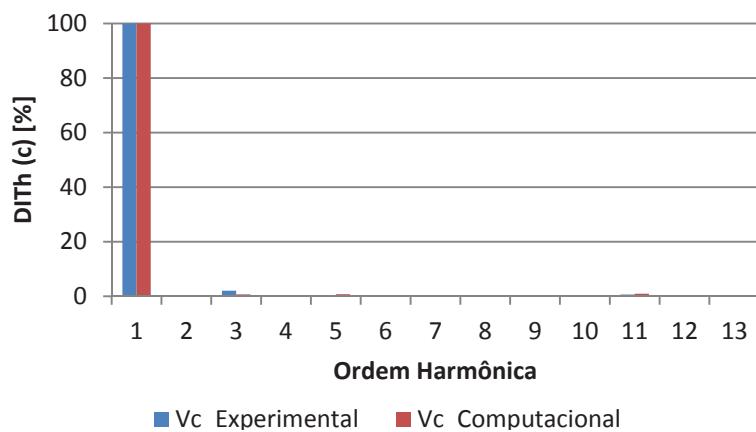
Figura 4.19 – Formas de onda das tensões aplicadas nos terminais do compensador – baixa saturação.



(a) Espectro harmônico –  $V_a$  – Comparação computacional versus experimental



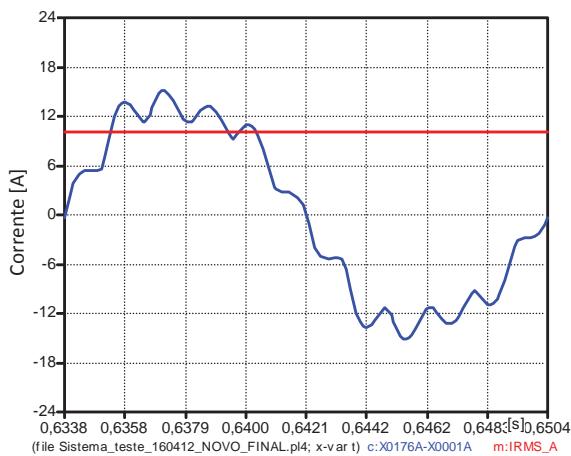
(b) Espectro harmônico –  $V_b$  – Comparação computacional versus experimental



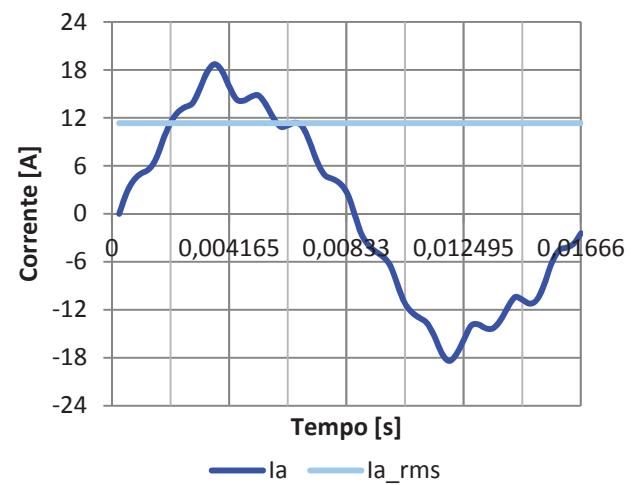
(c) Espectro harmônico –  $V_c$  – Comparação computacional versus experimental

Figura 4.20 – Espectro harmônico das tensões aplicadas nos terminais do compensador – baixa saturação.

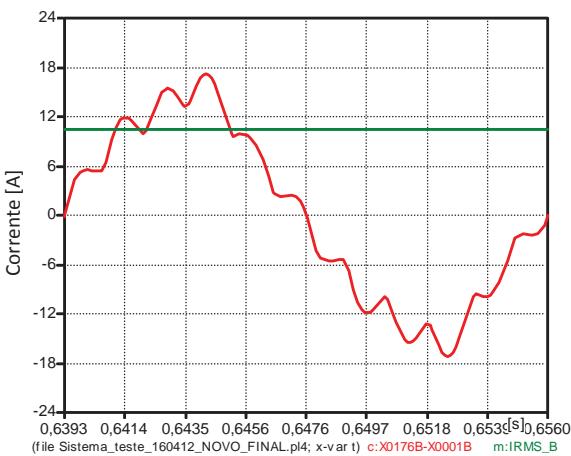
As respectivas formas de onda das correntes solicitadas pelo elemento indutivo do compensador, tanto para os estudos computacionais quanto para os ensaios experimentais, podem ser visualizadas através da Figura 4.21. Deve-se destacar que, embora o CERNS seja composto pelo arranjo paralelo entre o RNS e o banco de capacitores, o elemento indutivo corresponde à parte dinâmica do arranjo, fato este que confere ao dispositivo a capacidade de regulação das tensões. Por esta razão, no que tange às correntes, optou-se pela avaliação apenas da corrente do RNS. No que tange aos defasamentos angulares entre as formas de onda trifásicas, em consonância com as figuras anteriores, estes não foram contemplados.



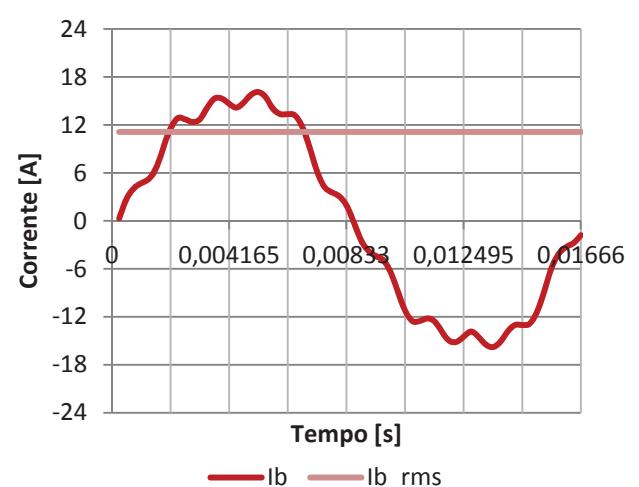
(a) Corrente de linha a – Computacional



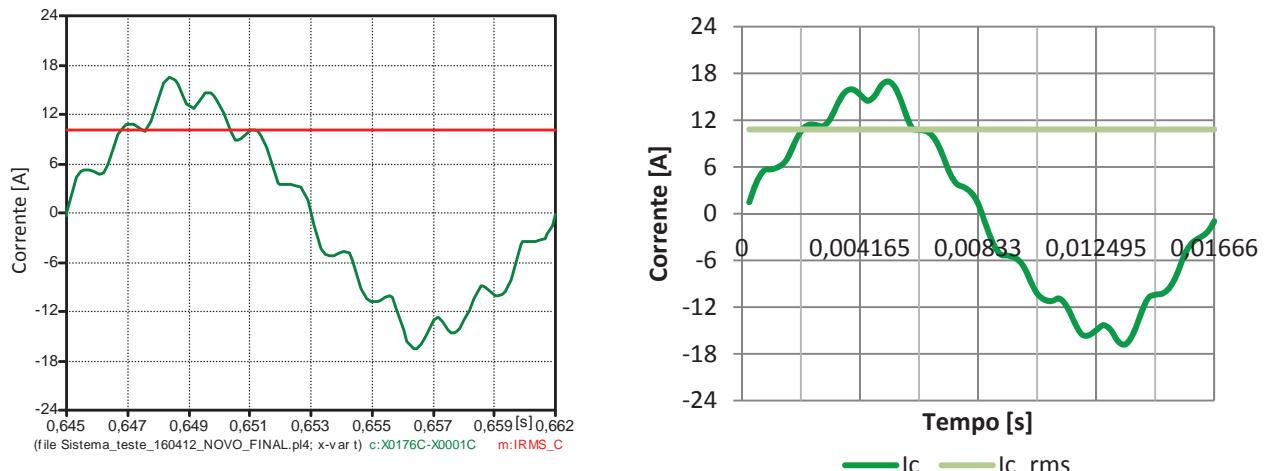
(b) Corrente de linha a – Experimental



(c) Corrente de linha b – Computacional



(d) Corrente de linha b – Experimental

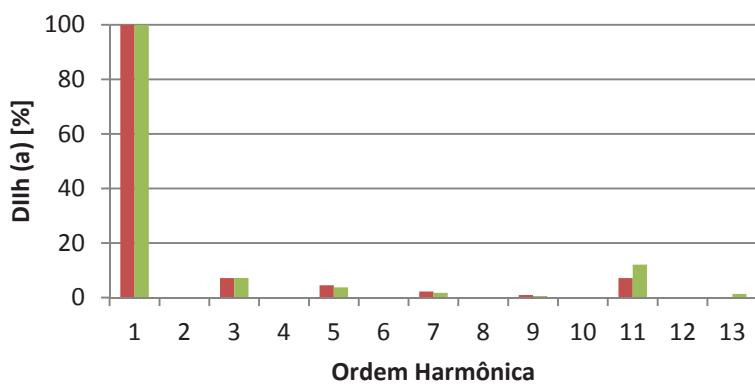


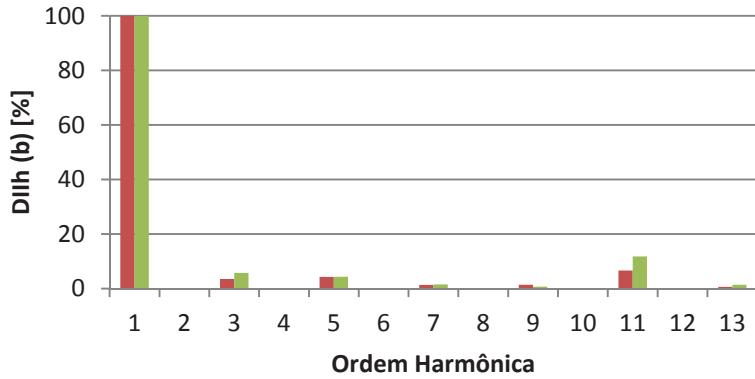
(e) Corrente de linha c – Computacional

(f) Corrente de linha c – Experimental

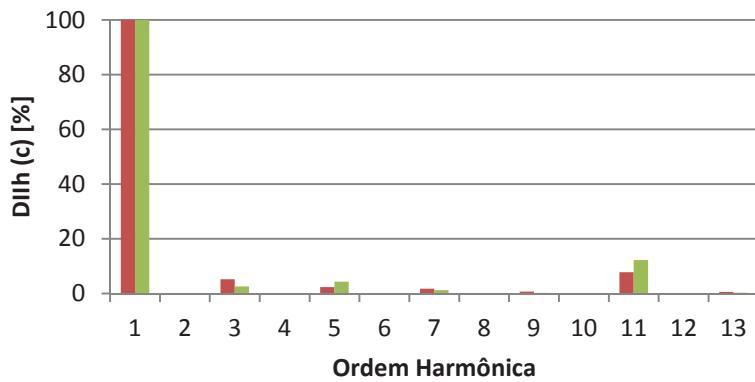
Figura 4.21 – Formas de onda individuais das correntes solicitadas pelo RNS – baixa saturação.

A Figura 4.22 apresenta uma comparação dos respectivos espectros harmônicos para as formas de onda obtidas computacionalmente e experimentalmente. Mais uma vez, a presença de componentes harmônicas outras que aquelas previstas pela expressão  $n=12k\pm 1$  se justifica pela aplicação de uma tensão não senoidal nos terminais do reator saturado, como anteriormente apontado. Por sua vez, embora as tensões fornecidas pela fonte programável sejam senoidais, o surgimento de distorções destas grandezas junto ao barramento analisado é explicado pela presença de uma impedância adicionada entre a fonte e a carga, visando, sobretudo, representar uma situação mais concretamente compatível com a realidade.


 (a) Espectro harmônico –  $I_a$  – Comparação computacional versus experimental



(b) Espectro harmônico –  $I_b$  – Comparação computacional versus experimental



(c) Espectro harmônico –  $I_c$  – Comparação computacional versus experimental

Figura 4.22 – Espectro harmônico das correntes solicitadas pelo RNS – baixa saturação.

As Figuras 4.23 e 4.24 apresentam os resultados computacionais e experimentais para as distorções totais de tensão e corrente.

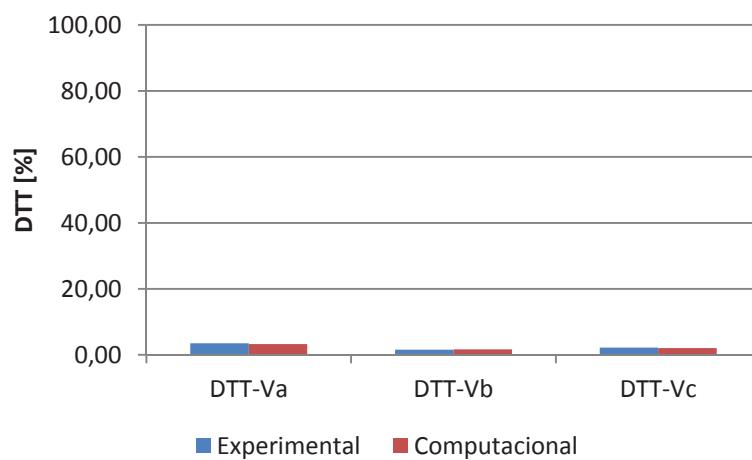
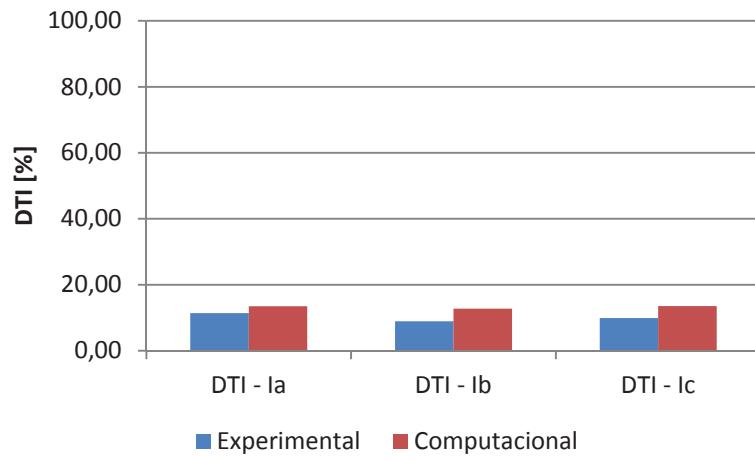


Figura 4.23 – Distorção harmônica total de tensão – computacional versus experimental – baixa saturação.



*Figura 4.24 – Distorção harmônica total de corrente – computacional versus experimental – baixa saturação.*

Sintetizando, a Tabela 4.5 apresenta uma comparação entre os estudos computacionais e os ensaios experimentais. De um modo geral, pode-se observar uma boa correlação entre os valores obtidos em laboratório com aqueles fornecidos pelo simulador computacional. Ao se correlacionar os valores das distorções obtidas com os níveis definidos pelo PRODIST fica evidenciada uma adequação aos padrões exigidos, muito embora esta orientação não tenha por propósito regulamentar a questão num ambiente laboratorial, ainda mais em se tratando de uma montagem em escala reduzida.

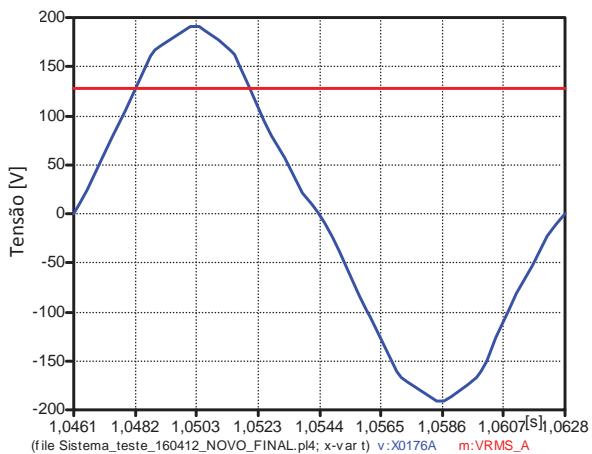
*Tabela 4.5 – Síntese dos resultados obtidos pelo elemento indutivo do compensador – baixa saturação.*

Grandezas Avaliadas	Experimental	Computacional
V <sub>a</sub>	120,3 V	119,6 V
V <sub>b</sub>	122,1 V	120,6 V
V <sub>c</sub>	120,6 V	119,3 V
I <sub>a</sub>	11,3 A	14,6 A
I <sub>b</sub>	11,1 A	13,7 A
I <sub>c</sub>	10,8 A	13,4 A
DTT – V <sub>a</sub>	3,5 %	3,3 %
DTT – V <sub>b</sub>	1,6 %	1,7 %
DTT – V <sub>c</sub>	2,2 %	2,1 %
DTI – I <sub>a</sub>	11,4 %	13,5 %
DTI – I <sub>b</sub>	8,9 %	12,8 %
DTI – I <sub>c</sub>	9,9 %	13,6 %

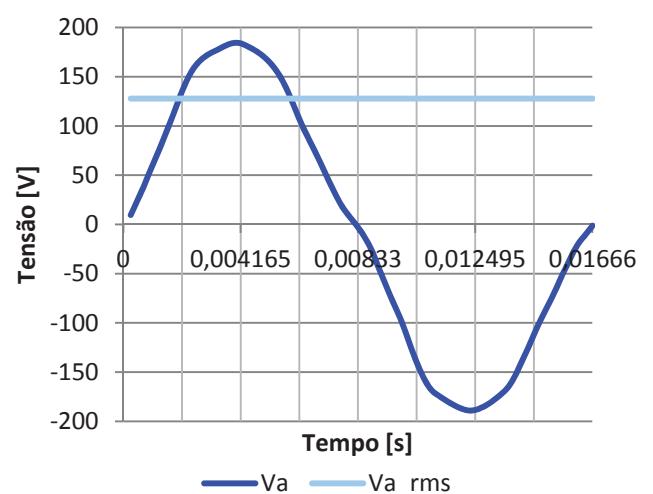
### 4.3.2 Avaliação de desempenho do compensador a núcleo saturado para o intervalo 2

Uma vez realizada a rejeição de 85% da carga e, diante da tendência de um correspondente aumento da tensão (caso o compensador não se fizesse presente), a ação praticamente imediata do dispositivo regulador é de conduzir o reator a um novo estado de saturação (mais elevado) objetivando, sobretudo, a restauração da tensão aos níveis admissíveis.

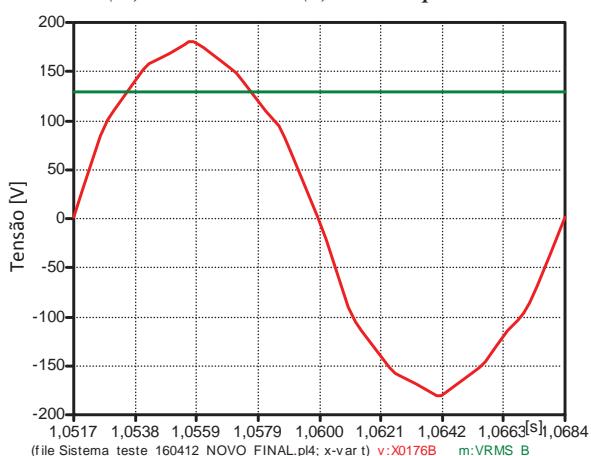
Neste sentido, a Figura 4.25 apresenta as respectivas formas de onda das tensões verificadas no barramento de conexão do compensador para as investigações computacionais e experimentais.



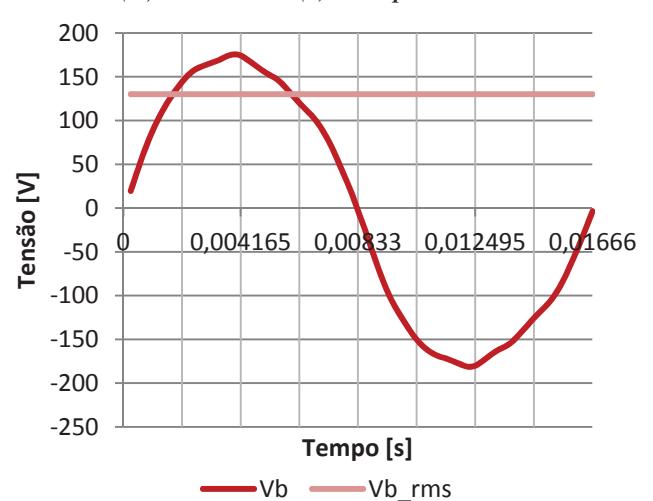
(a) Tensão  $v_a(t)$  – Computacional



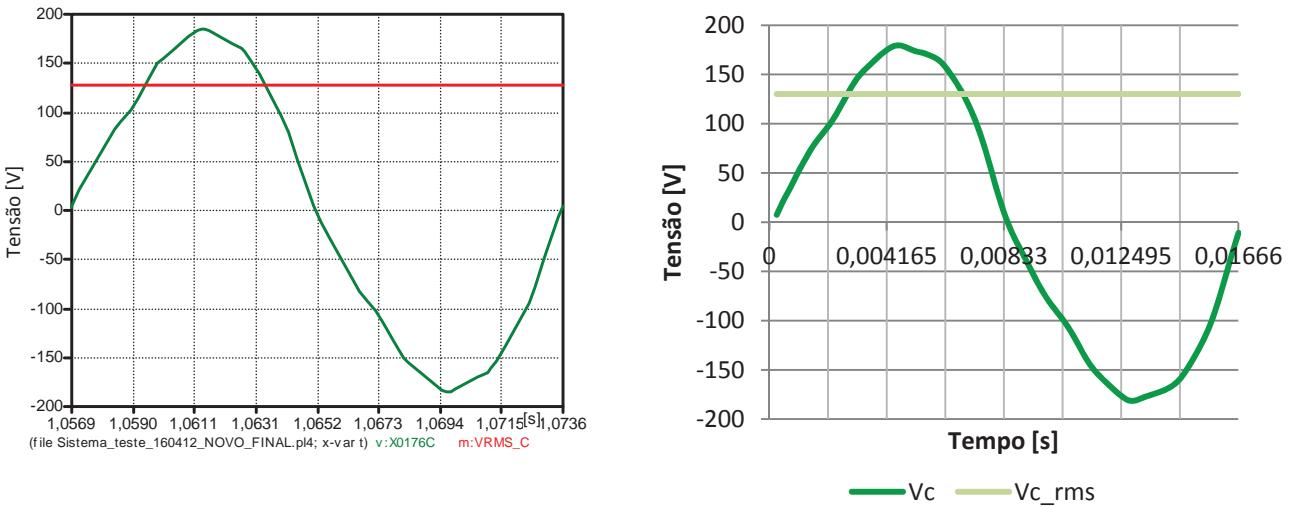
(b) Tensão  $v_a(t)$  – Experimental



(c) Tensão  $v_b(t)$  – Computacional



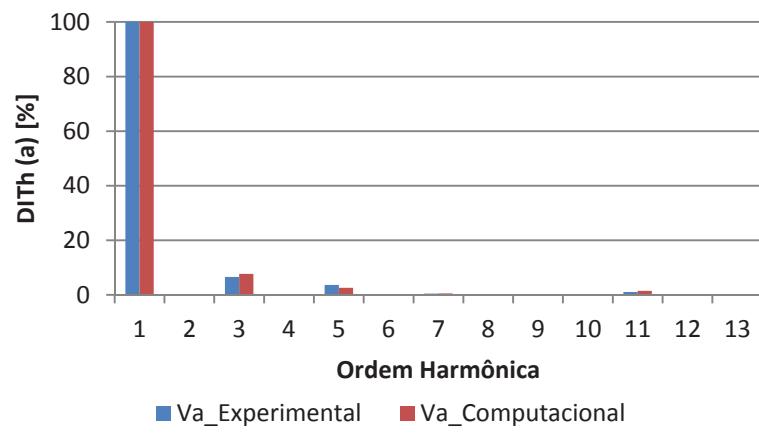
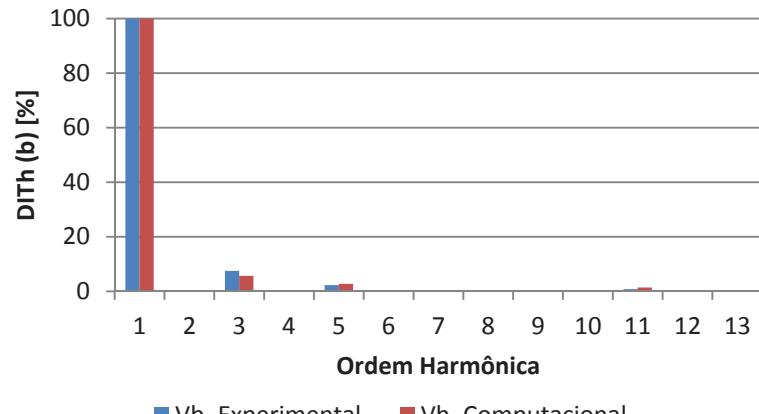
(d) Tensão  $v_b(t)$  – Experimental

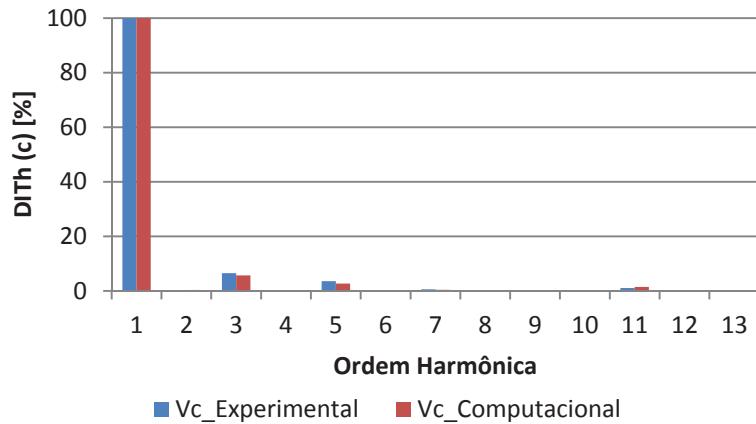

 (e) Tensão  $v_c(t)$  – Computacional

 (f) Tensão  $v_c(t)$  – Experimental

Figura 4.25 – Formas de onda das tensões aplicadas nos terminais do compensador – saturação elevada.

Os correspondentes espectros harmônicos para as tensões podem ser observados na Figura 4.26.

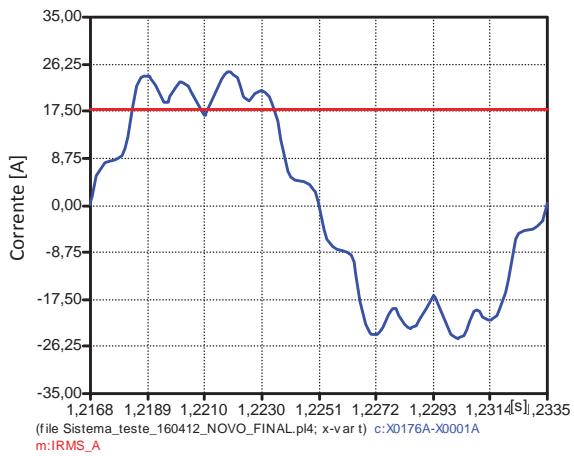

 (a) Espectro harmônico –  $V_a$  – Comparação computacional versus experimental

 (b) Espectro harmônico –  $V_b$  – Comparação computacional versus experimental



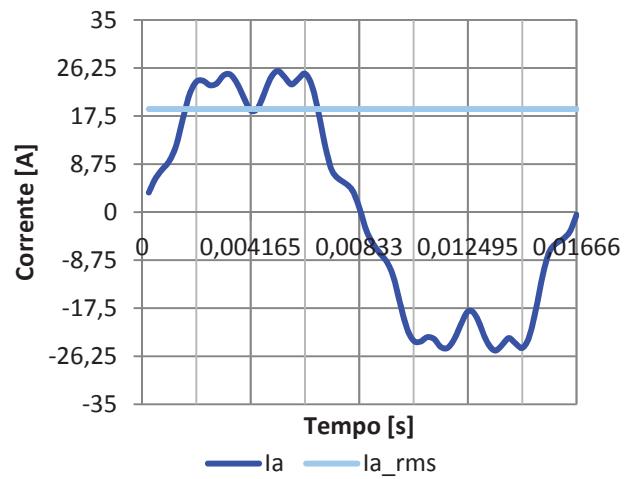
(c) Espectro harmônico –  $V_c$  – Comparação computacional versus experimental

Figura 4.26 – Espectro harmônico das tensões aplicadas nos terminais do compensador – saturação elevada.

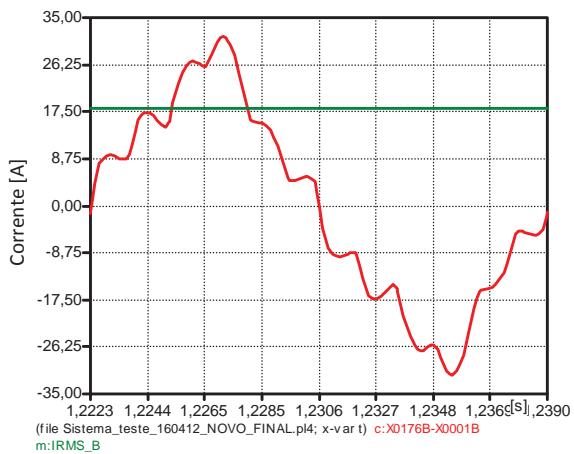
A Figura 4.27 apresenta as formas de onda das correntes experimentais e computacionais solicitadas pelo reator sob condição de saturação elevada.



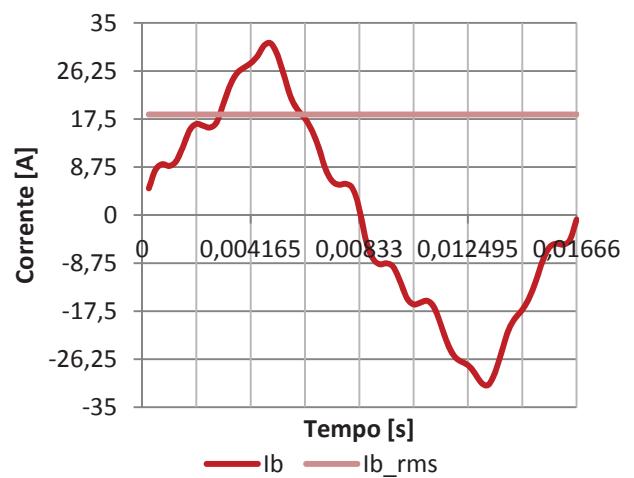
(a) Corrente de linha a – Computacional



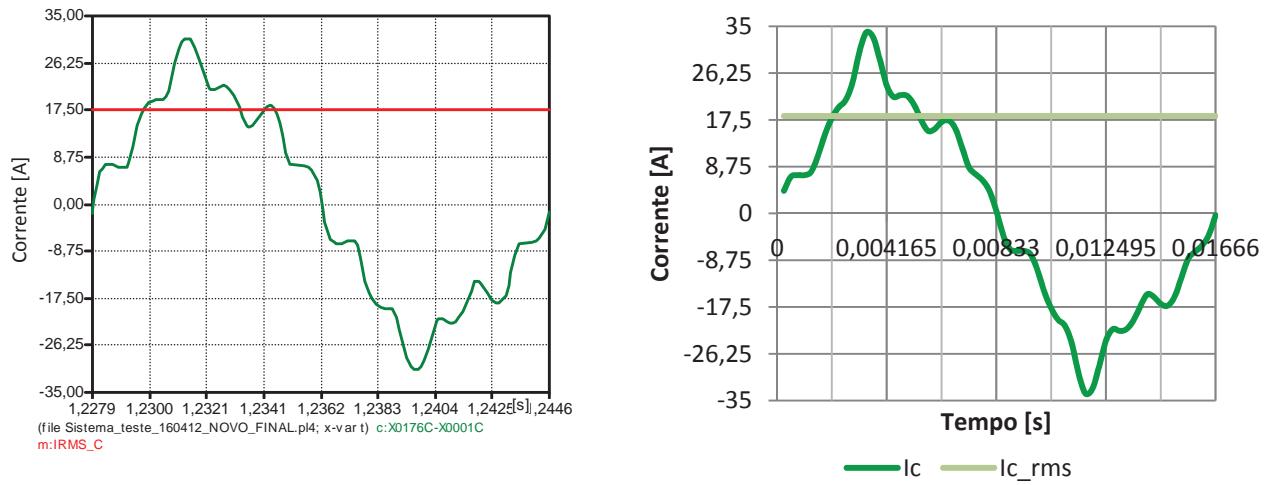
(b) Corrente de linha a – Experimental



(c) Corrente de linha b – Computacional



(d) Corrente de linha b – Experimental

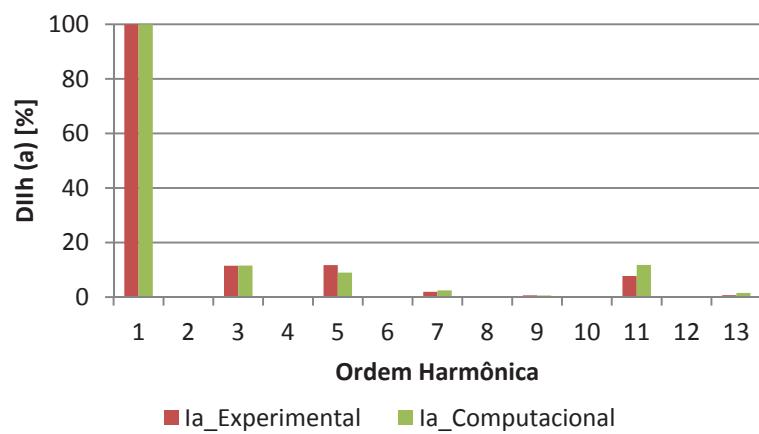


(e) Corrente de linha c – Computacional

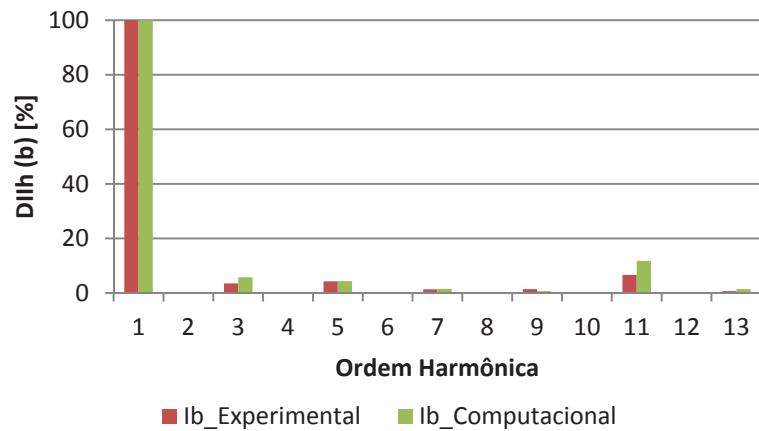
(f) Corrente de linha c – Experimental

Figura 4.27 – Formas de onda individuais das correntes solicitadas pelo RNS – saturação elevada.

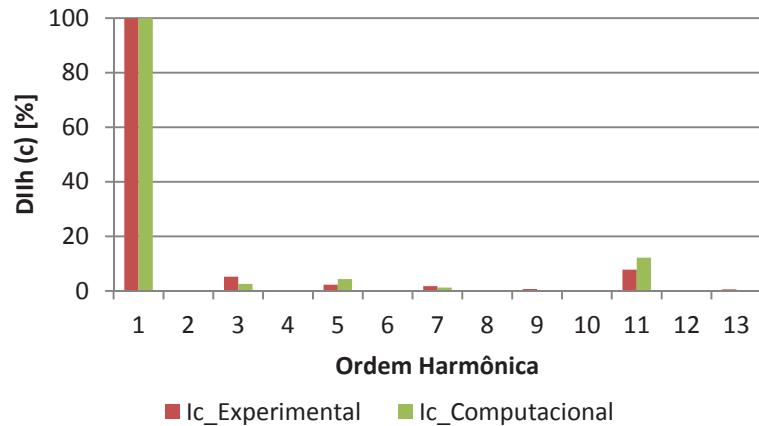
Os respectivos espectros harmônicos das correntes solicitadas pelo RNS podem ser constatados na Figura 4.28.



(a) Espectro harmônico –  $I_a$  – Comparação computacional versus experimental



(b) Espectro harmônico –  $I_b$  – Comparação computacional versus experimental



(c) Espectro harmônico –  $I_c$  – Comparação computacional versus experimental

Figura 4.28 – Espectro harmônico das correntes solicitadas pelo RNS – saturação elevada.

As Figuras 4.29 e 4.30 ilustram, comparativamente, as distorções harmônicas totais de tensão e corrente, advindas das avaliações computacionais e experimentais.

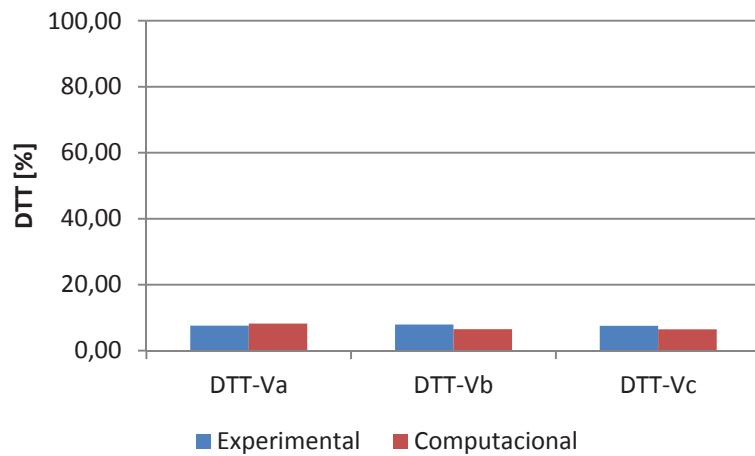


Figura 4.29 – Distorção harmônica total de tensão – computacional versus experimental – saturação elevada.

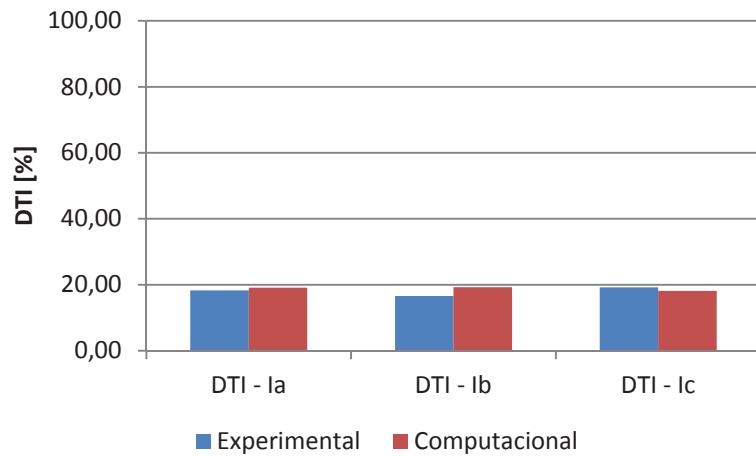


Figura 4.30 – Distorção harmônica total de corrente – computacional versus experimental – saturação elevada.

A Tabela 4.6 sintetiza os principais resultados obtidos para o presente caso e, mais uma vez, pode-se observar que os mesmos revelam uma concordância aceitável entre as correspondentes grandezas. No que tange aos valores obtidos diante da legislação aplicável, valem as mesmas observações já feitas para o caso anterior.

Tabela 4.6 – Síntese dos resultados obtidos pelo elemento indutivo do compensador – saturação elevada.

Grandezas Avaliadas	Experimental	Computacional
V <sub>a</sub>	127,8 V	127,6 V
V <sub>b</sub>	130,1 V	128,7 V
V <sub>c</sub>	128,2 V	128,2 V
I <sub>a</sub>	18,8 A	17,7 A
I <sub>b</sub>	18,3 A	18,0 A
I <sub>c</sub>	18,2 A	17,7 A
DTT – V <sub>a</sub>	7,6 %	8,2 %
DTT – V <sub>b</sub>	7,9 %	6,5 %
DTT – V <sub>c</sub>	7,5 %	6,5 %
DTI – I <sub>a</sub>	18,3 %	19,1 %
DTI – I <sub>b</sub>	16,6 %	19,3 %
DTI – I <sub>c</sub>	19,2 %	18,1 %

#### **4.4 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO MODELO QUANTO À CORRELAÇÃO ENTRE A POTÊNCIA REATIVA E A TENSÃO**

Uma vez constatado que os desempenhos do modelo computacional, tanto no que se refere às formas de onda quanto aos valores envolvidos no processo da regulação, se apresentam em proporções condizentes, procede-se, nesta seção, a um processo avaliativo complementar.

Desta feita, a meta consiste em obter, para distintos protótipos de reatores, os quais serão identificados na sequência, o comportamento da relação ou da interdependência entre as suas potências reativas consumidas em função da tensão do barramento de conexão. Em vista do fato que os estudos aqui feitos contemplam dispositivos em escala comercial e que não se dispõe de informações tão detalhadas sobre formas de onda, desempenho da saturação com as variações da tensão imposta, dentre outras, apenas a relação  $Q=f(V)$  foi disponibilizada para o estabelecimento de termos comparativos, experimental e computacional, para os reatores em pauta.

É importante destacar que tais estudos, envolvendo não apenas o protótipo laboratorial empregado para as investigações anteriores, somente foi possível diante do fato que outros reatores, em escala real, foram produzidos pelo grupo de pesquisas da UFU, e ainda, que tais produtos foram devidamente ensaiados em campo quanto à relação entre as suas potências reativas absorvidas em função de tensões de suprimento, propositalmente e controladamente variadas em instalações que tornaram factíveis tais testes.

Os reatores aqui utilizados se apresentam como resultados de projetos de P&D firmados entre a UFU e as concessionárias CEMAT e CEB, os quais resultaram nos seguintes produtos:

- RNS de 7 kVAr/220V – fabricado pela TRAEL – Cuiabá - MT;
- RNS de 586 kVAr/13,8 kV – fabricado pela TRAEL – Cuiabá - MT;
- RNS de 3 MVAr/34,5 kV – fabricado pela DENSITEL – Osasco -SP.

A Figura 4.31 apresenta um diagrama unifilar com uma estrutura topológica genérica e compatível com as situações estabelecidas para os testes em campo ou na fábrica, e cujos resultados foram reproduzidos através de estudos computacionais envolvendo a modelagem dos reatores utilizados e suas respectivas condições operacionais.

Neste, observa-se uma fonte de tensão que supre um dispositivo para variações de tensão e, por fim, o equipamento sob teste.

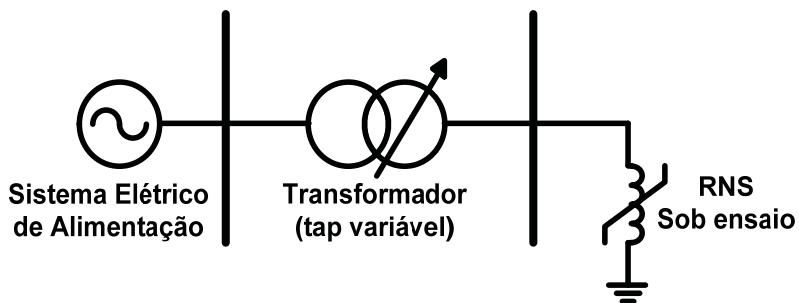


Figura 4.31 – Arranjo elétrico para os ensaios computacionais e de campo.

#### 4.4.1 Principais características e parâmetros dos reatores saturados utilizados para os testes

A seguir são apresentadas informações relacionadas aos protótipos empregados para o processo de validação. Tendo em vista que o **RNS 7 kVar/220 V** foi alvo de trabalhos já descritos, as suas características construtivas e paramétricas não são aqui reapresentadas.

Quanto ao segundo reator estudado, este corresponde a uma unidade de **586 kVar/13,8 kV**. Seus principais parâmetros construtivos e equivalentes elétricos se encontram na Tabela 4.7.

A disponibilização de recursos atrelados com o comutador de tapes para o presente dispositivo, assim como para os demais, destina-se a adequação do mesmo ao processo de compensação de tensões de operação de forma a restaurar valores outros que não o nominal. A título de ilustração, é comum, para um sistema de 13,8 kV, definir-se que a tensão contratada seja, por exemplo, de 13,2 kV e, nestas circunstâncias a denominada tensão de 1,0 pu corresponde a este

valor e não os 13,8 kV. Nestas condições o reator seria adequado como se o mesmo fosse equipado com um sistema de regulação que permitisse um ajuste do denominado *set point* do equipamento.

*Tabela 4.7 – Protótipo de reator a núcleo saturado twin-tripler – 586 kVAr.*

Principais Características Elétricas	
Potência Nominal	586 kVAr
Classe de Tensão	13,8 kV
Tensão de Saturação Nominal	13,9 kV
Corrente Nominal	25 A
Nº Espiras Enrolamento Principal	210 espiras
Nº Espiras Enrolamento Auxiliar	77 espiras
Principais Características Físicas	
Número de Tapes	04
Peso do Reator	4.800 kg
Volume de Óleo	900 litros
Meio Isolante	Óleo Mineral
Material dos Enrolamentos	Cobre eletrolítico
Núcleo	Aço silício GO-0,27 mm
Isoladores	Porcelana
Comutador	Acionamento Externo
Material do Tanque	Aço Carbono
Pintura	Cor Cinza Claro Padrão MUNSEU N6,5

A Figura 4.32 ilustra o reator aqui referido.



*Figura 4.32 – RNS twin-tripler – 586 kVAr/13,8 kV – protótipo em escala real.*

O outro reator avaliado corresponde a uma unidade de **3 MVar/34,5 kV**, cujos principais dados encontram-se destacados na Tabela 4.8 e indicado na Figura 4.33.

*Tabela 4.8 – Protótipo de reator a núcleo saturado twin-tripler – 3 MVar.*

Principais Características Elétricas	
Potência Nominal	3 MVar
Classe de Tensão	34,5 kV
Tensão de Saturação Nominal	35,9 kV
Corrente Nominal	51 A
Nº Espiras Enrolamento Principal	253 espiras
Nº Espiras Enrolamento Auxiliar	92 espiras
Principais Características Físicas	
Número de Tapes	05
Peso do Reator	26.230 kg
Volume de Óleo	8.180 litros
Meio Isolante	Óleo Mineral Isolante-Naftênico
Material dos Enrolamentos	Fio de cobre eletrolítico
Núcleo	Aço silício
Isoladores	Porcelana
Comutador	Tipo CTRPF – 5 posições – Sem Carga
Material do Tanque	Aço Carbono
Pintura	Cor Cinza Claro Padrão MUNSEU



*Figura 4.33 – RNS twin-tripler – 3 MVar/34,5 kV – protótipo em escala real.*

#### 4.4.2 Resultados obtidos para a correlação $Q=f(V)$ – computacional versus experimental

Os testes realizados no âmbito computacional e experimental consistiram, basicamente, em avaliações da operação em regime permanente. Para tanto, foram aplicados diferentes níveis de tensão nos terminais do equipamento, conforme as disponibilidades viabilizadas em campo e avaliadas as respostas dos equipamentos quanto às respectivas potências reativas absorvidas. Deve-se destacar que os equipamentos experimentaram variações de tensão desde a região de baixa saturação até a região de saturação elevada, para a qual cada equipamento foi especificado e construído.

As Figuras 4.34, 4.35 e 4.36 ilustram as curvas de tensão *versus* potência absorvida, experimentais e computacionais, para os reatores de 7 kVAr, 586 kVAr e 3 MVAr, respectivamente. Nestas, pode-se observar uma boa correlação entre os desempenhos experimentais e computacionais dos protótipos.

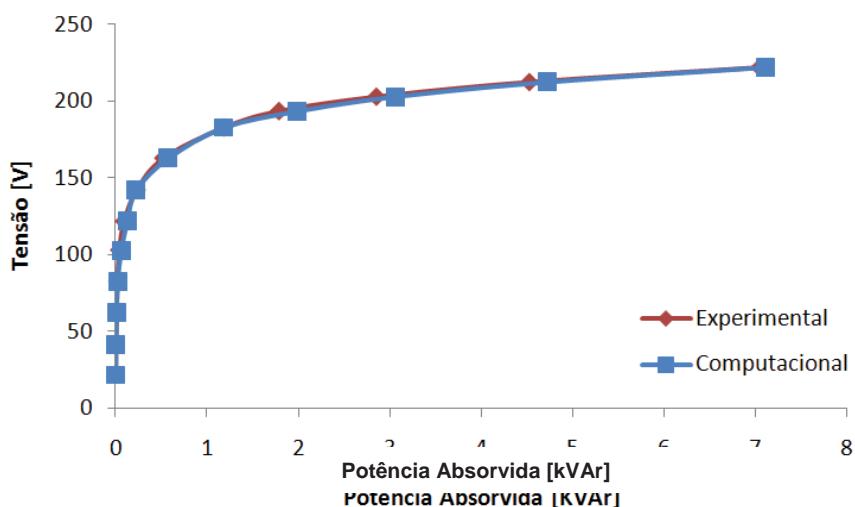


Figura 4.34– Correlação entre a tensão e a potência reativa – RNS 7 kVAr / 220 V – Resultado experimental versus computacional.

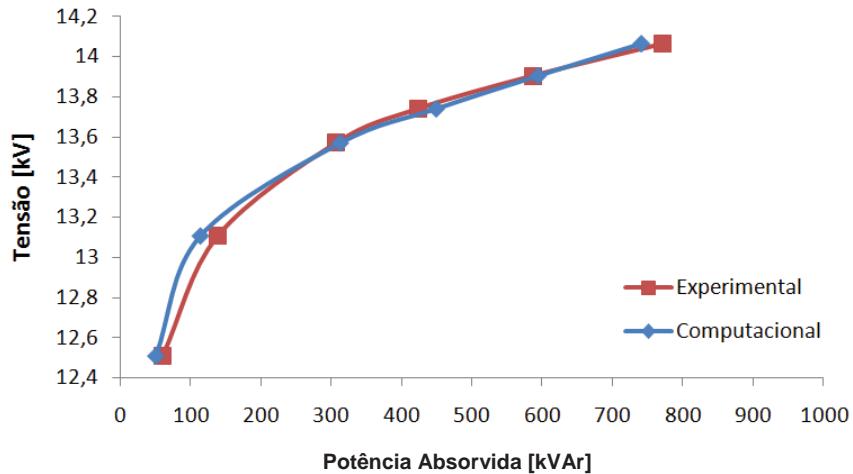


Figura 4.35 – Correlação entre a tensão e a potência reativa – RNS 586 kVAr / 13,8 kV – Resultado experimental versus computacional.

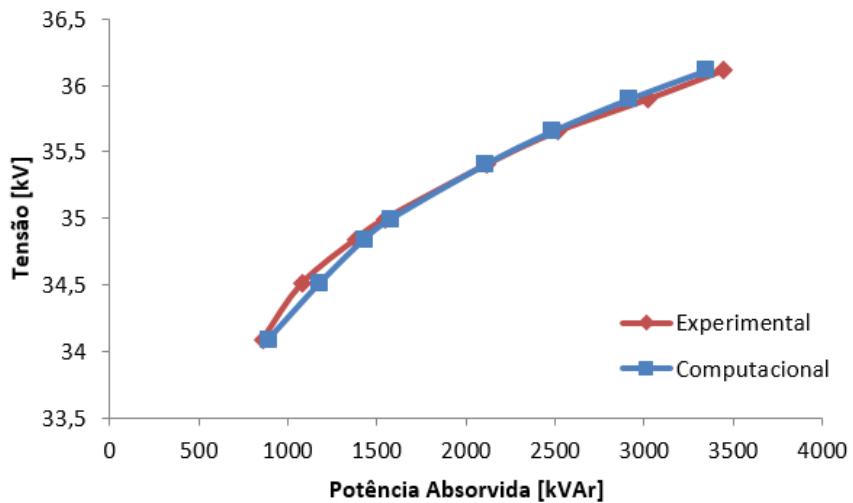


Figura 4.36 – Correlação entre a tensão e a potência reativa – RNS 3 MVA / 34,5 kV – Resultado experimental versus computacional.

## 4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo os esforços foram direcionados para a avaliação do desempenho do compensador a núcleo saturado, levando em consideração tanto a operação do reator saturado isoladamente, quanto o funcionamento do conjunto compensador em sua forma completa. Estas ações foram conduzidas com vistas a oferecer informações para o processo de validação do modelo computacional de reator e compensador a núcleo saturado.

Os resultados obtidos para a operação isolada do reator saturado, muito embora tenham sido realizados de forma mais abrangente para o protótipo em escala reduzida, indicaram através das formas de onda, valores eficazes e da correlação  $Q=f(V)$ , desempenhos condizentes com o esperado.

As formas de onda obtidas se mostraram bastante semelhantes, ocorrendo o mesmo também para os valores eficazes e distorções harmônicas de tensão e corrente verificadas em ambos os estudos, sobretudo para a condição de operação em plena saturação. Quanto aos estudos realizados envolvendo a operação em baixa saturação, estes apresentaram um nível de correlação menor que o anterior, porém dentro de níveis considerados aceitáveis. Este fato pode ser perfeitamente justificado pelas assimetrias e particularidades elétricas apresentadas pelo RNS utilizado nos ensaios experimentais. Entretanto, tais resultados não trazem maiores preocupações, tendo em vista que a região mais preocupante e, portanto, de maior interesse, corresponde ao ponto de operação em regime de saturação elevada.

Como destacado no texto, trabalhos de validação do modelo computacional foram também direcionados para outras unidades reativas, em escala comercial. Neste particular, a ausência de maiores informações relacionadas com formas de onda das tensões e correntes, conduziu a uma sistemática de avaliação atrelada tão apenas com as correlações entre as potências reativas absorvidas pelos dispositivos em função das tensões em seus terminais. Mais uma vez, os resultados se mostraram, experimentalmente e computacionalmente, condizentes.

Diante do bom desempenho obtido através das investigações relatadas neste capítulo ficou pois, evidenciado, que o modelo de CERNS proposto e implementado no simulador ATP se mostrou, dentro do universo definido de testes, bastante satisfatório.

# **Capítulo V**

---

## **AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL DO DESEMPENHO DO COMPENSADOR DE REATIVOS A NÚCLEO SATURADO PARA UM ESTUDO DE CASO**

### **5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

Uma vez estabelecidas as diretrizes básicas associadas com: o projeto de reatores saturados, a determinação de parâmetros elétricos equivalentes do equipamento, a proposição e validação de um modelo computacional representativo do compensador a núcleo saturado no simulador ATP, esta fase dos trabalhos encontra-se direcionada para a avaliação do processo como um todo.

Para tanto, através da seleção de um estudo de caso, cuja topologia e parametrização encontram sustentação na topologia típica de um alimentador de uma concessionária de distribuição, procede-se a exemplificação da eficácia do emprego de um regulador de tensão aos fins aqui almejados.

Buscando atingir as metas almejadas, os estudos desenvolvidos neste capítulo compreendem as seguintes etapas:

- Definição do arranjo elétrico para a realização dos estudos de desempenho do compensador a núcleo saturado e respectiva implementação na plataforma ATP;
- Avaliação do desempenho do sistema no que tange aos níveis das tensões sem a presença do compensador de reativos;
- Dimensionamento de um CERNS visando a compatibilização dos níveis das tensões aos patamares regulamentados;
- Avaliação da rede elétrica com a inserção do dispositivo regulador.

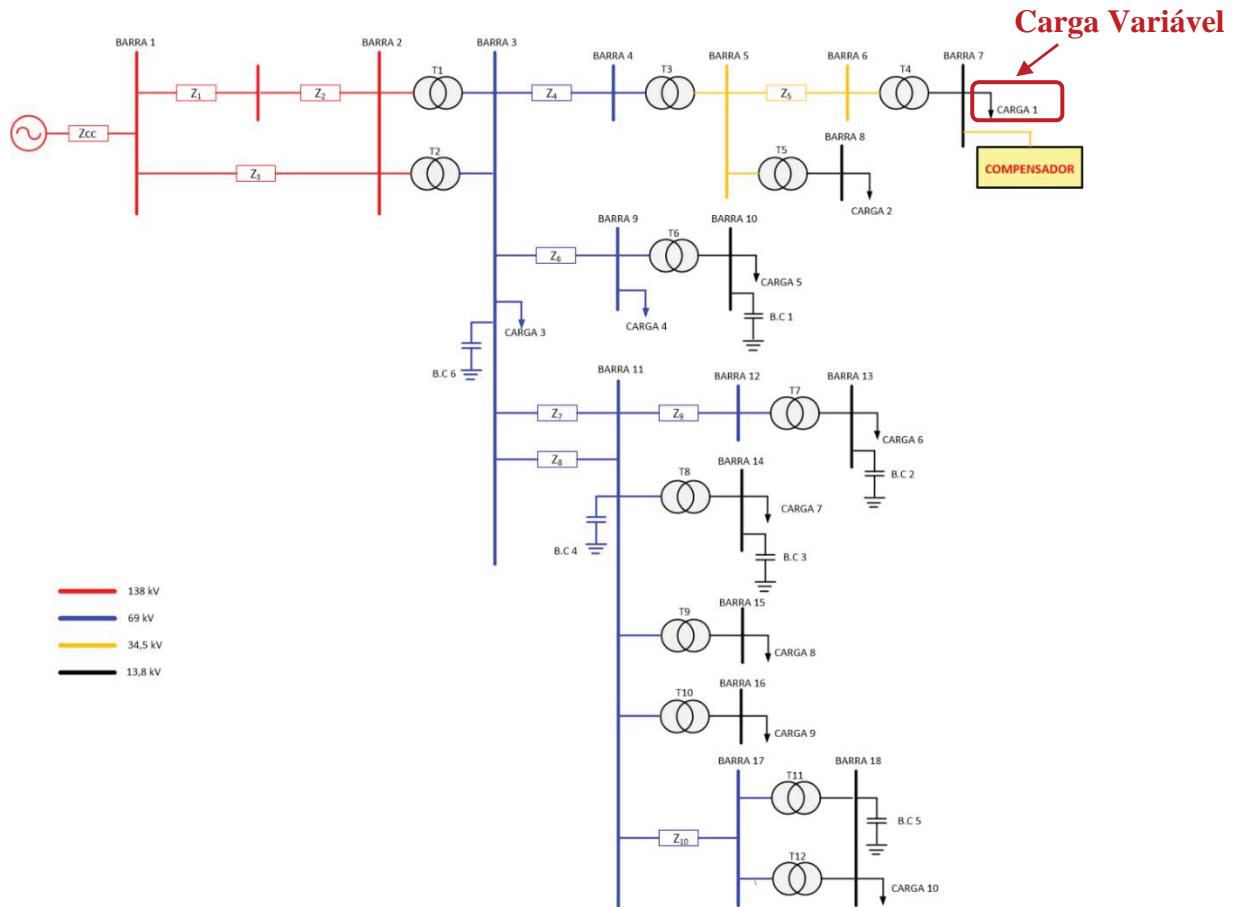
## **5.2 SISTEMA ELÉTRICO SELECIONADO**

Os estudos de desempenho do compensador a núcleo saturado foram conduzidos através do arranjo elétrico cujo diagrama unifilar encontra-se indicado na Figura 5.1. Esta evidencia que a rede utilizada compreende barramentos com tensões de 138 kV, 69 kV, 34,5 kV e 13,8 kV.

Dentre os aspectos que motivaram a seleção do presente caso para a realização dos estudos destaca-se, de forma pontual, sua topologia radial e a sazonalidade apresentada pelas cargas conectadas ao mesmo. Vale ressaltar que tais características tornam o referido sistema propício aos objetivos aqui postos.

As principais informações elétricas relativas aos diversos componentes que perfazem o sistema em pauta, nos termos necessários à modelagem estabelecida no simulador ATP, são fornecidas nas Tabelas 5.1 a 5.5.

**CAPITULO V – Avaliação Computacional do Desempenho do Compensador de Reativos a Núcleo Saturado para um Estudo de Caso**



*Figura 5.1 – Diagrama unifilar do sistema elétrico adotado para os estudos de desempenho do CERNS.*

*Tabela 5.1 – Nível de curto-circuito*

<b>Barra 1</b>	
Tensão	138 kV
Corrente de curto-circuito	2,84 kA
Ângulo	$\angle -83,55^\circ$

*Tabela 5.2 – Parâmetros equivalentes das redes alimentadoras*

Condutores	Resistência ( $\Omega$ )	Reatância (mH)	Capacitância ( $\mu\text{F}$ )
Z1	17,05	152,55	1,14
Z2	2,51	22,43	0,167
Z3	16,72	172,51	1,33
Z4	9,88	60,34	0,48
Z5	16,79	54,64	2,82
Z6	0,06	0,36	0,003
Z7	2,37	14,48	0,11
Z8	2,09	18,19	0,14
Z9	13,05	54,52	0,37
Z10	0,70	6,06	0,05

**CAPITULO V – Avaliação Computacional do Desempenho do Compensador de Reativos a Núcleo Saturado para um Estudo de Caso**

*Tabela 5.3 – Parâmetros equivalentes dos transformadores*

Transformadores	Potência Nominal (MVA)	Relação de Tensão (Primário / Secundário)
T1	60	138 kV / 69 kV
T2	60	138 kV / 69 kV
T3	12	69 kV / 34,5 kV
T4	6	34,5 kV / 13,8 kV
T5	1	34,5 kV / 13,8 kV
T6	12	69 kV / 13,8 kV
T7	5	69 kV / 13,8 kV
T8	20	69 kV / 13,8 kV
T9	12	69 kV / 13,8 kV
T10	12	69 kV / 13,8 kV
T11	12	69 kV / 13,8 kV
T12	12	69 kV / 13,8 kV

*Tabela 5.4 – Características das cargas*

Condições de Carregamento	Potência Ativa (MW)	Potência Reativa (MVAr)
Carga 1	5,4	2,6
Carga 2	0,8	0,6
Carga 3	6,3	3,6
Carga 4	1,8	0,8
Carga 5	2,3	2,0
Carga 6	1,8	1,0
Carga 7	5,0	3,1
Carga 8	0,8	0,6
Carga 9	1,8	1,1
Carga 10	11,3	5,8

*Tabela 5.5 – Parâmetros dos capacitores*

Banco de Capacitores	Potência (MVAr)
BC 1	1,0
BC 2	1,2
BC 3	4,8
BC 4	6,0
BC 5	6,0
BC 6	6,0

Em consonância com os procedimentos adotados ao longo desta tese, o sistema supra definido foi então inserido no simulador ATP, como pode ser verificado através da Figura 5.2.

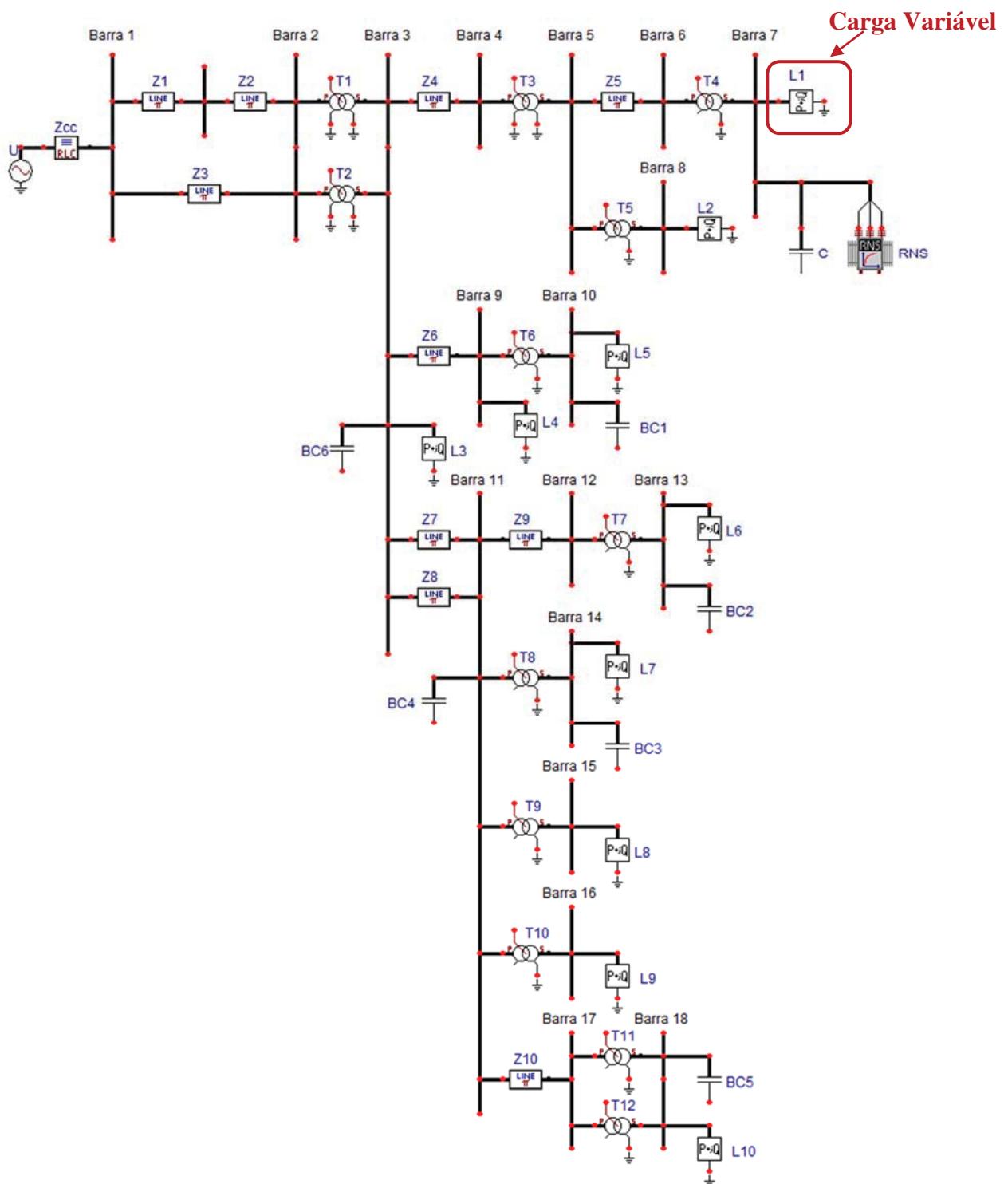


Figura 5.2 – Sistema elétrico implementado no ATP para os estudos de desempenho do CERNS.

### **5.3 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO SISTEMA QUANTO AOS NÍVEIS DAS TENSÕES - SEM A PRESENÇA DO COMPENSADOR**

Uma vez definido o sistema, o próximo passo consiste na avaliação das condições operativas quanto aos níveis das tensões nos barramentos, buscando assim determinar a necessidade ou não, de medidas mitigadoras para a adequação das tensões aos limites recomendados pela legislação.

Os estudos computacionais para avaliação das tensões nos barramentos do sistema supramencionado, sem a presença do compensador, foram realizados levando-se em consideração algumas particularidades específicas da referida rede elétrica. Neste contexto, buscou-se levar em consideração a sazonalidade intrínseca à operação da carga 1, de potência nominal 6 MVA, instalada no barramento 7, enquanto as demais cargas do sistema permaneceram constantes. As variações de carregamento susceptíveis de ocorrência na barra 7, foram sintetizadas através de 3 (três) condições distintas, todas aplicáveis à Carga 1:

- Carregamento leve: 20% da carga nominal;
- Carregamento médio: 67% da carga nominal;
- Carregamento pesado: 100% da carga nominal.

Buscando facilitar a visualização do desempenho do sistema, frente às variações de carregamento previstas para o barramento 7, as análises computacionais foram conduzidas ao longo de 2,5 s de simulação, período no qual foram experimentadas as condições de carregamento supramencionadas, mediante entradas e saídas de carga na referida barra, de acordo com os seguintes intervalos:

- Intervalo I (0 a 0,5s): carregamento médio;
- Intervalo II (0,5 a 1,0s): carregamento pesado;
- Intervalo III (1,0 a 1,5s): retorno ao carregamento médio;
- Intervalo IV (1,5 a 2,0s): carregamento leve;

- Intervalo V (2,0 a 2,5s): retorno ao carregamento médio.

Os resultados computacionais, obtidos através do programa ATP, para as amplitudes das tensões eficazes de cada barramento do sistema elétrico analisado, frente às situações de carregamento experimentadas pela barra 7, bem como os respectivos desvios destes em relação às tensões nominais das barras, encontram-se sintetizadas na Tabela 5.6. Conforme pode-se constatar, destacado em amarelo, tanto as tensões das barras 5, 7 e 8, para a condição de carregamento leve, quanto as respectivas tensões dos barramentos 6 e 7, para a situação de carregamento pesado, violaram os limites considerados adequados segundo as recomendações do PRODIST, para os pontos de entrega ou conexões em tensão superior a 1 kV e inferior a 69 kV, quais sejam, -7% e +5%. Vale lembrar que alguns dos transformadores encontram-se operando com seus tapes em posições tais que não a de 0%.

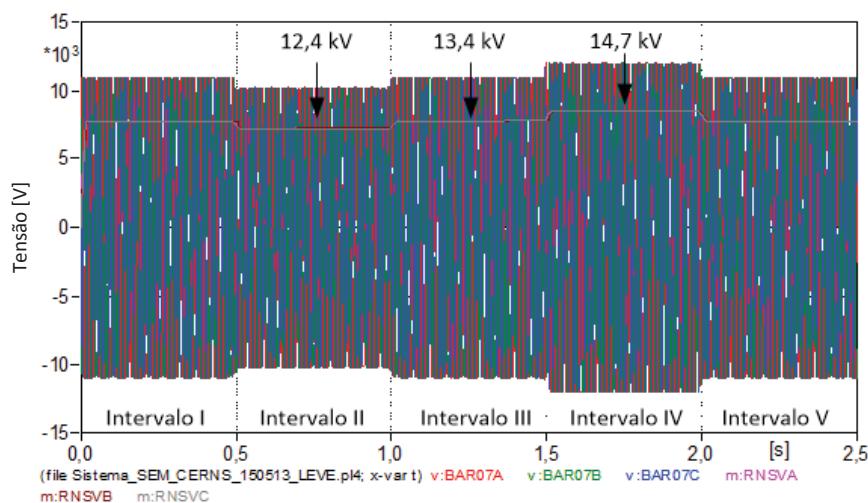
*Tabela 5.6 – Síntese das tensões nos barramentos do sistema – sem compensador*

Barramentos	Tensão Nominal (kV)	Nível de Carregamento na Barra 7					
		Leve		Médio		Pesado	
		Eficaz (kV)	Desvio (%)	Eficaz (kV)	Desvio (%)	Eficaz (kV)	Desvio (%)
Barra 1	138	143,0	3,6	142,4	3,2	142,1	2,9
Barra 2	138	143,8	4,2	142,7	3,4	141,9	2,9
Barra 3	69	72,2	4,7	71,5	3,7	71,0	3,0
Barra 4	69	72,0	4,3	70,5	2,2	69,5	0,7
Barra 5	34,5	36,7	6,5	35,7	3,5	35,0	1,3
Barra 6	34,5	36,1	4,6	33,3	-3,6	31,3	-9,4
Barra 7	13,8	14,7	6,5	13,4	-2,9	12,4	-9,8
Barra 8	13,8	14,7	6,4	14,3	3,5	14,0	1,2
Barra 9	69	72,2	4,7	71,5	3,7	71,0	2,9
Barra 10	13,8	14,3	3,7	14,2	2,8	14,1	2,1
Barra 11	69	72,2	4,6	71,5	3,6	71,0	2,9
Barra 12	69	71,9	4,2	71,2	3,2	70,8	2,5
Barra 13	13,8	14,4	4,4	14,3	3,4	14,1	2,4
Barra 14	13,8	14,3	3,8	14,2	2,9	14,1	2,2
Barra 15	13,8	14,4	4,0	14,2	3,1	14,1	2,4
Barra 16	13,8	14,3	3,7	14,2	2,8	14,1	2,1
Barra 17	69	72,0	4,4	71,3	3,4	70,9	2,7
Barra 18	13,8	14,5	4,7	14,3	3,8	14,2	3,1

Diante do exposto, fica pois evidenciada a necessidade de aplicação de medidas mitigadoras, mais especificamente do compensador a núcleo saturado, para a regulação das tensões no referido barramento. No que se refere à escolha do barramento para a realização da compensação reativa, esta foi norteada pela correlação de duas informações específicas, quais sejam: o barramento mais fragilizado e a barra mais próxima da carga causadora das variações das tensões. Mediante a conexão das informações supracitadas, constatou-se que o ponto de conexão mais adequado para receber a compensação reativa foi o barramento 7.

Assim, tanto o processo de dimensionamento do compensador, a ser abordado na próxima seção, quanto a avaliação das formas de ondas das tensões no que se refere às distorções harmônicas, foram realizadas para a barra 7.

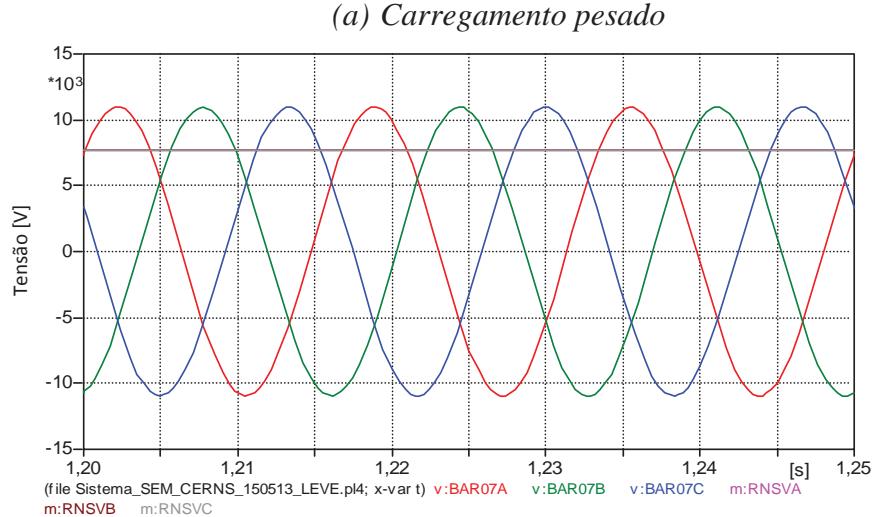
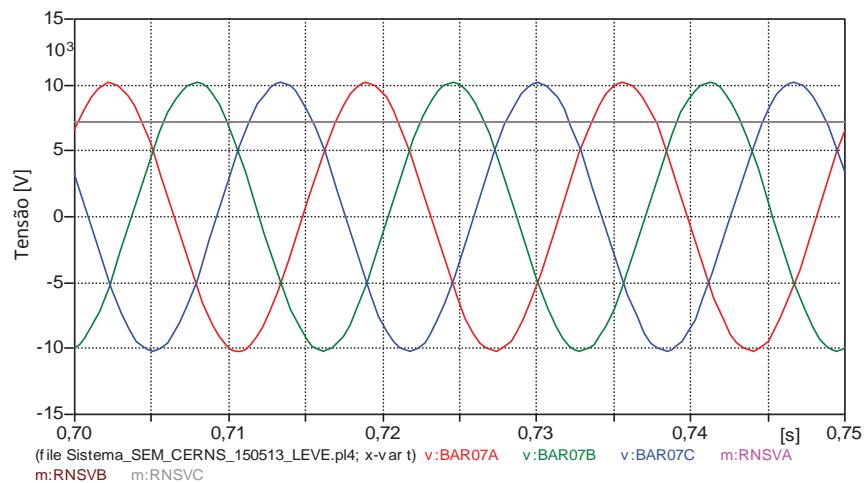
Almejando oferecer bases para a comparação dos desempenhos do sistema elétrico analisado, antes e após a inserção do compensador no barramento 7, a Figura 5.3 fornece os perfis das formas de onda das tensões de fase verificadas na referida barra, durante o intervalo total de estudo (2,5 s). Deve-se ressaltar que, embora as formas de onda apresentem as tensões de fase, os valores verificados na figura expressam os respectivos valores de linha para cada intervalo, visando assim, apenas facilitar a correlação entre os resultados desta com aqueles sintetizados pela tabela anterior.

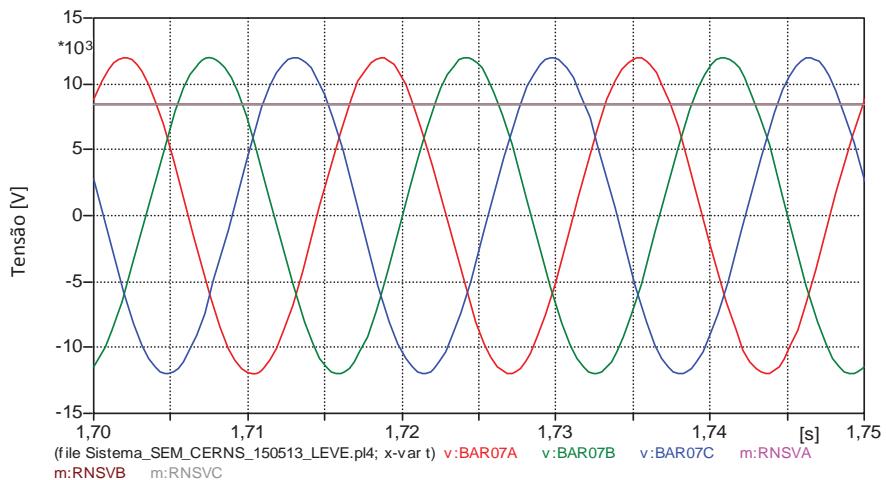


*Figura 5.3 – Formas de onda das tensões – barramento 13,8 kV – sem compensador.*

Conforme já destacado através da Tabela 5.6, fica pois reafirmado, através dos resultados apresentados pela Figura 5.3, que tanto para a condição de carregamento pesado (intervalo II) quanto para a situação de carga leve (intervalo IV), os valores eficazes das tensões violaram os limites inferior e superior estabelecidos pela legislação, respectivamente -7% e +5%.

As Figuras 5.4 (a), (b) e (c) apresentam uma vista ampliada das formas de onda das tensões, respectivamente para os intervalos de operação com carregamentos nominal, pesado e leve.





(c) Carregamento leve

Figura 5.4 – Vista ampliada das formas de onda das tensões – barramento 34,5 kV – sem compensador.

Os resultados visualizados através das formas de ondas das tensões apresentadas na Figura 5.4, demonstram que, apesar das variações de carregamento ocorridas no sistema, estas ocorreram sob condições ideais de suprimento, sem a presença de distorções harmônicas por parte da concessionária ou por parte das cargas. Desta forma, para a análise do sistema elétrico sem a presença do compensador, a distorção harmônica total de tensão (DTT) verificada no barramento escolhido para o estudo de caso foi nula.

## 5.4 DIMENSIONAMENTO DO COMPENSADOR UTILIZANDO O PROGRAMA DICOM

Muito embora o *software* para o dimensionamento do compensador não tenha sido uma contribuição desta pesquisa, como já enfatizado no capítulo II, a sistemática para o dimensionamento dos montantes de potência reativa do compensador empregou o aplicativo computacional denominado por DICOM, o qual objeto de desenvolvimento em [36].

Diante do exposto, nesta seção apresenta-se os resultados do emprego deste *software*, o qual se materializa na forma de uma definição das potências reativas

---

## CAPITULO V – Avaliação Computacional do Desempenho do Compensador de Reativos a Núcleo Saturado para um Estudo de Caso

---

inerentes ao capacitor e ao reator a núcleo saturado, visando, sobretudo, a restauração das tensões da barra 7 aos patamares regulamentados.

A Figura 5.5 apresenta a janela inicial do aplicativo para dimensionamento do compensador.



Figura 5.5 – Programa para dimensionamento de compensadores – DICOM – Janela inicial.

A Figura 5.6 apresenta a janela “Dados de Entrada”, destinada a parametrização das informações relativas aos níveis de curto-circuito, níveis de carregamento e limites estabelecidos pela legislação, para a regulação das tensões no barramento alvo do estudo.

## CAPITULO V – Avaliação Computacional do Desempenho do Compensador de Reativos a Núcleo Saturado para um Estudo de Caso

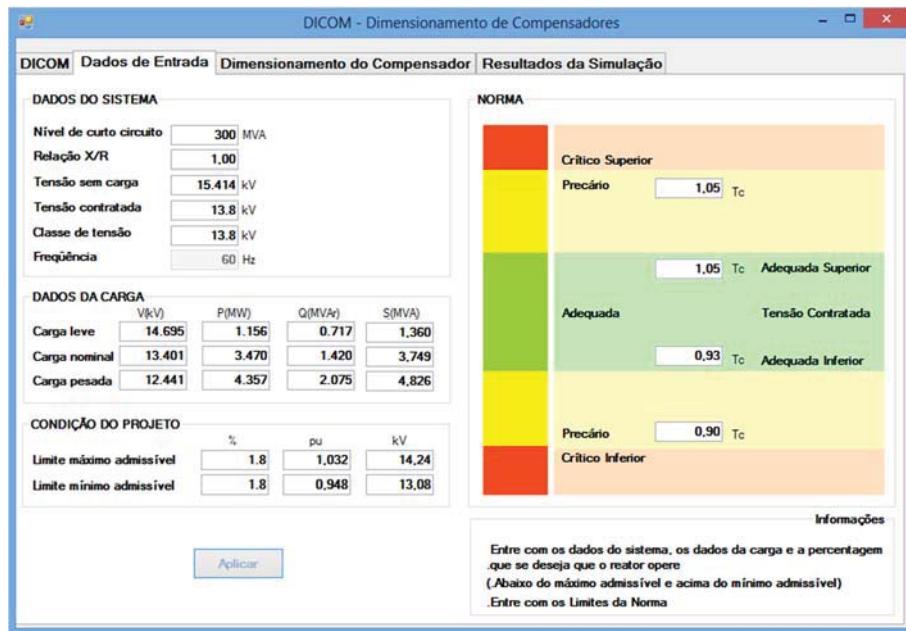


Figura 5.6 – Programa para dimensionamento de compensadores – DICOM – Janela Dados de Entrada.

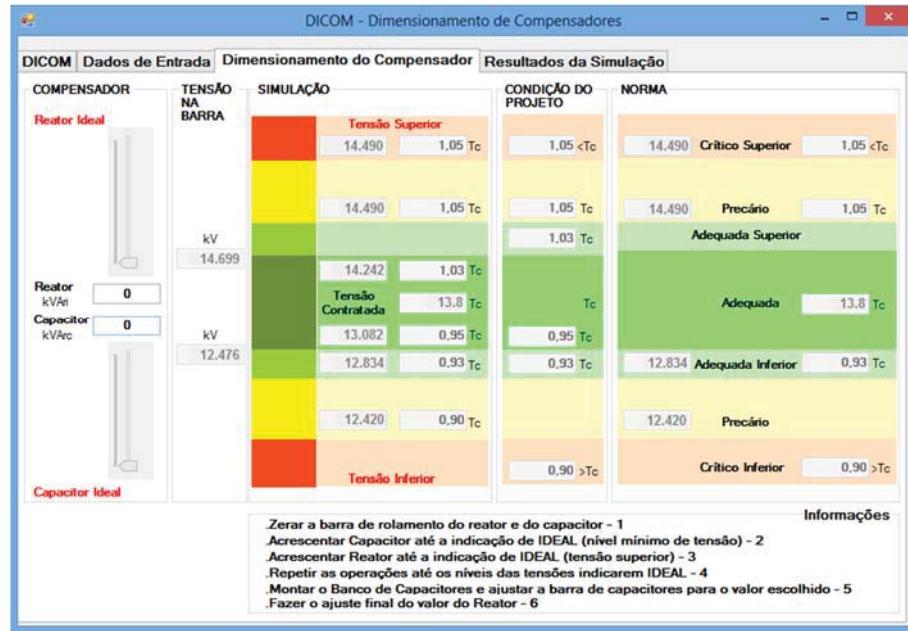
Após a parametrização das características básicas do sistema que se constitui no caso estudo em foco, na janela “Dimensionamento do Compensador”, procede-se a determinação das potências reativas necessárias para o enquadramento das tensões aos limites recomendados pela legislação.

Iniciando pela Figura 5.7 (a), constata-se que as variações de carregamento experimentadas pelo sistema causaram alterações nas tensões para valores que violavam os limites recomendados pela legislação, justificando, assim, a necessidade de compensação de reativos no referido sistema.

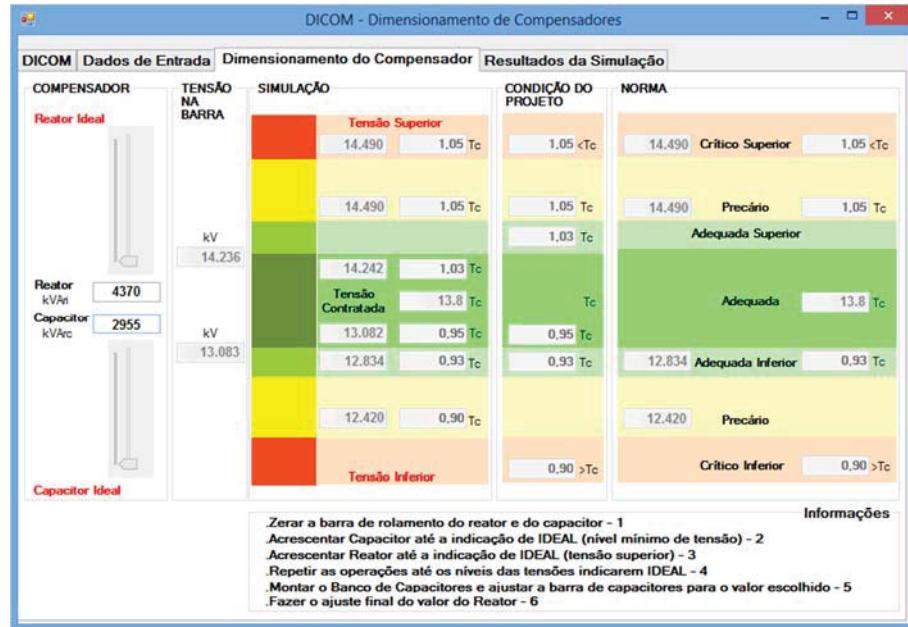
Fazendo uso dos recursos disponibilizados pelo programa, obtém-se as potências do banco de capacitores e do reator saturado necessários para a adequação das tensões. Isto pode ser observado nos resultados mostrados na Figura 5.7 (b), a qual evidencia um banco de capacitores de 3 MVar e um reator saturado de 4,3 MVar. Deve-se ressaltar que os resultados obtidos através do programa DICOM, levaram em consideração não apenas o enquadramento das

## CAPITULO V – Avaliação Computacional do Desempenho do Compensador de Reativos a Núcleo Saturado para um Estudo de Caso

tensões da barra 7, mas também das barras 5, 6 e 8, que também ultrapassaram os padrões recomendados pela legislação.



(a) Sistema elétrico sem a presença do compensador



(b) Sistema elétrico com a presença do compensador

Figura 5.7 – Programa para dimensionamento de compensadores – DICOM – Janela Dimensionamento do Compensador.

Quanto ao pré-projeto do RNS e a determinação dos parâmetros elétricos equivalentes necessários para o modelo a ser implementado no programa ATP, estes requisitos foram contemplados pelo programa PRORE 2.0, o qual se apresenta como uma das efetivas contribuições desta tese, como ressaltado no Capítulo II.

A Tabela 5.7 apresenta uma síntese das propriedades e parâmetros equivalentes atrelados com o RNS de 4,3 MVAr.

*Tabela 5.7 – Parâmetros elétricos equivalentes – RNS 4,3 MVAr – PRORE 2.0*

<b>Principais Características</b>	
Potência Nominal	4,37 MVAr
Classe de Tensão	13,8 kV
Tensão de Saturação Nominal	14,3 kV
Corrente Nominal	177,2 A
Resistência do enrolamento principal (Rp)	0,0147 Ω
Resistência do enrolamento auxiliar (Ra)	0,0020 Ω
Indutância do enrolamento principal (Lp)	1,3473 mH
Indutância do enrolamento auxiliar (La)	0,1805 mH
Tensão na bobina principal	3,65 kV
Tensão na bobina auxiliar	1,34 kV

## **5.5 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO SISTEMA COM A PRESENÇA DO COMPENSADOR**

Visando demonstrar a eficácia do processo de regulação das tensões ora proposto, as análises foram conduzidas de forma semelhante ao estudo computacional realizado anteriormente, levando-se em consideração as mesmas condições e intervalos de carregamento, porém, desta feita, inserindo-se o compensador de reativos a núcleo saturado, o qual se encontra-se conectado à barra 7 do sistema.

A Tabela 5.8 oferece uma síntese das tensões nos barramentos da rede elétrica analisada, bem como o desvio destas em relação ao valor nominal da tensão de cada barra.

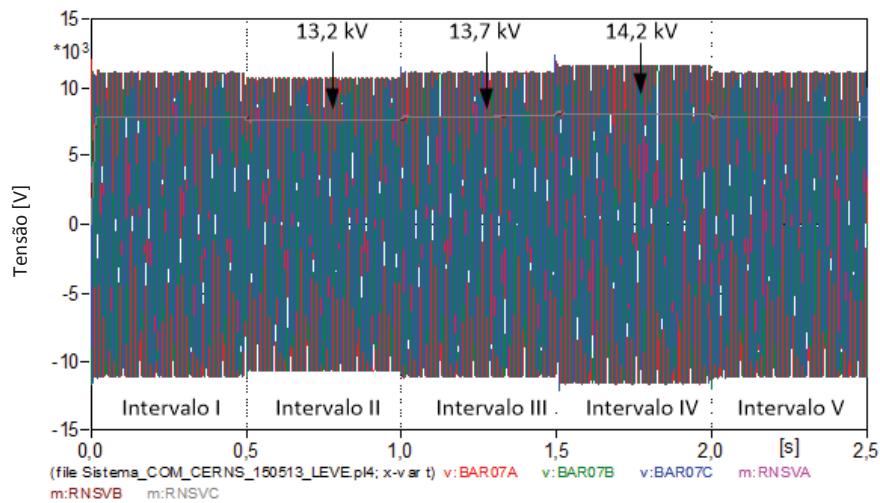
**CAPITULO V – Avaliação Computacional do Desempenho do Compensador de Reativos a Núcleo Saturado para um Estudo de Caso**

*Tabela 5.8 – Síntese das tensões nos barramentos do sistema – com compensador*

Barramentos	Tensão Nominal (kV)	Nível de Carregamento na Barra 7					
		Leve		Médio		Pesado	
		Eficaz (kV)	Desvio (%)	Eficaz (kV)	Desvio (%)	Eficaz (kV)	Desvio (%)
Barra 1	138	142,8	3,5	142,5	3,2	142,3	3,1
Barra 2	138	143,4	3,9	143,0	3,6	142,4	3,2
Barra 3	69	71,9	4,2	71,7	4,0	71,4	3,5
Barra 4	69	71,3	3,4	70,9	2,7	70,2	1,8
Barra 5	34,5	36,2	5,0	36,0	4,3	35,6	3,1
Barra 6	34,5	35,0	1,4	33,8	-2,1	32,6	-5,5
Barra 7	13,8	14,2	3,1	13,7	-0,5	13,2	-4,1
Barra 8	13,8	14,5	4,9	14,4	4,2	14,2	3,1
Barra 9	69	71,9	4,2	71,7	3,9	71,4	3,5
Barra 10	13,8	14,3	3,3	14,2	3,0	14,2	2,6
Barra 11	69	71,9	4,1	71,7	3,9	71,3	3,4
Barra 12	69	71,6	3,8	71,4	3,5	71,1	3,1
Barra 13	13,8	14,3	3,9	14,3	3,6	14,2	3,3
Barra 14	13,8	14,3	3,4	14,2	3,1	14,2	2,7
Barra 15	13,8	14,3	3,6	14,3	3,3	14,2	2,9
Barra 16	13,8	14,2	3,3	14,2	3,0	14,2	2,6
Barra 17	69	71,7	4,0	71,5	3,7	71,2	3,2
Barra 18	13,8	14,4	4,3	14,4	4,0	14,3	3,6

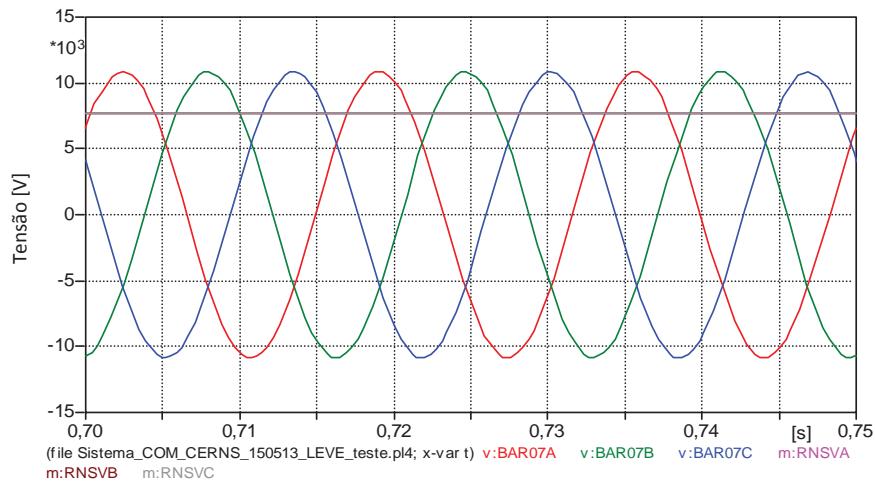
Conforme destacado em verde na Tabela 5.8, os níveis das tensões nos barramentos 5, 6, 7 e 8, que antes violavam os limites estipulados pela legislação, foram enquadrados dentro do padrão considerado adequado pelo PRODIST. Tais resultados demonstram assim, uma boa eficiência do compensador a núcleo saturado no processo de regulação das tensões, não somente da barra 7, na qual o mesmo foi conectado, mas também, a propagação do seu efeito benéfico nas barras localizadas a montante (barras 6, 7 e 8).

A exemplo da seção anterior, a Figura 5.8 apresenta os perfis das formas de onda das tensões de fase verificadas na barra 7, bem como os respectivos valores de linha destas para os intervalos II, III e IV, correspondentes às condições de carregamento pesado, médio e leve.

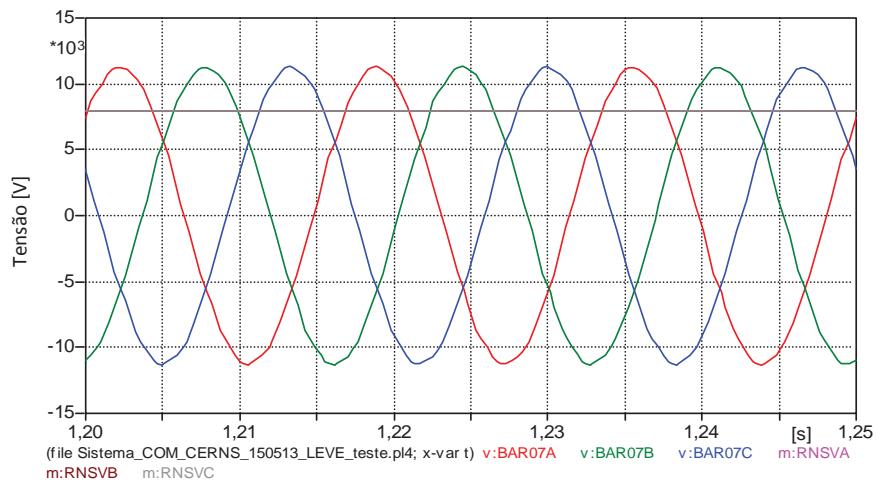


*Figura 5.8 – Formas de onda das tensões – barramento 13,8 kV – com compensador.*

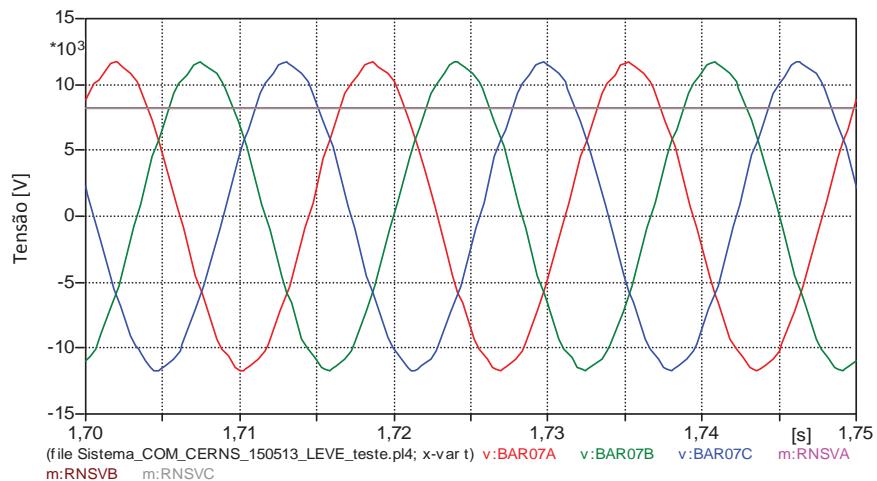
Detalhes das formas de onda das tensões destacando as condições de carregamento analisadas, podem ser observadas nas Figuras 5.9 (a), (b) e (c).



*(a) Carregamento pesado*



*(b) Carregamento médio*



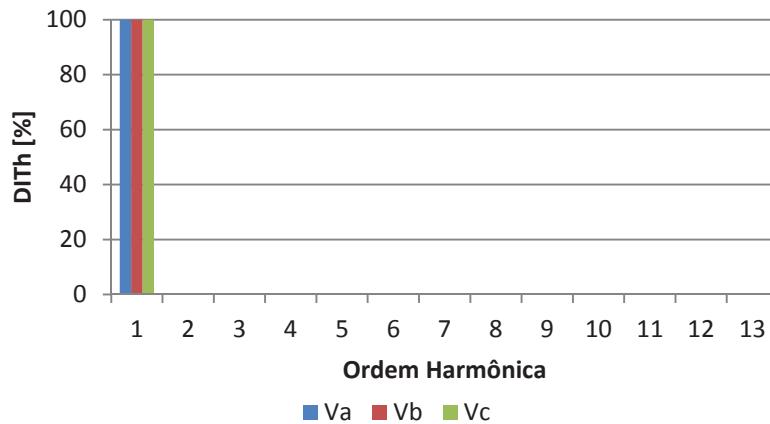
*(c) Carregamento leve*

*Figura 5.9 – Formas de onda das tensões – barramento 13,8 kV – com compensador.*

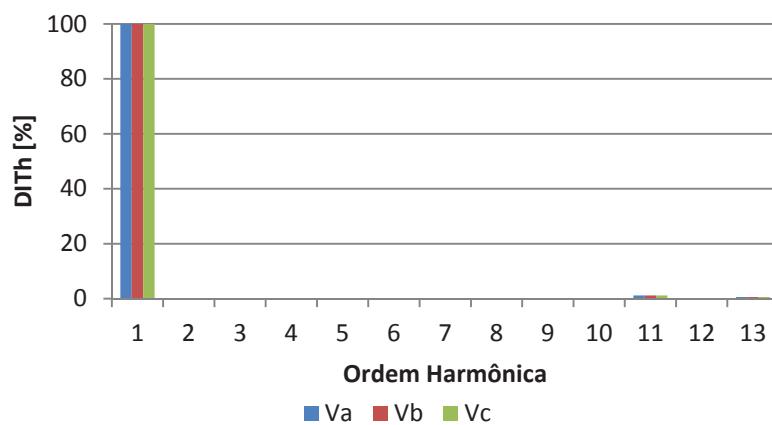
Os resultados obtidos demonstram que, muito embora os estudos tenham sido realizados em condições ideais de suprimento, a presença do elemento indutivo não linear do compensador, ainda que de forma pouco significativa, acabou impactando nas distorções harmônicas das tensões do barramento. Isto se deve, como já informado, ao fato que o reator saturado em pauta é capaz de produzir componentes harmônicas de corrente de ordem  $12k \pm 1$ .

As Figuras 5.10 (a), (b) e (c) apresentam as distorções harmônicas individuais de tensão para as respectivas condições de carregamento analisadas.

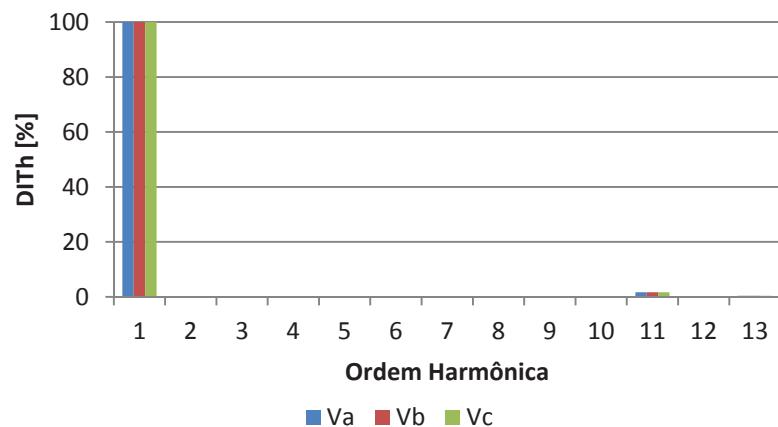
A partir de uma análise destas, pode-se verificar que os maiores níveis de distorções harmônicas foram verificados para a situação de carregamento leve, na qual o reator encontra-se operando em plena saturação. Além disso, as componentes harmônicas mais significativas foram aquelas compatíveis com a expressão dos equipamentos de 12 pulsos. Em contrapartida, para situação de carregamento pesado, o banco de capacitores tornou-se o elemento preponderante do compensador, justificando assim, a baixa distorção harmônica verificada nas tensões do barramento, devido a operação do RNS em condição de baixa saturação.



(a) Carregamento pesado



(b) Carregamento médio



(c) Carregamento leve

Figura 5.10 – Espectro harmônico das tensões aplicadas nos terminais do compensador.

Diante dos resultados apresentados, a distorção harmônica total de tensão (DTT) ficou em torno de 1,7% para a situação de carregamento leve, valor este totalmente compatível com a legislação aplicável.

No que se refere às correntes solicitadas pelo elemento indutivo do compensador, qual seja o reator saturado, estas podem ser visualizadas na Figura 5.11, que apresenta as reações do equipamento frente as variações de carregamento experimentadas ao longo do intervalo total de estudo de 2,5s.

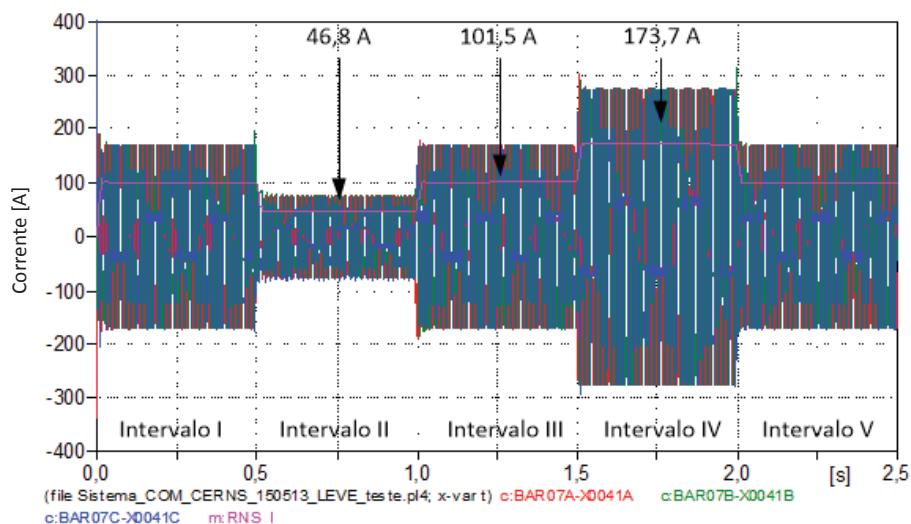


Figura 5.11 – Formas de onda das correntes solicitadas pelo RNS.

---

## CAPITULO V – Avaliação Computacional do Desempenho do Compensador de Reativos a Núcleo Saturado para um Estudo de Caso

---

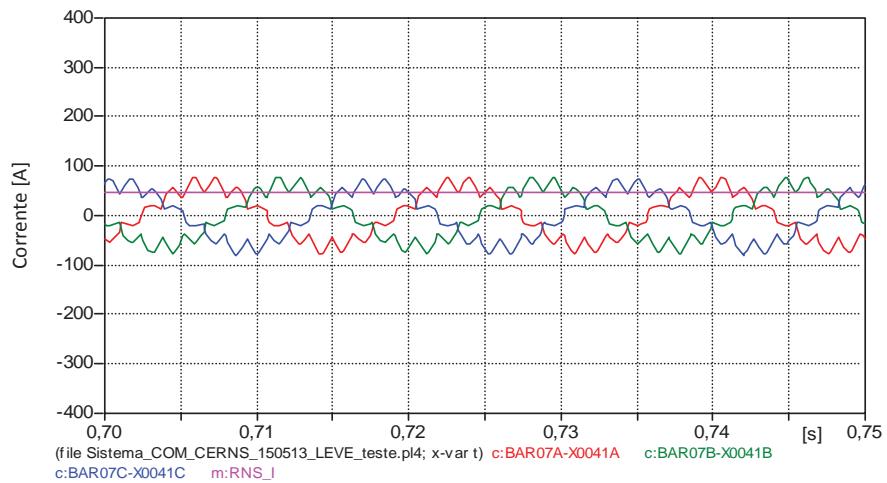
As formas de onda das correntes visualizadas na Figura 5.11 apresentam o desempenho do RNS frente a diferentes condições de carregamento, que conduzem a diferentes níveis de tensão aplicadas aos terminais do equipamento. Consequentemente, estas proporcionam a operação do mesmo sob condições de operação em baixa saturação, saturação média e saturação elevada, encontradas nos intervalos II, III e IV.

A Tabela 5.9 oferece uma síntese do desempenho do reator saturado, no que tange às correntes e potências absorvidas pelo equipamento frente às condições de carregamento analisadas. Os resultados obtidos demonstram que para o intervalo IV, durante a situação de carregamento leve no sistema, o equipamento atingiu o nível de saturação elevada, absorvendo da rede elétrica 98% de sua potência nominal de projeto. Em contrapartida, para a condição de carregamento pesado, correspondente ao intervalo II, o equipamento foi conduzido à operação em uma região de baixa saturação, absorvendo da rede cerca de 26% de sua potência nominal de projeto.

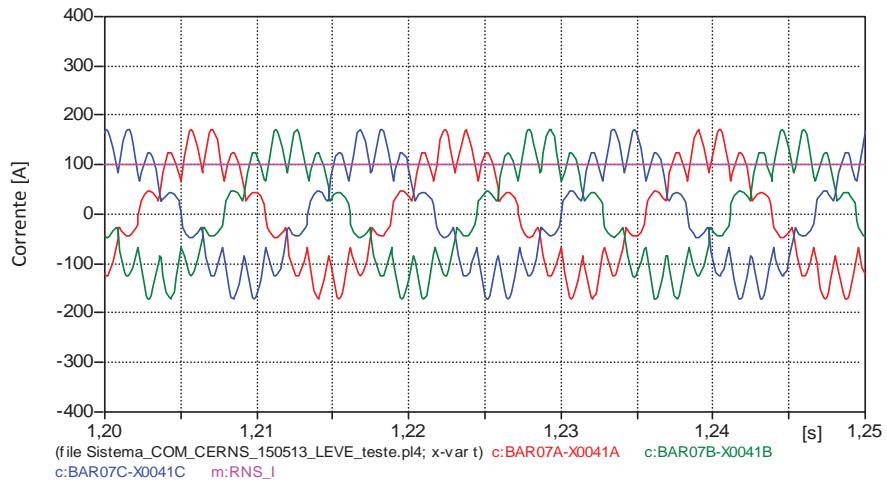
*Tabela 5.9 – Correntes e potências solicitadas pelo RNS*

Condições de carregamento	Corrente [A]	Potência Reativa [MVAr]
Pesado	46,8	1,1
Médio	101,5	2,4
Leve	173,7	4,3

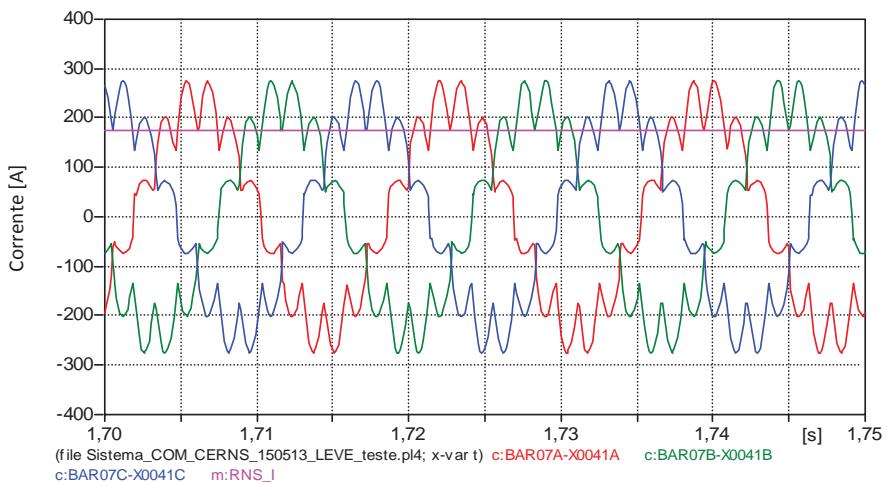
As formas de onda das correntes solicitadas pelo reator saturado, para as condições de carregamento supramencionadas, podem ser observadas em detalhes nas Figuras 5.12 (a), (b) e (c).



*(a) Carregamento pesado – baixa saturação*



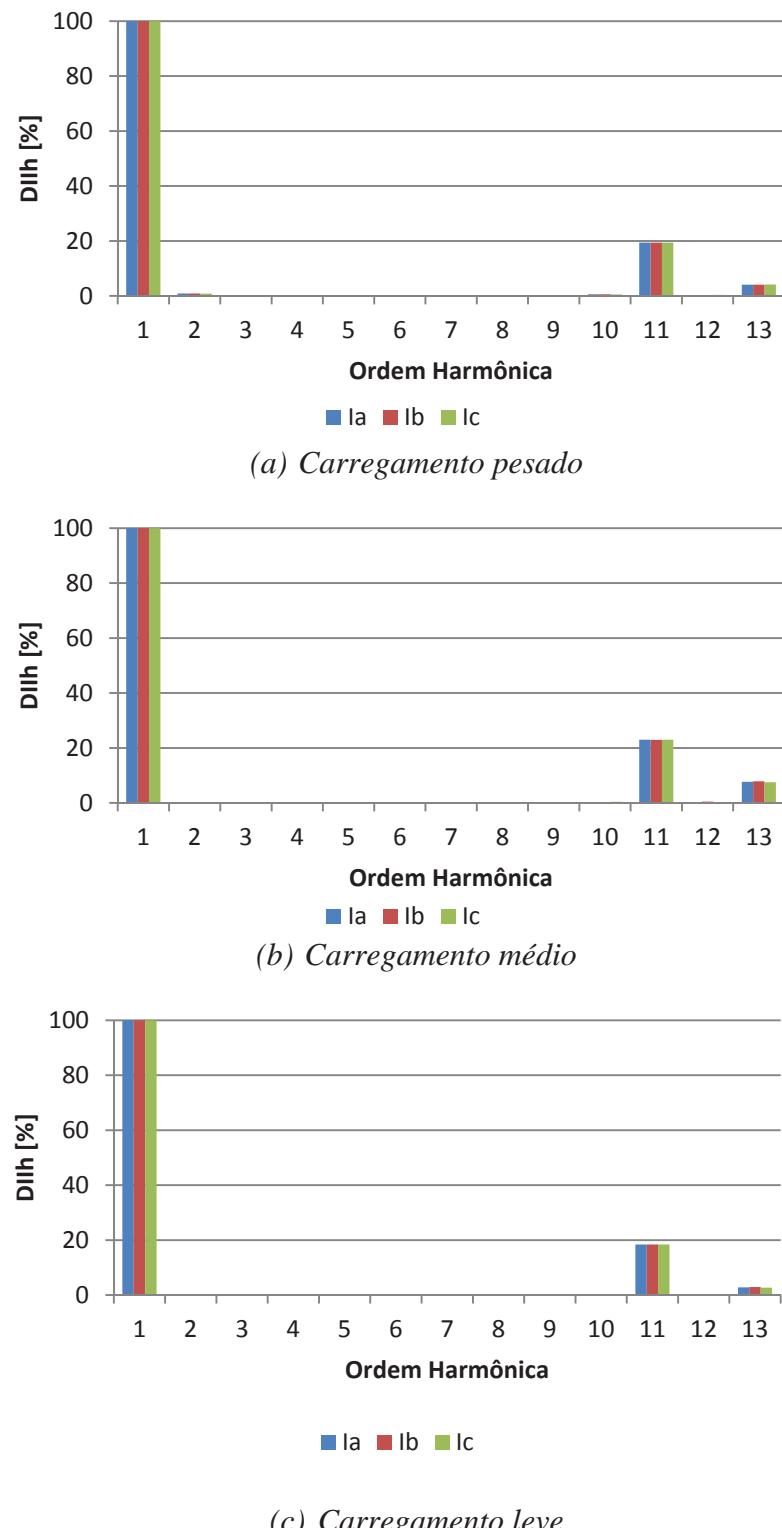
*(b) Carregamento médio – saturação média*



*(c) Carregamento leve – saturação elevada*

*Figura 5.12 – Vista ampliada das formas de onda das correntes solicitadas pelo RNS.*

Os respectivos espectros harmônicos das correntes de linha solicitadas pelo RNS nas diferentes condições de carregamento, podem ser observados nas Figuras 5.13.



*Figura 5.13 – Espectro harmônico das correntes solicitadas pelo RNS.*

Pode-se, mais uma vez, constatar que as componentes harmônicas de ordem 11 e 13 são as mais significativas.

## **5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Este capítulo teve como cerne a avaliação de toda a sistemática de trabalho com compensadores a núcleo saturado, levando-se em consideração aspectos atrelados com os fundamentos para a determinação das parcelas reativas de cada unidade do compensador, fazendo uso do programa DICOM, passando pela determinação dos parâmetros elétricos equivalentes e construtivos do reator saturado, através do programa PRORE 2.0. Por fim, através do modelo de compensador a núcleo saturado inserido no ATP, os desenvolvimentos culminaram pela avaliação computacional de desempenho do compensador a núcleo saturado na regulação das tensões em um sistema elétrico real nacional.

Os resultados obtidos ratificaram a importância do programa DICOM como ferramenta extremamente importante e eficiente no processo de determinação das parcelas reativas das unidades constituintes do CERNS. Entretanto, por mais que o aplicativo almeje a otimização e simplificação do processo de busca do compensador ideal, esta busca depende de uma criteriosa parametrização inicial, sobretudo de informações do sistema no qual o equipamento será instalado. Assim, a eficiência dos resultados oferecidos pelo programa dependem diretamente da qualidade das informações a respeito da rede elétrica estudada.

Quanto à utilização do programa PRORE 2.0 para o projeto básico do reator saturado, ficou mais uma vez evidenciada as contribuições feitas por esta proposta ao referido programa, sobretudo para o processo de determinação dos parâmetros elétricos equivalentes para simulação da referida tecnologia no simulador ATPDraw.

No que se refere a implementação computacional do CERNS no simulador ATP, a eficiência do modelo proposto e implementado foi mais uma vez ratificada através da avaliação computacional de desempenho do referido equipamento, aplicado a um sistema com características reais. Os resultados obtidos ressaltaram a eficácia do compensador no processo de regulação das tensões em um barramento de 13,8 kV do referido sistema, de maneira que as violações de tensão verificadas sem presença do compensador no sistema, foram mitigadas pela utilização do referido regulador.

Assim, diante dos resultados verificados através das várias etapas do processo de especificação, projeto e avaliação de desempenho de compensadores a núcleo saturados, ficou destacada uma boa concordância dos resultados apresentados, e portanto, uma boa eficiência de toda a sistemática proposta e implementada por esta tese. Isto torna as ferramentas aqui utilizadas, extremamente importantes para o domínio da tecnologia dos reatores a núcleo saturado tipo *twin-tripler*, e sobretudo, ratifica o emprego destes como compensadores de reativos para fins de regulação das tensões em barramentos do sistema elétrico.

# Capítulo VI

---

## CONCLUSÕES

Muito embora ao longo de cada capítulo tenha-se explorado aspectos relacionados com as constatações próprias aos desenvolvimentos feitos, é conveniente, neste momento, sintetizar os aspectos mais gerais e conclusivos acerca dos trabalhos até então realizados. Dentro deste enfoque, pode-se reconhecer que a presente pesquisa, evidencia significativas contribuições quanto ao processo de especificação e projeto de reatores a núcleo saturado, e ainda, no que diz respeito à proposição, implementação computacional e avaliação de desempenho de um modelo do respectivo dispositivo no simulador ATP.

Diante do exposto, podem ser destacados que as atividades realizadas representaram os seguintes avanços:

**a) Quanto ao projeto básico de reatores saturados e determinação dos parâmetros elétricos equivalentes**

Nesta fase do trabalho foram apresentados os fundamentos físicos e uma sistemática para o dimensionamento básico das unidades capacitiva e indutiva, do compensador de reativos através do aplicativo computacional DICOM, o qual foi desenvolvido em [36]. A partir das informações extraídas deste *software*, o presente trabalho avançou no sentido do estabelecimento de uma metodologia para o fornecimento de grandezas relacionadas com o projeto básico de reatores saturados do

tipo *twin-tripler*. Estes dados se apresentam como informações e orientações importantes para o projeto final e construção destes equipamentos. Uma vez caracterizado o reator quanto às dimensões físicas dos núcleos e bobinas, utilizando-se de procedimentos classicamente empregados na tecnologia de transformadores, foram então estabelecidas as bases para a determinação dos parâmetros elétricos equivalentes do reator, dados estes necessários para a modelagem deste dispositivo num aplicativo que utiliza técnicas de modelagem no domínio do tempo, a exemplo do ATP. A sistemática proposta foi implementada na forma de um novo aplicativo computacional, denominado por PRORE 2.0, *software* este também desenvolvido no âmbito desta pesquisa. Visando contemplar uma primeira etapa do processo avaliativo de desempenho e consistência dos programas elaborados, foram então conduzidos estudos envolvendo a especificação e projeto de um reator saturado. O equipamento utilizado para este fim foi um reator de porte comercial, para o qual todas as informações requeridas e disponibilizadas, pudessem ser prontamente empregadas. Comparando-se os resultados fornecidos pelo programa PRORE 2.0 com as grandezas utilizadas no projeto final do reator, constatou-se uma boa correlação entre as mesmas, fato este que ratificou a consistência da metodologia proposta como um bom instrumento balizador para o processo de construção de reatores a núcleo saturado do tipo *twin-tripler*.

**b) Quanto ao modelo computacional de reatores a núcleo saturado no simulador ATP**

Nesta fase da pesquisa os esforços se concentraram na proposição e implementação computacional de um modelo equivalente de reatores a núcleo saturado tipo *twin-tripler* no simulador ATP. O modelo proposto

fundamentou-se em recursos pré-existentes para a representação de transformadores saturáveis disponibilizados pelo aplicativo e em desenvolvimentos próprios desta pesquisa, a fim de compatibilizar os interesses deste trabalho. As atividades relacionadas com a avaliação do desempenho do modelo foram conduzidas através de simulações computacionais empregando-se um alimentador que foi posteriormente empregado para o processo de validação do *software*. Portanto, considerando-se tão apenas desenvolvimentos de cunho teórico, foram reproduzidas condições operativas similares àquelas factíveis de manifestação nas redes elétricas. Os resultados obtidos nos estudos de desempenho evidenciaram a eficiência do modelo de reator saturado desenvolvido. Isto ocorreu diante do registro computacional do enquadramento das tensões aos patamares definidos pela Agência Reguladora. Portanto, além da ratificação do fenômeno da regulação da tensão, os trabalhos evidenciaram, com clareza, que o modelo do compensador a núcleo saturado implementado no ATP se mostra adequado para os propósitos estabelecidos.

**c) Quanto à validação do modelo computacional e do desempenho do compensador de reativos**

Nesta etapa foi avaliado o desempenho do compensador a núcleo saturado utilizando-se de uma rede elétrica simplificada, à qual foram impostas condições adversas de cargas e respectivos efeitos sobre as tensões. Uma vez configurado o caso, através de estudos computacionais e experimentais foram realizados testes operativos com a inserção do compensador de reativos selecionado. Assim agindo foi obtida uma base de dados para fins de uma análise comparativa entre os resultados obtidos diante da presença do reator saturado isoladamente e, posteriormente, em conjunto com o banco de

capacitores. Os resultados obtidos foram bastante favoráveis e encorajadores no sentido de ratificar toda a concepção teórica estabelecida nesta pesquisa, e, por conseguinte, do *software* disponibilizado através da plataforma ATP. Além disso, também foi avaliada a resposta de outros reatores saturados em escala real. Desta feita, devido a inexistência de uma estrutura experimental que permitisse o levantamento das formas de onda das correntes e tensões em campo, apenas o desempenho quanto a interdependência entre as suas potências reativas e tensões terminais foi avaliado. Os resultados obtidos tanto para a operação isolada do reator saturado, quanto para a operação do compensador, se mostraram totalmente condizentes com o esperado, tendo em vista a boa correlação apresentada entre os resultados computacionais e experimentais. Portanto, mais uma vez foi reconhecido que o aplicativo computacional se mostra bastante satisfatório, respeitado o contexto de testes realizados.

**d) Quanto à avaliação computacional do desempenho do compensador de reativos a núcleo saturado para um estudo de caso**

Neste ponto da pesquisa, os estudos desenvolvidos foram dedicados à avaliação de toda a sistemática de trabalho com compensadores a núcleo saturado, empregando-se, para tanto, um sistema elétrico hipotético, todavia, com características físicas e parâmetros típicos de redes elétricas comerciais. Uma vez avaliadas as tensões para os diversos barramentos, diante das cargas supridas, foi então detectado e selecionado aquele que registrou um maior desvio dos valores regulamentados pelo PRODIST para fins das investigações aqui focadas. Neste contexto, numa primeira etapa procedeu-se a determinação das parcelas reativas de cada unidade do compensador, a determinação dos parâmetros elétricos equivalentes e construtivos do

reator saturado, e por fim, a avaliação computacional de desempenho do compensador a núcleo saturado na regulação das tensões aos fins aqui almejados. Os resultados obtidos ratificaram, mais uma vez, a importância dos programas DICOM e PRORE 2.0, para o dimensionamento do compensador, e também, do modelo implementado no programa ATP. Também, os desempenhos alcançados pela instalação do regulador a núcleo saturado em um sistema elétrico típico demonstraram, mais uma vez, a eficiência desta tecnologia no processo de regulação de tensão.

Em linhas gerais, os avanços oferecidos por esta pesquisa, cujos principais aspectos foram ressaltados ao longo do trabalho, se mostram extremamente importantes para o domínio da tecnologia dos compensadores de tensão a reator a núcleo saturado, sobretudo no que se refere ao processo de projeto e determinação dos parâmetros elétricos necessários ao modelo de compensador implementado no programa ATP.

Não obstante a isto, é importante reconhecer que estudos complementares, certamente, ainda se fazem necessários para o preenchimento de lacunas merecedoras de atenção quanto ao pleno domínio do tema em pauta, a exemplo de:

- *Utilização de outras topologias construtivas e de novos materiais magnéticos para a construção de reatores a núcleo saturado;*
- *Avaliação de soluções mitigadoras para as questões transitórias e também para as distorções harmônicas;*
- *Estudos complementares sobre mecanismos para a melhoria do estatismo do compensador em pauta;*
- *Investigações sobre fenômenos transitórios devido a energização e desenergização dos componentes do compensador, com destaque a manifestação da ferroressonância.*

## Referências Bibliográficas

---

- [1] ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST”, Módulo 8, Resolução Normativa Nº 469/2011, 2011.
- [2] ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, “Resolução Nº 505, 26 de novembro de 2001”.
- [3] ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico, “Requisitos Técnicos Mínimos para a Conexão às Instalações de Transmissão”, Módulo 3 – Submódulo 3.6, 18 de julho de 2010.
- [4] ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico, “Proteção de Caráter Sistêmico”, Módulo 11 – Submódulo 11.7, 17 de julho de 2009.
- [5] WEEDY, B. M., CORRY, B. J., “Electric Power Systems” 4<sup>th</sup> ed., John Wiley & Sons, Chichester-WS, United Kingdom, 2004.
- [6] OLIVEIRA, J. C., VASCONCELLOS, A. B., APOLÔNIO, R., KAWAPHARA, M. K., CARVALHO, J. E., RAUPP JR., E., “Compensador Estático de Reativos Controlado a Tiristores: Modelagem e Simulação”, VII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica – CBQEE, Santos-SP, Brasil, 2007.
- [7] GYUGYI, L., “Unified Power-flow Control Concept for Flexible AC Transmission Systems”, IEE Proceedings C: Generation, Transmission and Distribution, vol. 139, Issue 4, pp. 323-331. 1992.
- [8] SANTOS, C. H. R. R., “Influência do STATCOM na Estabilidade de Sistemas Elétricos de Potência”, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Brasil, 2003.

---

## Referências Bibliográficas

---

- [9] ZHENGPING, Xi, PARKHIDEH, B., BHATTACHARYA, S., “Improving Distribution System Performance with Integrated STATCOM and Supercapacitor Energy Storage System”, IEEE Power Electronics Specialists Conference – PESC, pp. 1390-1395, 2008.
- [10] WEINHOLD, M., ZUROWSKI, R., MANGOLD, T., VOSS, L., “Power Conditioning Equipment for Improvement of Power Quality in Distribution Systems”, II Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica – SBQEE, São Lourenço - MG, Brasil, 1997.
- [11] LIMA, R. R., OLIVEIRA, A., OLIVEIRA, J. C., CHAVES, M. L. R., SILVA, P. R. C., BENICHIO, V. M., “Projeto e Implementação de um Novo Regulador de Tensão em Sistemas de Distribuição de Energia de 13,8 kV”, III Congresso International de Distribución Eléctrica, Buenos Aires, Argentina, 2006.
- [12] COOPER Power Systems, “Regulador de Tensão Monofásico COOPER – VR 32”, Manual do fabricante. Disponível *online* em: “[www.cooperindustries.com](http://www.cooperindustries.com)”, acessado em setembro de 2012.
- [13] ITB Equipamentos Elétricos, “Regulador de Tensão Monofásico ITB RAV-2”, Manual do fabricante. Disponível online em: “[www.itb.ind.br](http://www.itb.ind.br)”, acessado em setembro de 2012.
- [14] GALASSI, M., “Projeto e Construção de um Restaurador Dinâmico de Tensão”, Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, 2006.
- [15] JESUS, D. M. F., SAMESIMA, M. I., “Avaliação de Desempenho do Restaurador Dinâmico de Tensão (DVR) na Compensação de Afundamentos e Elevações de Tensão”, XIX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - SNPTEE, Vol. 1, pp. 1-6, Rio de Janeiro - RJ, Brasil, 2007.
- [16] SIDELMO, M. S., “Análise e Implementação de um Restaurador Dinâmico de Tensão”, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, Brasil, 2003.
- [17] DIVAN, D., SCHNEIDER, R., BRUMSICKLE, W., TRUNGAL, D., GRANT, T., “Impact of Voltage Sag Correction in Manufacturing Applications”, PQA 2002, North America, Portland – OR, 2002.

---

## Referências Bibliográficas

---

- [18] Softswitching Technologies, “Dynamic Sag Correctors MiniDySc, ProDySc e MegaDySC”, Manual do fabricante. Disponível *online* em: <http://www.softswitch.com/sst/index.do>, acessado em setembro de 2012.
- [19] PIRES, I. A., “Compensadores Série de Tensão em Onda Quadrada: Aplicação na Mitigação de Afundamentos de Tensão”, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, Brasil, 2011.
- [20] STEVENSON, W. D., “Elements of Power Systems Analysis”, Mc-Graw Hill Book Company, 4th Edition, USA, 1982.
- [21] DUGAN, R. C., Mc GRANAGHAN, M. F., “Electrical Power Systems Quality”, Editora Mc-Graw Hill, USA, 1995.
- [22] BRASIL, D. O. C., “Aplicação de Reatores Saturados em Sistemas de Transmissão”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife - PB, Brasil, 1996.
- [23] DALE, S. H., DUNHAN, C. R., FRIEDLANDER, E., “Square Wave Transformer and Their Use in Static Control of Mercury Arc Rectifiers”, GEC Journal, pp. 229 - 238, England, October, 1952.
- [24] FISHER, F. J., FRIEDLANDER, E., “DC Controlled 100 MVA Reactor”, GEC Journal, pp. 93 - 104, England, April, 1955.
- [25] FRIEDLANDER, E., “Principle and Analysis of a Stabilized Phase Multiplier Type of Magnetic Frequency Convertor”, Electrical Energy, Vol. I, pp. 55 - 66, October, 1956.
- [26] 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.
- [27] 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, pp. 14 - 07, Paris, 1986.
- [28] OLIVEIRA, J. C., “Compensação de Reativos em Sistemas Elétricos”, Gráfica da UFU, Uberlândia, 1986.

---

## Referências Bibliográficas

---

- [29] 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.
- [30] AINSWORTH, J. D., FRIEDLANDER, E., YACAMINI, R., “Application of Saturated Reactor to AC Voltage Stabilization for HVDC Transmission and Other Large Convertors”, IEEE PES Summer Meeting and EHV/UHV Conference, Vancouver, July 1973.
- [31] 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.
- [32] THANAWALA, H. J., YOUNG, D. J., “Saturated Reactors – Recent Applications in Power Systems”, GEC Power Transmission Division, Publication N° 1490 - 5, Reprinted from Energy International, Vol. 7, Number 11, November 1970.
- [33] 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.
- [34] CARVALHO JUNIOR, M. A., “Steady State Representation of Reactive Compensating in HVDC Converter Station”, PhD Thesis, Umist, September 1983.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] BARBOSA JR., J. A. F., “Modelagem e Análise de Desempenho Transitório e Dinâmico de Compensadores Estáticos de Reativos Utilizando Reatores Saturados”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Fevereiro 2009.

---

## Referências Bibliográficas

---

- [38] KUSKO, A., “Poliphase Closed-Core Reactors”, IEEE Transactions (PES), Vol. 84, pp. 57 – 64, January 1965.
- [39] PACHECO, E. J. P., “Systems Voltage Control Using Saturated Iron Cored Reactors”, PhD Thesis, Umist, November 1977.
- [40] GEC SWITCHGEAR LIMITED, “The Control of System Voltage Using AC Saturated Reactors”, GEC Publication no. TD6031t-1068.
- [41] MAGNATA DA FONTE, L. A., “Reatores Saturados: Alguns Aspectos Operacionais e de Projeto”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife - PE, Dezembro 1997.
- [42] LEAL, F. S., “Reatores Saturados com Excitação Paralela”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife - PE, Novembro 2000.
- [43] DALE, S. H., DUNHAN, C. R., FRIEDLANDER, E., “Square Wave Transformer and Their Use in Static Control of Mercury Arc Rectifiers”, GEC Journal, pp 229 - 238, England, October 1952.
- [44] 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.
- [45] 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, Paris, France, September 1980.
- [46] VASCONCELLOS, A. B., OLIVEIRA, J. C., APOLÔNIO, R., “Análise de Desempenho Dinâmico de um Compensador Estático Tipo Reator a Núcleo Saturado”, VI Seminário Brasileiro Sobre Qualidade da Energia Elétrica - SBQEE, 2005, Vol. II, pp.356 - 361, Belém - PA, 2005.
- [47] VASCONCELLOS, A. B., APOLONIO, R., BELCHIOR, F. N. DAMACENO, V. G., VENDRAMINI, J. F., OLIVEIRA, J. C., PEREIRA, L. H. S., BARBOSA JÚNIOR, J. A. F., “Comparative Perfomance Análisis of Treble-Tripler and Twin-Tripler Saturated Core Reactor Compensators”, VII Conferência Internacional de Aplicações Industriais - INDUSCON, Recife - PE, 2006.

---

## Referências Bibliográficas

---

- [48] 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.
- [49] VASCONCELLOS, A. B., OLIVEIRA, J. C., APOLÔNIO, R., BAMBIRRA, M. L., NETO, A. R., “A Strategy for Voltage Regulation in Eolic Systems”, 11<sup>th</sup> International Conference on Harmonics and Quality of Power – ICHQP, Lake Placid, USA, 2004.
- [50] PACHECO, J. M., OLIVEIRA, J. C., VASCONCELLOS, A. B., APOLÔNIO, R., MIRANDA, N. R. O., PEREIRA, E. S., “Projeto e Análise de Desempenho de um Reator Saturado de 570 kVAr e 13,8 kV para Regulação de Tensão”, VII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica – CBQEE, Santos-SP, Brasil, 2007.
- [51] BARBOSA JR., J. A. F., OLIVEIRA, J. C., GONDIM, I. N., SILVA, T. V., SANTILIO, F. P., PACHECO, J. M., VASCONCELLOS, A. B., “Performance Analysis and Computational Model Validation of a Real Scale Saturated Core Reactor”, 11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilization – IEEE EPQU2011, Lisbon, Portugal, 2011.
- [52] MARTIGNONI, A., “Transformadores”, 8<sup>a</sup> Edição, Ed. Globo, São Paulo - SP, Brasil, 1969.
- [53] Alternative Transient Program (ATP), Rule Book, Jul. 1987.